



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 111761819 A

(43) 申请公布日 2020. 10. 13

(21) 申请号 202010645174.9

B33Y 50/00 (2015.01)

(22) 申请日 2020.07.07

B33Y 10/00 (2015.01)

(71) 申请人 南京理工大学

地址 210014 江苏省南京市玄武区孝陵卫  
街道孝陵卫街200号

(72) 发明人 刘婷婷 邹志永 廖文和 张凯  
陈香媛 熊志伟 顾明飞 张玲  
王新禹

(74) 专利代理机构 南京钟山专利代理有限公司  
32252

代理人 陈月菊

(51) Int. Cl.

B29C 64/153 (2017.01)

B29C 64/386 (2017.01)

B22F 3/105 (2006.01)

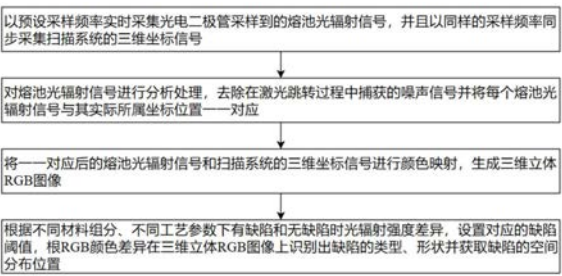
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,包括:以预设采样频率实时采集光电二极管采样到的熔池光辐射信号和扫描系统的三维坐标信号;去除在激光跳转过程中捕获的噪声信号并将每个熔池光辐射信号与其实际所属坐标位置一一对应;将一一对应后的熔池光辐射信号和扫描系统的三维坐标信号进行颜色映射,生成三维立体RGB图像;根据不同材料组分、不同工艺参数下有缺陷和无缺陷时光辐射强度差异,在三维立体RGB图像上识别出缺陷的类型、形状并获取缺陷的空间分布位置。本发明能够监测复杂形状零件打印过程的在线监测技术,实现制造过程与监测过程的结合,便于操作人员及时发现缺陷和及时优化工艺参数,有效提高打印质量。



1. 一种激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,其特征在于,所述在线监测方法包括以下步骤:

S1,以预设采样频率实时采集光电二极管采样到的熔池光辐射信号,并且以同样的采样频率同步采集扫描系统的三维坐标信号;

S2,对熔池光辐射信号进行分析处理,去除在激光跳转过程中捕获的噪声信号并将每个熔池光辐射信号与其实际所属坐标位置一一对应;

S3,将一一对应后的熔池光辐射信号和扫描系统的三维坐标信号进行颜色映射,生成三维立体RGB图像;

S4,根据不同材料组分、不同工艺参数下有缺陷和无缺陷时光辐射强度差异,设置对应的缺陷阈值,根据RGB颜色差异在三维立体RGB图像上识别出缺陷的类型、形状并获取缺陷的空间分布位置。

2. 根据权利要求1所述的激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,其特征在于,步骤S1中,所述以预设采样频率实时采集光电二极管采样到的熔池光辐射信号包括以下步骤:

S11,利用光电二极管实时采集经衰减片和滤波片作用后的熔池辐射光信号,并使采集到的熔池辐射光信号在检测电路作用下转化为对应的模拟电压信号;

S12,采用数据采集卡以预设采样频率实时采集光电二极管输出的模拟电压信号并存储。

3. 根据权利要求2所述的激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,其特征在于,步骤S11中,采用下述公式将采集到的熔池辐射光信号转换成对应的模拟电压信号:

$$V_{\text{out}} = \int_{830}^{960} T(\lambda)R(\lambda)R(f)\phi(\lambda)d\lambda$$

式中, $T(\lambda)$ 为衰减片和滤波片的光谱透过率; $R(\lambda)$ 为光电二极管光谱响应率; $R(f)$ 是反馈电阻; $\phi(\lambda)$ 为熔池光谱辐射通量。

4. 根据权利要求1所述的激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,其特征在于,所述预设采样频率的取值范围为10kHz-100kHz。

5. 根据权利要求1所述的激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,其特征在于,所述预设采样频率 $f$ 满足以下公式:

$$f > \frac{V_{\text{scan}}}{W_{\text{seam}}}$$

式中: $V_{\text{scan}}$ 为陶瓷SLM激光扫描速度, $W_{\text{seam}}$ 为激光光斑直径。

6. 根据权利要求1所述的激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,其特征在于,步骤S1中,采用振镜控制卡以同样的采样频率同步采集扫描系统的三维坐标信号。

7. 根据权利要求1所述的激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,其特征在于,步骤S2中,所述对熔池光辐射信号进行分析处理,去除在激光跳转过程中捕获的噪声信号并将每个熔池光辐射信号与其实际所属坐标位置一一对应的过程包括以下步骤:

S21,建立对应材料激光扫描过程中熔池光强的参考值,设置用于区别激光出光与不出光的熔池光强的阈值 $n$ ;

S22,依据阈值 $n$ ,在采集到的光辐射数据中找出每条熔道 $t$ 的起始光强信号,并确定每

条熔道 $t$ 的起始光强信号与第一条熔道起始光强的间隔数量 $d_t$ ;

S23, 计算出后一条熔道的 $d_{t+1}$ 与前一条熔道的 $d_t$ 的差值 $m_t = d_{t+1} - d_t$ , 得到每条熔道 $t$ 采集到的所有光辐射信号数量 $m_t$ ;

S24, 设置激光在两条熔道之间跳转时跳转距离的阈值 $N$ , 计算所有相邻两点的距离, 大于 $N$ 的点为每条熔道 $t$ 振镜坐标的起始点, 并确定每条熔道 $t$ 的起始坐标与第一条熔道起始坐标的间隔数量 $D_t$ ;

S25, 计算出后一条熔道的 $D_{t+1}$ 与前一条熔道的 $D_t$ 的差值 $M_t = D_{t+1} - D_t$ , 得到每条熔道 $t$ 采集到的坐标信号数量 $M_t$ ;

S26, 计算每条熔道 $t$ 采集到的所有光辐射信号数量 $m_t$ 与每条熔道 $t$ 采集到的坐标信号数量 $M_t$ 的差值 $R_t = m_t - M_t$ , 将其作为在激光跳转过程中每条熔道多采集的光辐射信号数量;

S27, 结合每条熔道光辐射起始点和坐标起始点以及每条熔道光辐射信号比坐标信号多采集的数量, 从第一条熔道光辐射起始点与坐标信号起始点开始顺次对齐, 并省略掉每条熔道最后多余的光辐射数量 $R_t$ , 将光辐射信号与所属坐标位置一一对应。

8. 根据权利要求1所述的激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法, 其特征在于, 步骤S4中, 所述根据不同材料组分、不同工艺参数下有缺陷和无缺陷时光辐射强度差异, 设置对应的缺陷阈值的过程包括以下步骤:

计算出一层之中监测到的光辐射强度的平均值与标准差, 根据标准差设置缺陷阈值, 将与平均值之间的偏差大于缺陷阈值的数据定义为有缺陷的异常值。

9. 根据权利要求8所述的激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法, 其特征在于, 所述缺陷阈值为 $\pm 5$ 个标准差。

## 一种激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及增材制造技术领域,具体而言涉及一种激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法。

### 背景技术

[0002] 增材制造又称3D打印,融合了计算机辅助设计、材料加工与成形技术,以数字模型文件为基础,通过软件与数控系统将专用的金属材料、非金属材料以及医用生物材料,按照挤压、烧结、熔融、光固化、喷射等方式逐层堆积,制造出实体物品的制造技术。与传统的机加工等“减材制造”技术相比,增材制造技术具有无需刀具和模具、材料利用率高、产品制造周期短、可实现复杂结构的制造等优势,尤其适合于飞机、飞船、导弹、卫星等航空航天国防装备大型复杂金属结构件的低成本、短周期、快速成形制造。

[0003] 然而,作为一项新兴制造技术,增材制造带来一系列优势的同时,也存在一些问题亟待解决。如,在增材制造过程中,容易出现球化、孔隙、裂纹、翘曲变形等缺陷,造成成形件力学性能降低,严重制约增材制造技术的发展。因此,打印件内部质量和内应力的控制问题是增材制造技术面临的一大挑战,亟需开展成形件缺陷在线监测研究。目前应用较多的监测技术包括CT检测、传统的超声检测以及涡流检测等。然而,这些传统的离线检测手段对成形后的铸件、锻件检测具有良好的效果,但增材制造成形原理和传统制造方式不同,由于无法及时发现缺陷,原材料以及加工工艺参数等都有可能大量废品的产生带来严重浪费,这促进了增材制造在线监测技术的研究。专利号为CN108509665A中提及了一种光电二极管检测的熔池光强数据场建模方法,但其中并未涉及适于任意扫描方式的具有复杂形状的熔融成形件缺陷的在线监测方式。

### 发明内容

[0004] 本发明针对现有技术中的不足,提供一种激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,能够监测复杂形状零件打印过程的在线监测技术,实现制造过程与监测过程的结合,便于操作人员及时发现缺陷和及时优化工艺参数,有效提高打印质量。

[0005] 为实现上述目的,本发明采用以下技术方案:

[0006] 一种激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,所述在线监测方法包括以下步骤:

[0007] S1,以预设采样频率实时采集光电二极管采样到的熔池光辐射信号,并且以同样的采样频率同步采集扫描系统的三维坐标信号;

[0008] S2,对熔池光辐射信号进行分析处理,去除在激光跳转过程中捕获的噪声信号并将每个熔池光辐射信号与其实际所属坐标位置一一对应;

[0009] S3,将一一对应后的熔池光辐射信号和扫描系统的三维坐标信号进行颜色映射,生成三维立体RGB图像;

[0010] S4,根据不同材料组分、不同工艺参数下有缺陷和无缺陷时光辐射强度差异,设置

对应的缺陷阈值,根据RGB颜色差异在三维立体RGB图像上识别出缺陷的类型、形状并获取缺陷的空间分布位置。

[0011] 为优化上述技术方案,采取的具体措施还包括:

[0012] 进一步地,步骤S1中,所述以预设采样频率实时采集光电二极管采样到的熔池光辐射信号包括以下步骤:

[0013] S11,利用光电二极管实时采集经衰减片和滤波片作用后的熔池辐射光信号,并使采集到的熔池辐射光信号在检测电路作用下转化为对应的模拟电压信号;

[0014] S12,采用数据采集卡以预设采样频率实时采集光电二极管输出的模拟电压信号并存储。

[0015] 进一步地,步骤S11中,采用下述公式将采集到的熔池辐射光信号转换成对应的模拟电压信号:

$$[0016] \quad V_{out} = \int_{830}^{960} T(\lambda)R(\lambda)R(f)\phi(\lambda)d\lambda$$

[0017] 式中, $T(\lambda)$ 为衰减片和滤波片的光谱透过率; $R(\lambda)$ 为光电二极管光谱响应率; $R(f)$ 是反馈电阻; $\phi(\lambda)$ 为熔池光谱辐射通量。

[0018] 进一步地,所述预设采样频率的取值范围为10kHz-100kHz。

[0019] 进一步地,所述预设采样频率 $f$ 满足以下公式:

$$[0020] \quad f > \frac{V_{scan}}{W_{seam}}$$

[0021] 式中: $V_{scan}$ 为陶瓷SLM激光扫描速度, $W_{seam}$ 为激光光斑直径。

[0022] 进一步地,步骤S1中,采用振镜控制卡以同样的采样频率同步采集扫描系统的三维坐标信号。

[0023] 进一步地,步骤S2中,所述对熔池光辐射信号进行分析处理,去除在激光跳转过程中捕获的噪声信号并将每个熔池光辐射信号与其实际所属坐标位置一一对应的过程包括以下步骤:

[0024] S21,建立对应材料激光扫描过程中熔池光强的参考值,设置用于区别激光出光与不出光的熔池光强的阈值 $n$ ;

[0025] S22,依据阈值 $n$ ,在采集到的光辐射数据中找出每条熔道 $t$ 的起始光强信号,并确定每条熔道 $t$ 的起始光强信号与第一条熔道起始光强的间隔数量 $d_t$ ;

[0026] S23,计算出后一条熔道的 $d_{t+1}$ 与前一条熔道的 $d_t$ 的差值 $m_t = d_{t+1} - d_t$ ,得到每条熔道 $t$ 采集到的所有光辐射信号数量 $m_t$ ;

[0027] S24,设置激光在两条熔道之间跳转时跳转距离的阈值 $N$ ,计算所有相邻两点的距离,大于 $N$ 的点为每条熔道 $t$ 振镜坐标的起始点,并确定每条熔道 $t$ 的起始坐标与第一条熔道起始坐标的间隔数量 $D_t$ ;

[0028] S25,计算出后一条熔道的 $D_{t+1}$ 与前一条熔道的 $D_t$ 的差值 $M_t = D_{t+1} - D_t$ ,得到每条熔道 $t$ 采集到的坐标信号数量 $M_t$ ;

[0029] S26,计算每条熔道 $t$ 采集到的所有光辐射信号数量 $m_t$ 与每条熔道 $t$ 采集到的坐标信号数量 $M_t$ 的差值 $R_t = m_t - M_t$ ,将其作为在激光跳转过程中每条熔道多采集的光辐射信号数量;

[0030] S27,结合每条熔道光辐射起始点和坐标起始点以及每条熔道光辐射信号比坐标信号多采集的数量,从第一条熔道光辐射起始点与坐标信号起始点开始顺次对齐,并省略掉每条熔道最后多余的光辐射数量 $R_t$ ,将光辐射信号与所属坐标位置一一对应。

[0031] 进一步地,步骤S4中,所述根据不同材料组分、不同工艺参数下有缺陷和无缺陷时光辐射强度差异,设置对应的缺陷阈值的过程包括以下步骤:

[0032] 计算出一层之中监测到的光辐射强度的平均值与标准差,根据标准差设置缺陷阈值,将与平均值之间的偏差大于缺陷阈值的数据定义为有缺陷的异常值。

[0033] 进一步地,所述缺陷阈值为 $\pm 5$ 个标准差。

[0034] 本发明的有益效果是:

[0035] (1) 利用光电二极管和RTC5振镜控制卡以相同的采样频率同时采集了熔池光辐射强度信号以及扫描系统x、y、z坐标位置,将熔池光辐射强度信号进行分析处理后,与x、y、z坐标位置一一对应进行“颜色映射”,能够监测复杂形状、以任意扫描方式打印零件的过程。

[0036] (2) 基于激光扫描速度和激光光斑直径,合理设置采样频率,提高监测精度。

[0037] (3) 相比于激光超声、高速相机等在线监测技术,成本低、效率高、可靠性好。

## 附图说明

[0038] 图1是本发明的激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法的流程图。

[0039] 图2为基于光电二极管的熔池光辐射过程监控系统原理图。

[0040] 图3为在基板上测试的打印效果图。

[0041] 图4为在基板上测试时对应的RGB监测效果图。

[0042] 图5为 $Al_2O_3$ 、 $Zr_2O_3$ 粉末SEM图。

[0043] 图6为采用SLM工艺打印的零件实物图。

[0044] 图7为监测零件打印时数据可视化的RGB三维效果图。

## 具体实施方式

[0045] 现在结合附图对本发明作进一步详细的说明。

[0046] 需要注意的是,发明中所引用的如“上”、“下”、“左”、“右”、“前”、“后”等的用语,亦仅为便于叙述的明了,而非用以限定本发明可实施的范围,其相对关系的改变或调整,在无实质变更技术内容下,当亦视为本发明可实施的范畴。

[0047] 具体实施例一

[0048] 结合图1,本发明提及一种激光粉末床熔融成形件缺陷在线监测方法,所述在线监测方法包括以下步骤:

[0049] S1,以预设采样频率实时采集光电二极管采样到的熔池光辐射信号,并且以同样的采样频率同步采集扫描系统的三维坐标信号。

[0050] S2,对熔池光辐射信号进行分析处理,去除在激光跳转过程中捕获的噪声信号并将每个熔池光辐射信号与其实际所属坐标位置一一对应。

[0051] S3,将一一对应后的熔池光辐射信号和扫描系统的三维坐标信号进行颜色映射,生成三维立体RGB图像。

[0052] S4,根据不同材料组分、不同工艺参数下有缺陷和无缺陷时光辐射强度差异,设置

对应的缺陷阈值,根据RGB颜色差异在三维立体RGB图像上识别出缺陷的类型、形状并获取缺陷的空间分布位置。

[0053] 本发明提及的监测方法是与实际打印过程同步进行的,以此达到最佳监测效果,图2为基于光电二极管的熔池光辐射过程监控系统原理图。基于所述监控系统原理图,具体的,本发明的在线监测方法包括以下步骤:

[0054] (1) 激光束作用于基板,将粉末材料熔化形成熔池,熔池发出的光辐射经过衰减片和滤波片的作用后进入光电二极管,利用光电二极管检测电路将采集到的光辐射信号转化为电压信号。

[0055] (2) 设置数据采集卡采样频率,实时采集光电二极管输出的电压信号并存储。

[0056] 本实施方式中,综合考虑数据采集卡的采样性能及监测精度,采样频率设置为10kHz。

[0057] (3) 利用振镜控制卡以相同的采样频率实时采集扫描系统的x、y、z位置坐标并存储。

[0058] 本实施方式中,振镜及激光振镜控制卡采用德国SCANLAB生产的intelliscan20型号振镜及RTC5激光振镜控制卡。采样频率设置为10kHz。

[0059] (4) 提出一种数据处理算法对光辐射数据进行分析 and 处理,以去除在激光跳转过程中捕获的噪声信号并把每个光辐射信号与其实际对应的坐标位置一一对应。

[0060] 本实施方式中,数据处理算法的具体步骤为:

[0061] a):建立对应材料激光扫描过程中熔池光强的参考值,设置激光出光与不出光时熔池光强的阈值n。

[0062] b):依据阈值n,在采集到的光辐射数据中找出每条熔道t的起始光强信号,并确定每条熔道t的起始光强信号与第一条熔道起始光强的间隔数量 $d_t$ 。

[0063] c):计算出后一条熔道的 $d_{t+1}$ 与前一条熔道的 $d_t$ 的差值 $m_t = d_{t+1} - d_t$ ,得到每条熔道t采集到的所有光辐射信号数量 $m_t$ 。

[0064] d):激光在两条熔道之间跳转时,采集到的相邻两点的距离会瞬间增大,由此设置跳转距离的阈值N,计算所有相邻两点的距离,大于N的点为每条熔道t振镜坐标的起始点,并确定每条熔道t的起始坐标与第一条熔道起始坐标的间隔数量 $D_t$ 。

[0065] e):计算出后一条熔道的 $D_{t+1}$ 与前一条熔道的 $D_t$ 的差值 $M_t = D_{t+1} - D_t$ ,得到每条熔道t采集到的坐标信号数量 $M_t$ 。

[0066] f):每条熔道t采集到的所有光辐射信号数量 $m_t$ 与每条熔道t采集到的坐标信号数量 $M_t$ 的差值 $R_t = m_t - M_t$ 为在激光跳转过程中每条熔道多采集的光辐射信号数量。

[0067] g):确定了每条熔道光辐射起始点和坐标起始点以及每条熔道光辐射信号比坐标信号多采集的数量后,从第一条熔道光辐射起始点与坐标信号起始点开始顺次对齐,并省略掉每条熔道最后多余的光辐射数量 $R_t$ ,即可把光辐射信号与书记对应的坐标位置一一对应。

[0068] (5) 将一一对应后的光辐射信号与扫描系统x、y、z坐标进行“颜色映射”,生成三维立体RGB图像。

[0069] 本实施方式中,编写一段“颜色映射”程序,将一一对应后的光辐射信号与采集到的扫描系统x、y、z坐标进行“颜色映射”,生成三维立体RGB图像。图5为Al2O3、Zr2O3粉末SEM

图。图6为采用SLM工艺打印的零件实物图。图7为监测零件打印时数据可视化的RGB三维效果图。

[0070] (6) 根据不同材料组分、不同工艺参数下有缺陷和无缺陷时光辐射强度大小的一般规律,设置阈值,根据RGB颜色差异在图像上识别出缺陷的类型、大小以及空间分布位置。

[0071] 本实施方式中,在打印完一层粉末后,计算出经过数据处理的光辐射强度的平均值及其标准差,将与平均值之间的偏差大于 $\pm 5$ 个标准差的数据定义为有缺陷的异常值,从而识别出缺陷形状、大小和空间分布位置。

[0072] 具体实施例二

[0073] 为了测试光电二极管熔池光辐射过程监测系统对复杂形状、以任意扫描方式打印的零件的监测效果,同时也为了证明新型数据处理方案以及新型“颜色映射”方案的正确性,首先在蓝色阳极氧化铝基板上进行了一次实验。首先使用激光束在蓝色阳极氧化铝基板上打印一条弧线充当缺陷,然后以90W激光功率,80mm/s的扫描速度,100 $\mu$ m的扫描间距在基板上覆盖弧线处的区域打印10mm $\times$ 10mm的五角星。在蓝色阳极氧化铝基板上打印的五角星效果图如图3所示;由光电二极管输出的电压信号和振镜输出的扫描系统x、y坐标信号进行图形可视化的RGB监测效果图如图4所示。

[0074] 本发明提出的SLM熔池光辐射过程监测系统及数据处理算法以及新型“颜色映射”方案,已经经过实施例实际验证,能够在线监测到复杂形状零件在增材制造过程中出现的翘曲变形以及大的孔隙和裂纹,经济高效,能够提高打印质量,具有应用价值

[0075] 以上仅是本发明的优选实施方式,本发明的保护范围并不仅局限于上述实施例,凡属于本发明思路下的技术方案均属于本发明的保护范围。应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理前提下的若干改进和润饰,应视为本发明的保护范围。

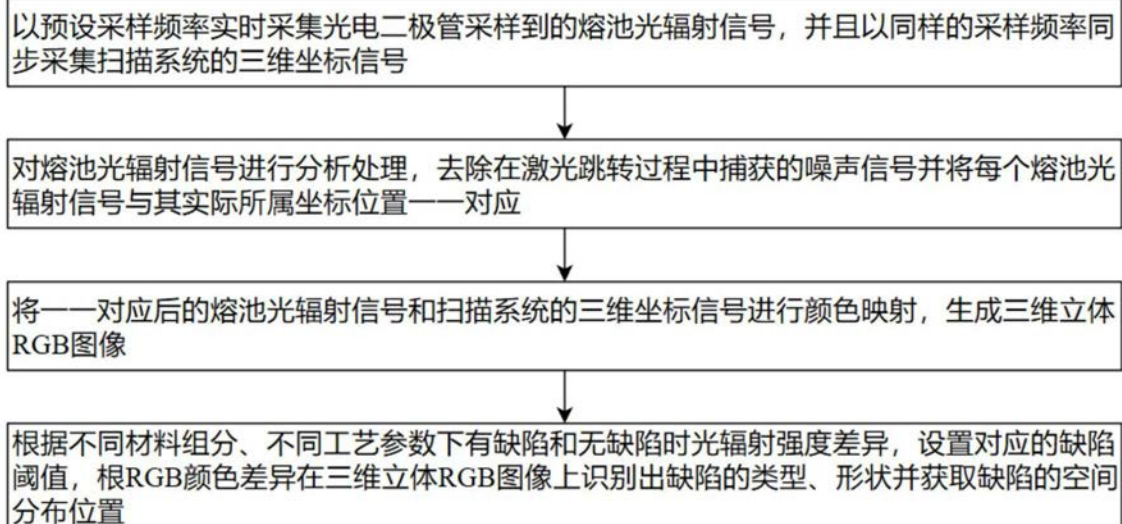


图1

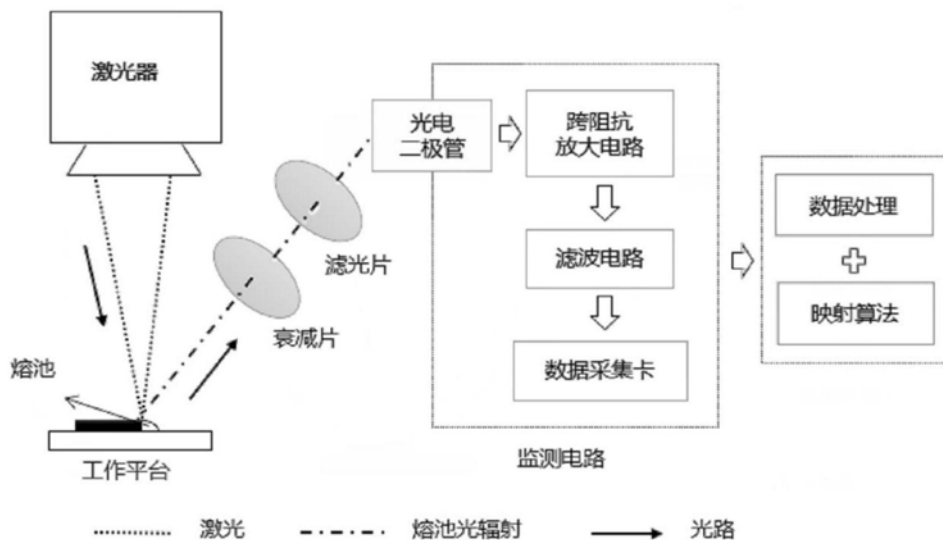


图2



图3

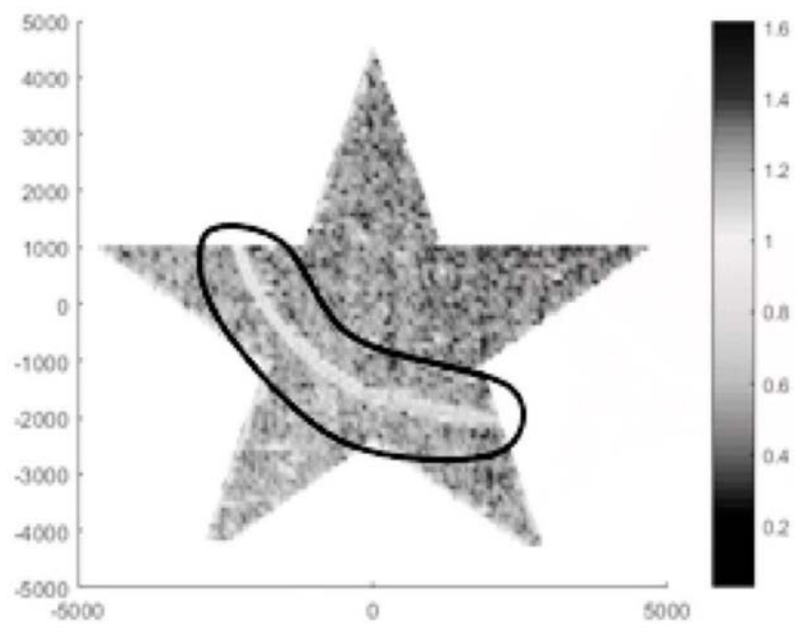


图4



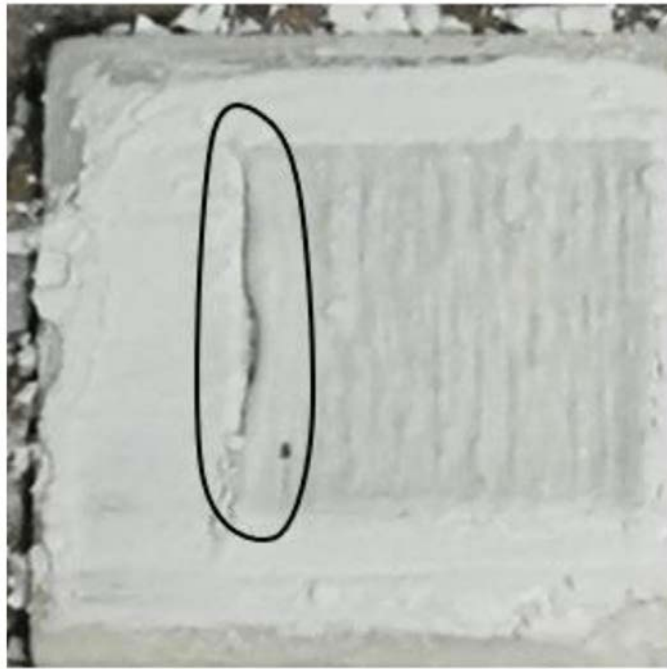


图6

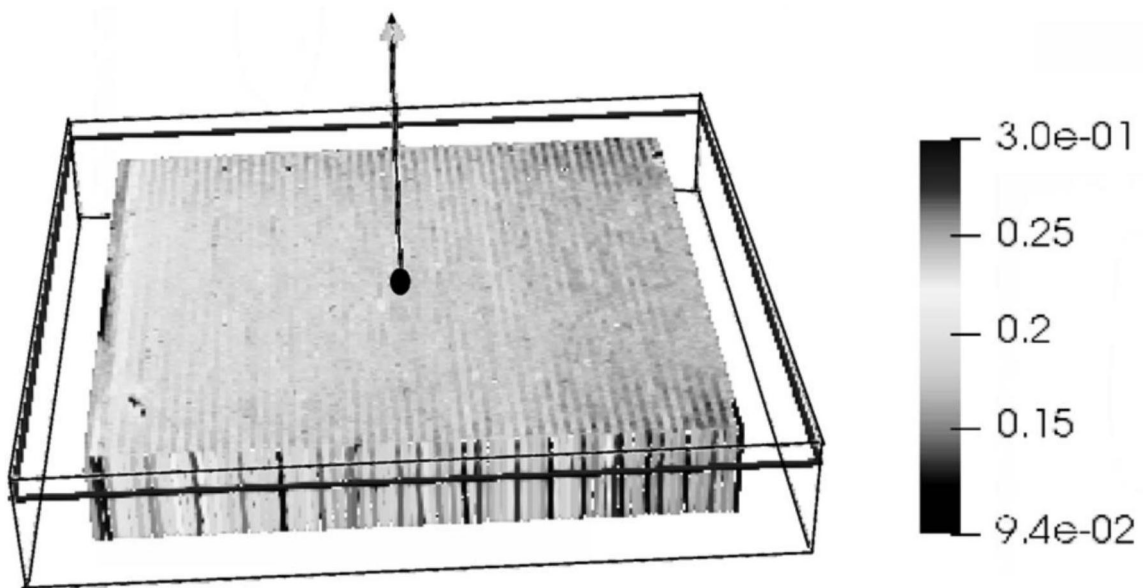


图7