



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104755197 A

(43) 申请公布日 2015. 07. 01

(21) 申请号 201380056864. 9

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2013. 11. 01

*B22F 3/105*(2006. 01)

(30) 优先权数据

*B29C 67/00*(2006. 01)

61/721341 2012. 11. 01 US

*G22C 1/04*(2006. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2015. 04. 29

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2013/067975 2013. 11. 01

(87) PCT国际申请的公布数据

W02014/071135 EN 2014. 05. 08

(71) 申请人 通用电气公司

地址 美国纽约州

(72) 发明人 P. M. 肯尼 D. E. 林利

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

代理人 周李军 林森

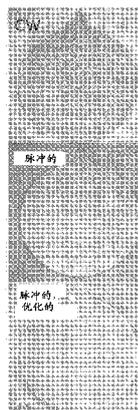
权利要求书2页 说明书12页 附图2页

(54) 发明名称

增材制造方法和设备

(57) 摘要

用于制造物体 (50) 的方法和设备。所述方法和设备需要在基材上向第一量的粉末材料 (60) 施加脉冲激光能量 (42), 以便在所述基材上将粉末材料 (60) 的颗粒熔合到第一层中, 随后通过在第一层上向至少第二量的粉末材料 (60) 施加脉冲激光能量 (42), 在第一层上形成至少一个另外的层, 以便在第一层上将粉末材料 (60) 的颗粒熔合到至少一个另外的层中。所述脉冲激光能量 (42) 以受控方式施加, 使得改变第一和第二量的粉末材料 (60) 的固化动力学, 以促进第一层和另外的层的至少一种微观结构特性。



1. 一种制造物体 (50) 的增材制造方法,所述方法包括:

在基材上向第一量的粉末材料 (60) 施加脉冲激光能量 (42),以便在所述基材上将粉末材料 (60) 的颗粒熔合到第一层中;

通过在所述第一层上向至少第二量的粉末材料 (60) 施加脉冲激光能量 (42),在所述第一层上形成至少一个另外的层,以便在所述第一层上将粉末材料 (60) 的颗粒熔合到至少一个另外的层中;

其中所述脉冲激光能量 (42) 以受控方式施加,使得改变第一和第二量的粉末材料 (60) 的固化动力学,以促进包含所述第一层和另外的层的物体 (50) 的至少一种微观结构特性。

2. 权利要求 1 的增材制造方法,其中所述施加脉冲激光能量 (42) 的受控方式导致第一和第二量的粉末材料 (60) 完全熔融。

3. 权利要求 1 的增材制造方法,其中所述施加脉冲激光能量 (42) 的受控方式降低在所述第一层和另外的层中的至少一种微观结构缺陷,并且所述至少一种微观结构缺陷选自微裂纹和孔结构。

4. 权利要求 1 的增材制造方法,其中所述粉末材料 (60) 为金属粉末材料 (60)。

5. 权利要求 4 的增材制造方法,其中所述金属粉末材料 (60) 为易于由快速固化和局部加热引起微裂纹的金属材料。

6. 权利要求 4 的增材制造方法,其中所述金属材料选自铝、镍、钛、铜、耐熔金属和它们的合金。

7. 权利要求 4 的增材制造方法,其中所述铝合金选自 6000 和 7000 铝合金系列和它们的混合物。

8. 权利要求 1 的增材制造方法,其中所述施加脉冲激光能量 (42) 的受控方式导致脉冲激光能量 (42) 具有使所述物体 (50) 不含微裂纹和孔结构的总体能量密度,其中所述总体能量密度使用以下等式计算:总体能量密度= $P_{avg}/vs$ ,其中  $P_{avg}$  为激光峰功率 ( $P_0$ ) 乘以工作周期 (D),  $v$  为扫描速度,和  $s$  为影线间距。

9. 权利要求 8 的增材制造方法,其中所述施加脉冲激光能量 (42) 的受控方式导致总体能量密度为约 20-约 60 J/mm<sup>2</sup>。

10. 权利要求 8 的增材制造方法,其中所述施加脉冲激光能量 (42) 的受控方式导致脉冲频率为约 20 KHz-约 50 KHz。

11. 权利要求 8 的增材制造方法,其中所述施加脉冲激光能量 (42) 的受控方式导致激光峰功率 ( $P_0$ ) 为约 100 W-约 500 W。

12. 权利要求 8 的增材制造方法,其中所述施加脉冲激光能量 (42) 的受控方式导致工作周期为约 0.5-约 0.7。

13. 权利要求 8 的增材制造方法,其中所述扫描速度为约 100 mm/s-约 2000 mm/s,影线间距为约 0.04 mm-约 0.1 mm。

14. 一种增材制造设备 (10),其设置用于实施权利要求 1 的增材制造方法,所述设备 (10) 包含脉冲-激光发生系统 (40) 和控制其中根据权利要求 1 施加脉冲激光能量 (42) 的受控方式的控制器 (30)。

15. 一种基本不含裂纹的铝制品 (50),所述制品通过权利要求 1 的增材制造方法制

造。

## 增材制造方法和设备

### [0001] 相关申请的交叉引用

本申请要求 2012 年 11 月 1 日提交的美国临时申请 61/721,341 的权益,其内容通过引用结合到本文中。

### [0002] 发明背景

本发明总体上涉及适于实施增材制造 (AM) 过程的方法和设备,具体地,采用能量束来选择性熔合粉末材料以生产物体的 AM 过程。更具体地,本发明涉及在 AM 过程中使用脉冲的导向能量束来实现预定的致密化和微观结构演进的方法和系统。

[0003] AM 过程总体上涉及一种或多种材料累积以制备净形或近净形 (NNS) 物体,与减材制造方法相反。虽然“增材制造”为工业标准术语 (ASTM F2792),但 AM 包括以多种名称已知的各种制造和原型技术,包括自由成型制造、3D 印刷、快速原型 / 工具加工等。AM 技术能由宽泛的材料制造复杂的组件。总的来说,可由计算机辅助设计 (CAD) 模型制造独立式物体。一种特别类型的 AM 过程使用能量束 (例如,电子束或电磁辐射,例如激光束) 来烧结或熔融粉末材料,产生其中粉末材料的颗粒结合在一起的固体三维物体。使用不同的材料系统,例如,工程塑料、热塑性弹性体、金属和陶瓷。激光烧结或熔融为用于快速制造功能原型和工具的著名的 AM 过程。应用包括用于熔模铸造的图案、用于注塑和压铸的金属模具和用于砂铸的模具和芯。制造原型物体以增强在设计周期期间观念的交流和测试为 AM 过程的其它常见的用途。

[0004] 激光烧结为常见的工业术语,用于指通过使用激光束来烧结或熔融细粉末而生产三维 (3D) 物体。更精确地,烧结需要在低于粉末材料的熔点的温度下熔合 (聚结) 粉末的颗粒,而熔融需要完全熔融粉末的颗粒以形成固体均质物料。与激光烧结或激光熔融相关的物理过程包括向粉末材料传热,随后烧结或熔融粉末材料。虽然激光烧结和熔融过程可应用于宽泛的粉末材料,但还未充分理解生产路线的科学和技术方面,例如,烧结或熔融速率和在层制造过程期间加工参数对微观结构演进的影响。该制造方法伴随多种模式的热量、质量和动量传递以及使得过程非常复杂的化学反应。

[0005] 激光烧结 / 熔融技术通常需要在基材上在受控量的粉末 (通常为金属) 材料上投射激光束,以便在其上形成熔合的颗粒或熔融的材料层。通过沿着预定的路径 (通常称为扫描图案) 相对于基材移动激光束,可在基材上在两个维度上限定层,层的宽度由其中照射粉末材料的激光束的直径决定。扫描图案通常包含平行的扫描线,也称为扫描矢量或影线 (hatch line),并且两个相邻的扫描线之间的距离通常称为影线间距 (hatch spacing),其通常小于激光束的直径,以便实现充分的重叠,以确保完全烧结或熔融粉末材料。沿着所有或部分扫描图案重复移动激光能够使材料的其它层沉积,随后烧结或熔融,从而制造三维物体。

[0006] 在过去,已使用连续波 (CW) 激光实施激光烧结和熔融技术,通常为在 1064 nm 下操作的 Nd:YAG 激光。这可实现特别适于修复应用的高材料沉积速率或随后的机械加工操作可接受的情况,以便得到成品物体。然而,该方法本身不能提供以精密公差和高品质表面整饰生产近净形物体。这些方法面临的另一个障碍是在最终产品中存在微观结构缺陷 (例

如,空隙、杂质或包含物)。这样的缺陷可导致灾难性失败。

[0007] 鉴于以上,可理解的是,存在与激光烧结和熔融技术相关的某些问题、短处或缺点,并且期望可得到改进的方法和设备并且能够以精密公差和 / 或高品质表面整饰生产近净形物体,和 / 或在成品物体中在沉积层之间能降低或消除裂纹、包含物和孔。

[0008] 发明概述

本发明提供了一种适用于 AM (增材制造) 技术的方法和设备,其中使用能量束来选择性烧结(熔合)或熔融粉末材料,以生产 3D 物体。

[0009] 根据本发明的第一方面,制造物体的方法需要在基材上向第一量的粉末材料施加脉冲激光能量,以便在所述基材上将粉末材料的颗粒熔合到第一层中,随后通过在第一层上向至少第二量的粉末材料施加脉冲激光能量,在第一层上形成至少一个另外的层,以便在第一层上将粉末材料的颗粒熔合到至少一个另外的层中。脉冲激光能量以受控方式施加,使得改变第一和第二量的粉末材料的固化动力学,以促进包含第一层和另外的层的物体的至少一种微观结构特性。

[0010] 本发明的其它方面包括适于实施包括上述步骤的方法的设备以及通过包括上述步骤的方法制造的制品。

[0011] 本发明的技术效果是能够适当地调节激光束脉冲,以准确和精确地控制施加于粉末材料的热量的量,特别是用于实现对由此生产的最终物体的特性精细很多的控制,例如,减少(如果并非不存在)微观结构缺陷,例如,空隙、杂质、包含物,特别是微裂纹和孔结构。不希望局限于任何具体的理论,我们认为脉冲激光能量控制对材料的固化动力学的效果影响通过能量沉积在材料中诱导的暂时的和空间的热梯度,与热梯度匹配的所得到的瞬时、局部、温度-依赖性材料性质,和所得到的材料的物理响应或微观结构特性。

[0012] 参考以下讨论的实施方案来更充分地解释这些和其它方面。应理解的是,总的来说,一个实施方案的特征也可与另一个实施方案的特征组合使用,并且实施方案不旨在限制本发明的范围。

[0013] 附图简述

结合附图,在以下详细说明中描述本发明的各种示例性实施方案,随着描述的进行,这些实施方案将变得更加显而易见,其中:

图 1 描述包括本发明的某些方面的设备的图。

[0014] 图 2 显示使用恒波技术(顶部)和脉冲波技术(中心和底部)生产的物体的横截面的显微照片。

[0015] 发明详述

以下定义适用于本发明。

[0016] 在本上下文中使用的“机械性能”指包括韧性(例如,断裂韧性)、延展性、抗蠕变性和中间温度强度。

[0017] 术语“超合金”通常旨在包括络合的基于钴或镍的合金,其包括一种或多种其它元素,例如,铌、铝、钨、钼、钛和 / 或铁。这样的材料描述于各种参考文献,包括美国专利 6,475,642 ;5,399,313 ;和 4,116,723,其通过引用结合到本文中。

[0018] 本文使用的术语“AM 过程”(也称为“增材制造”方法)指产生可用的三维物体并且包括一次一层地序贯形成物体的形状的步骤的任何过程。AM 过程包括三维印刷(3DP)过

程、激光-净形制造、直接金属激光烧结 (DMLS)、直接金属激光熔融 (DMLM)、等离子体转移的电弧、自由成型制造等。一种特别类型的 AM 过程使用能量束,例如,电子束或电磁辐射例如激光束,以烧结或熔融粉末材料。AM 过程通常采用相对昂贵的金属粉末材料或金属丝作为原料。3DP 过程的一个实例可在 2000 年 3 月 14 日颁布的 Sachs 的美国专利 6,036,777 中找到。

[0019] 本发明总体上涉及 AM 过程作为制造物体(制品、组件、零件、产品等)的快速方式,其中序贯形成多个薄的单元层,以生产物体。更特别是,铺设粉末材料的层并且使用能量束(例如,激光束)照射,使得在每一层内粉末材料的颗粒序贯烧结(熔合)或熔融,使层固化。根据本发明的一个优选的方面,采用脉冲-激光增材制造(AM)设备来产生脉冲激光束和实施能通过粉末材料的连续层内完全熔融颗粒以形成固体均质物料,生产三维物体的激光熔融方法。

[0020] 激光烧结/熔融技术的详细描述可在美国专利 4,863,538、美国专利 5,017,753、美国专利 5,076,869 和美国专利 4,944,817 中找到。使用这种类型的制造过程,通过在床中扫描材料的横截面,使用激光束来选择性熔合粉末材料。基于期望的物体的三维描述,扫描这些横截面。该描述可由各种来源得到,例如,计算机辅助设计(CAD)文件、扫描数据或一些其它来源。

[0021] 根据本发明的某些方面,粉末材料可为金属材料,其非限制性实例包括铝及其合金、钛及其合金、镍及其合金、不锈钢、钴-铬合金、钽和铌。生产三维结构的方法可包括在基材上沉积一种或多种前述粉末材料的第一层。沉积粉末材料的至少一个另外的层,随后对于每一个连续层,重复激光扫描步骤,直至得到期望的物体。在制造三维结构中,可将粉末材料施用于固体基础或不施用于固体基础。以逐层的方式形成制品,直至完成。在本发明中,对用于本发明的实施方案的粉末材料的颗粒形状没有特别的限制。粉末材料的平均晶粒尺寸优选为约 10-100  $\mu\text{m}$ 。

[0022] 在某些实施方案中,本发明提供具有高尺寸精度和优良的微观结构特性的铝产品,例如,其特征为基本不存在微观结构缺陷,例如空隙、杂质、包含物,特别是微裂纹和孔结构,不采用金属冲压,即使产品可由认为耐烧结的基于纯铝和/或铝合金的粉末材料形成。铝合金在本文中定义为含有至少 50 质量%的铝的金属合金。

[0023] 在一个实施方案中,AM 过程在惰性气氛下进行。在另一实施方案中,惰性气氛为包含选自以下的气体的气氛:氩、氦、氧、氮、空气、氧化亚氮、氨、二氧化碳,和它们的组合。在一个实施方案中,惰性气氛为包含选自以下的气体的气氛:氮( $\text{N}_2$ )、氩(Ar)、氦(He)和它们的混合物。在一个实施方案中,惰性气氛基本为氩气气氛。

[0024] 在另一个有利的实施方案中,脉冲-激光 AM 设备包含在其内可制造制品的构造室、在该室内并且在其上制造制品的可活动的构造平台、粉末材料递送系统和激光递送系统。粉末材料递送系统将粉末材料递送至构造平台。在一个任意的实施方案中,可采用能使用加热的气体加热粉末材料和平台的加热系统。通过顺应物体的形状,仅可活动平台中要在其上实施该过程的部分需要粉末材料。

[0025] 现在参考图 1,根据一个实施方案描述脉冲-激光 AM 设备 10 的图。在图 1 中说明的具体实例中,设备 10 包括脉冲-激光增材制造(AM)装置 100,其优选包含在其内要制造物体 50 的构造室(未显示)和在构造室内并且在其上制造物体 50 的可活动的构造平台

(未显示)。设备 10 还包括脉冲-激光发生系统 40 和控制器 30。在说明性实例中,可将粉末材料 60 放置在 AM 装置 100 中,以使用通过发生系统 40 产生的脉冲激光束 42 产生物体 50。物体 50 可采用各种形式。控制器 30 可将控制信号送至发生系统 40 和将控制信号 32 送至 AM 装置 100,以控制加热,并且在优选的实施方案中,使粉末材料 60 熔融,以形成物体 50。这些控制信号 32 可使用设计数据 20 产生。

[0026] 脉冲激光束 42 可通过脉冲激发或通过脉冲-激光发生系统 40 内的计量器(Q-开关或模式偶联)产生。脉冲激光束 42 不连续发出,与连续波(CW)激光相反,而是采用脉冲方式发出,即,及时有限的脉冲。

[0027] 在一个实施方案中,发生系统 40 适于逐层实施和局部熔合(熔融或烧结)粉末材料 60。在一个实施方案中,粉末材料 60 为对在常规的激光烧结/熔融过程中的裂化敏感的合金,并且激光束 42 以受控方式递送,使得改变熔融的粉末材料 60 的固化动力学,以提供所得到的物体 50 的更好的微观结构特性。在一个实施方案中,微观结构特性包括再固化的粉末材料 60 的应力、应变和裂化状态中的一个或多个。不希望局限于任何具体的理论,我们认为脉冲激光能量控制对材料的固化动力学的效果影响通过能量沉积在材料中诱导的暂时的和空间的热梯度,与热梯度匹配的所得到的瞬时、局部、温度-依赖性材料性质,和所得到的材料的物理响应或微观结构特性。

[0028] 在一个实施方案中,脉冲-激光发生系统 40 为脉冲的 Nd:YAG 激光。在另一实施方案中,发生系统 40 为脉冲纤维(纤维)激光。纤维激光通常为其中活性增加介质为掺杂稀土元素(例如铒、镱、钕、镨、镱和钪)的光学纤维的激光。纤维非线性(例如受激拉曼散射或四波混合)也可提供增加,因此用作纤维激光的增加介质。在另一实施方案中,发生系统 40 可为高斯类型密封管 CO<sub>2</sub>脉冲激光。因此,发生系统 40 可执行 CO<sub>2</sub>激光。

[0029] 根据本发明的优选的方面,利用通过激光峰功率、脉冲列的工作周期、扫描速度(影线速度)和影线间距(相邻的扫描的粉末材料之间的偏移)确定的激光焊接参数,激光束 42 采用脉冲方式施加,以生产不含或基本不含微观结构缺陷(特别是微裂纹和孔结构)的制品。特别是,控制激光脉冲及其相关的参数,以得到本文所称的总体能量密度,其使用以下等式计算:

$$\text{总体能量密度} = P_{\text{avg}} / v s$$

其中  $v$  为扫描速度,  $s$  为影线间距,  $P_{\text{avg}}$  为激光平均功率,通过用激光峰功率( $P_0$ )乘以工作周期( $D$ ,无量纲)来计算,后者通过用脉冲宽度( $\tau$ ,持续时间,以秒计)乘以脉冲频率( $f$ ,速率,以每秒的周期数计)来计算。

[0030] 脉冲激光束的脉冲频率可为约 50 Hz-50 KHz。在另一实施方案中,脉冲频率为约 1 KHz-50 KHz。在另一实施方案中,脉冲频率为约 3 KHz-50 KHz。在另一实施方案中,脉冲频率为约 10 KHz-50 KHz。在另一实施方案中,脉冲频率为约 20 KHz-50 KHz。

[0031] 根据本发明,激光束 42 可调节为正弦波、矩形波、整流正弦波、正方形波或任何其它波形(例如,锯齿波),其可为周期性或非周期性的或以某一射频重复分流。这样的波可具有坡道向上、坡道向下或二者。有利地,可优化调节的程度,以满足固化品质的最佳性能的要求。

[0032] 操作者指定的值可通过计算机提供给波形发生器,以指定适当的时间延迟值和有利地控制形成为窄脉冲的单个脉冲的脉冲能量。关于脉冲峰强度的过程或进展的在窄包

络内的不同特性和重复速率可因此任意定义和变化。例如,可产生其中脉冲-能量包络单调坡道向上或坡道向下或保持恒定的窄脉冲。本发明预期高斯、洛伦兹、超高斯、指数上升、指数下降和许多其它形式的脉冲能量包络。短的重复窄脉冲的组合、重复速率的改变、正弦和非周期性分布可通过本发明描述的各种实施方案来产生。在某些实施方案中,调节波形具有高工作周期 ( $D=P_{\text{avg}}/P_0=\tau f$ ),以递送充分的泵能量 (pump energy),而没有使激光过载 (overdriving) 的风险。

[0033] 脉冲激光束 42 的峰功率 ( $P_0$ ) 可为约 5 W-约 2000 W。在另一实施方案中,峰功率为约 40-约 1000 W。在另一实施方案中,峰功率为约 100 W-约 500 W。在另一实施方案中,通过分裂较高功率束和使用多个扫描头,在多个入射点提供峰功率。

[0034] 在一个实施方案中,激光扫描速度为约 100 mm/s-约 2000 mm/s。在另一实施方案中,激光扫描速度为约 200 mm/s-约 1000 mm/s。在另一实施方案中,激光扫描速度为约 200 mm/s-约 400 mm/s。在又一实施方案中,可使用较低的扫描速度,例如,约 80-约 400 mm/s。

[0035] 在一个实施方案中,影线间距为约 0.02 mm-约 0.2 mm。在另一实施方案中,影线间距为约 0.04 mm-约 0.1 mm。在另一实施方案中,影线间距为约 0.05 mm-约 0.07 mm。基于影线间距和激光束直径的典型范围,典型的束重叠 (b) 可为约 1200% 至约 50%。

[0036] 在一个实施方案中,工作周期为约 0.1-约 0.95。在另一实施方案中,工作周期为约 0.2-约 0.8。在另一实施方案中,工作周期为约 0.3-约 0.7。在其中粉末材料 60 为铝或铝合金的实施方案中,认为特别合适的工作周期为约 0.5-约 0.7。在其它实施方案中,认为特别合适的工作周期为约 0.4-约 0.6。

[0037] 使用脉冲激光束 42 序贯熔合的粉末材料 60 的第一层和连续层的厚度优选为约 5  $\mu\text{m}$ -约 2000  $\mu\text{m}$ 。在一个实施方案中,粉末材料层厚度与可用的激光功率成比例。在另一实施方案中,粉末材料层厚度为约 10  $\mu\text{m}$ -200  $\mu\text{m}$ 。在另一实施方案中,粉末材料层厚度为约 20  $\mu\text{m}$ -50  $\mu\text{m}$ 。

[0038] 在一个实施方案中,在粉末材料 60 经历脉冲激光束 42 之前,AM 装置 100 能使用加热的气体 70 加热粉末材料 60。此外,加热的气体 70 可在 AM 装置 100 内加热其它物体,其方式可帮助保持粉末材料 60 的已处理层的温度更接近待熔合的层的温度。

[0039] 在图 1 中对设备 10 的说明不意味着暗示物理和/或结构限制于其中可执行不同环境的方式。例如,在其它有利的实施方案中,可执行脉冲-激光发生系统 40 作为脉冲-激光 AM 装置 100 的一部分而不是作为单独的单元。不同的单元作为功能组件说明,其可组合或进一步分离成为另外的程序块,取决于具体的执行。在又一个实例中,可在脉冲-激光 AM 装置 100 内执行控制器 30。

[0040] 首先,在计算机中由设计数据 20 决定物体 50 的形式和材料累积。设计数据 20 也可采用各种形式。例如,设计数据 20 可为计算机辅助设计 (CAD) 文件或扫描数据。三维电子图象的 CAD 文件通常转化为在工业上称为立体平版印刷或标准三角形语言 ("STL") 文件格式或 STL 格式的另一文件格式。STL 格式文件随后通过合适的切片程序处理,以产生将物体 50 的三维电子图象转化为包含按二维切片表现的物体 50 的 STL 格式文件的电子文件。用于进行这些各种电子文件的合适的程序为本领域技术人员公知的。

[0041] 将由该过程产生的层信息输入控制器 30 中,其产生递送至 AM 装置 100 的计算机

(未显示)的信号 32,以控制它们的构造平台。控制信号 32 也可用于控制粉末材料 60 的供应和控制脉冲-激光发生系统 40。计算机也可特别用作 AM 装置 100 的控制计算机。在生产物体 50 的其它过程中,物体 50 的逐层累积可根据如前描述的增材制造方法发生。

[0042] 在其它有利的实施方案中,AM 装置 100 的构造室的体积不需要气密。使用这种类型的执行,优选在构造室内保持正压。可通过压力和 / 或温度调节器来保持压力。在一个实施方案中,气体的温度可为约 100°C - 约 400°C。在操作中,可通过气口将气体引入粉末材料递送系统和构造室中。取决于具体的执行,在通过气口引入之前,可将气体预热。加热的气体循环,并且加热粉末材料和构造室。加热的气体还可加热构造平台。加热构造平台可提供位于构造平台上的粉末材料的间接加热。使用惰性气体来加热粉末材料和构造平台与其中采用石英、棒加热器或碳纤维加热元件来直接加热构造平台的当前使用的机构相反。加热构造平台和其它系统组件可降低熔合粉末材料 60 所需的激光能量的量。当较高温度材料用于粉末材料 60 时,这种能力是有用的。

[0043] 作为通过脉冲激光束 42 熔融的结果,在粉末材料 60 的层已处理之后,至少一部分构造平台可移动,例如,在构造室内降低。随后,可递送另外的粉末材料 60,以在先前的层和构造平台的构造表面上沉积粉末材料 60 的另一个层。粉末材料 60 的另外的层可随后使用通过发生系统 40 递送的激光束 42 处理。每一次沉积粉末材料 60 的层,可使用再涂敷器使粉末层平滑,使得粉末层限定基本平的表面。使用这种类型的构造平台移动,可使用较少的粉末材料 60。具体地,在其中可活动的阶段还未向下移动或比起其它部分较少向下移动的区域上沉积较少的粉末材料 60。

[0044] 通过改变目前可用的激光烧结或熔融系统,可构造设备 10。不同的有利的实施方案可使用目前可用的激光烧结或熔融系统,其修改为包括脉冲-激光发生系统 40。此外,可修改设备 10 以包括合适的构造平台和加热的气体 70 的来源。另外,在其它有利的实施方案中,可包括门,其方式允许从构造室除去零件。

[0045] 在使用现有技术激光烧结过程生产零件中,最大的困难来源之一是在生产零件期间产生残余的应力。如以下讨论的,认为脉冲激光束 42 能降低残余的应力的,提供一些另外的几何自由度和过程稳健度。

[0046] 含有具有不同熔点的组成的材料更加可能具有较宽的脆性温度范围,这是相干温度(低于此温度,半熔融的金属开始产生连锁的晶粒,因此提供具有有一些拉伸强度的材料)和零延展性温度(低于此温度,半熔融的金属开始获得延展性)之间的差异。裂化发生的基本条件是材料经历的应力必须大于其断裂强度。此处应力通过热收缩引起,并且在该脆性温度范围内出现非常低的断裂强度。通过限制出现这些应力的长度和通过在熔融的区域提供振动,认为脉冲激光束 42 能提供改进的性质,这潜在地可允许更容易用熔融材料回填发展出的任何裂纹。

[0047] 存在多种具有该物理现象的不同的材料参数,但是通常具有高延展性(通过伸长率测量)的材料例如更加可能用本发明改进。具有低延展性的那些更加可能受益于脉冲激光束 42。存在例外,最显著的是上述铝材料,其通常具有相当高的室温延展性(在大多数情况下, >10% 伸长),但是非常易受热裂化影响,由于其大的脆性温度范围和高的固化收缩(例如,对于铝合金铸件,约 6.6%)二者。具有大的固化收缩的材料在近焊接区域更加可能经历大的应力,潜在地引起裂化。

[0048] 鉴于以上,设备 10 能加工宽泛的材料,包括但不限于以下讨论的。

[0049] 铝及其合金:认为一些铝合金可焊接(5000 系列),并且比起认为不可焊接的那些(6000 和 7000 系列),通常具有较低的强度。对于认为不可焊接的那些,本发明提供脉冲的实质益处。粉末材料 60 可为纯铝或铝合金。粉末材料 60 还可为纯铝的颗粒和一种或多种铝合金的混合物或者可为各种铝合金的混合物。对铝粉末材料 60 的组成没有限制,除了其要含有足够的金属形式的铝用于粉末材料颗粒,以形成氧化铝的基本包封的膜。

[0050] 镍和镍合金,包括基于镍的超合金:焊接性为决定性因素。具有高铝或钛浓度的基于镍的合金通常认为不可焊接。认为使用脉冲激光束 42 能降低在难以焊接的这些材料中的裂纹水平。

[0051] 钛及其合金:虽然认为大多数钛合金可焊接并且通过激光烧结过程相对容易处理,但是可观察到大规模的裂化。在本发明中,认为脉冲激光束 42 能降低残余应力的大小,并且在降低的裂化方面提供益处。

[0052] 金属间物:金属间铝化钛(TiAl)在室温下呈现低延展性并且易于有显著的大裂纹和微裂纹。

[0053] 耐熔材料:在本发明中,认为脉冲激光束 42 能降低残余应力的大小和耐熔材料的裂化,其倾向于在再固化期间裂化。耐熔金属(例如钨和钼)具有相当高的延展性至脆性转变温度,并且相当难以生产。在本发明中,还认为脉冲激光束 42 能降低残余应力的大小和耐熔金属例如铌和钽合金的裂化。在一个实施方案中,粉末材料 60 包含选自耐熔金属、常用于吸气的金属、碱土金属和 IV 族金属的元素金属以及它们的化合物和合金。耐熔金属的实例包括但不限于 Mo、W、Ta、Rh 和 Nb。吸气材料为容易通过吸附、吸收和 / 或闭塞收集游离气体的那些,并且通常包括 Al、Mg、Th、Ti、U、Ba、Ta、Nb、Zr、和 P,但是也存在若干其它材料。最后,4 族金属包括 Ti、Zr 和 Hf。金属化合物的实例包括金属氢化物(例如,  $TiH_2$ )和金属间物(例如, TiAl 和  $TiAl_3$ )。尤其是,合金的一种具体情况包括 Ti-6Al4V。

[0054] 铜及其合金:在本发明中,认为脉冲激光束 42 能降低残余应力的大小和在铜和相关的高导热性、低光学吸收合金中的裂化。

[0055] 金属玻璃:在本发明的另一实施方案中,使用无定形金属(也称为金属玻璃或玻璃状金属),其为固体金属材料,通常为合金,具有无序的原子尺度结构。大多数金属在它们的固态下为晶体,这意味着它们具有高度有序的原子排列。无定形金属为非晶体,因此为玻璃,但是与电绝缘体的常规玻璃不同,无定形金属具有良好的导电性。存在若干种可生产无定形金属的方式,包括极快速冷却、物理气相沉积、固态反应、离子辐射和机械成合金。在本发明中,提高冷却速率产生较小的(更好的)沉淀。在一个实施方案中,本发明的方法与约 20 kHz 的电流脉冲频率一起使用,其中工作周期为 0.5,并且材料在空闲阶段从液体变为固体,最大温度为 1200°C,产生约  $2.4 \times 10^7$  K/s 的冷却速率,比起先前使用的  $1.5 \times 10^6$  K/s 的  $6-\sigma$  测量冷却速率,冷却速率有一个数量级的提高。

[0056] 使用金属玻璃,快速固化产生亚稳定增强状态,在不同的合金(存在快速固化的钢、铝和其它)中不同。如果从熔融材料缓慢冷却,这些相的颗粒过度生长,降低它们作为增强剂的效率。在具有钪的铝材料(Scalloy、Pandalloy)的情况下,通过快速冷却,溶体中的钪没有时间形成大的颗粒。虽然已知激光烧结过程具有极快速的冷却速率( $10^6$  K/s 量级),本发明适用于需要快速固化的材料。使用脉冲,通过在脉冲之间允许材料的温度

降低至一定程度,所述方法允许提高冷却速率。

[0057] 在一个实施方案中,金属玻璃包括至少两种元素的合金。第一元素可包括银、铝、铜、镍或它们的组合。在另一实施方案中,第一元素可包括至少一种选自以下的元素:银(Ag)、铜(Cu)、金(Au)、铝(Al)、钙(Ca)、铍(Be)、镁(Mg)、钠(Na)、钼(Mo)、钨(W)、锡(Sn)、锌(Zn)、镍(Ni)、钾(K)、锂(Li)、铁(Fe)、钯(Pd)、铂(Pt)、铷(Rb)、铬(Cr)和锶(Sr)。

[0058] 第二元素可包括至少一种选自以下的元素:镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钷(Pm)、钷(Sm)、镱(Lu)、钇(Y)、钕(Nd)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、钍(Th)、钙(Ca)、钪(Sc)、钡(Ba)、镱(Yb)、锶(Sr)、铕(Eu)、锆(Zr)、锂(Li)、铪(Hf)、镁(Mg)、磷(P)、砷(As)、钨(W)、金(Au)、钷(Pu)、镓(Ga)、锗(Ge)、铝(Al)、锌(Zn)、锑(Sb)、硅(Si)、锡(Sn)、钛(Ti)、镉(Cd)、铟(In)、铂(Pt)、铑(Rh)、铱(Ir)、铀(U)、镍(Ni)、钌(Ru)、锝(Tc)、锰(Mn)、钴(Co)、钽(Ta)、铌(Nb)、锇(Os)、钒(V)、铁(Fe)、铬(Cr)、铼(Re)、钼(Mo)、银(Ag)、钨(W)、铍(Be)、硼(B)、铜(Cu)和汞(Hg)。

[0059] 第一和/或第二元素可具有高氧化潜力,例如,铜、钛、钌、铈、铈、钾、钠、镍、铋、锡、钡、锗、锂、锶、镁、铍、铅、钙、钼、钨、钽、铟、硅、镓、铁、锆、铬、硼、锰、铝、镧、钕、铈、钒、钇和/或铈。

[0060] 在另一实施方案中,可以约30-约99重量%(重量%)、约0.1-约20重量%(重量%)和约0.9-约69.9重量%(重量%)的量包括金属玻璃,基于总重量。

[0061] 金属玻璃包括合金,该合金包括两种或更多种元素,具有无序的原子结构。金属玻璃可为无定形金属。金属玻璃可具有约50-约100重量%(“重量%”),特别是约70-约100重量%,更特别是约90-约100重量%无定形含量,基于金属玻璃的总重量。在另一实施方案中,金属玻璃可基本为无定形的。

[0062] 如果金属粉末材料60包括铝(Al),则金属玻璃还可包括至少一种选自以下的元素:钯(Pd)、锆(Zr)、铂(Pt)、钍(Th)、钷(Pm)、钆(Gd)、铽(Tb)、镱(Lu)、铪(Hf)、钪(Sc)、钇(Y)、镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Sm)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、钷(Pu)、铑(Rh)、钛(Ti)、铱(Ir)、铀(U)、镍(Ni)、金(Au)、钌(Ru)、钙(Ca)、锝(Tc)、钡(Ba)、镱(Yb)、锰(Mn)、钴(Co)、铕(Eu)、钽(Ta)、锶(Sr)、铌(Nb)、锇(Os)、钒(V)、磷(P)、铁(Fe)、铬(Cr)、铼(Re)、砷(As)、钼(Mo)、锂(Li)、银(Ag)、镁(Mg)、硅(Si)、锗(Ge)、钨(W)或铜(Cu)。

[0063] 如果金属粉末材料60包括铜(Cu)和锆(Zr),则金属玻璃还可包括至少一种选自以下的元素:铝(Al)、银(Ag)、镍(Ni)、钛(Ti)、铁(Fe)、钯(Pd)和铪(Hf)。可以约10原子%(原子%)或更少的量包括至少一种选自铝(Al)、银(Ag)、镍(Ni)、钛(Ti)、铁(Fe)、钯(Pd)和铪(Hf)的元素,基于金属玻璃的总量。

[0064] 在使用金属玻璃的另一实施方案中,可利用氦,因为其最有导热性气体,比氩高约一个数量级。虽然辐射通常为最重要的冷却影响,但当材料极热时,对流起到重要的作用。因此,为了增强快速固化的材料的生产,利用基本包含氦的气氛。在一个实施方案中,生产气氛包含至少30、40、50、60、70、80、90%或更多的氦。在另一实施方案中,气氛包含氦和氩。在另一实施方案中,使用气体气氛和减压的组合。在此情境下,单独使用或与一种或多种另外的气体组合使用减压的氦气氛。在另一实施方案中,在生产期间,通过热冷冻或冷却构造平台或板来提高冷却速率。

[0065] 对于基于铁的金属玻璃,可使用的基于铁的形成玻璃的合金包括以下、基本上由以下组成或由以下组成:约 45-70 原子%(原子%) Fe、10-30 原子% Ni、0-15 原子% Co、7-25 原子% B、0-6 原子% C 和 0-2 原子% Si。例如,铁的含量可为 45、46、47、48、49、50、51、52、53、54、55、56、57、58、59、60、61、62、63、64、65、66、67、68、69 和 70 原子%。镍的含量可为 10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21、22、23、24、25、26、27、28、29 和 30 原子%。钴的含量可为 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14 和 15 原子%。硼的含量可为 7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21、22、23、24 和 25 原子%。碳的含量可为 0、1、2、3、4、5 和 6 原子%。硅的含量可为 0、1 和 2 原子%。形成玻璃的化学物质可呈现小于 100,000 K/s 的用于金属玻璃形成的临界冷却速率,包括  $10^3$  K/s- $10^5$  K/s 范围内的所有值和增量。临界冷却速率可理解为提供合金组合物内玻璃状部分形成的冷却速率。基于铁的形成玻璃的合金可导致可能主要由金属玻璃组成的结构。也就是至少 50% 或更多的金属结构可为玻璃状,包括 50%-99% 范围内的所有值和增量,以 1.0% 为增量。因此,可认识到,在接近原子尺度上可存在很少有序,即,可出现的任何有序可小于 50 nm。在另一个实例中,基于铁的合金可呈现包括金属玻璃和晶体相、基本上由金属玻璃和晶体相组成或由金属玻璃和晶体相组成的结构,其中晶体相的尺寸可小于 500 nm,包括约 1 nm-约 500 nm 中的所有值和增量,以 1 nm 为增量。

[0066] 在一些实例中,合金可包括以下、基本上由以下组成或由以下组成:以 46 原子%-69 原子% 存在的铁;以 12 原子%-27 原子% 存在的镍;任选的钴,如果存在,可以 2 原子%-15 原子% 存在;以 12 原子%-16 原子% 存在的硼;任选的碳,如果存在,可以 4 原子%-5 原子% 存在;任选的硅,如果存在,可以 0.4 原子%-0.5 原子% 存在。可理解的是,合金可包括 100 原子% 的以上合金元素,并且杂质可以 0.1 原子%-5.0 原子% 存在,包括其中的所有值和增量。可通过原料组合物、处理设备、在加工期间与环境的反应性等以及其它机制,引入杂质。

[0067] 可通过熔融一种或多种可包括单个元素或元素组合的原料组合物生产合金。原料可作为粉末材料或其它形式提供。原料可通过射频 (rf) 感应、电弧炉、等离子体电弧炉或使用屏蔽气体(例如,氩气或氦气)的其它炉或设备来熔融。一旦原料已熔融,它们可形成在惰性气体环境中屏蔽的锭。锭可翻转(flipped)和再熔融,以提高和/或改进均匀性。合金可随后熔融旋出成为宽度最多约 1.25 mm 的带。熔融旋出可在例如 5-25 米/秒的切向速度下实施,包括其中的所有值和增量。带的厚度可为 0.02 mm-0.15 mm,包括其中的所有值和增量。同样可使用其它方法,例如,双辊铸造或能以 100,000 K/s 或更低的速率冷却合金的其它相对快速的冷却过程。

[0068] 以上合金可呈现 7.70 克/立方厘米-7.89 克/立方厘米,±0.01 克/立方厘米的密度,包括其中的所有值和增量。此外,合金可呈现一种或多种 410°C-500°C 的玻璃至晶体转变温度,包括其中的所有值和增量,使用 DSC(差示扫描量热计),以 10°C/分钟的速率测量。玻璃到晶体的转变温度可理解为其中晶体结构开始形成并且从玻璃状合金长出的温度。第一起点玻璃至晶体转变温度可为 415°C-474°C,第二起点玻璃至晶体转变温度可为 450°C-488°C,包括其中的所有值和增量,同样通过 DSC 以 10°C/分钟的速率测量。第一峰玻璃至晶体转变温度可为 425°C-479°C,第二峰玻璃至晶体转变温度可为 454°C-494°C,包括其中的所有值和增量,同样通过 DSC 以 10°C/分钟的速率测量。此外,转变的焓可为 -40.6

J/g 至 -210 J/g, 包括其中的所有值和增量。DSC 可在惰性气体例如高纯度氩气下实施, 以防止样品氧化。

[0069] 此外, 以上合金可呈现 1060°C -1120°C 的初始熔融温度, 熔融温度可理解为在合金的状态从固体变为液体时的温度。合金可呈现 1062°C -1093°C 的第一起点熔融温度, 1073°C -1105°C 的第二起点熔融温度, 包括其中的所有值和增量。

[0070] 在另一实施方案中, 基于铁的形成玻璃的合金可导致呈现 119-134 Gpa 的杨氏模量的结构, 包括其中的所有值和增量。杨氏模量可理解为单位应力与单位应变的比率, 在材料的拉伸或压缩的比例极限内。合金也可呈现大于 1 Gpa 的极限或破坏强度, 例如, 1 Gpa-5 GPa, 例如, 2.7 GPa-4.20 GPa, 包括其中的所有值和增量。破坏强度可理解为最大应力值。合金可呈现 0.5% 或更大的弹性应变, 包括 0.5-4.0% 内的所有值和增量。

[0071] 实施例. 使用脉冲激光束和粉末床激光熔融设备。

[0072] 实施例 1. 非脉冲铝样品

在用于形成和巩固 6061 铝合金粉末材料的方法中, 恒波 (CW) 激光束系统与粉末床激光熔融设备一起使用。

[0073] 配备连续波 (CW) 激光束系统的 EOSINT M270 激光烧结 (DMLS) 机器 (EOS GmbH, Munich, DE) 用于选择性和快速熔融和固化在通常称为粉末床的设备中布置的一定量的铝合金粉末材料。

[0074] 激光功率水平设定为 165 W, 设定以产生在实施例 2 (以下) 的脉冲激光中测量的相同功率。扫描速度 (影线速度) 设定为 500 mm/s。影线间距设定为 0.08 mm。

[0075] 该程序的结果在图 2 的顶部图像中表示, 由该图像可见最终产品含有显著的和 (就本发明的目的而言) 不可接受量的微裂纹。

[0076] 实施例 2. 脉冲铝样品 #1

移除在实施例 1 中使用的原始激光来源, 并且用 400 瓦, GSI JK400FL 镜纤维激光 (GSI Group, Bedford MA) 代替。

[0077] 操作纤维激光, 以产生脉冲波激光束, 以选择性和快速熔合在粉末床中布置的一定量的铝合金粉末材料。

[0078] 激光峰功率 ( $P_0$ ) 设定为 400 W。扫描速度设定为 500 mm/s。影线间距设定为 0.08 mm。工作周期 (D) 为 0.51, 平均功率 ( $P_{avg}$ ) 为约 204 W, 基于 30 kHz 的脉冲频率和 17  $\mu$ s 的脉冲宽度。总体能量密度为约 5.1 J/mm<sup>2</sup>。该程序的结果在图 2 的中间图像中表示, 由该图像可见, 比起实施例 1, 最终产品含有显著较少的微裂纹, 但是对于本发明的优选实施方案, 仍认为微裂纹的水平过多。

[0079] 实施例 3. 脉冲铝样品 #2

操作在实施例 2 中使用的纤维激光, 以产生脉冲波激光束, 以选择性和快速熔合在粉末床中布置的一定量的铝合金粉末材料。

[0080] 激光峰功率 ( $P_0$ ) 设定为 500 W。扫描速度设定为 100 mm/s。影线间距设定为 0.06 mm。工作周期 (D) 为 0.5625, 平均功率 ( $P_{avg}$ ) 为约 281 W, 基于 22.5 kHz 的脉冲频率和 25  $\mu$ s 的脉冲宽度。总体能量密度为约 47 J/mm<sup>2</sup>。该程序的结果在图 2 的底部图像中表示, 根据本发明的一个优选的方面, 由该图像可见最终产品基本不含微裂纹。虽然在图 2 中底部

图像标记为“优化的”，但这样的描述仅用于识别在该非限制性实验内的特定样品。

[0081] 基于该研究，推断通过脉冲-激光熔融 Al6061 粉末材料和其它铝合金用于形成物体的特别合适的总体能量密度可为约 20- 约 60 J/mm<sup>2</sup>。此外，推断平均功率 ( $P_{avg}$ ) 特别合适的范围为约 280-350 W，工作周期 (D) 特别合适的范围为约 0.5-0.7，扫描速度 (v) 特别合适的范围为约 100-200 mm/s，特别合适的影线间距 (s) 为约 0.06 mm。这样的工作周期范围可例如使用具有约 25-35 微秒的脉冲宽度和约 22.5 kHz 的脉冲频率的脉冲激光束实现。

[0082] 还基于该研究，推断通过脉冲-激光熔融基于铝的粉末材料以外的粉末材料用于形成物体的特别合适的总体能量密度不同于以上公开的那些。例如，预期对基于铝的粉末材料以外的材料的总体能量密度和工作周期的范围高于或低于铝及其合金的那些范围，取决于多种因素，例如熔点。对于某些粉末材料，我们认为总体能量密度可为 0.1-50 J/mm<sup>2</sup>，例如，在 0.2-25 J/mm<sup>2</sup> 范围，或在 0.3-15 J/mm<sup>2</sup> 范围，或在 0.3-8 J/mm<sup>2</sup> 范围。在另一方面，较高的总体能量密度可特别适用于由具有比铝及其合金更高熔点的材料形成的粉末。

[0083] 本文引用的所有出版物、专利和专利申请（无论在前或在后）通过引用而全文结合到本文中，达到每一个单独的出版物、专利或专利申请通过引用结合而具体和分别地说明的相同程度。应认识到，所称通过引用结合到本文中的任何专利、出版物或其它公开材料以全部或部分结合到本文中，仅达到结合的材料不会与现有的定义、陈述或在本公开中描述的其它公开材料冲突的程度。因此，并且在所需的程度上，本文明确描述的公开代替通过引用结合到本文中的任何冲突的材料。所称通过引用结合到本文中，但是与现有的定义、陈述或在本公开中描述的其它公开材料冲突的任何材料或它们的各部分仅在结合的材料与现有的公开材料之间不出现冲突的程度上结合。

[0084] 必须注意到，除非内容明确指示另外的情况，否则在本说明书和所附权利要求中使用的单数形式“一个”、“一”和“该”包括复数对象。

[0085] 除非另外定义，否则本文使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属领域普通技术人员通常理解的相同的含义。虽然与本文描述的那些类似或等价的多种方法和材料可用于本发明的实践，但本文描述了优选的材料和方法。

[0086] 如本领域普通技术人员理解的，本发明的方法和组合物大大降低或消除与现有技术方法和组合物相关的缺点和不足。

[0087] 应注意到，当在本公开中采用术语“包含 (comprises)”、“包含 (comprising)”和来自根术语“包含 (comprise)”的其它衍生词时，旨在为开放式术语，指定存在任何所描述的特征、元素、整数、步骤或组分，并且不旨在排除存在或加入一个或多个其它特征、元素、整数、步骤、组分或它们的组。

[0088] 如所需的，本文公开了本发明的详细实施方案；然而，应理解的是，所公开的实施方案仅用于举例说明本发明，其可以各种形式体现。例如，作为使用激光辐射作为电磁辐射的备选，可使用粒子辐射，例如电子辐射。此外，代替单一激光设备，可使用两种或更多种激光源。因此，本文公开的具体的结构和功能细节不应解释为限制性的，而仅作为权利要求的基础，并且作为教导本领域技术人员按实质上任何适当的详细结构不同地运用本发明的代表性基础。

[0089] 虽然显然本文公开的本发明的说明性实施方案实现以上陈述的方面，但认识到本

领域普通技术人员可以想到很多修改和其它实施方案。因此,应理解的是,所附权利要求旨在涵盖在本发明的精神和范围内的所有这些修改和实施方案。

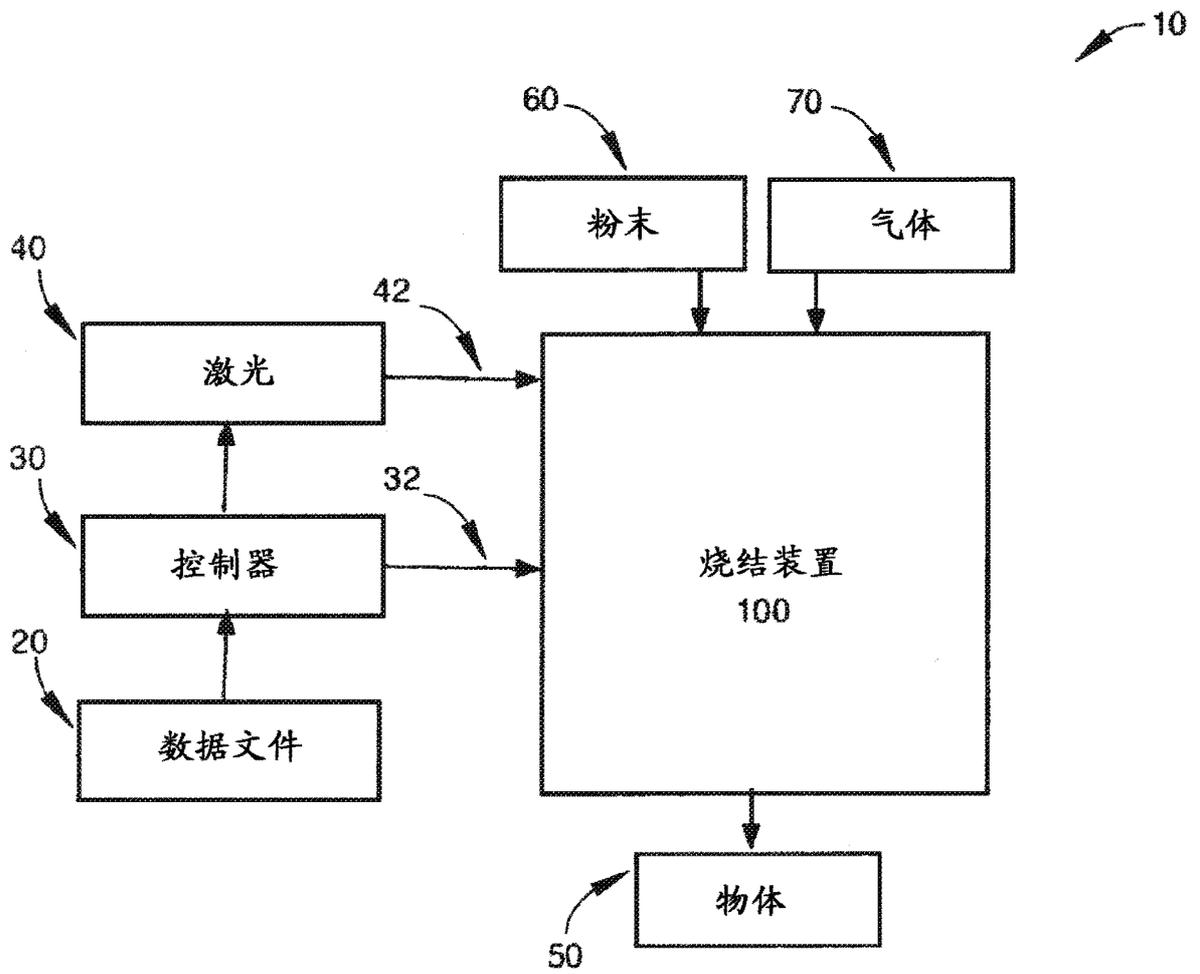


图 1

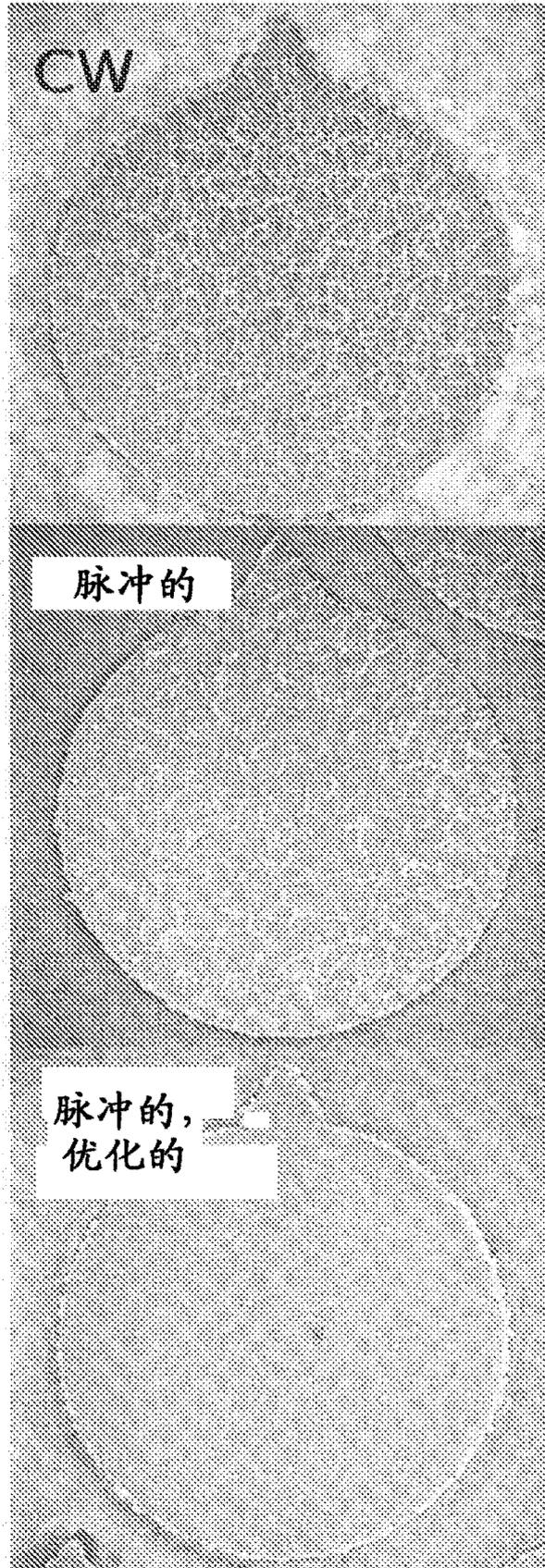


图 2