



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105163922 A

(43) 申请公布日 2015. 12. 16

(21) 申请号 201380069753. 1

代理人 齐永红

(22) 申请日 2013. 11. 08

(51) Int. Cl.

(30) 优先权数据

*B29C 45/14*(2006. 01)

61/723, 991 2012. 11. 08 US

*B29C 49/52*(2006. 01)

*B29C 35/08*(2006. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2015. 07. 08

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2013/069349 2013. 11. 08

(87) PCT国际申请的公布数据

W02014/074954 EN 2014. 05. 15

(71) 申请人 DDM 系统有限责任公司

地址 美国佐治亚州

(72) 发明人 苏曼·达斯 袁大军

阿尼路德·卢拉拉贾 保罗·茨里诺

(74) 专利代理机构 北京英特普罗知识产权代理

有限公司 11015

权利要求书1页 说明书84页 附图95页

(54) 发明名称

用于制造三维物体的系统和方法

(57) 摘要

本发明公开了用于制造三维物体的系统和方法。该系统包括一个光学成像系统,所述光学成像系统提供一个光源;一个感光介质,当曝光于来自所述光学成像系统的所述光源的一部分时,所述感光介质适用于改变状态;一个控制系统,用于控制所述光学成像系统的移动,其中所述光学成像系统在所述感光介质上连续地移动。所述方法包括移动一无掩模光学成像系统,该无掩模光学成像系统以一种连续序列提供所述光束;将所述光束呈现在所述感光介质的一部分上;降下所述感光介质所在的一个板;以及应用所述感光介质的一个新层。

1. 一个制造三维物体的系统,所述系统包括:
  - 一个光学成像系统,其提供多个光源;
  - 一个液态感光介质,当曝光于来自所述光学成像系统的光的一部分时,所述感光介质适应以改变状态;
  - 一个控制系统,用于以微米定位精度控制所述光学成像系统的移动,其中所述光学成像系统在感光介质上连续地移动,以防止在所述感光介质中的流相关失调。
2. 根据权利要求 1 的所述系统,所述多个光源的各个光源包括:
  - 一个反射器,其接收所述光的一部分;
  - 一个光学透镜系统,包括接收所述反射光的一部分的一个透镜;
  - 一个空间光调制器,用于接收来自所述光学透镜系统的所述反射光;和
  - 一个投影透镜,用于将从所述空间光调制器接收的所述光聚焦到所述感光介质的一个表面上。
3. 根据权利要求 1 的所述系统,所述光学成像系统包括一个无掩模光系统,用于提供所述多个光源,并且包括一个或多个空间光调制器,所述一个或多个空间光调制器扫描所述介质的全部或一部分。
4. 根据权利要求 1 的所述系统,所述感光介质包括一种光敏聚合物。
5. 根据权利要求 1 的所述系统,所述控制系统接收一个计算机辅助设计图。

## 用于制造三维物体的系统和方法

[0001] 对相关申请的交叉引用

[0002] 本申请,根据《美国法典》第 35 篇第 119(e) 条的规定,要求在 2012 年 11 月 8 日提交的第 61/723,991 号美国临时申请的优先权。本申请也是第 12/435,776 号美国专利申请的部分继续,该第 12/435,776 号申请,根据美国法典第 35 篇第 119(E) 条的规定,要求在 2008 年 5 月 5 日提交的美国临时申请(序列号:61/050,383)的优先权。上述申请的全部内容和实质在此以引用的方式并入。

[0003] 关于受美国联邦资助研究或开发的声明

[0004] 本发明受到由国防高级研究计划局(DARPA)提供的 HR0011-07-1-0034 和 HR0011-08-1-0075 拨款的政府支持。联邦政府对本发明具有一定的权利。

### 背景技术

[0005] 快速建模或者固体免模制造已成为一个越来越重要的工具,并且这一技术自 20 世纪 80 年代其最初应用后已经取得了重大的进步,如第 4,575,330 号美国专利所表现的(该专利通过引用并入本文,似乎已经在下文充分阐述)。在一个公知为立体光刻的实施方案中,快速建模制造使用一缸可固化液体,其中该缸内的某个可动点受到一个指定固化源的刺激。随着该源相对于该缸被移动或该缸相对于该源被移动,正在凝固或固化的所述点被不断地移动。其结果是在建构一个包含在其他液体缸中的固化材料的固体块。在大多数的实际应用中,通常固化的区域被定位在缸的表面或非常接近缸的表面。随着液体被凝固,固体结构逐渐下沉进入到缸中,从而使得未固化液体流到表面上,而该液体将轮到实施相同的方法。通过继续固化这些非常薄的层,固体对象被建成其最终形状。将一层与前一层粘合是所述方法的一个内在特征,这在本领域中是公知的。

[0006] 例如,本领域已知的光刻系统,引导光束到由一个掩薄膜覆盖的一个感光表面上,将一个需要的图案蚀刻在对应于该掩模的空隙区域的基板上。在基于掩模的光刻系统中,生成的所述图案由设置在用于光活化的光路径中的物理掩模来定义。虽然有效,在光刻法中使用物理掩模具有诸多的缺点,包括制造掩模的成本,制造半导体所需的系列掩模的生产所需要的时间,由从一个光源的光与所述掩模的不透明部分发生衍射所造成的衍射效应,在用于多级图案的掩模对准中的登记错误,形成在掩模基板中的色心,掩模中的缺陷,定期清洁的必要,以及由于连续清洁造成的掩模退化。

[0007] 无掩模光刻系统也是本领域中所共知的,并通常使用配合一个数字微镜阵列的一个离轴光源来制造用于基因的含有探针的片状物或在高密度微阵列中实施的其他固相组合化学结构。

[0008] 虽然无掩模光刻系统解决了所述几个与基于掩模的光刻系统相关联的问题,例如失真和图像的均匀性,仍然会出现问题。尤其是在要求快速建模和有限生产数量的情形下,没有实现无掩模系统由规模数量衍生的效率优点。另外,虽然无掩模光刻系统被导向半导体制造,这些现有技术系统和方法显着缺乏对其他适合于无掩模光刻技术应用的参照。

[0009] 一种常用固化介质包括曝光于光时是可聚合的光敏聚合物。光敏聚合物可以液体

或半液体形式被应用到一个基板或物体上,然后曝光于光,如紫外线,以进行聚合所述聚合物,并生成固体涂层或铸件。并且,展现出导向性能的导电性的光敏聚合物是公知的,从而可通过对电路布局图案的所述聚合物进行聚合来创建电路。但是,光敏聚合的常规方法使用物理掩模来限定聚合的区域。这种基于掩模的光敏聚合物方法存在基于掩模的光刻方法的缺点,包括必然需要许多不同的掩模,用于掩模制造的漫长准备时间,无法修改掩模,以及在制造过程中所使用的掩模的退化。

[0010] 可以想像的是,快速建模具有许多的优点。例如,快速建模方法可大幅度地降低产品概念和最终设计之间的时间,以及能够创建复杂形状。对于更传统的模型制造或建模,通过设计团队、制造方、消费者,也许还有其他方分析的一系列图纸的迭代产生获得,直到这被认为是可行的暂定最终设计结果。该被同意的设计随后通过铸造和 / 或加工成型方法产生。如果需要模具,也必须制造模具,而这可能需要相当长和宝贵的时间。然后对成品建模进行测试,以确定它是否符合该部分的设计标准。设计和审查过程往往是乏味的,用于创建所述建模的配备必要的设备费力又费钱。如果该部分是复杂的,那么必须先组装众多的临时组件。然后建模本身由这些单个组件构建。

[0011] 对于快速建模的使用显著减少了在概念和建模完成之间所需的费用和时间。常见的是,该概念呈现在 CAD(计算机辅助设计)中。由于这一方法完全电子化,不需要用于制造的图纸。使用 CAD 系统来产生一个兼容输出数据文件,包含关于所述部分的几何结构的信息。此文件通常被转换成一个“切片”数据文件,包含关于所述部分的横截面在预期层深处的信息。快速建模控制系统随后在可固化树脂表面上依次重新生成各个横截面。所制造的部分可由团队分析或用于各种形状、尺寸和功能测试。由于该方法的快速和低成本,制造和评价几种设计的时间和成本显著小于每个概念加工成型所需,是后者的几分之一。因为快速建模方法通过创建非常薄的层来创建结构,可容易地呈现具有复杂内部的复杂组件,而不需要组装多个单独组件。

[0012] 另一方面,快速建模的一种常规和显著的缺点,并非实施技术的初始成本,而是与各部分生成相关的时间可仍超过所期望的。因为所述部分的生成是以逐点逐层方法发生的,产生一个单一部分所需要的时间可变得过大。减少制造时间仍然是一个期待的目标。虽然上面的描述涉及光固化的方法;该方法以及一般的优点和缺点对于其他快速建模技术是相似的。

## 发明内容

[0013] 本发明的实施方案涉及光学模型制造方法和系统,更具体地,涉及光学模型制造方法和系统,其中通过一个使用多个光束来照射一种光固化性介质的部分的一个连续移动的光学成像源生成一个三维物体。进一步的,本发明的实施方案涉及用于使用空间光调制器(SLMs)的大面积无掩模光敏聚合(LAMP)的系统和方法。

[0014] 例如,本发明的一种方法 / 系统涉及使用至少扫描一种光敏聚合物的表面的一部分的空间光调制器。在扫描所述光敏聚合物的一个表面中,所述空间光调制器投影一个二维图像(例如,来自一个 CAD 文件)到其上面。所述二维图像包括要在所述光敏聚合物(一旦固化)的各层中形成的一个三维物体的横截面。

[0015] 该方法 / 系统涉及所述空间光调制器的连续移动,而不是所谓的“步骤和曝光”或

“步骤和重复”移动。在提供连续移动中,由所述空间光调制器所投影的所述二维图像是一个动态图像。也就是说,并非将一个固定单一图像投影在所述光敏聚合物表面的一部分,随着所述空间光调制器移动到一个新位置,将所述空间光调制器改变到对应于在所述新位置上的期望图像的一个新图像,在所述新位置将所述新图像投影到所述光敏聚合物表面上的所述部分,本发明的实施方案涉及投影一个随着所述空间光调制器扫描所述光敏聚合物的所述表面而连续变化的一个图像。

[0016] 本发明的实施方案还提供可克服传统系统和方法的一些限制的可选特征,如聚合收缩、固化前的液态聚合物移动等的。此外,可实现提高的分辨率和制造速度的结合。至少可在聚合物容器设计、光调制方法和光图案中,找到所述大面积无掩模光敏聚合系统中导致该等特征的改进例子。

[0017] 以上系统和方法不仅限于光敏聚合物。例如,复合材料(例如,那些包含用于所述聚合物的一种填充材料的材料)也可采用。或者,如想要一个陶瓷体,可以在所述大面积无掩模光敏聚合系统和方法中使用一种聚合物-陶瓷基体,随之是除去所述聚合物组分,从而留下了可进行进一步处理的一个陶瓷体。

[0018] 通过阅读下面的说明书并结合附图,本发明的这些和其它的目的、特征和优点将更加清楚。

#### 附图说明

[0019] 图 1 是用于三维物体熔模铸造的一种常规铸造的一个流程图。

[0020] 图 2 是一个常规完全产生熔模铸造对象的一个饼图。

[0021] 图 3A-3B 是根据本发明的一个示例性实施方案的一个大面积无掩模光敏聚合(LAMP)的透视图。

[0022] 图 4 是根据本发明的一个示例性实施方案的一个大面积无掩模光敏聚合系统的另一透视图。

[0023] 图 5 是根据本发明的一个示例性实施方案的一个示例性计算机辅助设计切片图案。

[0024] 图 6-7 是根据本发明的一个示例性实施方案的使用一个无掩模光学成像系统、一个材料构建平台、一个材料重涂系统和一个控制系统,来制造所述三维物体的所述大面积无掩模光敏聚合系统的透视图。

[0025] 图 8 是根据本发明的一个示例性实施方案的用于所述大面积无掩模光敏聚合系统的一个光学成像系统的一个透视图。

[0026] 图 9 是根据本发明的一个示例性实施方案的一个三维计算机辅助设计图纸的多个横截面视图。

[0027] 图 10A 示出了根据本发明的一个示例性实施方案的所述二维计算机辅助设计图纸的多个堆叠横截面视图。

[0028] 图 10B 示出了根据本发明的一个示例性实施方案的图 10A 的所述二维计算机辅助设计图纸的所述堆叠横截面视图的一个三维物体的一个透视图。

[0029] 图 11 示出了根据此处所描述的各方面的具有一个龙门式扫描无掩模光学成像系的一个大面积无掩模光敏聚合机的一个实施方案。

[0030] 图 12 示出了根据此处所描述的各方面的一个扫描无掩模光学成像系统的一个实施方案。

[0031] 图 13 示出了根据此处所描述的各方面的一个扫描无掩模光学成像系统的一个实施方案。

[0032] 图 14 示出了根据此处所描述的各方面的一个材料构建平台 (MBP) 的一个实施方案。

[0033] 图 15 示出了根据此处所描述的各方面的一个材料重涂系统 (MRS) 的一个实施方案。

[0034] 图 16 示出了根据此处所描述的各方面的一个材料重涂系统的另一实施方案。

[0035] 图 17 示出了使用具有一个单边重涂机的一个材料重涂系统在构建精度的损失。

[0036] 图 18 示出了根据此处所描述的各方面的具有一个多叶重涂机的一个材料重涂系统的一个实施方案。

[0037] 图 19 示出了根据此处所描述的各方面的一个隔板印刷式供墨窗格的一个实施方案。

[0038] 图 20 示出了使用一个材料重涂系统的构建精度的损失。

[0039] 图 21 示出了根据此处所描述的各方面的使用符线在部分间空间中构建一个共形晶格的一种方法的一个实施方案。

[0040] 图 22 示出了根据此处所描述的各方面的使用符线在部分间空间中构建一个共形晶格的一种方法的另一个实施方案。

[0041] 图 23 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机的一个实施方案。

[0042] 图 24 示出了根据此处所描述的各方面的用于校正间隙误差的一种方法的一个实施方案。

[0043] 图 25 示出了根据此处所描述的各方面的用于校正间隙误差的一种方法的另一个实施方案。

[0044] 图 26 示出了根据此处所描述的各方面的自动部分布局和脚手架的一种方法的一个实施方案。

[0045] 图 27 示出了根据此处所描述的各方面的识别一个浮岛的一种方法的一个实施方案。

[0046] 图 28 示出了根据此处所描述的各方面的识别一个多功能支架结构的一种方法的一个实施方案。

[0047] 图 29 示出了根据此处所描述的各方面的用于收缩缓解和支架结构进行筛查的一种方法的一个实施方案。

[0048] 图 30 示出了根据此处所描述的各方面的为了就收缩缓解和支架结构进行筛查的一种方法的另一个实施方案。

[0049] 图 31 示出了根据此处所描述的各方面的为了就收缩缓解和支架结构进行筛查的一种方法的另一个实施方案。

[0050] 图 32 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表。

[0051] 图 33 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表。

[0052] 图 34 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表。

[0053] 图 35 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表。

[0054] 图 36 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表。

[0055] 图 37 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表。

[0056] 图 38 示出了根据此处所描述的各方面的实施直接切片的一种方法的一个实施方案。

[0057] 图 39 示出了根据此处所描述的各方面的识别“内部”与“外部”的一种方法的一个实施方案。

[0058] 图 40 是一个由于计算一移动距离的浮点错误造成的具有粗糙边缘的切片图像。

[0059] 图 41 示出了在直接分层文献中许多先前报道工作中使用的测试组件。

[0060] 图 42 示出了一个典型内部冷却高压涡轮叶片的一个 CAD 模型。

[0061] 图 43A 提供了以两个不同 ACIS 分辨率产生的一摞诸多连续切片的每个图像中所观察到空白线数量的一个图表。

[0062] 图 43B 提供了一个时间图表, 计算一个使用 DPI 的一个切片缩放。

[0063] 图 44 示出了所述边界表象 (BRep) 数据结构的各种成分。

[0064] 图 45 示出了根据此处所描述的各方面的一个角表数据结构。

[0065] 图 46 示出了根据此处所描述的各方面的用于识别冗余顶点的一个单元结构的一个示意图。

[0066] 图 47 是根据此处所描述的各方面的用于填充  $V[c]$  的一种方法的一个流程图。

[0067] 图 48 提供了相对于小平面数目的该比例的一个趋势。

[0068] 图 49A 示出了根据此处所描述的各方面的用于在一个任意 Z- 高度识别所述相交小平面的方法。

[0069] 图 49B 示出了根据此处所描述的各方面的用于 STL 文件直接分层的数据结构。

[0070] 图 49C 示出了相对于众多小平面的计算的时间比例。

[0071] 图 50 示出了根据此处所描述的各方面的用于存储这些相交点的一个数据结构。

[0072] 图 51 示出了相对于网格大小的切片时间比例。

[0073] 图 52 示出了空白线错误的一个特别糟糕实例。

[0074] 图 53 示出了根据此处所描述的各方面的使用空白线的纠正多像素宽行的一种方法。

[0075] 图 54 示出了根据此处所描述的各方面的一个贴片的方法。

[0076] 图 55 示出了当两个创建的轮廓在内部区域大小相同时的阶梯效应。

[0077] 图 56 示出了用于一个半球部分的一个尖点量。

[0078] 图 57 示出了根据此处所描述的各方面的用于在对一个样本 CAD 部分切片时计算

量偏离的这些步骤的每个步骤。

- [0079] 图 58 是一个自适应地使用所述量偏离方法切片的一个样本 CAD 部分。
- [0080] 图 59 提供了用于样本部分的层厚度的变化对高度  $z$  的一个图表。
- [0081] 图 60 提供了用于样本部分的所述百分比量偏离对高度的一个图表。
- [0082] 图 61 提供了用于样本部分的百分比总量误差对高度的图表。
- [0083] 图 62 示出了在使用全白构建图像时在朝下表面上造成的楼梯步进。
- [0084] 图 63 示出了根据此处所描述的各方面的用于产生一个灰度图像的一个方法。
- [0085] 图 64 示出了灰度曝光结果。
- [0086] 图 65 示出了具有一个已知恒定方格长度和十个不同贴片的一个样本曝光图像。
- [0087] 图 66 示出了通过曝光图 65 中的所述图像而获得的固化方格。
- [0088] 图 67 示出了所述叶片模具的所述天然取向。
- [0089] 图 68 示出了在原来方向观察到的减少突出物的一个构建方向。
- [0090] 图 69 示出了在原来方向观察到的减少突出物的一个构建方向。
- [0091] 图 70 示出了当所述前缘腔的所述基部的正在构建时所述部分的一个横截面。
- [0092] 图 71 示出了在对应于图 70 中所示的所述浮岛的所述位置的连续层的三维切片。
- [0093] 图 72 示出了在图 67 中所示的采用这种方法在所述样本高压叶片上产生的各种支架件。
- [0094] 图 73 示出了在具有和不具有一个支架结构的一个前缘的所述内壁获得的一个温度分布。
- [0095] 图 74 示出了在内部腔体中的速度流线。
- [0096] 图 75 示出了使用一个具有一个单边重涂机的一个材料重涂系统的构建精度的损失。
- [0097] 图 76 示出了根据此处所描述的各方面的具有一个多叶重涂机的一个材料重涂系统的一个实施方案。
- [0098] 图 77 示出了根据此处所描述的各方面的一个隔板印刷式供墨窗格的一个实施方案。
- [0099] 图 78 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机的一个实施方案。
- [0100] 图 79 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机的一个实施方案。
- [0101] 图 80 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机的一个实施方案。
- [0102] 图 81 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机的一个实施方案。
- [0103] 图 82 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机的一个实施方案。
- [0104] 图 83 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机的一个实施方案。
- [0105] 图 84 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料构建

平台基板和基板底座的一个实施方案。

[0106] 图 85 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台基板和基板底座的一个实施方案。

[0107] 图 86 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台基板和基板底座的一个实施方案。

[0108] 图 87 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料重涂系统的一个实施方案。

[0109] 图 88 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台密封系统和材料重涂系统的一个实施方案。

[0110] 图 89 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台密封系统和材料重涂系统的一个实施方案。

[0111] 图 90 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台密封系统和材料重涂系统的一个实施方案。

[0112] 图 91 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台密封系统和材料重涂系统储料器的一个实施方案。

[0113] 图 92 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料重涂系统储料器和重涂机的一个实施方案。

[0114] 图 93 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料重涂系统储料器和重涂机的一个实施方案。

[0115] 图 94 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台密封、材料重涂系统储料器和重涂机的一个实施方案。

[0116] 图 95 (A)、95 (B) 和 95 (C) 示出了根据此处所描述的各方面的用于使用同时地在一个树脂的表面上移动的一系列的成像头的一个实施方案。

[0117] 图 96 示出了根据此处所描述的各方面的用于采用一个二维阵列的成像头来同时对所述树脂的所述表面形成图案的一个实施方案。

[0118] 图 97 提供了使用在大面积无掩模光敏聚合的一个实施方案中的一个光源的所述发射光谱的一个图表。

[0119] 图 98 提供了来自于以不同筛查分辨率的一个筛查灰度图像的所述灰度系数的一个比较。

[0120] 图 99 示出了用于来自所述空间光调制器的 (a) 1 像素、(b) 2 像素、(c) 3 像素、(d) 4 像素、(e) 5 像素和 (f) 10 像素线条投影的强度分布和轮廓。

[0121] 图 100 示出了来自一个全白投影的一个光强度分布。

[0122] 图 101 提供了当所述灰度从 30% 到 90% 白变化时以一个固定曝光时间和筛查分辨率的固化深度测量的一个图表。

[0123] 图 102 示出了一个带有中性密度滤光片的以确定在不同光强度的所述固化特征的用于固化深度测量的一个图表。

[0124] 图 103 提供了曝光于不同光线强度下的一个 PCMS 的一个工作曲线图表。

[0125] 图 104 示出了关于光强度的所述临界能量和树脂灵敏度的所述相关性的一个总结。

- [0126] 图 105 提供了用于各种灰度值和筛查分辨率的工作曲线的一个图表。
- [0127] 图 106 提供了用于各种灰度值和筛查分辨率的所述临界能量和树脂灵敏度的一个摘要。
- [0128] 图 107 提供了总结了均匀灰度曝光导致的光强度对于固化特征的所述影响的一个图表。
- [0129] 图 108 示出了可用于提取三维信息的一个棋盘形图案。
- [0130] 图 109 示出了以 600 毫秒具有各种方格长度的棋盘形曝光的图像,以示出一个均匀过渡。
- [0131] 图 110 提供了示出了由一个棋盘形曝光图案导致的一个 PCMS 的均匀过渡的一个图表。
- [0132] 图 111 示出了在 170  $\mu\text{m}$  方格长度具有各种曝光时间的一个棋盘形曝光的图像,以示出所述均匀过渡的所述时间相关性。
- [0133] 图 112 提供了用于选择筛查分辨率的曝光时间工作曲线的一个图表。
- [0134] 图 113 提供了总结在均匀过渡中所述临界曝光时间和树脂灵敏度在筛查分辨率的所述趋势的一个图表。
- [0135] 图 114 示出了材料系统分辨率的一个图表,其中所述投影图案具有比所述材料系统的所述“像素”细的特征,其可通过所述散射长度来定义。
- [0136] 图 115 示出了用于选择棋盘筛查分辨率的由 PCMS 受到的模拟光强度分布。
- [0137] 图 116 提供了将实验固化深度测量与所述散射长度像素模型比较以预测灰度和均匀过渡曝光的所述光强度的图表。
- [0138] 图 117 提供了显示了在 100%选择灰度强度的用于所述 PCMS 的转化度和聚合率的一个图表。
- [0139] 图 118 提供了具有关于转化度的筛查分辨率的所述影响的特征的一个图表。
- [0140] 图 119 示出了在灰度支架结构的所述开发中的迭代步骤。
- [0141] 图 120 示出了使用带有各种灰度值的灰度支架结构来制造不支持几何结构的一个试验的所述结果。
- [0142] 图 121 示出了用于一个困难组件的选择性蚀刻的一个测试的图像。
- [0143] 图 122 示出了使用各种灰度值的一个测试组件的制造图像。
- [0144] 图 123 示出了来自透印调节交替 GSS 结果的图像。
- [0145] 图 124 显示了一个带有“裂隙”的一个叶片模具的立体图像。
- [0146] 图 125 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的所述收缩机制的一个图表。
- [0147] 图 126 示出了在一个单层曝光中由 UV 照射所诱导的一个曲率图。
- [0148] 图 127 提供了用于研究减少大面积无掩模光敏聚合组件中缺陷的方法的一个中空圆柱体设计的示意图。
- [0149] 图 128 示出了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的使用全白曝光的一个测试圆柱体的制造的结果。
- [0150] 图 129 示出了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的使用全白曝光的一个测试圆柱体在 BBO 和烧结后的制造的结果。

[0151] 图 130 示出了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的使用在选择方格长度的棋盘曝光来制造的圆柱体的胚体模。

[0152] 图 131 示出了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案在 BBO 和烧结后使用具有方格长度的一个错列棋盘曝光制造的所述测试圆柱体的 BBO 和烧结的影响。

[0153] 图 132 示出了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的示出垂直裂缝的测试圆柱体。

### 具体实施方式

[0154] 为了便于对于本发明的实施方案、原理和特征的理解,此处下文将对其进行说明,引用说明性实施方案中的实施。特别是,它们在一个连续移动的快速建模系统和方法的上下文中描述。

[0155] 但是本发明的实施方案并不限于使用在所描述的系统中。相反,本发明实施方案可在想要或需要一个三维建模对象(例如一个铸件)时使用。因此,在此处下文中被描述为一个连续移动的快速建模系统和方法的所述系统还可作为一种系统用于许多应用和许多尺寸物体。

[0156] 下文描述组成各种实施方案的组件旨在说明性的而不是限制性的。起到与本文中所述材料相同或类似功能的许多合适组件,旨在被包含在本发明实施方案的范围之内。

[0157] 图 1 示出的是用于三维物体的熔模铸造的一个常规铸造流程图。例如,在图 1 中示出的所述流程图可被利用来创建涡轮叶片;具有极其复杂的内部冷却通道的涡轮叶片经常通过熔模铸造生产。所述外部叶片形状由注射模塑蜡图案来限定,这些图案在脱壳后被除去或“丢失”。所述叶片的所述内部通道是由注射模塑陶瓷芯限定,这些注射模塑陶瓷芯在铸造后被除去或“丢失”。所述芯和蜡制模操作需要复杂的装备准备,从而导致过渡的初始和维护成本、非常缓慢的制造周期以及低的铸造产出。

[0158] 图 1 的方法 5 开始于所述芯、图案、模具制造必须的所有工具 10,已经用于铸造这些物品的给定装置,对于每个物品通常包括超过一千件工具。下一步骤涉及通过注射制模来制造陶瓷芯 12。熔化的蜡也可被注模 14 以限定用于所述物体的形状的所述图案。几个这样的蜡图案随后被集合 16 成一个蜡图案集合或树。所述图案集合然后再经过多轮浆涂敷 18 和粉刷 20,以形成所述完整模具集合。所述模具集合然后被放置在一个高压釜中进行脱蜡 22。其结果是一个中空陶瓷壳模具,在其中倒入熔融金属以形成所述铸件 24。一经固化,所述陶瓷模具被剖开,各个金属铸件被与其分离。在运输 34 前,所述铸件接下来是最后精细加工 26、28、30 和检查 32。

[0159] 作为本发明的所述实施方案的结果,传统的铸造步骤 10、12、14、16、18、20、22 已过时,这导致三维物品建模消除了 1000 多件工具和 5 个主要方法步骤。

[0160] 如前所述,传统的快速建模存在重大障碍。例如,尽管当前熔模铸造实践的成熟性,特别是在航空航天工业,在这个用于喷气发动机的冷却单晶超耐热镍合金涡轮叶片的所述可承受的、高产量生产中存在一个重大问题。虽然在设计表面中做了许多方面改进,目前没有已知的就降低涡轮叶片制造成本的显著改进。在涡轮叶片设计中的改进,大大超过了在熔模铸造能力中的相称改进。

[0161] 例如在燃气涡轮发动机中,公认所述涡轮发动机可达到更高的性能,如通过在更

高温下操作达到较大的功率密度和较低的特定燃料消耗量 (SFC)。涡轮叶片位于燃气涡轮发动机的核心,在最高温度下(甚至超过其熔点)运行。由于涡轮叶片受到非常高的热量,在确定涡轮叶片的所述设计、材料和涂层的改进一直进行持续努力,以实现更高的耐高温能力,从而提高性能—通常是基于牺牲可购性。在过去的四十年里,材料已经从锻造合金改进到第四代的单晶超耐热合金;设计已经从非制冷固体叶片改进到具有高度对流效应和高度薄膜效应的冲击冷却叶片;而涂层已经发展成对环境和热保护的叶片。虽然已开发相称的制造方法,以能够生产更复杂的合金、设计和涂层,对于降低这些制造方法的成本方面,很少有进展,特别是熔模铸造,或快速建模。

[0162] 熔模铸造一个物品的成本,例如,一个涡轮叶片,费用由材料使用、处理和最后精加工成本确定,但最终“卖”价是由铸造出品率(不良质量成本)驱动。为了大幅降低制造物品的售价,可在铸造出品率中实施本发明实施方案的改进,其次通过在也影响铸造出品率的处理中的减少。如图 2 所示,对于一个最终出品的熔模铸造物品,通常成本的三分之一是由制造该“浪费”整体核/壳模具(图 1 中步骤 10-22)构成;所述成本的三分之一是金属浇注;成本的三分之一是最后精加工、测量和检查成品金属铸造品。然而,当铸件出品率低时,制造核/壳模具的成本占整体成本的主导地位,有时多达一个熔模铸造的成本的一半。总之,对于一个出品的物品铸造品,成本被均匀地分配在制造所述模具、铸造和最后精加工,如图 2 所示。

[0163] 制造所述“浪费”整体核/壳的成本是一个熔模铸造物品成本的很大一部分,因为低出品率原因的大约 60-90% 发生在制造和处理核 12、注蜡 14 和脱蜡 22 中;而相对较少的剩余部分通常是由金属浇注和最后精加工造成的,步骤 24、26、28、30、32 和 34。原因通常是由于处理和脱蜡引起的变化和损坏,这些发生在核制造,围绕核的注蜡,以及随后的在脱蜡中对于所述核的高应力。核断裂和破损,手工最后精加工破损,注蜡引起的核断裂、破损和偏芯,以及在脱蜡中导致的偏芯和壳缺陷,通常导致下游产出率的问题,如不吻合、浇铸不满、再结晶晶粒、表面缺陷、夹杂等铸造后检测到的缺陷。不幸的是,铸造低产率的早期原因没有被发现,直到金属已经铸造,壳和芯已被除去,所述金属组件被检测。尽管做了一些增加生产率方面的改进,如半自动化最后精加工和处理,并未显著地降低了熔模铸造涡轮叶片的成本。通过直接数字化制造所述熔模铸造模具消除所述“浪费”方法和伴随的工具配置和处理,可显著提高产量、降低成本和交货时间。

[0164] 本发明的实施方案涉及开发用于三维物品(例如叶片)的所述直接数字化制造(DDM)的一种颠覆性制造技术的系统和方法。本发明的实施方案是基于光固化材料(如,仅仅光敏聚合物,包括一种光敏聚合物、填充陶瓷-或陶瓷前体物的光敏聚合物、金属等复合材料)的大面积无掩模光敏聚合(LAMP)。

[0165] 如上所述,参照图 1,在一些实施方案中可使用大面积无掩模光敏聚合,以生产用于步骤 24(即所述铸造步骤)的整体陶瓷芯模具。因此,使用大面积无掩模光敏聚合的物品的直接数字化制造将取代并消除步骤 10-22,相当于仅仅用一个步骤消除对应直接数字模具生产的 1,000 多件工具和五大方法。相应地,大面积无掩模光敏聚合会从根本上消除至少大约 95% 或更多的设备准备和设备准备成本,至少约 20-30% 的整体部分成本,以及至少约 60-90% 导致低铸造产量的所述原因。大面积无掩模光敏聚合可在原处铸造更复杂的特征,诸如薄膜冷却孔,这些在其他情况下通过常规的熔模铸造方法是难以或实际上不

可浇铸的,从而进一步提高铸造产量,并显著地改进了下游加工产量和成本。

[0166] 本发明的示例性实施方案涉及用于制造一个三维物体的一种系统和一种方法。

[0167] 在一个示范性实施方案中,用于制造一个三维物体的所述系统包括用于提供一个光源的一个光学成像系统;适用于改变状态的一个感光介质;以及用于在感光介质上连续地移动所述光学成像系统的一个控制系统。所述光学成像系统可使用一个空间光调制器(SLM)来扫描装在一个容器内的所述介质的所述表面的一部分。在一个示范性实施方案中,所述介质是一种光敏聚合物。随着所述光学成像系统扫描所述介质,当所述光源照射所述介质的所述表面的一部分时,所述介质的所述特征变化,例如,从一种液体或含水状态转变到所述固态。

[0168] 在一个示范性实施方案中,所述光学成像系统或辐射系统包括一个光源,一个反射器系统,一个光学透镜系统,一个镜子,包括一个数字微镜装置(DMD)的空间光调制器,和一个投影透镜。在操作中,所述光源可照亮一个紫外线光源,例如,在所述紫外光谱中具有一个特定的预期波长。本发明的各种实施方案可包括光源包括一种紫外线、紫色光、蓝色光、绿光、光化光和类似物的任何一种。从所述光源发射的所述光可被引导至所述反射器系统的一部分,并因此从所述反射器系统反射,其可包括一个凹形反射器。所述反射器系统的所述反射器在所述光到达一个镜子前,将所述光导向通过所述光学透镜系统的一个透镜。所述镜子然后将所述光朝着所述数字微镜装置反射。所述数字微镜装置是一个微小电子机械装置,包括多个微小镜面表面,每个所述微小镜面表面可独立地从第一位置转到第二位置。所述镜子被组成一个半导体芯片的所述表面,并通过将一个适当电压施加到在每个镜子下构建的所述电路,可令所述镜子相对于垂直于所述半导体芯片的一个平面倾斜到一侧或另一侧。相对于参照的一些固定框架,在一个方向上转动使所述镜子反射光,而在一个相反方向转动将导致所述光从参照的所述框架偏转。来自所述数字微镜装置的所述光随后被导向一个投影透镜。然后,所述光被投影到在所述容器中的所述介质的所述表面上。其它类型的空间光调制器,如液晶显示器、光栅光阀等,也可实施。

[0169] 例如,一种方法/系统涉及使用至少扫描一个光敏聚合物的所述表面的一部分的空间光调制器。在扫描所述光敏聚合物的一个表面中,所述空间光调制器投影一个二维图像(例如,来自一个CAD文件)到其上面。所述二维图像包括要在所述光敏聚合物的所述各层内形成的一个三维物体(一旦固化)的一个横截面。

[0170] 所述方法/系统涉及所述空间光调制器的连续移动,而不是所谓的“步骤和曝光”或“步骤和重复”移动。在提供连续移动中,由所述空间光调制器所投影的所述二维图像是一个动态图像。也就是说,不是将一个固定的单一图像投影在所述光敏聚合物表面的一部分,随之是所述空间光调制器移动到一个新位置,将所述空间光调制器改变到对应于在所述新位置上的所述期望图像的一个新图像,并且在所述新位置将所述新图像投影到所述光敏聚合物表面上的所述部分,本发明的实施方案涉及投影一个随着所述空间光调制器扫描所述光敏聚合物表面而连续变化的一个图像。

[0171] 如上面间接提到的,所述系统和方法不限于仅仅使用光敏聚合物作为所述感光介质。例如,复合材料(例如,那些包含用于一种聚合物的填充材料,或那些将所述光敏聚合物与另一种聚合物结合的材料)也可采用。例如,如想要一个陶瓷体,那么一种聚合物-陶瓷基体或者一种聚合物-陶瓷前体物可在所述大面积无掩模光敏聚合系统和方法中

使用,随之是除去聚合物组分,从而留下了可进行进一步处理的陶瓷生坯。

[0172] 将一种感光介质用一个聚焦光栅扫描激光束曝光的公知方法被用在常规立体光刻系统中,以及在微电子制造系统中,用于掩模写入、建模、芯片定制和缺陷修复。这样的系统将所有像素一次曝光在所述基板上。最广泛使用的直接写入系统使用一种紫外 (UV) 激光光源。所述激光光源被聚焦到所述期望大小点上,位于在要交联的所述聚合物的所述表面上,或立体光刻中的要光形成的所述陶瓷悬浮物,或在制版印刷业中具有一个涂有感光材料的一个基板上,或在微电子制造中涂覆有光刻胶的一个基板上。所述聚焦点可随着所述光束光栅扫过基板被调制。在原理上,这些是无掩模系统。因为通过这样的工具转移图案信息是以缓慢的逐位串行模式进行,通常基板曝光时间可从每平方英尺几分钟至数小时。一些光栅书写工具使用多个光栅扫描光束以克服所述低通量问题,但只是部分地实现了目标。其它光栅书写工具概念在过去几十年中已被开发,但由于其低通量,所有这些系统只适用于小容量或一类一个的应用中,如建模或掩模制造,并且对于高容量(甚至中等容量)中的成本效益生产没有吸引力。

[0173] 在一个示范性实施方案中,所述空间光调制器是具有大约一百万微像素的一个二维阵列,其中每一个微像素可被单独接通或断开。在所述接通位置,入射在所述像素上的光照被导向一个高分辨率投影透镜,并在所述感光介质上成像。在所述断开位置,入射到所述像素上的所述光照被从所述投影透镜的所述入口数值孔径 (NA) 偏转,不被允许到达所述基板。所述空间光调制器由所述控制系统控制,该控制系统可包括一个计算机。所述计算机访问包含在一个完整帧(例如,一个位图帧)中的所有像素的所述接通/断开状态的 CAD 文件。

[0174] 计算机到常规板 (CtCP) 光刻技术可将空间光调制器用作可编程的大规模并行写头,如在图 3 中所示。在一个示范性实施方案中,所述计算机到常规板系统可由配备有一个单个基于所述数字微镜装置的扫描头的贝斯印的 UV 系列 57F 机(在 21 世纪初这商业化)来制造。这项技术的成功带来了具有协同工作的两个基于数字微镜装置的扫描头的 700 系列 UV 制版机,以实现方法通量,这要比单一激光束写技术要高很多个量级。

[0175] 图 3A 和 3B 示出了根据本发明的一个示例性实施方案的提供一个光源给一给定表面的一光学成像系统的一个透视图。用于制造一个三维物体的所述大面积无掩模光敏聚合系统 100 包括所述光学成像系统 200。所述光学成像系统 200 或辐射系统包括一个光源 205,一个反射器系统 210,一个光学透镜系统 215,一个镜子 220,至少一个空间光调制器 225,例如,一个数字微镜装置,以及一个投影透镜 230。

[0176] 所述光源 205 可照明,从而提供了一个光。本发明的各种实施方案可包括光源包括紫外线、紫色光、蓝色光、绿光、光化光和类似物的光的任何一种。在一个示范性实施方案中,所述光源具有在所述紫外光谱中的一个特定的预期波长。本发明的实施方案可在本文中描述为一个紫外光源,但本发明的实施方案并不限于这样的光源,可实施其他光源(包括实施方案公开的例子)。

[0177] 从所述光源 205 发射的所述光可被投影在所述反射器系统 210 的一部分上,并且从所述反射器系统 210 反射,其可包括一个凹面形反射器 211。所述反射器系统 210 的所述反射器 211,在所述光到达所述镜子 220 之前,将所述光导向通过所述光学透镜系统 215 的一个透镜 216。所述镜子 220 随后将所述光反射至所述数字微镜装置 225。来自所述数字

显微镜装置 225 的所述光随后被导向所述投影透镜 230。来自所述投影透镜 230 的所述光然后被投影到所述感光介质的所述表面 300 上。

[0178] 在一个示范性实施方案中,所述贝斯印设备可结合所述光学成像系统。在这样一个实施方案中,贝斯印的大规模并行扫描装置可包括一个单一基于数字显微镜装置的空间光调制器。如果需要和 / 或必要的话,所述贝斯印设备可被扩展到并行工作的多个数字显微镜装置。

[0179] 图 4 示出了所述光学成像系统 200 的一个示范性实施方案中的一个透视图,该光学成像系统 200 发射一个光源到所述感光介质的一个给定表面 300 上。在本质上,图 4 示出了一个基于空间光调制器的计算机到常规板扫描无掩模成像系统的一个示意图。

[0180] 在一个示范性实施方案中,所述 UV 光源 205 可是一个水银蒸气灯、氙灯、紫激光二极管、二极管泵浦固体激光器、三倍频 Nd :YAG 激光器、XeF 受激准分子激光器或类似物。所述 UV 光源 205 可照射一个空间光调制器或一个空间光调制器阵列,例如,1 乘 2,使得从所述空间光调制器阵列的所述接通像素反射的所述光束被耦合进入到所述投影透镜,而从所述断开像素的所述光束被引导离开所述透镜。所述空间光调制器的所述元件,例如,一个数字显微镜装置 225,微不足道的尺寸大约是 15 平方微米 ( $\mu\text{m}$ ),是通过来自所述计算机的所述 CAD 数据来单独可控的,从而实现对于激光照射的大量位点的快速可编程选择。所述数字显微镜装置 225 可通过其双稳态镜配置来调节所述照明,其在所述接通状态中,将反射的照明导向一个投影透镜,并且在所述断开状态中,将所述照明导离所述透镜。

[0181] 所述整个光学成像系统 200 可被安装在具有移动跨越几百毫米的大面积的一个 XY 扫描台上。随着所述光学成像系统 200 在所述介质上(例如,所述基板 300)的不同区域扫描,带有所述适当放大或缩小的所述投影透镜 230 将所述空间光调制器阵列的所述接通像素图像直接成像到所述基板 300 上。所述投影透镜 230 减少比可在大约 1 和大约 50 之间,这可导致在大约 15 微米和大约 0.3 微米之间的最小特征尺寸。在所述阵列中的每个像素被数字控制为接通或断开。对应于一个输入位图图像(例如,BMP、TIFF 等文件)的一个期望图案可由所述空间光调制器,通过加载带有配置每个像素的位图数据的所述阵列来生成。当需要一个不同的图案时,可加载一个不同位图数据集。实际上,所述空间光调制器可以是一个快速可编程结构光图案发生器,其可再现高保真的具有跨越大面积基板的一个全部位图图像。

[0182] 通过激光直接写入技术将空间光调制器与串行曝光进行比较,空间光调制器通过在一个单一镜头曝光一个全部图像字段实现大规模并行处理。集成到商业化空间光调制器的所述数字信号处理电子可支持一个高帧率(几 kHz),使所述曝光图像数据得以被连续刷新,从而基板(感光介质)的大面积通过以高速扫描可被连续地滚动并动态地曝光。

[0183] 图 5 示出了根据本发明一个示例性实施方案的一个涡轮叶片模具的示例性计算机辅助设计切片图案。换句话说,用于在将多叶片模具的 CAD 切片图案投影到一个大面积的一个无掩模成像系统的所述无缝扫描配置被示出在图 5 中。

[0184] 如所描述的,所述光学成像系统 200 可被安装在一个 XY 台上,并且在所述空间光调制器发送一个帧序列时被扫描。每一帧,例如,见附图 5 中的示范性帧,代表一个完整图案的一部分,模仿与所述基板同步扫描的一个掩模。所述空间光调制器是由一个脉冲 UV 光源 205 照亮,而所述脉冲被同步到配置所述空间光调制器的所述数据流。随着所述光学成

像系统 200 在所述基板 300 上扫描,被发送到所述空间光调制器的所述数据是连续和同步地更新,一行一行地和一帧一帧地,在其扫描移动期间将所述整个图案信息传递给所述基板 300。所述空间光调制器如此操作,使得整个阵列就每个脉冲被重新配置,以正确地在所述基板上形成所述正确图像。在所述基板 200 上的所述期望图像可被数字化,并以一个如同在光栅扫描-书写系统中所使用的类似方式的一个数据流被送入到所述空间光调制器。所述基于空间光调制器成像系统和传统光栅扫描-写入方法之间的区别在于:使用所述空间光调制器的大规模并行处理能力来提高多个数量级的数据通量。

[0185] 示范性实施方案,将通过使用光固化性树脂的固体免模制造 (SFF) 的复杂三维物体的分层制造,与来自印刷业的直接数字计算机到板 (CTP) 光刻技术的所述细微特征分辨率和高通量进行整合。这些技术,最近发展到急剧增加通量,通过使用空间光调制器直接将来自于用作制造印刷大师的计算机处理位图图像用于大面积感光板来形成图案。这种技术集成实现了目前固体免模制造方法在部分构建速度、大小和功能定义方面的颠覆性突破。具体实施方案可提供快速制造具有宏观尺度外部尺寸(约几厘米)和微观尺度内部特征(约微米到约几十微米)的部分或物体的能力。此外,示范性实施方案可很好地适合于大批量生产用于从数字信息直接铸造涡轮叶片的最先进整体陶瓷芯模。

[0186] 重新参照附图 4,它示出了根据本发明的一个示例性实施方案的用于制造三维物体的一个系统和方法的一个透视图。也就是,一个大面积无掩模光敏聚合系统 100 示出在附图 4 中,并,在一个示例性实施方案叶片模具结构中,示出了在一个大面积上的多个物体的逐层同时制造。

[0187] 在操作中,来自所述光学成像系统 200 的所述紫外线光源 205 的光通过光学器件进行调制和传送。所述紫外线光源 205 通过透射和反射光学器件调制并传送送到一个空间光调制器 225 阵列。

[0188] 所述空间光调制器阵列可接收来自所述控制系统 400 的 CAD 数据切片位图图像的一个实时视频流。所述控制系统 400 的一个过程控制计算机 405 可转动在阵列接通或断开中的所述对应像素。如所描述的,来自所述接通像素的所述光可被向下反射并传送到所述投影透镜系统 230。所述投影透镜 230 可将对应于所述接通像素的高度集中的图像以若干千赫 (kHz) 的率输送到所述材料构建平台 500 中的一个感光介质的所述表面 300 上。所述光学成像系统 200,包括所述光源 205、光学器件 215、空间光调制器阵列 225 以及投影透镜 230,可沿所述 X 和 Y 轴以高速被扫描,以连续地曝光所述树脂 300 的新区域,同步于在所述空间光调制器阵列上被不断刷新的图像。当所述树脂 300 的所述全部表面区域已经被扫描和曝光,材料构建平台 500 的所述表面可向下沿所述负 Z 轴移动一个切片层厚度,并且光可固化材料的一个新层可通过一个材料重涂系统 600 扫过。

[0189] 所述材料重涂系统 600- 其为了说明的目的作为一个线卷绕下拉棒示出- 以高速扫过所述感光介质的厚度均匀的层,跨越所述材料构建平台 500 的内部,而不会干扰前述之前构建层。一旦已经形成所述感光介质的一个新层,聚焦和对准光学器件可确保所述介质的所述表面是位于所述投影透镜的所述焦平面中,如果有必要则在 Z 方向进行微调。一经该步骤完成后,所述大面积无掩模光敏聚合方法重复构建所述下一层的循环,提供新树脂,直到所述全部构建完成。

[0190] 如附图 4 和 6-7 所示,用于制造所述三维物体的该系统和方法包括一个无掩模

光学成像系统 200, 一个用于保持所述介质的容器 500, 材料重涂系统 600 和所述控制系统 400。在一个示范性实施方案中, 所述大面积无掩模光敏聚合系统 100 可包括: (1) 用于将所述图案曝光到一感光介质的一个无掩模光学成像系统 (MOIS); (2) 所述材料构建平台 (MBP), 用于一个三维物体的一层一层 UV 固化和自由建模制造; (3) 所述材料重涂系统 (MRS), 用于迅速将约 25-100  $\mu\text{m}$  均匀厚度层的所述感光介质涂覆到所述材料构建平台; 和 (4) 所述控制系统, 包括带有所述无掩模光学成像系统、所述材料构建平台, 和材料重涂系统的硬件和软件接口, 以及 3-D CAD 数据位图切片, 以促成一个完全自动化和同步的大面积无掩模光敏聚合系统。

[0191] 当所述光学成像系统是一个无掩模光学成像系统或无掩模光学成像系统 200, 无掩模光学成像系统 200 可包括所述 UV 光源、光束均匀化光学器件、镜子、聚光光学器件、照明光学器件、一个空间光调制器阵列以及所述投影透镜系统。此外, 所述无掩模光学成像系统 200 可包括一个 UV 光源、传输和冷凝器光学器件、空间光调制器 (空间光调制器) (例如, 所述数字微镜装置) 阵列、投影透镜系统, 和高精度 XY 扫描台。无掩模光学成像系统 200 可利用具有远超过一百万调制器元件的所述空间光调制器阵列进行扫描曝光。该无掩模光学成像系统 200 利用最先进的空间光调制器 225, 如所述数字微镜装置芯片 (如来自德州仪器), 具有  $1024 \times 768$  像素并带有一个大约 10kHz 的帧率。此外, 无掩模光学成像系统 200 利用广泛的软件算法来协调和同步所述空间光调制器数据帧和在所述材料构建平台上所述扫描光学成像系统的所述位置信息。

[0192] 无掩模光学成像系统 200 可被安装在一个悬挂龙门式精度 XY 移动台上, 其具有为实现一个至少大约 15  $\mu\text{m}$  分辨率 (具有大约 +1.5  $\mu\text{m}$  的误差) 的最小平面内特征分辨率的亚微米位置分辨率。所述 XY 移动平台可高速扫描所述全部材料构建平台 500 (例如, 大约几百毫米/秒), 以曝光具有所述感光介质的一新未曝光层的所述材料构建平台 500 的所述顶表面的不同区域。

[0193] 在一个示范性实施方案中, 所述材料构建平台 500 可包括一个容器 505, 其作为所述构建容积 510。所述材料构建平台 500 可包括一个构建基板, 其被安装在用于以层构建一个物体的一个高精度 Z- 平移台, 例如, 使用所述感光介质的 25 微米 (及以上) 层厚度。当所述三维物体的所述特征的所述尺寸如此要求时, 可创建所述感光介质的较薄层。类似地, 当所述三维物体的一个特征的所述尺寸是较大时, 也可使用所述感光介质的更厚层。在一个示范性实施方案中, 所述整个构建容积 510 的所述总体尺寸可是大约 24 英寸 (X) 乘以 24 英寸 (Y) 乘以 16 英寸 (Z) ( $24 \times 24 \times 16$ )。由一种高精度加工板 516 制成的一个构建表面 515 可位于所述构建容积 510 内 (即, 在所述材料构建平台内), 并且可被安装在用于在所述 Z 方向上移动的一个精密线性移动台上。在一个部分的所述制造期间, 所述构建表面 515 可被增量向下移动, 距离等于与所述部分所正在构建的所述层厚度。该控制系统 400 可控制这种向下移动。

[0194] 在一个示范性实施方案中, 所述材料构建平台 500 可使用一个精密线性定位系统构建, 该精密线性定位系统具有亚微米分辨率, 用于实现大约为 +25  $\mu\text{m}$  的一个最小构建层厚度 (误差大约为  $\pm 2.5 \mu\text{m}$ )。当所述材料构建平台 500 的所述全部表面区域已经被所述无掩模光学成像系统 200 扫描, 并且所述曝光已经完成时, 所述构建表面 515 可经由其向下移动板 516 向下移动, 并且所述材料重涂系统 600 可应用所述光固化陶瓷材料的一个层新。

[0195] 所述材料重涂系统 600 可包括一个涂敷装置 605,其可是但不限于:一个线缠绕迈耶下拉棒、一个逗号棒或一个刀刃或一个浆液分配系统。所述材料重涂系统 600 可并入可施加薄至约 2.5 微米涂层(具有 0.25 微米变化)的一个涂敷装置。所述材料重涂系统 600 可被设计成依次所述沉积感光介质的所述层。在一个部分构建中,一经完成了一个层曝光后,该材料重涂系统 600 可在计算机 405 控制下快速地扫过所述介质,横跨所述构建区域。所述材料重涂系统 600 可实施来自所述网络涂敷行业的原理,当各种微粒加载制剂的极薄和均匀的涂层(几微米的量级上)被沉积在固定的、平的或者柔性基板上。

[0196] 在一个示范性实施方案中,所述感光介质可包括在一个可光敏聚合基质中的耐火陶瓷颗粒的一浓缩分散体。所述陶瓷颗粒可,在烧成后,产生一个高品质陶瓷物件。在一个示范性实施方案中,所述可光敏聚合基质可是樟脑与一种丙烯酸类单体的一种混合物,如此配制以便它在室温下是固体,但在温暖(高于约 60°C)时是液体。茨由于其便利熔点,可被选择,并且由于固体茨具有一个高蒸气压,从而易于通过升华除去。温暖的液化树脂可提供给所述重涂系统,并且作为一种薄液体层所被应用到所述材料构建平台上。它可迅速冻结,提供一个平滑固体表面。曝光于所述紫外线,可交联所述单体,使该曝光区域可输注。在构建所有所述层后,对构建材料的所述块加热约 60°C 以上可融化掉所述未曝光材料,其作为一种液体排出。在排出后,通过在室温或略高于室温升华,将所述固体茨 c 从所述生坯中除去。接下来,在升华后,所述大面积无掩模光敏聚合制造模具可是一个含有足够聚丙烯用于高生坯强度的干燥体,但没有在烧制前特殊粘合剂-燃尽所需要的那么多。

[0197] 所述固体构建材料还可提供更清晰固化轮廓,并且可提高分辨率。一固体构建材料可不需要与先前曝光层的流相关干扰的相关流出的液体桶。因此,重涂可进行得更快,具有更薄的层,因为来自所述重涂装置的所述更大剪切力可不破坏底层固体层。

[0198] 此外,消除了在一个桶中的液流使所述构建平台可被快速地在所述 X-Y 方向转换。由此,所述曝光和光学系统设计的所述机械结构被大大简化,从而提高精确度和可重复性。

[0199] 所述固体制造材料(所述支架结构在内)可不需要。支架结构流行于来自液体材料的三维免模建模。有出挑(如一个弯曲部分)的一个层不能漂浮在空间,所以所述构建软件生成临时支架来支持它,即,一个支架结构。在做一个常规 SLA 构建后,所述支架结构需要被去除。但是,如果该物体是一个金属铸造模具,在所述模具内部的所述腔室是所述相关表面,一内部支架结构不能被简单地除去。需要仔细考虑所述设计需要,以找到在不需要支架结构情形下的优化构建方向。固体构建材料不需要支架结构,因为所述出挑由所述下面固体(但未固化)材料支架。

[0200] 二氧化硅是一示例性陶瓷材料,而所述大面积无掩模光敏聚合方法可应用于广泛范围的陶瓷材料。可制造氧化铝或含氧化钇感光介质,例如,用于铸造需要氧化铝或氧化钇的更具反应性的超耐热合金(用于制造涡轮叶片)。调整用于所述基于氧化铝基或氧化钇树脂的曝光会导致对于光敏聚合的一个不同灵敏度。在含陶瓷树脂中的灵敏度大多受到光散射限制,这取决于所述陶瓷的所述折射率,也取决于影响光子传输的所述粒子尺寸分布和悬挂结构。二氧化硅的所述折射率接近于所述单体,所以二氧化硅树脂是非常灵敏的。氧化铝和氧化钇具有较高的折射率,因此它们需要一个更高曝光剂量。

[0201] 考虑到在所述液体状态下的所述介质材料的所述流变行为,所述介质的所述光固

化行为,所述未固化介质的所述清洁排出,固化聚合物移除,烧制,以及所述最终烧制陶瓷物体的所述耐火性能,可开发一新感光介质。

[0202] 一种固体介质的开发可采用所述成功的基于萘类的媒介物,如樟脑,其可通过升华在建模后除去。这消除了几乎所有的干燥和黏合剂烧尽问题。在温暖液体中的所述萘陶瓷粉末流变性是很好理解的,并且有效胶体分散剂是可商业获得。可获得樟脑和苧烯在室温下固化的详细信息,因为这些都是用于凝固研究的一个首选模型系统。浓陶瓷悬浮液的所述凝固也很好理解。基于萘类-丙烯酸酯单体的固体感光介质的所述光敏聚合现象的初步结果是令人鼓舞的。固体聚合物通常用于在印前制版印刷行业,以及在光刻中。

[0203] 所述含陶瓷树脂的光固化特征作为一组成和特征函数,可调整以开发一种优化 PCMS 组合物。含陶瓷的树脂用作所述感光介质以及其可操作的实例可在美国专利中找到(专利号 6117612),其通过引用的方式纳入本文中,如同在下文中所完全阐述的。

[0204] 所述控制系统 400 可包括用于所述大面积无掩模光敏聚合系统 100 的所述 PCS 405。从本质上说,所述 PCS 405 构成所述大面积无掩模光敏聚合系统 400 的大脑,并且是所述系统的所述中央处理单元,负责自动化功能。所述 PCS 405 可包括所述软件算法,以进行所述整体模芯 CAD 文件的自适应切片,用于优化层的厚度、部分表面光洁度,避免楼梯步进和最小构建时间,其作为所述模具设计中的关键特征和特征尺寸的函数。所述 PCS 405 还可包括用于协调所述材料构建平台、所述材料重涂系统和所述无掩模光学成像系统的移动的所述算法和信号通讯逻辑,用于自动化一层一层材料输送、扫描并曝光来构建三维部分,在最短的时间内以及尽可能少的所述大面积无掩模光敏聚合机空闲时间。软件算法可处理所述 CAD 数据切片成需要闪发至所述空间光调制器的所述堆叠图像(例如,参见附图 10A),该发送以所述感光介质的无缝和无掩模曝光所必需的高速度,因为所述无掩模光学成像系统以高速移过所述材料构建平台。软件算法也可自适应地调整所述实时曝光剂量,作为切片层厚度的一个函数,以通过所述层厚度实现所述必要充分固化深度而不管所述层厚度。

[0205] 用于所述大面积无掩模光敏聚合系统的所述整体 PCS 和用户界面可集成所述软件算法和信号通信逻辑。所述 PCS 可包括所有所述必需 CAD 数据接口、机器自动化和控制硬件和软件接口,以及错误检测和恢复,以使所述大面积无掩模光敏聚合机用作一个完全自动化、不用操作员的固体免模制造(SFF)机。例如而非限制,图 9 示出了的一个三维 CAD 图纸的多个横截面图,并且图 10A 示出了所述三维图像的多个堆叠剖面图,引起是图 10B 的所述涡轮叶片模具三维铸造。

[0206] 智能自适应切片算法优化构建速度和通量,而同时,仔细说明嵌入每个片层厚度的必要特征分辨率和/或表面光洁度。例如,含有关键特征的一体芯模具的部分可被以约 25 微米的层厚度进行切片,而对应于具有非关键特征或大部分垂直壁的所述平台和倒杯的其他区域可约 100 微米或更大层厚度进行切片。数据传送和文件格式协议将所述 CAD 切片数据发送到所述空间光调制器阵列。智能软件和硬件算法将所述 CAD 数据切片转换成素数图像帧堆叠,这些必须以一个高刷新率向无掩模光学成像系统中的素数空间光调制器阵列闪发。

[0207] 图 6-7 示出了示例性大面积无掩模光敏聚合装置,示出了所述光学成像系统,所述材料重涂系统,以及所述材料构建平台。换言之,图 6-7 是所述大面积无掩模光敏聚合系统的概念示意图,示出了所述无掩模光学成像系统、所述高精 XY 扫描台、所述材料重涂

系统和所述材料构建平台。

[0208] 该无掩模光学成像系统 200 在图 7 被更详细示出。所述无掩模光学成像系统 200 可将来自 UV 光源 205 的非均匀输出转换成均匀强度的一个矩形光束,在被由两个镜子重方向并穿过冷凝器光学后,照亮所述空间光调制器阵列。所述空间光调制器阵列或数字微镜装置 225 可以相对于所述像素平面的所述法线的一个角度被照射,因为所述接通镜子倾斜以引导所述光进入所述投影透镜。所述投影透镜 230 以所述适当比例放大或缩小所述图像,将所述图像投影到所述材料构建平台 500 中的所述介质的所述表面上,其位于所述投影透镜的所述焦平面。该无掩模光学成像系统 200 以悬挂龙门样式安装在一个 XY 扫描台上,并优选地横跨过所述材料构建平台 500,其时所述空间光调制器发送一个帧序列。每一帧代表覆盖所述材料构建平台 500 的索索全部可曝光区域的一个完整连续滚动图案的一部分。所述空间光调制器可由同步于所述空间光调制器数据流的一个脉冲 UV 光源照射。随着所述基板移动,发送到所述空间光调制器的数据被不断更新,逐排地,和所述微镜阵列的一帧一帧地,在其扫描移动期间传递所述全部图案信息到所述基板上。考虑到在数字微镜装置器件上有可约 780000 和 1300000 微镜,使用所述空间光调制器的所述大规模并行处理能力来增加所述光敏聚合通量,最少超过了一个单点激光光源的至少六个数量级,如同在立体光刻的情况中。

[0209] 计算表明,通过对一个部分的每个切片的所述厚度的光敏聚合所需要的曝光时间为约五毫秒的量级。商用高速扫描台可以 400-600 毫米/秒的速度移动所述光学成像系统,所以 200 部分可在于大约一秒钟内在一个 24 英寸乘以 24 英寸的构建区域中被曝光。用于曝光的一秒时间预算意味着重涂一层应该不超过四秒。这意味着,所述重涂装置可以相对高速度移动,向上约 100 毫米/秒以在 4 秒内横跨所述构建平台的所述 24 英寸(610 毫米)长度。所述重涂设备可成功地涂覆在所述感光介质的一个新层上,速度大约为 300 毫米/秒至约 1500 毫米/秒(大约 1-5 英尺/秒)。涂敷速度的这些类型,商业化地使用在所述转换和网络涂敷行业中,使所述系统能满足每层的所述临界时间预算,同时实现了高通量需要,使大面积无掩模光敏聚合成为一个成本效益方法。计算进一步揭示,通过实施自适应切片,以在包含关键特征的所述部分的区域使用较薄层(例如,约 25-75 微米),在其他地方使用较厚层(例如,大约 250 微米),所述部分构建率可增加到每小时至少约 90 份,从而每一部分节省成本约 25-30%。

[0210] 超耐热合金对象,例如,叶片,目前使用基于二氧化硅的壳模和芯铸造。通过所述大面积无掩模光敏聚合方法生产的用于一体芯模具的所述感光介质可基于一个二氧化硅制剂进行设计和研制。一种制剂可根据用于常规芯和壳模的所述相同组成进行以仿制。使用一个基本相同的模具组成对于由大面积无掩模光敏聚合制成的超耐热合金叶片的验收有帮,因为没有大量工作来重新使一个组件合格,模具化学不能更改。二氧化硅可是耐火材料,因为它比较容易在铸造后通过浸提除去。根据一个示范性实施方案,可使用至少两种光致固化的陶瓷介质或材料:1) 一种液体陶瓷树脂,和 2) 一种固体陶瓷树脂。

[0211] 在一个第一个实施方案中,所述光固化性陶瓷材料可是一种液态陶瓷树脂,基于现的光固化树脂。这种树脂中含有在低粘度流体单体(非水性丙烯酸或水性丙烯酸甲酯)中的约 50-60 容积百分比的陶瓷颗粒的悬浮液。这种制剂被理解,并在现有技术中已充分表征。所述液体陶瓷树脂是在其曝光给 UV 光的所在通过光敏聚合而局部地固化。在所述构

建完成后,所述一体芯模具是处于一个液态树脂桶中的一个固体陶瓷填充光敏聚合物。在将所述模具从所述桶移除后,多余树脂被排出。如此固化模具必须经过一个粘合剂烧尽过程(约 200-500°C),以除去所述聚合物而不损坏模具。然而,液态树脂有许多缺点,包括:(1) 它们固化成一个“生胚”构建状态,由在丙烯酸酯情况下的一种聚合物中的一种陶瓷组成,这需要仔细粘合剂热解,或者在湿水凝胶(含水甲基丙烯酸酯)中的一种湿陶瓷组成,这需要仔细干燥。这两者对于模具的相关薄片来说都是可控的,但对于所述方法构成约束;和(2) 对于某些设计,它们需要沿着所述部分构建支架结构。

[0212] 在第二实施方案中,所述光固化性陶瓷材料可是包括一种固体升华性单体溶液的一种固体陶瓷树脂。这可包括可作为一液体施加的一构建材料,但不是那种在一经实施就冻结以形成一种光敏聚合性固体。例如,这可在一种分子固体溶剂中使用一种单体来实现。所述固体溶剂可是一种低熔点媒介,其在高于约 50°C 左右熔化(例如,樟脑萘合金)。在所述熔融状态时,它是一种低粘度单体-媒介溶液中的约 50-60 体积百分比的陶瓷粉末的一种流体悬浮液。材料的一个新层可作为一种温热液体施加,在施加之后冻结,从而生成一个固体构建材料。所述冻结固体陶瓷树脂在其曝光于 UV 光的地方通过光敏聚合被局部交联。在所述构建完成后,所述一体芯模具是位于一块冻结固态树脂中的一种固体陶瓷填充交联光敏聚合物。该块被简单地加热到高于该媒介熔点,使未固化的过量树脂被排出。在如此固化模具中其余樟脑在构建后通过升华(周围温度冷冻干燥)被除去。升华后,只有少量固化单体保留,所以黏合剂烧尽要容易得多。

[0213] 萘是从松树(萘类)衍生的一种非毒性材料,并刚好在高于室温(50°C)以上熔化,但在室温下它是固体。樟脑是一种类似的材料,具有较高的熔点。这些萘可用于陶瓷悬浮液的冻结铸造。固体萘(或樟脑)容易升华,因此成形后,可通过升华除去。这消除了与粘合剂聚合物的热解(如与聚丙烯酸酯)和水凝胶的液体干燥(如与含水的甲基丙烯酸酯)相关联的困难。升华是一种温和的固体-蒸气转化,其不会导致尺寸变化,因此很少有或没有翘曲或开裂。

[0214] 后期处理和烧制开发努力可是必要的,以实现功能陶瓷器件。所述大面积无掩模光敏聚合方法可构建“生胚”陶瓷器件,包括在一种光敏聚合粘合剂中的陶瓷粉末。对于未固化陶瓷树脂的设备进行排水可是必要的,并且有效的排水、冲洗和除去所有松散的材料的过程可进而是必要的。在排水完成后,如此构建的“生胚”陶瓷设备可成功地烧制,以排出聚合物,烧结生成具有所述正确矿物成分和功能的坚硬物品。

[0215] 虽然此处提到了涡轮叶片模具,本发明的实施方案具有超出涡轮叶片的广泛应用。本文所公开的所述实施方案促成了常规情形下难以或不可制造的组件的所述设计和制造。相对于含陶瓷的大面积无掩模光敏聚合产品,所公开的实施方案可从根本上在世界范围改变目前采用的几乎任何组件的芯和模具是如何铸造的。

[0216] 本发明的所述各种实施方案通过以下非限制性实例进一步说明。大面积无掩模光敏聚合被用来构建复杂三维制品,通过光形成一种 UV 固化树脂的许多薄层的图案。一种示例性紫外线固化型树脂含有约 76%比重的二氧化硅粉末,其制备经由研磨熔融石英至平均颗粒大小为 7 微米,19.17%比重的 SR238 单体(Sartomer 公司,Warrington PA)和 2.34%比重的 SR494 单体(Sartomer,Warrington PA),1.58%比重的 Variquat CC55 分散剂(Degussa),和一个光引发剂,如 0.86%比重的 Irgacure 819(Ciba-Giegy)。其他光引发

剂、吸收剂或染料可根据需要加入,以按照需要修改 UV 固化特征。一个无掩模光学成像系统通过一个高分辨率位图图案扫描所述紫外线固化型树脂,以固化各个层。新层被施加,并且该过程被重复,以产生 10 厘米量级大小的复杂物体,内部和外部部分在尺寸规模上大约为 50 微米。耐火陶瓷模具是用如丙烯酸酯单体中的二氧化硅粉末的树脂 UV 固化悬浮液生产。

[0217] 在本发明的一个方面,具有制造一种三维物体的一个系统。该系统包括一个光学成像系统、一种光固化性介质,和一个控制系统。所述光学成像系统提供了一种光源。一经曝光给来自所述光学成像系统的所述光源的一部分,所述光固化性介质改变状态。所述控制系统控制所述光学成像系统的移动,其中,所述光学成像系统在所述光固化介质上面连续移动。

[0218] 此外,所述光学成像系统包括:接收所述光源的一部分的反射器;一个光学透镜系统,其包括接收所述反射光源的一部分的一个透镜;一个空间光调制器,用于接收来自所述光学透镜系统的所述反射光源;和一个投影透镜,用于将来自所述空间光调制器接收到的所述光源聚焦到所述固化介质的一个表面上。可替代地,所述光学成像系统包括一个无掩模光系统,用于提供所述光源,包括扫描所述介质的一部分的一个空间光调制器。在一个示范性实施方案中,随着所述光学光系统在所述光固化介质的所述表面上移过,所述光源连续地改变。

[0219] 所述光固化性介质可包括一种光敏聚合物。所述控制系统可接收一个计算机辅助设计图纸。

[0220] 所述光学成像系统投影一个从所述控制系统接收的二维图像到所述介质的表面上,该二维图像包括要形成的一个三维物体的一个横截面。被投影的所述二维图像可是一种动态图像,其随着所述光学成像系统在所述介质上扫描,而连续变化。

[0221] 所述系统还包括一个容器,用于容纳所述可光固化介质。该容器包括一个可向下移动的下平台,用于相对所述光学成像系统降低,其中,所述容器包括用于将更多所述光固化介质引入其中的一个入口。

[0222] 该系统还包括一个重涂系统,用于给所述光固化介质快速涂覆一均匀的厚度。

[0223] 在另一个示例性方面,包括若干步骤的一种光学建模方法,其中,一种光固化性介质被一光束曝光,以形成一个三维模型。该方法包括:移动一个无掩模光学成像系统,该系统在一个连续序列中提供所述光束;将所述光束呈现在所述光固化性介质的一部分上;降低所述光固化介质所在的一个板;并应用所述光固化媒体的一个新层。

[0224] 该方法还可进一步包括:分析多个二维计算机辅助设计;所述光束被呈现在所述光固化介质的所述部分,该固化介质具有来自从所述多个二维计算机辅助设计之一的形状。此外,该方法可进一步包括:将所述光束投影,该光束随着该光束扫描所述可光固化介质的一个表面而连续变化。进而,该方法可包括:提供一种材料构建平台,用于容纳所述可光固化介质和所述板,所述光固化介质位于该板上。该方法可包括:通过至少一个透镜系统,将所述光束导向反射离开一个反射器,以及导向一个空间光调制器。

[0225] 在所述光束被呈现在所述光固化介质的所述部分后,所述光固化介质所在的该板的降低发生。

[0226] 在另一个方面,一种用于制造一个三维物体的方法包括:移动一个无掩模光学成

像系统,该系统在一个连续序列提供一个光源;引导所述光源反射离开一个反射器,通过至少一个透镜系统,并进入一个空间光调制器;分析多个二维计算机辅助设计;将所述光源呈现所述固化介质的一部分上,该固化介质被包含在一材料构建平台中,呈现在所述固化介质的所述部分上的该光源具有一个图案,该图案对应于所述多个二维计算机辅助设计之一;将所述光源投影,以随着所述光源扫描所述可光固化介质的表面上,进行连续地改变;降低所述材料构建平台内的所述光固化介质所在的一个板,在所述光源被呈现到所述光固化介质的所述部分后,发生所述光固化介质所在的所述板的降低;以及将光固化性媒体的一个新层应用到所述物质构建平台。

[0227] 该公开描述了大面积无掩模光敏聚合技术,这是一种基于层的制造技术。大面积无掩模光敏聚合技术可用于具有复杂内部几何结构的一体芯陶瓷模具的制造,例如用在高压涡轮机叶片的熔模铸造中。不同于生产塑料建模部分的大多数基于层的制造技术,大面积无掩模光敏聚合可应用于生产可承受的严峻考验的功能陶瓷组件,例如,涡轮机叶片单晶铸造中所涉及的高温方法。在一些情况下,要生产部分的复杂内部几何结构以及物理性能的严格要求,可会带来多种挑战。

[0228] 该公开还描述了用于所述大面积无掩模光敏聚合技术的多个数据处理方案。STL 文件(其是所述部分几何结构的匹配近似),通常使用在添加制造(AM)行业中。然而,由于在在大面积无掩模光敏聚合中的所述复杂部分几何结构,所述几何结构的这种近似可能不具有成本效益。因此,一种使用 ACIS 内核的容错的直接切片的方法可用来对所述本地 CAD 几何结构进行切片,并可输出所述切片轮廓的高分辨率(1500dpi)位图图像。STL 文件切片算法可与所述大面积无掩模光敏聚合技术一起使用。进一步地,一组后期处理算法,诸如错误检查、部分安置、贴片等在所述切片图像数据上运行的算法,可与所述大面积无掩模光敏聚合技术一起使用。

[0229] 除了促成所述大面积无掩模光敏聚合技术的基本功能的所述数据处理方案,该公开还描述了几个计算方案,以进一步提高使用大面积无掩模光敏聚合技术的部分质量,如用于自适应切片 CAD 模型的一个基于体积偏离的方法,来缓解使用大面积无掩模光敏聚合技术和其他一般 AM 方法生产的部分上的“楼梯步进”效果,以及施加到所述切片图像的一个灰度缩放和抖动方法,以缓解所述楼梯步进效应,其当计算不同于以往方法的灰度强度时考虑所述材料系统的所述固化特征的灰度系数的影响。该公开还描述了用于支架几何结构的一种方法,带来部分构建中的无支架特征或“浮岛”。这种方法可用在本地 CAD 几何结构。此外,现有的方法可不被施加到所述大面积无掩模光敏聚合技术,这是由于,例如,无法在构建完成后除去支架结构。

[0230] 图 11 示出了一个大面积无掩模光敏聚合机 1100 的实施方案,具有根据本文中所描述的各种方面的龙门式扫描无掩模光学成像系统。所述大面积无掩模光敏聚合机 1100 可如图 11 所描述的配置。此外,所述大面积无掩模光敏聚合机 1100 可被配置为包括一个材料复涂系统 1101、一个悬挂龙门样式无掩模光学成像系统 1103,一个高精度 XY 扫描台 1105,以及和一个材料构建平台 1107。

[0231] 图 12 示出了根据本文描述的一个扫描无掩模光学成像系统 1200 的一个实施方案。所述系统 1200 可如由图 12 配置。

[0232] 图 13 示出了根据本文描述的一个扫描无掩模光学成像系统 1300 的一

个实施方案。所述扫描无掩模光学成像系统 1300 可如在图 13 所描述的进行配置。此外,所述扫描无掩模光学成像系统 1300 可被配置成包括从数字显微镜装置 1301 闪发的一个紫外线像素阵列,一个投影透镜 1303,一个数字显微镜装置 1305,一个冷凝器 1307,一个第一镜子 1309,一个第二镜子 1311,一个 UV 光源 1313,和一个圆顶形反射器 1315。

[0233] 图 14 示出了根据本文描述的一个方面的一个材料构建平台 (MBP) 1400 的一个实施方案。所述材料构建平台 1400 可如在图 14 所描述的配置。此外,该材料构建平台 1400 可经配置为包括一个动态密封构建容器 1401。在一个实例中,在该方法开始时,所述动态密封构建容器 1401 可是空的,如由参考号 1411 所描述的。在该方法结束时,所述动态密封构建容器 1401 可具有完成的一个部分 1403,如由参考号 1412 所描述的。在此方法中,所述构建槽 1401 可逐渐成长,随着每个层被添加到所述部分 1403,如参考号 1413 至 1420 所描述的。在一个实例中,随着每一层被添加到部分 1403,所述动态密封构建容器的每一侧可生长。

[0234] 图 15 示出了根据本文描述的一个方面的一个材料重涂系统 (MRS) 1500 的一个实施方案。所述系统 1500 可如在图 15 中所描述配置。所述系统 1500 可被配置为使用按要求分配来处理,例如,容器中和层内沉淀。

[0235] 图 16 示出了根据本文描述的一个方面的一个材料重涂系统 1600 的另一实施方案。系统 1600 可如在图 16 中所描述配置。进而,所述系统 1600 可被配置为使用按要求分配来处理,例如,容器中和层内沉淀。

[0236] 图 17 示出了使用具有一个单边重涂机的一个材料重涂系统 1700 在构建精度的损失。在图 17,具有一个单边重涂机的所述材料再涂系统可导致凹陷或隆起,这可能会导致精度损失。在一个实例中,对于首个约十 (10) 至约二十 (20) 层,一个叶片可已删除太多的浆料,并且可形成围绕一个模具的所述浆料区域中的一个火山口形状。此外,在大约四十 (40) 至约五十 (50) 层后,可形成围绕所述模具部分的一个浆料穹顶形状。此隆起问题可会更加恶化,例如,随着更多层被添加,而这可能会导致一个部分的构建失败。

[0237] 图 18 示出了根据此处所描述的各方面的具有一个多叶重涂机的一个材料重涂系统 1800 的一个实施方案。所述系统 1800 可如在图 18 所描述的配置。此外,系统 1800 可被配置来处理在图 17 所描述的凹陷和隆起的问题,这可增加的一个部分的构建精度。

[0238] 图 19 示出了根据此处所描述的各方面的一个隔板印刷式供墨窗格 1900 的一个实施方案。所述隔板印刷式供墨窗格 1900 可按照图 19 所描述的配置。

[0239] 图 20 示出了使用一个材料重涂系统在构建精度的损失。在图 20,所述材料重涂系统可造成的一个部分的一个面的侵蚀,这是由于:例如,大体积的未固化液体。另外,随着所述材料重涂系统以高速扫过新层,未固化单体的一个大的截留容积可侵蚀的一个部分的一个表面。

[0240] 图 21 示出了根据此处所描述的各方面的使用符线在部分间空间中构建一个共形晶格的一种方法 2100 的一个实施方案。在图 21 中,所述方法 2100 可包括共同构建一个构建块,该构建块包括容器壁、一个部分,和一个共形晶格。此外,该方法 2100 可包括减少未固化单体的截留体积,减少或消除部分侵蚀,减少凹陷或隆起等,带来了一个部分的构建精度的提高。

[0241] 图 22 示出了根据此处所描述的各方面的使用符线在部分间空间中构建一个共形

晶格的一种方法 2200 的另一个实施方案。在图 22 中,所述方法 2200 可包括共同构建一个构建块,该构建块包括容器壁、一个部分,和一个共形晶格。此外,所述方法 2100 可包括执行构建后部分脱落,其中可包括从所述构建块沿符线解构所述容器壁或所述共形晶格。该方法 2100 可包括恢复所述部分。

[0242] 图 23 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机 2300 的一个实施方案。所述个大面积无掩模光敏聚合机 2300 可如图 23 所描述的配置。

[0243] 图 24 示出了根据此处所描述的各方面的用于校正间隙误差的一个方法 2400 的一个实施方案。

[0244] 图 25 示出了根据此处所描述的各方面的用于校正间隙误差的一种方法 2500 的另一个实施方案。

[0245] 图 26 示出了根据此处所描述的各方面的自动部分布局和脚手架的一种方法 2600 的一个实施方案。

[0246] 图 27 示出了根据此处所描述的各方面的识别一个浮岛的一种方法 2700 的一个实施方案。

[0247] 图 28 示出了根据此处所描述的各方面的一种识别多功能支架结构的一种方法 2800 的一个实施方案。

[0248] 图 29 示出了根据此处所描述的各方面的为了就收缩缓解和支架结构进行筛查的一种方法 2900 的一个实施方案。

[0249] 图 30 示出了根据此处所描述的各方面的为了就收缩缓解和支架结构进行筛查的一种方法 3000 的一个实施方案。

[0250] 图 31 示出了根据此处所描述的各方面的为了就收缩缓解和支架结构进行筛查的一种方法 3100 的一个实施方案。

[0251] 图 32 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表 3200。

[0252] 图 33 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表 3300。

[0253] 图 34 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表 3400。

[0254] 图 35 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表 3500。

[0255] 图 36 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表 3600。

[0256] 图 37 提供了用于一个大面积无掩模光敏聚合系统的一个实施方案的基于筛查的灰度工作曲线的一个图表 3700。

[0257] 所述大面积无掩模光敏聚合方法可为了制造高精度的内部冷却涡轮叶片,因此可无法承受 STL 文件的粗糙嵌合几何结构近似。本地 CAD 几何结构可能需要被处理,以输出用于构建这些组件的所述切片数据。用于完成这个的一个直接切片算法可用诸如 ACIS 的一个几何结构内核来实现。

[0258] 图 38 示出了根据此处所描述的各方面的进行直接切片的一种方法 3800 的一个实

施方案。在图 38 中,该方法 3800 可包括将一个本地 CAD 部分加载到一个程序中,如在 3800a 所提及的。该方法 3800 可包括计算一个边界框,如在 3800b 所提及的。该方法 3800 可包括创建一个切片平面,如在 3800c 所提及的。该方法 3800 可包括计算所述部分和所述切片平面之间的相交,如在 3800d 所提及的。该方法 3800 可包括点阵化一个相交线来创建一个位图图像,如在 3800e 所提及的。该方法 3800 可包括:例如使用 CCITT FAX4,获得或压缩切片位图,如在 3800f 所提及的。该 ACIS 内核是由空间公司(达索系统公司的子公司)市售的 C++CAD 库。它提供了强大的 API(应用程序接口)和用于大多数的所述基本 CAD 操作的函数调用。这些 API 已经被集成到所述切片软件来制造 CAD 切片。所述所得的 CAD 切片然后被点阵化,以获得用于曝光的所述位图。

[0259] 需要被切片的所述本地 CAD 模具可首先装入到所述算法,使用 ACIS 的加载功能,如在 3800a 所提及的。ACIS 库可与 SAT 文件格式一起工作,因此其它格式 CAD 文件可需要先转换成 SAT 格式,通过使用商用 CAD 软件或通过使用 ACIS 的内置文件格式转换功能。在翻译过程中,数字或拓扑的不准确可能潜入所述部分。在严重的情况下,可需要实施错误检查和校正方案。一旦所述部分已经被加载,可计算其边界框,以获得将要生成的所述位图的大小的估计,如在 3800b 所提及的。一个切片平面然后可创建并与所述部分相交,例如,使用 ACIS 的布尔 API 来获得的一个相交线,如在 3800c 所提及的。一旦获得了所述相交线,它可被点阵化,以获得所述位图,如在 3800d 所提及的。这可涉及为所述图像中的像素的各行发射光束,以及计算所述相交线的所述相交。像素值然后可在每个相交之间用交替的白色和黑色部分进行填充,如在 3800e 所提及的。得到的所述位图图像然后可使用 CCITT fax4 无损压缩方案进行压缩,该方案由三个数量级的数据进行压缩,而无需任何损失,如在 3800f 所提及的。CCITT fax4 是行业标准无损压缩方案,用于有效地压缩 1 位 TIFF 图像。这些位图然后可输送到后期处理算法。

[0260] 为了实现在图 38 中所示的所述基本算法轮廓中所讨论的所述任务,可需要完成几个不同的步骤。这些步骤的一例被示出了在用于直接切片的虚拟码中,称为算法 1。

[0261] 算法 1:

[0262]

```
1: set ACIS parameters like native resolution
2: set build parameters like layer thickness and slice image resolution
3: import CAD File to SAT format using ACIS Interops module
4: perform error checking on part
5: if part free of errors then
6:   get bounding box of the part, i.e., (Xmin; Ymin;Zmin) & (Xmax;
Ymax;Zmax)
7:   adjust bounding box dimensions
8:   compute the height and width of slice image in pixels
9:   create and allocate memory for a 'characterBuffer' array
10:  for each 'Z' location along the build direction do
11:    create a plane at the specic 'Z' location
12:    for each body in the CAD slice do
13:      intersect body with the plane created to get a wire graph of the
cross-section
14:      store the cross-section wire graph to a 'crossSectionList'
15:    end for
16:  for each cross-section wire graph in the 'crossSectionList' do
17:    extract all the edges and store in an 'edgeList'
18:  end for
```

[0263]

```

19:   for each row of pixels in the image do
20:       create a ray
21:       for each edge in the 'edgeList' do
22:           compute intersection of the edge with the ray
23:           if ray is not tangent to the edge then
24:               store the intersection point in an 'intersectionList'
25:           end if
26:           sort points in 'intersectionList' w.r.t their 'X' coordinates
27:           for each intersection point in the 'intersectionList' do
28:               compute the corresponding pixel number in the image
29:               store the pixel number to a 'pixelNumberList'
30:           end for
31:       create temporary 'integerBuffer' array
32:       for each pixel in the current row of pixels do
33:           create a boolean variable 'color' and initiate to '0'
34:           fill 'integerBuffer' array with the value of 'color'
35:           toggle 'color' value when you hit a number in
'pixelNumberList'
36:       end for
37:       for every 8 values in 'integerBuffer' array do
38:           compute the decimal sum
39:           identify the corresponding ASCII character
40:           store it in the corresponding row of 'characterBuffer'
array
41:       end for
42:   end for
43: end for
44: end for
45: use 'characterBuffer' array information to create the slice image
46: save the slice image to a multipage tiff
47: else
48: display error message to user
49: exit slicer program
50: end if

```

[0264] 在导入所述 CAD 文件并执行关于所述部分的错误检查后,可计算其边界框,以产生所述部分的最小和最大程度,即, (Xmin;Ymin;Zmin) 与 (Xmax;Ymax;Zmax)。所述切片图像(像素)的尺寸可由需要的这些程度和分辨率(dpi)来确定。图像处理领域的一个惯例:对于所述图像宽度上四舍五入到一个 32 位(4 字节)的整数倍值,因此,这些边界框范围可需要进行调整。假设(不失一般性),该构建方向是沿着“Z”轴,所述图像大小可从这些调整范围计算如下:

$$[0265] \quad \text{图像宽度} = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\text{分辨率}} \quad \text{方程式 (1)}$$

$$[0266] \quad \text{图像高度} = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{\text{分辨率}} \quad \text{方程式 (2)}$$

[0267] 一旦所述图像的尺寸被确定,可创建表示为 'characterBuffer' (字符缓冲器)的 ASCII 字符阵列,并动态分配,以存储对于每个切片的必要信息。二进制(黑色和白色)位

图图像中,每个像素可能需要 1- 位内存。可能在 C++ 中没有规定单独访问存储器的每一位。所以,八个像素的值集合(‘0’和‘1’;‘0’表示黑色,‘1’表示白色)可在一个时间被读取,对应于其十进制总和的 ASCII 字符可被存储在所述‘characterBuffer’(字符缓冲器)阵列的适当位置。在内存已分配给图像后,所述部分然后可在相应的‘Z’高度位置进行切片,通过调用‘api\_planar\_slice’API 来产生相交轮廓。各种 ACIS API 的细节可在其门户网站的文档中找到,如在 <http://doc.spatial.com/index2.php> 发现的 ACIS 文档门户中所描述的。如果所述部分文件有多个体,每个体也可被切片,并且获得的横截面轮廓可被存储在记为‘crossSectionList’的列表中。在计算所有的所述平面相交后,来自每个这些轮廓的每一个的所有的所述边缘可被提取和被存储在一个‘EdgeList’中。一旦‘EdgeList’被填充,届时可是用于计算创建所述位图图像所需的所述必要颜色信息的时间。所述部分的“外部”可由黑色来表示,而该部分的“内部”可由白色表示。

[0268] 为了确定一个点是否在该部分的所述内部或外部,可需要建立其相对于该部分的成员资格,例如,如由 Robert B. Tilove 在《集成员资格分类:一种对于几何结构相交问题的统一方式》(Set membership classification:A unified approach to geometric intersection problems)所讨论的(计算机,IEEE 交易,100(10):874-883,1980)。相对于内部的一个点的成员资格的创设,可通过创建来自所需点的一条非“相切的”(触摸不相交)的曲线,并让它扩大到无穷大(假定一个无穷远的点是所述部分的外部),同时计数其与所述部分相交的次数。如果所述相交的次数是奇数(偶数),则该点可是所述部分的内部(外部)。

[0269] 图 39 示出了根据此处所描述的各方面的将所述“内部”与所述“外部”相区分的一种方法的一个实施方案。如可清楚地看出的,源自外部点的所述光线形成偶数(4)的相交,而源自内部点的光线形成奇数(5)的相交。相当明显,同样的逻辑适用,如果所述光线在无穷远处开始并终止在其成员资格要被确定的点。更重要的是,可观察到如果开始于无穷远处的所述光线穿过一个部分,其成员资格在所述部分的内部和外部之间在每次其与所述部分边界相交时切换。出于制造所述切片图像的目的,可利用这个事实。起始于边界框的左端的光线可为所述图像中的像素的每行创建,并且它们与在‘edgeList’中的每个边缘的相交可被计算。如前面提到的,这些光线可必须是非“相切的”,该方法才能工作,因此所计算的相交可被存储到‘intersectionList’中,如果所述光线对于计算所述相交所用的所述边缘非相切。一旦创建‘intersectionList’,可创建一个‘integerBuffer’阵列,用于存储像素颜色数据。一个布尔‘颜色’变量(一个可只取‘0’和‘1’值的变量)可被创建,并初始为‘0’开始(因为所述光线的开始点可在一部分的外部)。沿光线行进的过程可通过计数像素来进行模拟,随着我们在行中从左边移动到右边。‘色’变量的值可在每次像素数超过‘intersectionList’中的点的一个“X”坐标时进行切换。这种沿光线进展可以像素为单位进行计数,并且不能以相对于每个像素尺寸的沿光线经过的绝对浮点距离进行计数。每个像素的尺寸可是浮点数,如用于 1500dpi 图像的 0.00066667 英寸,相对于这个尺寸的所经过的距离的计数,而非整数像素数,可会导致浮点错误,并且可导致所述切片图像的粗糙边缘,如在图 40 中所描述的。图 40 是具有由于在计算一个移动距离中的浮点错误导致的粗糙边缘的一个切片图像。在图 40 中,所述插图显示所产生的粗糙边缘。这样粗糙的边缘会降低所述部分的所述表面质量,因此可能需要避免。一旦像素的所述整数值

被适当地填充时,所述‘integerBuffer’阵列随后可转化成相应的 ASCII 字符,来为所述图像填充‘characterBuffer’(字符缓冲器)阵列。当对于所述图像的所有所述行的该相交和收集所述像素颜色信息的过程完成时,所述‘characterBuffer’(字符缓冲器)阵列可完全填充,在该点,它可用于制造所述压缩 TIFF 图像。

[0270] 图 41 示出了使用在直接分层文献中的所述诸多先前报道工作中的测试组件。可看出,大部分的所述测试组件都是单体积固体,其中一些具有一个或两个空隙。经比较,图 42 示出了一个典型内部冷却高压涡轮叶片的一个 CAD 模型。它刻意示出在所述线框视图中,以更好地了解所涉及的所述几何结构复杂性。图中的每一条边表示两个或更多个 NURBS 曲面接触的一个接口。一经将在此前示出的所述测试组件与所述高压叶片模具进行比较,在涉及大面积无掩模光敏聚合部分的所述几何结构复杂性中的数量级的差别是显而易见的。对于具有如此高复杂性的部分,错误范围是有如此之多。由于 CAD 翻译或由于由设计者在接口处的不当定义的表面相交所造成的非流形几何结构导致的模型中的微小差距是很常见的。为了成功地对所述模型进行切片,可实施在上一节中所描述的直接切片算法,以容忍这些错误。

[0271] 据观察,在上一节中所讨论的直接切片算法的两个步骤中发生误差。第一步是切片,这涉及所述切片平面和所述 CAD 对象之间的所述相交的计算。由于在所述模具的复杂区域中的所述不当定义几何结构,在某些情况下,所述切片操作未能产生一个线框相交曲线(图 10 中步骤(c))。促成错误的第二个步骤是点阵化(图 10 中步骤(d)),这涉及计算光线和所述线框相交曲线之间的所述相交。在所述模型中的任何间隙表现为在所述线框相交曲线的差距,这些反过来表现为在所述点阵化图像中的空白线(参照示出这些空白线的图 28a)。据观察,在这两个步骤中产生的错误对于被称为 ACIS 分辨率的一个参数非常灵敏,该 ACIS 分辨率定义了 ACIS 内核对于 CAD 模型中的固有拓扑错误是如何的灵敏。

[0272] 图 43A 提供了来自一摞以两个不同 ACIS 分辨率产生的诸多连续切片中的每个图像中观察到空白线的所述数量的一个图表 4300a。可看出,始终如一地更多的误差产生在在所述较低分辨率(对拓扑错误的较低 ACIS 耐受)值的每个切片层中。ACIS 分辨率参数不仅影响在点阵化中的所述切片图像误差,经观察,它也影响在所述切片步骤中产生的误差。当所述切片操作失败,在某些情况下,观察到通过降低所述 ACIS 分辨率(因此使得内核更能容忍)和重新切片,仍然可计算出所述线框相交曲线。

[0273] 记住这一事实,为了容忍地对所述错误 CAD 几何结构进行切片,误差容限的两个级别被嵌入在所述直接切片算法中。第一是在所述 CAD 空间中,其旨在减轻在所述切片步骤中诱发的所述问题。如果所述切片操作失败,该算法动态地降低了所述 ACIS 分辨率,以试图计算一个相交曲线。如果失败,该切片平面位置由沿所述部分的所述高度少量扰动(通常是由  $\pm 10 \mu\text{m}$ ),在这一新切片平面位置再次以各种分辨率进行所述切片操作,以探索成功地计算一个线框切片的可能性。在极端情况下,如果所述切片操作仍然失败,不能创建所述对应图像,这些从通过对所述同一部分的一个 STL 表象进行切片所获得的所述输出借用(STL 文件切片方法将在第 2.3 节中讨论)。

[0274] 容错性的所述第二个层次是在所述图像空间中。如先前所讨论的,在成功计算所述线框相交曲线后,杂散线可有时在期间导致向所述直接切片处理过程的所述点阵化步骤的所述输出切片图像。为了缓解这一问题,实施错误校验算法,当实施输入时,其通过自动

检测这些杂散线,并用叠层片图像进行纠正。请注意,此错误检查算法可用在叠层片图像上,不管它们是由所述直接切片算法或所述几个 STL 文件切片算法产生的。因此,该误差容忍的第二个层面,除了使得所述直接切片算法错误得以容忍,让所有所述 STL 文件切片算法错误也得以容忍。

[0275] 在本节给出对于所述直接切片算法的所述时间复杂度的一个粗略估计,以及对几个代表性部分切片所需的所述计算次数。所述算法的所述时间复杂度可被估算如下:假设在所述部分有 N 个面,对于该部分中的每个层:

[0276] 1) 需要用所述切片平面来计算的 N 个表面相交。这相当于大致需要一定时间的 N 个运算。

[0277] 2) 接着,考虑到最坏的情况下,对于所述图像中的像素的每一行,需要计算 N 个光线-边缘相交。这相当于另一图像高度 \* N 个运算。

[0278] 3) 一旦计算所述相交点,需要为所述切片图像中的每个像素确定所述适当整数像素值。这些需要在以后转换为字符值,以正确地创建 1-位 TIFF 图像。这两个运算一起将等于 C \* 图像高度 \* 图像宽度运算,其中 C 是某个常数。

[0279] 这样,通过将上述每个步骤中的所述运算次数相加,我们可得出该算法的所述时间复杂度,如下所示:

[0280]  $T(N) = \# \text{层} * \{N + \text{图像高度} * \{N + C * \text{图像宽度}\}\}$  方程式 (3)

[0281] 其中, N 表示所述部分的表面的所述数目, C 是一个常数。该算法的所述计算时间与所述部分的层的所述数目大致呈线性变化关系,其可是直接正比于所述部分的所述高度,和反比于所述层厚度,以及所述部分的表面的所述数目。虽然在方程式 3 中的表达预测了所述切片时间相对于所述图像高度和图像宽度呈二次比例关系,相比所述图像的所述宽度,运算的所述数目更依赖于所述图像高度。因此,所述切片时间可大致与所述图像高度呈线性变化关系,可独立于所述图像宽度(在现实中是直线性的,但具有非常小的斜率线性),因此相对于所述切片图像的所述输出分辨率(DPI,每英寸点)也呈线性。图 43B 提供了用 DPI 计算一个切片比例的所述时间的一个图 4300b。对于在图 42 中所示的所述全边内部冷却高压涡轮叶片模具,它需要大约两(2)分钟来计算每个切片,需要大约一天半来计算沿着所述部分的所述长度的所述全部堆叠切片图像。

[0282] 下表 1 提供了用于计算用于各种输出图像分辨率的每个切片的所述计算次数。

[0283]

DPI	图像宽度	图像高度	切片次数
300	632	1066	24.963
600	1265	2132	42.866
900	1898	3199	60.388
1200	2531	4265	80.340
1500	3163	5332	100.077

1800	3796	6398	118.458
2100	4429	7465	140.901
2400	5062	8531	159.843

[0284] 因为 STL 文件通常用于工业中,使用 ACIS 的所述直接切片方法可不处理这些文件,已研究几个替代方法。

[0285] 重建 SAT 文件

[0286] 所述 STL 文件格式的主要弱点之一是缺乏拓扑信息。如前所述,STL 文件只是一个关于三角面的没有嵌入其中的边缘或顶点连接信息的随机集合。一个样本 STL 文件的基本结构示出如下:

[0287]

```

solid cube_corner
  facet normal 0.0 -1.0 0.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 1.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 0.0 -1.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 1.0 0.0
      vertex 1.0 0.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.0 0.0 -1.0
    outer loop
      vertex 0.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 1.0
      vertex 0.0 1.0 0.0
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.577 0.577 0.577
    outer loop
      vertex 1.0 0.0 0.0
      vertex 0.0 1.0 0.0
      vertex 0.0 0.0 1.0
    endloop

```

[0288]

```

  endfacet
endsolid

```

[0289] 可看出,每个所述小平面及其各自顶点坐标和法线矢量依次以一个任意顺序列出。这限制了有效地完成对于它们的多个至关重要操作。首先,对所述模型进行切片可能变得困难且耗时。除了切片,进行错误检查操作,如识别所述模型中的缺失的小平面或差

距,计算整体性能,如质量、重心、体积等,这对于不同的方法规划操作(如部分方向,构建区包装等)很重要,以及对部分几何结构的操纵,同样也可能变得困难。将减轻这些限制造为最终目标,可实施一种算法从具有嵌入其中的所有所述拓扑信息的 STL 文件来对 CAD 文件(或一个 SAT 文件)实施反向工程。这样做,可有助于在使用强大的 ACIS 的 API 来执行所述切片操作和其他重要的操作,例如如前所述的错误校验、计算所述整体特征、部分操作等。为了对 SAT 文件实施反向工程,可能需要从底层向上构建 ACIS 的所述 BRep(边界表象)数据结构。

[0290] 图 44 示出了的所述边界表象数据结构的所述各种元素。可能需要对该边界表象数据结构进行创建和填充。在所述边界表象数据结构中的每个体可被分成“块”。块可以或不可以被断开连接,可以因为简化所述几何结构而存在,以使所述 CAD 算法更有效率。每个块可包括断开闭对象的一个被称为‘壳’的列表。每个壳可包括一个“面”列表,其绑定该壳定义的所述空间。每个“面”可包括一系列“环”。一个环可以是端到端连接“共边”的一个圈。一个共边可以是与在所述模型中的每个“边缘”相关联的一个拓扑实体,并且可被用于存储在所述部分中的边缘连接信息。如果两个面在一个边缘相遇,从每个这些面的所述环的所述相应共边可指向相同边,这可以是所述建模内核如何标识它们之间的邻接信息。

[0291] 为填充所述数据结构,并创建来自一个三角形网格的 SAT 文件,可执行以下步骤:

[0292] 1) 对于每一个列出的小平面,需要创建顶点。同样可需要创建连接这些顶点的共边,并且这些共边可在右边‘意义’形成环,如顺时针或逆时针。

[0293] 2) 从所述面邻接信息,可需要创建边缘,来自相邻面的对应共边可需要指向所述同一边缘。

[0294] 3) 同样,来自所述面邻接信息,所有的所述互连面可需要被组合成壳。在分组结束时,每个壳可拥有所有的互连的所述面的一个名单,但不要与任何其他壳的所述面接触或相交。

[0295] 4) 这些壳可被任意地分成块,所述整个体可从所述获得块列表中创建。

[0296] 为了对一个 SAT 文件实施反向工程,可需要从 STL 文件中提取所有的所述拓扑信息,像顶点和边连接和面邻接。可需要实施特殊数据结构,以实现此目的。

[0297] 所述角表数据结构可在两个整数阵列中存储所述拓扑和连接信息。图 45 示出了根据本文描述的各个方面的一个角表数据结构 4500。在图 45 中,所述角表数据结构 4500 可被配置成包括持有拓扑和连接信息的命名法 4500a 或整数阵列 4500c。围绕在一个小平面的一个顶点的区域可被随意地称为一个“角”。对应于该角的顶点可被称为‘v(c)’. 与当前的角‘c’相反的角可被称为‘l(c)’和‘r(c)’. 左边的和右边的角可分别称为‘l(c)’和‘r(c)’. 下一个和之前的角可分别称为‘n(c)’和‘p(c)’(假设顶点以一个逆时针的方式列出)。当前的角所属的三角可被称为‘t(c)’. 存储所述连接信息的所述两个整数阵列可是所述顶点阵列‘V[c]’和所述相对阵列‘O[c]’,如图 45 所示。对于任何给定的角‘c’,所述相应顶点和对角指数可从所述顶点阵列‘V[c]’和相对阵列‘O[c]’分别获得。一旦这两个阵列填充,可获得所述邻接信息。例如,从一个随机角‘c’开始,所述左边三角形可由查询 t(o(p(c))) 访问,所述右边三角形可通过 t(o(n(c))),所述相对三角形可通过 t(o(c))。

为了重建一个 SAT 文件,也可需要素数边缘连接信息。因此,该数据结构可扩展,同样通过构建一个边缘阵列 ‘E[c]’。它可存储与一个给定角 ‘c’ 相对的所述边缘的所述边缘转位。如果计算这三个阵列,那么可恢复所有重建 SAT 文件所需的所述拓扑信息。

[0298] 图 46 示出了根据此处所描述的各方面的用于识别冗余顶点的一个单元结构的一个示意图。图 47 是根据此处所描述的各方面,一个用于填充 V[c] 的一种方法 4700 的一个流程图。当所述部分的所述边界框中的所述封闭空间可被划分成离散单元,‘V[c]’ 可通过实施一个小单元结构来构成。因为所述小平面从所述 STL 文件读取,在它们被给予一个转位或被存储在 V[c] 之前,可首先就冗余检查其顶点的每个。因为每个顶点被读取,可计算其单元数。可计算该顶点之间的距离,已经存在于它单元中或所述紧邻单元中的所述顶点。如果它小于一个设定容值,则该顶点可被丢弃或最靠近它的所述顶点的所述转位可被存储在 V[c] 中。如果不是这样,一个新顶点转位可被创建或存储在 V[c] 中。对于所述 STL 文件中的所述面的所述顶点继续这一过程,可带来 V[c] 的完成。

[0299] ‘O[C]’ 的构建可通过首先确定与一个顶点相关联的所有所述角,围绕每个顶点旋转,标记所述对角。这是通过首先填充称为 ‘箱’ 的一个临时数据结构来进行的。‘箱’ 中的每个节点对应于所述网格中的一个独特顶点。对于所述部分的每一个角 ‘c’, 识别对应于 ‘c’ 的所述下一个和前一个角的所述顶点转位中的最小顶点转位。所述三重态 ( $\min\{V[n(c)], V[p(c)]\}, \max\{V[n(c)], V[p(c)]\}, c$ ) 被存储在 ‘箱’ 的  $\min\{V[n(c)], V[p(c)]\}$  节点。这实质上是把源自 ‘箱’ 中其对应节点中的所述顶点和指向该边缘的所述角 ‘c’ 的所有边缘分组。在为所述网格中的每一个角这样做之后,在 ‘箱’ 中的每个节点将指向源自一个顶点所有边缘以及指向这些边缘的所述角。一旦 ‘箱’ 被完全填充,很容易检查指向源自同意顶点的同一边缘的角。如果这样的一对角退出,那么每个角被标记另一个的相对。为 ‘箱’ 中的每个节点的所有边缘这样做,可完全填充 ‘O[c]’。这样做的一个伪代码显示在算法 2 中。

[0300] 算法 2 :O[c] 的构建。

[0301]

```

1: create and allocate memory for bins
2: for each corner c in the mesh do
3:   e1 ← min{V[n(c)], V[p(c)]}
4:   e2 ← max{V[n(c)], V[p(c)]}
5:   bins[e1] ← (e1, e2, c)
6: end for

```

[0302]

```

7: for each node in bins do
8:   for any pair of triplets (e1, e2, c) and (e1', e2', c')
9:     if e1 = e1' and e2 = e2' then
10:       O(c) ← c'
11:       O(c') ← c
12:     end if
13: end for

```

[0303] 一旦 ‘V[c]’ 和 ‘O[c]’ 被构建,‘E[c]’ 可容易地构建如下。首先创建一个空阵列 ‘E’, 初始化为空。对于网格中每一个角 ‘c’, 检查 ‘p(c)’ 或 ‘o(p(c))’ 或两者没有指向任何边缘。如果它们中的一个没有不指向一个边缘,分配由另外一个指向的边缘的边缘转位。如果两者都没有指向任何边缘,那么为对应于 ‘c’ 和 ‘n(c)’ 的两个顶点的边缘,创建一个新

的转位,为‘n(c)’和‘o(p(c))’两个角将该边缘转位存储在‘E[c]’中。为所述网格中每个角这样做,‘E[c]’表可是完全填充。为构建‘E[c]’的一个伪代码中放在算法 3 中给出。

[0304] 算法 3 :构建 E[c]’。

[0305]

```

1: create and allocate memory for an array E
2: for each corner c in the mesh do
3:   E[c] ← NULL
4: end for
5: edgeIndex ← 0
6: for each corner c in the mesh do
7:   if E[p(c)] = NULL and E[o(p(c))] = NULL then
8:     create a new edge with vertices V(c) and V(n(c))
9:     E[p(c)] ← edgeIndex
10:    E[o(p(c))] ← edgeIndex
11:    edgeIndex ← edgeIndex + 1
12:  else if E[p(c)] = NULL then
13:    E[p(c)] ← E[o(p(c))]
14:  else
15:    E[o(p(c))] ← E[p(c)]
16:  end if
17: end for

```

[0306] 在构建 V[c], O[c] 和 E[c] 后,可实施一个名为“漩涡”的简单函数,以找出在所述网格中脱节壳的数量。首先,启动称为“壳”阵列,具有的长度等于在所述网格中小平面的数量,并将所述网格设置为空。在壳中的每个节点指向一个小平面的壳数目。对于所述网格中的每个角的‘c’,如果其相应的小平面‘t(c)’不被分配给‘Shell[t(c)]’中的一个壳数目,壳的数目被递一增加,并且该漩涡功能因为所述角‘c’而被调用。漩涡函数是一个调用自身的递归函数。当它因一个特定角而被调用时,它首先为小平面对壳数目,并调用自身用于‘c’用于所述左边角(‘l(c)’)和右边角(‘r(c)’)。通过该调用自身递归过程中,它用壳数目标记所有所述相互连接小平面对壳数目,此过程继续,直到所有所述小平面对壳数目都被标记有一个壳数目。在该程序结束时,可识别在所述网格中不相交壳的数量和属于每个壳的小平面的所述列表。这样做的一个个伪代码显示在算法 4 中。

[0307] 算法 4 :使用‘漩涡’函数确定在一个网格中不相交壳的数量。

[0308]

```

1: create and allocate memory for an array 'shell'
2: for each facet 't' in the mesh do
3:   shell[t] ← NULL
4: end for
5: #shells ← 0
6: for each corner 'c' in the mesh do
7:   if shell[t(c)] = NULL then
8:     swirl(c, #shells)
9:     #shells ← #shells + 1
10:  end if
11: end for
12: function swirl(c, k)
13:  if shell[t(c)] = NULL then
14:    shell[t(c)] ← k
15:    swirl(l(c), k)
16:    swirl(r(c), k)
17:  end if
18: end function

```

[0309] 以这种方式，一旦所有的所述阵列‘V[c]’，‘O[c]’，‘E[c]’被计算，并且不相交壳的数目被确定，用于从所述 STL 网格重构一个 SAT 文件所有所述必需拓扑信息被恢复。使用该信息，如前面所讨论的，通过填充所述边界表象数据结构，构建所述 SAT 文件。带有这些想法的一个算法已经实施，STL 文件已使用所述 ACIS 内核被成功切片。除了切片，也已成功地进行其他操作，例如错误校验、几何结构变形、整体性能如重心、体积等的运算。

[0310] 虽然恢复所述拓扑信息的所述方法有如前面所概述的几大优势，它也有它的局限性。削弱了该方法的几个严重局限性之一是得到的所述 SAT 文件过大。这是由于这样的事实：许多过量实体（如边缘、共边、顶点、面等）需要创建，以存储所述拓扑信息，而在一个本地 CAD 表象情况中，要少了许多。例如，如果要要将一个由 N 个小平面组成的一个球体的所述 STL 文件重构成一个 SAT 文，它将有 N 个表面平面贴片，若干边和顶点，而不是仅仅是一个表面（如在其本地 CAD 格式中所表示的）。由于所有这些多余的实体，所述 SAT 文件比用于表示相同几何结构本地 CAD 文件要大几倍，并且此文件大小与面数目成线性关系。下表 3 给出了就几个样本网格所生成的 SAT 文件大小估计。图 48 提供了该比例相对于小平面的数目的一个趋势。

[0311] 表 3：几个样本 STL 网格制造的 SAT 文件大小。

[0312]

# 小平面	SAT 文件大小 (KB)
12	12
24	24
540	593
2376	2935

3872	4763
------	------

[0313]

6162	7668
------	------

[0314] 对于一个内部冷却涡轮叶片的所述模具的所述复杂 CAD 模型,必须有 550 万个小平面的一个 STL 网格。有这样大的小平面的计数,这种方法可会产生要处理的较大文件切片。因此,这种方法可不被集成到所述大面积无掩模光敏聚合数据处理流,相反,已经对读取和切片 STL 文件的直接方法进行更多研究。

[0315] 由于使用前一种方法生成巨大 SAT 文件,已经实施用于直接读取和切片 STL 文件和并没有任何中间转换的一种算法。因为一个 STL 文件是按随机顺序的小平面的一个列表,有效地对其切片的一个主要问题是缺乏一个将文件中的那些处在相交区域的小平面与其余部分小平面的快速识别的能力。因此,需要实施可用于此目的的某种类型的一个数据结构。

[0316] 图 49A 示出了根据此处所描述的各方面的用于识别在一个任意 Z- 高度的相交小平面的方法 4900a。提供了一个三角形网格和切片平面的一个例子,如在 4901a 所提及的。所述切片可被假定为沿 z 方向,而不损失一般性。为了识别相交小平面的,首先每个小平面的最大和最小 z 坐标被计算并存储在存储器中。对于一个给定切片平面,选择最小 z 坐标小于所述切片平面高度的所述小平面的,如在 4903a 所提及的。在这些选择的小平面中,那些最大 z- 坐标大于所述切片平面高度的可被识别并保留,而其余的将被丢弃。以此方式,只有那些与所述给定切片平面相交的小平面可与文件中的其他小平面的分离,如在 4905a 所提及的。

[0317] 为了做到这一点,实施由链表组成的一个数据结构。图 24 示出了这种数据结构的一个示意图。它由一个主链表构成,按照 z 值的递增顺序排序。在此链表中的每个节点包括其特定 z 值和一个指针,指向包含具有相同最小 z 坐标值作为那个节点的所述 z 值的所有小平面的一个二次列表。一旦在所述给定 STL 文件中的所有小平面的都在该数据结构中被填充,实施完成方法 4900a 的所述步骤所需的所述操作的其余部分是简单的。

[0318] 对于每个切片,一旦在所述相交区域的小平面被确定,计算一个在所述小平面的和所述切片平面之间的一个简单参数相交,以得到所述相交线的所述各种边缘。如果一个小平面的所述边缘的每一个以参数形式呈现为一条直线,如方程式 4 所示(其中下标 'i' 及 'j' 表示一个小平面的两个不同顶点),可计算在所述边缘与在高度“Z”的所述切片平面之间的在所述相交的所述参数值,如方程式 5 所示。

$$[0319] \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i + t \left( \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i \right) \quad \text{方程式 (4)}$$

$$[0320] \quad t_z = \frac{Z - z_i}{z_j - z_i} \quad \text{方程式 (5)}$$

[0321] 如果这样计算出的参数值 't<sub>z</sub>' 位于 '0' 和 '1' 之间,计算并存储所述相交点的所述坐标,如方程式 6 所示。

$$[0322] \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{int Point}} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i + t_z \left( \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i \right) \quad \text{方程式 (6)}$$

[0323] 当每个小平面对与所述切片平面相交时,其产生两个相交点。另一个相交点也可类似计算,这两点共同构成的所述截面线的一个边缘。由于所述小平面对以随机顺序列出,所述线边缘同样以一个随机顺序计算。在常规轮廓规划操作中,这些边缘需要进行排序,所述相交环路需要构建。然而,对于所述大面积无掩模光敏聚合方法,产生所述切片的一个位图图像就足够了。这可通过为每行像素射出光线和计算相交点来直接完成。然后,用这些点,可填充所述像素值。为了有效地识别出与特定光线相交的边缘,使用如用于小平面对与切片平面相交的一个类似数据结构,不同之处在于现在这些边缘基于其最小 y 坐标排序,而不是所述 z 轴坐标。一旦所述边缘被识别,所述相交点以一个类似与小平面对 - 平面相交计算的方式来计算参数。这样获得的图像可被保存在 CCITT fax4 格式中,供给后期处理算法。

[0324] 为了完成前一节中所描述的运算序列的所述算法的所述伪代码示于算法 5。算法 5:STL 文件的直接切片。

[0325]

```

1: load STL file of given name
2: determine #facets in the file
3: i ← 0
4: zList ← NULL
5: for i < #facets do
6:   bufferFacet ← readFacet(i)
7:   update the max and min bounds of the part
8:   addFacet(bufferFacet, zList)
9: end for
10: using max and min bounds, compute image size and allocate memory
11: eList ← NULL
12: for each Z location along the build direction do
13:   facetsToSlice ← isolateFacets(zList, Z)
14:   crossSectionWireEdges ← slice(facetsToSlice, Z)
15:   addEdge(crossSectionWireEdges; eList)
16:   for each row of the image do
17:     Y ← ycoord value corresponding to the row
18:     intersectingEdges ← isolateEdges(eList, y)
19:     for each edge in intersectingEdges do
20:       create a horizontal ray at Y from the left edge of the bounding
box
21:       compute intersection points between ray the edge
22:     end for

```

[0326]

```

23:   compute integerBuffer from the intersection points
24:   compute characterBuffer from intBuffer
25: end for
26: use information in characterBuffer to write the slice image to disk
27: end for

```

[0327] 开始时,一个给定名称的所述 STL 文件被载入所述程序。STL 文件可为两种类型: ASCII 和二进制。ASCII STL 文件包含以明文列出的所有所述小平面信息,并可在任何标准文本编辑器中打开。二进制 STL 文件以一个二进制格式存储所有信息,而非纯文本,因此要小得多。由于无掩模光敏聚合中遇到的所述典型 STL 网格有非常大平面计数(5 百万以上),使用所述切片算法,专门切片二进制 STL 文件。

[0328] 二进制 STL 文件以一个 80 字节块内存开始,其被称为所述标头,包含任何文件特定信息。在所述 80 字节块之后,有一个 4 字节块,其以一个无符号整数格式包含的小平面数目。在所述文件中所述第一个 84 字节存储器之后,每个小平面信息被存储在 50 字节的块中。每个 50 字节的块由存储所述法向量(三个方向余弦各 4 个)的 12 个字节以及存储所述三个顶点中的每一个的 36 个字节组成。每个小平面的所述 50 字节块的剩余 2 个字节通常是空的,但也可在一些应用中用来存储诸如颜色等特殊属性信息。

[0329] 一旦 STL 文件被装入该程序,在该文件中小平面的数量在所述标头后从所述 4 字节块存储器读取,并分配给 # 小平面。从零开始,对于每个  $i < \#$  小平面,所述对应小平面的所述法线向量和顶点坐标信息使用所述函数 readFacet 读取并存储在称为 bufferFacet 的一个临时变量中。用于函数 readFacet 的一个伪代码见算法 6。

[0330] 算法 6:从二进制 STL 文件读取一个小平面。

[0331]

```

1: bufferFacet ← NULL
2: function readFacet(i)
3:   facetStartLocation ← 84 + 50 * i
4:   bufferFacet:Nx ← readByte(facetStartLocation)
5:   bufferFacet:Ny ← readByte(facetStartLocation + 4)
6:   bufferFacet:Nz ← readByte(facetStartLocation + 8)
7:   for n := 0 to 2 do
8:     bufferFacet:V [i]x ← readByte(facetStartLocation + 12 + 12 * n)
9:     bufferFacet:V [i]y ← readByte(facetStartLocation + 12 + 12 * n + 4)
10:    bufferFacet:V [i]z ← readByte(facetStartLocation + 12 + 12 * n + 8)
11:   end for
12:   return bufferFacet
13: end function

```

[0332] 这个函数,在本质上,可寻求所述文件至对应于所述第  $i$  小平面的所述正确存储位置,并且可读取每个存储器小平面块内的所述对应字节信息,并且可填充所述临时变量 bufferFacet。每个小平面  $i$  开始于文件开头的  $(84+50*i)^{th}$  字节,因为所述标头有八十(80)个字节,对于 # 小平面有四(4)个字节,对于所述第  $i$  小平面之前的所述  $i-1$  小平面的每个有五十(50)个字节。一旦所述小平面开始位置被识别,并且分配给 facetStartLocation,该运算的其余部分可使用 readByte 函数和所述正常矢量的所述  $x, y, z$  坐标读取对应字节信息,且所述各顶点被填充。

[0333] 以这种方式,已经从文件中读取一个小平面,在算法 5 中的下一个步骤可更新至所述部分的最小及最大范围,以填充图 49B 所示的所述数据结构中的所述小平面。图 49B 根据本处所描述的各个方面示出了用于 STL 文件直接分层的一个数据结构。这通过将所述文件读取的每个小平面发送到所述函数 addFacet 完成。

[0334] 该函数的所述伪代码示出于算法 7 中。

[0335] 算法 7 :在所述数据结构中填充一个小平面。

[0336]

```

1: function addFacet(facet, zList)
2:   traverse through zList
3:   look for matching zList node corresponding to facet.minZ
4:   if found then
5:     add facet to the list pointed by the matching zList node
6:   else
7:     create a new node toAdd
8:     toAdd.Z ← facet.minZ
9:     toAdd.facetList ← facet
10:    add toAdd to the zList in the proper sorted location
11:  end if
12: end function

```

[0337] 所述给定小平面的最小 Z 坐标值被识别,遍历 zList 查找 Z 值与所述小平面的所述最小 Z 坐标匹配的一个节点。如果找到这样的节点,所述给定小平面被加到该节点指定的所述列表。如果未找到这样的节点,创建通过 toad 代表的一个新节点变量,其 Z 值等于所述小平面的最小 Z 坐标,其小平面列表指向所述给定小平面。这个新节点然后被添加到所述适当位置中的所述 zList,从而其保持相对于所述节点的所述 Z 值的所述上升顺序排序。

[0338] 利用 readFacet 和 addFacet 这两个函数,在算法 5 中第一环结束前,该部分最小和最大边界将被确定,且图 49B 所讨论的小平面的所述数据结构将被填充。下一个环利用由此填充的所述数据结构以对所述模型进行切片及输出所述图像。对于该切片平面的一个给定 Z 位置,首先落在该平面的所述相交区域中的所述小平面使用函数 isolateFacets 确定,并存储在所述 facetsToSlice 列表中。用于分离所述小平面的所述伪代码见算法 8。

[0339] 算法 8 :在所述相交区域分离小平面。

[0340]

```

1: function isolateFacets(zList, Z)

```

[0341]

```

2:   facetsToSlice ← NULL
3:   for each node in zList do
4:     if z value of the node is less than Z then
5:       traverse through each facet in the facet list pointed by the node
6:       look for facets whose maxZ > Z
7:       if such a facet found then
8:         add facet to facetsToSlice
9:       end if
10:    else
11:      break
12:    end if
13:  end for
14: end function

```

[0342] 如所述伪代码所示,为隔离所述所需要小平面以相交,首先读取 zList 中的每个节点。如果该节点对应的所述 Z 值小于该切片平面的所述 Z 高度,则解析该节点指定的所

述小平面对列表中的所述小平面的每个。如果发现一个小平面具有大于切片平面高度的最大 Z 值,则添加到 facetsToSlice 列表。在每个 Z 值小于所述切片平面高度的所述节点的每个以这种方式被解析后,所述 isolateFacets 函数返回 facetsToSlice 中聚集的所述小平面对。已隔离所述切片平面的所述相交区中所述小平面对,算法 5 然后使用所述函数切片,计算带有所述切片平面的这些小平面的所述相交。如前一节中所述,这些相交已经计算参数。已计算形成所述部分横截面的所述轮廓的相交边缘,下一个步骤是从其中产生一个图像。为了完成这一点,针对所述图像的每一行产生光线,计算其具与所述轮廓边缘的相交。为了有效地计算这些相交,所述边缘被依次填充到与用于填充所述小平面的非常相似的一个数据结构中。所述边缘基于其最小 Y - 坐标(而不是在所述小平面对情况下的 Z - 坐标)被设置在箱中。用于边缘排序的该数据结构由 eList 表示,算法 5。函数 addEdge 用于填充该数据结构中的所述边缘,且其实施与前述的 addFacet 函数非常相似。在 eList 填充后,计算所述光线和所述边缘之间的相交的所述过程,与用于计算在所述切片平面与小平面对之间的相交的过程相同。对于每条光线,使用 isolateEdges 分隔所述相交面,其实施与 isolateFacets 类似。一旦识别所述相交边缘,计算所述相交点参数。在计算所述相交边缘后,执行创建位图数据的所述过程。首先,一个临时 intergerBuffer 阵列被填充,然后转换成 ASCII 字符阵列 CharBuffer,用来保存所述位图图像。

[0343] 本节规定了对所述时间复杂度的粗略估计以及完成所述切片操作所需的时间。如果 N 表示一个 STL 网格中的小平面对数目,为填充前述章节中所讨论的所述切片数据结构,需要完成下述操作以读取每个小平面对:1) 通过扫描在 zList 中的所述每个节点,以确定一个匹配节点,以及 2) 通过扫描至由所述匹配节点指定的所述小平面对列表的所述末端,来添加所述小平面对。这两个操作的任何一个,在最坏的情况下,需要 N 个时间步骤。由于这两个操作都需要在所述文件中就每一个小平面对进行,用于填充所述数据结构的所述时间复杂度为  $O(N^3)$ 。

[0344] 类似  $N^3$  的多项式时间复杂度通常是可接受的,但如果所考量的所述 N 较大时,则所述计算时间变得过长。使用这种算法的各种网格尺寸的切片 STL 文件的所述计算时间的一个粗略估计见表 4。图 49C 就示出了若干小平面对的计算时间比例。

[0345] 表 4 :用于各种网格尺寸的切片时间

[0346]

编入转位时间 (秒)	编入转位时间 (秒)
81080	11.475
102268	17.902
114818	22.356
160296	44.893
191172	68.579
219584	109.218

337128	613. 151
--------	----------

[0347] 可以看出,对于具有大量小平面的一个文件,所述切片时间要数天。在无掩模光敏聚合情况下,由于一体芯高压轮机叶片模具的所述几何结构复杂度,所述 STL 文件的网格尺寸高至 5.5M。对于这样一个巨大文件,其需要 4 天以上的时间来切片,这是惊人的大。因此,实施一个新 STL 切片算法以减少所述切片时间。该算法详细情况以及实施的新数据结构将在下一节中阐述。

[0348] 因为,对于大 STL 网格,它需要过长时间填充上一节中所描述的所述数据结构;研究了一种新方法以便降低所述切片时间。经仔细检查,很明显,为了创建所述切片图像的关键信息,是所述光线与所述截面线边缘相交的所述点。因此与其花费大量时间计算对于之前讨论的所述数据结构中所述小平面的填充,计算和存储这些相交点足以,因为每个小平面从该文件读取。此外,如果这些小平面被存储在一个阵列结构中,而非如先前的在链表中,数据访问可以更快,因为阵列对于编入转位和搜索具有  $O(1)$  复杂度,而链表对于所述相同的具有  $O(N)$  的复杂度(即,随机访问对系列访问)。图 50 示出了根据本文所描述的各个方面的一个用于存储这些相交点的数据结构 5000。

[0349] 所述数据结构中的每一行表示对应该部分中每个切片  $i$  的一个  $Z$  高度。每一栏表示对应所述切片图像的一行  $j$  的一个  $Y$  水平。所述数据结构中的每个位置  $(i; j)$  包含对应所述第  $i$  个切片图像的所述第  $j$  行的所有所述相交点。

[0350] 由于从所述文件中读取每个小平面,根据其最大与最小  $Z$  范围,可确定这种特定小平面将边缘贡献的所有所述切片编号。对于对应这些切片编号的每一个的这些边缘的每一个,也可确定所述相应切片图像的所有所述行,对此其将这相交点贡献。基于该信息,因为每个小平面被读取,计算由该小平面向所述小平面的每个贡献的所有的所述相交点,并存储在图 50 中所示的所述数据结构中的所述对应位置。一旦所述文件中的所有所述小平面贡献的这些相交点被计算并存储,切片图像可通过使用如前面部分所讨论的一个相似方法来制备。

[0351] 为实施用于切片 STL 文件的这一新算法的所述伪代码示出于算法 9。首先创建该部分的边界框坐标,或者通过执行所述整个部分的一个线性扫描,或直接从所述 CAD 模型向该程序输入所述信息。所述边界框的所述最小和最大顶点分别由  $(\min x, \min Y, \min Z)$  和  $(\max X, \max Y, \max Z)$  表示。接下来,以  $zY$  矩阵表示的所述二维阵列数据结构被分配,初始化为 NULL。由于每个小平面  $f$  从文件中读取,计算小平面  $f$  贡献边缘的切片的所述范围。 $\min Layer$  和  $\max Layer$  表示在此范围内的最低和最高的切片的所述层数目。对于每个从  $\min Layer$  至  $\max Layer$  的切片  $i$ ,所述小平面以所述相应切片高度切片,所得边缘被存入通过  $e$  表示的变量。对于每个边缘  $e$ ,计算图像行的范围,该边缘向其贡献了一个相交点。该范围的最下面和最上面的行分别由  $\min Row$  和  $\max Row$  表示。对于在  $\min Row$  和  $\max Row$  之间每行  $j$ ,计算所述边缘  $e$  和对应于所述行  $j$  的所述光线的所述相交点,并存储在以  $\text{intPoint}$  表示的一个变量。所述小平面与所述切片平面之间的以及所述边缘与所述光线之间的这些相交点,如前一节所述,对其参数进行计算。由此计算出的  $\text{intPoint}$  被填充在所述 2D 阵列  $zY$  矩阵中的第  $(i, j)$  的单元。在对所述列表中的所有所述小平面的一个线性扫描之后,一旦该  $zY$  矩阵被完全填充,则可产生所述切片图像。对于每个切片图像  $i$ ,为计算每行  $j$  的所

述像素信息,所述变量 integerBuffer 和 characterBuffer 基于选自 zY 矩阵中的第 (i, j) 单元的所述相交点进行填充。一旦所述 characterBuffer 阵列完全填充该切片的所有行,其可被用来将所述切片图像写入至磁盘。

[0352] 算法 9 改进 STL 文件的直接切片。

[0353]

```

1: compute bounding box of the part
2: (minX; minY; minZ) ← minimum extents of the part
3: (maxX; maxY; maxZ) ← maximum extents of the part
4: zYMatrix ← NULL
5: for each facet f in the file do
6:   bufferFacet ← readFacet(f)
7:   minLayer ← floor( $\frac{\text{bufferFacet.minZ} - \text{minZ}}{\text{LayerThickness}}$ ) + 1
8:   maxLayer ← floor( $\frac{\text{bufferFacet.maxZ} - \text{maxZ}}{\text{LayerThickness}}$ )
9:   for each slice i; i := minLayer to maxLayer do
10:    e ← sliceFacet(bufferFacet, i)
11:    minRow ← floor( $\frac{\text{maxY} - \text{e.maxY}}{\text{pixelSize}}$ ) + 1
12:    maxRow ← floor( $\frac{\text{maxY} - \text{e.minY}}{\text{pixelSize}}$ )
13:    for j := minRow to maxRow do
14:      intPoint intersectEdge(e; j)
15:      zYMatrix[i][j] intPoint
16:    end for
17:  end for
18: end for
19: for each slice i; i := 0 to #Layers do
20:   for each row j; j := 0 to imageHeight do
21:     intPoints ← zYMatrix[i][j]
22:     compute integerBuffer using intPoints
23:     compute characterBuffer using integerBuffer

```

[0354]

```

24: end for
25: use information in characterBuffer to write the slice image to disk
26: end for

```

[0355] 这里规定了对使用该算法对 STL 文件进行切片所需要的所述时间复杂度和所述计算时间的粗略估计。为了在所述二维矩阵中的所有所述相交点编入转位,这将需要进行  $N*Z*Y*C$  个运算,其中  $N$  表示在所述文件中的小平面的数目,  $Z$  表示所述切片范围 ( $\text{maxLayer} - \text{minLayer}$ ),  $Y$  表示所述行范围 ( $\text{MaxRow} - \text{minRow}$ ), 而  $C$  表示一些独立常数。在最坏的情况下,  $Z$  和  $Y$  可都等于  $N$ , 且时间复杂度降低到  $O(N^3)$ , 如同在上一节中所讨论的所述链表 STL 切片算法。但是,在典型的场景中,  $Z$  和  $Y$  都比  $N$  小得多。常数  $C$  也非常小,因为一个阵列结构用来代替一个链表。因此,在最典型的情况下,该算法表现就像其为  $O(N)$  复杂度,具有一个非常小常数值,因此是比上一节中所讨论的所述链表算法快得多。使用这种

2D 矩阵方法对具有不同小平面计数的典型 STL 文件进行切片的编入转位时间的一个估计值,以及在上一节中所讨论的所述链表算法相对应次数,示出于见表 5。

[0356] 表 5 :用于各种网格尺寸的切片时间

[0357]

# 小平面	用于链表的编入转位时间 (秒)	用于 2D 矩阵的编入转位时间
81080	11.475	14.147
102268	17.902	14.197
114818	22.356	14.550
160296	44.893	15.466
191172	68.579	16.157
219584	109.218	16.895
337128	613.151	18.690
438434	1464.206	19.715
531370	2476.122	21.754
678358	4656.452	24.045
756446	6075.474	24.921

[0358] 图 51 示出于相对于网格大小的切片时间比例

[0359] 如可看到的那样,使用这种方法节省大量切片时间。对应 5.5M 小平面 STL 文件切片只需 30 分钟,而使用链表方式切片相同文件需要 4 天。这使得在为每个新部分设计而准备构建应用图像中节省大量时间。

[0360] 虽然,这种新方法降低了所述计算时间,但是它也有其局限性。首先,由于所述小平面只是读取一次,并从存储器中丢去,一旦设置所述切片厚度和图像分辨率,在执行时无法对其作出动态改变,因为所述小平面信息无法恢复。在链接表途径中,由于所有的所述小平面在所述数据结构中被编入转位,总是具备为如适应切片的应用中动态地改变所述层高度和图像分辨率的灵活性。然而,这个缺点可以其他方式减轻。由于所述切片时间本身很短,切片图像的多个堆叠可在多个层厚度创建,并且可从这些堆叠中的每一个选择所述适当图像,用于在应用(如适应切片)中使用可变层厚度。

[0361] 其次,这种新方法使用了比链表方法多得多的内存,其存储所有所述光线与在所述部分中所述切片的每一个的所有所述相交点,而在所述链表方法中,只是所述小平面被存储在存储器中。举例来说,对于所述 5.5M 三角部分,所述新方法需要约 2.5GB 内存,使用链表方法只要 300 兆内存。因为近来存储器很便宜,这种局限不是一个重大障碍。因此,考虑到本节讨论的每个 STL 切片的所述方法的利弊,本节中的所述方法为用于大面积无掩模

光敏聚合对极高分辨率 STL 文件进行切片的优选方法。

[0362] 通过 STL 切片（尤其是直接 CAD 切片）生成的所述切片图像，在适合用于在一个大面积无掩模光敏聚合构建前，需要进一步的后期处理。这些不同后期处理操作和算法的详细信息在本节中给出。

[0363] 需要对所述切片图像执行的强制性后期处理操作之一是检查所述图像的错误和有效性。这些错误是由潜入到所述模型的间隙引起的，而这或者是由于所述 CAD 模型中的错误或由于在不同 CAD 格式之间转换造成的。在所述切片操作期间，在创建所述切片图像的过程中，为所述图像的每一行生成光线以识别所述正确像素颜色值，如前所述。任何光线，如其潜入到所述 CAD 模型中的这些间隙之一相重合，将导致应在一个无差错文件中被计算的一个相交点的遗漏。这一遗漏将导致所述像素颜色值无法切换到所述相应位置，这将反过来又表现为所述切片图像中的一个空白线。图 52 示出了空白线错误的一个特别糟糕实例。在所述图像可以被用于所述大面积无掩模光敏聚合机上部件构建之前，需要检测和校正这样的空白线。为此目的，已执行一种错误检查和纠正算法。该算法需要 5200a 引用的图 52a 所示的一个错误切片，且输出 5200b 引用的图 52b 所示的一个校正切片。

[0364] 为了识别这些空白线，该算法扫描所述图像的每一行，检查由相反颜色的像素夹着的像素，例如，与紧靠正在被搜索的当前行上方和下方的像素相比，具有不同颜色值的像素。一旦找到这样的像素，翻转它们的值以匹配所述顶部和底部行的所述颜色值，来校正所述空白线。这种方法仅适用于校正是 1 - 像素厚的空白线，但可扩展到检测多个像素宽的线。所述扩展算法以及用于检测具有多个像素宽的空白线的所述伪代码的详细信息见下文。

[0365] 该错误校正操作的所述伪代码示出于算法 10。需要检查的所述给定切片图像堆叠被首先加载到该程序。由于从所述堆叠读取中的每个图像，其像素数据首先从 ASCII 表示转换成整数表示，便于数据操纵，并存储在一个整数阵列 integerBuffer 中。如果一个相交点在所述切片操作中被错过且导致空白线，则含有所述空白线的所述行的最后一个像素在周围黑色背景下为一个白色像素。利用这一事实识别需要校正的错误行。这通过检查在 integerBuffer 中像素的最后一栏中的 1（即，白色）颜色值的像素来完成。如果这样一个白色像素被识别，则意味着所述对应行需要就一个空白线进行校正。已确定所述空白线发生的所述行后，下一个步骤是确定该空白线的宽度。因此，在已经识别一条空白线起源的所述行后，检查紧随所述识别行的所述行的末端像素的所述颜色值。如果发现连续行具有白色像素值，则所述空白线的所述宽度大于一。对连续行数进行计数，并存储在所述变量宽度中。在已经识别了所述开始行号和一条空白线的所述宽度后，该信息随后被传递给函数 correctRow。

[0366] 算法 10 错误检查算法。

[0367]

```

1: load the stack of images to correct
2: for each image in the stack do
3: characterBuffer ← pixel data of the image
4: integerBuffer ← convert ASCII data in characterBuffer to integer data
5: for each row j of the image do
6:     width ← 0
7:     if the last pixel of row j in integerBuffer = 1 (i. e. white) then
8:         width ← width + 1
9:         j ← j + 1
10:        while last pixel of row j in integerBuffer = 1 do
11:            width ← width + 1
12:            j ← j + 1
13:        end while
14:        correctedIntegerBuffer ← correctRow(integerBuffer, j -
width, width)
15:    end if
16: end for
17: correctedCharacterBuffer ← convert correctedIntegerBuffer to
ASCII data
18: output the corrected image to disk using correctedCharacterBuffer
19: end for

```

[0368] 所述函数 correctRow 的所述伪代码见算法 11。它只是先前描述的用于校正一像素宽空白线的一个扩展版本。三个计数器 i, j 和 k 在所述算法中使用。计数器 k 跟踪对应于一个多像素宽空白线（正在被校正）中每行的所述图像中的所述行数。计数器 i 跟踪需要检查颜色信息的所述空白线中的一个特定行上方的行数。类似地，计数器 j 跟踪需要检查颜色信息的所述空白线的一个特定行下方的行数。对于所述空白线的每行中的每个像素，检查在所述行（即为上方的 i 行和下方的 j 行）中的所述对应像素的所述颜色。如果是相同的，而不是与正在被校正的所述行中的所述目前像素的所述颜色不同，则翻转所述像素值。

[0369] 算法 11 行校正功能。

[0370]

```

1: function correctRow(integerBuffer, row, width)
2: for i := 1 to width do
3:     j = width - i + 1
4:     k = row + i - 1

```

[0371]

```
5:   for each pixel in row k do
6:       if color i rows up = color j rows down  $\neq$  color on current row
       then
7:           flip the current pixel color
8:       end if
9:   end for
10: end for
11: end function
```

[0372] 例如,让我们假设一条空白线的所述开始行数为三十(即行=30)。让我们还假设所述空白线的所述宽度是3(即,宽度=3)。因此,在这个例子中,如果我们校正所述空白线中的第一行(在所述循环的第一次迭代),在这三行中上方的一行的所述像素的颜色值应进行同等性检查,如果它们是同等的,而不是不同于正被校正的所述第一行中的所述像素颜色值,则该像素颜色值需要被翻转。计数器值被相应地设置,即,对于所述第一次迭代(校正素数空白线中的第一行), $k = 30$ (所述空白线的开始行号), $i = 1$ (上一行)且 $j = 3$ (下三行)。类似地,用于校正所述空白线( $K = 31$ )中的所述第二行,上两行( $i = 2$ )和下两行( $J = 2$ )的所述像素值需要对颜色信息等予以检查。

[0373] 所有这些错误检查操作基于这一假设,即,这些连续空白线的集体宽度比在要被切出的所述CAD部分中的最小特征尺寸小得多。对于当前正在由大面积无掩模光敏聚合构建的所述叶片设计,具有约500微米的最小特征尺寸,即,在1500dpi下,尺寸大约为30个像素。在所述切片中观察到的最宽空白线为五个像素宽,这比30个像素的最小特征尺寸小得多,因此可合理准确地校正。

[0374] 该算法的另一局限在于,当所述空白线太宽时,当所述颜色从黑切换到白或反之亦然,所述校正行不符合该部分的所述边界。在所述纠正行中的所述部分的所述边缘变为垂直而非平滑连接到所述轮廓的其余部分。图53示出了根据如本文所述的各个方面的矫正具有空白线的多像素宽行的一个方法5300。这种现象见于5300b引用的图53b,用于在5300a引用的图53a所示的一个样本空白线。当所述空白线是窄的(小于5个像素宽),所引起的不精确性是可忽略的,但随着其变宽,则需要对其进行校正。这个问题可通过构建一个花键(例如具备CI连续性的一个厄米三次样条)来确定,以一个连续方式来关闭所述轮廓,在所述空白线中的所述行中的每一行的所述颜色反复点可从这样构建的花键中计算。所述边缘轮廓的这种平滑方式可保持,如5300c引用的图53c所示,同时纠正任意宽的空白线。虽然,它可校正任意宽度的一条空白线,如果所述空白线太宽(所述空白线的宽度接近该部分的最小特征尺寸),则不是在所述图像中被动校正,所述本地CAD部分的所述几何结构需要修理以精确切片。

[0375] 以这种方式,该函数correctRow可校正空白线,如果给出在所述切片图像中的所述空白线的起始行号以及其宽度。返回至算法10,一旦所述切片图像(integerBuffer)的所述整数数据中识别的所有所述空白线被纠正,则其被转换回为ASCII数据,并保存至磁盘。以这种方式,检查并校正所述堆叠中的所有所述切片图像的错误,最后,获得一个无差错图像堆叠,这通过采取在以下各节中描述的其它后期处理操作获得。

[0376] 上述获得的所述校正图像需要在所述构建区域中的用于适当部分放置的一个图像模板上正确贴片。图54示出了根据本文所述各个方面的一个贴片方法5400。在5400a

引用的图 54 显示了至所述贴片代码的一个典型输入图像。5400b 引用的图 54 所示的一个网格结构用背景,在其上该输入切片被贴片。所述网格结构已经过相当多实验进行优化,以防止在由所述叶片对悬挂物的一个新层进行重涂的过程中,在所述空白区域中未固化悬挂物在所述构建箱中左右晃动。该算法自动计算所述切片图像的最大范围,确定可在所述构建区域内构建的部分数量,在正确的坐标勾画出它们,并创建沿所述网格结构的断裂线以便于所述构建完成后轻松拆卸部分。由所述代码生成的所述最终准备构建图像,看起来像 5400c 引用的图 54c 中所示的。代码通过所述切片图像的整个堆叠,以产生一个最终准备构建图像堆叠,该堆叠然后被供给到所述大面积无掩模光敏聚合机。

[0377] 根据所述 CAD 模型的复杂程度,对所述构建图像堆叠进行切片和处理可能花费大量时间。对于涡轮几何结构,目前需要两天的时间准备数据。有时,在各种 CAD 设计的评估中,会出现建立几个在特征上差异微小的设计的需要。在这样的情况下,实施可能需要一个基本设计的算法,实施直接在所述图像层次的所述次要特征增加和修改,以为所述预期 CAD 配置的每个生成所述构建图像是有益的。这将节省大量时间和精力,因为它避免重新切片整个 CAD 模型。这样的算法目前基于需要 - 需要在开发中。

[0378] 本章中给出为了使所述大面积无掩模光敏聚合方法的基本功能得以实现而开发的所述各种数据处理算法的一个详细概述。呈现的所述算法属于两大类:切片和后期处理。本章介绍的该工作小结见本节。

[0379] 由于在所述大面积无掩模光敏聚合方法中遇到的所述部分的所述几何结构复杂性,采用所述 ACIS 内核的一个直接切片方法被实施,以对本地 CAD 几何结构进行切片,而非添加制造业普遍使用的所述常规 STL 切片方法。在文献中提出的在先直接切片方法将直接切片吹捧为可解决 STL 文件造成的所有弊病。直接切片被认为是无错的和快速的,但是 STL 切片被认为是容易出错且耗时。本章表明,这种断言只有当使用简单几何结构才是真实的,正如许多先前报道工作的情况一样。当所述几何结构是复杂的,直接切片方法比 STL 文件切片产生更多的错误,且耗费更多的时间。本章中介绍的所述直接切片算法能容忍这样的错误。

[0380] 虽然直接切片方法是用于大面积无掩模光敏聚合方法产生切片数据的所述优选方法,STL 文件切片算法也由于这种文件格式的普遍而施行。对这种格式文件切片的多种方法被实施。使用 POVRA 的所述 STL 切片方法,一种图形渲染引擎,很容易实现,但用于大面积无掩模光敏聚合的目的不够准确。从使用所述角表数据结构的一个扩展版本的一个 STL 网格来重构拓扑信息的方法被实施。然而,对于复杂部分,如在大面积无掩模光敏聚合中所构建的,由该方法引起所述 SAT 文件尺寸被证明太大而无法处理。因此,一种读取所述小平面数据且将其排序成类似于文献中报道的数据结构的一种更直接方法被实施。虽然这些数据就小部分以相当快速切片时间产生,但对于 5.5M(这是所述大面积无掩模光敏聚合方法中所通常需要的)所述量级的高小平面计数,需要太长时间来处理(4 天以上)。因此,绕过所述小平面数据排序操作的一个快得多的方法被实施,并且发现降低了几个量级的处理时间(从 4 天以上至约一小时)。

[0381] 继所述切片操作,在准备用于大面积无掩模光敏聚合构建之前,所述输出数据需要进一步处理。为此目的,几个后期处理,如错误检查,部分放置和贴片,图像级几何结构变形等被执行,说明了这些的详细细节。总之,在本章中提出的工作建立了使用所述大面积无

掩模光敏聚合方法来生产成功构建所需的所述基本数据处理流程。

[0382] 用于边界表象模型的基于自适应切片的一中新容积偏离方法在本文开发。BRep 代表边界表象,一种广泛使用以存储 CAD 模型数据的数据结构。用于实现所述直接切片算法而使用所述 ACIS 建模内核使用所述边界表象格式,许多市售 CAD 软件包像 Solidworks, Pro/Engineer, CATIA, Unigraphics 等也如此。这种方法的动机和算法细节呈现于本节中。

[0383] 虽然几个自适应切片已在本文献中说明(已在上一节中所讨论),但是也存在一定的局限性,尤其是在自适应切片边界表象模型的情况。由于小平面数据的简单性,所述用于自适应切片的最为广泛使用的最大尖点高度标准的方法非常适用于 STL 文件。但是,当施行用于切片直接 CAD 模型时,变得极其复杂且计算密集。为计算每个层的尖点高度,实施一个复杂优化方案,这涉及计算在切片轮廓中在每个点的所述垂直正常曲率(其本身需要局部切线和法线向量的几个复杂计算),并且这些计算需要很长的时间。此外,该方法仅适用于像 B-样条和 NURBS 的参数曲面片,因而不能直接扩展至通用边界表象 CAD 模型,这些模型通过一个参数样条曲线和分析曲线的混合物定义。

[0384] 文献中呈现的用于自适应切片 CAD 模型的另一种方法使用一种区域偏离方法。这种方法,虽然相比用于 CAD 模型的所述尖点高度方法更简单,但困难重重,因为它没有考虑到该部分的所述局部表面几何结构。这会导致这样的情况:相对于所述原来 CAD 几何结构的所述添加制造部分的所述实际几何结构偏离,并未被正确的估计,如图 55 的实例所示。图 55 示出了阶梯效应,另外两个创建轮廓在内部区域大小相同。如图 55 所示,如果所述 CAD 几何结构是一个倾斜圆柱体,仍然会存在所述层状部分的阶梯效应,同时具有相同区域的切片轮廓。在这种情况下,该区域偏离方法将不能识别由于楼梯效果造成的所述几何结构偏离,因此将无法实现层高度适应性。

[0385] 文献中呈现的用于自适应切片 CAD 模型的另一主要方法在所述表面粗糙度参数 Ra 上使用一个最大限制。这种方法同样简单实施为将所述层厚度与所述表面粗糙度 Ra 相关的一个闭合形式表达,以确定将要使用的下一层高度。然而,需要开展大量经验和统计建模,以识别该固化层形状以及其与用于一个给定添加物制造技术的所述表面粗糙度参数 Ra 的关系。

[0386] 为了克服这些限制,并合理简易地实现自适应切片一个通用边界表象模型的最终目标,所述体积基于偏离自适应切片技术已经开发并实施。

[0387] 在本文阐述的体积基于偏离的方法中,计算所述尖点的全部体积,以便将其作为估计所述层状部分的所述几何结构偏离的估计的衡量使用。所述尖点体积的概念在图 56 中说明,在一个半球形部分和所述对应添加制造部分之间的所述几何结构偏离在图 56 中予以强调。图 56 说明了一个半球形部分的一个尖点体积。从图示中可以清楚看出,具有该部分中的所述对应 3D 层的每个 2.5D 层的所述几何结构偏离被标记为所述尖点体积。

[0388] 为自适应切片该部分,在每个切片高度,计算所述尖点体积,并用作确定下一个层高度的衡量。然而,所述尖点体积可显著地改变一个部分的高度,因为其是横截面周长,层厚度,以及与所述构建方向的局部表面切线矢量形成的角度的一个函数。因此,使用一个恒定尖点体积标准以确定所述层厚度是不可行的。为了减轻这一困难,所述尖点体积由所述部分的所述三维切片的所述体积标准化,以给出在所述添加制造部分的各层内百分比体积误差的估计(与所述原始几何结构相比较),如方程式 24 所示。

$$[0389] \quad \%VolumetricError = \frac{Cusp\ Volume}{3D\ Slice\ Volume}$$

[0390] 设置所述 % VolumetricError 的一个上限,且确定在每个切片高度的所述层厚度,以满足此上限标准。在沿该部分的长度的每个切片高度,首先使用所述最大可能层厚度来估计所述 % VolumetricError。如果所述计算误差小于所述最大限度,则使用所述最大层厚度。如果不是,则所述层厚依次收敛到一个值,该值产生用‘二分法’设计得出所述指定最大误差。如果所述得到的层厚度大于所述可被构建的所述最小层厚度,则将其用作下一层高度。否则,下一层高度设定为所述最小层厚度,并重复该操作。使用 ACIS 内核的这种方式的实施细节在下文给出。

[0391] 对于使用量偏离法的所述自适应切片操作的所述伪代码见算 12。所述给定名称的该部分先装入所述程序,并设置所有重要 ACIS 参数,如分辨率。下一步计算该部分的所述边界框以识别其最小和最大程度。切片在略高于 minZ 的高度开始。对于每个切片高度  $minZ < z < maxZ$ ,计算所述切片轮廓并创建切片图像。

[0392] 算法 12 自适应切片算法。

[0393] 1:load the given part and store in wig

[0394] 2:compute bounding box and store the bounds in min and max

[0395] 3:for z: = minZ to maxZ do

[0396] 4:create horizontal plane at height z

[0397] 5:compute slice by intersecting the plane with the part

[0398] 6:create image from slice

[0399] 7:z = z+layerThickness(wig, z)

[0400] 8:end for

[0401] 一旦创建所述切片图像,下一层的所述切片高度通过将该部分 (wig) 和当前切片高度 (z) 传至称为 layerThickness 的一个函数来确定。该函数的伪代码见算法 13。

[0402] 算法 13 计算层厚度。

[0403]

```

1: function layerThickness(wig, z)
2: low ← z
3: high ← z + MAXTHICKNESS
4: deviation = computeDeviation(wig, z, MAXTHICKNESS)
5: thickness = MAXTHICKNESS
6: mid = 0
7: while deviation ≠ 0 and |deviation - MAXTHICKNESS| > TOL do
8:     mid =  $\frac{high + low}{2}$ 
29:     thickness = mid - z
10:     if thickness > MINTHICKNESS then
11:         deviation = computeDeviation(wig, z, thickness)
12:         if deviation = 0 then
13:             break
14:         else
15:             if deviation > MAXDEVIATION then
16:                 high = mid
17:             else
18:                 low = mid
19:             end if
20:         end if
21:     else
22:         thickness = MINTHICKNESS
23:         break
24:     end if
25: end while
26: end function

```

[0404] 在该算法中,使用表示为低 (low)、中 (mid) 和高 (high) 的三种高度追踪器。为查找在高度  $z$  的所述层厚度,这三个跟踪器被首先分别设置为  $z, 0$  和  $MAXTHICKNESS$  (表示可被构建的最大层厚度)。首先,在高度  $z$  的该部分的所述%体积偏离以所述最大允许层厚度计算。如果此偏离是不为零或大于标为  $MAXDEVIATION$  的所述最大允许体积偏离,则下一层高度使用类似于在求根的所述‘二分法’设计予以调整 (直到所述体积偏离接近最大允许体积偏离)。

[0405] 所以,如果在  $MAXTHICKNESS$ ,所述体积偏离大于  $MAXDEVIATION$ ,所述高度标记中 (mid) 被调整至它的新值,如方程式 25 所示:

$$[0406] \quad mid = \frac{high + low}{2} \quad \text{方程式 25}$$

[0407] 然后计算由中给出的在该新高度的所述体积偏离。如果它仍然比  $MAXDEVIATION$  高,则高度设置为中的当前值,以便在下一迭代中,在一个较低高度计算所述体积偏离。如果所述中的当前值的所述体积偏离比  $MAXDEVIATION$  低,则所述中的当前值设置为低,以便在下一迭代中,在一个更高的  $Z$  高度计算所述体积偏离。以这种方式,通过连续迭代,所述中值趋同到一个  $z$  高度,当所述体积偏离在  $MAXDEVIATION$  的附近区域中由  $TOL$  表示的一个

限度范围之内。一旦所述中值趋同为一个稳定值,则计算下一个层高度,如方程式 26 所示,并返回。

[0408] 厚度 = 中 - Z, 方程式 (26)。

[0409] 这确保了在每个切片高度  $z$ , 该部分以最大可能层厚度被切片, 以满足所述体积偏离标准, 以便为该部分获得最小数目切片, 从而降低总的构建时间, 同时还保持精度。所述函数 `computeDeviation` (其用于在一个切片高度  $z$  和一个层厚度 <用厚度表示> 计算一个给定通用边界表象部分 `wig` 的所述体积偏离) 的实施是相当简单的, 且容易扩展到具有任意复杂度的部分。表明需要执行以便计算体积偏离的各种操作的该函数的伪代码见算法 14。

[0410] 算法 14 : 计算 % 体积偏离。

[0411]

```

1: function computeDeviation(wig, z, thickness)
2: //compute 3D slice:
3: block ← a cuboid of height equal to thickness
4: 3DSlice ← solid geometry obtained from intersection of wig and block
5: //compute 2.5D slice:
6: slicePlane ← a plane created at height z + thickness
7: contour ← intersection of wig and slicePlane
8: 2:5DSlice ← sweep contour down by a distance equal to thickness
9: //compute volume lost:
10: cuspVolume1 ← subtract 2:5DSlice from 3DSlice
11: //compute volume gained:
12: cuspVolume2 ← subtract 3DSlice from 2:5DSlice
13: //compute volume of 3D slice:
14: 3DVolume ← volume of 3DSlice
15: //compute % volume deviation:
16: deviation ←  $\frac{\text{cuspVolume1} + \text{cuspVolume2}}{3DVolume} * 100$ 
17: return deviation back to the calling function
18: end function

```

[0412] 首先, 计算所述三维切片几何结构。为了做到这一点, 等于所述给定层厚度 (表示为厚度) 的高度的一个长方体被创建, 并存储在所述变量命名块。可通过在所述给定部分 `wig` 与由块表示的所述长方体之间的 ACIS 执行一个固体焦点操作, 计算所述三维切片几何结构。接着, 所述 2.5D 切片 (假定各印刷层几何结构为矩形壁) 的几何结构依照下列步骤计算:

[0413] a) 在高度  $z + \text{厚度}$ , 创建一个切片平面,

[0414] b) 使用所述给定 CAD 部分 `wig` 计算所述平面的所述相交, 以获得所述二维切片轮廓,

[0415] c) 垂直地向下扫过所述二维切片轮廓, 其距离等于所述当前层厚度。

[0416] 一旦计算 3D 和 2.5D 切片, 在所述给定高度  $z$  和给定层厚度, 所述层状部分所损失的所述体积 (记为 `cuspVolume1`), 通过使用所述 3D 切片作为所述“空白”体及 2.5D 切片

作为“工具”体,执行减法操作,以及计算所得的几何结构体的体积予以确定。同样地,由所述层状部分(用  $\text{cuspVolume2}$  表示)获得的所述体积是通过从前面步骤交换“空白”体和“工具”体,以及计算所得几何结构体体积来确定。最后,可计算所述%体积偏离,如算法 14 中的 16 行所示,即  $3D\text{Volume}$  表示 3D 切片的体积。图 57 同时依据本文所述的各个方面示出了在对一个样本 CAD 部分切片时,用于计算所述体积偏离的这些步骤的每一步。

[0417] 对由三种不同基元(圆柱、圆锥和球体)和一个免模截面组成的一个样本 CAD 部分上的自适应切片的影响见图 58。图 58 是一个使用所述体积偏离方法进行自适应切片的样本 CAD 部分。所使用的最小和最大层厚度分别为 0.001 英寸和 0.1 英寸。百分之二的最大体积偏离被用作自所述适应切片标准。可从图 48 做出以下结论:

[0418] (a) 0.1 英寸的所述最大层厚度使用在具有垂直圆柱形横截面的所述区域,因为此区域中所述体积偏离为零。

[0419] (b) 比最大值要小的一个或多或少恒定的层厚度,用于对所述圆锥形部分切片。在这个区域中的所述层厚度中的微小变化是由于这样的事实引起的,即%体积偏离是一个相对量度,且其随沿所述部分的高度相对于所述横截面位置而变化。

[0420] (c) 对于所述球形部分,所述层厚度逐渐改变,厚度向顶部减少。

[0421] (d) 对于所述免模部分,所述层厚度连续变化,厚度增加或减少取决于所述本地表面复杂度。

[0422] 图 59 为样本部分提供层厚度变化对比高度  $z$  的一个图表 5900。图 59 提供了所述层厚度如何沿着所述部分的所述高度变化的一个图,以给出对上述呈现的所述结论的更清楚的说明。可看出,所述层厚度范围在所述算法中规定的所述最大厚度和最小厚度之间。

[0423] 图 60 提供了用于样本部分的所述体积百分数偏离对高度的一个图表 6000。图 60 给出了一个图,显示沿所述部分的所述高度的在每层的%体积偏离,以及其对比在所述最大层厚度的均匀切片,这如何就所述自适应切片而变化。可清楚看到,所述自适应切片部分,如在所述算法中被所述最大值限定所规定的,具有至多 2% 的一个体积偏离,而对于所述均匀切片部分,所述体积偏离从 0% 至接近 35% 的一个广泛范围内波动,作为在所述构建方向中一个位置函数。图 61 提供比例总体积误差对比样本部分高度的一个图表 6100。图 61 给出的一个图表,显示在所述部分就自适应切片及均匀切片失去或获得的所述总绝对体积  $\text{in}(\text{in}^3)$  的所述变化。

[0424] 从所示的结果看,显而易见的是,使用%体积偏离作为一个自适应切片标准的这种方法十分有效。因为它计算所述尖点的所述全三维体积,这种方法不受用于切片边界表象模型的所述面积偏离途径的局限。

[0425] 但应该指出的是,相比所述尖点高度度量(这是一个绝对的),所述%体积偏离度量是一个相对量度。然而,如所述结果所示,这种方法可得到十分满意的结果,且其明显的简单性(作为结果的更快的计算时间)以及处理具有更复杂几何结构的一般边界表象模型的可测量性(仅对比于由库尔卡尼和杜塔处理参数曲面样条)使其具有所述优势。所述容积偏离度量的所述相对关系可通过具有所述增在构建部分的更多设计知识(如最小特征尺寸,最大曲率区域等)来实现,同时在所述切片算法中设置所述参数(最小和最大层厚度范围以及所述最大容积偏离限制)。

[0426] 作为这项工作的未来范围,用于通过大面积无掩模光敏聚合制造的所述特定高压

涡轮叶片设计,可以执行实证研究将所述%体积偏离,与所述制造部分的所述绝对表面粗糙度参数 Ra 相关,以便为所述切片算法推断一个更准确的参数范围。然而,对于成功地制造自适应切片部分,一些硬件更改需要在大面积无掩模光敏聚合机上进行。在其当前配置中,以一个自动方式在一个构建中动态地改变曝光时间是不可行的(它仍然可在所述曝光各层之前,手动指定,但对于大构建来说,非常冗长)。需要获得这种能力,以便固化任意厚度的层。在重涂每一新层时,同时控制所述湿层的厚度也很重要,因为它依赖于像表面张力、悬挂等流变等现象。一旦这些变化实现,预计简单且可测量的自适应切片算法(如本文所提出的),将大大提高所述部分质量。

[0427] 此处所寻求的解决楼梯步进问题的另一个主要方法是通过灰度缩放和抖动。在大面积无掩模光敏聚合中使用灰度缩放和抖动背后的基本理念是,通过在所述构建图像中使用筛查灰度区域来有效地调制在一个单次曝光中的所述固化深度,用以替代在所述切片图片中使用用于所述固化区域的全白区域。在添加制造部分中观察到的如先前所讨论的所述楼梯步进效果,就是所述固化层拥有一个具有一个横跨所述全部曝光区域的恒定深度的 2.5D 几何结构的结果。对于朝下的表面(也就是说,对于构建方向,法线向量作出的大于 90 度且小于 270° 的一个角的表面),这意味着所述固化层在所述边缘超过该部分几何结构。这种效果见图 62。图 62 示出了在使用全白构建图像时,在朝下表面上所引起的楼梯步进。

[0428] 对于 6200a 引用的图 62 中所示的一个三维 CAD 模型,如果全白切片图形被用来表示固化该部分的每一层的所述曝光剂量,所导致的固化层超过所述实际表面轮廓,如在 6200b 引用的图 62 中所示的。

[0429] 为了纠正这种超过效应,该材料系统接收的所述曝光剂量需要在每个曝光图像的边缘(所述全固化深度导致超过所在)进行局部地调制,以便获得更准确地表示所述表面轮廓的一个固化轮廓。能量剂量 (E) 是所述光强度的一个产物(用 I 表示,单位为瓦/米<sup>2</sup>),曝光时间 (t),如下所示:

[0430]  $E = I * t$  方程式 (27)。

[0431] 因此,局部调节曝光能量剂量 E 的一种方法涉及到对曝光时间 t 的操作。然而,在目前的大面积无掩模光敏聚合中设备中,不具备在每次曝光中在本地操纵曝光时间的功能。用于操纵曝光剂量的另一种方法涉及操纵的光强度。由于大面积无掩模光敏聚合和大多数其他投影系统使用具有固定的输出功率的单个光源,在本地操作光强度会也非常具有挑战性。作为本地操纵所述实际光强度的一个替代方法,在抖动前进行灰度缩放被用来在操纵入射到所述材料的所述有效光强度。

[0432] 随后的用于产生灰度图像的所述算法的细节和方法呈现于本节中,用于在每个曝光内调制固化深度以减少对向下面表面的楼梯步进效果。固化深度  $C_d$  是光强度 I,树脂参数灵敏度  $D_p$  和临界能量  $E_c$  和曝光时间 t 的函数。如先前所述,曝光时间 t 在该方法中被保持恒定。通过前面部分中呈现的实验研究,已确定其余参数相应为所述灰度值 G 的函数。该函数对灰度值 G 函数的相关性见方程式 39。

[0433]  $C_d = D_p(G) \ln \frac{I(G)t}{E_c(G)}$  方程式 39

[0434] 这些函数相关性已经明确在前面的章节中指出。因此,有关 HDS 超细筛查分辨率的  $C_d$  和灰度值 G 的表达的最终展开形式为:

$$[0435] \quad C_d = (22.1G + 193.1) \ln \frac{GI_0 t}{35.6G + 101.8} \quad \text{方程式 (40)}。$$

[0436] 其中,  $I_0$  是来自一个全白曝光的全光源强度, 其经测定为 1.6 毫瓦 / 平方厘米, 用于在大面积无掩模光敏聚合中作为光源。因此, 使用方程式 40 中的表达, 对于给定的曝光时间  $t$ , 可计算导致所需的固化深度  $C_d$  的灰度值  $G$ 。确定切片图像中的每个像素所需的固化深度  $C_d$  和由此所需的灰度值  $G$  的算法的细节见下文。

[0437] 直接切片算法可扩展到输出灰度片图像, 而不是通常黑白图像。用于实现其的伪代码见于该算法 15。

[0438] 算法 15 : 灰度切片图像生成。

[0439]

```

1: wig ← given part
2: for each slice height z along the height of the part do
3: //compute 3D Slice:
4: block ← a cuboid of height equal to layerThickness
5: 3DSlice solid geometry obtained from intersection of wig and block
6: //compute 2D Slice:

```

[0440]

```

7: slicePlane ← plane at a height of z + layerThickness
8: 2DSlice ← contour obtained from intersection of wig and slicePlane
9: //compute Slice Image Pixel Values:
10: for each pixel in the slice image corresponding to the 2D slice
do
11: (x, y) ← coordinates corresponding to the pixel
12:  $C_d$  ← thickness of 3DSlice at (x, y)
13: t ← exposure time corresponding to a cure depth equal to
layerThickness
14: G ← gray scale value solved from Equation 40 using  $C_d$  and t
15: pixelValue ← G * 255
16: end for
17: end for

```

[0441] 所述给定 CAD 模型首先被加载到程序并分配给该变量 wig。对于沿部分高度的每个切片高度  $z$ , 首先计算三维切片 (表示为 3DSlice), 以便确定需要被固化的精确几何结构。其完成通过创建一个由块表示的长方体, 该块的厚度等同于由 layerThickness 表示的所述层厚度, 并计算它与所述给定部分 (由 wig 表示) 的所述相交。接着, 在高度  $z + \text{layerThickness}$  计算所述二维切片轮廓 (由 2DSlice 表示), 通过在这个高度创建一个切片平面, 并计算其与 wig 的相交。现在, 对于对应于所述切片高度  $z + \text{layerThickness}$  的所述切片图像中的每个像素, 首先, 识别所述像素的由  $(x; y)$  表示的所述相对应坐标值。所需实现的需要固化深度  $C_d$  通过计算在这些坐标的所述三维切片几何结构的所述厚度来确定。曝光时间  $t$  是固定的, 并对应于等同于使用在所述构建中的所述全部层厚度的一个固化深度。在方程式 40 中使用  $C_d$  值和  $t$ , 所述灰度因子  $G$  可通过使用任何像牛顿-拉夫逊或二分法的标准求根方法来求解。一旦当前位置所需的灰度值  $G$  被确定, 所述切片图像的所

对应像素值设定为 G\_255(对于一个 8 位灰度图像,像在这种情况下被创建的,一个 255 的值对应于全白,一个 0 值对应于全黑)。以这种方式,在所述切片图像中的所述每个像素的所述灰度值被确定,并创建所述切片图像。

[0442] 图 63 示出了根据本文所述的各个方面的一个用于产生灰度图像的方法 6300。6300a 引用的图 63 示出了用于计算灰度切片图像的样本的所述样本部分。6300b 引用的图 63 示出了识别对应于所述切片图像的每个像素的所需固化深度的过程。由与所述 3D 切片的光线相交的该过程所确定的所述固化深度,在每个像素值所需的所述灰度值又可从方程式 40 中所确立的所述固化深度模型计算。从该过程获得的所述灰度切片图像示出于 6300c 引用的图 63。6300d 引用的图 63 示出了通过抖动所述灰度切片图像获得的所述抖动灰度区域的一个放大视图。

[0443] 对于 6300a 引用的图 63 所示的所述样本部分,一个样本层被固化,用于展示该概念。图 64 示出了灰度曝光结果。6400a 引用的图 64 示出了通过一个全白曝光得到的所述固化轮廓。正如所料,该轮廓或多于或少于相当于 2.5D 截面。现在,使用上一节中所讨论的方法得到的所述灰度切片图像进行曝光的所述同一层的所述固化轮廓示出于 6400a 引用的图 64。可看出,通过所述灰度曝光得到的所述固化轮廓非常接近 6400a 引用的图 64 所示的所述样本部分的每一层的所述实际三维切片几何结构。

[0444] 这些单层固化轮廓作为一个概念证明。多层状部分可很容易地使用这种曝光技术来建,以产生平滑的向下表面。此外,由于所述固化轮廓现在可被精确地控制,可在构建中使用更高层厚度,而不会损害部分精度和表面平滑性,从而也有可能减少构建时间。

[0445] 如前一节中所讨论的,获得的固化宽度  $C_w$  是几个参数的所述复杂相互作用的结果,要精确地建模是非常困难的。因此,为了理解大面积无掩模光敏聚合悬浮液的所述固化深度现象,提出了一个简单实验研究。从以往经验看,挑选出四个重要参数,用于研究它们对固化宽度  $C_w$  的具体影响。它们是:

[0446] (a) 特征尺寸,

[0447] (b) 峰值光强度,

[0448] (c) UV 吸收剂浓度,以及

[0449] (d) 光引发剂 (PI) 浓度。

[0450] 确定每个所述参数的离散值,通过实验确定在每个所述参数的固化宽度特征。固化宽度通过曝光在载玻片上的已知长度的方法,以及通过测量获得的所述固化方格长度偏离来确定。图 65 示出了具有一个已知恒定方格长度和十个不同贴片的一个样本曝光图像。图 66 示出了通过曝光图 65 中的所述图像而获得的固化方格。图 65 示出了一个具有用于曝光的已知方格的一个样本图像,图 66 示出了获得的所述对应固化层的一个图像。

[0451] 但应注意的是,图 65 中的所述曝光图像中的每个贴片以不同曝光剂量进行曝光,因此在图 66 中所示的素数固化方格中获得的所得方格长度是不同的。在所述每个曝光剂量的所述对应固化宽度  $C_w$  被如下计算:

$$[0452] \quad C_w = \frac{l_{cured} - l_o}{2} \quad \text{方程式 (60)}。$$

[0453] 其中,  $l_{cured}$  是固化每个贴片后得到的所述方格长度,  $l_o$  是所述曝光图像中的方格长度。以这种方式,在所述参数 (a)、(b)、(c) 和 (d) 的每个参数的离散值,相对于所述能

量剂量的所述固化宽度趋势被识别。介绍用于固化宽度  $C_w$  的临界能量剂量和灵敏性,所述固化宽度  $C_w$  类似于固化深度情形下的  $E_c$  和  $D_p$ 。为清楚起见,从这里开始,不同符号被用于识别对应于固化深度和固化宽度的所述临界能量剂量和灵敏度。对应于固化深度  $C_d$  的所述临界能量剂量从这里开始用  $E_{d\ c}$  表示,用于固化深度的所述灵敏度用  $D_{d\ p}$  表示。同样,用于固化宽度  $C_w$  的所述临界能量剂量和灵敏度分别用  $E_{w\ c}$  和  $D_{w\ p}$  表示。额外上下标“d”和“w”被添加到通常参数  $E_c$  和  $D_p$ ,其中“d”表示深度,“w”表示宽度。

[0454] 一个被称为加宽深度  $B_d$  的新参数被引入,这给出了在这些层开始在宽度方向上固化之前可实现的最大固化深度。其确定是通过计算以等于所述固化宽度临界能量剂量  $E_{w\ c}$  获得的所述固化深度,在该能量剂量,侧向固化刚开始发生,如方程式 61 所示。

$$[0455] \quad B_d = D_p^d \ln \frac{E_c^w}{E_c^d} \quad \text{方程式 (61)}。$$

[0456] 这是用于表征每个成分的所述侧散射引起固化宽度扩大的良好测量。理想情况下,所述组合物应被优化,以获得最大扩大深度,从而得到具有良好层到层的粘接和最小过量侧散射的深度固化部分。

[0457] 此处介绍的用于分析大面积无掩模光敏聚合的所述材料系统的所述固化宽度特征参数,类似于用于表征所述大面积无掩模光敏聚合悬浮液的所述线宽。但是,将要示出,这里所获得的结果偏离在她论文中介绍的 quasi-Beer-Lambert 定律。这些差异可归因于以下原因:

[0458] 1) 在使用的所述设定曝光中的差异,

[0459] 2) 在所用固化时间中的差异,

[0460] 3) 计算固化宽度  $C_w$  的方法中的差异。

[0461] 从使用本节描述的方法通过实验研究获得的结果见下文。

[0462] 三种情况可能会介绍典型的添加制造方法的支架结构的需要。为清楚起见,这些被重新列出:

[0463] (a) 具有大悬伸的表面。

[0464] (b) 导致浮岛的表面或几何结构。

[0465] (c) 可能会翻倒的几何结构。

[0466] 如前面所提到的,这些情况的每一种必要支架的程度随每个添加制造方法变化。例如,选择性激光烧结 (SLS) 无须对于所述情况的任一情况的任何特殊支架,因为总是有一个未烧结粉床充当支架。另一方面熔融沉积模型制造 (FDM),在所有这些情况下,都需要支架,因为材料仅沉积在由所述部分几何结构包围的所述区域中,而所述构建体积的其余部分是空的,不像在 SLS 的情况下那样。对于所述立体光刻 (SLA) 过程,对于支架的需要介于这两个极端之间。因为在 SLA 中的所述构建体积,在某些情况下(基于所述部分几何结构),由一种粘性树脂构成,由该粘性介质提供的浮力足以支架所述部分,避免翻倒,从而避免在这种情况下对于支架的需要。

[0467] 从前面的讨论来看,很明显,虽然需要支架的一些常见情况存在,对于支架的需要程度相对于考虑中的所述添加制造方法具有不同性。相对于在所述特定大面积无掩模光敏聚合方法中这些情况的每种情况,对于支架的需要在本节中讨论。所述大面积无掩模光敏聚合方法,如前面所述,目的是为铸造高压涡轮叶片而构建陶瓷模具。因此考虑在所述大面

积无掩模光敏聚合方法中对于支架的需要,具体到在高压涡轮机叶片模具引起的所述几何结构的需要。图 110 示出了在一个具有代表性高压涡轮叶片模具中发现的所述特征。注释了一些显着特征,如所述前边缘,后缘,薄膜冷却销(冷却所述叶片的外部表面的所述前边缘和中间弦部),中间弦蛇形线(在中间弦区域内创建一个用于空气流动的蛇形线通道),前缘腔(供应冷却空气到所述前边缘薄膜冷却销),尖帽(创建用于冷却所述叶片的所述顶部边缘的一个空气腔),销翅片(冷却所述后缘的窄横截面)。而在建立这样一个复杂几何结构时,需要支架结构的这三种情况中的每一种都遇到了,可在大面积无掩模光敏聚合中对其进行处理的方式在下文中介绍。

[0468] 在构建所述高压涡轮叶片模具的所述复杂几何结构时,一些悬垂确实发生。图 67 示出了所述叶片模具的所述本地方向。在以该方向构建时,限定所述叶片的所述尖帽的特征导致非常大的悬垂,而这导致所述构建失败。不过,从以往的经验看,对于典型的高压叶片几何结构,可发现最大限度地减少这些悬垂的一个个方向,从而能够带来成功的构建。这样方向见图 68,这使得以前造成构建失败的所述尖帽特征在后缘从其根部更为逐渐地增长。图 68 示出了减少了所述原始方向观察到的悬垂的一个构建方向。

[0469] 因此,对于那种在所述大面积无掩模光敏聚合方法中遇到的几何结构,为悬垂结构增加支架的问题不是那么关键,可发现将导致可容忍悬垂(导致部分成功构建)的一个构建方向。这是理想的,因为任何额外添加的支架结构将完全处于所述建成部分的内部,且不可能消除。这导致在所述铸造叶片中的额外的非预期的特征,这将改变所述预期设计的所述冷却特征。然而,如果在将来遇到不具有任何能产生可容忍悬垂的可行方向的一个叶片几何结构,则需要处理该支架情况。

[0470] 在构建复杂集合图形时,如使用所述大面积无掩模光敏聚合方法的涡轮模具,所述浮岛问题是一个显著问题。在最简单几何结构中,可发现不会导致任何浮岛方向。然而,对于图 67 所示的那种复杂部分,通常不可能发现会消除浮岛形成的任何情形。即使以在图 69 中所示的最大限度地减少悬垂结构的方向,当所述中弦蛇形线和所述前缘腔的所述基础开始形成时,浮岛形成。图 69 示出于在所述原始方向观察到的减少悬垂的一个构建方向。图 70 示出了当所述前缘腔的所述基部的正在构建时所述部分的一个横截面。在所述框中突出显示特征显然不具备支架它的任何以前构建特征。

[0471] 当这样无支架特征被固化,因为其下方没有特征坚持,所述收缩应力对于所述特征的影响更大,并且它会卷起。此外,所述重涂过程施加给所述层显著的剪切应力,随着它扫过所述构建区域。当所述叶片扫过,在其下面有粘性陶瓷加载悬浮物的一层,形成一个边界层,这对所述平台施加曳力。观察到悬浮为非牛顿,但忽略这一事实,对于所述最剪切力可做一个粗略估计。在所述重涂过程的所述速度范围内的所述浆料的所述粘度被测定为在 400-450 厘泊范围内。所述重涂叶片在 6 秒行进 26 厘米的距离,且是在所述构建平台 200\_μm 以上的高度。以此速度和粘度,假设牛顿现象和一个线性速度分布,施加在所述部分上的所述剪切应力将是 100 帕的数量级。由于这样高的高剪切力和非支架特征由于收缩应力的卷曲效果,所形成的任何非支架特征将被造成所述构建失败的所述重涂手臂扫走。

[0472] 因此对于在一个构建中产生浮岛的任何几何结构,支架结构都是必要的,以获得成功部分。然而,如前面所讨论的,所有的所述几何结构特征、支架或以其它方式被封入到一体芯模具的所述外壳内,并且除去这些构建后支架是不可能的。这导致在所述铸造叶片

中的额外非预期功能,这可能对所述模具的所述设计冷却性能产生不利影响。所述浮岛问题可能是阻碍所述大面积无掩模光敏聚合方法构建任意复杂性的叶片设计的唯一限制。

[0473] 但是,必须指出的是,所述当前叶片被设计用于通过常规熔模铸造方法能力和限制进行制造。因为所述大面积无掩模光敏聚合方法进入满负荷生产,且通过所述过程生产的所述部分的所述铸造性被成功地证明,因此,针对该技术的先进模具设计范围具有一个巨大范围。此处介绍的工作是针对所述大面积无掩模光敏聚合方法的需要的该设计目标的第一步骤。

[0474] 需要支架的最后一种情况是部分在被构建时,由于其自身重量,部分翻倒的情况。在所述大面积无掩模光敏聚合方法中,这种支架要求是相当弱的。在一个网格结构的帮助下,所述部分被非常牢固地附着到所述构建平台。所述部分在构建时,其周围有一个共形脚手架。因此,当所述部分在构建时,在所述构建体积中,周围有脚手架,从而消除了所述部分由于重力力矩翻倒的可能性。

[0475] 因此,经过回顾,需要支架结构的所有情况,只有导致浮岛的情况造成在大面积无掩模光敏聚合方法的情况下部分失败的威胁,因此需要进一步解决。随后的所述算法方法的详细信息,用于将导致浮岛的所述几何结构与输入 CAD 模型识使用算法识别的所述研究方法以及用于生成支架结构的所述研究方法的详细信息见下文。

[0476] 为了最佳定位支架结构,首先需要一种方法,用来应用算法识别在一个部件构建中导致这些浮岛的所述几何结构。为识别在一个给定方向正在构建的一个部分的浮岛的目的而开发的一个算法的细节见本节。ACIS 内核再次用于实施该算法,因此它是直接对 CAD 模型作用。此过程的伪代码示出于算法 16。

[0477] 算法 16 识别浮岛。

[0478]

```

1: wig ← the given CAD part
2: layerThickness ← layer thickness used in the build
3: (Xmin, Ymin, Zmin) ← compute minimum extents of the part
4: (Xmax, Ymax, Zmax) ← compute maximum extents of the part
5: for each Z location along the height of the part do
6: //compute slice at height Z
7: (Xmin, Ymin, Zmin)1 ← (Xmin, Ymin, Z - layerThickness)
8: (Xmax, Ymax, Zmax)1 ← (Xmax, Ymax, Z)
9: block1 ← a cuboid created with extents specified by (Xbmin; Ybmin; Zbmin)1 & (Xbmax; Ybmax; Zbmax)1
10: 3DSlice1 ← geometry obtained from the intersection of wig and block1
11: //compute slice at height Z + layerThickness

```

[0479]

```

12:    $(X_{bmin}, Y_{bmin}, Z_{bmin})_2 \leftarrow (X_{min}, Y_{min}, Z)$ 
13:    $(X_{bmax}, Y_{bmax}, Z_{bmax})_2 \leftarrow (X_{max}, Y_{max}, Z + layerThickness)$ 
14:    $block_2$  a cuboid created with extents specified by  $(X_{bmin}, Y_{bmin}, Z_{bmin})_2$  &  $(X_{bmax}, Y_{bmax}, Z_{bmax})_2$ 
15:    $3DSlice_2 \leftarrow$  geometry obtained from the intersection of wig and  $block_1$ 
16:   //check for floating islands in  $3DSlice_2$ 
17:   for each disconnected lump  $i$  in  $3DSlice_2$  do
18:     for each disconnected lump  $j$  in  $3DSlice_2$  do
19:       check for intersection between lumps  $i$  &  $j$ 
20:     end for
21:     if no intersections found then
22:       lump  $i$  in  $3DSlice_2$  is a floating island
23:     end if
24:   end for
25: end for

```

[0480] 所述给定部分被首先被装入所述算法,并计算其最小和最大范围。沿该部分的所述高度的每个  $Z$  位置,创建一个由块 1 表示的长方体,其具有一个横截面面积,该横截面面积等于所述部分的所述边界框的所述横截面面积,以及一个等于层厚度的厚度。在记为 wig 和块 1 的所述部分间计算一个实体相交,以在所述部分的高度  $Z$  产生一个三维切片(由  $3DSlice_1$  表示)。同样地,计算在高度  $Z+layerThickness$  的一个三维切片(由  $3DSlice_2$  表示)。在对应于图 70 中所示的所述浮岛的所述高度,使用上述步骤计算的所述两个切片被示出于图 71 中。71 示出了在对应于图 70 所示的所述浮岛的所述位置的连续层的三维切片。为了说明的目的,示出了由几个层分隔的切片,因此所述明显较大的悬垂。对于连续切片,所述悬垂会很小,但由此产生漂浮特征也是如此,因此这将是难以察觉的。

[0481] 虽然,在所述图中因为层厚度非常薄(100\_M),所述切片看似二维,但是因为其被创建的方式,它们其实是三维的。在这些切片中的每个所述断开连接固体区域作为一个块存储在所述 ACIS 数据结构中。为了确定在所述第二个切片中是否存在浮岛,检查该切片的各块是否与所述第一个切片的各块有相交。如果所述第个二切片存在一个块,而且其不与所述第个一切片的任何块相交,则其被归类为一个浮岛,且需要创建支架结构。通过沿所述部分的长度为每个相继对的切片重复这样的操作顺序,可以在一个部分构建中识别导致浮岛的所有特征。这种操作可为所述部分的不同方向重复进行,可选择产生最小数量浮岛的方向。为使用这种方法识别的浮岛生成支架的所述算法的详情见下文。

[0482] 在呈现的大多数先前工作中,支架只沿着所述构建方向生成,该方向或者一路向下延伸至构建平台的所述基部,或直到紧邻的下一个几何结构特征。这个方法对于大面积无掩模光敏聚合行不通,因为所有所述支架都将被所述壳完全封装,所以无法删除。因此,一路至所述基部地创建修长支架将完全打乱所述预期冷却设计。相反,这里介绍的方法,试图以最小支架长度将所述识别浮岛连接至所述紧挨着周围几何结构,以对预期设计意图产生最小的影响。需要注意的是,这些支架结构连接的所述几何结构无须沿着所述构建方向直接在所述浮岛下方,这与以前介绍的方法不同。这种方法的伪代码示出于算法 17。

[0483] 算法 17 支架结构生成

[0484]

```

1: origin ← centroid of the floating island that needs to be supported
2: maxTiltAngle ← maximum tilt angle with which a support may be built
3: maxCurvature ← maximum curvature allowed at the point of contact
4: n ← the number of orientations user wants to output
5: r ← nominal radius of the support
6: candidateOrientationList ← discrete orientations within the "cone"
  underneath origin
7: for each orientation i in candidateOrientationsList do
8: shoot a ray from origin to the surrounding geometry of the part
9: check for smoothness of the surface at the point of intersection with
  the ray
10: curvature ← local surface curvature at intersection point
11: if surface is smooth and curvature < maxCurvature then
12: support:direction ← orientation i
13: support:length ← length of the ray in this direction
14: list ← support
15: end if
16: end for
17: sort the identified support orientations in list w.r.t length in
  ascending order
18: for i:= 1 to n do
19: retrieve ith orientation from the sorted orientations in list
20: sweep a circle of radius r from origin along the ray in orientation
  i
21: output the part
22: end for

```

[0485] 该算法将四个参数作为如下输入：

[0486] (1) 需要产生支架的所述浮岛的质心，用原点表示。

[0487] (2) 可能构造支架的所述最大倾斜角度，用 maxTiltAngle 表示。

[0488] (3) 所述用户想要输出的所述潜在方向的数量，用 n 表示。

[0489] (4) 用户指定的该支架的标称半径，用 r 表示。

[0490] 首先，通过从原点下离散所述“锥”（具有一个等于 maxTiltAngle 的顶角），创建一个可以沿着其构建支架的可能候选方向的列表。对于这些候选方向中的每一个方向，生成源于原点的光线，并计算它们的与所述部分几何结构的相交。在这些相交点的每一个，测定所述表面的平滑度。如果局部表面曲率很高，则很可能其对应于一个冷却特征，并且该方向被放弃。同样地，如果该相交接近两个或多个表面的边界，且所述相邻表面不保持连续性，同样也放弃该方向，因为根据经验观察，收缩应力此类角积聚，并导致所述支架或其它细长结构失败。在以这种方式消除连接到非光滑表面的方向后，其余方向作为用于支架增长的潜在方向进行存储。计算源自每个这些潜在方向中的原点的所述光线的长度，然后就其长度以上升顺序存储所述潜在方向列表。对于在所述排序列表中的第一 n 个方向，半径为 r 的圆柱形支架通过沿所述光线扫过一个圆形横截面进行创建，直到其连接到所述部分。

[0491] 图 72 示出了在图 67 中所示的使用这种方法的所述样本 HP 叶片上生成的各种支架件。可以看出,在所述各种候选方向中,其中许多方向被抛弃,因为它们或在高曲率区与所述表面相交,或者非常长。以绿色突出的所述支架结构是优选的,因为它是最短的,并且也在一个低曲率区域与所述部分相交。

[0492] 在图 67 中所示的所述形状的部分中所经历的许多情况,导致浮岛的所述特征连续增长(即,从一个小平面浮动区域增至一个较大特征),因此,从过去的经验可知,仅仅在图 72 中以绿色标注的所述类型的一个支架足够。图 72 示出了由该算法产生的支架。然而,当所述特征突然导致大浮岛,该算法可很容易地扩展,以用于制造多支架。对于支撑大浮动特征,显示一个给定尺寸的一个特定支架特征可支撑的悬垂的所述最大量的一个额外参数,需要纳入该算法中。基于该参数,所述大浮岛的所述区域可被细分为更小区域,并且该过程可针对具有一个额外约束的每个较小区域,以产生非相交支架。

[0493] 正如前面所注意到的,纳入到所述模具中以产生成功大面积无掩模光敏聚合构建的任何支架结构被完全被包封在一个共形外壳。因此,没有办法从所述模具后构建中移除这些结构,而这将反过来导致所述叶片铸件中的更多非预期特征。虽然这是所述大面积无掩模光敏聚合方法的一个局限,必须指出的是,当前叶片的设计是基于所能看到的传统制造技术,因此对于针对所述大面积无掩模光敏聚合方法的需要的制造设计具有巨大的范围。为了证明这一点,由纳入一个样本支架结构(如图 72 所突出显示的)获得的所述设计的所述性能分析在本节予以说明。直观地说,所述加入这样的支架特征将把某些所述冷却空气从所述中间弦蛇形线通道改道至所述前缘腔。这样做,它可能不仅去除了某些所述上部冲击冷却孔,而且也阻碍了在所述前缘的所述最低冲击射流。另外,由于所述冷却空气改道,可能没有足够质量流留在所述中间弦蛇形线用于冷却其提供冷却空气的所有其他特征(如尖帽等)。因此为了研究这一点,进行该支架特征的所述流和热分析。这些模拟的细节和所获得的结果将在下文讨论。

[0494] 为了简化所述啮合过程并减少计算次数,所述几何结构被简化为一个代表,但是更容易处理。一个  $25\text{MW}/\text{m}^2$  的恒定代表热通量边界条件被应用于所述前缘壁。一个 20 米/秒的等速被应用作为输入流状态,在所述蛇形线通道的底部,具有 5% 的湍流强度。进行了模拟,以解决所述雷诺平均纳维斯托克斯方程式和所述热方程式,用于对应于所述天然和改性(具有添加支架)几何结构的每个所述情形。图 73 示出了从具有和不具有一个支架结构的一个前缘的所述内壁获得的一个温度分布。可清楚地看出,与所预期的不同,在添加的所述支架的情况下的温度分布比没有支架的情况低得多。对于没有一个支架的所述情况,在所述前缘的所述下部区域有一个热点,而添加一个支架显著降低所述前缘壁出现的所述峰值温度。图 74 示出了在一个内部空腔的速度流线。可看出,在没有所述支架的情况下,从所述较低最冲击喷射的所述液流无法到达所述前沿腔壁的最底区域,这不是所述支撑的几何结构的情况。也可看出,与直观预期不同,所述支架结构不阻碍该较低冲击的所述流可清楚地看出,与所预期的不同,在所述增加的支架的情况下的温度分布比没有支架的情况下低得多。对于没有一个支架的所述情况下,在所述前沿的所述较低区域有一个热点,添加支架显著降低在所述前缘壁出现的所述峰值温度。图 74 显示了所述流的所述速度流线,以便更好的理解获得的温度结果。可看出,在没有所述支架的所述情况中,来自所述较低最冲击喷射的所述液流无法到达所述前沿腔壁的最底区域,这不是所述支撑的几何结构的情况。也

可看出,与直观预期不同,所述支架结构不阻碍所述较低冲击喷射,它也不缺乏来自冷空气的所述较高冲击喷射。

[0495] 相反,它增加了来自所述前缘腔最底部的所述质量流,从而提供更好整体冷却。此外,与最初预期的不同,所述支架结构的增加并未显著降低在所述蛇形线通道中的所述质量流,其反过来可对其它特征的所述冷却产生不利影响,如所述尖帽。对于所述两种情况,发现在所述蛇形线通道的出口的所述质量流率差异非常小(无支架情形下的 0.145 克/秒对有支架情形下的 0.137 克/秒),并且预计不会对叶片区域其他地方造成不利加热。

[0496] 因此,在这种情况下,纳入该支架特征是正确的。当然,在现实世界情况中,将需要进行很多进一步的分析工作,以便完全理解增加了这样一项新特征的效果。这种分析的主要意图是为了更好地理解,存在于特定针对所述大面积无掩模光敏聚合方法需求的多功能支架设计的所述巨大范围(该意义上的多功能,不仅有助于成功的大面积无掩模光敏聚合的构建,也提高了叶片冷却)。

[0497] 大面积无掩模光敏聚合是一种颠覆性添加制造技术,其已经被开发用于为高压涡轮机叶片的熔模铸造的陶瓷模具制造。本文中所介绍的所述工作处理所述大面积无掩模光敏聚合方法的所述数字数据处理和计算需求。已经介绍了促成所述大面积无掩模光敏聚合过程的一些数据处理算法,如直接切片,STL 切片,如错误校验的后期处理算法,部分定位和贴片等。讨论了改善所述部分质量的几种计算方案,如自适应切片、灰度,以及用于图像补偿的固化宽度研究。此外,也介绍了 CAD 数据预处理算法,尤其是对无支架特征的识别,以及一体芯模具的制造的内部支架结构的生成,适合于使用大面积无掩模光敏聚合方法。最后,介绍了目前尚不能制造但提供优于所述常规设计性能的一些新颖冷却设计。这种设计可使用所述大面积无掩模光敏聚合方法进行制造,从而提供了所述大面积无掩模光敏聚合技术颠覆高压涡轮叶片的所述熔模铸造现有技术的潜力的一角。在本章介绍了在本文中做出的独特贡献摘要以及沿着这些线的未来研究的范围。

[0498] 对于在此文中做出的独特贡献摘要在这里列出:(a)介绍了一种使用 ACIS 内核的容错直接切片算法。虽然以前的使用所述 ACIS 内核的直接切片方法在文献中进行了报道,但是他们都建议将直接切片作为针对在 STL 切片中所有固有问题的一种解决方法。他们声称,直接切片,不像 STL 切片中的情形,不会出错。在本文中观察到这未必是真实的。只有当给定几何结构是简单的时候,直接切片才不会出错。当该几何结构是复杂的时候,如通常见于高压涡轮叶片的几何结构,所述 CAD 部分容易从两个缘由出错:1)设计者对于有关所述部分的建模错误,以及,2)由于直接切片所需要的 CAD 翻译。在本文介绍的直接切片算法容忍这样的错误,并且可生产无错切片。

[0499] (b)对于 STL 切片,介绍了两种新方法:1)介绍了重构 STL 网络的所述拓扑信息的一种新方法,该方法通过扩展所述角表数据结构。使用此拓扑信息,STL 网格被转化为 CAD 文件,从而帮助纠错、几何结构性质(体积,质量中心等)评估以及对这些网络的修改。2)实施了一个非常快速 STL 文件切片算法。在文献中报道的前述 STL 切片算法使用了在小平面可能被切片之前的某种小平面对组策略。结果表明,这仅适用于输入网格尺寸小的情况。当网格尺寸变得非常大(涡轮机叶片模具的 5-6 百万小平面的量级),这些方法要耗费非常长时间(4 天的数量级)来处理和对所述网格进行切片。在本文中介绍的方法完全绕过所述小平面对组策略,从而带来了在处理时间方面提高了几个数量级(从几天到仅几分钟)。

[0500] (c) 介绍了基于图像数据的一个完整后期处理工作流程,包括错误检查、部分布局 and 贴片、图像层次几何结构修改、数据压缩等。大部分以前报告的方法与来自于切片的矢量数据一起使用。

[0501] (d) 介绍了用于 CAD 文件的基于自适应切片方法的新体积偏离。用于 CAD 文件的自适应切片的前述介绍的方法包括:基于尖点高度或面积偏离方法确定所述层厚度。在本文中指出这两种方法都有其局限性。虽然尖点高度是一个绝对标准并且对 STL 文件来说是一个好办法,在 CAD 部分上实施该方法涉及在每个切片位置上的大量复杂计算,使之难以扩展用于复杂部分。另一方面,面积偏离并不考虑所述表面几何结构,从而严重限制了其性能。

[0502] (e) 介绍了一种新的灰度缩放方法,以减少在法向矢量向下指向所述构建的所述基础的所述表面的楼梯步进效果。在所述文献中报道的先前灰度缩放方法或没有研究或报道灰度缩放对于所述材料的所述固化特征的效果。此外,用于所述大面积无掩模光敏聚合方法中的所述材料系统装有一个较高体积百分比的陶瓷颗粒,从而从根本上与所述文献中公布的用于灰度研究的所述材料系统不同。由所述涉及灰度对于所述固化特征的效果的所述直接数字化制造实验室的一名前成员所做的论文工作被纳入到所述数据处理算法,以产生减少对于具有指向向下的法向矢量的表面的楼梯步进效果的灰度图像。

[0503] (f) 进行了了解所述大面积无掩模光敏聚合悬垂的所述侧向固化现象的研究,介绍了一些令人吃惊的结论。据观察,所述侧向固化为所述大面积无掩模光敏聚合方法中的特征尺寸的一个功能。任何小于约 500 像素的特征呈现出不同侧向固化现象,该现象取决于其尺寸。同时也观察到,所述固化宽度随着在所述大面积无掩模光敏聚合方法中的能量剂量呈线性变化,与先前研究公布的 quasi-Beer-Lambert 假设不同。这些差异被归因于在所述曝光设置和所述固化宽度数据计算方法的差异。也介绍了显示固化宽度相对于光强度、光引发剂和紫外线吸收剂浓度的变化的研究。

[0504] (g) 介绍了用于识别 CAD 文件中浮岛以及生成针对于大面积无掩模光敏聚合进程需要的支架结构的算法。以前的方法主要是应用于 STL 网格,它们都产生与所述构建方向对齐的直支架,这些支架或从所述基底增长或从直接位于所述浮岛下面的所述几何结构增长。这些方法不能应用于在在大面积无掩模光敏聚合中制造一体芯涡轮机叶片模具,因为不可能将这些支架在构建后去除。因此,介绍了一种新的方法,其中所述浮岛被连接到最近的周围几何结构。也就针对于大面积无掩模光敏聚合的制造设计潜力,通过评估一个示例性支架结构的所述冷却性能途径来进行讨论。

[0505] (h) 最后,介绍了目前无法使用传统制造方法进行制造的新冷却设计。使用 CFD 和热分析技术对几个新薄膜冷却设计进行了分析,介绍了及其优于常规简单设计的改进。这项工作使我们更好的了解大面积无掩模光敏聚合提供的在打开一扇构建新一代涡轮叶片设计的设计机会的大门的潜力。

[0506] 图 75 示出了使用具有一个单边重涂机的一个材料重涂系统的构建精度损失。在图 75 中,所述具有一个单边重涂机的重涂系统可导致严重凹陷或隆起,这可导致构建精度损失。在一个实例中,对于第一个约 10 至约 20 层,一个叶片可除去过多的浆料,并且可在围绕一个模具的所述浆液区形成一个焊疤形。此外,在约 40 至约 50 层后,可围绕所述模具部分形成一个浆液穹顶形状。该隆起问题可能会变得严重,因为,例如,更多的层被添加,这

可导致一部分的构建失败。

[0507] 图 76 示出了根据此处所描述的各方面的具有一个多叶重涂机的一个材料重涂系统 7600 的实施方案。所述系统 7600 可如在图 76 中所描述地进行配置。此外,所述系统 7600 可被配置来处理在图 76 中所描述的所述凹陷和隆起问题,这可增加部分的构建精度。

[0508] 图 77 根据此处所描述的各方面示出了一个隔板印刷式供墨窗格的一个实施方案。所述隔板印刷式供墨窗格 7700 可在如图 77 中所描述的进行配置。

[0509] 图 78 示出了根据此处所描述的各方面的一个大面积无掩模光敏聚合机的一个实施方案。

[0510] 图 79 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机 7900 的一个实施方案。

[0511] 图 80 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机 8000 的一个实施方案。

[0512] 图 81 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机 8100 的一个实施方案。

[0513] 图 82 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台 8200 的一个实施方案。

[0514] 图 83 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台 8300 的一个实施方案。

[0515] 图 84 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合材料构建平台基板和基板底座 8400 的一个实施方案。

[0516] 图 85 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合材料构建平台基板和基板底座 8500 的一个实施方案。

[0517] 图 86 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合材料构建平台基板和基板底座 8600 的一个实施方案。

[0518] 图 87 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料重涂系统 8700 的一个实施方案。

[0519] 图 88 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台密封系统和材料重涂系统 8800 的一个实施方案。

[0520] 图 89 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台密封系统和材料重涂系统 8900 的一个实施方案。

[0521] 图 90 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台密封系统和材料重涂系统 9000 的一个实施方案。

[0522] 图 91 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料构建平台密封系统和材料重涂系统储料器 9100 的一个实施方案。

[0523] 图 92 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料重涂系统储料器和重涂机 9200 的一个实施方案。

[0524] 图 93 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料重涂系统储料器和重涂机 9300 的一个实施方案。

[0525] 图 94 示出了根据此处所描述的各方面的大面积无掩模光敏聚合机材料构建

平台密封、材料重涂系统储料器和重涂机 9400 的一个实施方案。

[0526] 图 95A, 95B 和 95C 示出了根据此处所描述的各方面的使用同时地在一个树脂的所述表面横跨移动的一系列成像头的一个实施方案。超 - 大面积无掩模光敏聚合使用了一系列成像头, 如在图 95A-95C 所示, 这些成像头可在所述树脂中曝光和固化的时候, 通过同时在所述光固化树脂的表面移动, 可以对所述光固化树脂的所述表面进行成像。图 95A 示出了在两排交错的图像投影单元中的所述超 - 大面积无掩模光敏聚合。如在所述图中的所述箭头所示, 所述投影单元可以反方向扫过所述树脂。所述树脂的所述整个表面由此可以在一个单通过而被形成图案, 提供了通量的增加, 超过当前大面积无掩模光敏聚合技术约 10X (其在所述树脂表面上使用一个单一成像头的蛇形线扫描。)

[0527] 图 96 示出了根据此处所描述的各方面的采用一个成像头二维阵列对所述树脂的所述表面同时形成图案的一个实施方案。在图 96 中, 所述技术可以在一个闪 - 大面积无掩模光敏聚合概念中应用。闪 - 大面积无掩模光敏聚合示出于图 96。闪 - 大面积无掩模光敏聚合可以使用一个二维投影阵列, 全部同步投影一个较大的图像部分, 但以高分辨率。所述光固化树脂的所述整个面积可由此以一个单闪或几个闪形成图案, 在闪之间所述阵列的小转位移动, 以覆盖在所述之前闪中未曾曝光的所述树脂的面积。闪 - 大面积无掩模光敏聚合可显著增加在曝光通量, 高达超过目前大面积无掩模光敏聚合技术的 50X。

[0528] 在大面积无掩模光敏聚合中使用的所述光源可以是一个高压汞灯。来自所述光源的所述发射光谱示出于图 97。有来自所述光源的三个不同发射区域, 它们是在 365nm 的 I- 线, 在 404.7nm 的 H- 线和在 435.8nm 的 G- 线。对于该光源, G- 线是最强的光谱特征, 其次分别是 H- 线和 I- 线。需要注意的是, 用于光敏聚合的所述第一峰是所述 I- 线, 这是由于使用的所述光引发剂表现出对于所述较长波长的可忽略性吸收。

[0529] 以前进行的关于灰度曝光的研究提出: 入射到所述表面上的所述光强度被有效地降低。这个特征可在于: 一个“灰度系数”,  $g$ , 其将该平均灰度光强度与所述“全白”光强度相关联, 并且可以通过方程式 3.1 进行描述。

[0530] 
$$g = \frac{I_{gr}}{I_0}$$

### 3.1

[0531] 其中,  $I_{gr}$  是来自于一个半色调灰度曝光的入射到所述 PCMS 上的所述平均光强度, 并且  $I_0$  是来自一个完全曝光的所述光强度, 当在所述数字显微镜装置上的每一个像素被转到所述接通位置。直观地, 所述灰度系数可以假设为等于所述图像的嗾使灰度值, 即在所述设计图像中的白色像素的所述百分比,  $G$ , 和独立于所述像素分布。对这个假设进行了测试, 其结果显示在图 98 中。

[0532] 对于所述灰度系数的确定, 使用由所述光学扫描系统的所述供应商提供的一个光电检测器。首先, 测定来自一个全投影的所述电流, 其对应于传递到所述光检测器的所述总光能。所述曝光面积在整个实验中保持恒定, 以给出对于所述光强度的一个直接关系。接下来, 测量来自在不同分筛查分辨率和灰度值的投影灰度图像的电流。所述筛查过程的完成使用环球显卡的 Harlequin RIP, 细节可在其他地方找到。所用筛查技术是 Harlequin 色散筛查 (HDS), 这是一种专有筛查技术。筛查分辨率在 Harlequin 色散筛查超细到 Harlequin 色散筛查超粗之间变化; 此处, Harlequin 色散筛查超细具有最高筛查分辨率 (1x1 像素半

色调单元) ;此处, HARLEQUIN 色散筛查具有最低筛查分辨率 ( $4 \times 4$  半色调单元)。所述灰度系数的决定是通过将所述灰度电流除以所述全面曝光电流。与这种测量技术相关的所述误差被确定为  $\pm 1\%$ 。结果表明所述灰度系数,  $g$ , 是相当于所述投影图像  $G$  的所述灰度的这一假说的有效性。从图 98, 发现所述线性拟合的所述斜率和截距分别是 1.004 和 -0.003。考虑到在所述实验过程中的所述误差, 可合理假设  $\sim 1$  的斜率和  $\sim 0$  的截距。从这个实验中, 可以得出结论: 入射到所述 PCMS 的所述表面上的所述平均灰度光强度,  $I_{gr}$ , 可以等于全白光强度乘以所述投影图像的所述灰度值  $G$ 。该结果由方程式 3.2 和 3.3 总结。

$$[0533] \quad g = G \quad 3.2$$

$$[0534] \quad I_{gr} = I_0 G \quad 3.3$$

[0535] 此外, 对于灰度曝光的所述平均效应, 考虑投影到所述 PCMS 的光强度的所述“真实”分布也很重要。其通过使用由 Ophir-Spiricon 提供的一个电荷耦合器件 (CCD) BeamGage® 激光束测量系统测量所述光强度分布来完成。此轮廓仪的所述光谱范围是 190-1320nm, 具有  $\pm 1\%$  线性度和功率。在所述 CCD 中的各像素大小是  $4.4 \mu\text{m}$ , 从而能够对所述空间光调制器光输出的进行子像素电平测量。所述轮廓仪提供了有关所述光学轮廓每秒每像素的计数信息, 它类似于光强度。采用这种设置, 可以确定所述光强度分布。然而, 由于缺少一个校准系统, 所述光强度在每个单独像素的所述实际量级不能被直接确定。对于该限制的克服可以通过测量在相同条件和相机设置下的所有光学轮廓克服, 从而能够测定在不同像素图案的所述光强度分布中的趋势。

[0536] 图 99(a) 示出了在所述焦平面来自于正在被投影的所述数字微镜装置的一个像素的所述光强度分布。所述顶部面板显示了标绘在所述  $x$ - $y$  平面中的所述光强度, 其与所述 PCMS 表面平行, 其中红色对应于高光强度, 蓝色对应于低光强度。以前的报告已经即将就单个像素的所述强度分布描述为高斯。。

$$[0537] \quad I(x, y) = I_0 e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{r^2}} \quad 3.4$$

[0538] 其中,  $I_0$  是所述峰光强度, 而  $r$  是所述高斯半径。

[0539] 图 99(a) 的所述底部面板示出了所述投影像素的所述横截面轮廓的一个曲线图。在所述轮廓中显示的所述曲线拟合通过一个二维高斯回归获得。从该回归, 所述高斯半径被确定为  $\sim 8.3 \mu\text{m}$ , 其与  $17 \mu\text{m}$  的像素分辨率是一致的。对于单个像素曝光的最大测量强度值为 3601 计数 / 像素 - 秒。来自于所述测量的统计误差确定为  $\pm 85$  计数 / 像素 - 秒, 而水平误差条显示所述数据点被平均的所述 CCD 的所述尺寸。为了更好地理解来自 SLM 投影的所述光强度分布, 研究了其他像素图案。数字图 99(b)-(f) 分别示出了所述强度分布和 2, 3, 4, 5 和 10 像素行的轮廓。Sun 等人也暗示其他像素投影可被当作高斯强度分布的总和。因此, 每个分布分别最为 2, 3, 4, 5 和 10 二维高斯分布总和进行回归。来自所有研究的所述投影的平均高斯半径为  $8.6 \mu\text{m}$ , 具有  $1 \mu\text{m}$  的标准偏离。然而, 观察到其他趋势: 无法描述具有一个恒定半径的高斯分布的一个叠加。在图 99(f) 中, 可以看出在山谷中的趋势, 其中在所述 10 像素线的中心达到最小, 这可能归因于衍射。这表明, 需要更详细的光学分析。然而, 用于立体光刻中的建模固化深度的常规技术使用激光的所述峰强度来预测所述固化深度。因此, 对于本研究, 评估来自所述各种强度分布的峰强度中的所述趋势已经足够。从这些实验, 可以看出, 所述峰强度与每个研究的所述线保持恒定。来自所述 10 像素

行的最大测量强度为 3683 计数 / 像素 - 秒, 这表明对于一个单像素投影, 只增加了 ~ 2%。

[0540] 上述结果表明, 所述像素分布可能对所述峰光强度的影响很小。为了验证这一点, 投影所述 SLM 的所有像素。该曝光的一个轮廓示于图 100。发现最大强度是 3959 计数 / 像素 - 秒, 这表明对于单个像素曝光的所述峰光强度仅相对于一个整片曝光降低仅约 10%。此外, 图 100 示出了所述光学投影的所述潜在复杂性, 这由于其对所述峰强度的忽略性影响而被忽略。观察到所述山谷的所述强度中的一个周期性分布, 其有一个 ~ 220  $\mu\text{m}$  的期间并可能是衍射的结果。

[0541] 当考虑灰度曝光, 该材料系统可以根据入射到所述表面上的所述本地平均的或一个中间光强度固化。上述表明, 投影像素的所述分布并不显著改变所述最大入射光强度。因此, 如果来自灰度曝光的所述固化深度类似于来自一个全白曝光的所述固化深度, 则可以得出结论: 所述 PCMS 根据所述本地光强度固化。然而, 如果来自灰度曝光的所述固化深度低于来自一个全白曝光的所述固化深度, 则所述 PCMS 的所述固化现象可被建模为一个有效光强度降低。为了研究对于灰度曝光的所述反应, 在一个固定曝光时间和筛查分辨率, 对固化深度进行测量, 所述灰度从 30% 到 90% 白色之间变化。所用的所述曝光是 600 毫秒, 而所述分辨率为 HARLEQUIN 色散筛查超精细。所得到的薄膜均相光滑, 没有在所述灰度曝光中使用的所述像素分布的迹象。在图 101 中的所述固化深度测量清楚地表明, 除了从灰度曝光制备的所述薄膜的所述均相性外, 所述固化深度随着灰度的降低而降低。这表明所述光强被有效地平滑并减少。从图 101 中的所述发现, 可假定灰度曝光导致所述 PCMS 固化, 如同所述光强度与所述投影图像的所述灰度值成比例地降低。该假说的有效性和限制是下面讨论的焦点。

[0542] 由 Atencia 等人的报告提出具有一个足够高筛查分辨率的灰度曝光带来强度方面地有效降低, 对应于所述投影图像的所述灰度。为了将所述固化现象与一个灰度光强度相关, 可决定改变关于所述固化参数的所述“真实”光强度的效果。这可以通过使用 UV 中性强度 (ND) 滤波器完成, 其在一个特定范围的波长上均相地衰减光强度。从爱特蒙特光学采购一个 0.3 和 0.5 的标称光强度 (OD) 的 UV-VIS ND 滤波器, 以均相地衰减从 200nm 到 700nm 的波长。使用一种类似于用在确定所述灰度系数的技术测量所述滤波器的所述传输。首先, 一个全白图像被投影到所述光电检测器, 产生的电流被测定。接着, 将所述 ND 滤波器 10202 放置在所述光源和所述光检测器之间, 测定来自一个衰减全白投影的所述电流。这两个电流测量值的所述比率为每个滤波器提供传输。测定所述 0.3 至 0.5 的 OD 滤波器的所述传输百分比为 56% 和 32%, 相比于未过滤光的  $1.6\text{W}/\text{cm}^2$ , 其分别对应于  $896\text{mW}/\text{cm}^2$  的和  $512\text{mW}/\text{cm}^2$  的一个光强度。为将所述 PCMS 曝光于一个降低光强度, 所述 ND 滤光器 10202 被放置在所述玻璃载玻片 10203 的顶部, 如在图 102 所示。

[0543] 在多个曝光时间对于每个所述不同光强度, 进行了固化深度测试, 来开发工作曲线。选定所述曝光时间, 来研究对于所述不同光强度的一个能量剂量恒定范围。图 103 示出了所得到工作曲线。还示出了来自一个  $1.6\text{W}/\text{cm}^2$  未过滤光强度的所述工作曲线以作比较。可以看出, 当所述光强度降低时, 对于一个恒定能量剂量的所述固化深度增加。其结果是, 来自光强度的最高源的所述固化深带来最低固化深度。因此, 所述临界能量随着光强度的降低而降低。而在第一反直观的, 应注意对于一个恒定能量剂量, 就一个较低强度的所述曝光时间增加, 即有更多时间以开展光敏聚合。从图 103, 也可以看出, 来自每一个光强度曲线

的斜率保持不变,这表明在这些曝光条件下,所述树脂灵敏度与光强度不具有什么相关性。

[0544] 图 104 示出了所述临界能量和树脂灵敏度关于光强度的相关性的一个总结。所述临界能量的所述线性回归,在图 104A 示出,带来下列经验关系。

$$[0545] \quad E_c = 18.31 * I + 109 \quad 4.1$$

[0546] 其中, $E_c$ 单位为  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  (毫焦耳 / 平方厘米), $I$  单位为  $\text{W}/\text{cm}^2$  (瓦 / 平方厘米),而斜率单位为  $\text{ms}$  (毫秒)。从该回归, $R^2$ 被确定为 0.999。这表明,所述临界能量与光强度具有一个较强线性相关性。无论是雅各布方程式(方程式 2.9)还是所述抑制剂方程式(方程式 2.12)都没有预测该现象。相反,这两种模式都假定所述固化参数对于一个给定材料系统是恒定的,与所述能量是如何传递到所述材料系统不相关。来自所述树脂灵敏度的一个线性回归的结果,示于图 104B 中,显示了一个接近水平斜率,表明所述树脂灵敏度相对地与光强度不相关,其遵循所述雅各布方程式。

[0547] 就灰度曝光等同于与所述投影图像的所述灰度值成比例的光强度有效减少,观察到具有灰度曝光的趋势可能类似于观察到的具有真实光强度减少的趋势,即,所述临界能量应当与所述灰度系数具有一个强线性相关性,所述树脂灵敏度应当相对地与所述灰度系数不相关。用于评估所述光强度减少假说的有效性一种方法是:假设所述假说是正确的,将来自灰度曝光的所述固化参数的所述现象与观察到的就光强度真实减少的所述现象进行比较。如果所述现象是相似的,则所述光强度减少模型可以被用于预测灰度曝光的所述固化特征。为了检验这一假说,开展了许多灰度曝光固化深度实验,在 5 个不同筛查分辨率,设计了从约 20% 至约 90% 的灰度图像: HARLEQUIN 色散筛查超细、细、中、粗和超粗。对于每个所述灰度值和筛查分辨率的工作曲线通过测量不同曝光时间的所述固化深度来形成。根据所述光强度减少假说研究,就每个灰度曝光的能量剂量范围为  $320\text{mJ}/\text{cm}^2$  (毫焦耳 / 平方厘米) 至  $1920\text{mJ}/\text{cm}^2$  (毫焦耳 / 平方厘米)。图 105 示出了来自 50%、40% 和 20% 白色的灰度以及具有 HARLEQUIN 色散筛查超细筛查的工作曲线的一个样本。

[0548] 从图 105,可以看出类似于一个光强度真实减少的趋势。随着所述灰度降低,所述临界能量也这样。这由一个等效能量剂量导致的所述 x 截距的一个移位以及固化深度的增加来证实。然而,注意到随着灰度减少,所述树脂灵敏度也显示了稍微下降,这偏离了所述光强度减少假说。这由所述斜率随着灰度降低而降低得以证实。这些结果指出,由灰度曝光带来的所述临界能量可能以类似于一个光强度真实减少的方式表现。然而,其他现象可能会影响所述树脂灵敏性,因为它的趋势偏离一个真实光强度降低。

[0549] 通过灰度曝光的持续研究,发现所述固化参数对于研究的各筛查分辨率表现出类似趋势。这显示在图 106 中。对于研究的所有所述 HARLEQUIN 色散筛查筛查分辨率,产生均相厚度的薄膜。在每一个灰度值,获得了所述临界能量和树脂灵敏性的相似值,无论筛查分辨率。这表明所述 PCMS 可能就一个范围的筛查分辨率以一个类似方式表现,以及,所述强度降低假设就每个筛查分辨率都是有效的。图 106 量化了在图 105 中观察到的所述趋势。可以看出,所述临界能量的一个线性回归准确地描述了随着灰度的所述变化,这是由所述高  $R^2$  值证明。这表明,在不同的分辨率,灰度曝光的所述临界能量以一种类似于其随着均匀光强度变化的方式变化。此外,非水平斜率的一个线性回归准确地描述了所述树脂灵敏性,这偏离对于观察到的对于变化光强度的趋势。由于树脂灵敏度和临界能量的趋势位于就每个筛查分辨率确定的误差范围内,所述结果可合并,以获得所述固化参数趋势的一

个更好回归；这可能有助于提供关于所述固化特征在从灰度曝光产生均相薄膜时的更好理解。

[0550] 来自均相灰度曝光的固化参数的所述趋势示于图 107 中。在该图中，所述图像灰度被转化为其有效强度，以将所述结果与从一个光强度真实降低获得的所述临界能量进行比较。来自灰度曝光的所述临界能量和真实强度测量均被绘制。从图 107，可以看出，所述灰度曝光临界能量位于从所述真实强度测量获得的所述临界能量的误差范围内。这表明，来自灰度曝光的所述临界能量表现如同一个光强度中的真实降低。对于所述临界能量的灰度曝光的影响获得的回归为：

$$[0551] \quad E_c = 19.6 * I + 103.7 \quad 4.2$$

[0552] 在这里，I 被通过将所述全白光强度乘以所述图像的所述灰度获得。就该回归获得的  $R^2$  值为 0.92，这表明该回归对于所述数据很是匹配。同时，可注意到，具有光强度的所述斜率仅变化 1.3mJ/W，而在零光强度的所述临界能量的变化仅仅是 5.3mJ/cm<sup>2</sup>，这位于在所述灰度曝光测量中获得的 5.6mJ/cm<sup>2</sup> 的所述平均置信区间内。除了  $E_c$ ，所述树脂灵敏度也显示了与光线强度的一个强线性相关。

$$[0553] \quad D_p = 11.3 * I + 194.8 \quad 4.3$$

[0554] 从该回归， $R^2$  被确定为 0.94，这表明所述回归是灰度光强度对于所述树脂灵敏性的所述影响的一个恰当表征。

[0555] 在当前灰度研究中，只考虑了带来均相薄膜的所述筛查分辨率。然而，直观地，如果曝光的和未曝光的足够大像素集合被投影到所述 PCMS，则薄膜均相性将丧失，并且，具有全白曝光的固化深度的区域将伴随着未固化树脂区域发展。迄今为止，很少有报告给出在所述均相过渡范围内的所述固化深度特征。然而，所述均相过渡是减轻聚合收缩应力方法的研究中的一个兴趣区域。。由 Ganahl 的报告表明，对于一个给定材料系统，存在减少在有一个光敏聚合薄膜中的所述应力的线宽和线间距的最佳尺寸。也可以注意到，由 Ganahl 生成的所述薄膜是不均相的，并且固化区域也没有彼此完全隔离。相反，该薄膜包含一个较大固化深度的区域，连接于具有一个较低固化深度的部分固化树脂的区域。这对应于均相过渡，其对应于对于曝光和未曝光区域的尺寸，所述材料系统为此不能创建由未固化单体的不同区域分离的固化聚合物的不同区域。所述转换度的该空间调制减少 GANAHL 研究的所述材料系统中的收缩应力，这表明它可减少用于在大面积无掩模光敏聚合中的所述 PCMS 中的收缩应力。

[0556] 为了将在所述均相过渡范围内的包含维度的特征纳入到所述多层构建中，必须预测所述固化深度，以确保合适结合到前层。对于所述均相过渡的研究是通过选择一个灰度值来完成的。此外，所述筛查技术被转化成一个良好定义图案，以容易地提取维度信息。所述选择图案是一个“棋盘”，这示于图 108 中。

[0557] 所述棋盘图案包括曝光和未曝光区域的交替方格。为了研究筛查分辨率的影响，所述方格初始的长度被依次增加。研究的所述方格长度的为从约 1 个像素至约 80 个像素，其对应于约 17 μm 至约 1360 μm。每个棋盘图案具有一个 50% 的图像灰度值。然而，随着所述筛查分辨率降低，所述图象在视觉上表现得灰色减少，更像是一个明显黑色和白色方格的图案。类似地，随着所述筛查分辨率降低，灰度曝光的所述光强度减少假设崩溃。

[0558] 在图 109 中的图像显示一个 600 毫秒曝光的所述均相过渡。在图 109 (a) 中可以

看出具有一个  $17\ \mu\text{m}$  方格长度的棋盘曝光的带来具有均相厚度的一个薄膜。然而,当所述方格长度达到图 109 (b) 中的  $85\ \mu\text{m}$  时,观察到所述薄膜厚度中的不均相性。这代表所述均相过渡的开始。图 109 (c) 和 109 (d) 描绘了对于  $170\ \mu\text{m}$  和  $255\ \mu\text{m}$  方格长度的从均相到所述持续偏离。随着所述均相过渡的进行,所述曝光区域的所述固化深度增加,而所述未曝光区域的所述固化深度减少。

[0559] 当表征在所述固化深度的喉使均相过渡效果时,在图 110 中可以看出,该均相过渡将恒定且均相固化深度的两个区域分离。当所述棋盘曝光图案的方格长度小时,所述具有较低固化深度的区域出现,这对应于灰度曝光。具有一个较高恒定曝光深度的所述区域来自于一个全白曝光。这两个区域由所述均相过渡分开,其中所述固化深度随着所述棋盘的所述方格长度就一个给定曝光时间的增加而增加。在图 110 中所示的所述结果中的一个有趣方面,曝光时间增加,所述均相过渡向右移位。所述 S 形回归的所述中心在对较大方格长度的曝光时间的增加后增加。所述 200 毫秒曝光时间的所述中心是在一个约  $172\ \mu\text{m}$  方格长度,而所述 900 毫秒曝光的所述中心位于一个约  $330\ \mu\text{m}$  方格长度。从这些固化深度测量,可以观察到所述均相过渡的所述平均方格长度范围为从约  $100\ \mu\text{m}$  至  $450\ \mu\text{m}$ 。

[0560] 所述均相过渡的该时间相关性进一步在图 111 中显示,其示出了具有一个约  $170\ \mu\text{m}$  方格长度的一个棋盘曝光。在一个 250 毫秒曝光时间,很清楚所述薄膜不是均相的。所述边长被测量为  $156\ \mu\text{m}$ 。随着所述曝光时间的增加,所述边长在 400 毫秒增大到  $173\ \mu\text{m}$ ,并且在 800 毫秒增加到  $203\ \mu\text{m}$ 。然而,在一个 2400 毫秒足够高曝光时间,形成了一个均匀厚度的均相薄膜。

[0561] 这些结果显示了对于所述灰度强度假说的所述尺寸和曝光时间限制,以及对于一个全白强度假设的所述限制。所述固化深度如果要在一个恒定曝光时间增加,那么所述有效强度也必须提高。结果是,在所述均相过渡范围内的所述强度并未很好地定义,并且取决于所述间隔长度以及曝光区域的所述大小。因此,所述雅各布方程式不能被直接使用,因为所述光强度无法被确定。但是,为了获得一个预测性固化深度模,所述雅各布方程式可被修改以忽略所述光强度,并只考虑所述曝光时间,其示于方程式 4.4-4.7。

$$[0562] \quad E = I * t \quad 4.4$$

$$[0563] \quad E_c = I * t_c \quad 4.5$$

$$[0564] \quad C_d = D_p \ln \frac{E}{E_c} = D_p \ln \frac{I * t}{I * t_c} \quad 4.6$$

$$[0565] \quad C_d = D_p \ln \frac{t}{t_c} \quad 4.7$$

[0566] 这里,  $D_p$  等同于在所述未修改雅各布方程式中的所述树脂灵敏度,  $t$  是所述曝光时间,  $t_c$  是所述临界曝光时间,而  $I$  是所述最大有效光强度。该方程式可以适用于使用的所述光源。但是,它可精确地预测所述固化深度,从而能够在大面积无掩模光敏聚合中的所述均相过渡内的实施曝光图案。所述临界曝光时间,  $T_c$ , 可以通过用于确定  $E_c$  相同的方法来确定。选择的棋盘方格长度的曝光时间工作曲线图被示于图 112 中。从这些结果,可以看出,随着所述棋盘图案的所述方格长度的增加,所述斜率(树脂灵敏度)首先降低,达到最小,然后增加。一个类似图案也显示在所述 x- 截距(临界曝光时间)中。在所述树脂灵敏度

和所述临界曝光时间中的最小值都发生在一个类似棋盘图案上。

[0567] 在图 113 中进一步研究这些现象,其中提供在所述均相过渡内得到的所述固化参数的一个摘要。当所述方格长度约为  $85 \mu\text{m}$  或更低时,所述固化参数是恒定的,表明可以做出灰度光强度假设。另外,当所述方格长度约为  $1360 \mu\text{m}$  或更大时,所述固化参数达到全白亮强度值,可以做出一个全强度假设以准确地预测所述固化深度。可以看出,在从灰度曝光到全白曝光的所述过渡中,在一个  $42 \mu\text{m}$  方格长度,所述临界曝光时间和树脂灵敏度都存在一个最小量。有趣的是,在此筛查分辨率,固化会比一个全白曝光更快开始。然而,由于树脂灵敏度的所述最小量,所述固化深度增速比一个全白曝光要慢得多。

[0568] 两个因素可以影响由投影灰度图像产生的所述固化深度。这是所述图像的所述灰度值,以及用于将所述图像转换为黑白像素分布的所述筛查分辨率。基于这些结果,出现三个不同曝光类型:全白曝光、均相过渡曝光和灰度曝光。

[0569] 用于预测所述固化深度的一个标准方法与所述总能量剂量相关,并与光强度不相关。然而,在前面讨论中描述的结果明显违背均匀光强度以及灰度光强度的降低的该评估。在均匀光强度降低的所述情况中,确定所述能量被传递到所述 PCMS 的所述方式影响所述临界能量,其中增加光强度对所述临界产生效果。还观察到这一效果随着灰度曝光,并且并作为结果,用于预测和解释所述临界能量随着均匀光强度变化的概念也可以被用于预测所述临界能量随着灰度光强度变化。最近,所述光强度与所述临界能量的相关性已被确认,模型已被开发,以描述这个现象。当入射到所述 PCMS 的所述光强度增加时,初级自由基的所述引发率受到直接影响,显示于方程式 2.2 中。如果所述光强度增加,产生用于聚合的更多初级自由基。一个较高引发率将提高聚合物链增长的所述率。。

$$[0570] \quad R_p = k_p [M] \left( \frac{R_i}{2k_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 5.1$$

[0571] 其中  $K_p$  和  $K_t$  是增长和终止的所述率常数,被认为是与所述引发率不相关的重要特征。因此,随着光强度的所述固化深度变化可以被认为是在引发、增长和终止反应率之间的一个竞争结果。这个概念由哈洛伦等人开发的一种简化自由基消耗模型的基础。从概念上讲,如果,由于一个高光强度,并且相比  $K_p$ ,所述自由基引发率较高,则过量自由基会出现在所述 PCMS 中,并且所述自由基消耗反应(如重组、诱捕和去激发)潜在可能性将会增加。其结果是,所述产生的自由基的一部分不会有助于聚合。因此,在较高光强度,需要更多光子(较高能量剂量)以形成一个等效固化深度。这些概念可以由方程式 5.2 来表示。

$$[0572] \quad E_c(I) = E_{c,DE} + E_{c,excess} \quad 5.2$$

[0573] 当  $E_{c,DE}$  是所述“剂量当量”临界能量,其对应于所述光强度范围内,其中所述临界能量是恒定的,并与光强度不相关,  $E_{c,excess}(I)$  是对大于所述剂量当量强度范围的光强度的曝光的结果的临界能量的增加。所述剂量当量临界能量可通过在方程式 2.12 中的所述抑制剂用尽模型来预测。因为 HDDA 是一个快速反应单体,发现在低光强度,所述 PCMS 显示剂量当量。这由方程式 5.3 表达,,在方程式 5.4 中,提出了一个最小光强度的表达式。

$$[0574] \quad E_c = E_{c,DE} \left( 1 + \frac{I}{I_{min}} \right) \quad 5.3$$

$$[0575] \quad I_{\min} = k_p [M] f h \nu \quad 5.4$$

[0576] 其中,  $I_{\min}$  是用于说明剂量当量的所述过渡光强度,  $k_p$  为所述增长率常数,  $[M]$  是说是单体浓度,  $f$  是一个比例系数,  $h$  是普朗克常数, 而  $\nu$  是所述入射光的所述频率。如果所述光强度比  $I_{\min}$  低, 所述系统表现为与光强度不相关, 如果所述光强度大于  $I_{\min}$ , 所述系统与所述光强度相关。提出用方程式 5.5 来描述临界能量随着光强度的变化。

$$[0577] \quad \frac{\delta E_c}{\delta I} = (1 - \Phi) \left( \frac{\gamma_{INH} C_{INH} + \gamma_A C_A}{\Omega / k_p [M] s_p} \right) \left( \frac{1}{c_p} \right) \quad 5.5$$

[0578] 其中  $\gamma_{INH}$  和  $\gamma_A$  是所述抑制剂和吸收剂的有效性,  $C_{INH}$  和  $C_A$  是所述抑制剂和吸收剂的浓度,  $f$  是一个比例因子。从这个方程式, 预测在临界能量的所述变化将与光引发剂浓度成反比, 与抑制剂和吸收剂浓度成直接正比。然而, 对于一个选择的制剂, 临界能量中的所述变化被预计是线性的。发现用于具有灰度和均匀光强度的所述临界能量的所述线性趋势表明, 该模型可被用于预测临界能量与光强度的相关性。但是, 应该指出的是, 所述预测值偏离所述测量值。哈洛伦等人提出的临界能量随着随着光强度的所述变化值在 0.08mJ/mW 和 0.1mJ/mW 之间, 与方程式 4.2 中所示的该研究获得的 0.02mJ/mW 值截然不同。这表明, 有可能存在导致所述临界能量与所述光强度相关性的其他效果。可能考虑的一些其他因素是: 研究曝光剂量的所述范围的所述变化, 和对不同光源的使用。如在之前讨论中描述的所述测量固化深度, 相比哈洛伦等使用的那些, 在更高能量剂量。因此, 差异可能已经由于光敏聚合反应不同阶段形成。在低曝光剂量时, 所述 PCMS 是在所述引发阶段, 而在一个更高剂量, 聚合是在所述增长和终止阶段。其结果是, 如增长链的降低移动性等因素可能影响对于光强度的所述相关性。使用不同光源可改变初级自由基的所述引发效率。具有引发初级自由基的一个较低效率的一个光源可能会降低自由基耗尽反应, 导致随着光强度的更少变化。

[0579] 当研究真光强度变化对于所述树脂灵敏度的影响时, 发现其表现为与光强度不相关, 这与哈洛伦的结果是一致的。但是, 可以在上述描述的图中看出, 灰度曝光产生树脂灵敏度的变化, 其中所述树脂灵敏度随着灰度光强度降低而降低。这表明, 当所述临界能量可以被视为光强度真减少的一个函数, 所述树脂灵敏度可能不能。由于与高负载陶瓷悬浮液中光散射相关的所述复杂性, 可能要求数值模拟, 以充分研究该现象。但是, 对于该效应的一个可能解释可在所述曝光技术的所述差别中发现。当一个均匀分布光强度被投影到所述 PCMS, 吸收只能垂直进行。这与灰度曝光不同, 其中入射光强度是不均匀的。作为散射的结果, 吸收可深度和宽度都分布。当在所述投影图像中的白色像素的百分比所述较高时, 所述吸收的大部分是随着深度。然而, 随着所述灰度值减少, 所述区域随着横向吸收百分比增加。横向吸收的该增加可能减少所述垂直吸收。由于所述工作曲线只测量所述固化深度, 对于树脂灵敏度的所述决定为垂直吸收。这可能是散射效果的基础, 用于产生树脂灵敏度与所述投影图像的喉使灰度值的相关的依据。

[0580] 当投影到所述 PCMS 的一个灰度图像的所述筛查分辨率位于所述均相过渡中, 无论是所述灰度光强度还是所述全白光强度都不能精确地预测所述导致的固化深度。当考虑该长度规模内的曝光特征时, 考虑灰度曝光如何可从由未曝光区域隔开的充分曝光区域形成是重要的。在上述讨论中, 表明来自一个像素投影的所述峰强度为由一个全白投影导致

的所述峰强度~90%，其中所述数字显微镜装置的每一个像素被接通。类似地，测定所述棋盘曝光图案导致的所述峰强度，确认其也具有所述全投影强度的~90%内的峰值光强度。

[0581] 结果是，来自灰度曝光的所述固化深度的所述预测偏离了在立体光刻中预测所述固化深度的所述常用方法，该方法使用所述激光束的所述峰强度来预测所述固化深度。与此相反，灰度曝光根据所述投影图像的所述灰度值固化，对应于入射到所述 PCMS 的所述平均光强度。当所述分辨率筛查进入所述均相过渡，所述 PCMS 开始偏离于该平均效应。这表明所述 PCMS 具有某些临界尺寸，对此所述光强度被分布或平均。从概念上讲，它可以解释该材料系统有它自己的“像素”，其中将输入到“像素”功率除以它面积是所述得到光强度，其导致所述 PCMS 中的固化。可以假设，对于散射系统，所述材料系统的像素的所述尺寸由所述散射长度来决定。由于陶瓷颗粒负载，光可被分散而不是被所述光引发剂所吸收。其结果是，所述光强度被横向扩散到未曝光区域。为了预测所述散射长度和所述 PCMS 的随后横向分辨率，能够考虑所述树脂灵敏度方程式，其显示在方程式 2.11 中，并可以重新安排以解决散射长度。

$$[0582] \quad l_{sc} = \left( \frac{1}{D_p} - (1 - \Phi)(c_p \epsilon_p + c_A \epsilon_A) \right)^{-1} \quad 5.6$$

[0583] 这个方程式促成对于所述光强度的所述预测，对此所述 PCMS 就任何长度规模固化。图 114 示出了所述 PCMS 内的所述光强度如何能够由所述“散射长度像素化模型”进行预测的一个图表。在这个模型中，所述 PCMS 分辨率被定义为所述散射长度，其转换成所述 PCMS “像素”的所述半径。输入到该像素的所述光强度在所述像素区域进行平均，以在所述像素中心获得一个有效光强度。然后所述像素中心从所述先前位置转换一个增量距离，所述强度被平均到所述新中心的所述散射长度像素区域。该过程在所述整个曝光区域被重复，作用于通过增加在未曝光区的所述光强度和减少在曝光区域的所述光强度，来平滑所述光强度。

[0584] 为了正确地预测所述光强度，选择正确树脂灵敏度来确定合适散射长度。在均相过渡曝光中，所述树脂灵敏度随着所述棋盘图案中的所述方格长度变化。该变化可通过提出用于解释在灰度曝光中观察到的树脂灵敏度中的所述降低相同的机制进行说明。随着来自灰度曝光的曝光区域之间的分隔增加，由于散射，从而允许更多的吸收横向发生，这导致  $D_p$  降低。然而，随着所述像素分布接近全白曝光，横向吸收减少，而所述垂直吸收增加至所述全白曝光树脂灵敏度。因此，为了预测均相过渡曝光内的所述固化深度，使用每个特定筛查分辨率的所述树脂灵敏度值。

[0585] 除了选择用于方程式 5.6 的所述恰当树脂灵敏度输入，应当知晓摩尔消光系数。可以从文献中获得这些值的估计。用于预测各种筛查分辨率的所述光强度分布的所述参数的总结示于下表中。在图 114 中所示的所述像素平均技术被用来预测由所述 PCMS 经历由均相过渡曝光导致的所述光强度分布。

[0586] 表：基于方程式 5.6 的所述散射长度计算中使用的属性概要。

[0587] 用于预测所述散射长度的材料特征

[0588]

$\epsilon_p$	80	(L/mol-cm)	[43]
[0589]			
$\epsilon_A$	2300		
$c_p$	0.102	(mol/L)	第2章
$c_A$	0.002		
$\Phi$	.55	vol%	

[0590] 用于研究的棋盘筛查分辨率的散射长度

[0591]

方格长度 ( $\mu\text{m}$ )	$D_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$l_{sc}$ ( $\mu\text{m}$ )
17	216.6	247
170	199.9	226
340	186.6	209
510	200.8	227

[0592] 来自这些模拟的结果示于图 115 中,用于 17  $\mu\text{m}$ , 170  $\mu\text{m}$ , 340  $\mu\text{m}$  和 510  $\mu\text{m}$  的选择棋盘筛查分辨率。最初,当所述棋盘图像的所述方格长度小时,其结果是:在所述投影图像的所述灰度值,光强度均相减少,对于所述棋盘曝光图案,其是 50%。因为所述棋盘图案的所述方格长度增加,在所述曝光区域中的所述光强度增加,在未曝光区域所述光强度减少。一旦所述方格长度足够大,所述光强度到达所述全白曝光强度。

[0593] 从图 115,可以看出:当所述方格长度接近 510  $\mu\text{m}$ ,所述峰光强度达到所述全白曝光强度。该模拟结果具有一个很强实验验证,这在上文描述的图中有显示,其中所述固化深度,随着一个提高的方格长度,达到平稳状态。这是达到所述峰全白光强度的一个结果。而在一个高负荷陶瓷悬浮液中的光散射是复杂的,该散射长度像素化模型表明,它可提供入射到所述 PCMS 的所述散射光强度分布的一个精确估计。

[0594] 当考虑实验固化深度测量,所述固化深度将由所述固化样本的最大厚度决定,这将由所述 PCMS 经历的最大入射光强度导致。从图 115 中的所述模拟,通过方程式 5.7 如下确定所述最大光强度和预测所述固化深度:

[0595] 
$$C_{d,max} = D_{p,sr} \ln \frac{I_{max} * t}{E_c(I)}$$
 5.7

[0596] 其中  $D_{p, sr}$  是用于所述选择筛查分辨率的所述树脂灵敏度,  $E_c(I)$  是在方程式 4.2 中所示的所述强度相关临界能量,  $I_{max}$  为从所述模拟获得的最大光强度,  $t$  是所述曝光时间。将来自这些模拟的结果与图 116 中的所述实验工作曲线进行比较。可以看出:该散射长度像素模型精确地预测所述最大光强度。从这些模拟中得到的所述  $R^2$  值介于 0.89 至 0.99 之间。由于这些高  $R^2$  值,这表明该散射长度像素化模型准确地简化了在陶瓷加载混悬剂中所述光散射复杂现象。并且,该模型引入了新长度规模,这能够用于大面积无掩模光敏聚合,用来在所述均相过渡中制造特征。然而,该模型的一个可能限制可能是确定所述目标筛查分辨率的所述有效树脂灵敏度所需要的。该可能限制可通过开发一种在所述均相过渡内接近所述树脂灵敏度或散射长度的方法来克服。

[0597] 除了变换由所述 PCMS 经历的所述光强度的均相过渡曝光,在上述描述的图中也

显示出了：所述均相过渡与曝光时间相关。这可以归因于固化宽度增长。虽然由所述 PCMS 经历的所述光强度分布可以被假设为与曝光时间不相关，来自高光强度区域的所述固化宽度会成长进入低光强度区域，其可以通过一个适应雅各布固化宽度方程式来描述，如在方程式 5.8 所示。

$$C_w = B \sqrt{\ln \frac{I_{max} t}{E_c(I)}}$$

5.8

[0599] 其中， $C_w$  是所述固化宽度， $B$  是所述 PCMS 像素的所述直径，其为  $B = 2l_{sc}$ 。当所述曝光时间增加，最终所述固化宽度将与来自一个相邻投影区域的所述固化宽度重叠。因此，在低曝光时间的所述均相过渡内的筛查分辨率可以是在高曝光时间的具有均相厚度的均相层。这表现在上述描述的用于一个  $170 \mu m$  方格长度的图中。

[0600] 描述了灰度和均相过渡曝光的机制，研究了所述固化参数随着灰度光强度变化的原因。得出的结论是：所述临界能量表现得相当于均匀光强度中变化趋势，其可通过由哈洛伦提出的所述自由基消耗模型恰当预测。发现所述临界能量与在所述临界损耗模型中预测的光强度呈线性变化。然而，所述变化的所述量级并没有准确地预测，这可能与在所述研究的能量剂量范围中的差异以及在所述光源中不同性相关。发现所述树脂灵敏度随着灰度光强度的降低而降低，这与均匀光强度变化的所述现象偏离。提出这与所述曝光方法中的所述差异相关，其中在灰度曝光所用的所述筛查技术促成侧向散射和后续吸收，这可减少由固化深度工作曲线测量的垂直吸收。在上面讨论中，描述了均相过渡曝光背后的机制，并提出了所述“散射长度像素化模型”来预测所述 PCMS 所经历的在均相过渡曝光中的所述光强度。该模型将所述散射长度作为所述材料系统的所述临界分辨率，其中所述“像素中心”的所述光强度通过将所述散射长度内的所述总入射功率除以所述散射长度面积来获得。在选定棋盘曝光图案，对该模型的有效性进行了评估，发现对于所述固化深度的预测达到一个很高精度水平。讨论了所述均相过渡的时间相关性，提出了其与所述固化宽度相关，其中所述曝光的直径为所述散射长度的两倍。

[0601] 在一些实施例中，大面积无掩模光敏聚合可被用于制造无支架几何结构，降低在 BBO 中由聚合收缩应力导致的内部应力而出现的缺陷。下面讨论的是由于灰度曝光在所述转化度中观察到的趋势，其中陈述了灰度曝光和筛查分辨率的所述效果，并将其与全白曝光比较。所有讨论的是用于利用灰度曝光制造无支架特征的一个框架。也呈现了产生灰度支架结构 (GSS) 的有效性，并对结果进行了讨论。讨论了降低在大面积无掩模光敏聚合中使用灰度曝光的缺陷的一个框架，陈述了该框架有效性，讨论了灰度对于其他类型缺陷的影响。

[0602] 在一些实施方案中，理想的是开发用于大面积无掩模光敏聚合中的纳入灰度曝光的一种固化深度模型。它可以促成，例如，预测曝光剂量或曝光时间，以产生所述理想固化深度，以保证粘附到前层。然而，所述固化深度模型并未提供关于聚合度的任何信息，该信息有助于作出哪个灰度适合于处理大面积无掩模光敏聚合所面对问题的决定。在另一方面，FTIR 测量可以提供关于单体转化程度的信息，这直接关系到聚合度。对于无支架几何结构的制造，例如，灰度曝光可施加到周围区域，以提供一个 GSS，其中转换的一特定程度将对应于一个合适支架结构。此外，容积皱缩和皱缩应力信息可以从转化度和转换测量率而

获得。

[0603] 当考虑灰度曝光对所述转化度的影响时,两个因素可能对于调节一个全白曝光之间的所述转化度起到重要作用,即,(1)所述灰度值;以及(2)所述投影图形的所述筛查分辨率。

[0604] 首先,可研究所述均相灰度曝光影响。然后可以从所述得到的红外光谱(根据等式 2.13)计算所述转化度。所述研究的灰度值分别为 20%,40%,60%和 80%。此外,对一个全白 100%曝光的转换度进行了研究,以作为参考。测定在不同曝光时间的每个灰度值的转化度,以便保持能量剂量的一个恒定范围。转换测量度的结果示于图 117 中。由 Ogliari 等的报告表明转换测量度可以通过 Hill 的三个参数非线性回归(其中  $R^2$  值为 0.99)<sup>1</sup>来回归。同样地,每个灰度曝光被回归到希尔方程式,获得大于 0.98 的  $R^2$  值。其结果是,这些曲线可以用来获得对于聚合趋势和率的了解。

[0605] 光敏聚合可以在三个阶段描述:引发、增长和终止<sup>2</sup>。这些阶段在 117 图中观察到。最初,在低曝光时间,转化率缓慢地增加,这主要是由于引发自由基物种的有限活动性。在引发后,所述单体被快速转化,以增加所述分子量和形成一个交联聚合物网络,这在所述增长阶段发生。所述终止阶段经历自动减速期,其中链增长变为控制的扩散,而增长临界基链的所述移动性降低。在关于多官能丙烯酸酯(如 HDDA)的使用中,这防止最终转化率达到 100%。如所示,所述转换度在约 82% 稳定。这表明,残留单体被保持在所述 PCMS 中。

[0606] 从图 117,可以看出:灰度曝光延长所述引发和增长阶段。当所述曝光时间低于 2000ms 时,可以从一个给定曝光剂量的一个较低灰度的一个较低转换度看出。然而,灰度曝光并不改变所述聚合物的最终转化率;相反,灰度主要影响所述聚合率。这显示在图 117 的所述底部面板中,其中该回归模型的所述衍生物被绘图。如图所示,随着灰度值降低,单体转化率最大值也降低。此外,聚合最高率被延迟到更高曝光时间,具有 80% 外,发生在类似于 100% 白的一个曝光时间。这表明,一个 80% 灰度曝光并不显著调节由一个全白曝光的转化度。然而,当所述灰度值低于 80% 白时,在所述聚合率降低增加。另外,应注意的是,对于 60% 或更低的灰度值,所述最大聚合率转移到较高曝光时间。

[0607] 除了考虑在所述均相区域内的灰度,也有必要表征从均相过渡内的灰度曝光所得的所述转化度,这显示在图 118。为了表征所述均相过渡对所述转化度的效果,研究了一个 600 的毫秒曝光时间和一个 50% 白的灰度值。所述棋盘图案被用作所述筛查技术,其初始的所述方格长度从 17  $\mu\text{m}$  到 1360  $\mu\text{m}$  变化。可以看出,当所述方格长度通过所述均相过渡增加时,存在一个最低转化度,对其遵循一个类似趋势(见图 113 中的树脂灵敏度)。

<sup>1</sup> F. A. Ogliari, C. Ely, G. S. Lima, M. C. M. Conde, C. L. Petzhold, F. F. Demarco, 和 E. Piva, 《鎓盐降低有机溶剂在一个模型牙齿粘合剂树脂中的抑制聚合作用》(Onium salt reduces the inhibitory polymerization effect from an organic solvent in a model dental adhesive resin),《生物医学材料研究部分 B》(Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials): 应用生物材料,第 86B 卷,第 113-118 页,2008。

<sup>2</sup> C. Decker, 《光引发交联聚合》(Photoinitiated crosslinking polymerisation),《高分子科学进展》(Progress in Polymer Science),第 21 卷,第 593-650,1996 年。

[0608] 来自所述转化度对所述筛查分辨率的相关性的结果可以分成三个区域:(1)灰度曝光,(2)均相过渡曝光,和(3)全白曝光。在所述灰度曝光区域内,发现所述转化度是恒定的。因为具有小于所述散射长度的尺寸的任何筛查分辨率作用于有效地减少对于所述投影图像的灰度级的光强度,获得一个恒定转化度。在另一方面,当所述方格长度位于所述均

相过渡内,所述转化度显著降低。这是不正常现象,因为所述均相过渡是灰度光强度提高到全白光强度的结果。

[0609] 由于所述均相过渡的该现象,预测该转化度也将随着来自灰度曝光到全白曝光的过渡而增加。然而,虽然所述光强度在所述棋盘图案的所述曝光区域中正在增加,所述光强度在所述未曝光区域正在减少。因此,残留物和部分聚合单体被限制在薄膜内的所述曝光区域之间。

[0610] 注意到 FTIR-ATR 提供研究表面的条件的一个平均光谱是很重要的。因此,一旦从所述灰度曝光区域进入到所述均相过渡,所述平均转换度减少。然而,所研究的层的实际状态由具有高和低的转化度的区域组成,其分别对应于曝光区域和未曝光区域。随着所述方格长度增加并退出所述均相过渡,所述转化度增加并且超过从灰度曝光所获得的所述转化度。

[0611] 在转化度中的逐渐增加与从所述薄膜中的所述未曝光孔中除去残余单体的增加能力有关。随着所述方格长度继续增加,所述转化度最终达到一个恒定值。这个区域对应于所述全白曝光区域,该区域的测量的所述转换度与图 117 中所示的所述 100% 白曝光样本所测定的所述转化度一致。

[0612] 当将灰度曝光作为大面积无掩模光敏聚合中构建 GSS 的一项技术考虑时,可以考虑三个方面:(1) 所述 GSS 优选足够强,以在材料重涂后继续存在,(2) 所述 GSS 优选具有足够刚性,以保持所述空间位置和所述无支架特征的几何结构,以及(3) 所述 GSS 应通过使用一种合适溶剂来形成,从而容易地除去,例如,在所述构建完成后。

[0613] 这些方面的每一个可与所述转化度相关。随着所述转化度增加,粘度和硬度都增加<sup>3</sup>。对于所述灰度层要在材料重涂后继续存在,例如,所述转化度优选足够高-例如,所述粘度和硬度应达到一个预定值-以防止所述部分聚合区域从期望位置除去或移开。同样地,所述转换度应达到一预定值,以确保所述目标特征的精度。然而,对比一个足够高转化度的所述要求,所述粘度和硬度优选足够低,以在所述构建完成后被轻易除去,从而仅仅制造所述预期特征。这两种矛盾要求的结果是:为成功制造 GSS 的转换度的一个目标窗口。此外,要在材料重涂后继续存在所要求的所述转换度可能比在所述制造完成后能够轻易除去 GSS 的所述转化度要高。

<sup>3</sup> F. Jack L, 《在未填充牙齿修复树脂的固化反应中的硬度和转化程度的关系》(Correlation between hardness and degree of conversion during the setting reaction of unfilled dental restorative resins), 《牙科材料》(Dental Materials), 第 1 卷, 第 11-14 页, 1985; RP Slopek, 《在丙烯酸酯树脂的光聚合过程中使用粒子跟踪微流变的力学性能原地监测》(In-situ Monitoring of the Mechanical Properties during the photopolymerization of acrylate resins using particle tracking microrheology), 博士论文,《化学与生物分子工程学》,佐治亚理工学院,亚特兰大,2008 年。

[0614] 通常,但不总是,一个恒定曝光时间被使用在大面积无掩模光敏聚合中,用于光敏聚合遍及整个构建的单层,其确定可以通过计算产生一个大约 135  $\mu\text{m}$  - 155  $\mu\text{m}$  (取决于使用的所述聚合物) 固化深度所要求的所述曝光时间。一个比所述层厚的固化深度可以被用来确保合适地粘附到前层。这些曝光时间范围通常为约 120 毫秒到 180 毫秒,再次基于所述材料制剂和所述光源的熟化。

[0615] 其结果是,这提供一个考虑来自灰度曝光的所述固化深度和转化度的曝光时间范围。所述固化深度模型及转换度测量两者都可以被用来确定用于 GSS 制造研究的灰度值合

适范围。如果一个选定灰度值的所述临界能量剂量大于所述灰度能量剂量,则不会发生固化,这表明该灰度是不适合 GSS。然而,如果灰度曝光产生一个合适固化深度(例如,100 μm 或更大),则可能所述 GSS 不能轻易地在构建完成后被除去。基于该理由,可估计对于 GSS 的所述合适灰度范围。在一些实施方案中,所述范围可以是在约 46%和 82%之间,通过将方程式 4.2 和 4.3 纳入到雅各布方程式中。

$$[0616] \quad C_d = D_p(t) \ln \frac{I}{I_0} \quad 6.1$$

$$[0617] \quad C_d = (111.3 \cdot I_0 \cdot g + 194.8) \ln \frac{I_0 + g \cdot I}{194.8 \cdot I_0 + 103.7} \quad 6.2$$

[0618] 除了考虑所述固化深度方程式,所述转化度也可以有助于对于 GSS 合适灰度的选择。从图 117 中,也可以看出,在一个约 170ms 曝光时间,所述转化度为~14%。其结果是,使用的所述灰度应优选产生比所述全白曝光低的所述转化度。灰度值接近 80%,例如,产生一个类似于用于一个全白曝光的转化度,这往往显示:一个 80%的灰度值将产生类似于在一个构建中的一个全白曝光的机械特征。因此,一个 80%的灰度值不太可能适合 GSS。

[0619] 从图 117 可以看出,60%和 60%以下的灰度值产生比一个全白曝光显著降低(~5%)的一个转化度。基于这些伴随着固化深度预测的发现,可以预测大面积无掩模光敏聚合中用于 GSS 制造的所述适合灰度范围。在一些实施方案中,所述范围可以是在约 46%和 60%之间。

[0620] 应当指出的是,一个 14%的转化度低于所述凝胶点,其被定义为所述转化度,其中达到聚合的最大率<sup>4</sup>。这表明:当一个层被首先曝光于大面积无掩模光敏聚合中的 UV 光时,相比所述已完成的叶片模具,所述粘度和模量都更低。对于一个全白曝光的聚合的最大率被证明发生在~27%±2%,这与文献一致。由于从大面积无掩模光敏聚合所得的所述生坯模具保持精确几何结构,这表明大部分光敏聚合发生在经由“透印”的第一曝光后。Kambly, 例如,报告称透印可能在所述曝光表面下方增长多达 4~6 层<sup>5</sup>。当考虑所述 GSS 制造时,可以开发技术以减少来自透印的增量固化,从而将所述转化度维持在所述凝胶点或所述凝胶点以下。

<sup>4</sup> K. C. Wu and J. W. Halloran, 《通过红外光谱法的陶瓷立体光刻树脂的光聚合监控》(Photopolymerization monitoring of ceramic stereolithography resins by FTIR methods), 《材料科学》(Journal of Materials Science), 第 40 卷, 第 71-76 页, 2005 年。

[0621] 除了选择合适于 GSS 的所述灰度值,也可以选择一个合适筛查分辨率,例如,用于确定该曝光技术是否应该是一个灰度曝光或在所述均相过渡内。在 GSS 制造背后的所述基本原理是均相地增加围绕所述无支架特征的所述区域的所述粘度。因此,在所述灰度曝光区域内选择一个筛查分辨率是合适的,因为所述均相过渡不倾向于产生均相层。因此,用于 GSS 所有研究的所述筛查分辨率是 HARLEQUIN 色散筛查超细,以保证灰度曝光。

[0622] 为了评估在在大面积无掩模光敏聚合中所诉 GSS 有效性,设计了一个难题组件。该难题组件的侧视图和正视图分以示于图 119a 中,其中所述构建方向是从下向上,所述白区域对应于要由通过紫外线曝光固化的区域。该测试组件包括一个底座、侧壁、悬垂物和一个无支架方柱。随着所述构建进展,最终将有一个无支架特征,对此可评估所述 GSS 有效性。所述无支架特征是一个方柱,其具有一个 1360 μm 方格边长度,以及 3 毫米柱高度。该柱与所述基座的距离是 1 毫米,与所述侧壁的距离是 3.06 毫米,所述无支架结构通过一个悬垂

物连接到所述部分。

[0623] 悬垂结构对大面积无掩模光敏聚合提出了一个难题。然而,本发明的实施例涉及适合于制造无支架特征的系统。因此,当所述构建触及所述悬垂结构时,进行了其他曝光,以确保所述悬垂不会妨碍无支架特征的 GSS 评估。图 119b 示出了用于 GSS 的第一方法。在该 GSS 中,为每层选择一灰度等级,灰度曝光围绕所述整个柱。所述灰度曝光区域连接到所述基座、侧壁悬垂和无支架特征。

[0624] 来自所述第一试验的结果示于图 120 中。基于来自所述固化深度方程式和转换度测量的预测,研究的所述灰度值在 HARLEQUIN 色散筛查超细的一个筛查分辨率为 50%,54%,56%,58%和 62%。所述构建参数,如材料重涂速度和曝光时间,被分别设置为 30 毫米/秒和 170 毫秒。从这些结果中,观察到一个“全有或全无”现象。对于该试验,50%和 54%的灰度值无法制造所述无支架柱的任何组件。然而,当所述灰度值提高至 56%时,几乎所有所述灰度区域聚合到无法容易地除去的转化度。这种趋势持续到 58%白灰度值,其中可以看出:一个更大数量的 GSS 仍然很好粘附在所述侧壁和所述无支架特征两者上。对于所述 62%灰度值,所述 GSS 近乎一个固体块。

[0625] 该结果表明与基于转换度测量的预测非常符合。一个 60%灰度值被预测为 GSS 的上限,可以看出,一个 62%灰度值可以具有非常类似于所述测试组件的机械特征。这种“全有或全无”现象可能与透印和材料重涂速度相关。但是,对于这些构建参数的一个 54%灰度值,没有足够粘性以粘附到上一层,或在重涂后继续存在。

5 K. Kambly, 《用于大面积无掩模光聚合的陶瓷-负载光固化树脂中的固化动力学和光聚合收缩特征》(Characterization of Curing Kinetics and Photopolymerization Shrinkage in Ceramic-Loaded Photocurable Resins for Large Area Maskless Photopolymerization), M.S.论文,《机械工程》(Mechanical Engineering), 佐治亚理工学院, 亚特兰大, 2009 年。

[0626] 其结果是,所述 GSS 成了下层中的一个无支架特征,并在重涂中被相应地移除。这表明所述 GSS 必须对每个层成功。当使用 56%灰度值或更高灰度值时,该 GSS 强大到足在所述材料重涂过程后继续存在。由于透印,每个附加层引起在前面层中的增量聚合。因为,来自一个单层的转换度低于所述凝胶点,所述 PCMS 位于聚合的自动加速阶段。这将导致所述转换度以最小能量剂量迅速增加。其结果是,在所述 GSS 内部的所述转化度朝着类似于一个全白曝光的值发展。

[0627] 由夏和方所作的报告显示在他们用于投影的微立体光刻的 GSS 研究中的类似现象<sup>6</sup>。在他们的测试组件中,所述 GSS 被粘合到所述测试组件。然而,所述 GSS 能够通过一种食人鱼溶液去除,其优选以比所述测试组件更快的速度蚀刻所述部分聚合支架结构。鉴于这些发现,研究了用于具有一个 56% GSS 的所述难题组件的选择性蚀刻,以确定该技术是否适合于大面积无掩模光敏聚合。对适合于大面积无掩模光敏聚合的两种溶剂进行了测试,其是丙酮和 3D101。在室温下通过超声进行一小时的蚀刻。

[0628] 来自所述蚀刻研究的结果示于图 121 中。所述测试组件在图部 121a 中表示蚀刻之前的所述组件的状况和尺寸。各个组件被用于每个蚀刻实验。图 121b 和 121c 显示在分别使用丙酮和 3D101 蚀刻之后的所述组件的状况。从这些结果,可以看出:所述两种蚀刻技术都没有完全除去所述 GSS。在每种情况下,所述 GSS 仍然结合到所述侧壁上,并且一个显著部分的 GSS 环绕所述无支架柱。然而,虽然所述 GSS 的部分被蚀刻,相称数量的所述测试组件也被蚀刻。发现,使用丙酮或 3D101,从超声波清洁,多达 1.25 毫米的所述测试组件被

蚀刻。这表明透印可能会增加所述 GSS 中的所述转换度,类似于所述测试组件。其结果是,所述 GSS 不能被选择性地蚀刻。相反,所述 GSS 和测试组件均以类似速度进行蚀刻。

[0629] 可以从这些初始 GSS 研究得到重要观察结果。首先,可以看出,形成在 56% 灰度值形成的所述 GSS 具有一个过高转化度,从而不能被轻易移除;所述 GSS 不能与所述测试组件相区分。由此,需要一个较低灰度以产生具有一个较低转化度的 GSS。第二,对于灰度值大于 56% 以下,不能形成一个 GSS。从这个结果,可以解释用于制造支架结构的所述理想灰度是在约 54% 和 56% 之间。另外,可以解释为在制造后轻易去除的转换度低于所述给定构建参数在材料重涂后继续存在所需的最低转化度。第三,在蚀刻中,大部分所述 GSS 保持粘合到所述侧壁上。

[0630] 考虑到这些观察结果,对于 GSS 制造可以做出三个改进。首先,所述重涂速度可以从 30 毫米/秒降低到 1 毫米/秒,所述曝光时间可以从 170 毫秒增加到 218 毫秒。一个较低重涂速度可以作用于降低在材料重涂后继续存在所需的最低转化度。另一方面,增加所述曝光时间促成在灰度曝光和全白曝光之间的所述转化度的一个较大差异。

<sup>6</sup> C. G. Xia 和 N. Fang, 《使用一个灰度聚合自我牺牲结构的全三维微细加工》("Fully three-dimensional microfabrication with a grayscale polymeric self-sacrificial structure"), 《细观力学和微型工程》(Journal of Micromechanics and Microengineering), 第 19 卷, 2009 年 11 月。

[0631] 第二,本发明的实施方案还可以包括:开发一个在连续层之间交替灰度值的新颖技术,以减少在所述 GSS 中的透印。该技术在图 119c 中描述。该技术包括从一个高灰度值到一个低灰度值在连续层之间交替灰度值。例如,考虑在图 120 中呈现的所述 56% GSS。从透印产生的所述高转换度可以通过降低所述 GSS 内每隔一层的所述灰度来减少。

[0632] 当所述转化度低于所述凝胶点时,由于自动加速,例如,一个较低转化度具有一个较低相应聚合率,这示出于图 117 中。其结果是,所述较低转化度可作为一个屏障在所述整个 GSS 制造中调解增量聚合。除了开发用于透印降低的该系统和方法,所述 GSS 到所述侧壁的连接可以被除去,以增加可在构建完成后形成的所述表面积。所述 GSS 和所述侧壁之间的所述间隙分隔可设定为约 1 毫米,GSS 的 2 毫米可以用于在所有方向围绕该柱。

[0633] 来自这些修改的结果示于图 122 中。对于在交替灰度种的该实验,所述低灰度值被保持恒定在 50%,研究了所述高灰度值在 52% (b)、53% (c)、54% (d) 和 56% (e)。此外,对于所述交替 GSS,一个 50% 的恒定 GSS 也示于 (a) 中。第一行显示了在使用 3D101 形成前的所述测试组件。可以看出:该 GSS 看起来比在图 119 中所示的形成在第一次试验的 GSS 的粘稠性要低得多。第二行显示了在使用 3D101 的水喷射后的所述测试组件,这是用于除去残余单体的一种典型技术。可以看出,对于所述 GSS 的除去揭示了所述灰度支架测试组件的制造成功。

[0634] 所述成功可以在很大程度上归因于减少所述重涂率,这降低了在所述重涂过程后继续存在所要求的所述最低转化度。图 122a 显示一个 50% GSS 可制造一个无支架柱。这表明对于制造无支架特征,交替 GSS 并非必要。相反,所述关键参数是所述材料重涂速度。然而,显示在所述 GSS 内的交替灰度曝光也是制造无支架几何结构的一种有效方法。所述 GSS 交替优点在于“全有或全无”现象的缓解。

[0635] 图 122 显示了交替灰度 GSS 扩展了可用于制造所述无支架柱的所述灰度范围。这可以由图 122e 显示,其中使用了一个 50% 和 56% 的交替 GSS。此前,由于显著透印,使用在

56%的单一灰度值的一个 GSS 无法被轻易地除去。然而,将一个 50%灰度值每隔一层插入到所述 GSS,促成通过标准形成技术,成功制造所述无支架特征的,以及轻易除去所述 GSS。这表明交替灰度减轻来自透印的残留固化的能力。这一方面增加了制造无支架几何结构的可靠性,并可以允许构建参数中的更多变化。

[0636] 测试组件应注意的一个方面是所述柱的高度。所述柱高被设计为 3 毫米,但是对于每个 GSS,所述柱高为~ 3.5 毫米。这可能与导致固化多达所述柱下面 5 层的透印有关。当一个全白曝光被投影到一个灰度曝光上面层时,透印的易感性由于一个较高光强度而被增加。灰度曝光消耗通常存在于未曝光单体中的许多抑制剂品种。其结果是,任何额外曝光剂量直接进到聚合中,这导致所述柱要比所述设计值长。

[0637] 为了产生更精确无支架特征,可以执行对于所述 GSS 的一个额外设计修改,其可以在图 119d 中看出。在该设计中,灰度曝光被从所述无支架特征正下方去除。此设计特征试图减轻透印,因为在所述 PCMS 中的所述抑制剂必须在固化可能发生之前被消耗。其结果是,形成所述曝光层下方的附加厚度的概率被降低,这可能带来一个更准确构建的测试组件。

[0638] 来自一个透印缓解交替 GSS 的结果示于图 123 中。所述所示测试组件使用 50%和 70%交替灰度值制造。图 123a 和 123b 分别在形成前描绘了所述 GSS,以及在形成后出现的所述无支架柱。

[0639] 所述透印缓解交替 GSS 的交替灰度值之间的所述差别,完全不同于典型交替 GSS,其可能与所述灰度支架的所述体积减少相关。从该结果,可看到在所述基座和所述无支架特征之间的一个较大间隙,这将导致在所述构建方向的一个更高准确度。所述柱高测得为 3.2 毫米。这表明,在所述柱正下方没有灰度的情况下(即,相对于当灰度位于所述柱下方时的 5 层),透印形成对应于在所述柱下方两层的附加厚度。

[0640] 也可注意到:在所述柱的制造中,发生更多偏移,这导致通过所述灰度支架柱的所述长度的一个可变横截面。此外,可以看出,在所述基层中由于来自所述较高交替灰度值的透印而形成的一些粗糙度。这些效果可以通过增加所述周围灰度的尺寸进一步减少。例如,这可以促成在所述交替灰度中的一个较小差差别;并且,使用的所述高灰度可以减少,这将消除对于所述基层的粘合。围绕所述柱的大量体积的 GSS 还可以防止在材料重涂中的偏移。

[0641] 上述讨论了用于在大面积无掩模光敏聚合中无支架几何结构制造的灰度曝光的结果,表明灰度支架结构可以被用于制造无支架几何结构,并且可以在部分制造完成后使用标准开发技术容易地除去。然而,在微立体光刻中使用的技术,如选择性腐蚀,并不特别适用于大面积无掩模光敏聚合中的 GSS。然而,随着纳入新颖 GSS 设计,如交替灰度和透印缓解,可以得到可靠的和准确的无支架特征。

[0642] 此外,所述 GSS 可以容易地在部分完成后被除去,无需使用机械方法,这对于应用到大面积无掩模光敏聚合很重要。许多在叶片模具中遇到的所述无支架几何结构是在所述模具的所述内部特征内。该灰度支架结构技术有希望成功制造叶片模具内的无支架特征,从而扩大大面积无掩模光敏聚合的多功能性。

[0643] 当一个叶片模具使用大面积无掩模光敏聚合成功制造时,在所述生坯中很少观察到裂缝。其结果是,在大面积无掩模光敏聚合中产生的大部分缺陷发生在粘合剂烧尽和烧

结过程中。BBO 是除去所述结构组件的一个灵敏过程，以形成适于烧结的一个易碎陶瓷粉末组件。某些可能在 BBO 中产生的缺陷是：剥落、裂缝、气泡和空隙。为了减少这些缺陷，可仔细考虑所述材料组合物，加热率应足够低。此外，在烧结温度达到较高之前，基本上除去所有粘合剂很重要。在黏合剂烧尽和烧结中，缺陷减轻一直是许多研究的焦点，结果表明，聚合收缩可能是一个主要成因。

[0644] 由裴和哈洛伦的报告研究了在陶瓷立体光刻中在 BBO 和烧结中的裂缝形成，其中研究了关于开口间距和缩回开口的相关性<sup>7</sup>。从这些结果，发现一个较大缩回开口产生更多裂缝。这是由于在模具表面附近的残留未固化单体。与此观察相关的所述机制是引起所述未固化单体聚合的自由基热引发，这造成缺陷增长的收缩和所在。有趣的是，关于开口间距的很小相关性可以关联到所述观察到的水平和垂直裂缝。

[0645] 在大面积无掩模光敏聚合中，一个均相光强度曝光被施加到一个大面积，这导致在 BBO 中异常缺陷形成。这些现象之一为“裂缝”，显示于图 124 中。虽然妨碍用于铸造的所述模具功能的大范围缺陷在生坯中不存在，可以看到裂缝前体，见于图 124a 中。在 BBO 中形成的裂缝是直的并且平行于所述大面积无掩模光敏聚合层。另外，在所述整个叶片模中观察到每个 4, 6 和 8 层的一个周期性。

[0646] 报道了这些裂缝随着温度的起源，可以看到在温度低至 148°C 时（裂缝首先出现在 220°C）这些特征的证据。有趣的是，这对应于所述酮引发剂发生热分解以形成自由基的温度范围，其可以在所述模具内聚合残留未固化单体。也可以注意到：显著重量减轻在 300°C 之前不会发生。这表明，所导致的裂缝并不是由于热解。

[0647] 图 124B 示出了在加热到 193°C 后的所述模具的状态。从该图像，看起来在 BBO 中形成所述裂隙，然而在发生显著重量损失之前，对应于在所述生坯中观察到的所述潜在裂缝前体，这在图 124C 中被确认。为了进一步检查，图 124d 示出了具有一个 6 层周期的一个典型裂缝的放大图。

[0648] 这些观察提供了有力的指示，所述观察到的裂缝是聚合收缩和其导致的应力的结果。在一个单层曝光期间，转化度将随深度而变化。因此，在转化度中的一个梯度可以存在于相邻层的所述界面。当所述生坯车身模具达到足以分解所述酮引发器的温度时，转化度较低区域聚合和从相邻层收缩。通过每层之间的所述界限观察到图 124d 中的这种效应。

[0649] 除了聚合收缩，考虑聚合收缩应力也是重要的。从图 124a 可以看出，周期性裂缝前体存在于所述生坯模具，且 BBO 扩散该预先存在的缺陷。这些裂缝可能与收缩应力相关。在大面积无掩模光敏聚合中，主要有两个方面促成从收缩率的应力发展：(1) 单层收缩应力，和 (2) 多层收缩应力。这两种机制的示意图见图 125。

[0650] 当 UV 光曝光于所述 PCMS，一个增量深度被聚合并经受收缩。随着所述曝光的进行，一个额外增量元件被聚合。如果没有施加边界条件，来自所述第二增量元件中聚合收缩的线性收缩将导致远离所述光源的一个曲率。这种效应见图 125a 中，且已经在图 126 中通过实验观察到。但是，在大面积无掩模光敏聚合中，一个边界条件被设置在所述层上以持平。其结果是，在相邻层之间产生应力。

<sup>7</sup> C.-J. Bae, 《由陶瓷立体光刻制造的整体芯陶瓷精密铸造模具》(INTEGRALLY CORED CERAMIC INVESTMENT CASTING MOLD FABRICATED BY CERAMIC STEREOLITHOGRAPHY), 博士,《材料科学与工程学》(Materials Science and Engineering), 密歇根大学, 2008。

[0651] 应力产生的所述第二机制形成于所述多个层曝光, 见于图 125b 中。当一个 PCMS 附加层被曝光于 UV 光, 所述线性收缩与前一层交互。如果没有施加边界条件, 曲率朝着所述光源形成。由于透印, 多层收缩应力将继续深入扩展至所述构建。有趣的是, 在大面积无掩模光敏聚合中的透印可以穿透约 6 层, 这与在所述裂隙中观察到的所述周期性非常类似。因此可以假设, 该裂缝是由于透印导致的从跨越多层的收缩应力积累到应力松弛的结果。

[0652] 为了检验这一假设, 研究了通过灰度减少聚合收缩和聚合收缩应力的方法。聚合收缩已被直接相关于所述转换度, 其中, 高转换度对应于大体积收缩<sup>8</sup>。因此, 可以得出结论: 为了减少聚合的负面效果, 所述转化度必须保持较低水平。但是, 在 BBO 期间, 由于用于聚合的所述光引发剂产生自由基的热分解, 未固化和部分固化的单体可潜在聚合, 并且由于 BBO 的性质, 体积变化应该被最小化, 以减少缺陷。此外, 高转换度是对确保所述叶片模具尺寸精度来说是必要的。出于这些考虑, 降低转化度可能并非是由于减轻由 BBO 和烧结所导致的潜在收缩相关缺陷的一个可行方法。因此, 减轻收缩缺陷最好通过一种新技术解决, 以获得一个高转化度, 同时减轻体积收缩。如下述所讨论的, 这可以通过在所述均相过渡内的曝光图形利用来完成。

[0653] 当投影到所述 PCMS 的所述表面上的所述曝光图案是在所述均相过渡内时, 与一个全白曝光相比, 平均转换度可能降低超过 50%, 如图 118 所示。这表明体积收缩净减轻也可大于 50%。当曝光图案在所述均相过渡内, 未固化或部分固化单体被保留在所述层内, 这已被显示用于通过单体减轻来降低体积收缩应力<sup>9</sup>。均相过渡曝光具有减轻体积收缩的净效应和减少收缩应力的前景, 显示了减少在所述生坯模具中的缺陷的可能。因为所述裂缝和脱层的根源通常与所述生坯模具的状态相关, 减少所述生坯中的缺陷可减少在 BBO 和烧结中的这些类型的缺陷。

[0654] 为了研究用于减轻这些类型缺陷的这种技术的有效性, 设计了一个测试组件。该测试组件是一个中空圆柱体, 见于图 127a。所述圆柱体的外直径被设定为 22 毫米, 厚度为 3 毫米, 高度为 24 毫米, 以模拟在叶片模具中使用的标称尺寸。所述空心圆柱体使用全白曝光和在所述均相过渡内的三个筛查分辨率制造。所用的所述筛查技术为棋盘图案, 具有方格长度分别为 170  $\mu\text{m}$ , 255  $\mu\text{m}$  和 425  $\mu\text{m}$ , 对应于邻近灰度曝光的筛查分辨率, 在所述均相过渡的中间以及邻近全白曝光。对于每个筛查分辨率, 所述层在一个交错图案中被曝光, 使得所述曝光区域在后续层中未被曝光, 反之亦然, 见于图 127b。

[0655] 为确保各层之间正确粘合, 对于方格长度为 170  $\mu\text{m}$ , 255  $\mu\text{m}$ , 425  $\mu\text{m}$ , 选择的曝光时间分别为 278 毫秒, 274 毫秒和 274 毫秒。对每个筛查分辨率的四个样本进行了检查, 以获得统计信息, 四个全白圆柱体使用 170 毫秒的曝光时间进行制造, 以作为参考。在制造后, 每个模具使用 3D101 形成。在形成后, 所述测试圆柱体经受 BBO 和烧结, 其中所述加热表见于表 6.1。在烧结完成后, 在一小时内将模具冷却至室温。

<sup>8</sup> D. C. Watts, 《光聚合网络中的反应动力学和力学》(Reaction kinetics and mechanics in photo-polymerised networks), 《牙科材料》(Dental Materials), 第 21 卷, 第 27-35 页, 2005 年。

<sup>9</sup> P. D. Ganahl, 《结构化照明作为用于控制光聚合涂层特性的一种加工方法》(Structured illumination as a processing method for controlling photopolymerized coating characteristics), 博士论文, 《化学和生化工程》(Chemical and Biochemical Engineering), 爱荷华州大学, 2007 年。

[0656]

加热率 (°C/分钟)	峰温度 (°C)	保持时间 (小时)
5	260	0
3	300	0
0.5	350	2
0.5	475	0
3	600	0
12.5	1350	2

[0657] 表 0.1 :黏合剂烧尽和烧结加热表

[0658] 图 128 示出了使用全白曝光的一个测试圆柱体的制造结果。在 (a) 中的所述图像显示了说明的所述生坯模具,以加强对缺陷的检测。该模具包含一个光滑表面,但显示了所述生坯中的明显缺陷。图 128b 示出了所述表面截面放大图,具有增强对比度,以显示所述裂缝前体。可以看出,在图 123A 中所示的一个类似于所述模具的周期性在全白测试圆柱体中形成。这表明裂缝将在 BBO 中产生的高概率。除了所述裂缝前体,可以看出一个涉及“混排”的缺陷,这与在大面积曝光中大面积无掩模光敏聚合中的所述蛇形线路径相关。从所述生坯中的这些缺陷,可以预期裂缝将在图 128b 中所示的所述区域中形成,并且在 BBO 和烧结中混排缺陷由于热引发聚合和后续收缩变得更明显。

[0659] 这种预期在图 129 中获得验证,其显示了来自所述全白曝光测试圆柱体的 BBO 和烧结的诸多水平缺陷。相比所述生坯中的裂缝,来自这些裂缝的亮度较高,这表明了一更大缺陷。在该示例中,有 4 个水平缺陷,在所述圆柱体整个周边蔓延,并伴随许多局部裂缝。可以看出,裂缝发生在所述测试圆柱体整个高度,其中所述缺陷的严重程度是变化的,虽然间距保持恒定。图 128B 示出了 4, 6, 或 8 层的常规间距。

[0660] 从图 129 的结果显示,所述裂缝发生在 BBO 和烧结过程中的所述测试圆柱体中,其通过在所述生坯中的裂缝前体的存在而被预测。因此,可以对有关均相过渡曝光对于减少或增强这些缺陷的有效性进行比较。图 130 示出了用于圆柱体的所述生坯模具,其使用格长度为  $170\ \mu\text{m}$ (a),  $255\ \mu\text{m}$ (b), 和  $425\ \mu\text{m}$ (c) 的棋盘曝光制造。在每个筛查分辨率中,相比所述全白圆柱体,所述表面粗糙度增加。此外,观察到剥落,外表面的部分在形成中被除去。这些效应是由于所述圆柱体内的所述固化部分的所述有限连接以及缺乏光滑外表面而造成的。然而,从所述捕获图像中不能阐明裂缝前体。这表明裂缝不应在 BBO 和烧结过程中形成。

[0661] 除了所述生坯中没有裂缝前体,也应注意没有混排图案缺陷。通过观察所述放大视图和提高对比度,可以看出,垂直线出现在所述圆柱体表面上,这可能导致在 BBO 和烧结过程中垂直缺陷的形成。由  $170\ \mu\text{m}$  方格长度引起的所述垂直特征看上去没有那么直,当与具有  $255\ \mu\text{m}$  和  $425\ \mu\text{m}$  方格长度的圆柱体相比) 并且被不规则地隔开。对于图 130b-130c 中的所述方格长度,所述间距大体上恒定,所述线是直的并平行于所述构建方向。另外,也可以看出,垂直线之间的所述间隔较大,对于  $425\ \mu\text{m}$  方格长度与  $255\ \mu\text{m}$  方格长度相比,具有较大对比度。发现所述间隔长度被等同于在所述曝光方法中的所述方格长度,这表明所述线是所述曝光技术的一个特征。

[0662] 从这些生坯体圆柱体的这些观察表明了减轻裂缝和混排缺陷的可能,因为它们的前体中未被观察到。然而,所述曝光图案将垂直线和不平表面引入所述生坯体,这可能导致

裂缝和混排之外的其它缺陷形成。图 131 示出了 BBO 和烧结对于使用一个交错棋盘曝光（具有  $170\ \mu\text{m}$ (a),  $255\ \mu\text{m}$ (b), 和  $425\ \mu\text{m}$ (c) 的方格长度）制造的测试圆柱体的效应。

[0663] 每个筛查分辨率明确具有明显较少的长距离水平裂缝。图 131a 示出了长距离水平裂缝的最大数量。然而, 这些是观察到的主要横向缺陷, 对比在所述全白曝光中所观察到的诸多较小长度的水平缺陷。当检查这些具有  $255\ \mu\text{m}$  和  $425\ \mu\text{m}$  方格长度的筛查分辨率时, 未观察到长距离水平缺陷。

[0664] 对于具有  $425\ \mu\text{m}$  方格长度的所述圆柱体的进一步检查显示: 可能形成短距离裂缝。对于这两种  $170\ \mu\text{m}$  和  $425\ \mu\text{m}$  方格长度筛查分辨率, 所述薄膜接近均相。在  $170\ \mu\text{m}$  方格长度的情况下, 该层邻近均相灰度曝光, 而对于  $425\ \mu\text{m}$  方格长度, 该层是邻近均相全白曝光。从该考虑,  $455\ \mu\text{m}$  可能具有最有效的减轻特征, 因为它位于所述均相过渡的中心。这些结果表明, 适当选择均相过渡曝光可能是减少裂缝和分层的一项可行技术。对于所述检查的筛查分辨率,  $255\ \mu\text{m}$  方格长度在减少所有类型缺陷（包括裂缝）上最有效。

[0665] 当考虑到其他缺陷, 可以看出的是, 虽然在所述生坯体圆柱体中未观察到所述混排缺陷, 所述缺陷在各个研究的筛查分辨率中形成。然而, 对于所述混排效应的所述光投影强度低于在所述全白圆柱体中看见的所述强度, 该特征定义更差。其结果是, 均相过渡曝光没有消除所述混排缺陷, 但有可能降低它的效应, 这可能是归因于局部收缩。在所述生坯测试圆柱体中未检测到另一个效应被示出于图 131 中的所述放大视图。在具有交替棋盘曝光的所述生坯体圆柱体中, 观察到“连续”垂直线。但是, 由于 BBO 和烧结的结果, 发生到“点”线的变换。此效应可以归因于在热解之前自由基热引发和聚合。其结果是, 均相过渡曝光可能已经将在全白曝光中的所述大规模裂隙转化为孤立的“微裂缝”, 这防止了产生更大缺陷的所述收缩积累。

[0666] 由于这些微裂缝的所述垂直排列, 应力松弛可能会垂直发生。对于垂直裂痕的研究见于图 132, 这示出了对于每种曝光技术的显著垂直裂缝形成的测试圆柱体。对于具有  $455\ \mu\text{m}$  方格长度（图 132d）的筛查分辨率, 发生最大垂直裂缝, 其中垂直裂缝作用于将在所述筛查分辨率的 4 个研究样本的两个中的所述测试圆柱体分开。具有  $170\ \mu\text{m}$  方格长度（图 132b）的棋盘图案也导致长距离裂缝。对于此样本, 看上去一个水平缺陷阻止了所述垂直裂缝的进一步蔓延。对于所述全白曝光圆柱体, 许多水平裂缝发展在所述样本, 见于图 132a 中。其结果是, 大范围直裂缝减少, 样本含有许多小垂直裂缝。图 132c 示出了最少垂直裂缝（包括大和小范围）, 其对应于具有一个  $255\ \mu\text{m}$  方格长度的一个棋盘曝光。

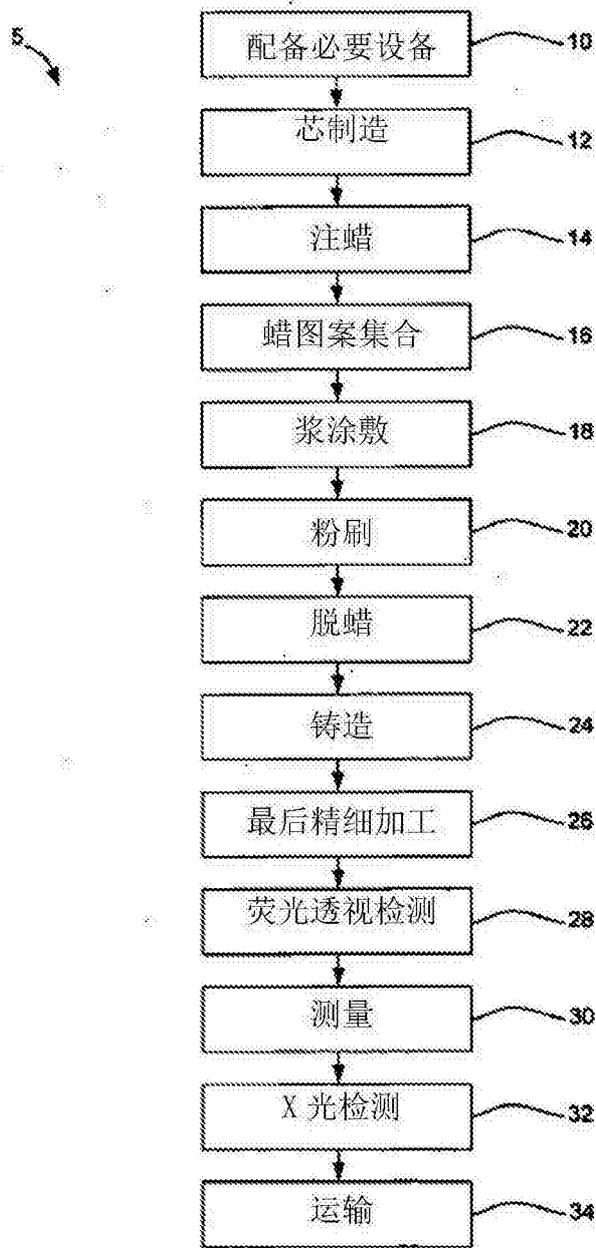


图 1

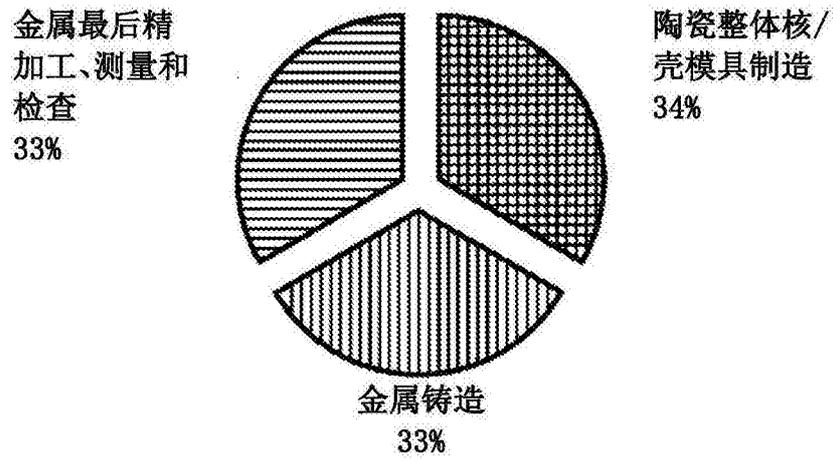


图 2

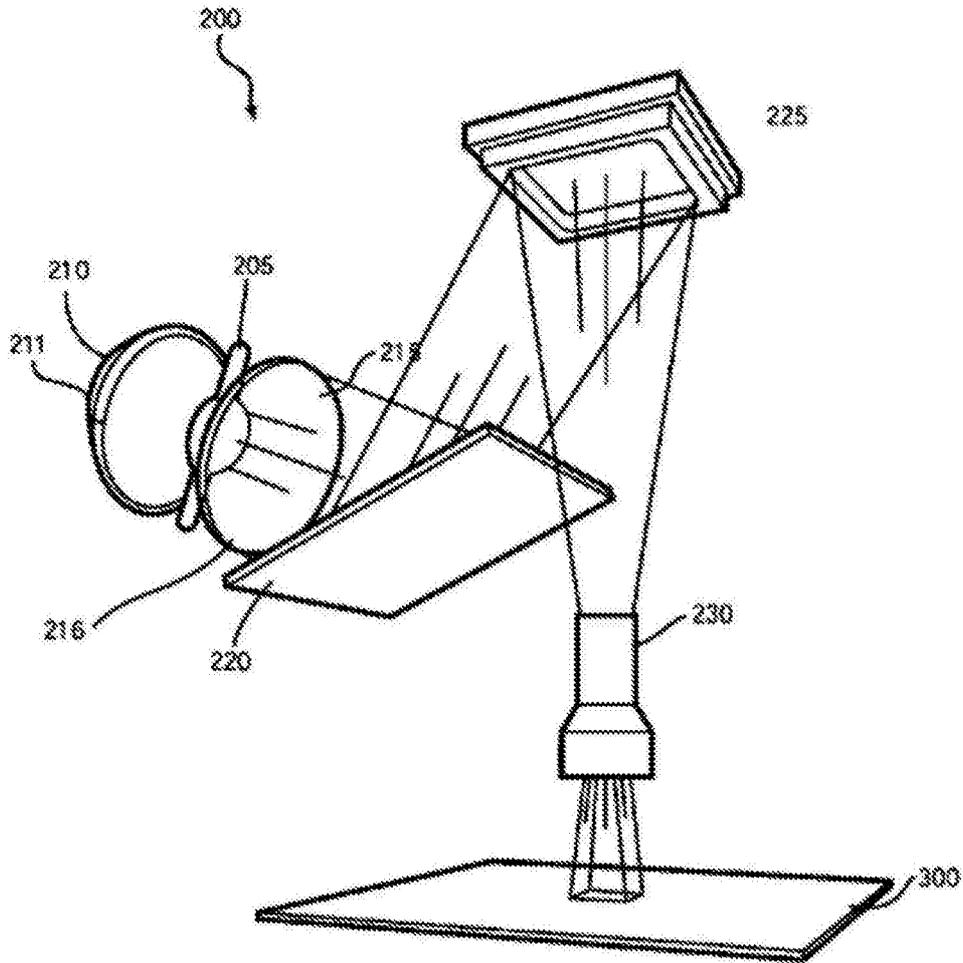


图 3A

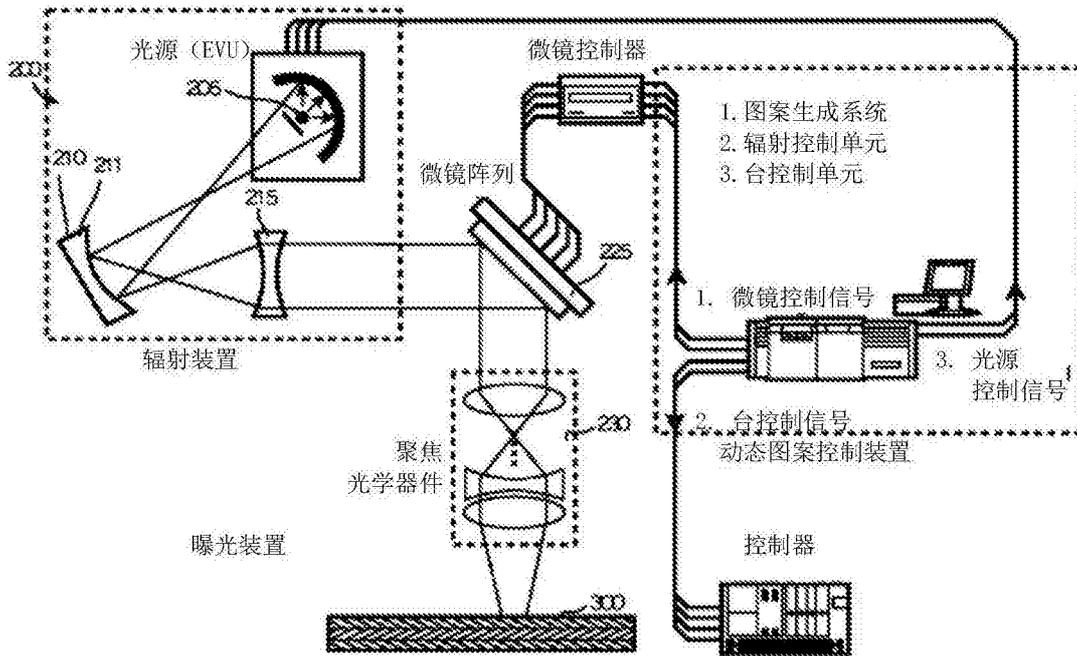


图 3B

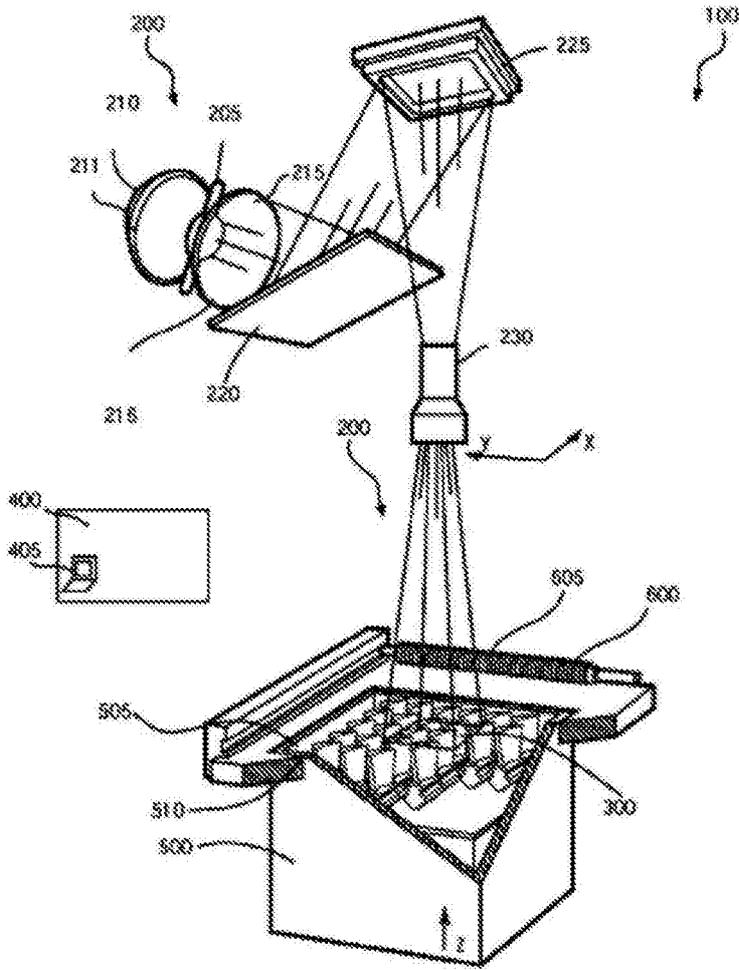


图 4

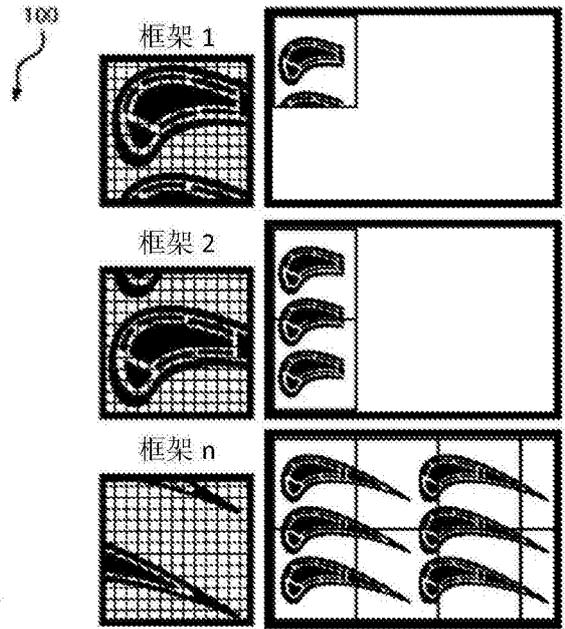


图 5

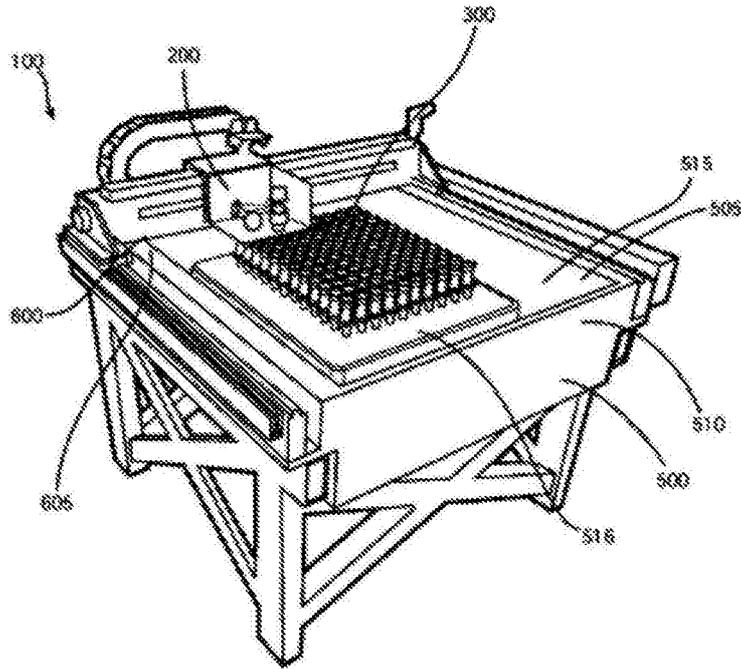


图 6

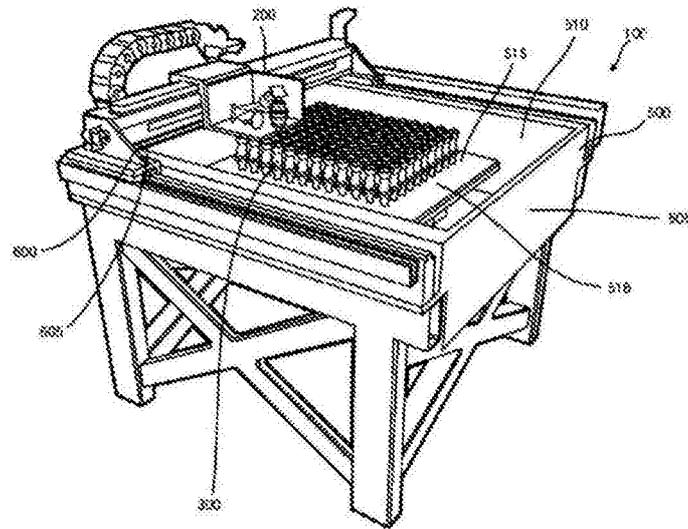


图 7

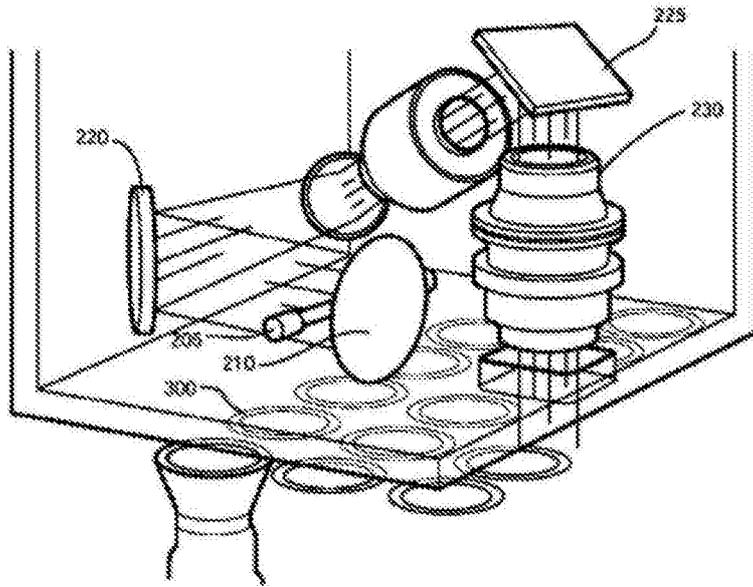


图 8

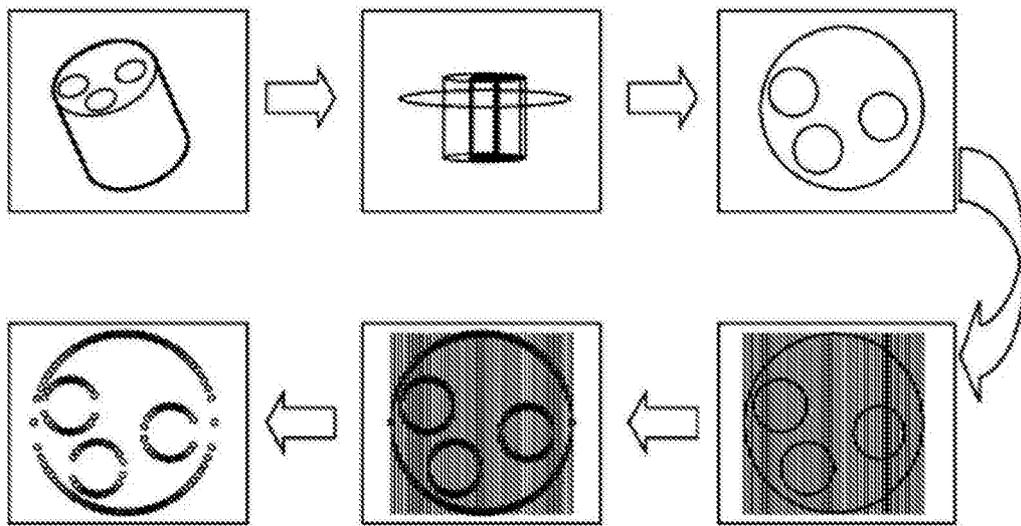


图 9

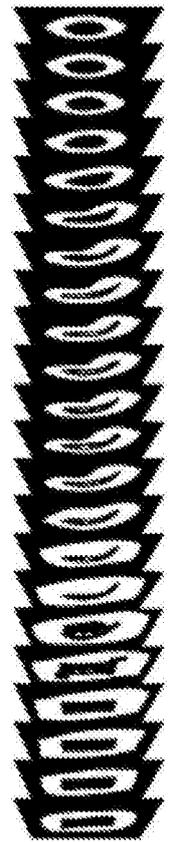


图 10A

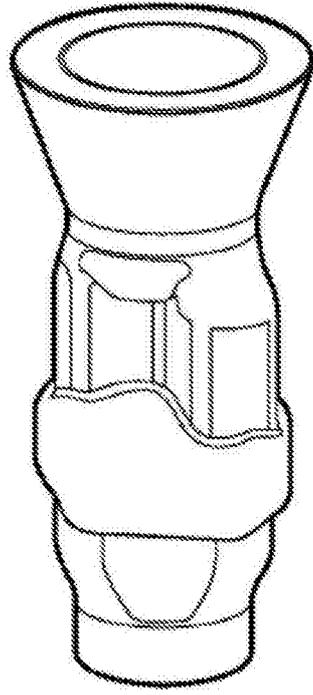


图 10B

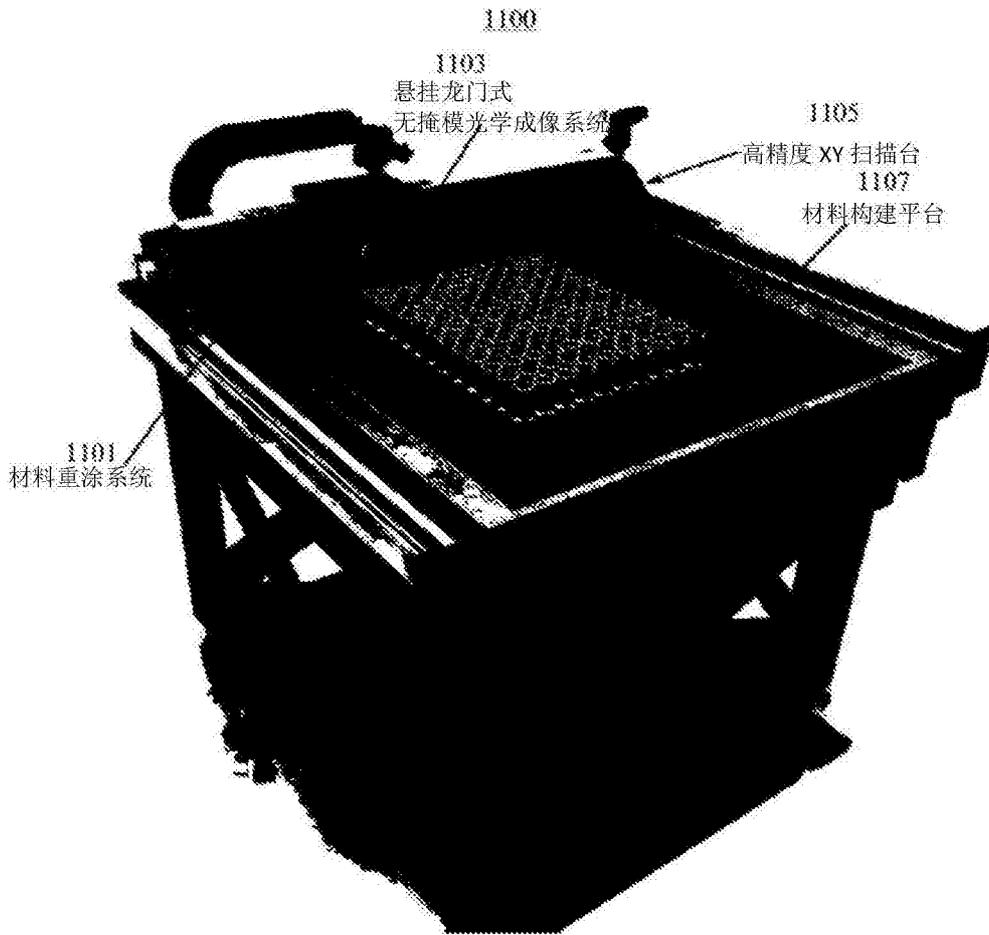


图 11

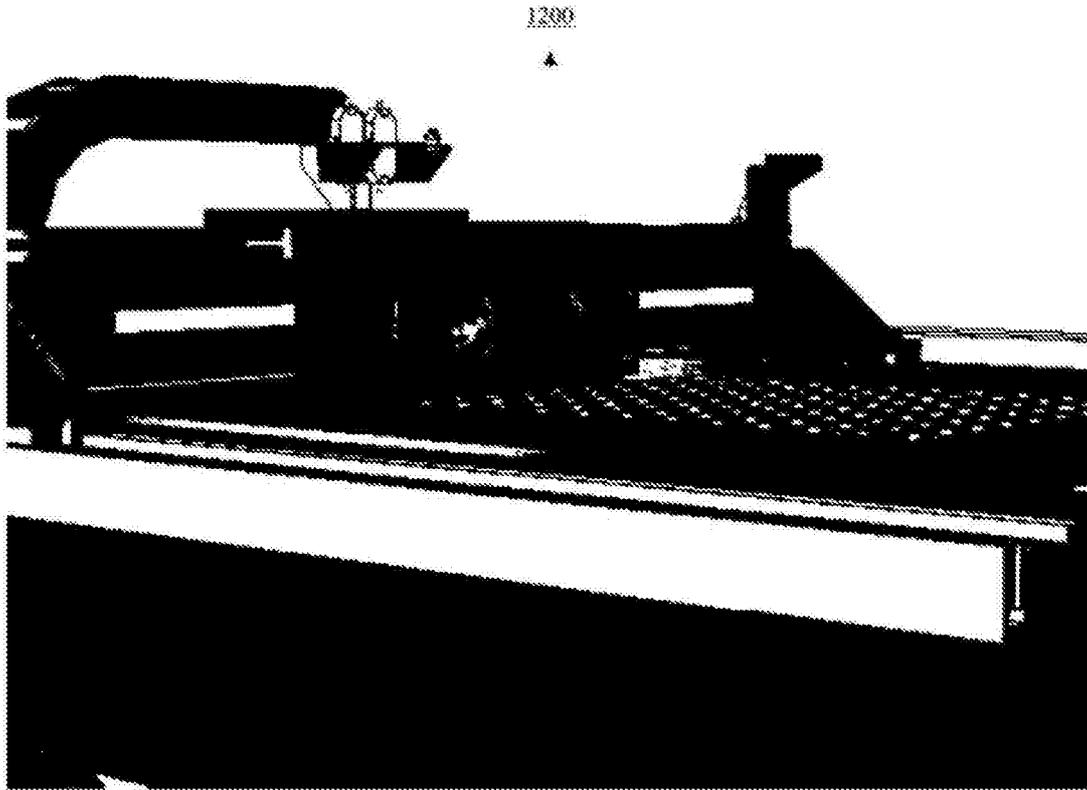


图 12

1300

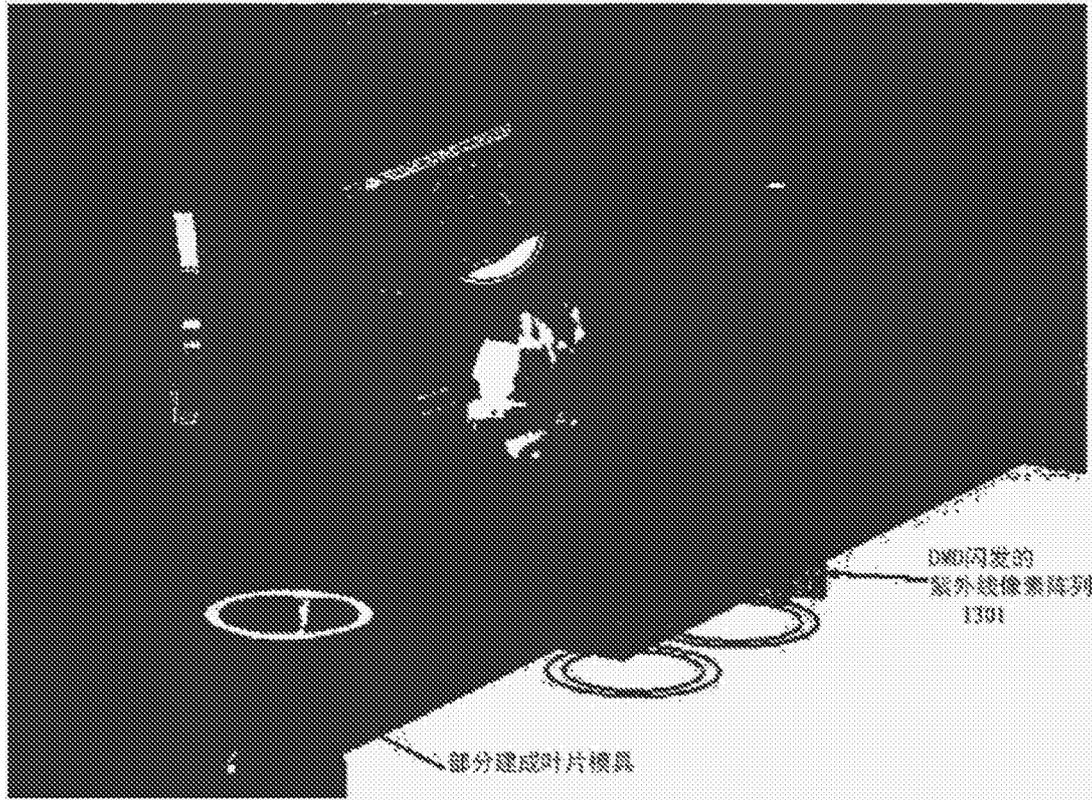


图 13

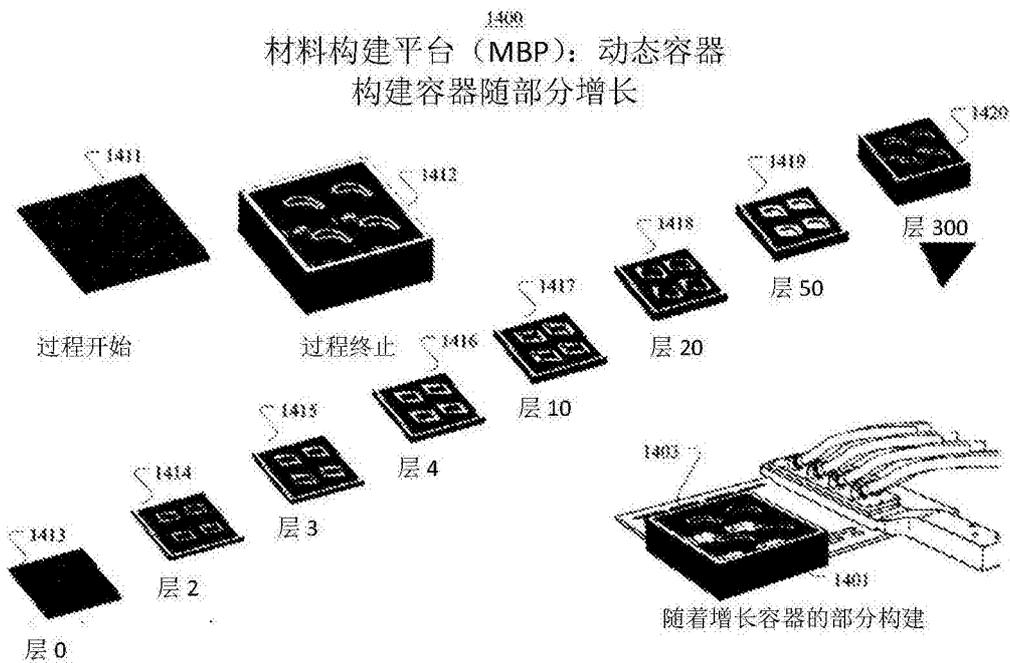


图 14

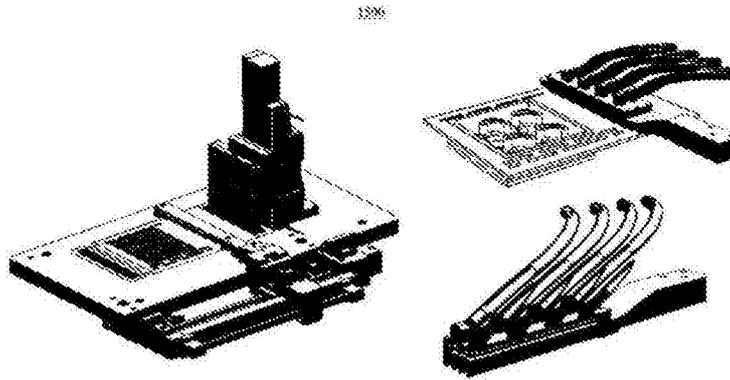


图 15

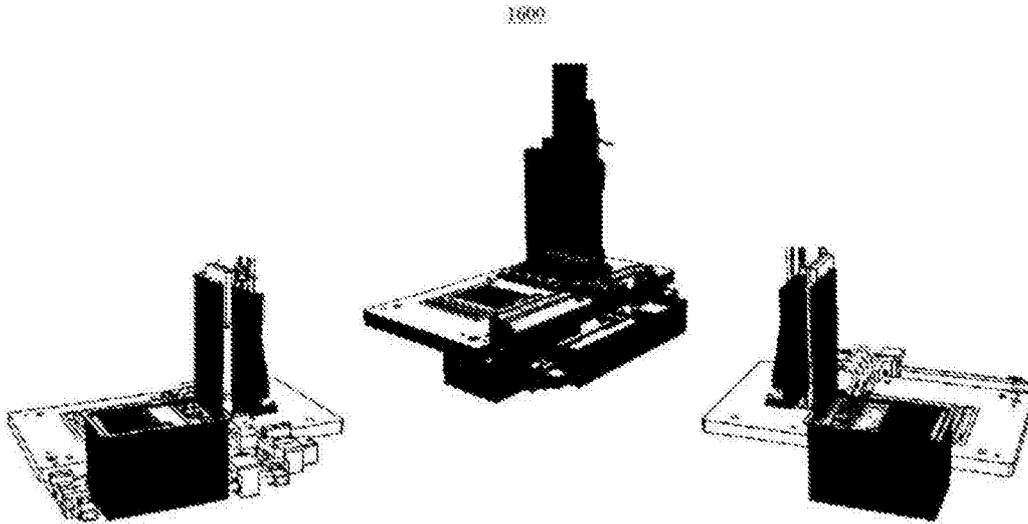


图 16

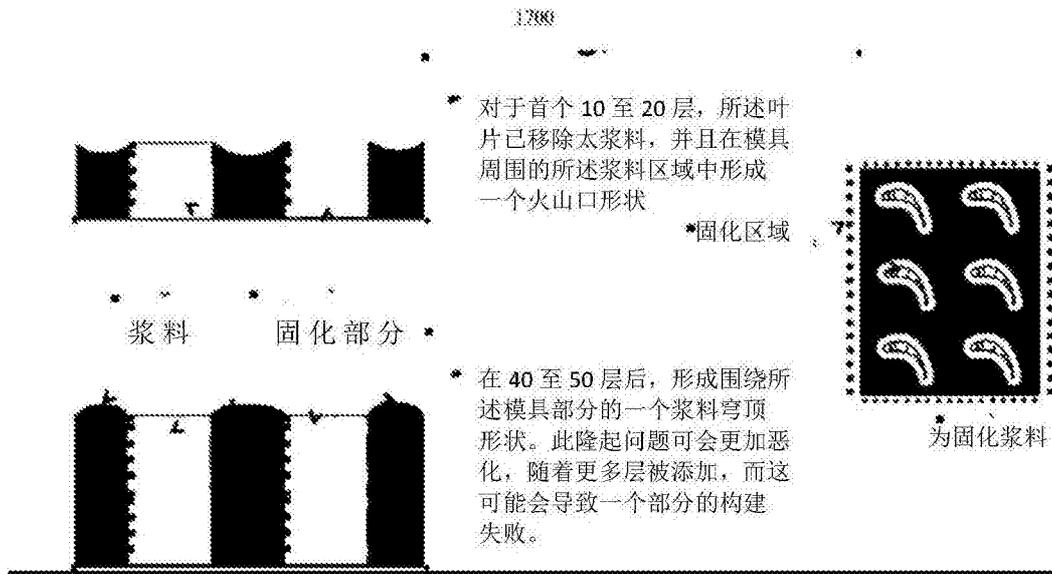


图 17

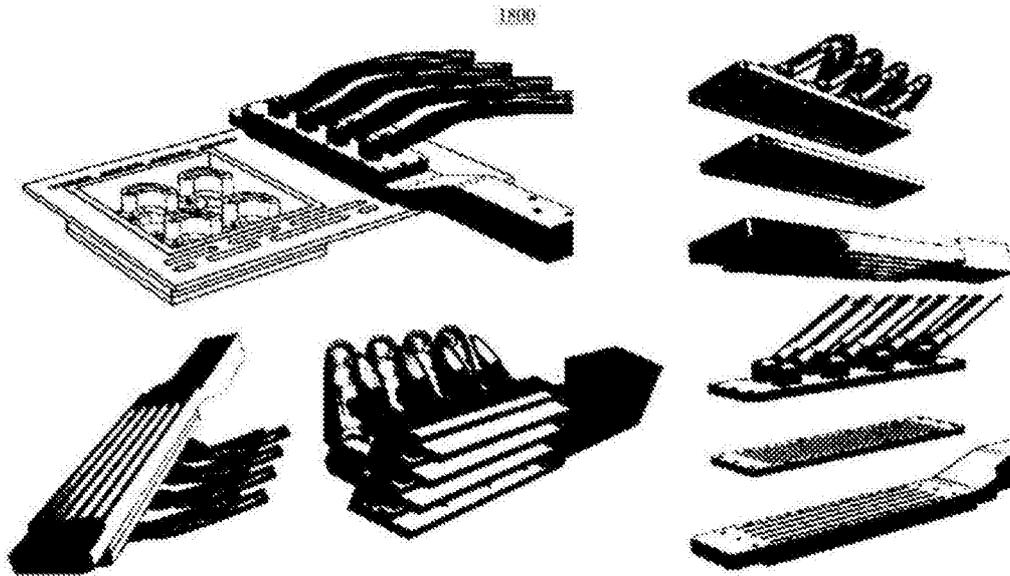


图 18

1800

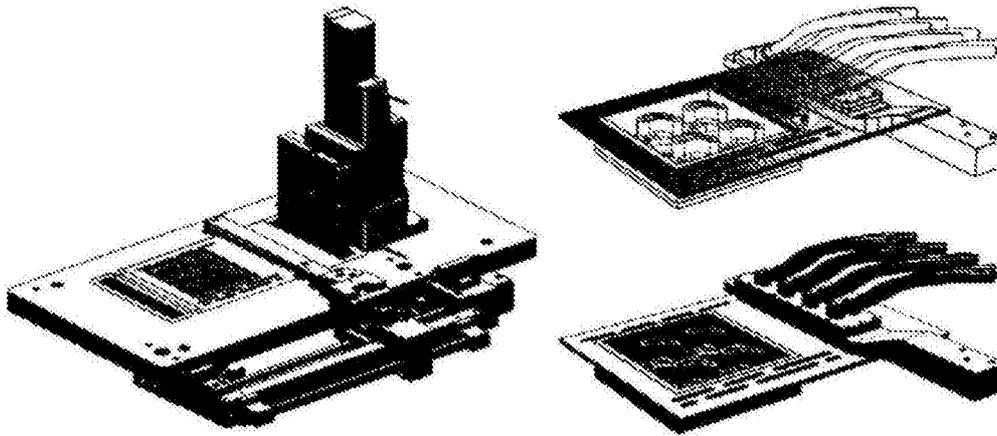
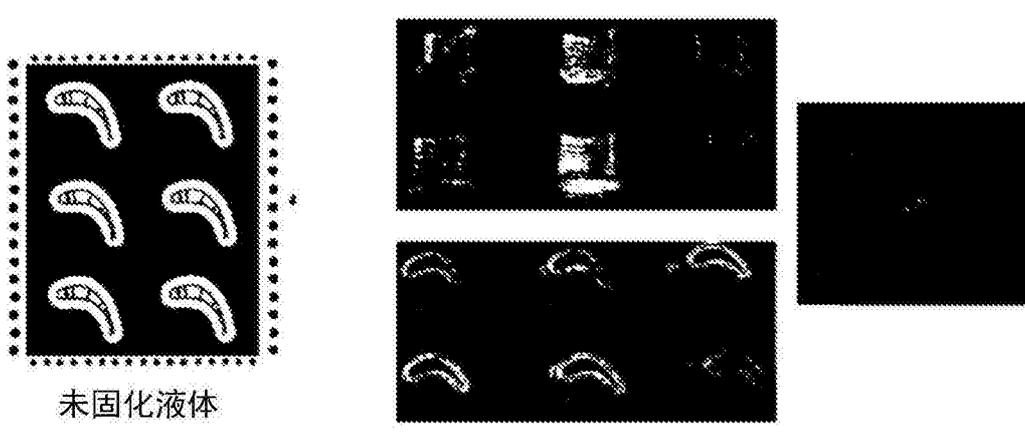


图 19

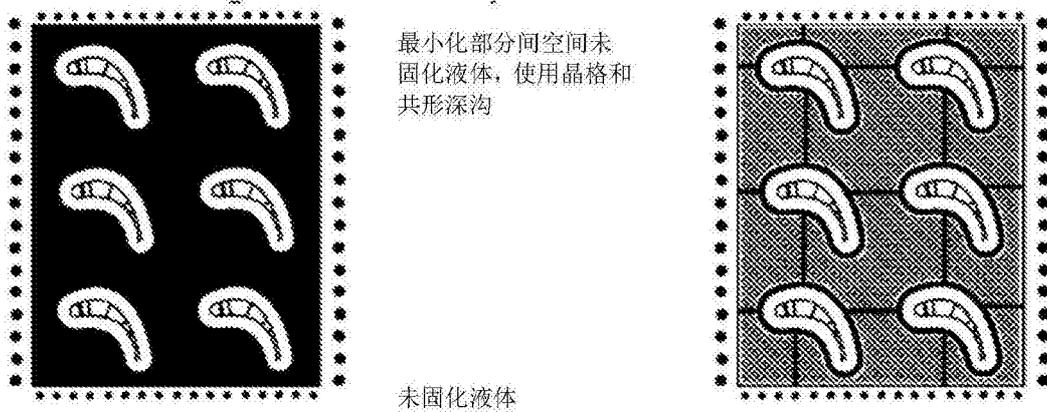
2050



未固化液体

图 20

2100



最小化部分间空间未固化液体，使用晶格和共形深沟

未固化液体

图 21

2200

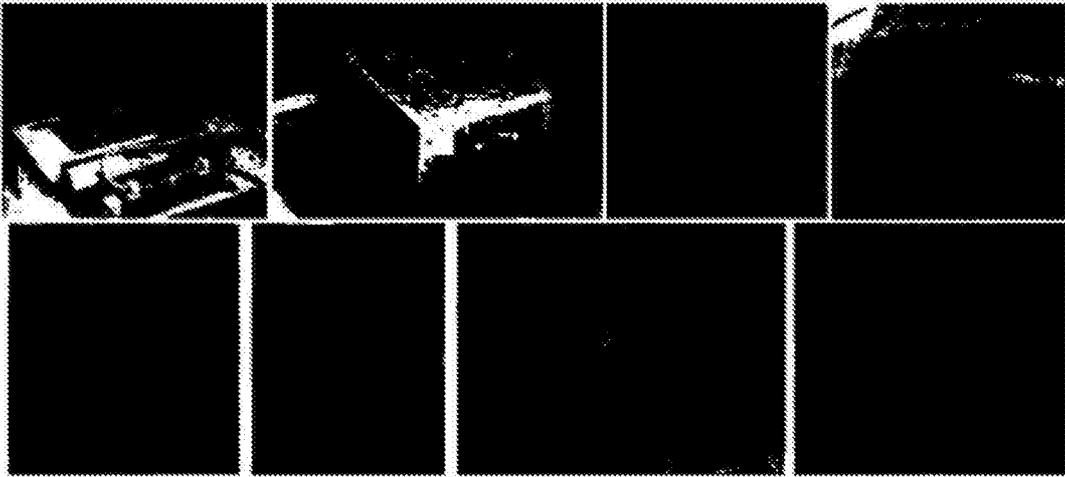


图 22

2300

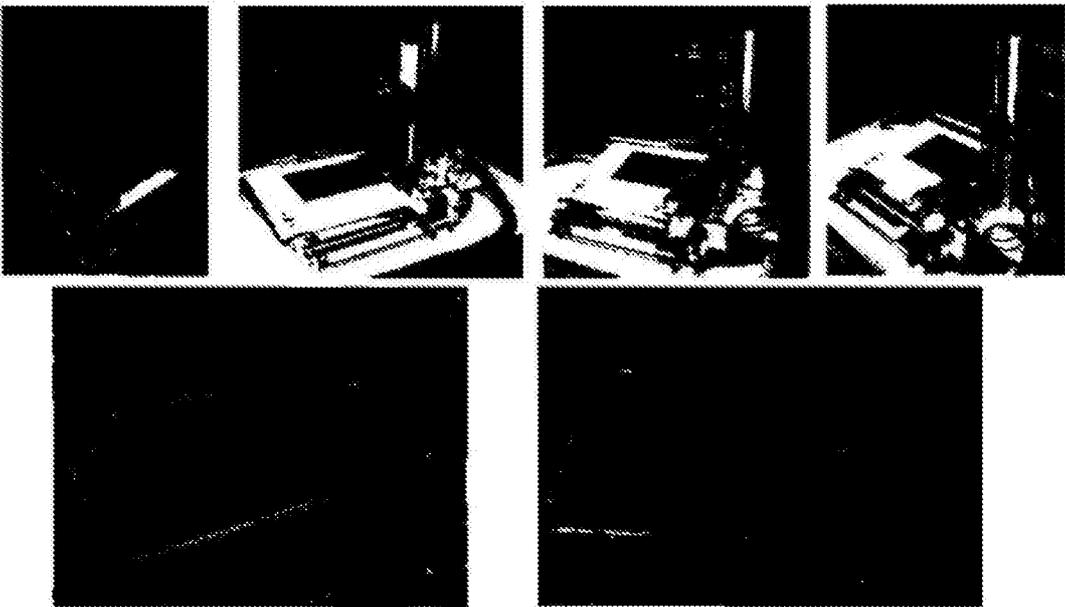


图 23

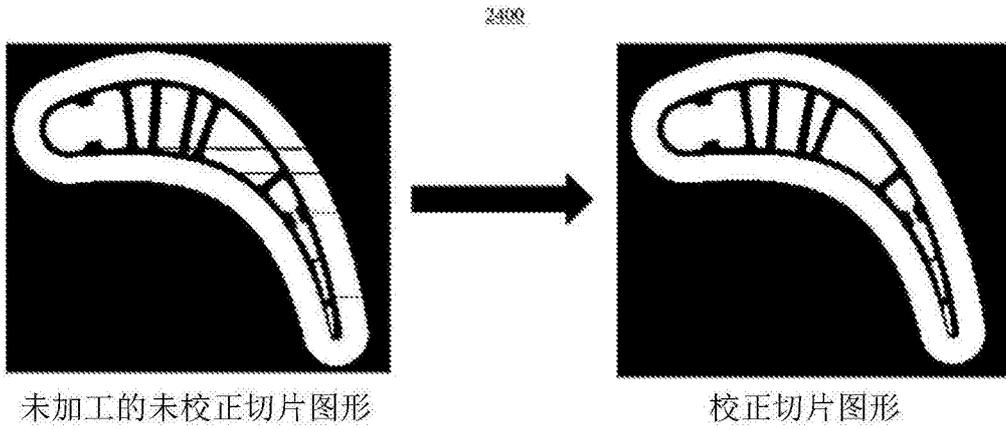


图 24

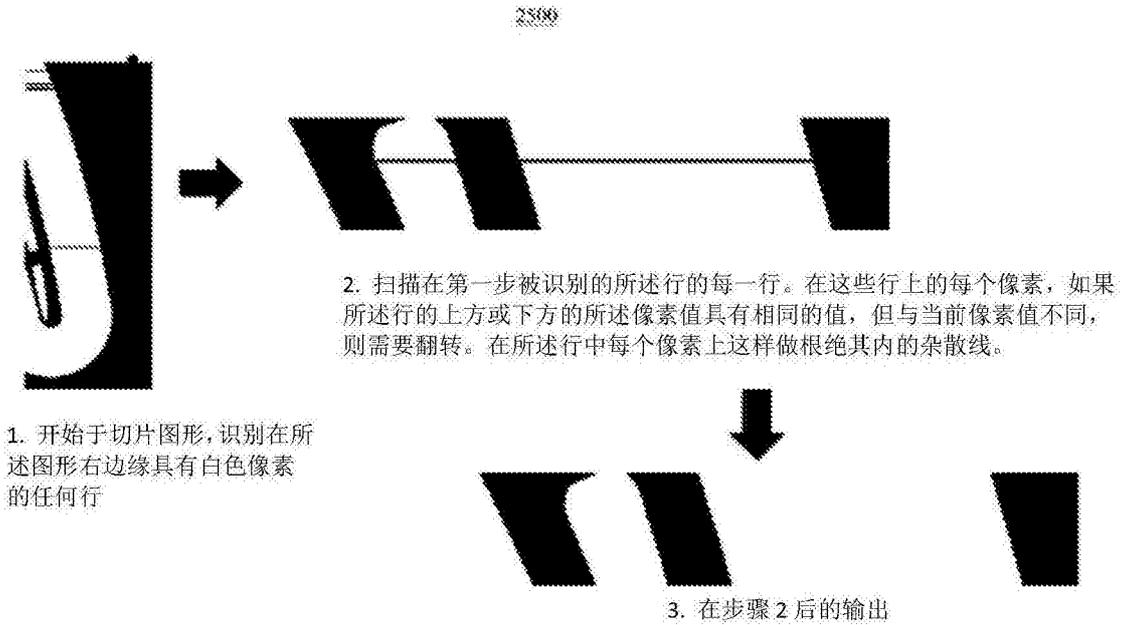


图 25

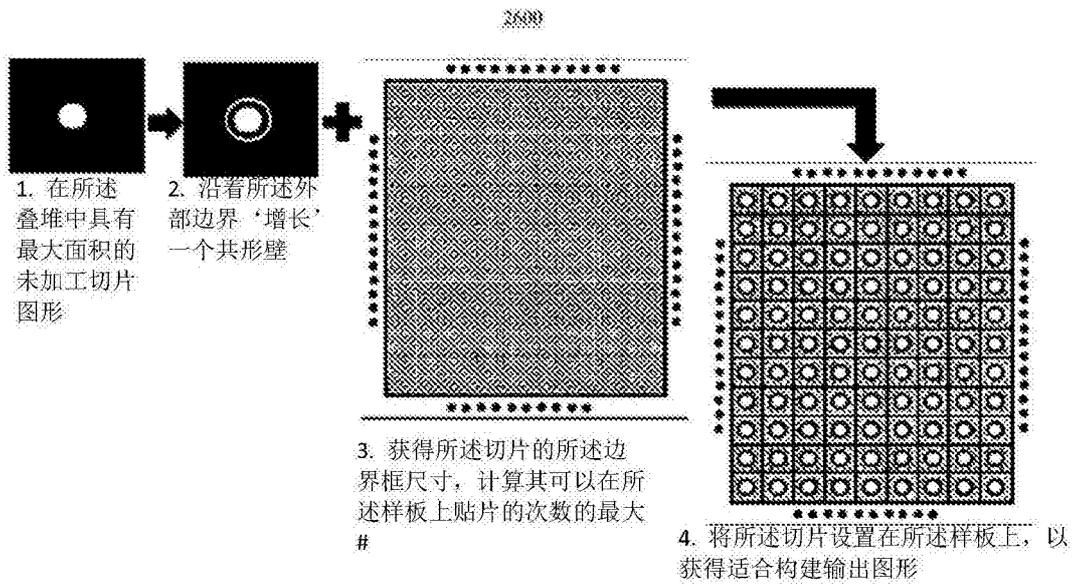


图 26

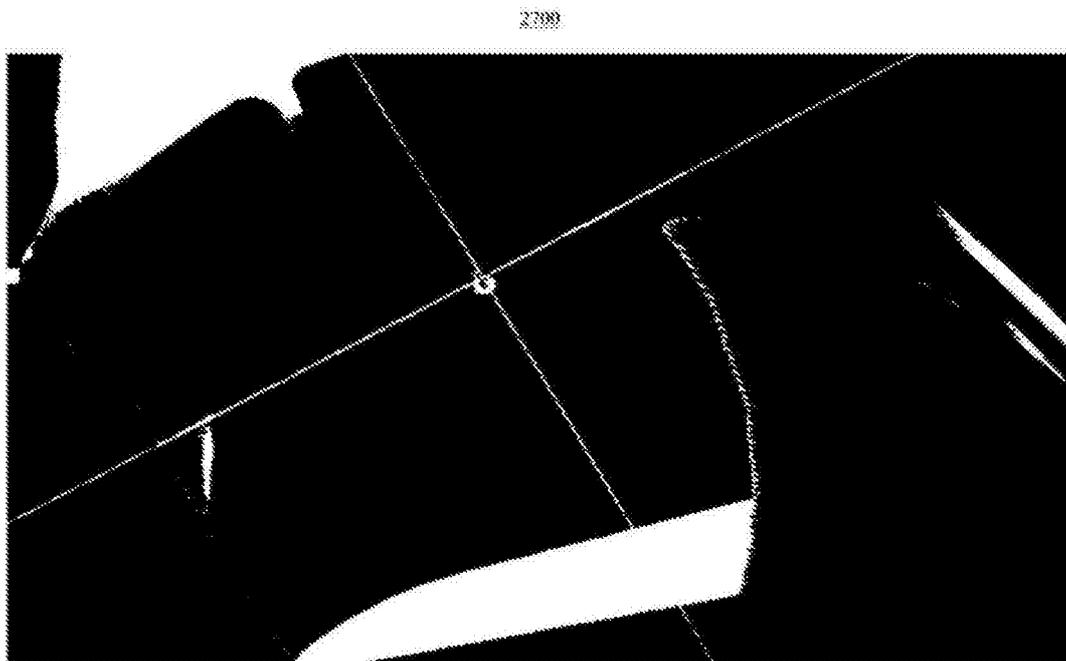


图 27

3888



图 28

2800



图 29

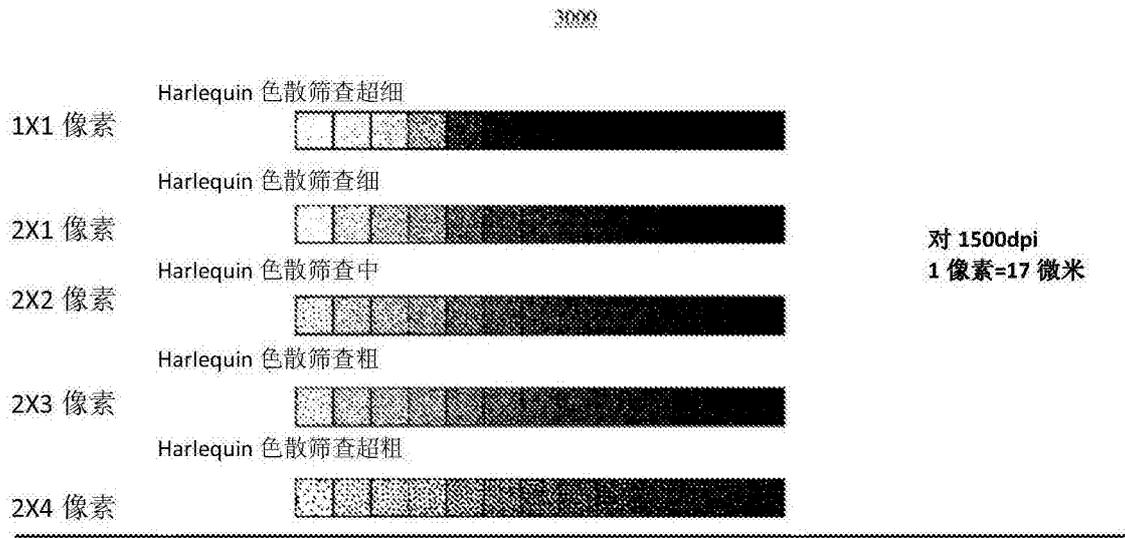


图 30

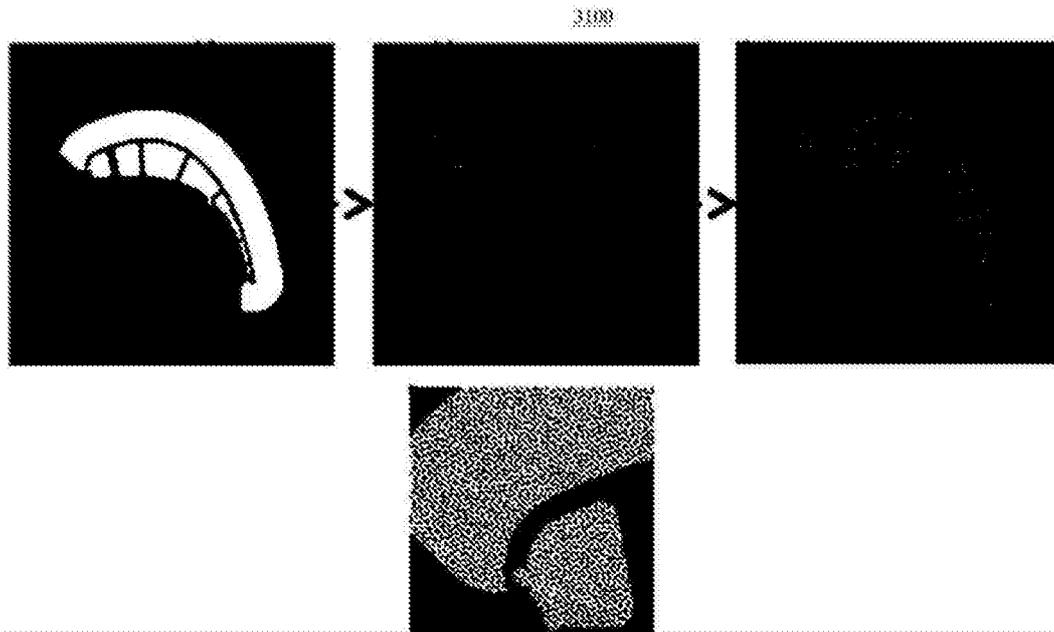


图 31

3200

灰度系数 对 图形灰度

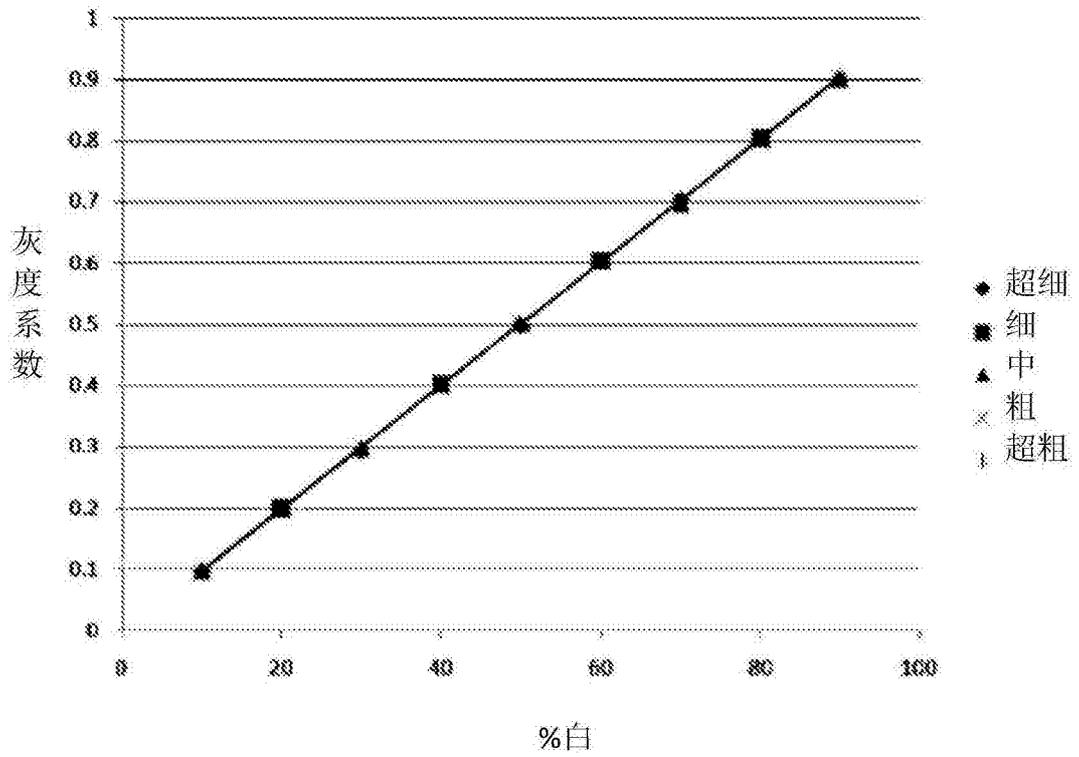
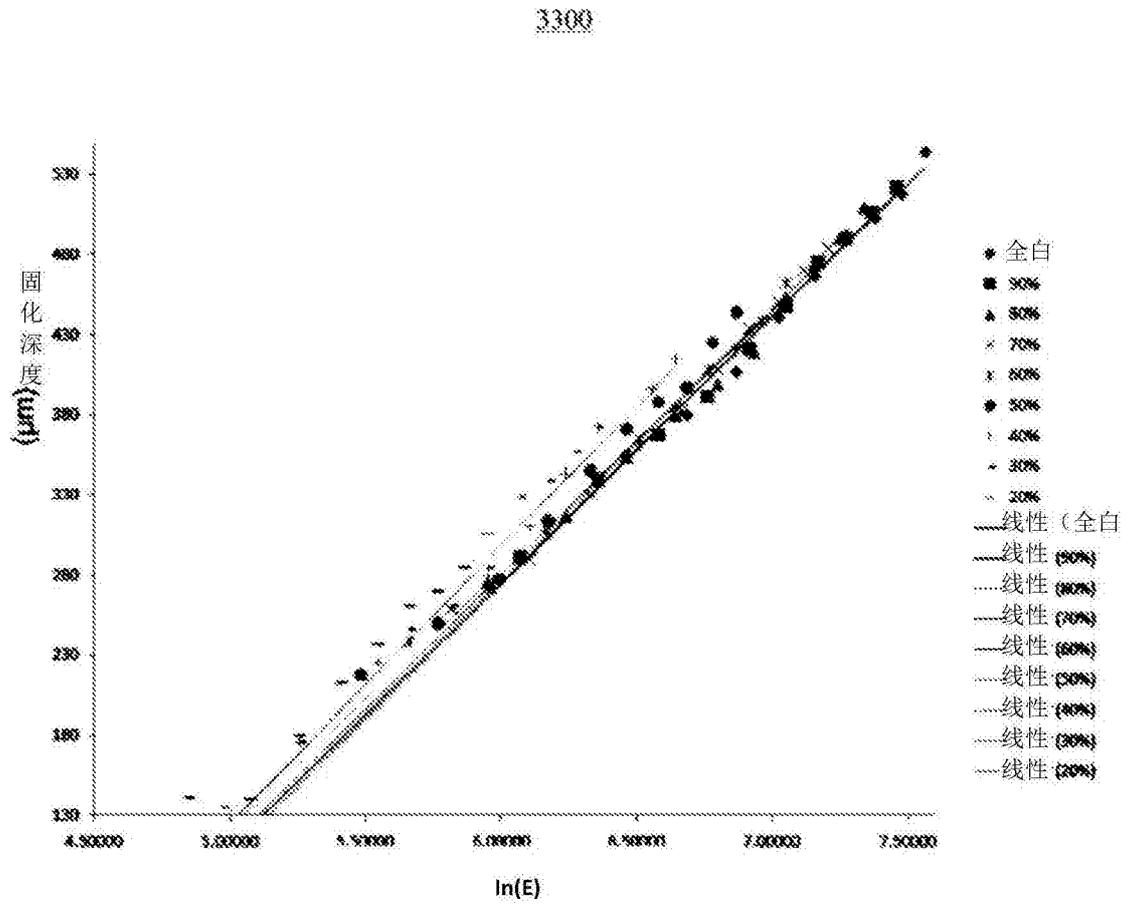


图 32



3400

穿透深度 对 灰度

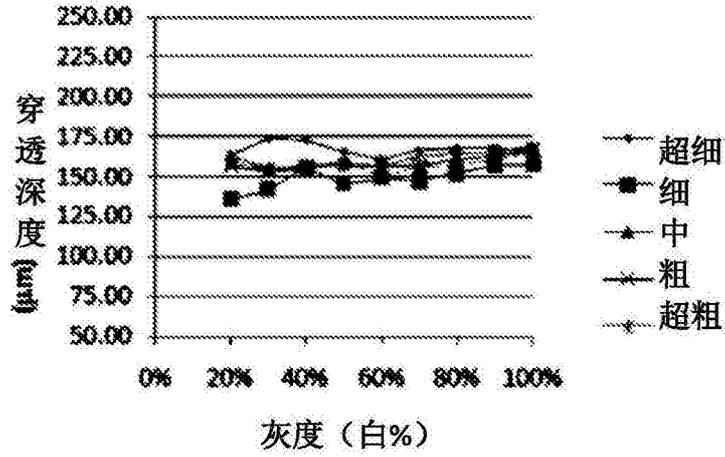


图 34

3500

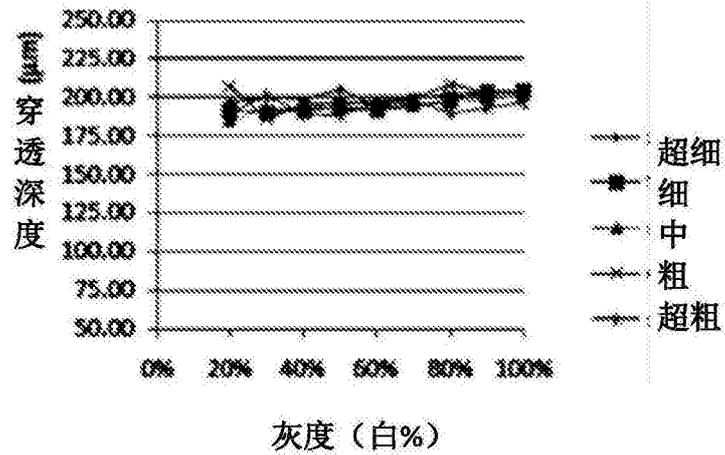


图 35

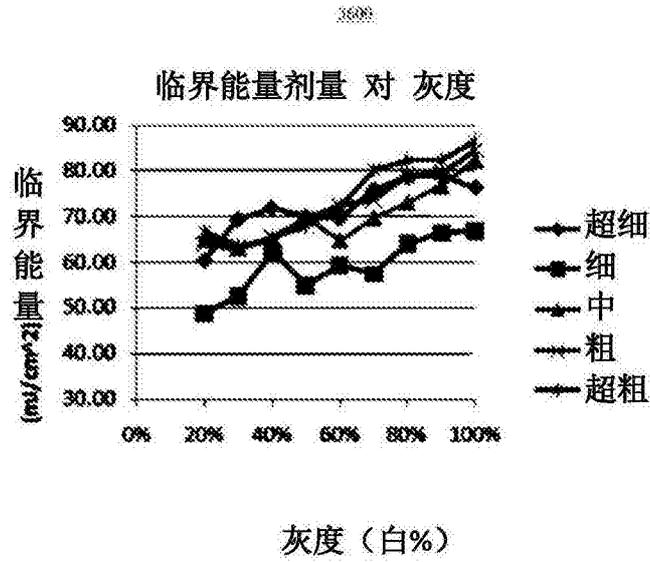


图 36

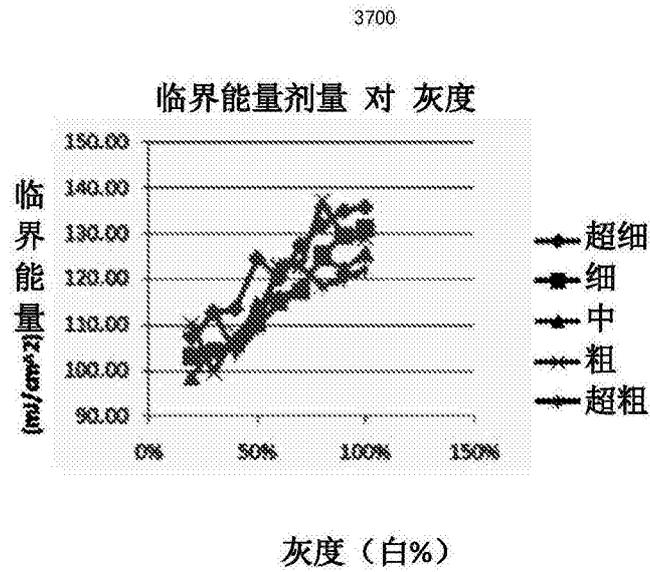


图 37

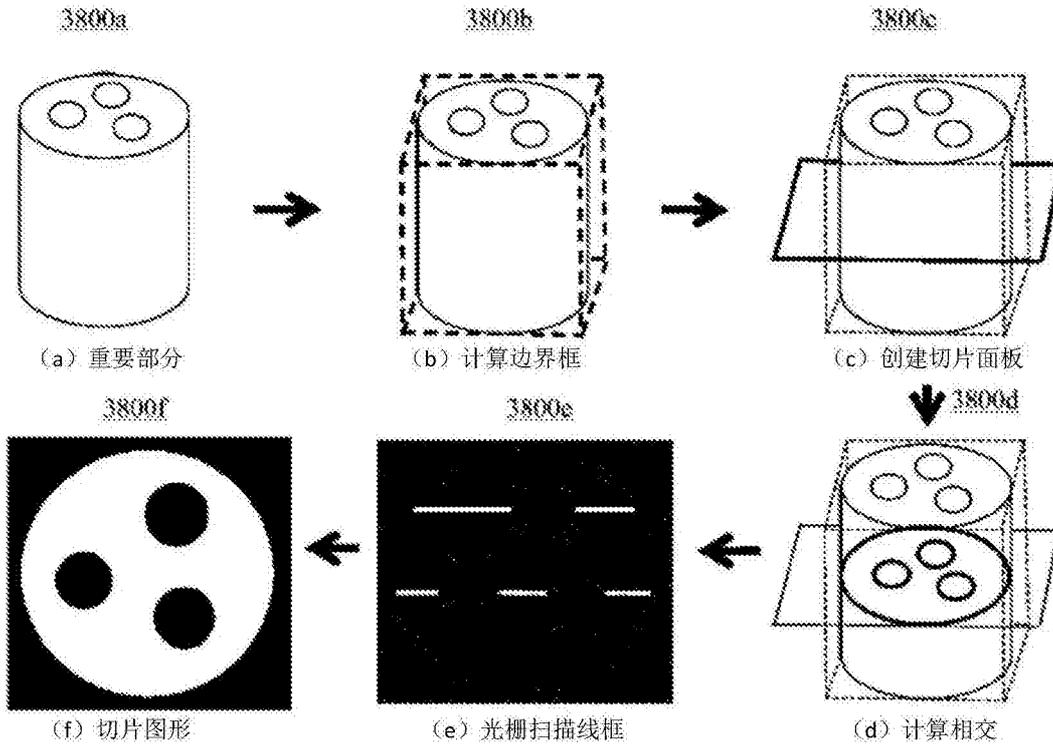


图 38

3900

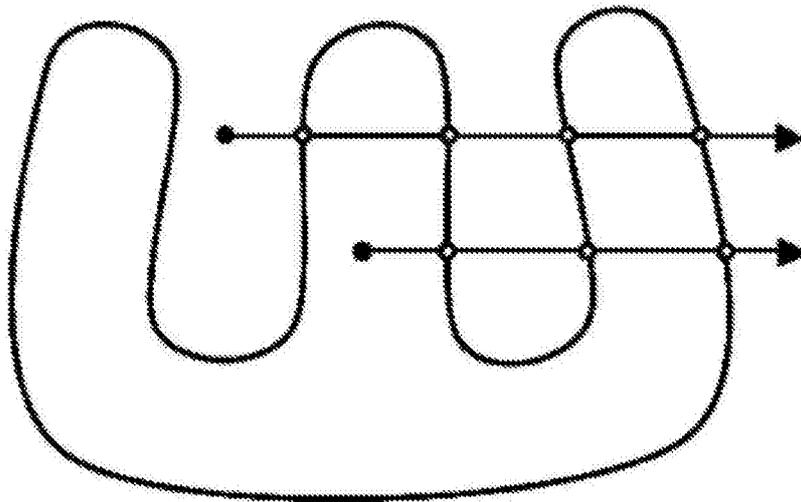


图 39

4000

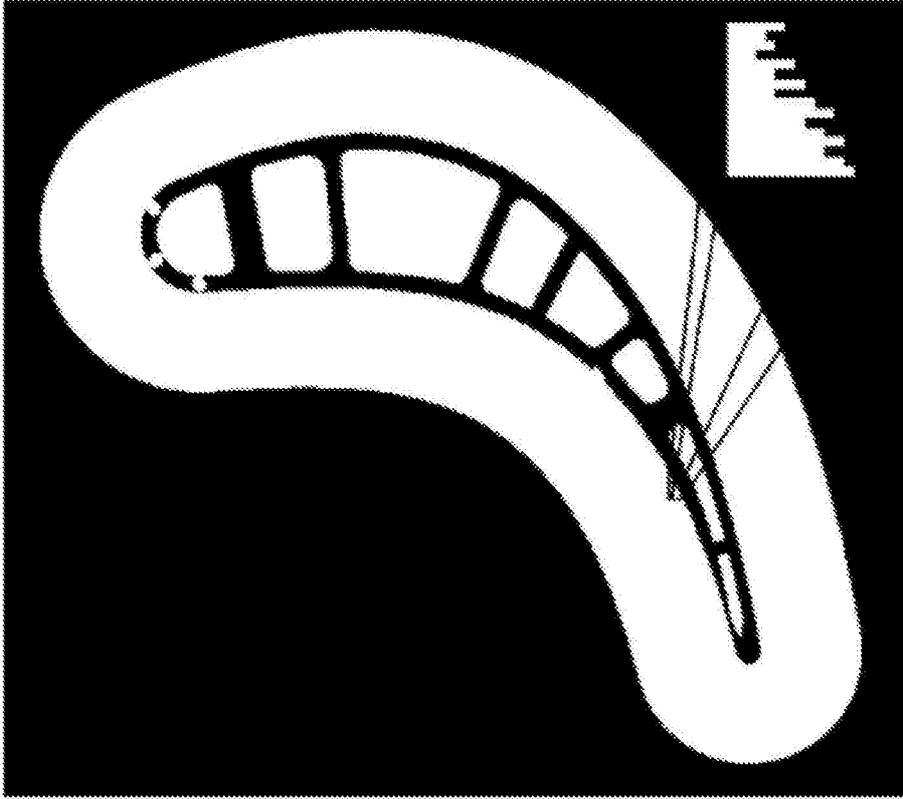


图 40

4100

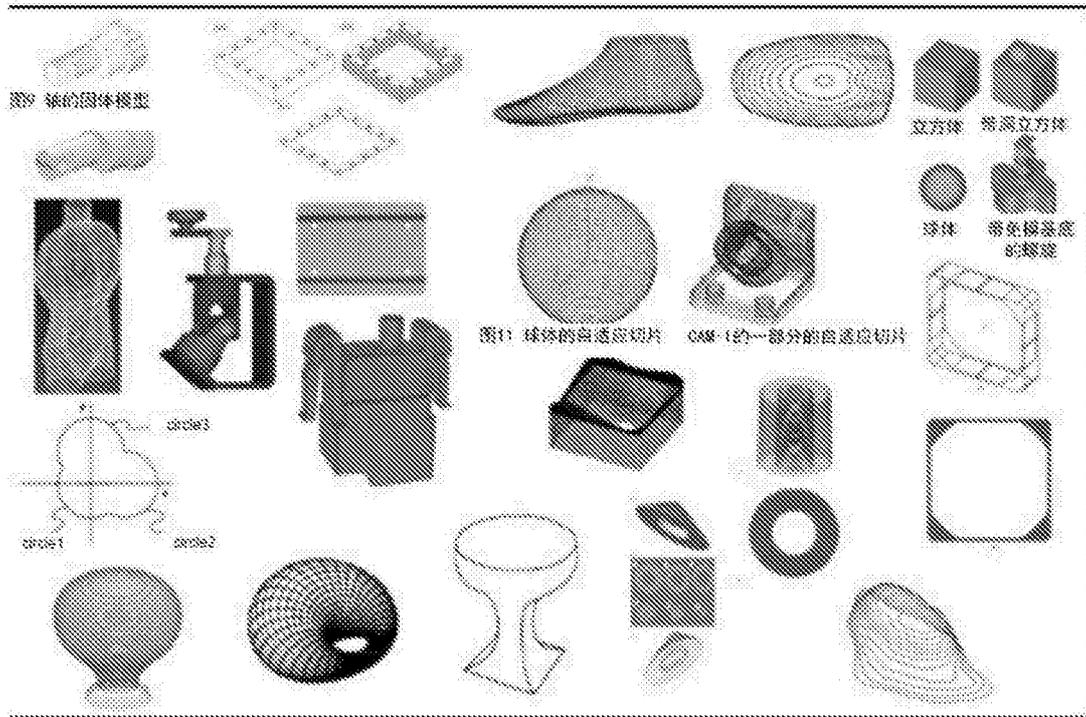


图 41

4200

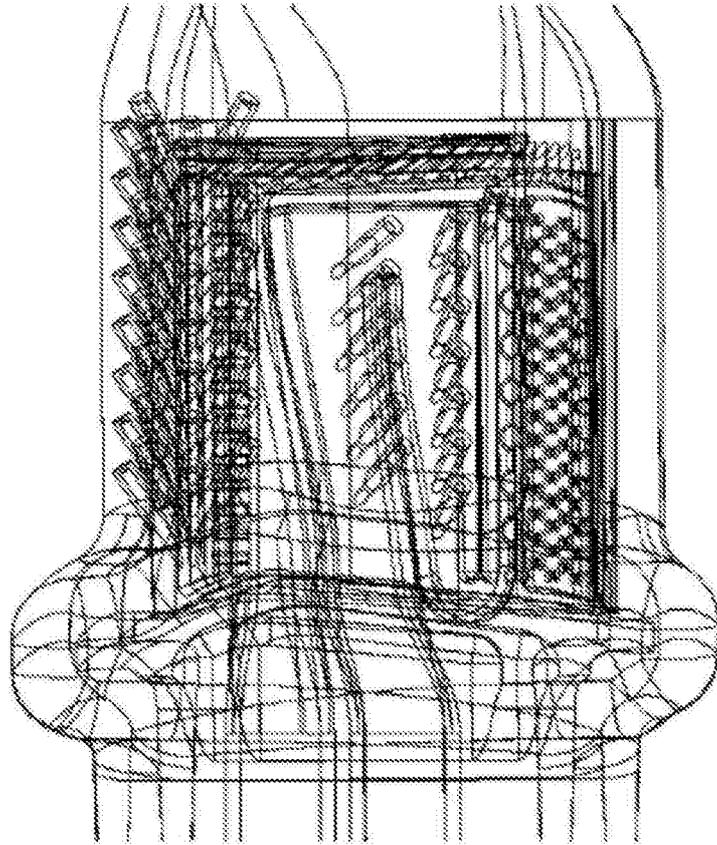


图 42

4300a

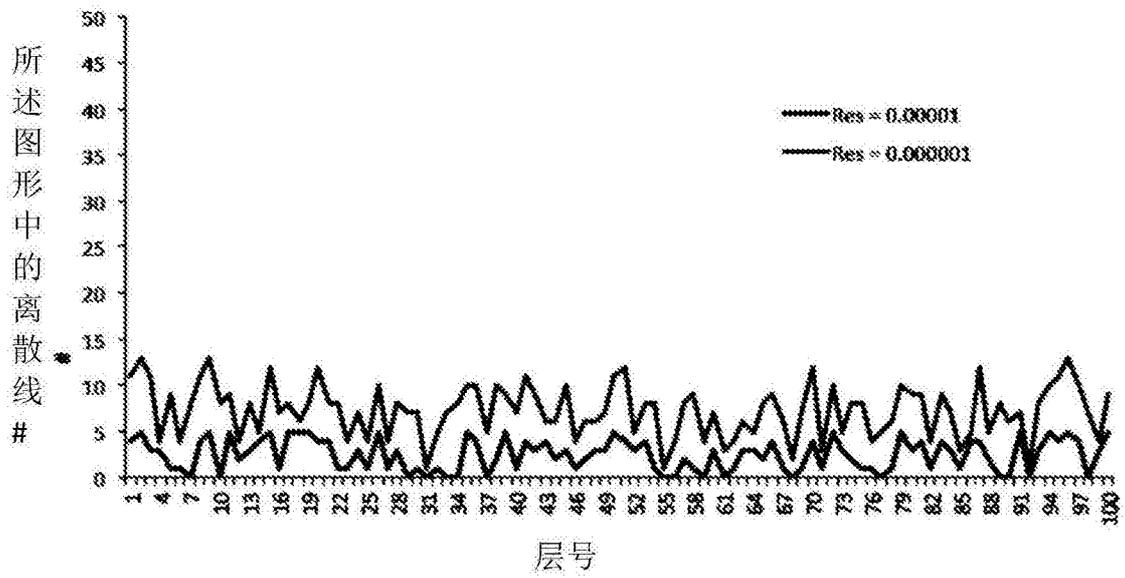


图 43A

4300b

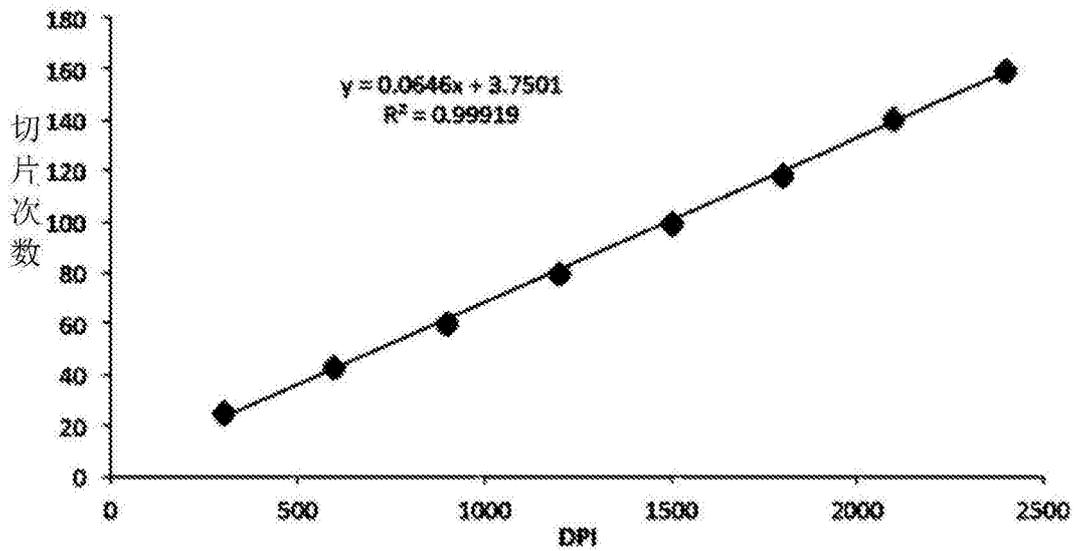


图 43B

4400

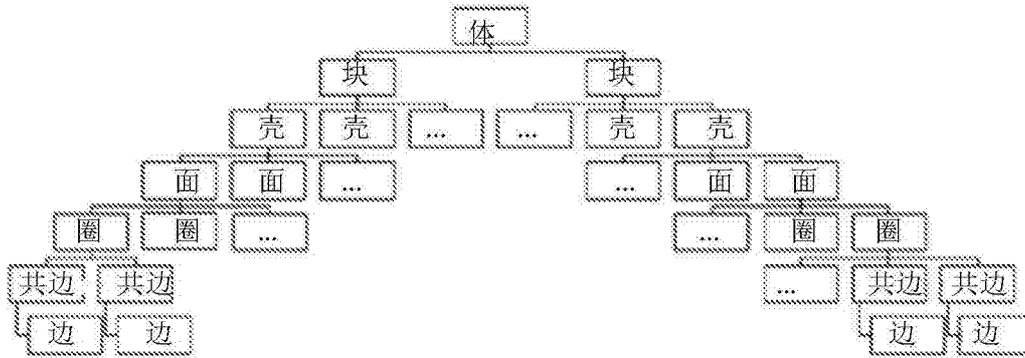


图 44

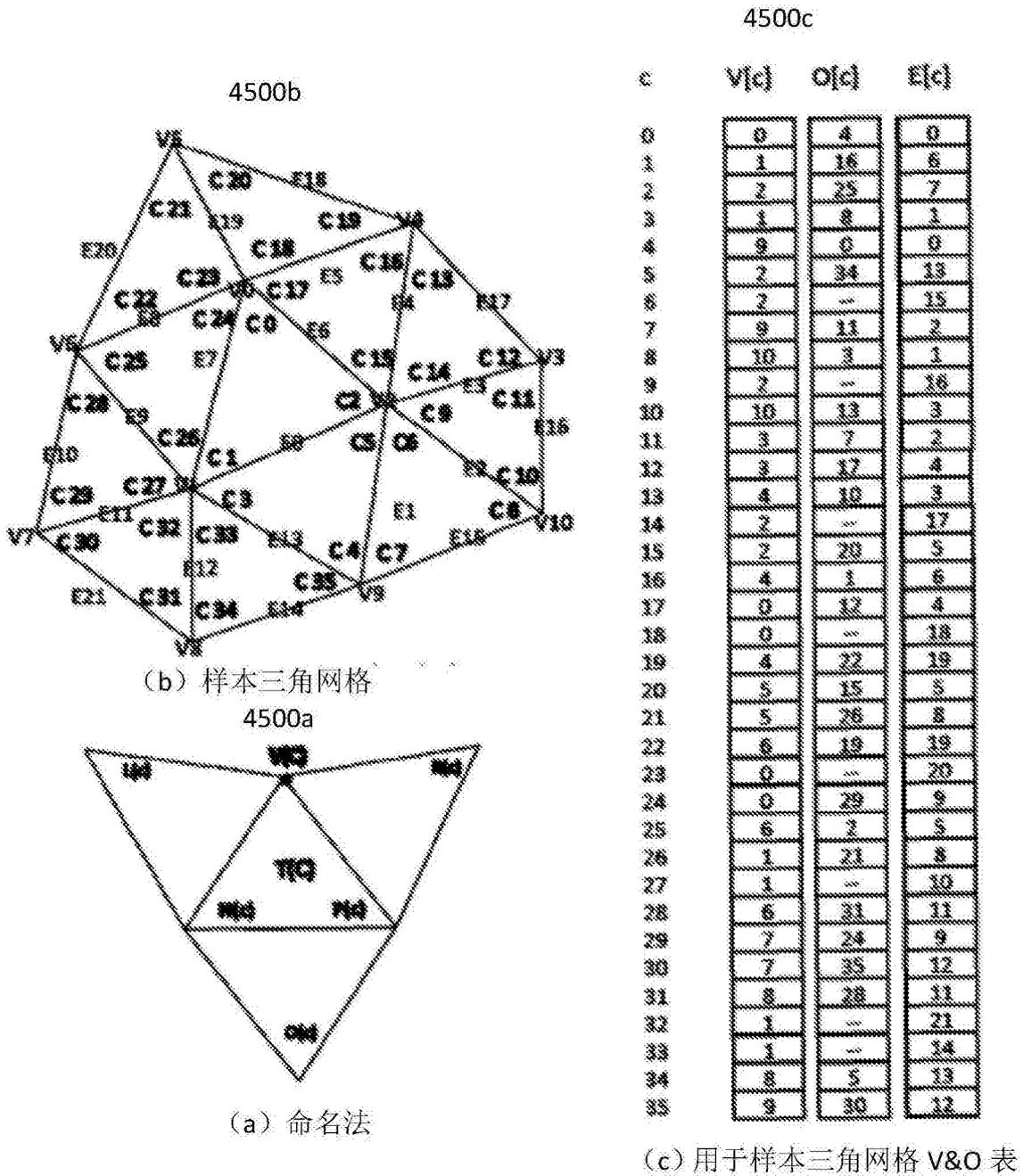
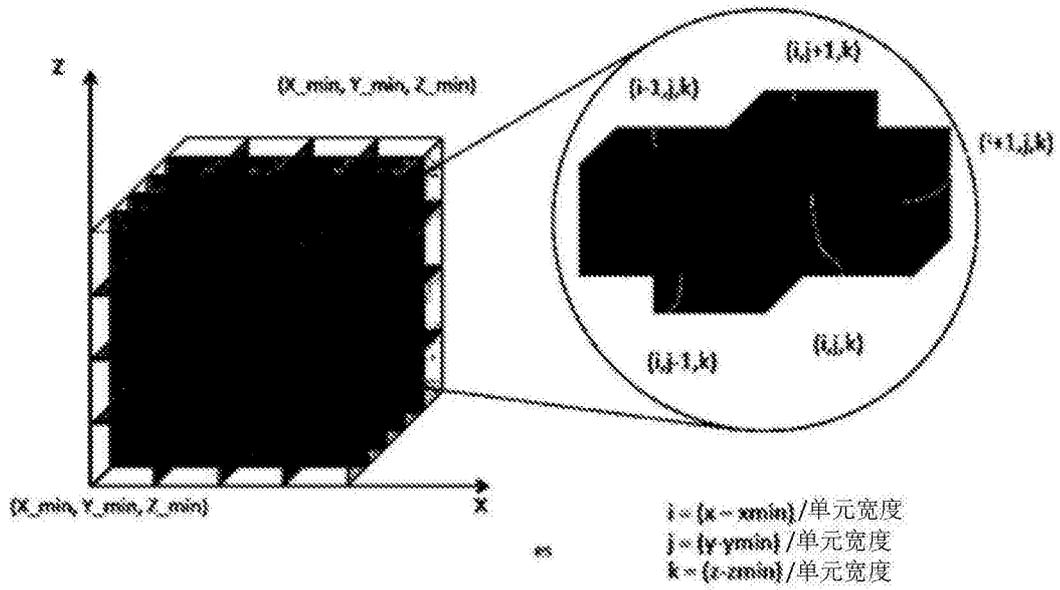


图 45

4600



散列表：将整个部分分为有限矩形体积

图 46

4700

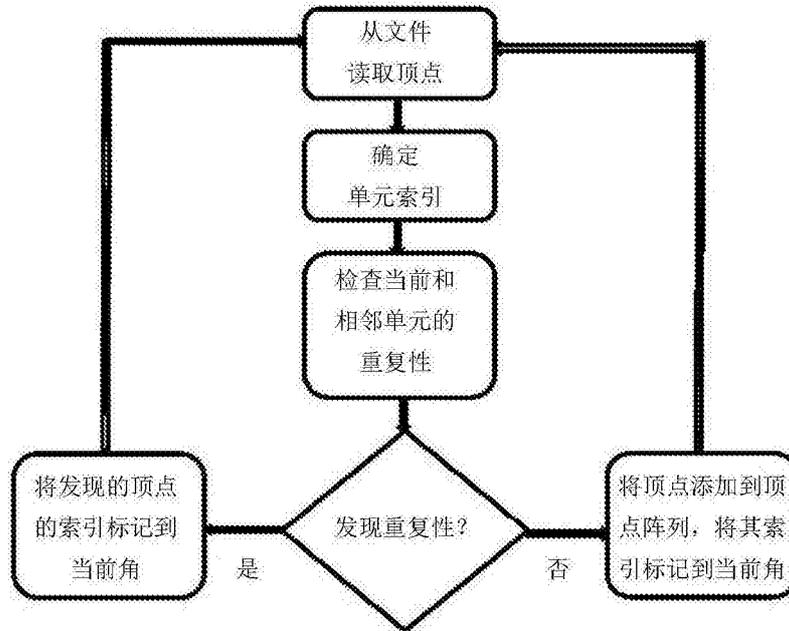


图 47

4800

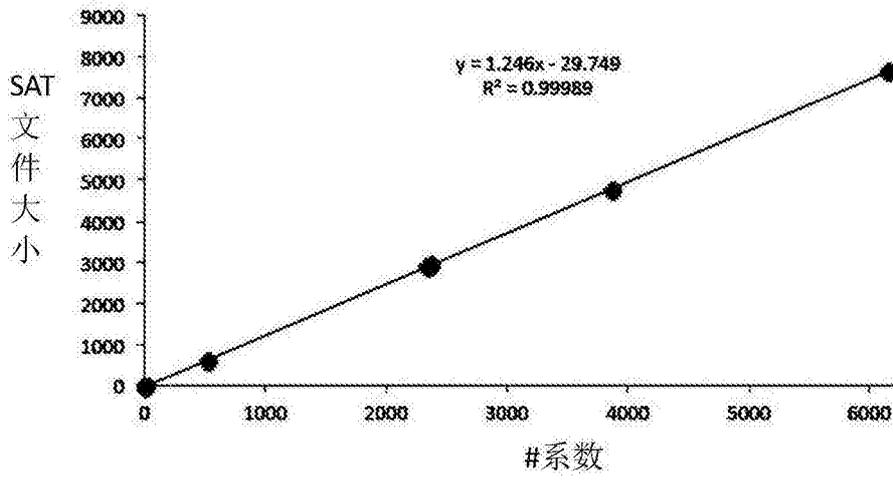


图 48

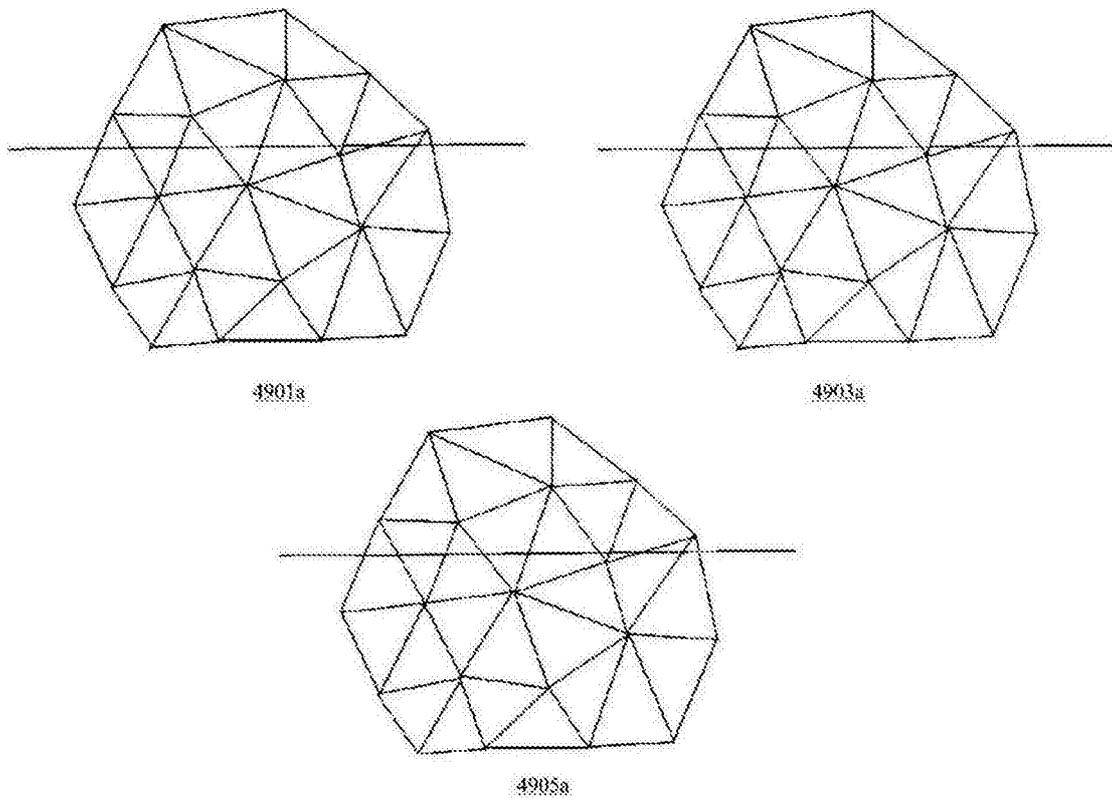


图 49A

4900b

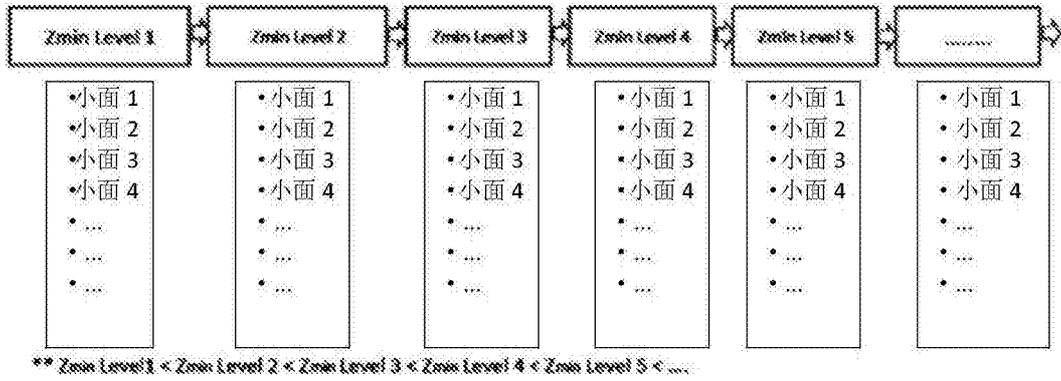


图 49B

4900c

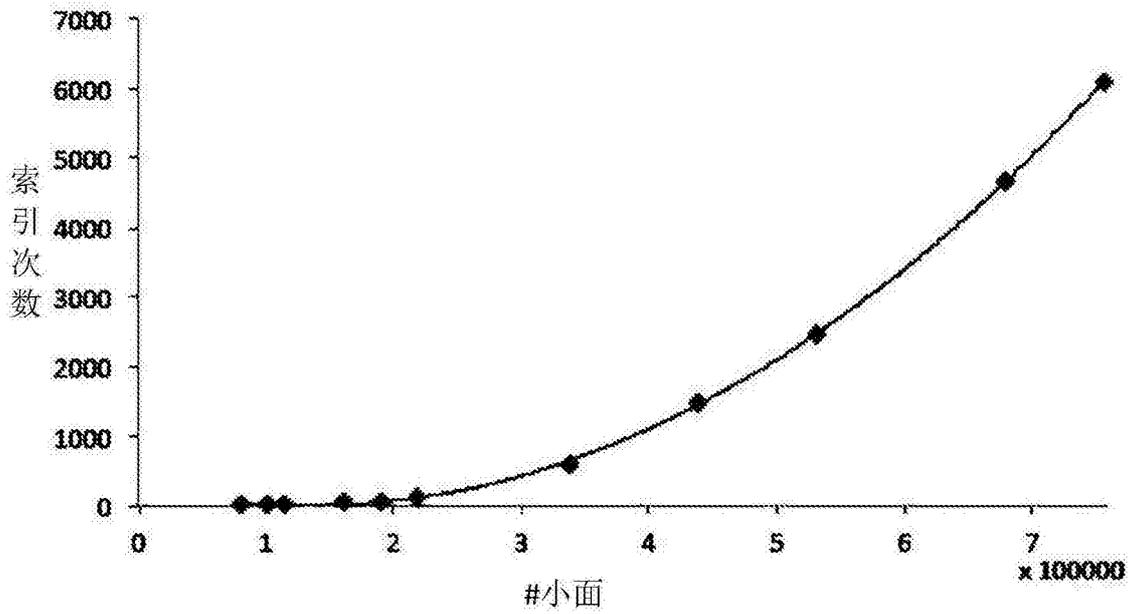


图 49C

5000

Z \ Y	行 1	行 2	行 3	行 4	.....
切片 1	点 (1,1)	点 (1,2)	点 (1,3)	点 (1,4)	.....
切片 2	点 (2,1)	点 (2,2)	点 (2,3)	点 (2,4)	.....
切片 3	点 (3,1)	点 (3,2)	点 (3,3)	点 (3,4)	.....
切片 4	点 (4,1)	点 (4,2)	点 (4,3)	点 (4,4)	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....

图 50

5100

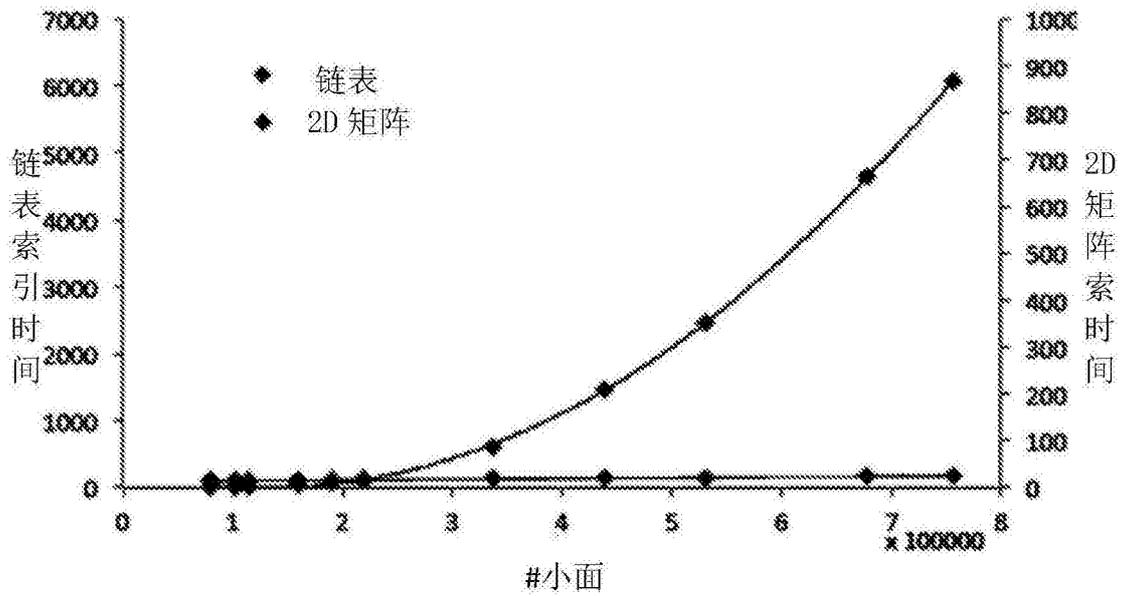


图 51

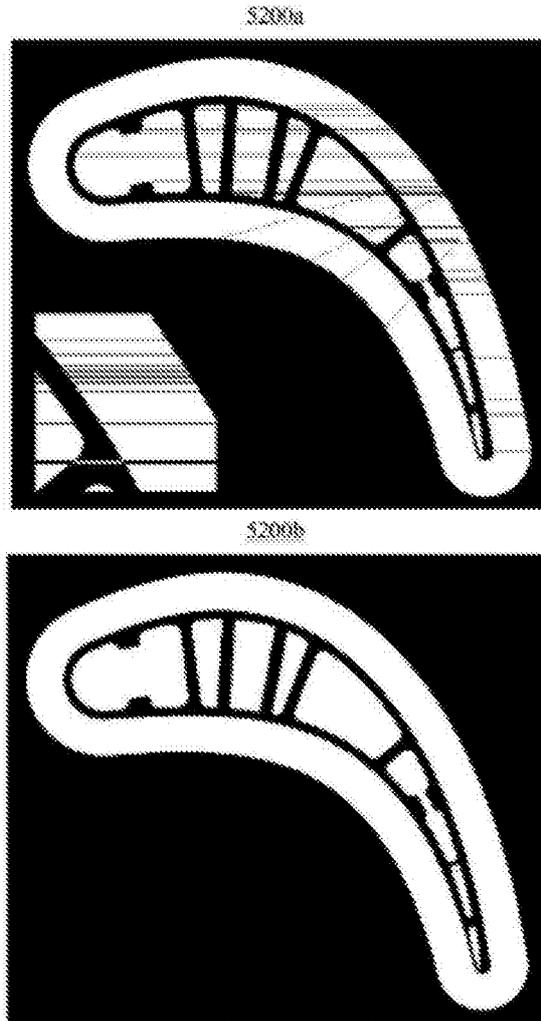


图 52

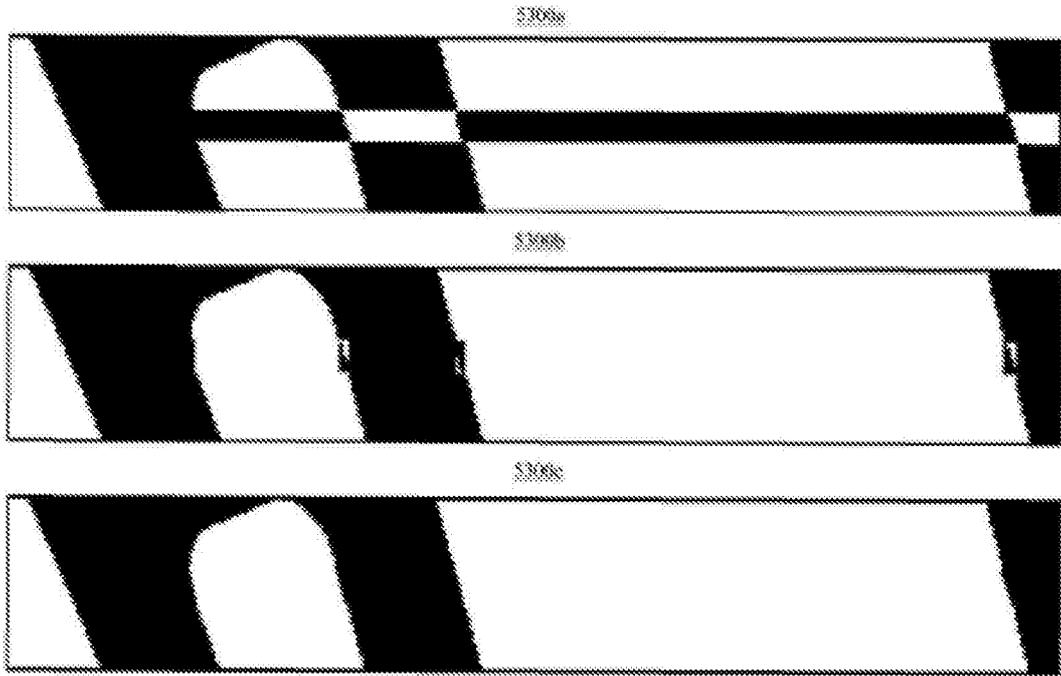


图 53

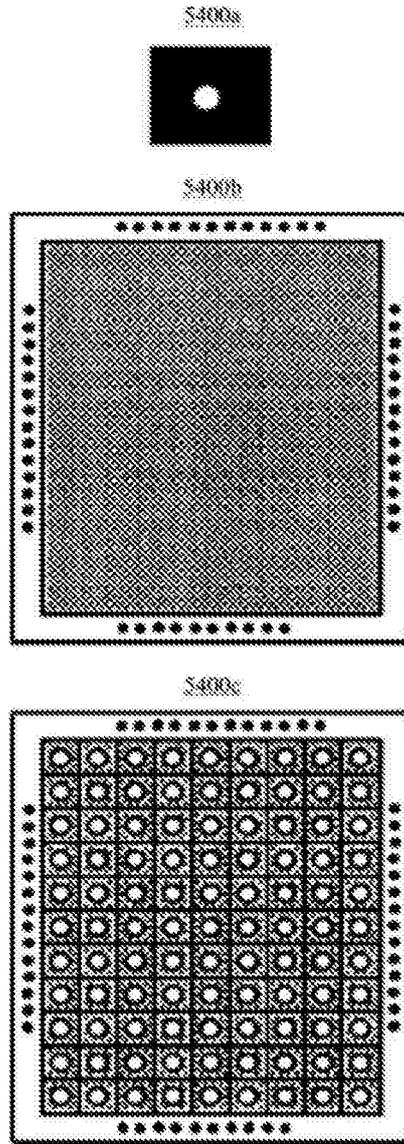


图 54

5500

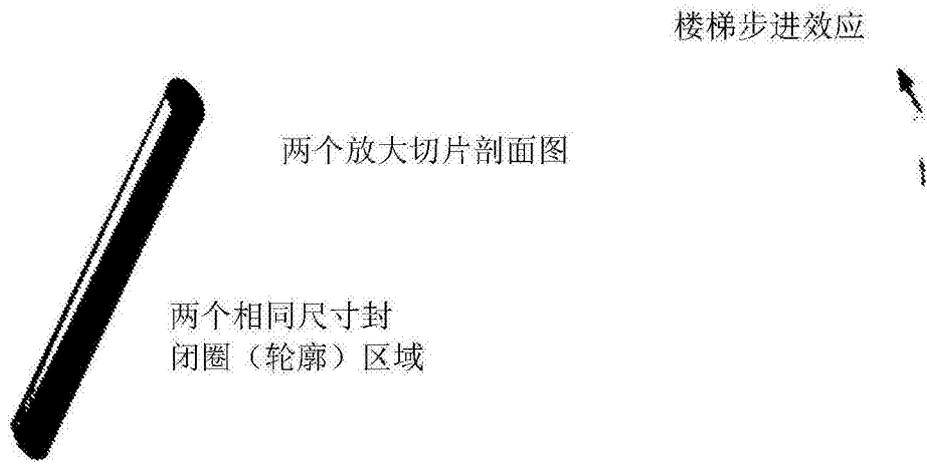


图 55

5600

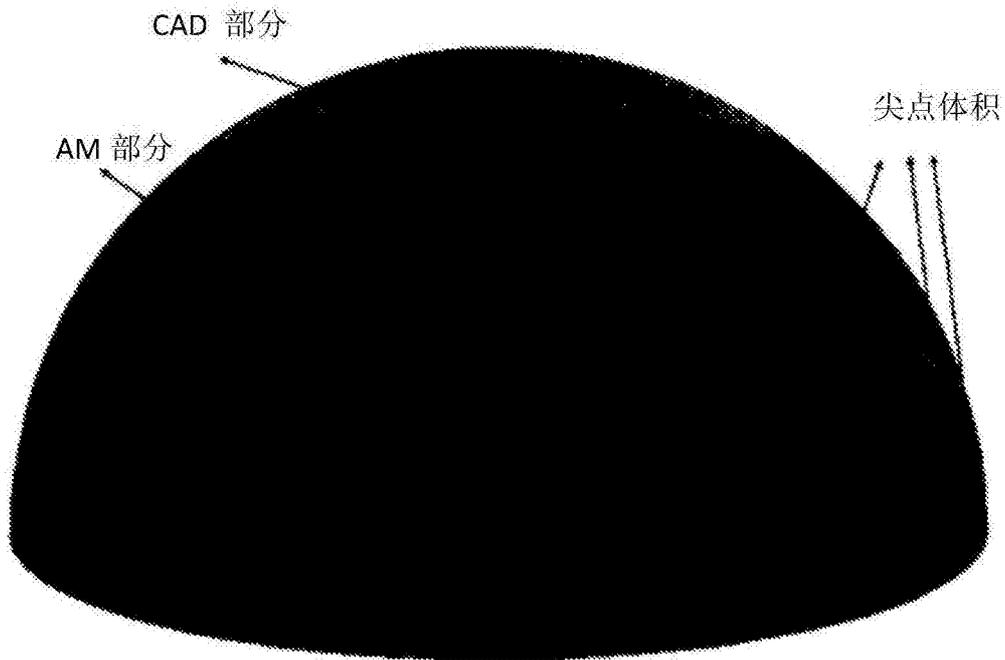


图 56

5700

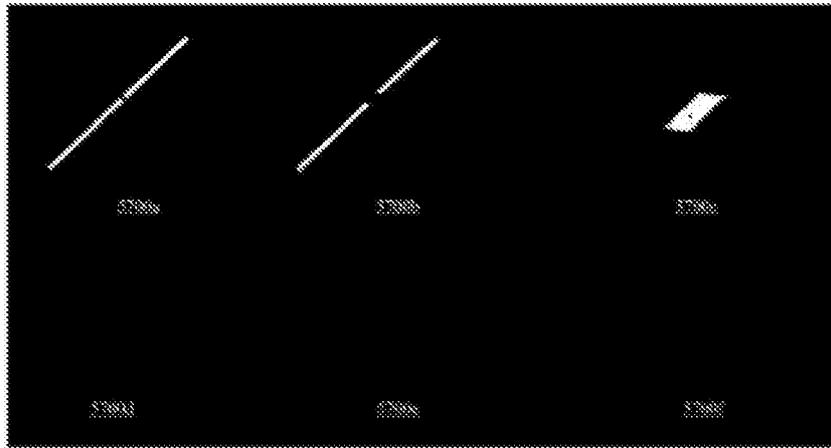


图 57

5800

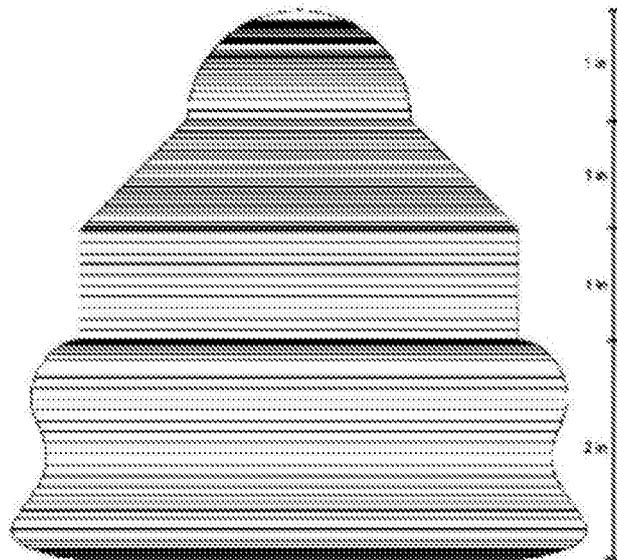


图 58

5900

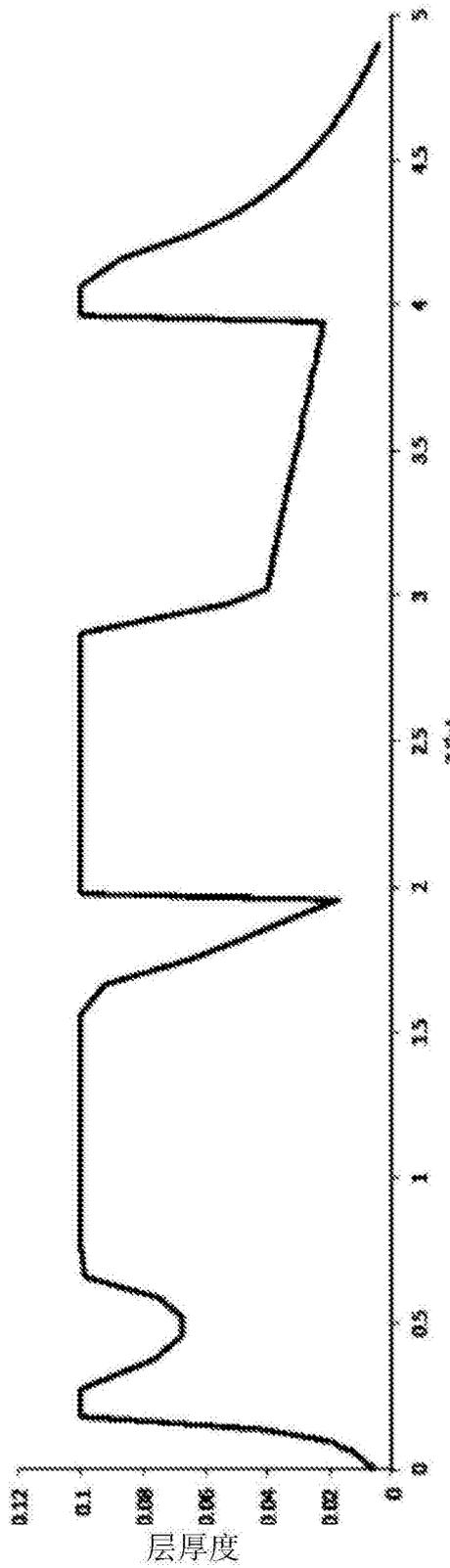


图 59

6000

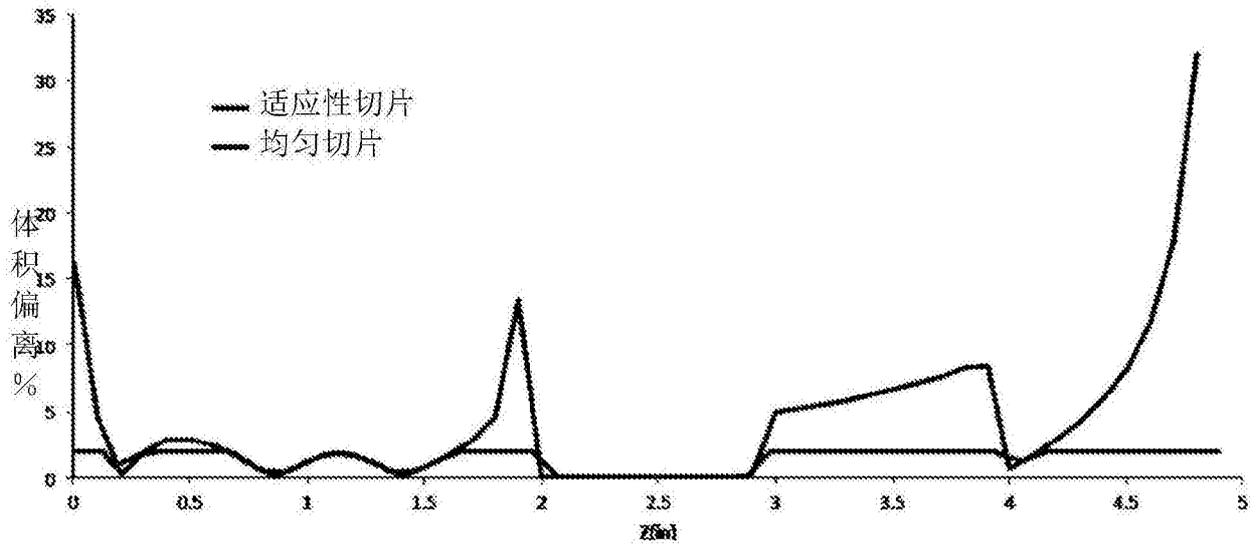


图 60

6100

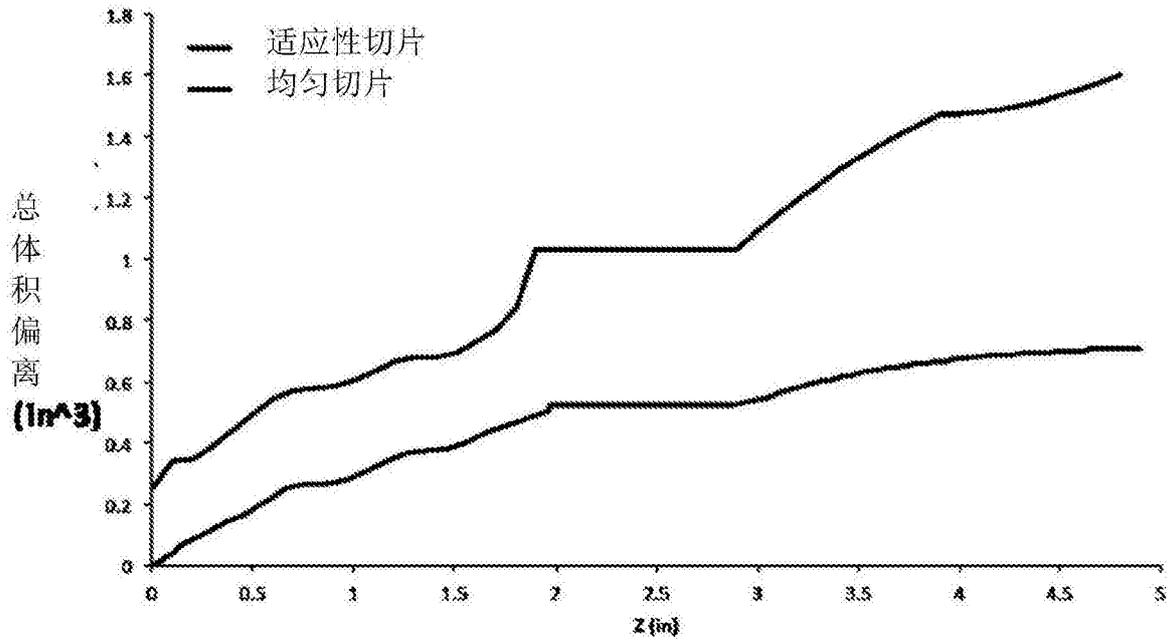


图 61

6200

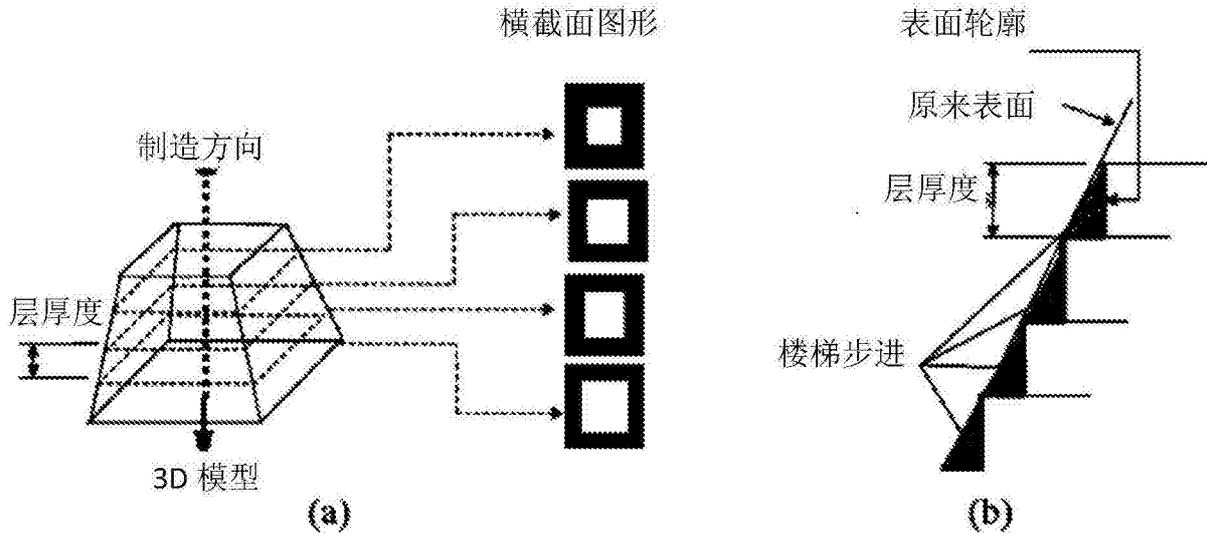


图 62

6300

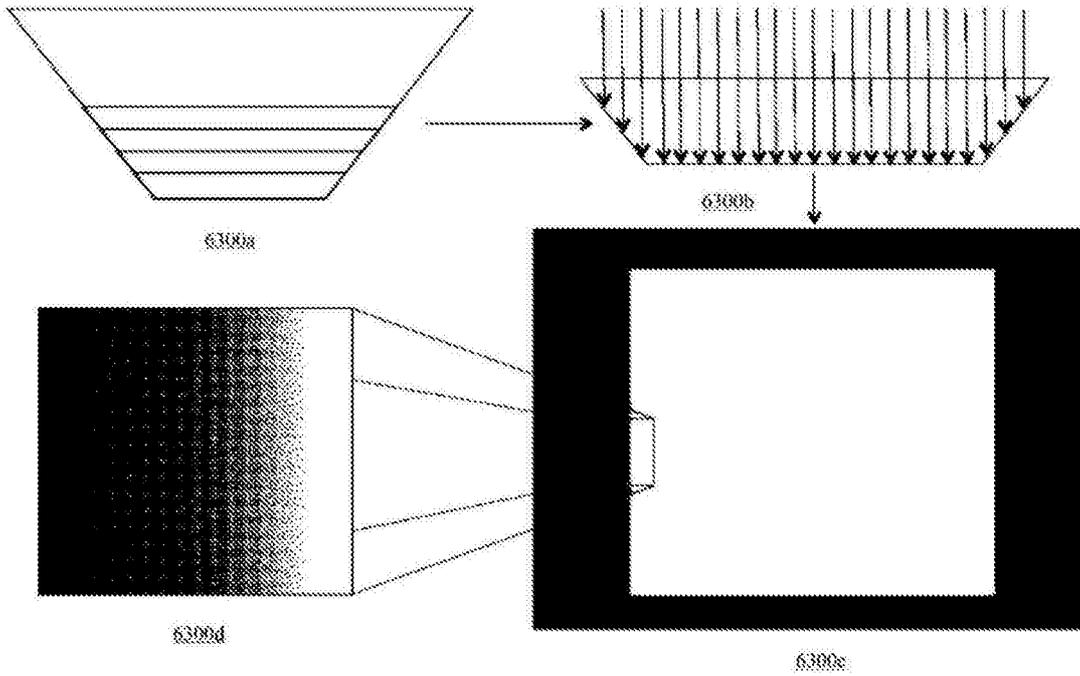


图 63

6400

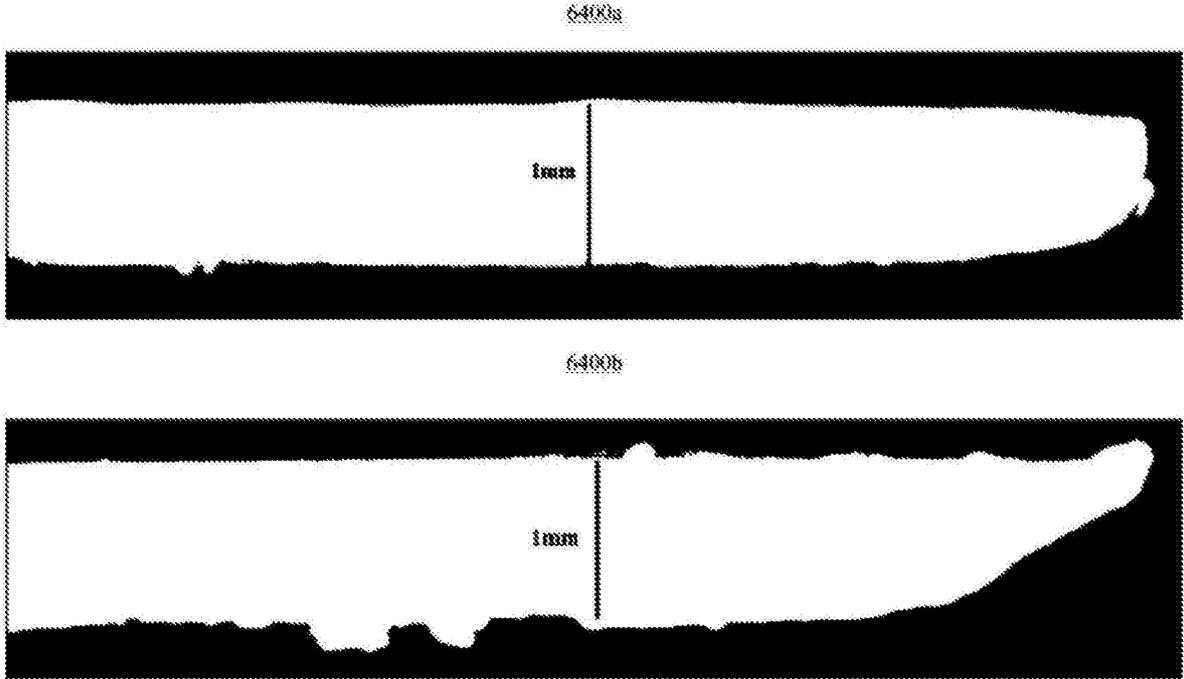


图 64

6500

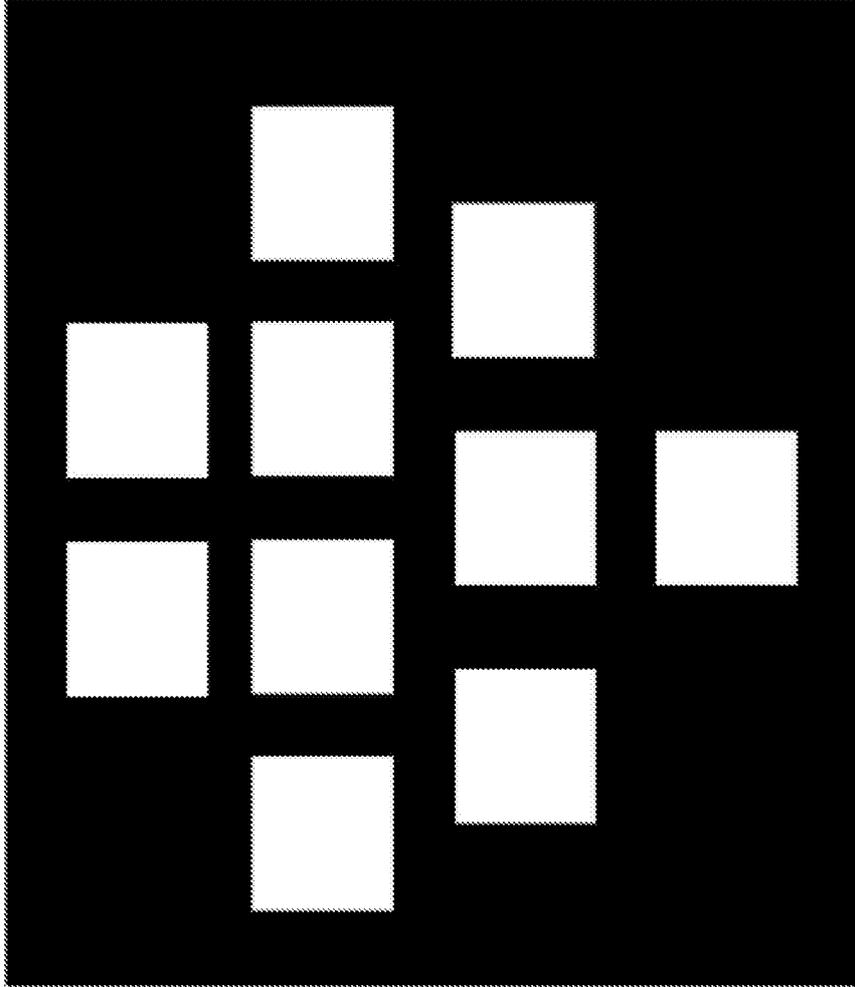


图 65

6600

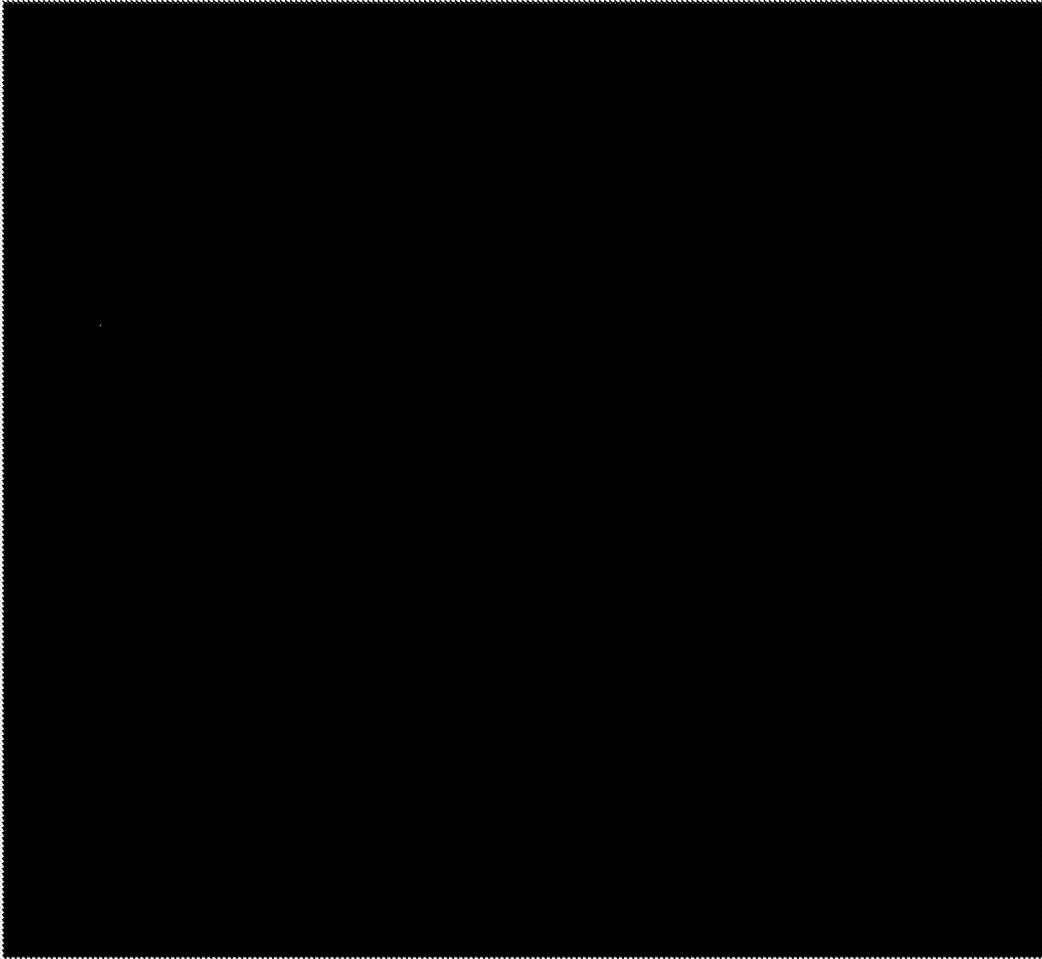


图 66

6700

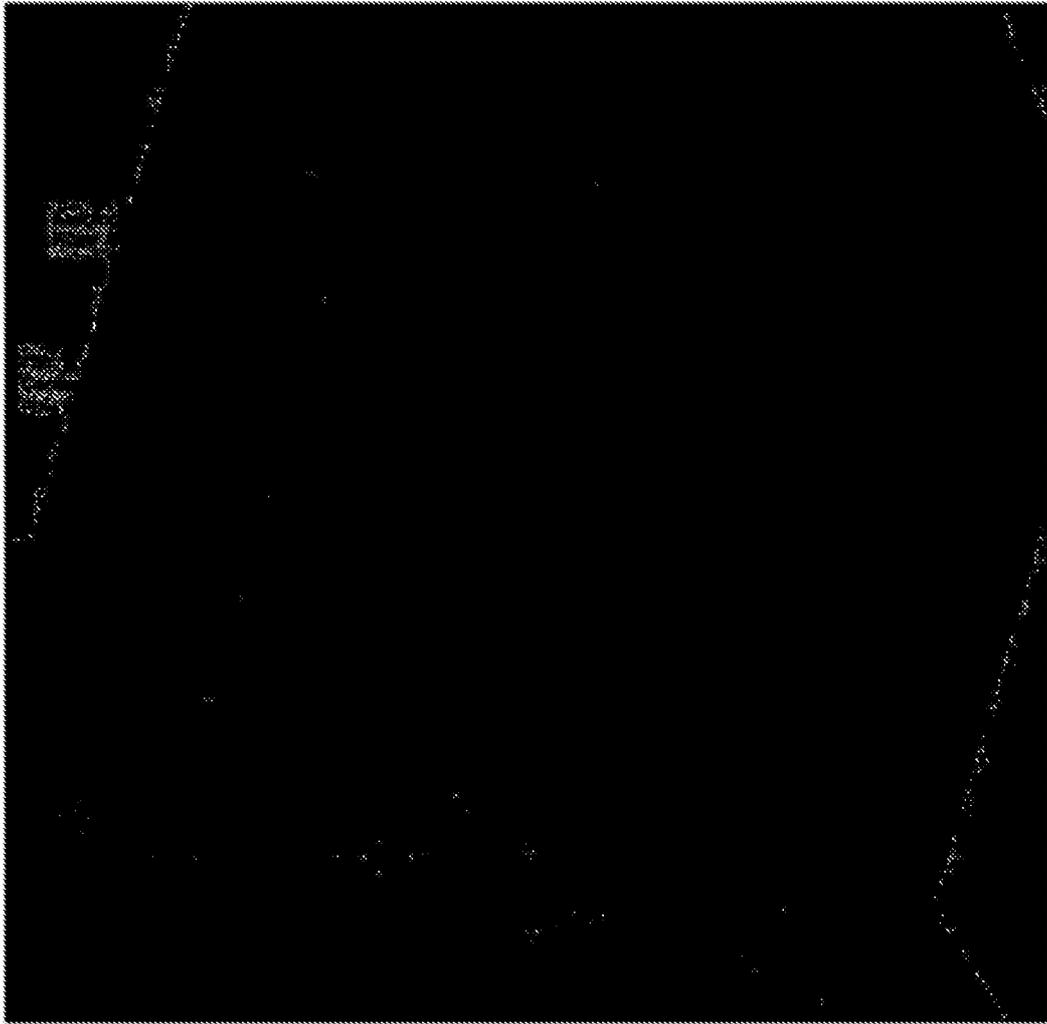


图 67

6800

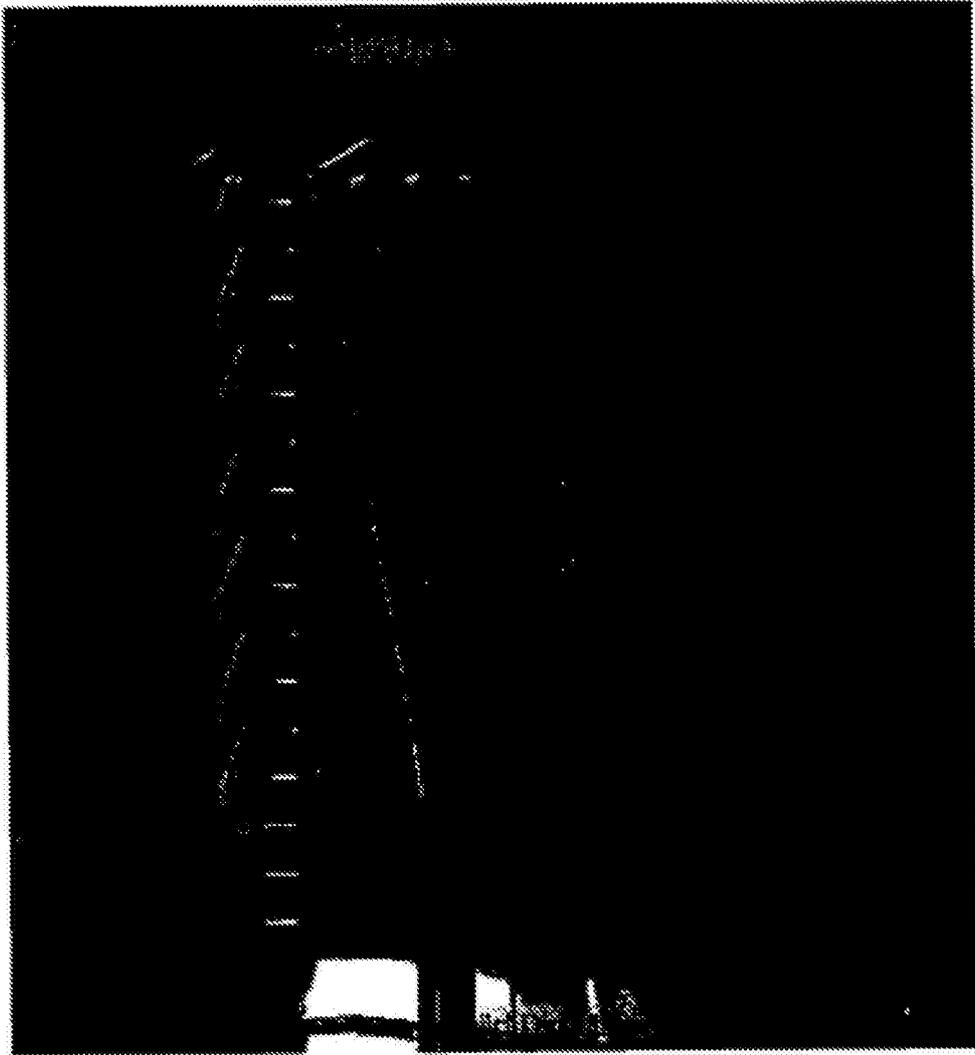


图 68

6900

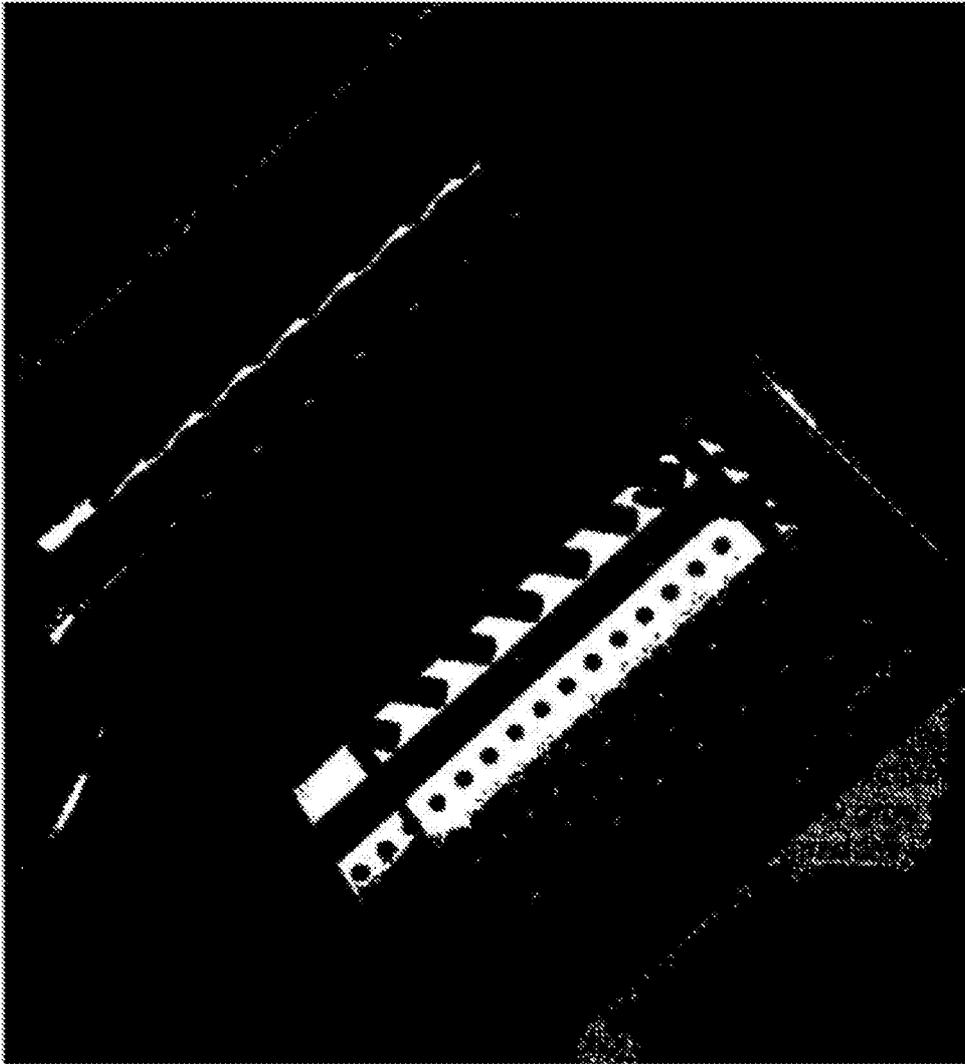


图 69

7000

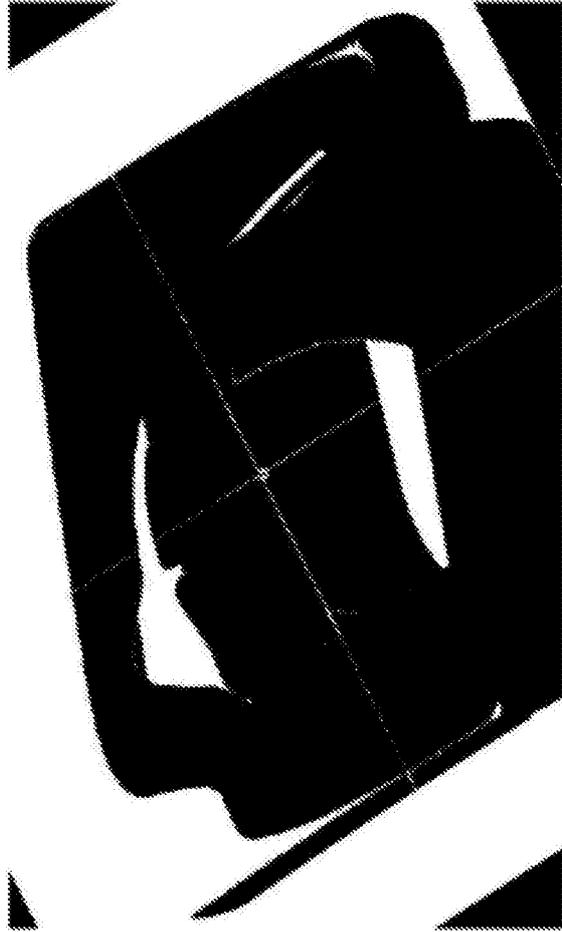
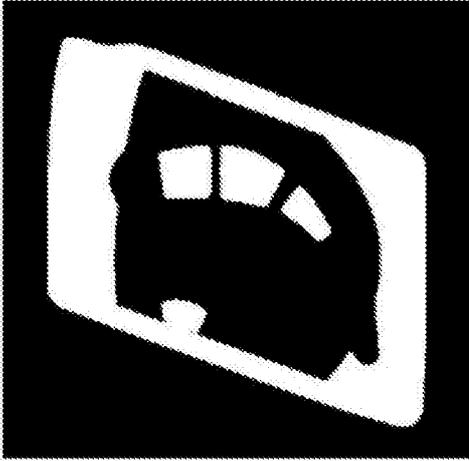


图 70

7100

7100a



7100b

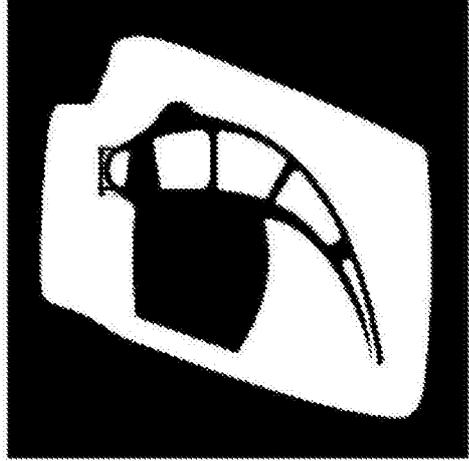


图 71

7200

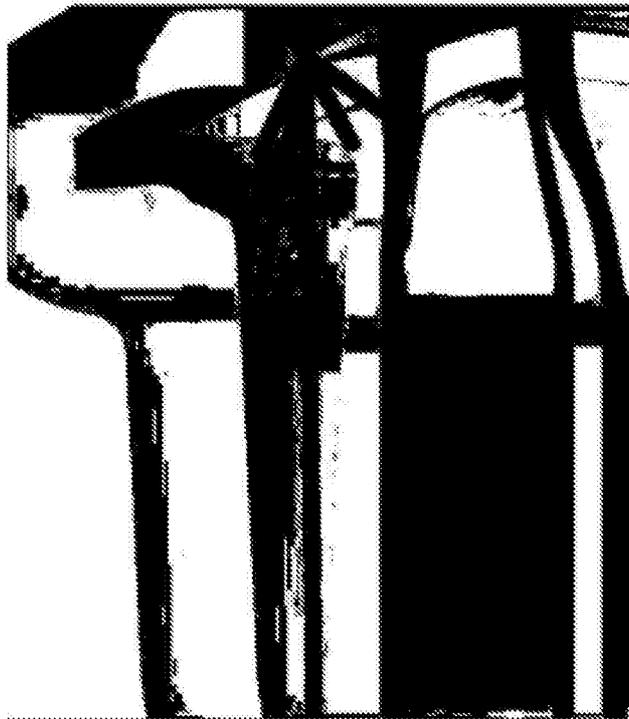


图 72

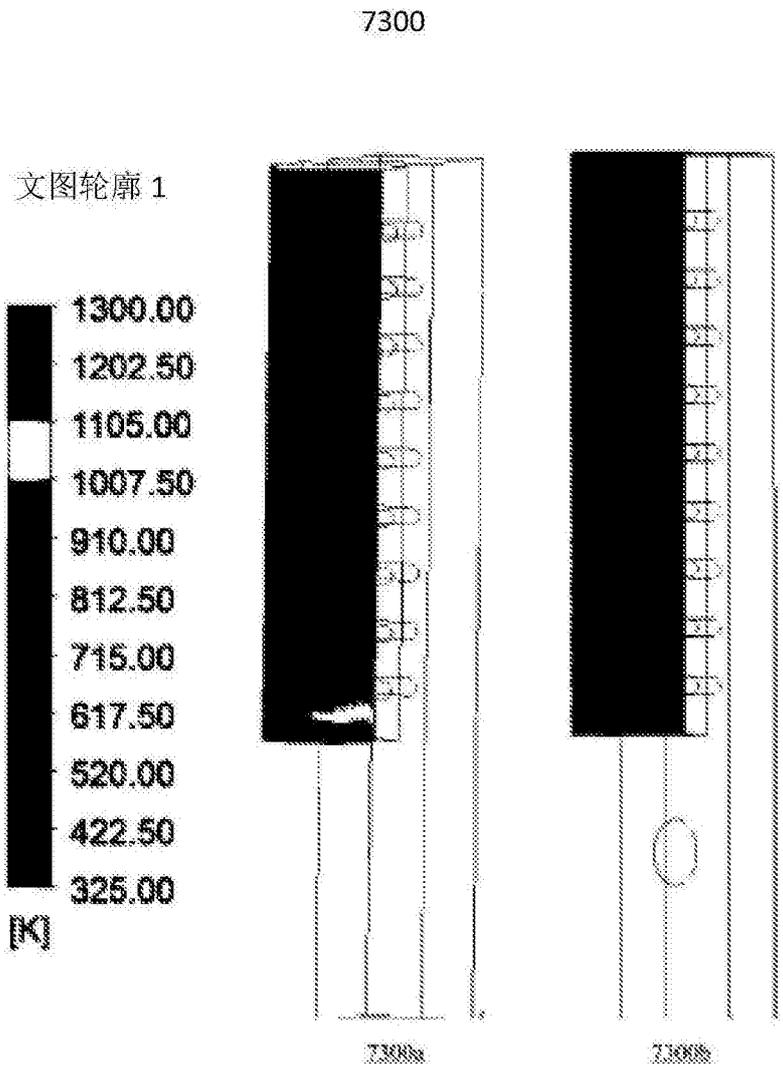


图 73

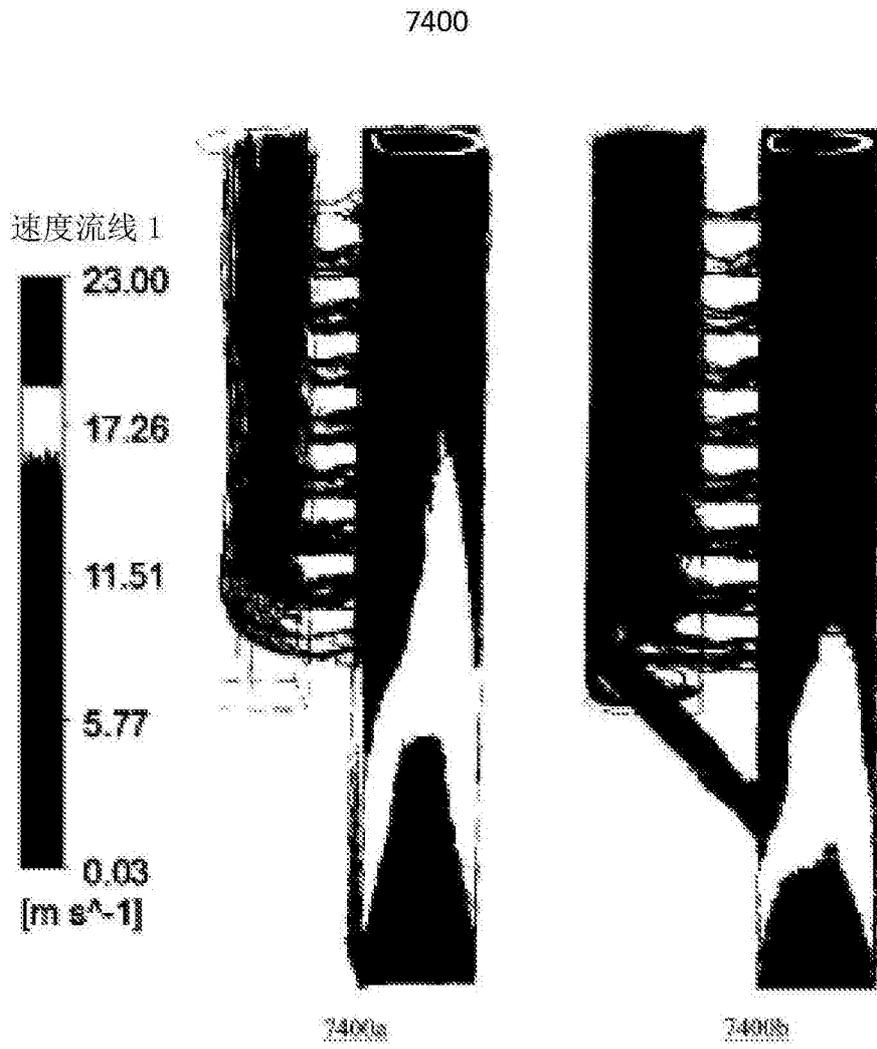


图 74

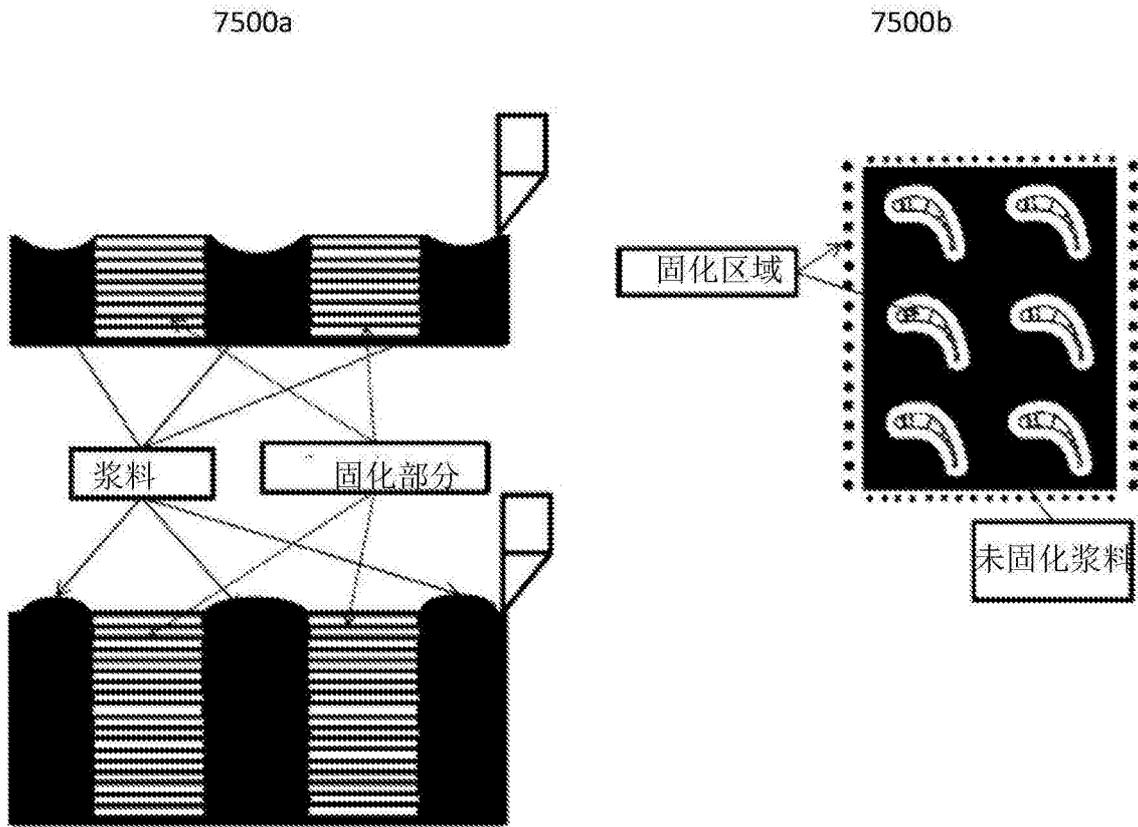


图 75

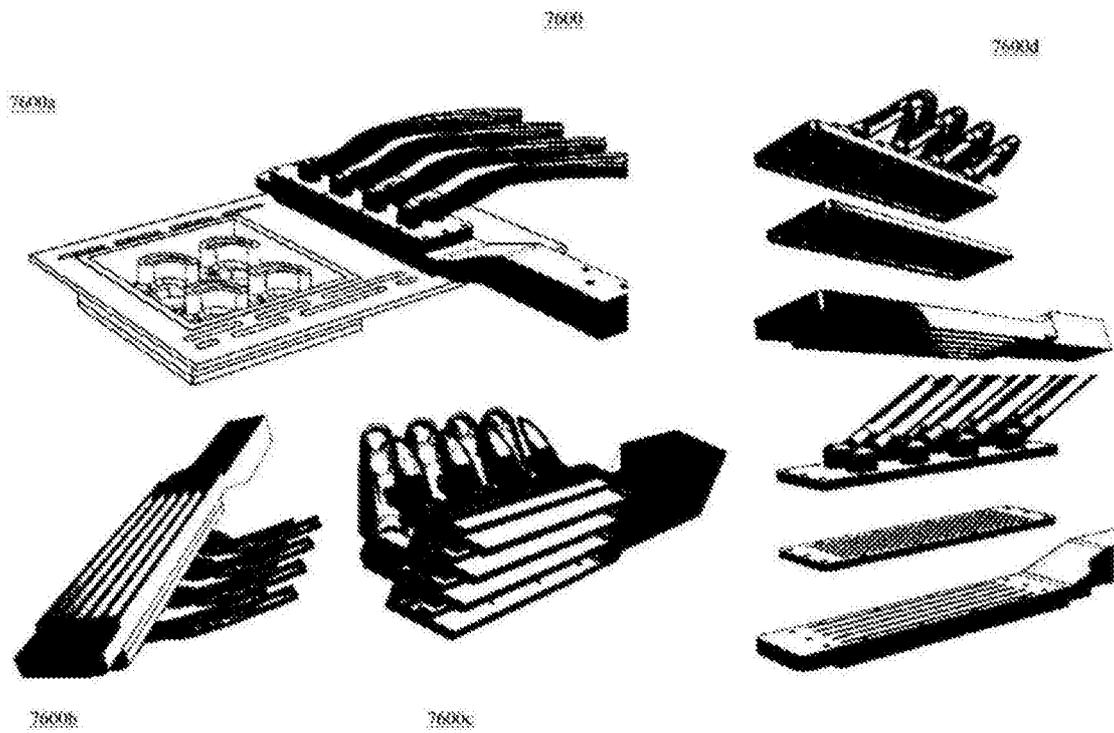


图 76

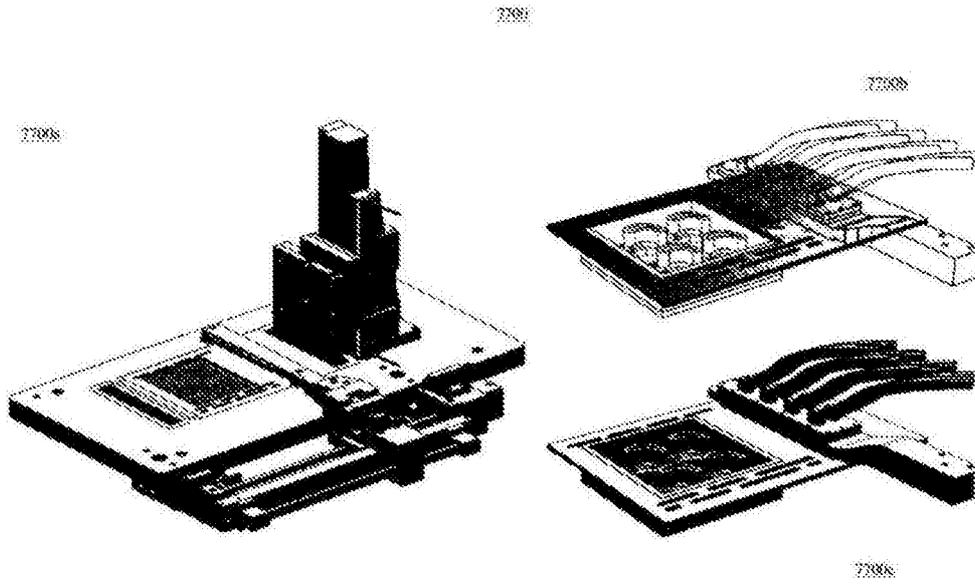


图 77

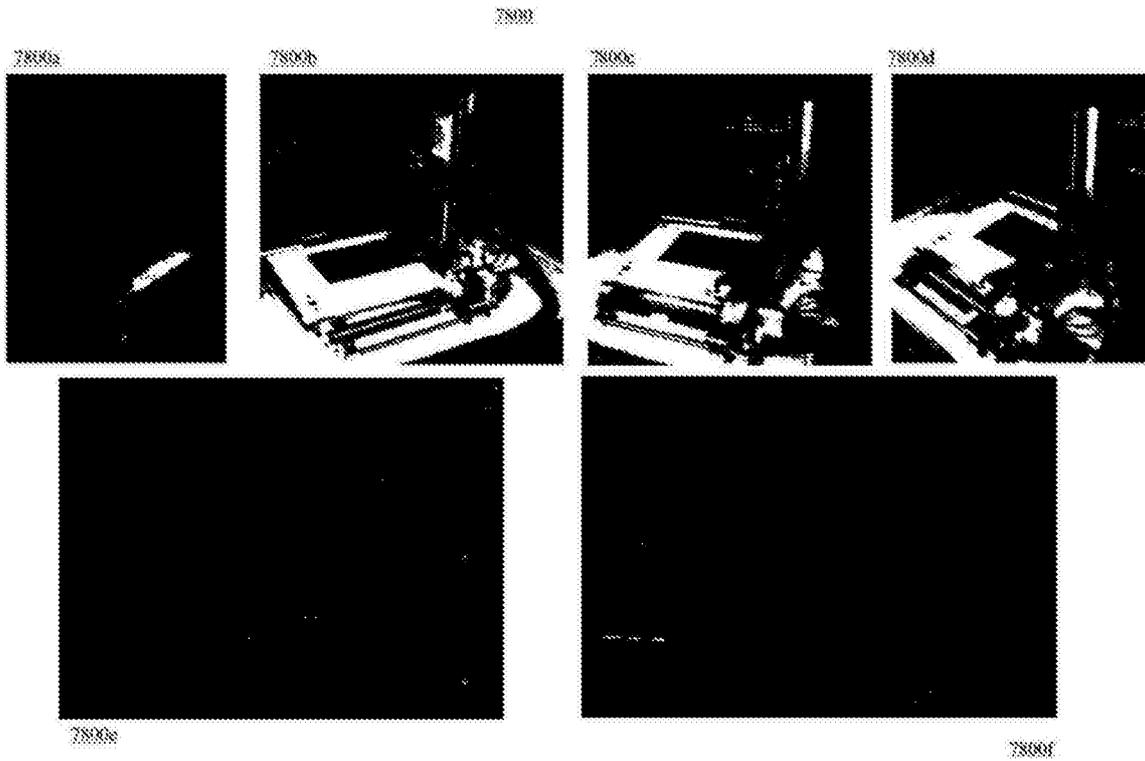


图 78

7900

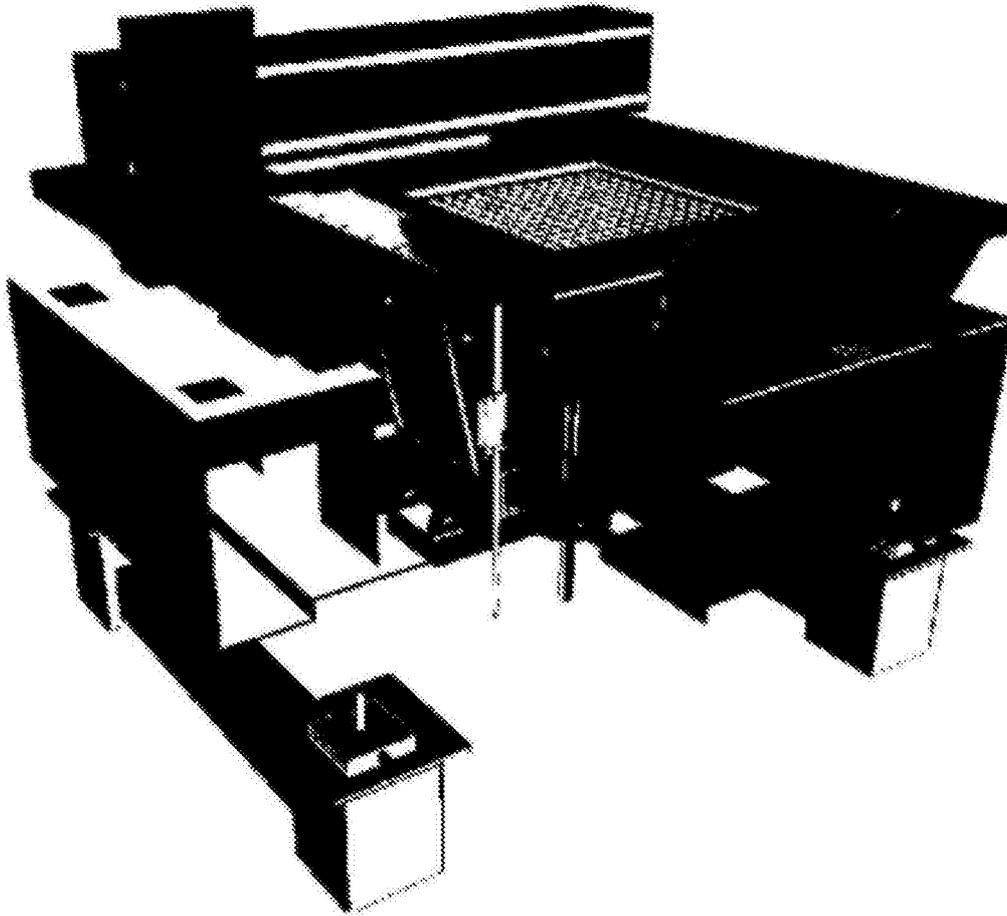


图 79

8000

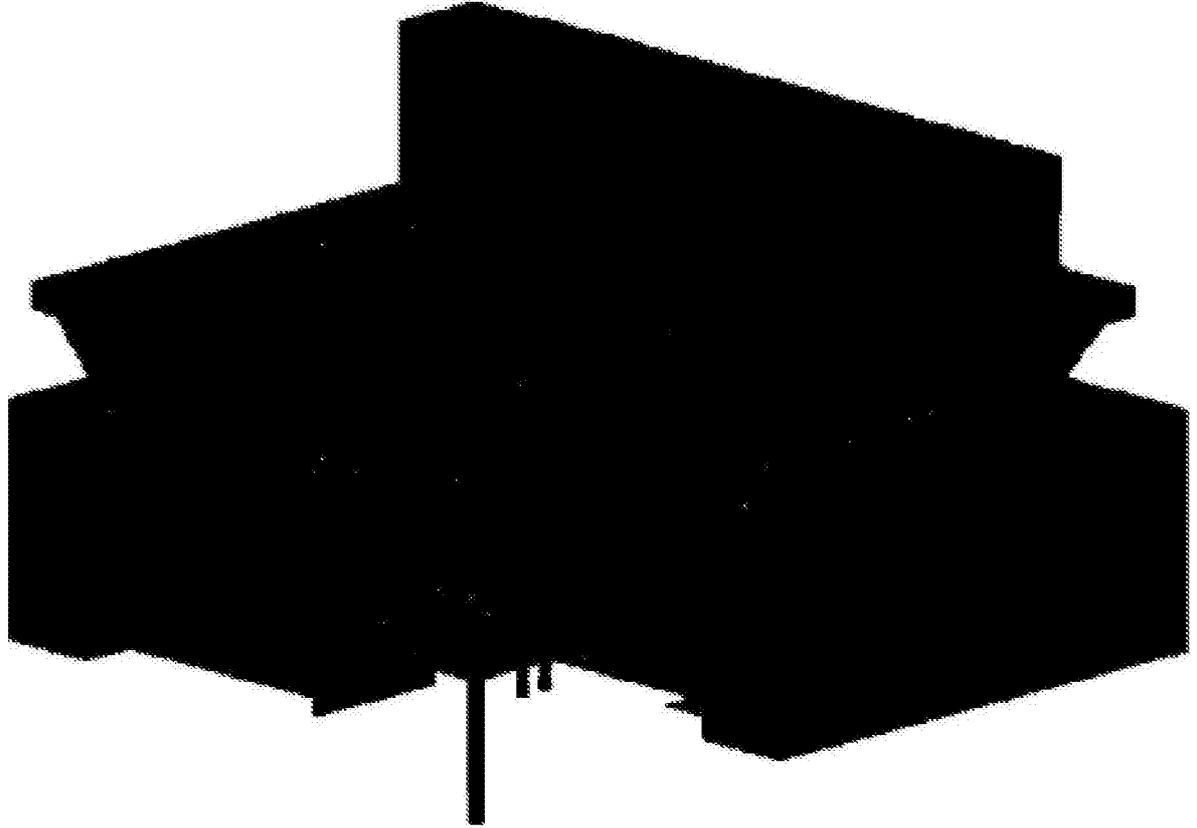


图 80

8100

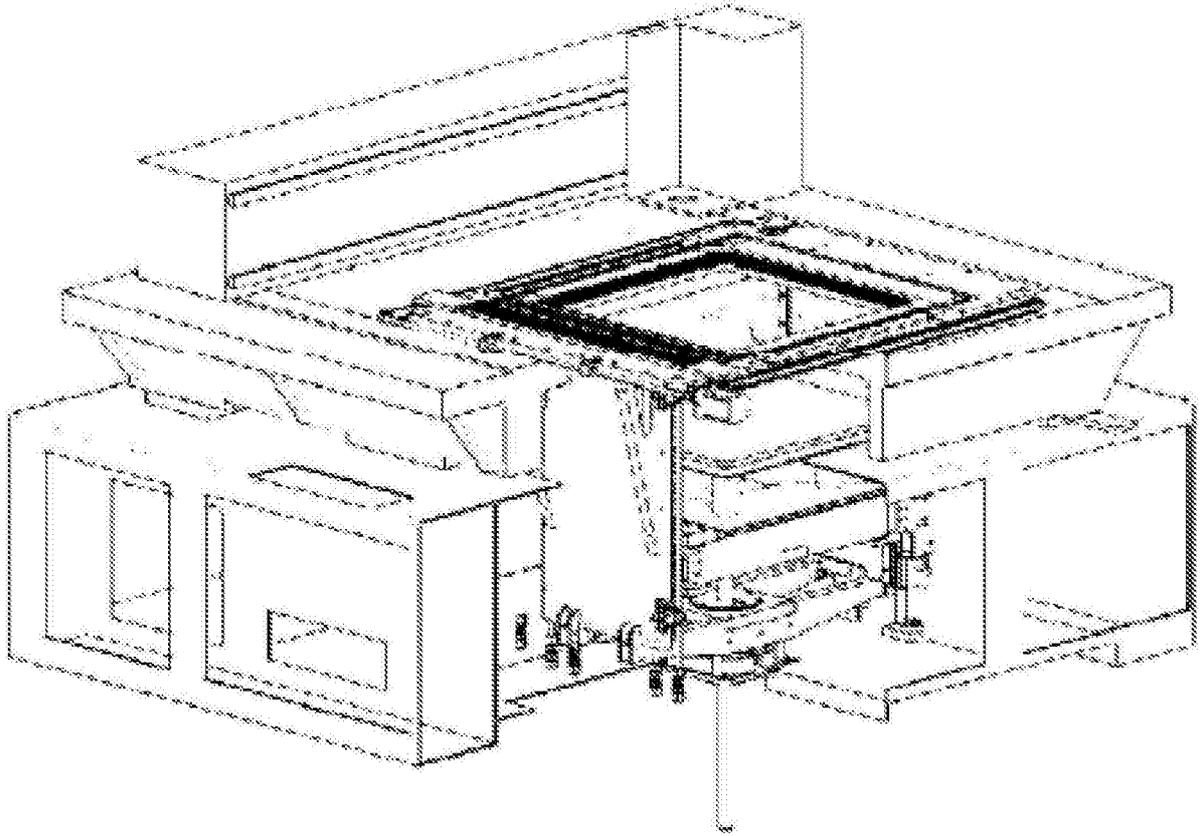


图 81

8200

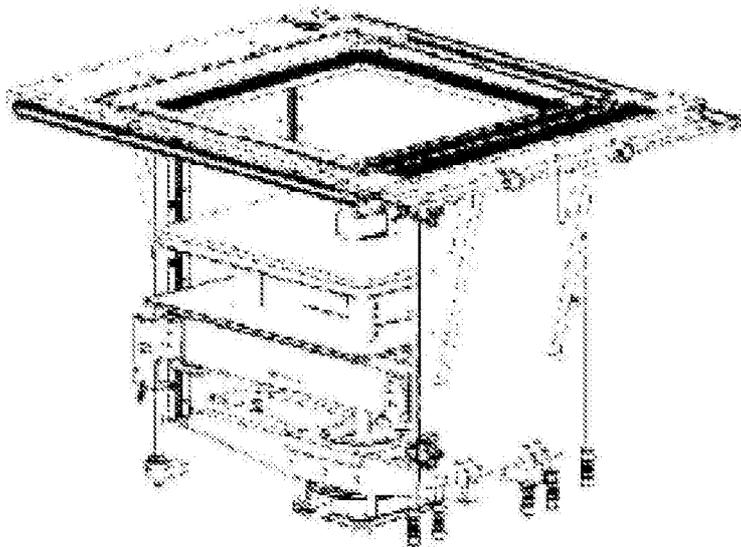


图 82

8300

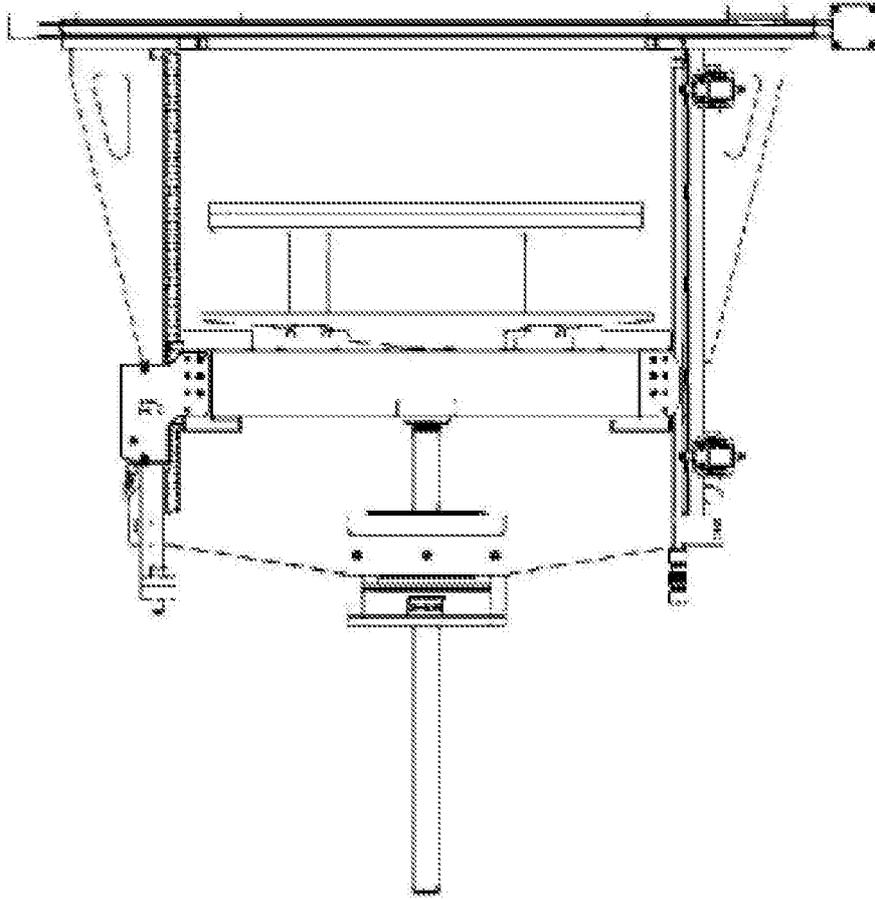


图 83

8400

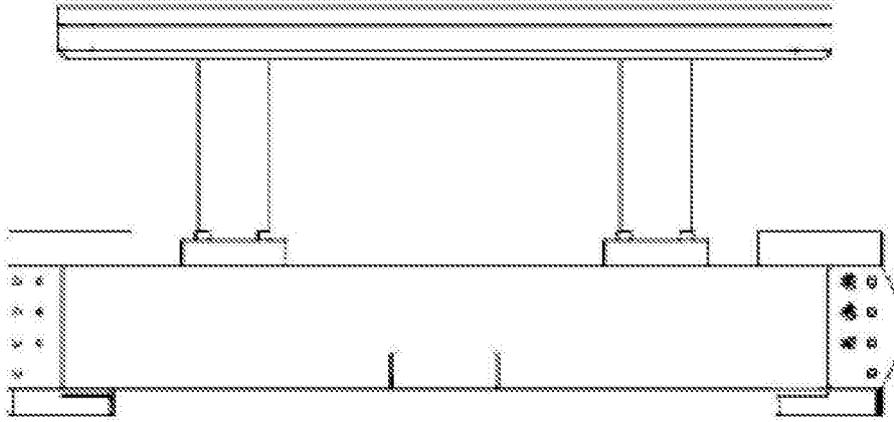


图 84

8500

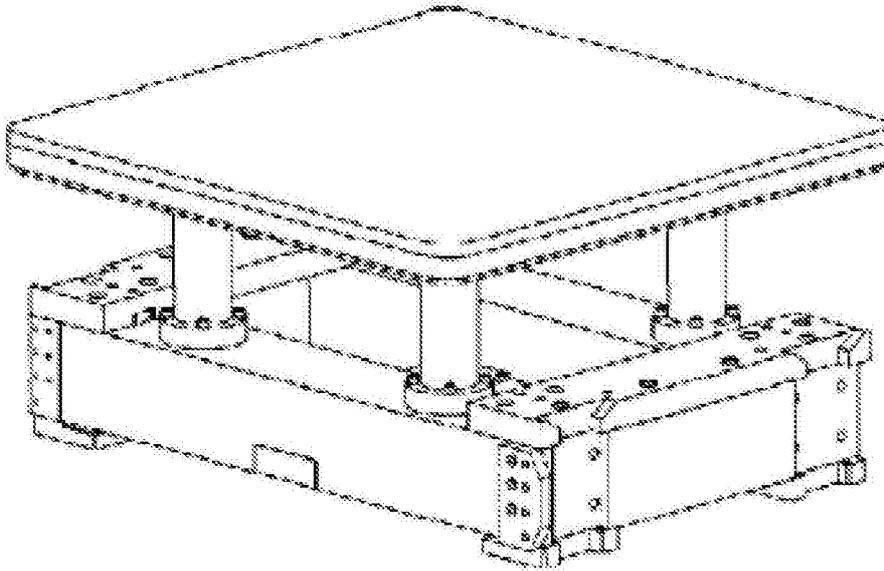


图 85

8600

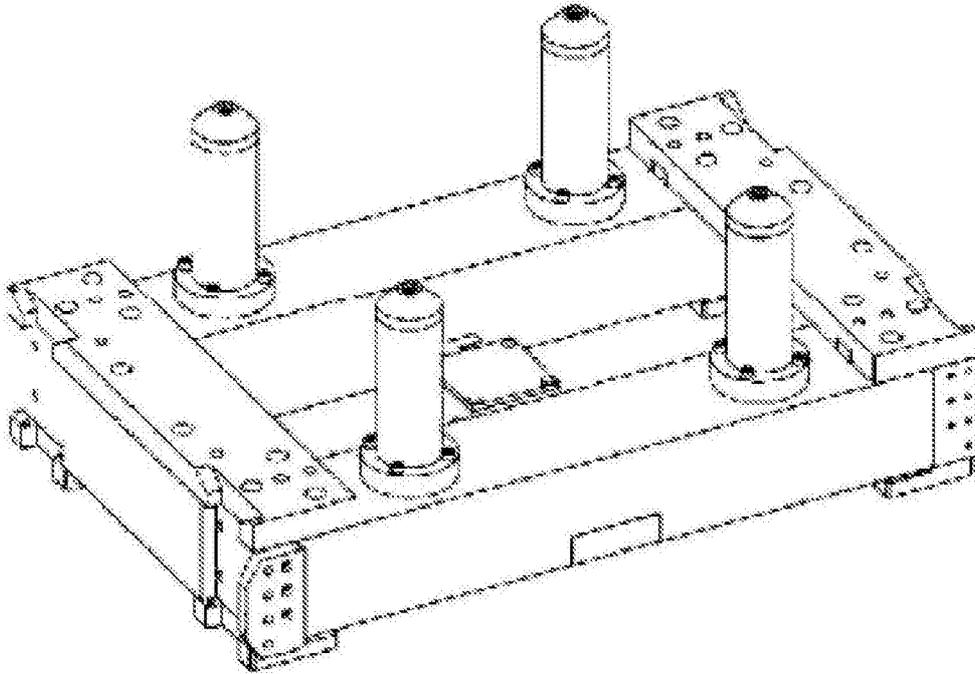


图 86

8700

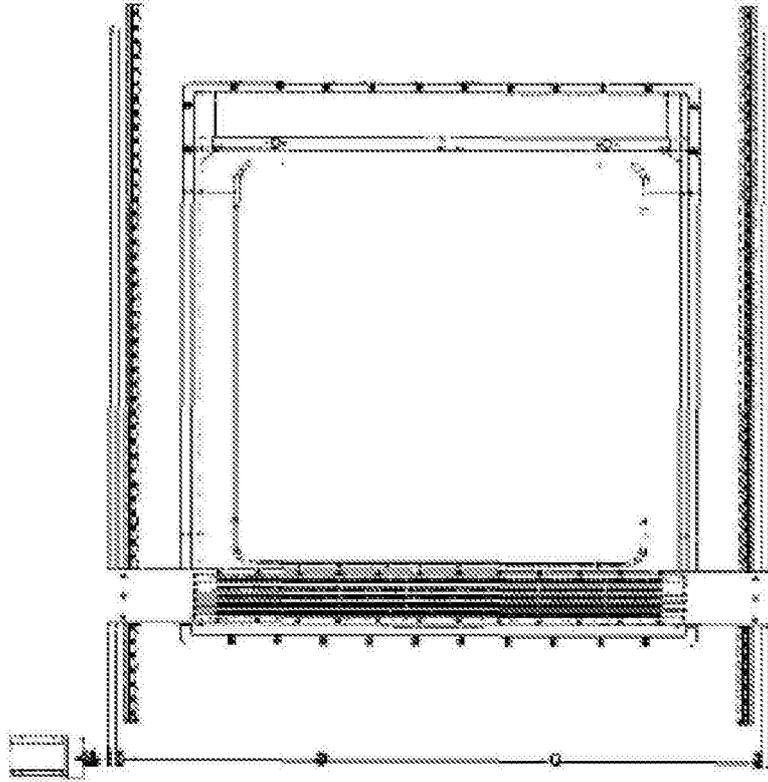


图 87

8800

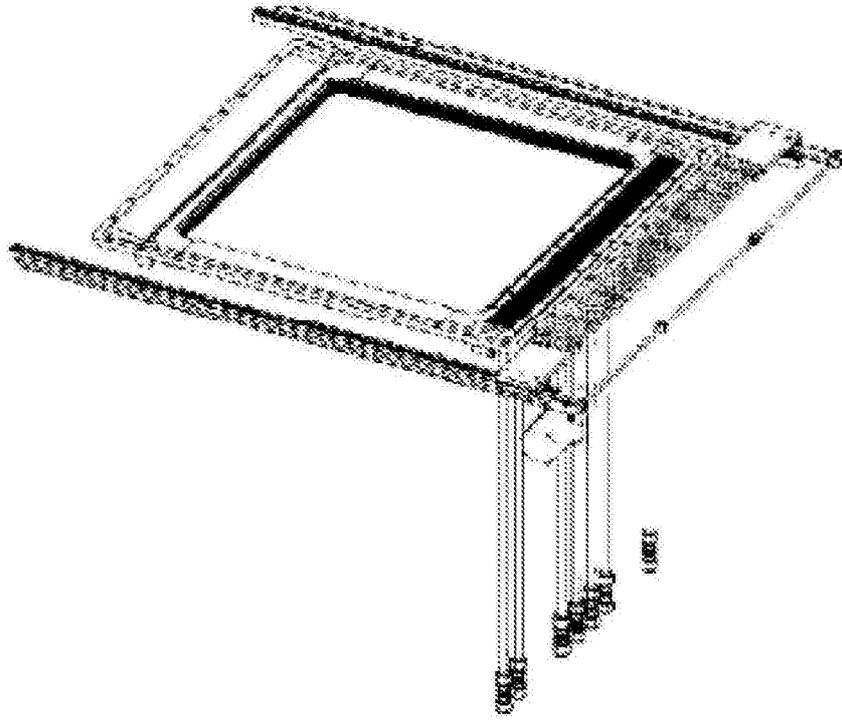


图 88

8900

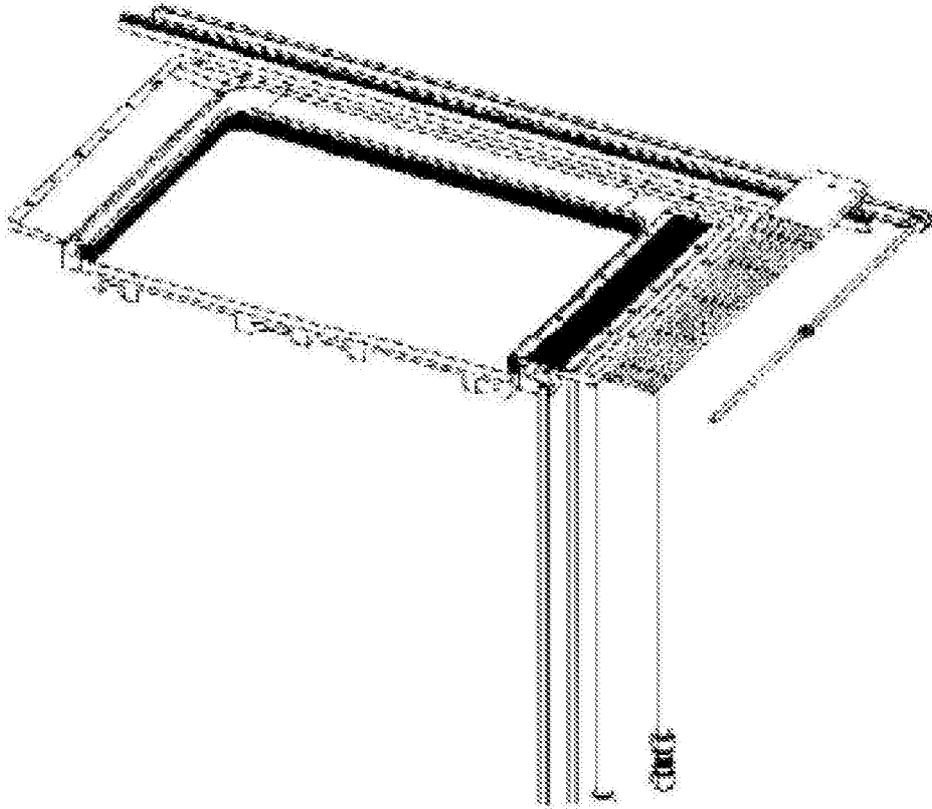


图 89

9000

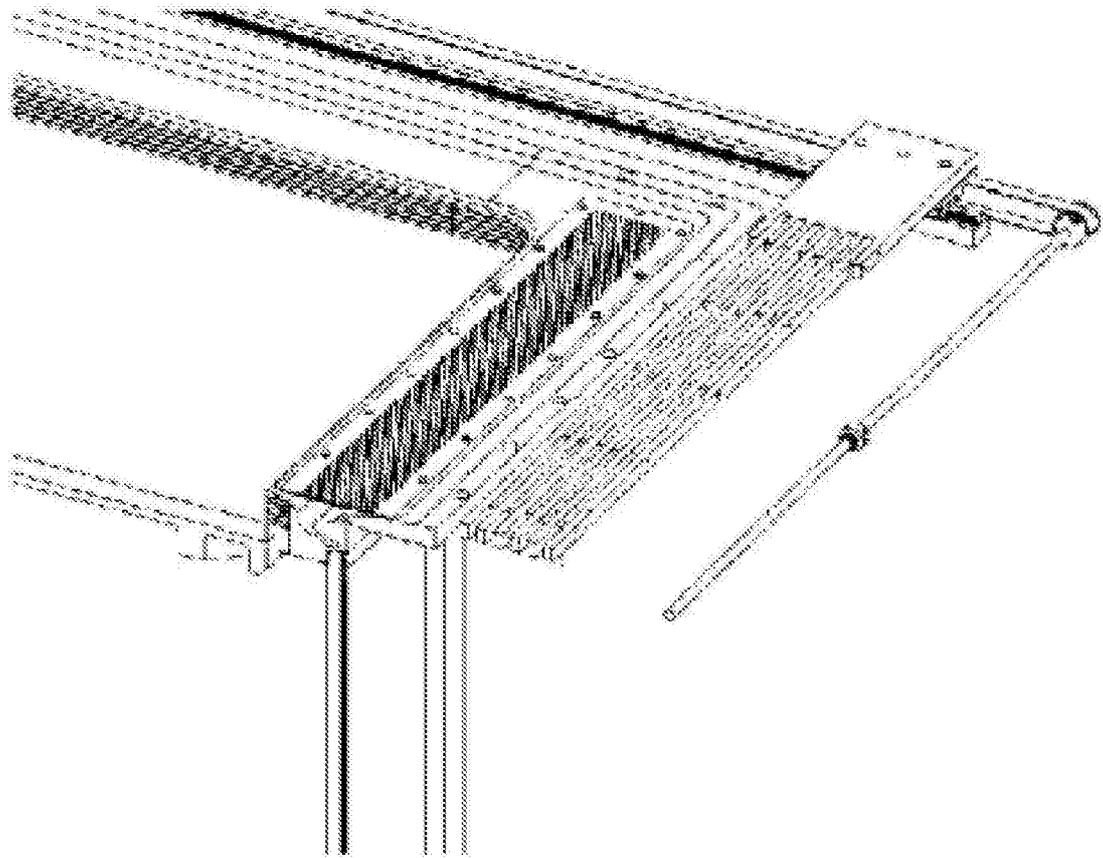


图 90

9100

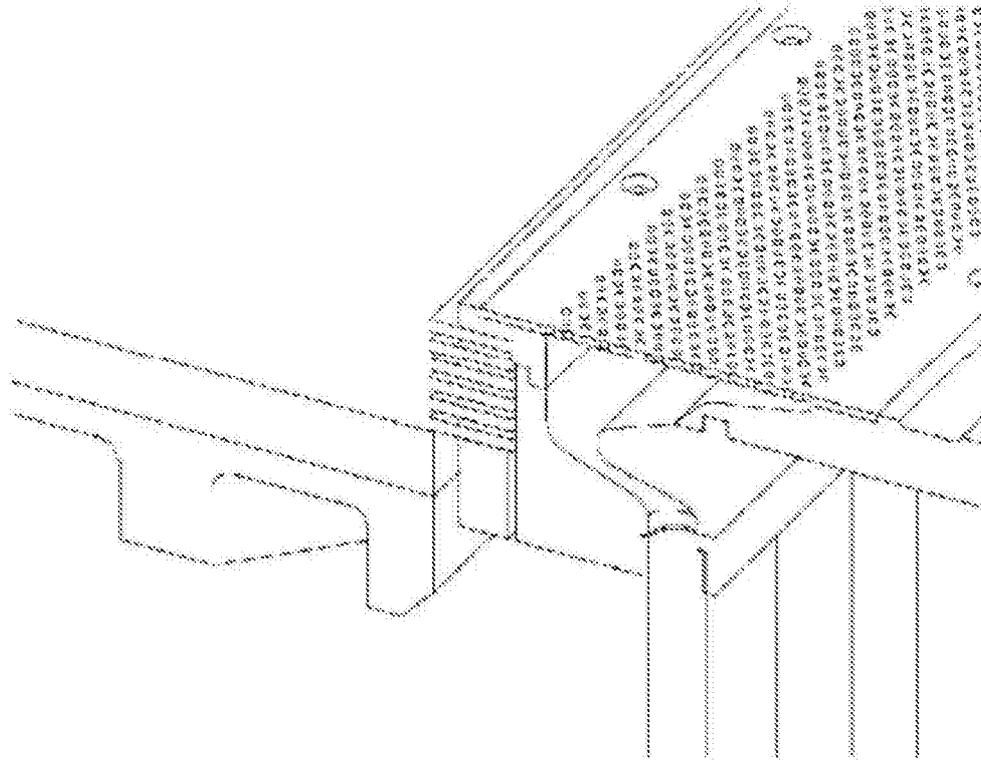


图 91

9200

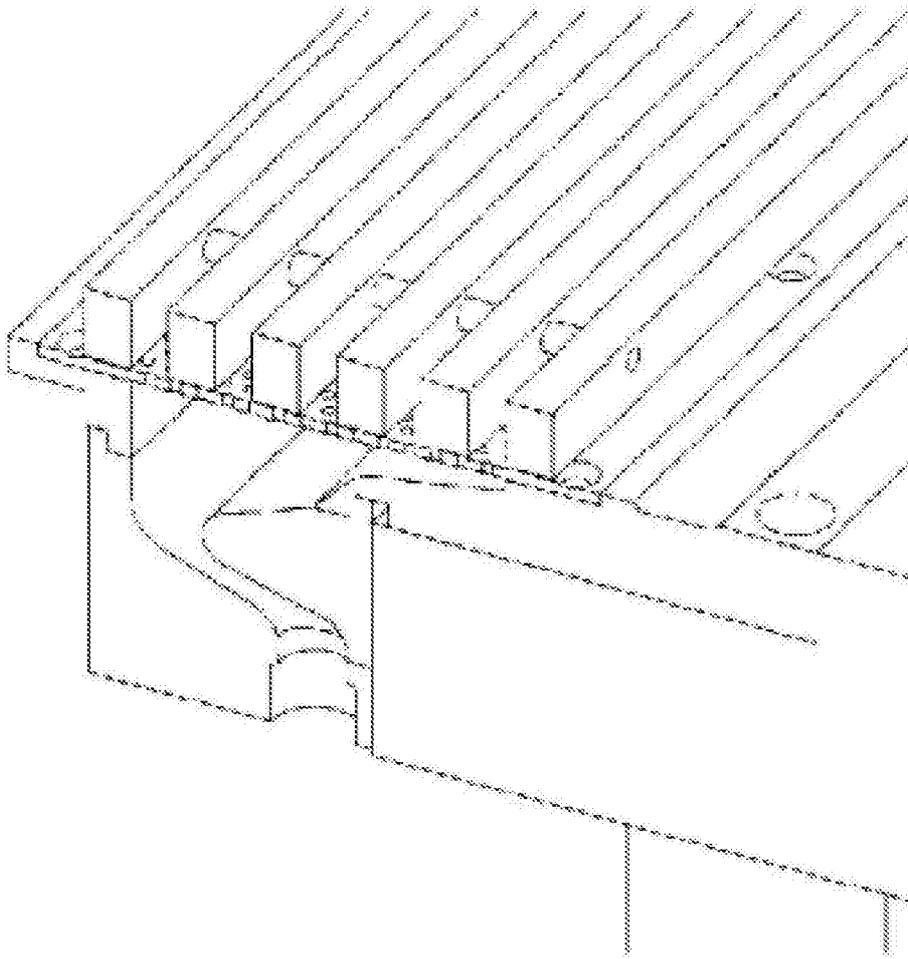


图 92

9300

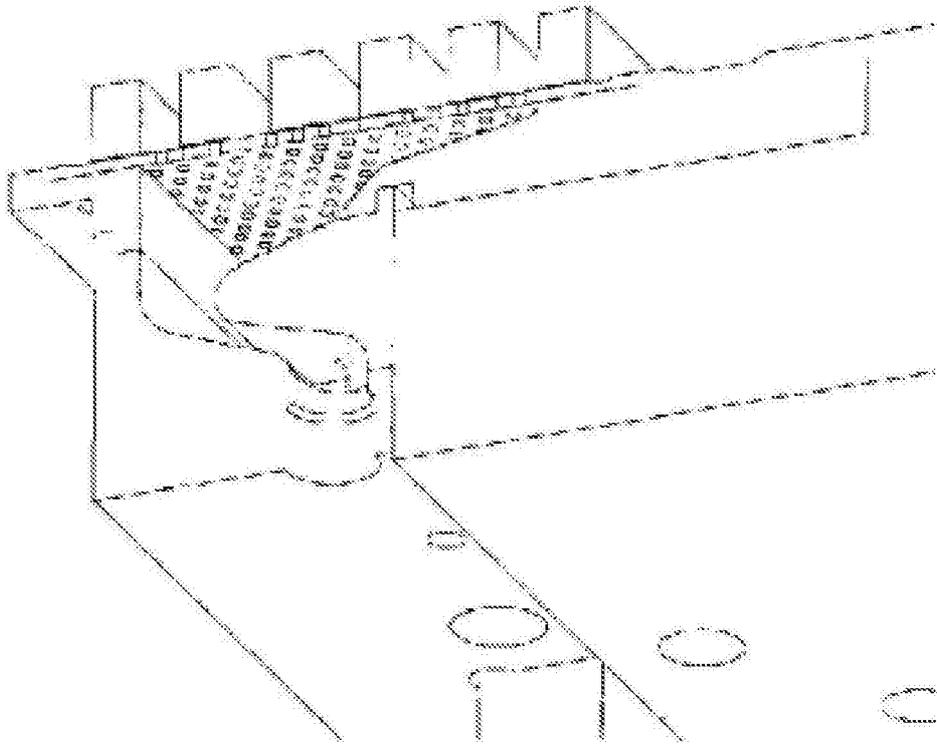


图 93

9400

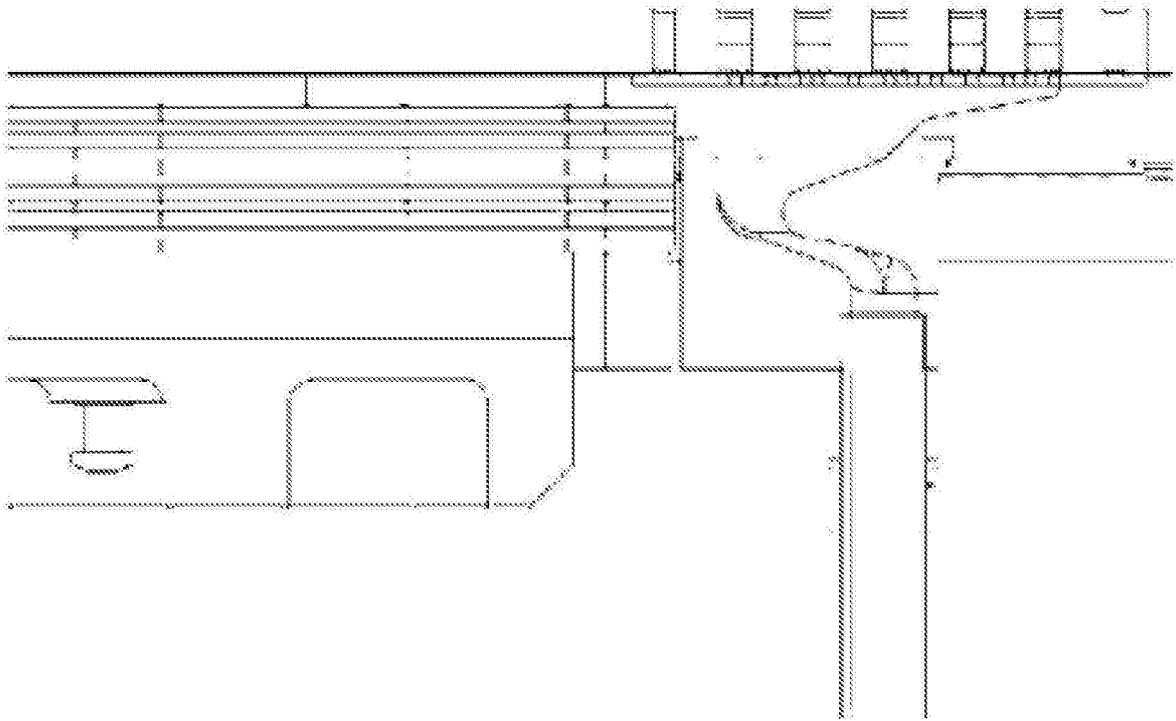


图 94

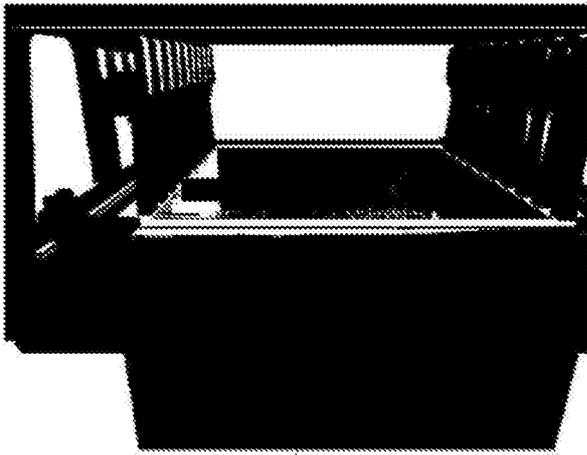


图 95(a)

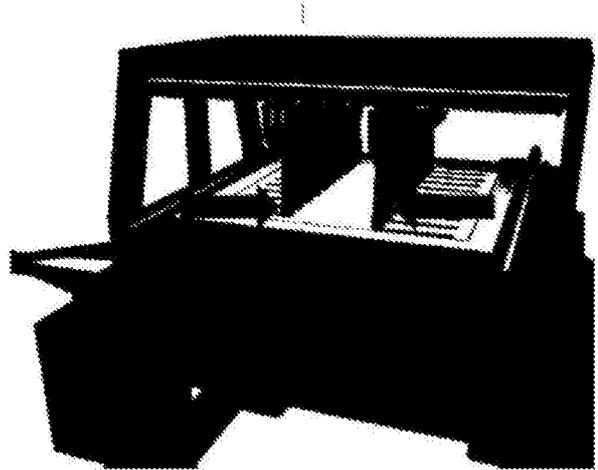


图 95(b)

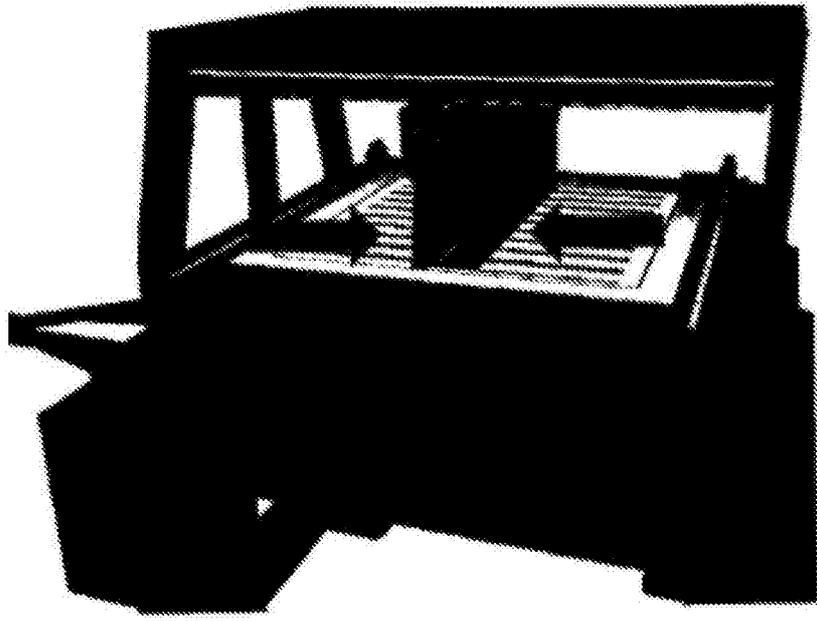


图 95(c)

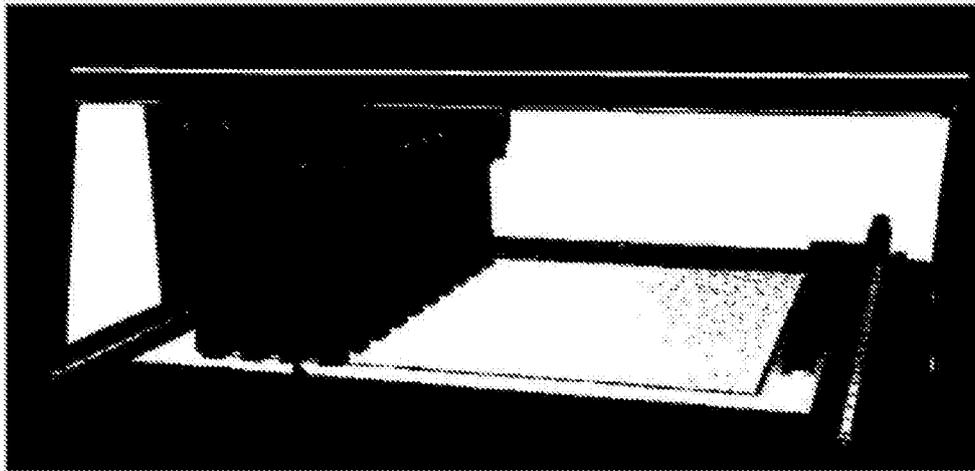


图 96

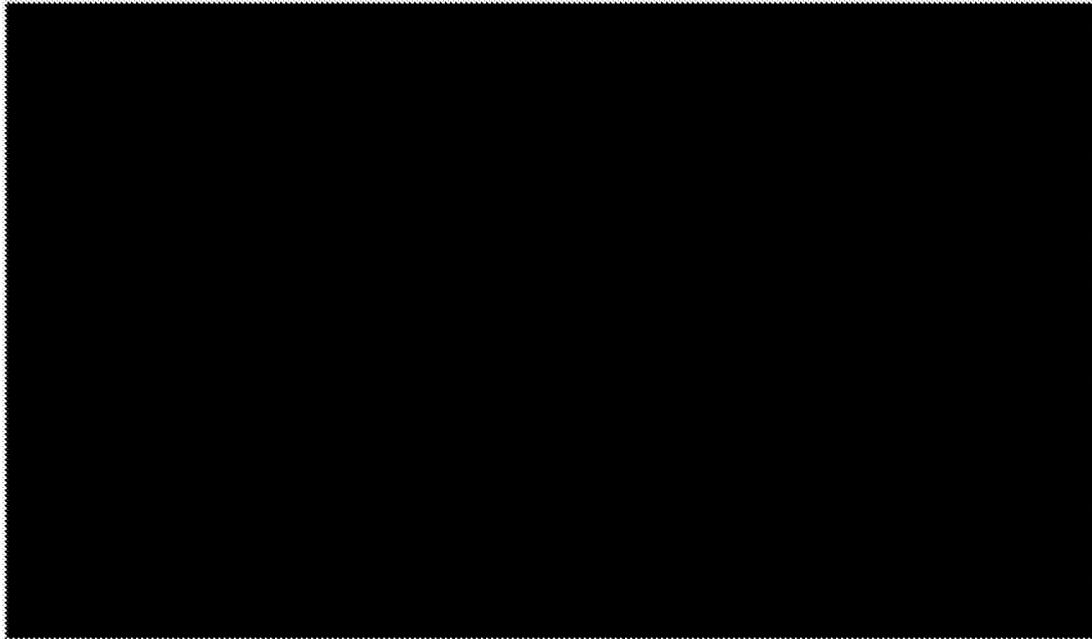


图 97

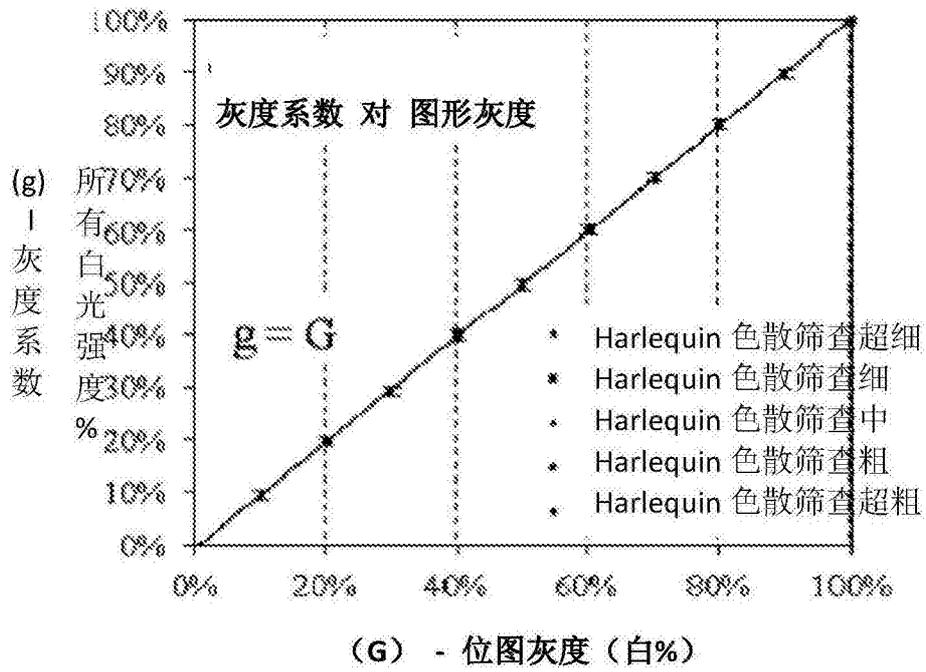


图 98

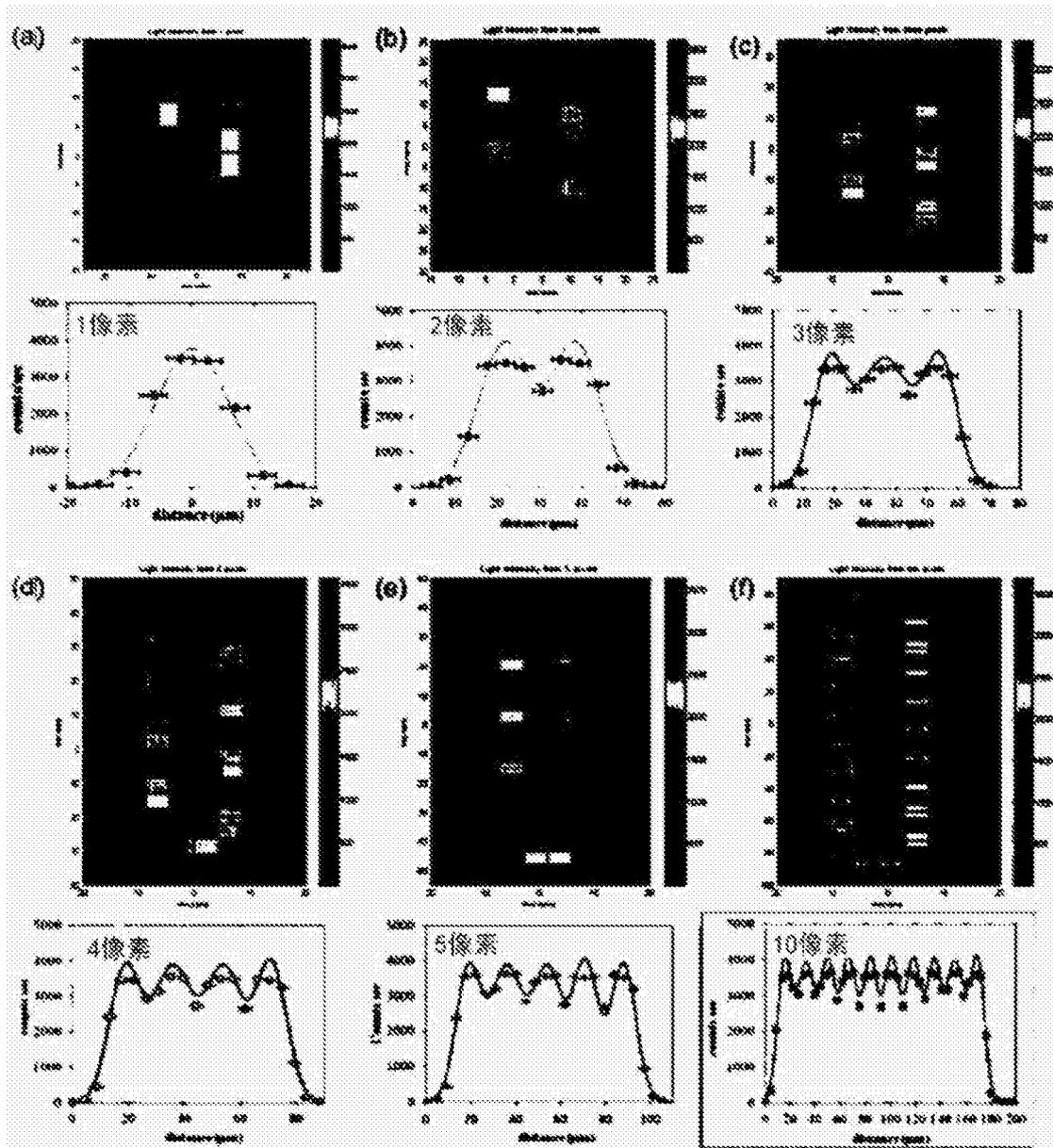


图 99

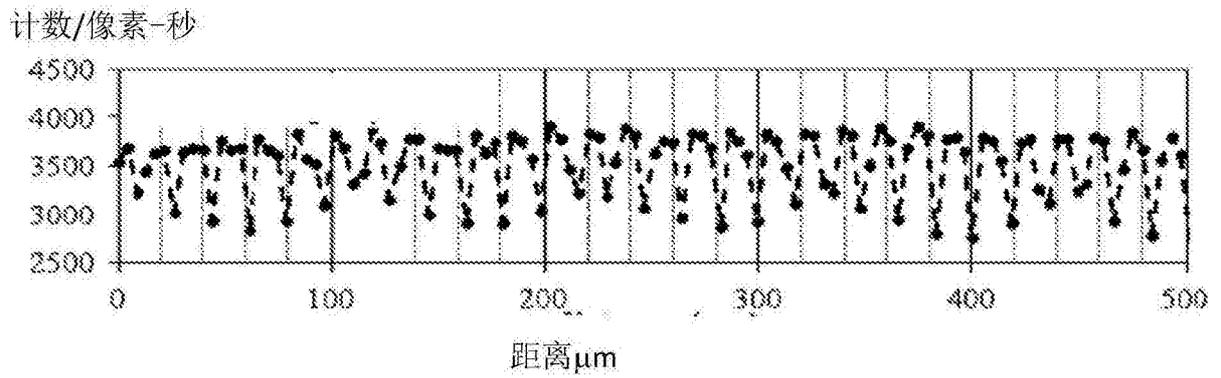


图 100

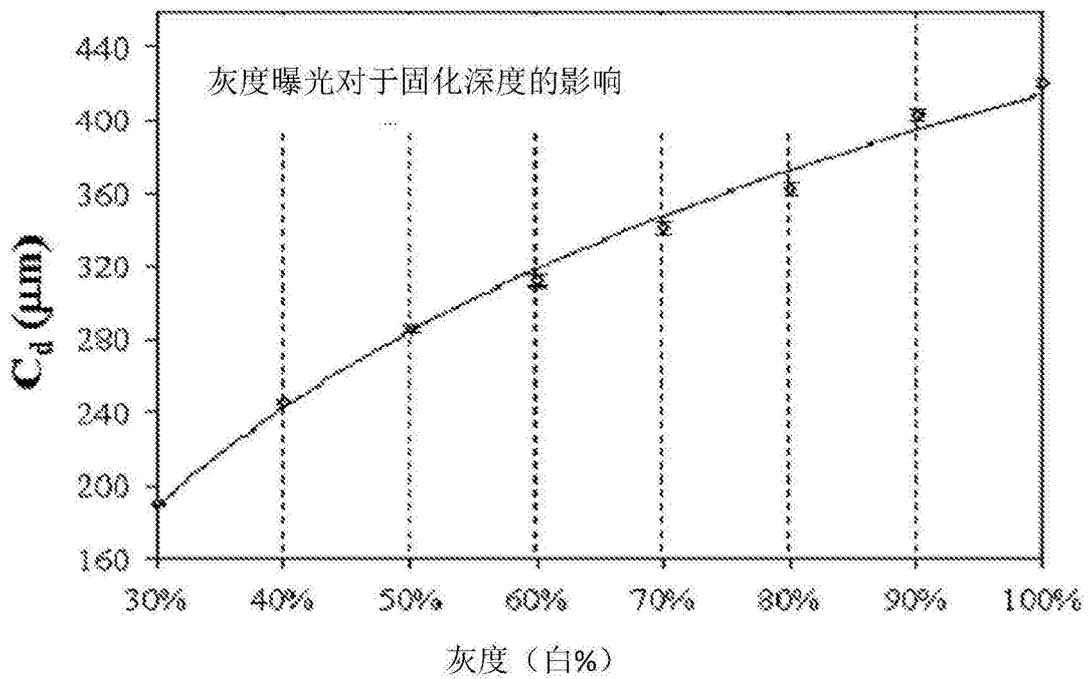


图 101

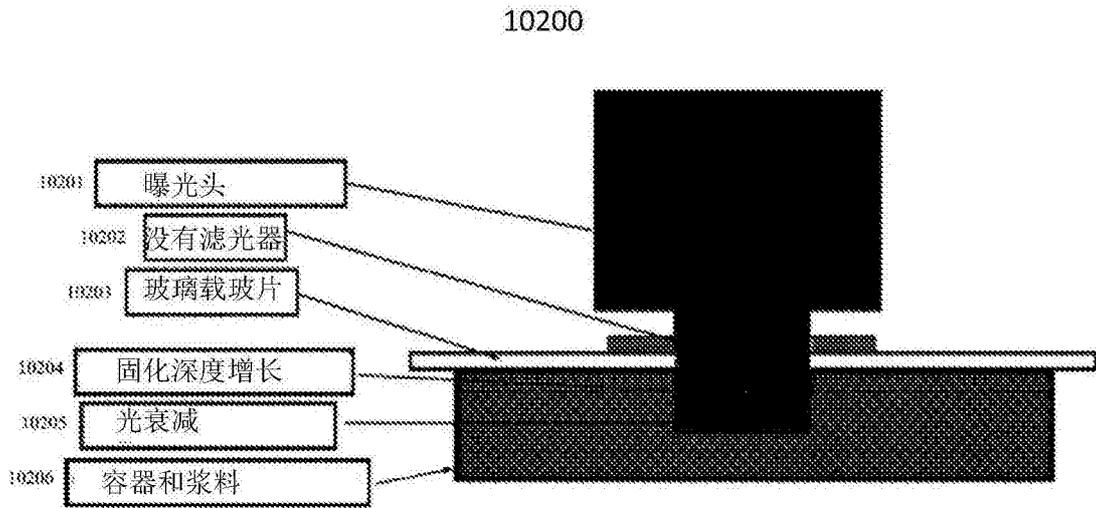


图 102

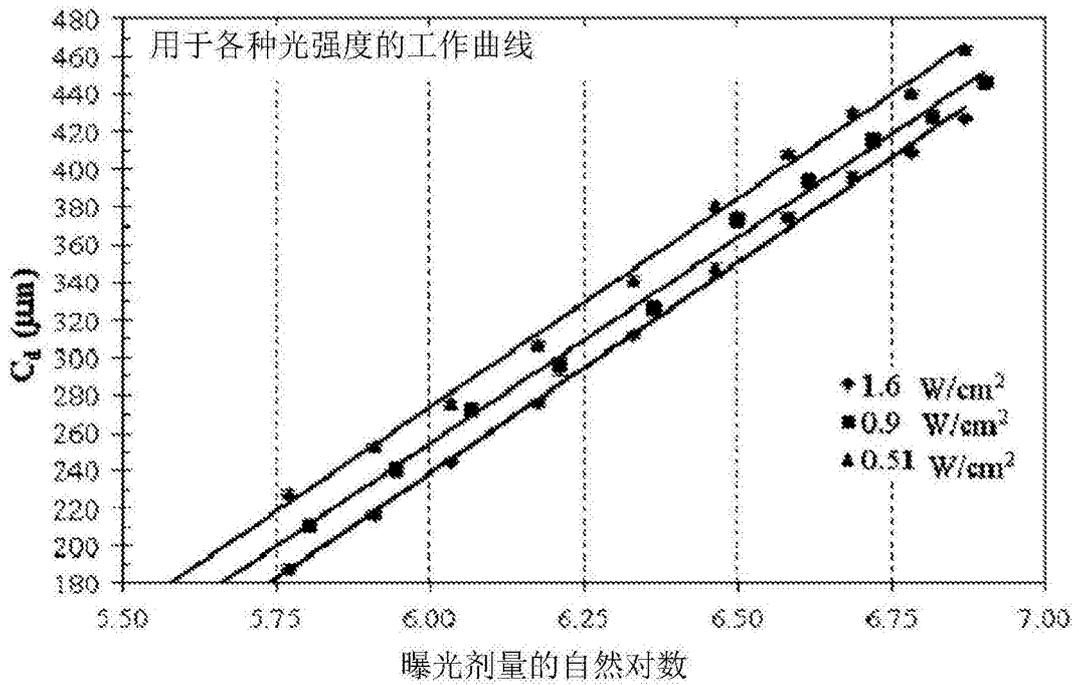


图 103

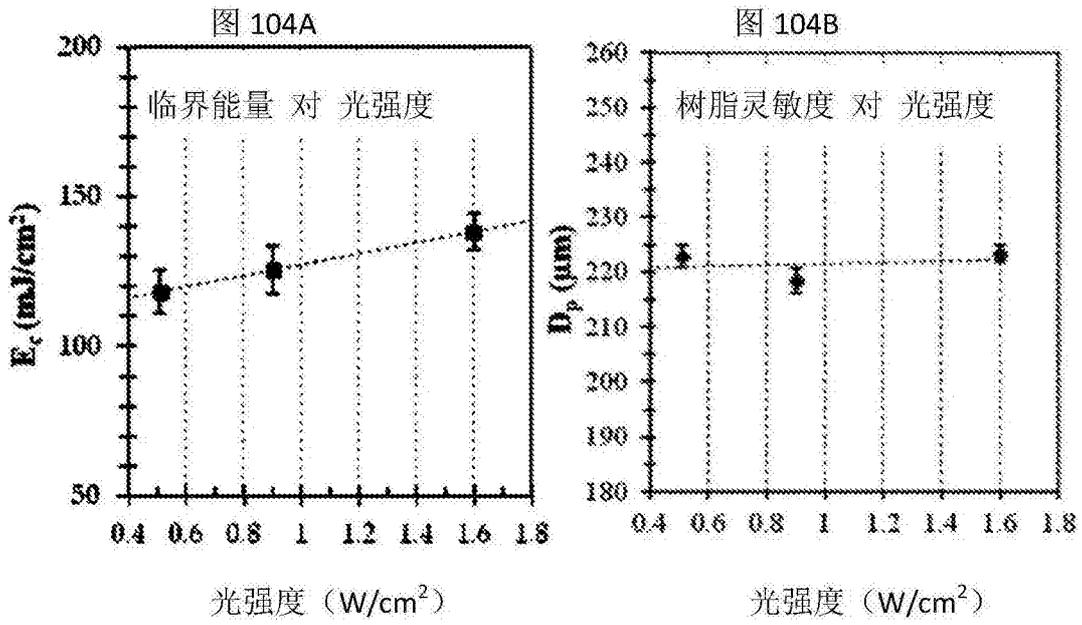


图 104

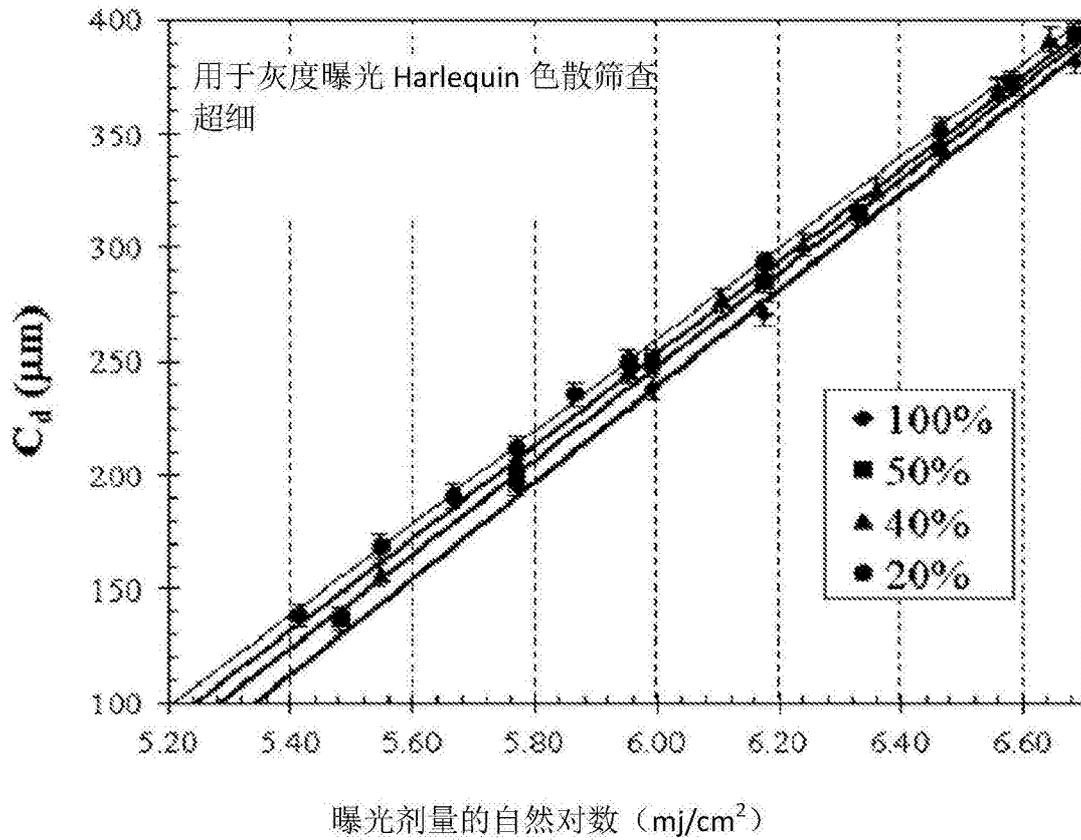


图 105

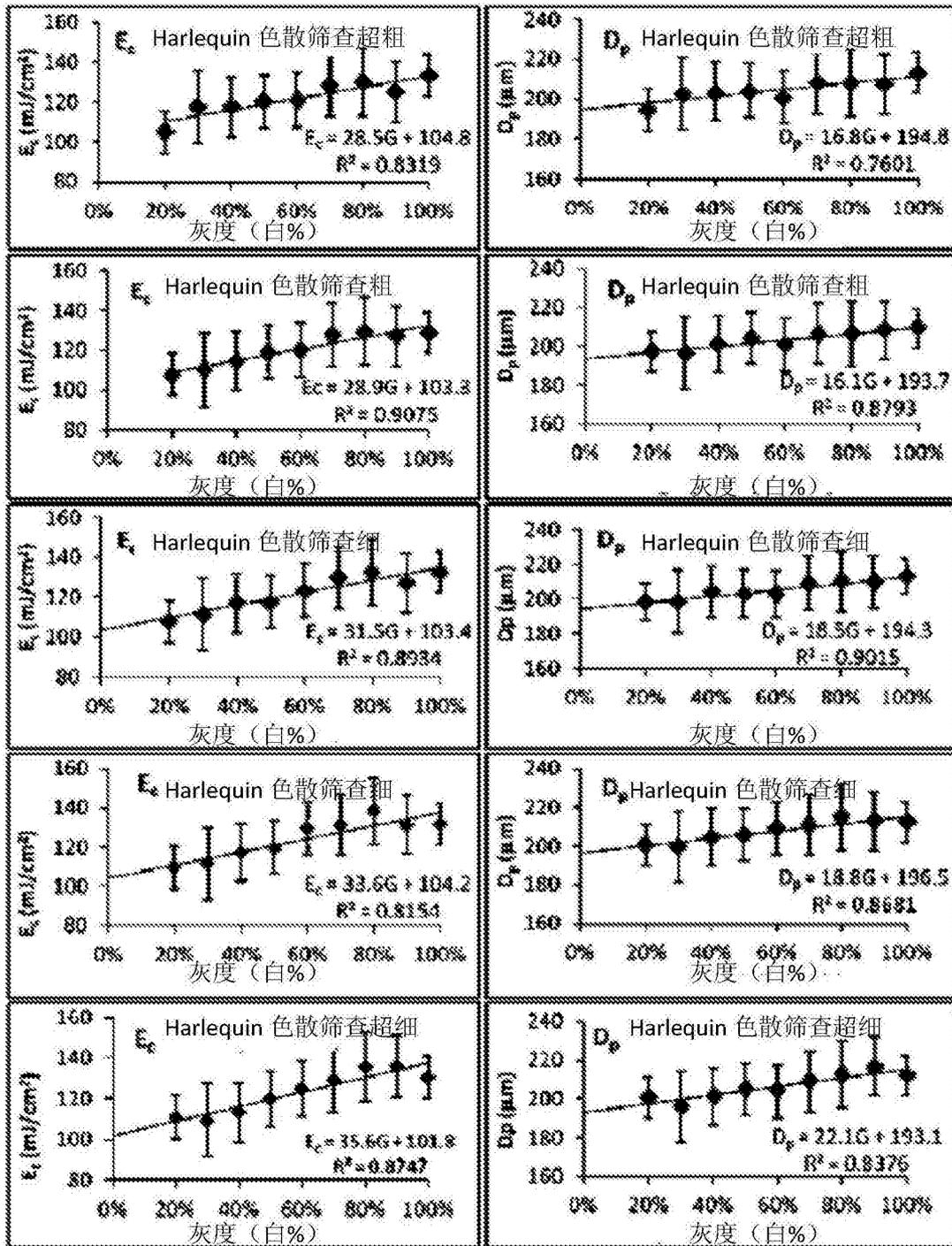
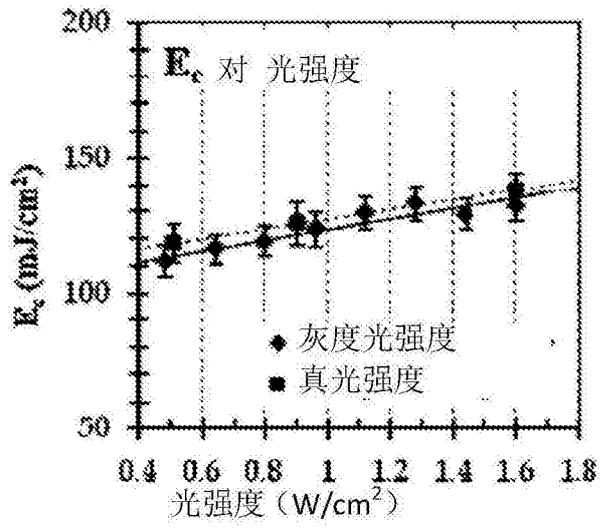
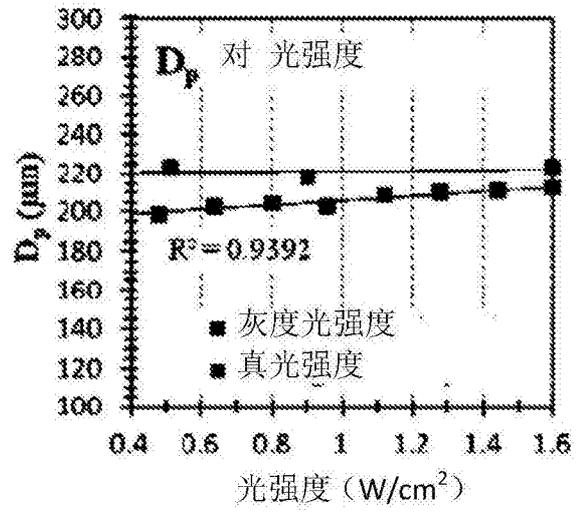


图 106



107A



107B

图 107

10800

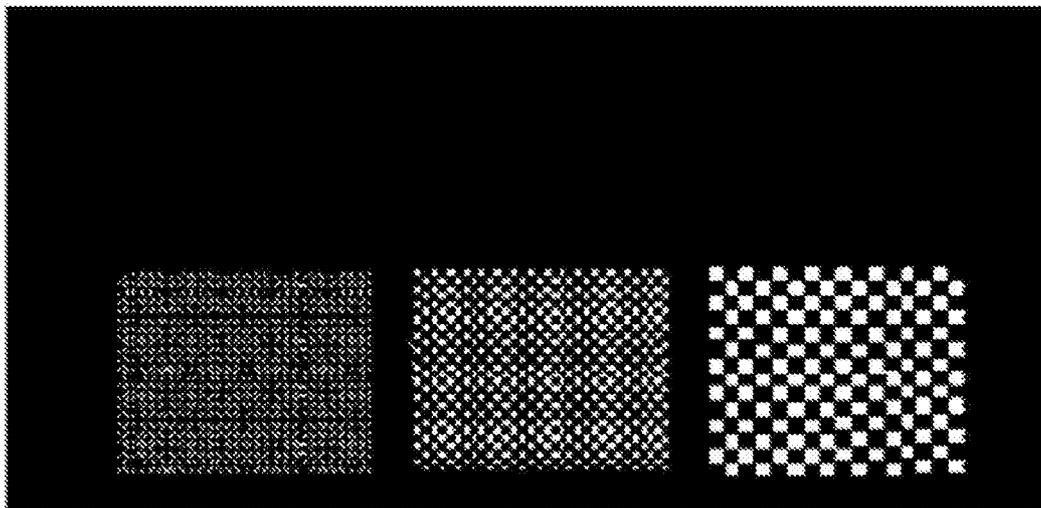


图 108

10900

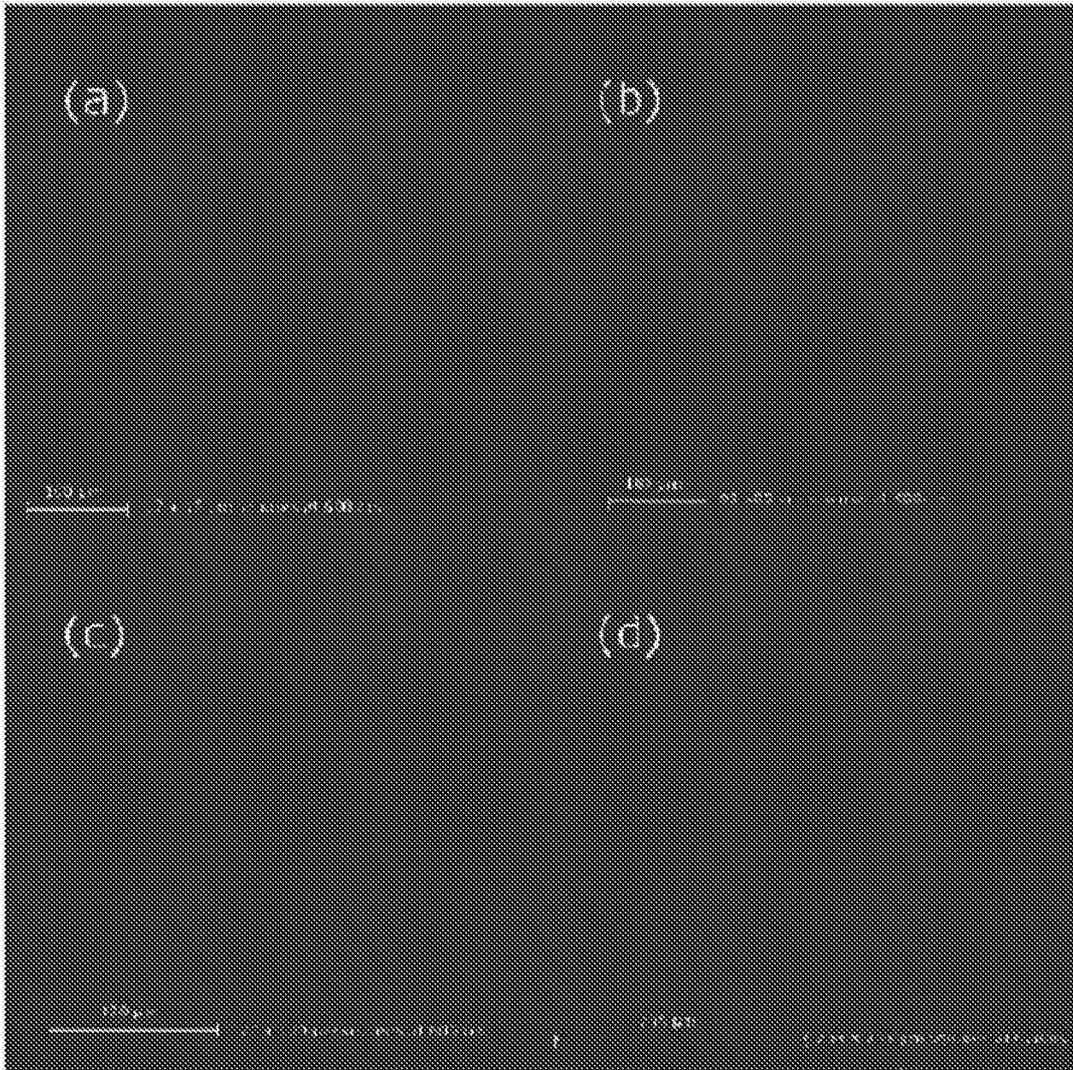


图 109

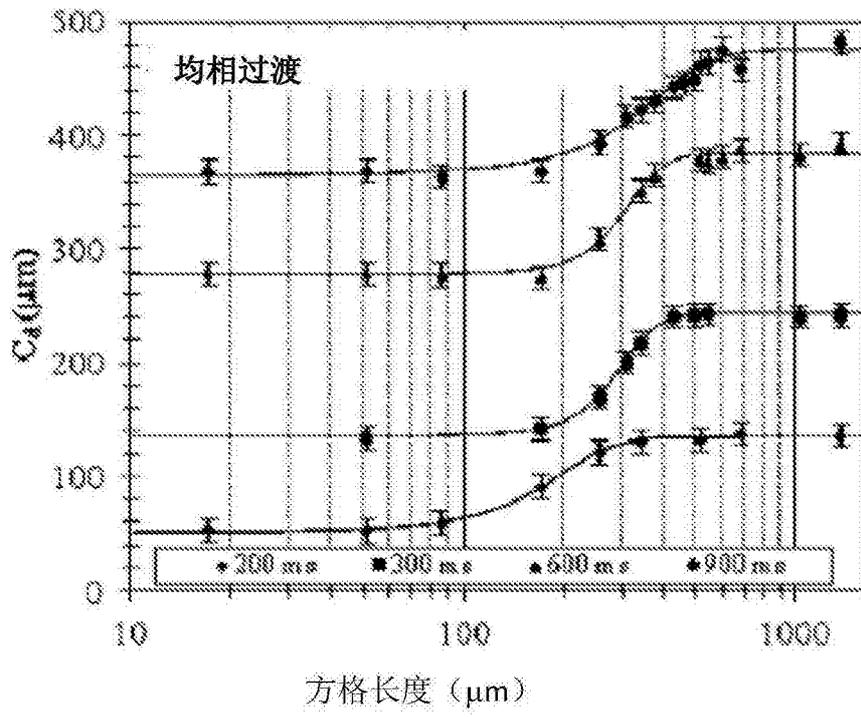


图 110

11000

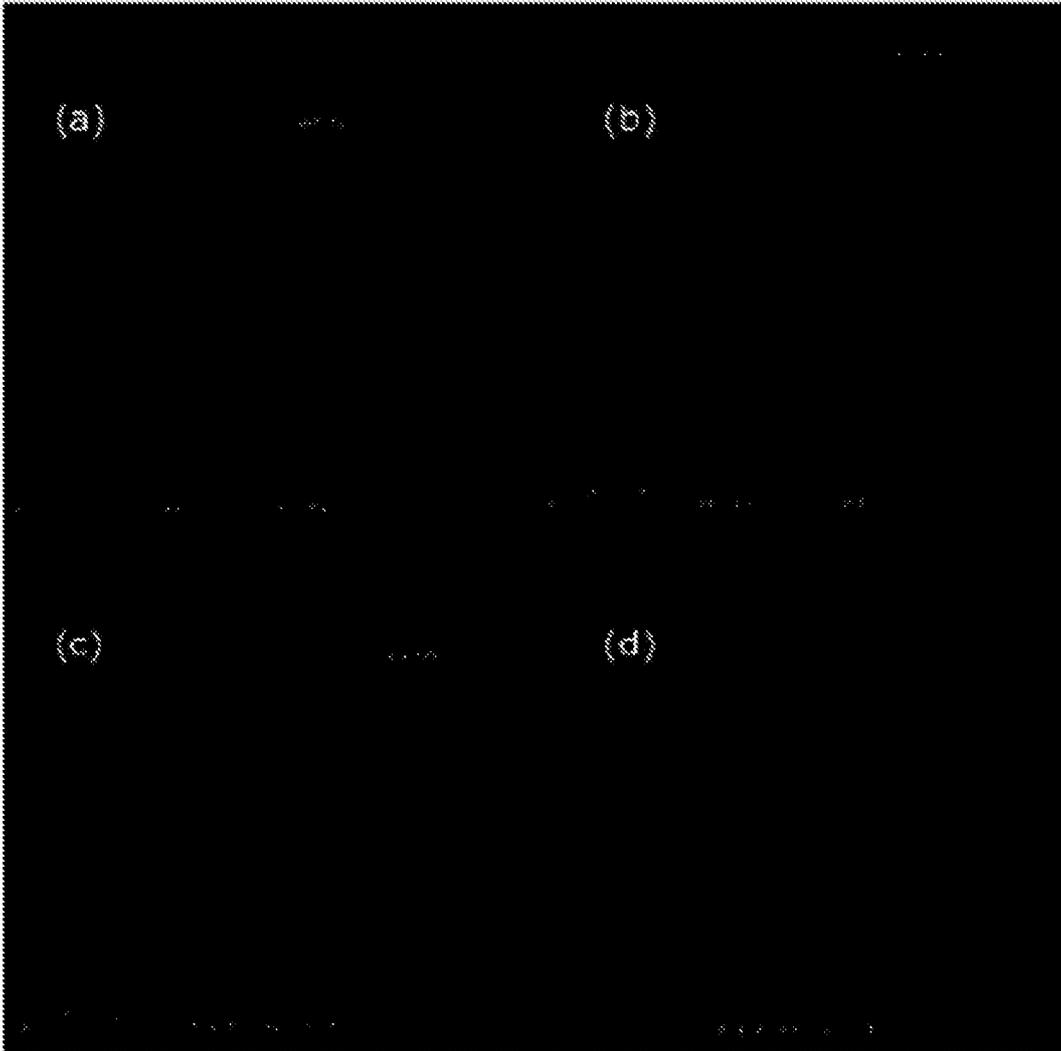


图 111

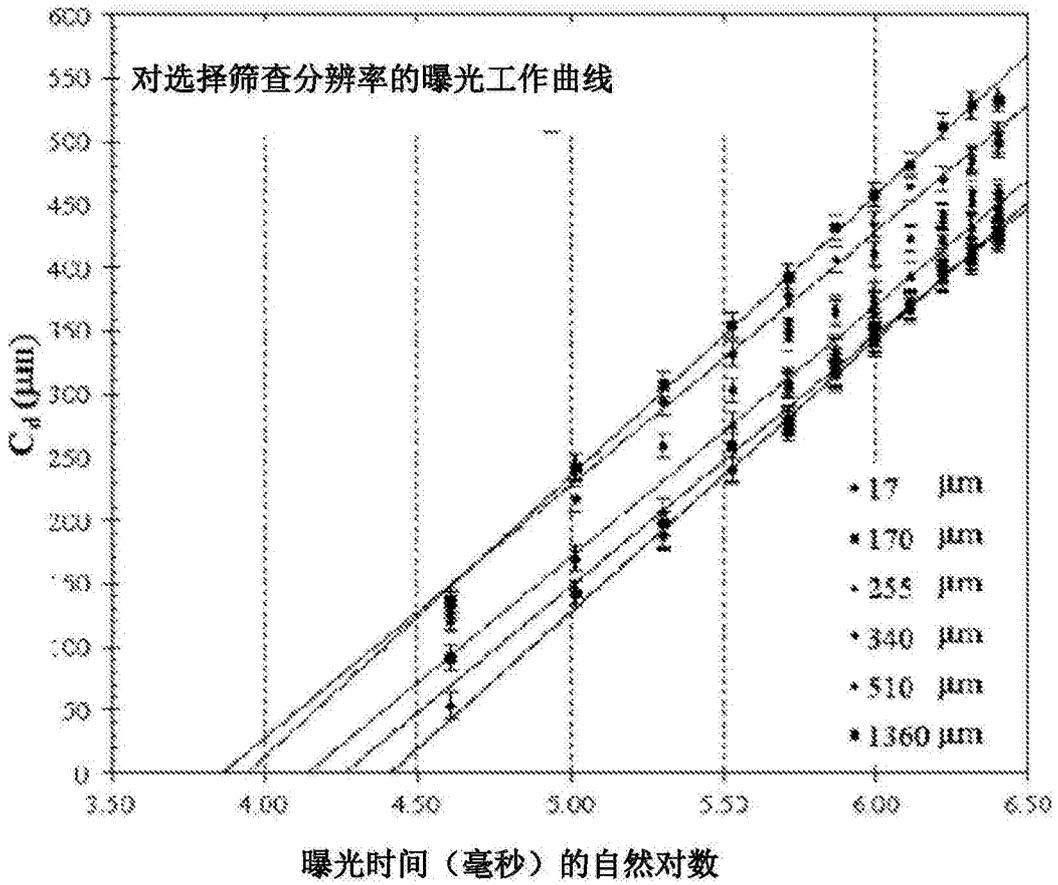


图 112

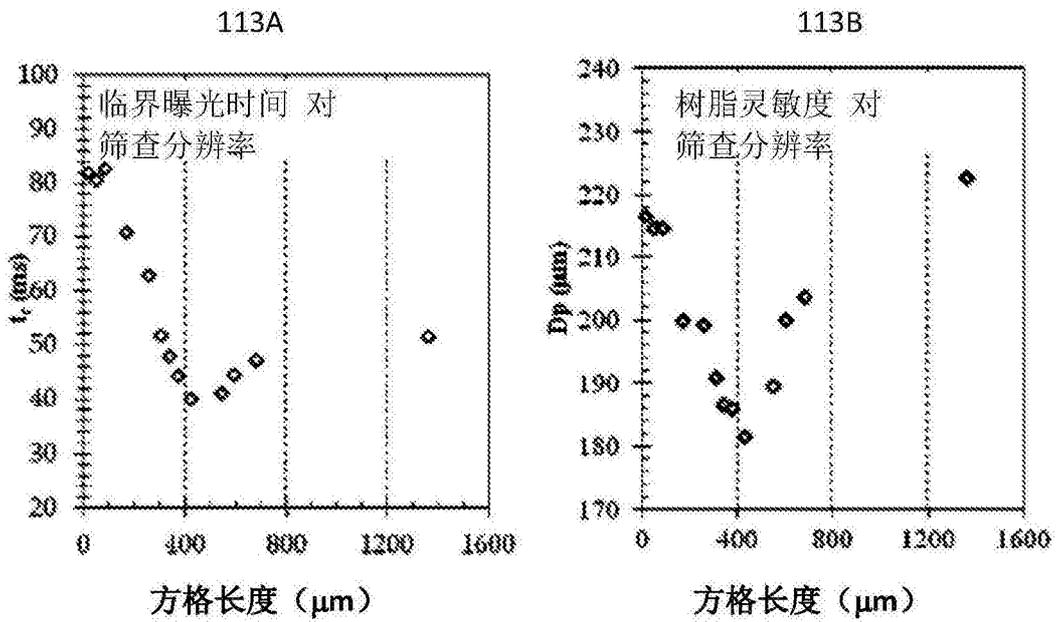


图 113

11400



图 114

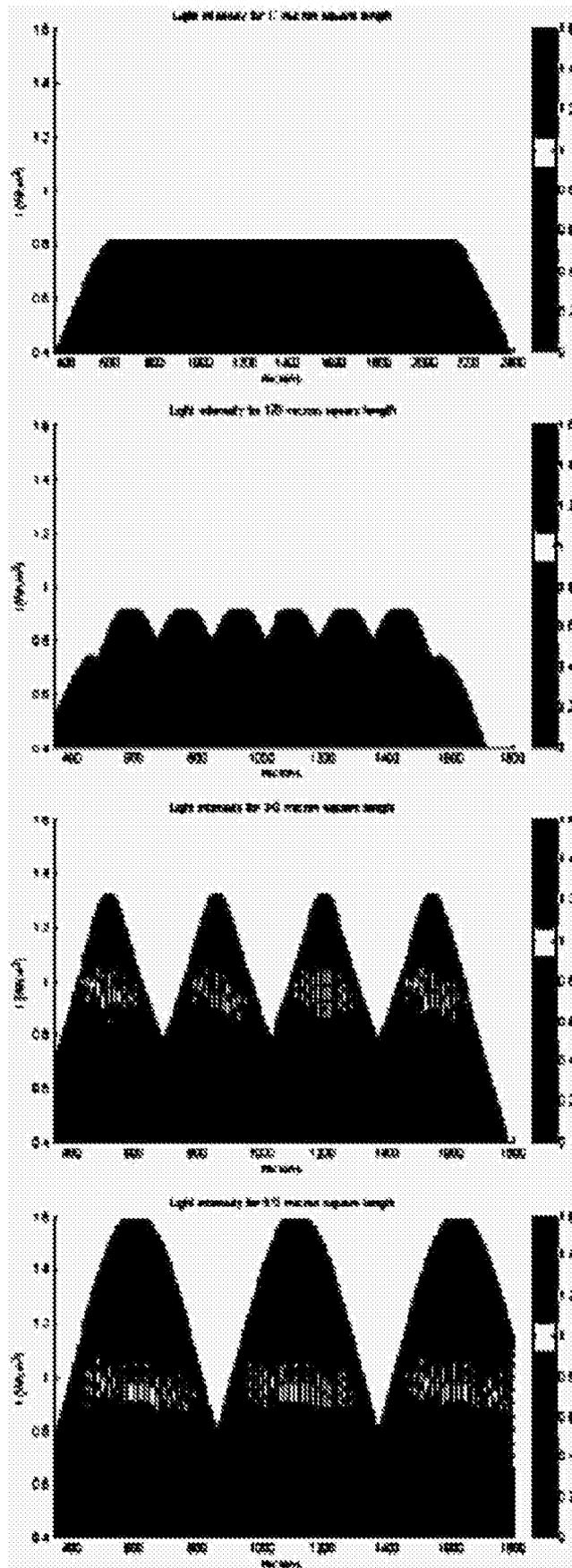


图 115

均相过渡曝光模型评估

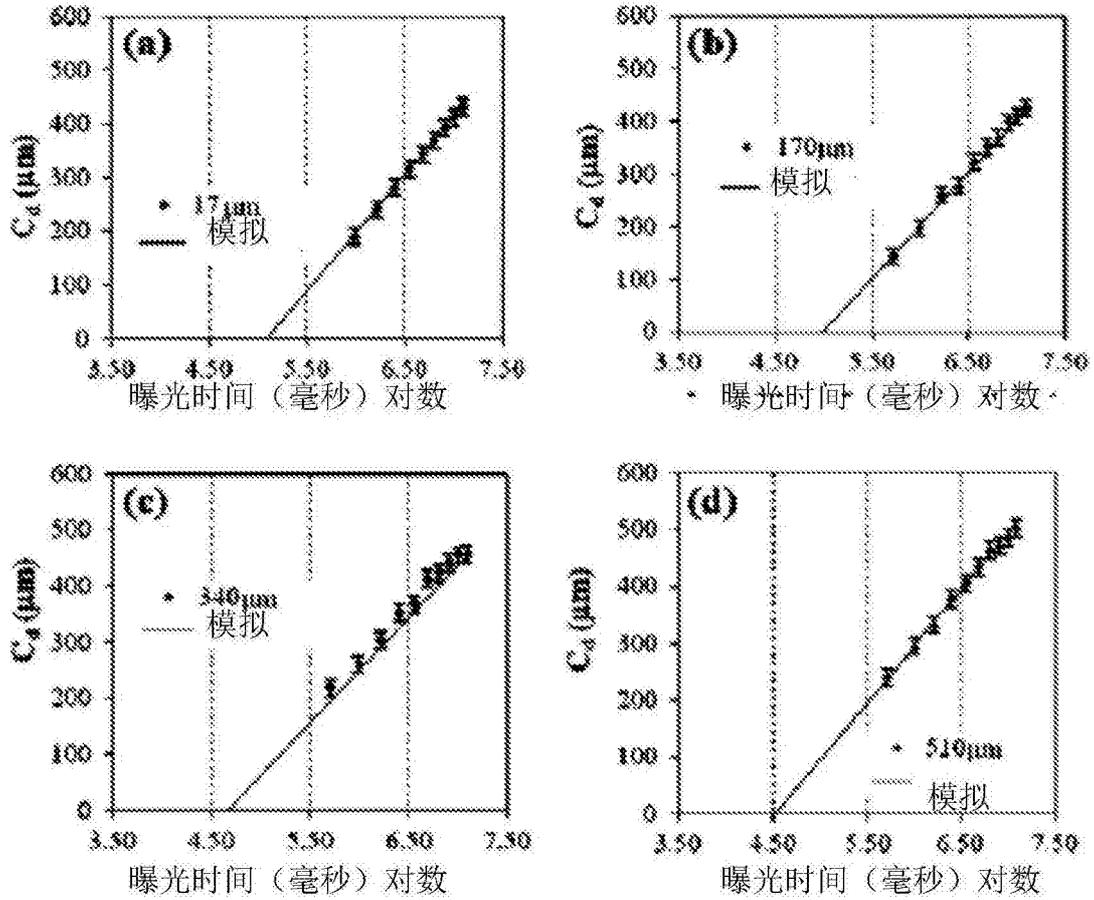


图 116

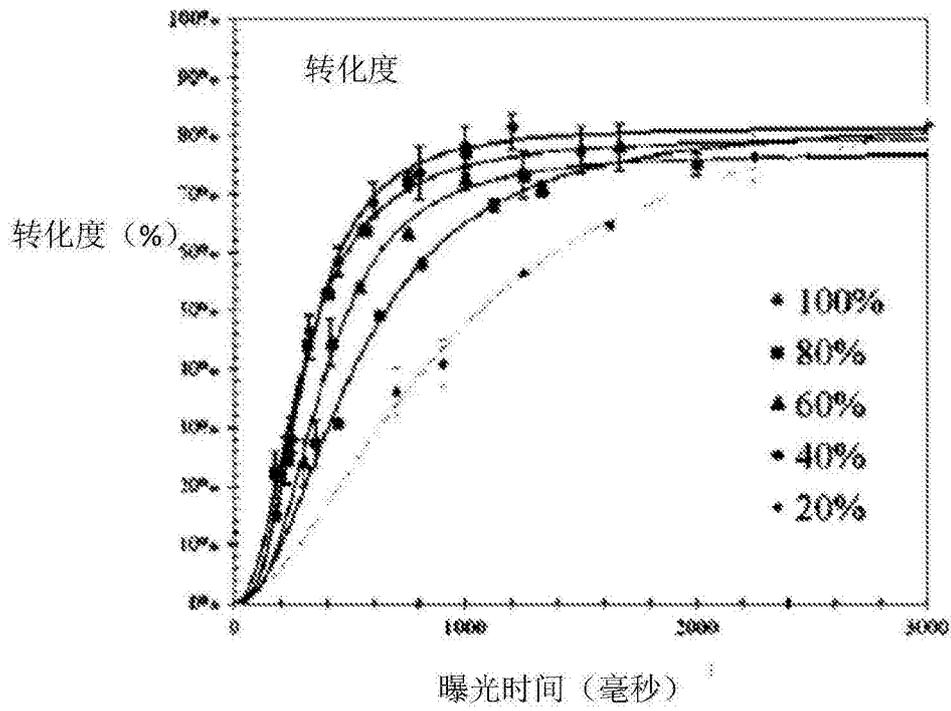


图 117A

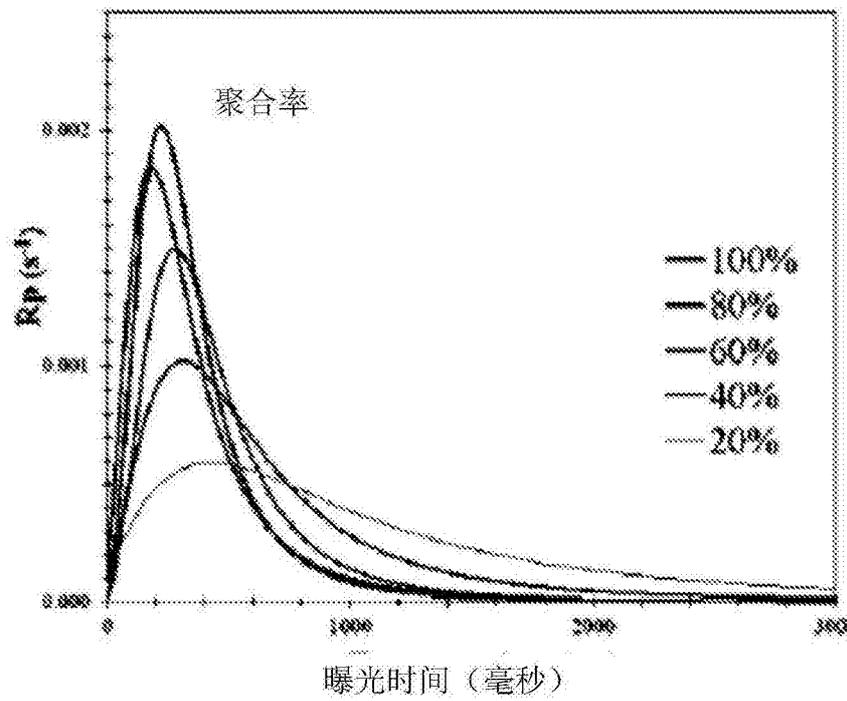


图 117B

图 117

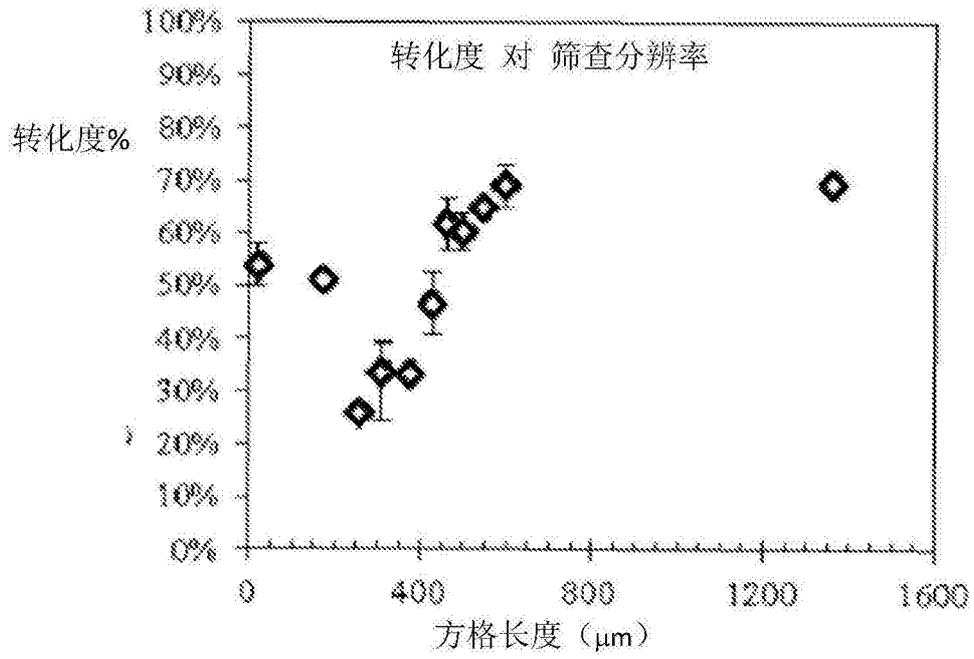


图 118

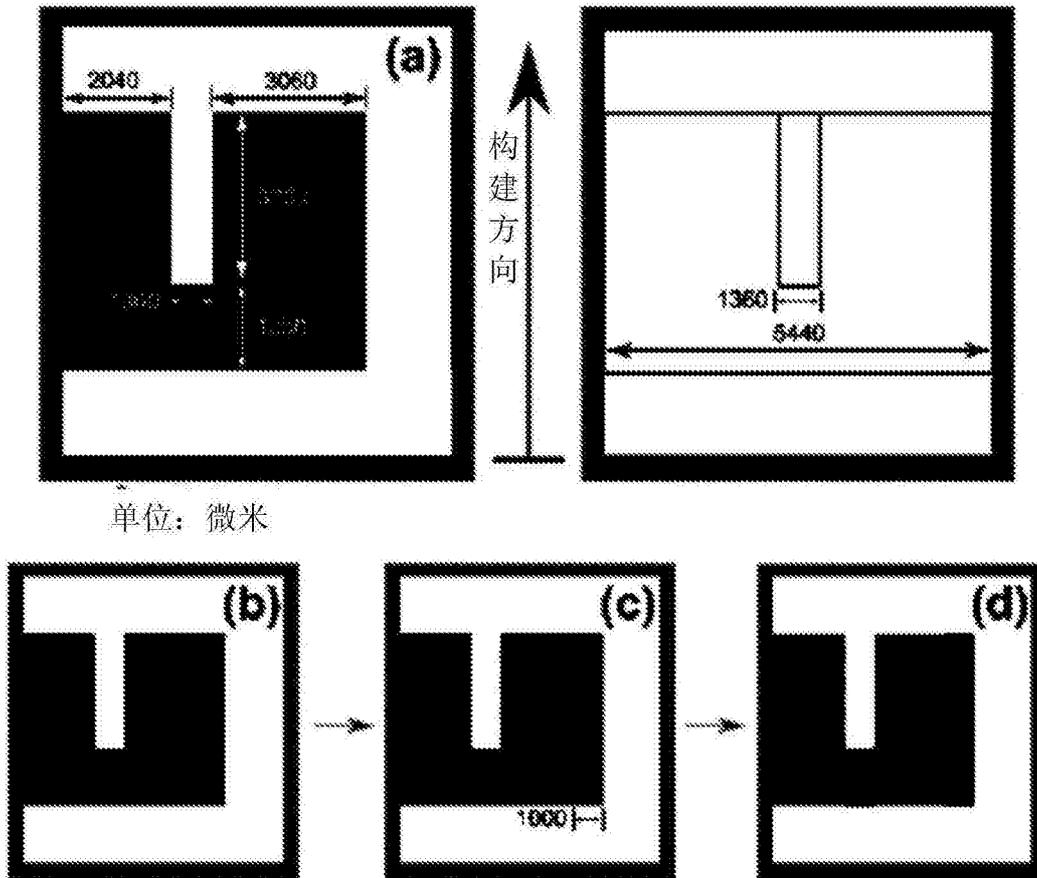


图 119

12000



图 120

12100



图 121

12200

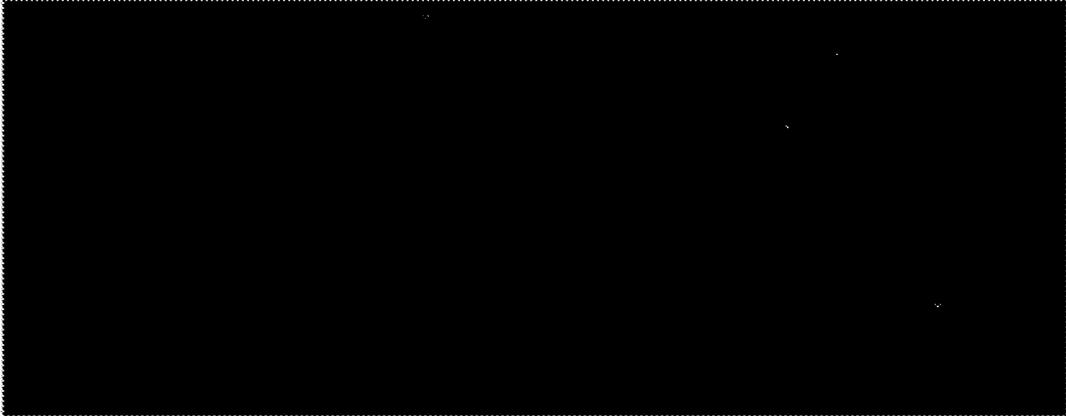


图 122

12300

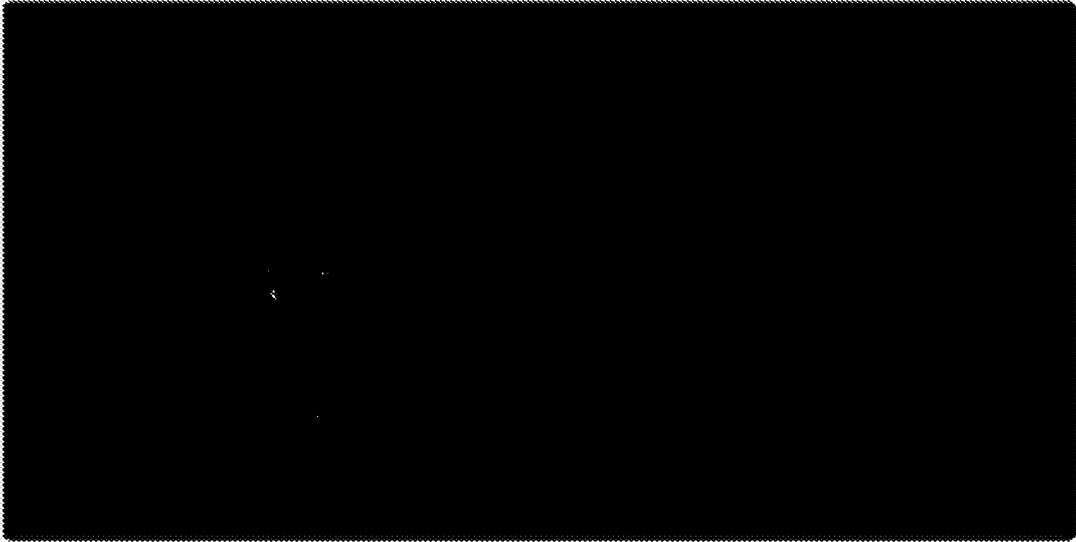


图 123

12400

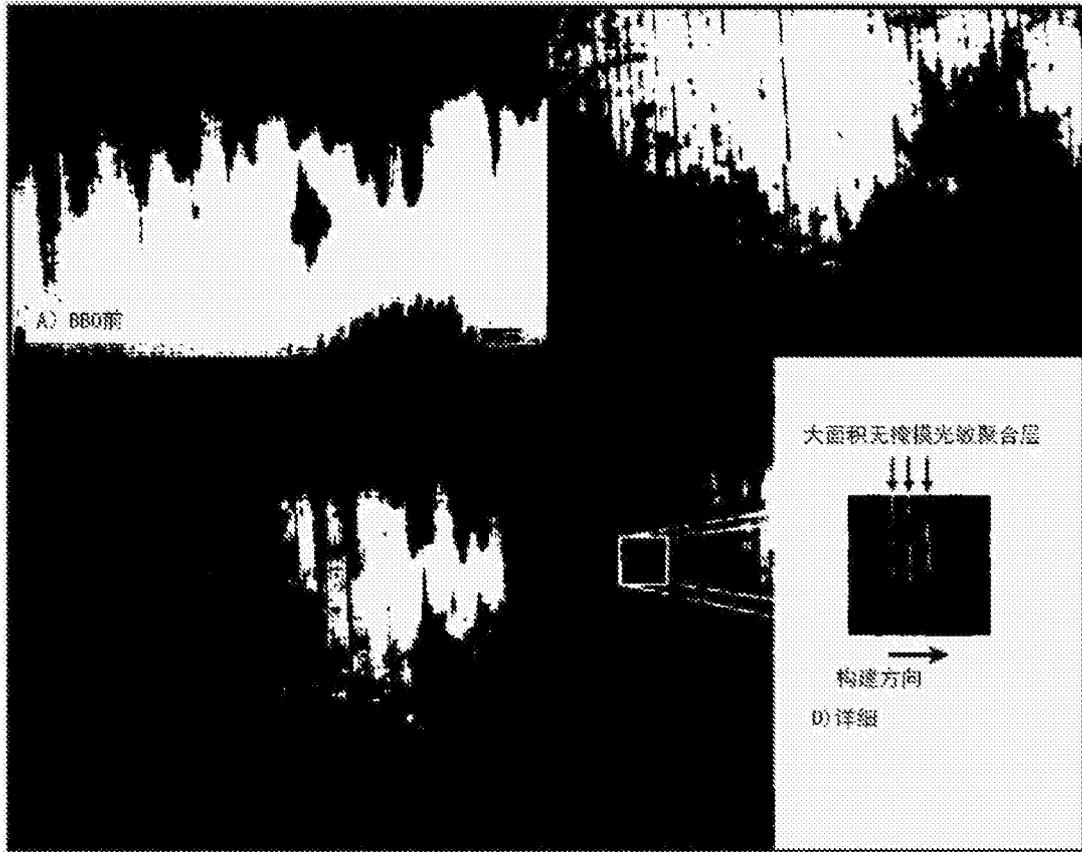


图 124

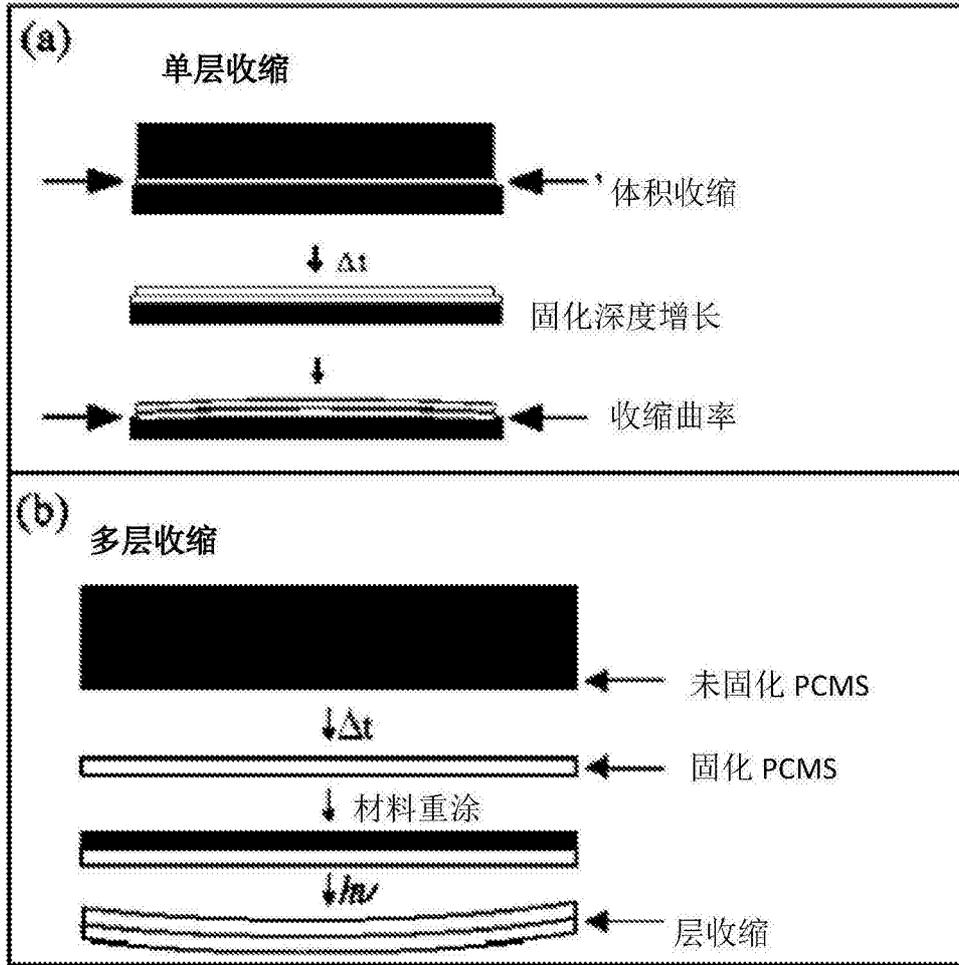


图 125

12600

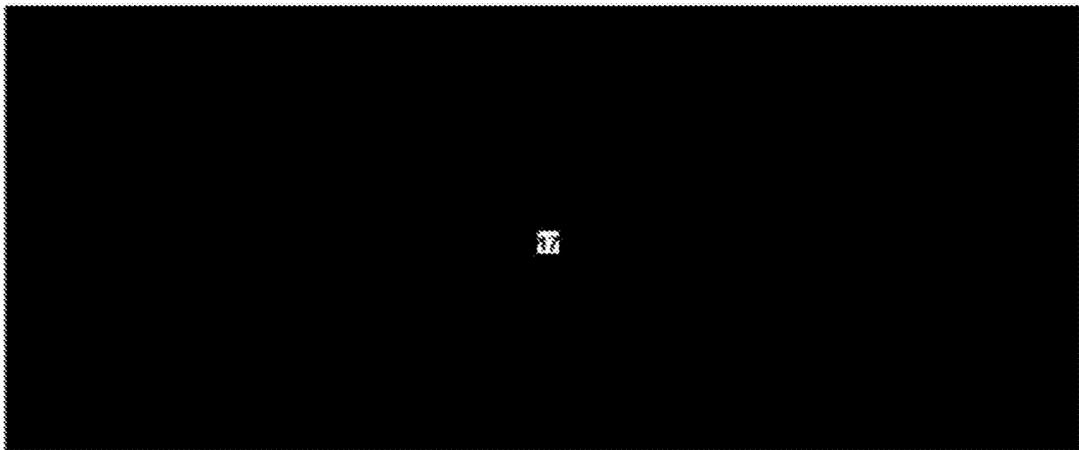


图 126

12700

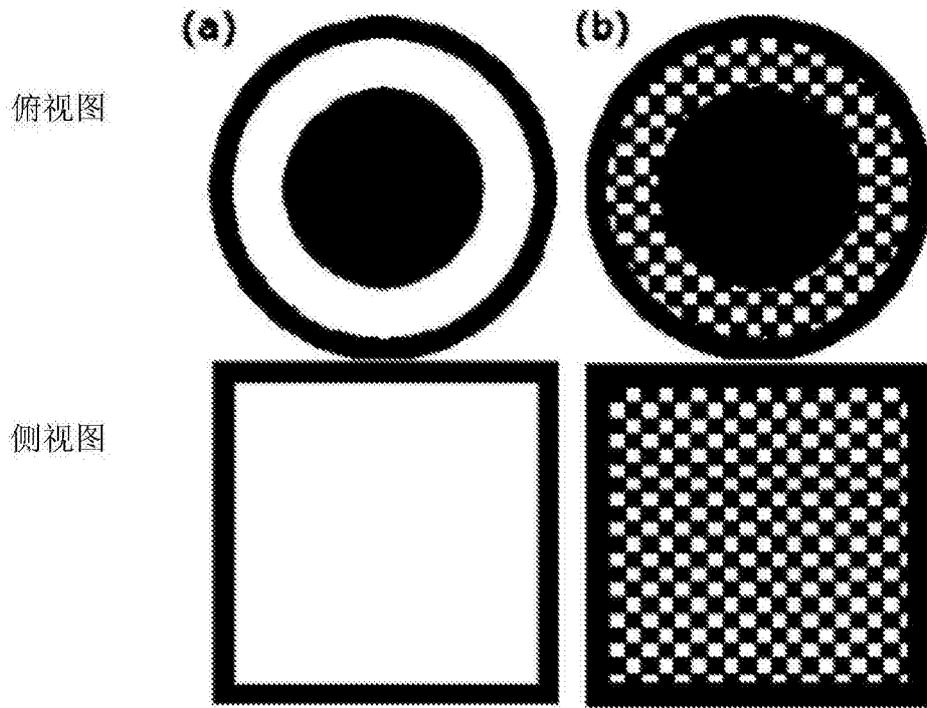


图 127

12800

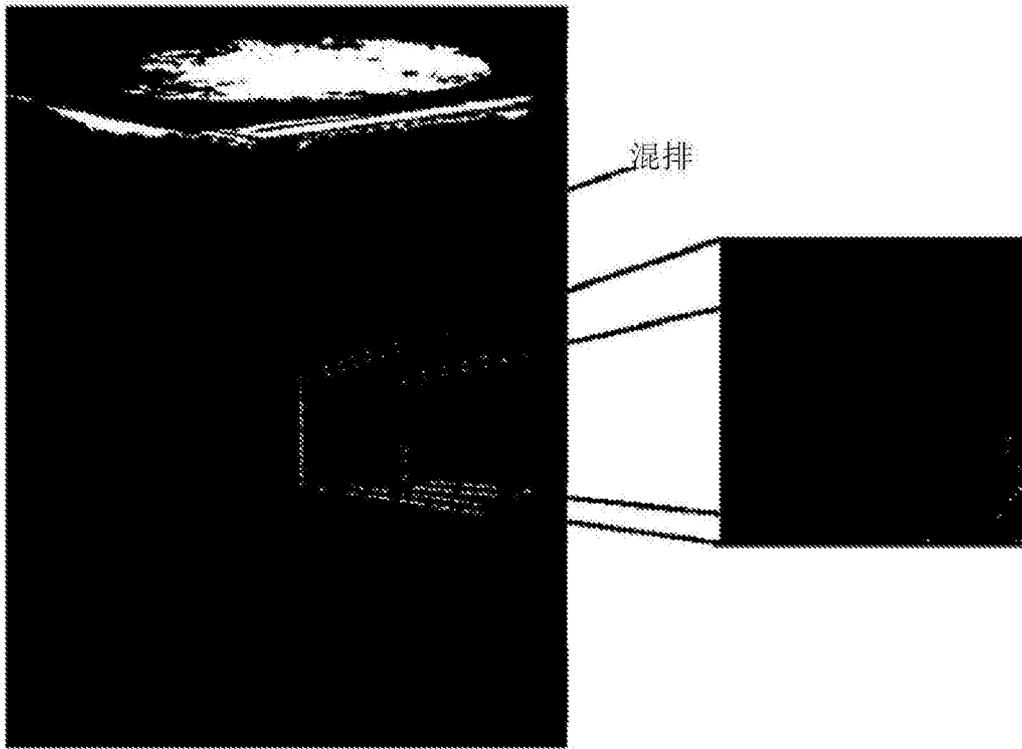


图 128

12900

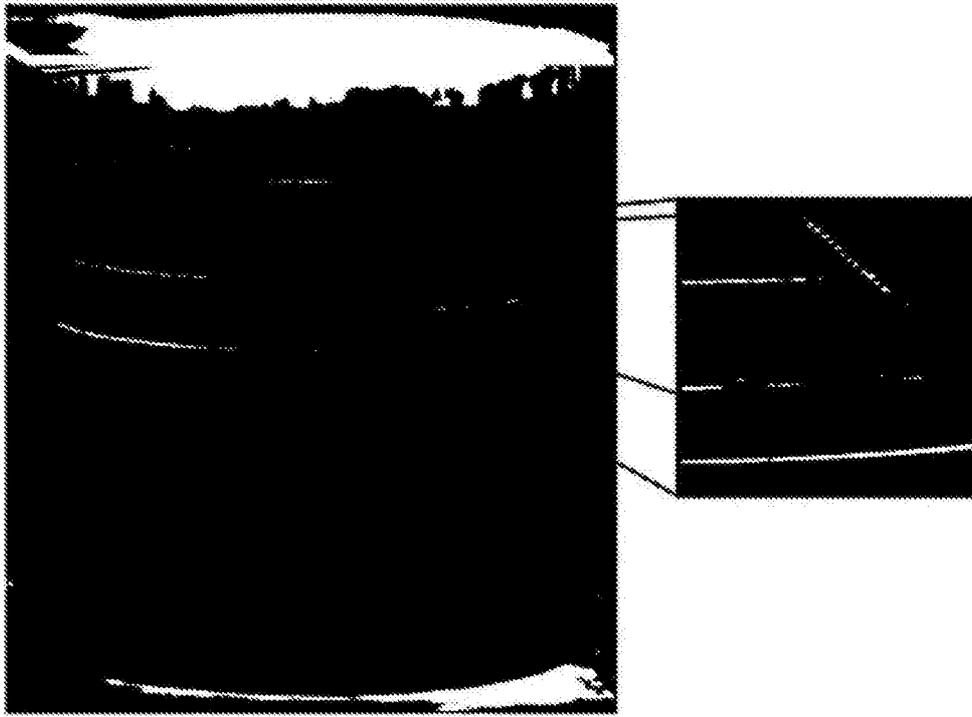


图 129

13000

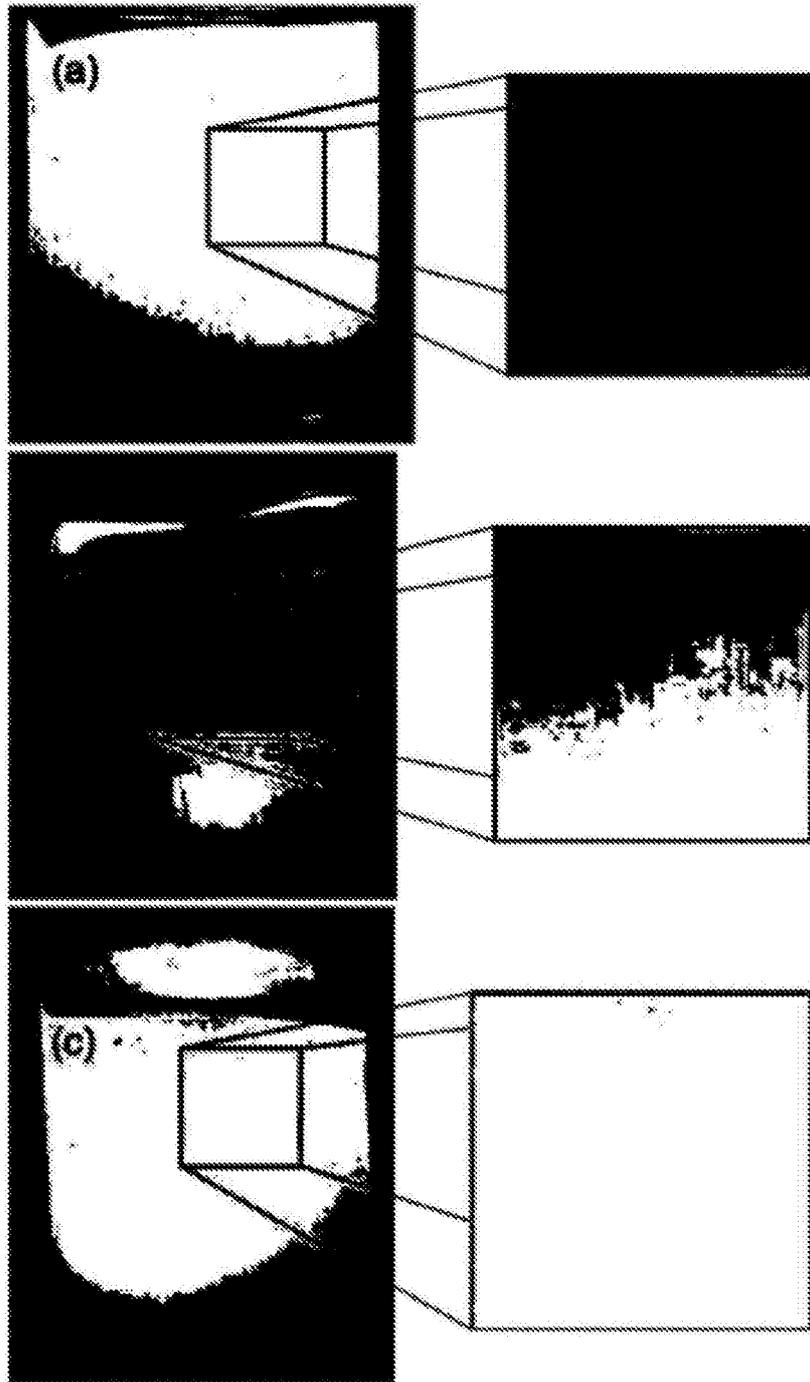


图 130

13100

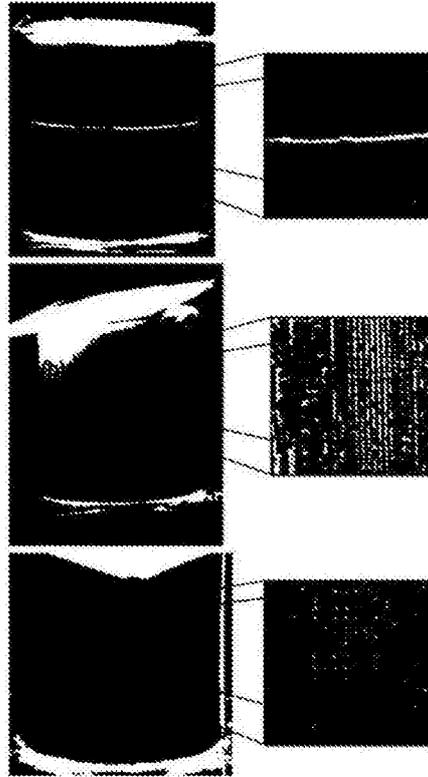


图 131

13200



图 132