

## 激光沉积制造翘曲变形检测与开裂预测研究

钦兰云<sup>1</sup>, 王昆<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 王向明<sup>2</sup>, 杨光<sup>1\*</sup><sup>1</sup>沈阳航空航天大学机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136;<sup>2</sup>中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035

**摘要** 翘曲变形与开裂是激光沉积制造大型整体结构的瓶颈,限制了该技术的发展。为解决这一难题,笔者基于表面形貌监测系统提出了一种翘曲变形原位检测及开裂预测新算法。通过坐标系校准、滤波降噪、曲面重构等实现了原位检测与数据预处理,采用旋转切片和平行切片两种方案求取切片与重构表面的交线,计算交线的翘曲角与翘曲角变化量,根据翘曲阈值与开裂阈值判定翘曲变形并预测开裂。设定的阈值与制件尺寸呈反比关系,与翘曲度呈正比关系。实验结果表明:翘曲样件 X 向的最大翘曲角为 3.98°,且该方向所有交线的翘曲角均超出了翘曲阈值(3.27°),判定发生翘曲变形;薄壁件开裂影响区内翘曲角的最大值在第 46~51 层呈连续正增长趋势,翘曲角变化量为 1.58°,且 80% 的交线的翘曲角变化量超出了开裂阈值(1.53°),判定即将发生开裂,继续沉积至第 55 层时出现开裂。通过实验证实了所提算法检测翘曲与预测开裂的有效性,对激光沉积制造技术的发展具有重要意义。

**关键词** 激光技术; 激光沉积制造; 翘曲检测; 开裂预测; 原位监测

中图分类号 TH164

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221501

## 1 引言

激光沉积制造(LDM)属于定向能量沉积(DED)中的一种。在激光沉积制造中,激光快速熔化金属粉末,熔融金属凝固后逐层堆积成高性能的近净成形零件。然而,随着金属材料的不断堆积,周围环境、激光焦点、沉积层与熔池之间的大温度梯度导致沉积系统中存在由不均匀加热和冷却产生的高水平残余应力,从而导致零件发生翘曲变形,甚至开裂<sup>[1-3]</sup>,严重影响了制件的成形精度,同时降低了制造效率,严重时直接导致零件报废,造成材料浪费和制造周期延长。因此,在激光沉积过程中对制件的翘曲变形进行检测反馈,从而对制件开裂进行预测,是加工过程高效高质量进行的保证。

鉴于此,各国学者在增材制造表面形貌检测<sup>[4-7]</sup>、几何缺陷控制<sup>[8-12]</sup>以及算法处理<sup>[12-14]</sup>等方面开展了广泛的研究工作。表面形貌检测通常采用双目/三目摄像机、激光位移传感器等非接触式检测设备。Biegler等<sup>[15]</sup>采用数字图像相关(DIC)技术原位测量了DED制件的变形,处理后的图像能够清晰地反映热输入和冷却导致的膨胀和收缩变形。谢瑞山等<sup>[16]</sup>通过DIC技术成功获得了零件在制造过程中的瞬态应变场,并发现应变累积会增大变形趋势。樊爽等<sup>[17]</sup>采用最小二乘拟合方法优化了DIC技术测量应变场的测量精度

和稳定性,使通过原位测量应变场来实时控制激光沉积制造应力和瞬态变形具有可行性。但摄像机的观测效果受保护气氛中粉尘的影响,且安装位置和观测范围受限,而三维扫描设备能够更好地采集表面形貌信息,对几何变化更敏感,因此,三维扫描设备比摄像机更适合检测几何变形。

本课题组在前期的研究中<sup>[8-9]</sup>已基于激光轮廓扫描仪实现了激光沉积制造表面不平整与熔化塌陷的闭环控制,通过扫描仪获取制件的表面形貌数据,对数据进行分层切片处理后提取缺陷区域,然后采用工艺参数调整与路径规划的方法主动补偿几何缺陷。陈乐群<sup>[12]</sup>和崔陆军等<sup>[18]</sup>通过机器学习算法提高了表面缺陷检测的准确性。鹿旭飞<sup>[19]</sup>和Heigel等<sup>[20]</sup>基于激光位移传感器获得了基板翘曲变形的演化过程,发现了翘曲变形的规律。祝子笛<sup>[21]</sup>采用位移传感器测量了基板在高度方向上的翘曲变形量,但只能监测一个固定点的位移波动。裂纹检测方法包括放射线检测、超声检测、位移传感、红外检测等,Tan等<sup>[22]</sup>采用激光位移传感器对薄壁件关键位置的位移波动进行了实时监测,虽能监测到制件开裂时的瞬间位移波动,但仍未实现开裂层数及位置的预测。孙玲玉等<sup>[23]</sup>基于光纤光栅传感阵列实现了铝合金服役过程中的疲劳裂纹预测,但尚未将其应用于制造过程。

综上所述,国内外在激光沉积制造几何缺陷检测

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-02-13; 录用日期: 2023-03-09; 网络首发日期: 2023-03-19

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0122600)、国家自然科学基金(51975387)

通信作者: \*yangguang@sau.edu.cn

与控制方面的研究尚不成熟,仍未实现开裂预测。笔者采用高速轮廓扫描仪原位监测制件的表面形貌,基于PCL点云库完成坐标转换、滤波、曲面重构等数据处理,通过切片组与重构表面交线的翘曲角判定翘曲变形,基于翘曲角的变化趋势及范围预测开裂时刻,实现了对角翘曲、X/Y向翘曲等常见翘曲变形的检测与开裂预测,对于激光沉积制造过程中的质量自动监测具有重要意义。

## 2 翘曲变形检测与开裂预测系统

翘曲变形检测与开裂预测系统是基于激光沉积制造系统搭建的,系统路线图如图1所示。采用基恩士公司生产的LJ-V7300型高速轮廓扫描仪监测制件的表面形貌,该扫描仪的重复测量精度可达 $5\ \mu\text{m}$ ,将其通过一个步进电机模组刚性连接在沉积头上,扫描仪、

计算机与数控系统之间保持通信。数控系统由实验室自主研发,用于控制沉积头与扫描仪的同步移动,以及激光功率、送粉速率、保护气体流速等工艺方案的调整。

图2为激光沉积制件翘曲变形检测和开裂预测软件系统框图,该系统主要包含三个模块,即系统控制模块(激光沉积设备控制系统)、数据采集处理模块和可视化模块。初始点云数据经数据采集处理模块进行形貌重构与坐标转换后实现原位检测,通过点云配准、滤波、降采样、曲面重构等步骤完成数据预处理。然后,计算切片组与重构表面交线的翘曲角,完成翘曲变形检测,通过开裂影响区内翘曲角的变化趋势和连续5层翘曲角的变化量实现开裂预测。此外,整个过程均可通过PCL库可视化,检测/预测结果将反馈于系统控制模块,形成闭环控制。

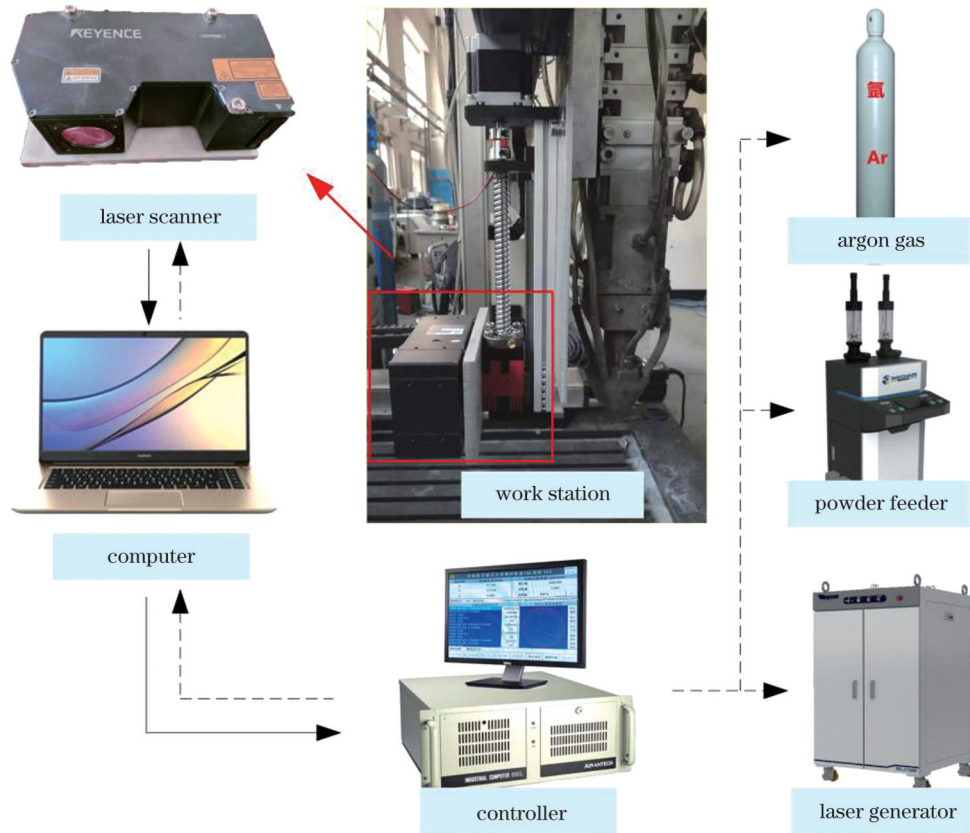


图1 翘曲变形检测与开裂预测系统的路线图

Fig. 1 Roadmap of warping detection and cracking prediction system

## 3 翘曲变形检测与开裂预测算法

### 3.1 坐标系校准与点云预处理

坐标系校准与点云数据预处理流程如图3(a)所示。初始点云数据经形貌重构后由仅含 $z$ 值的高度数据转换为包含 $(x, y, z)$ 信息的三维点云,通过坐标转换完成点云坐标系与加工坐标系之间的手眼标定,实现原位检测。若制件由于尺寸、遮挡等因素需要进行多视角/分块扫描时,则可通过点云块配准、去除重复点

处理获得完整的表面形貌,然后基于PCL点云库的最近点迭代、坐标转换算法实现多视角下点云块的配准<sup>[24-25]</sup>。否则,直接采用PCL点云库中的直通滤波、统计滤波、包围盒滤波去除噪声点并降采样<sup>[26]</sup>,以便在保证点云精度的同时加快后续处理效率。

原位检测原理如图3(b)所示,扫描仪按照设定的采样频率发射蓝色激光线,根据激光三角原理获取表面高度信息。每条扫描线上有800个数据点,数据点间隔 $\Delta x$ 按照固定值 $0.3\ \text{mm}$ 分布于扫描线上,即每条

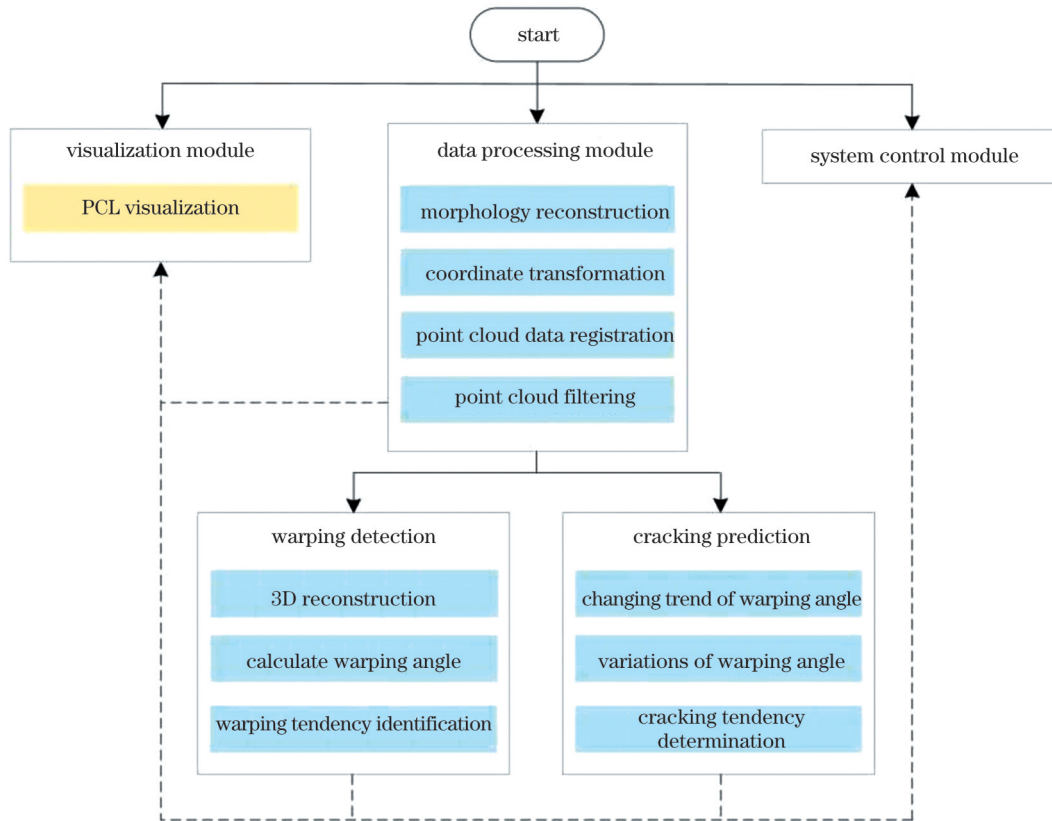


图 2 激光沉积制造翘曲变形检测与开裂预测软件架构图

Fig. 2 Software architecture of warping detection and cracking prediction in LDM

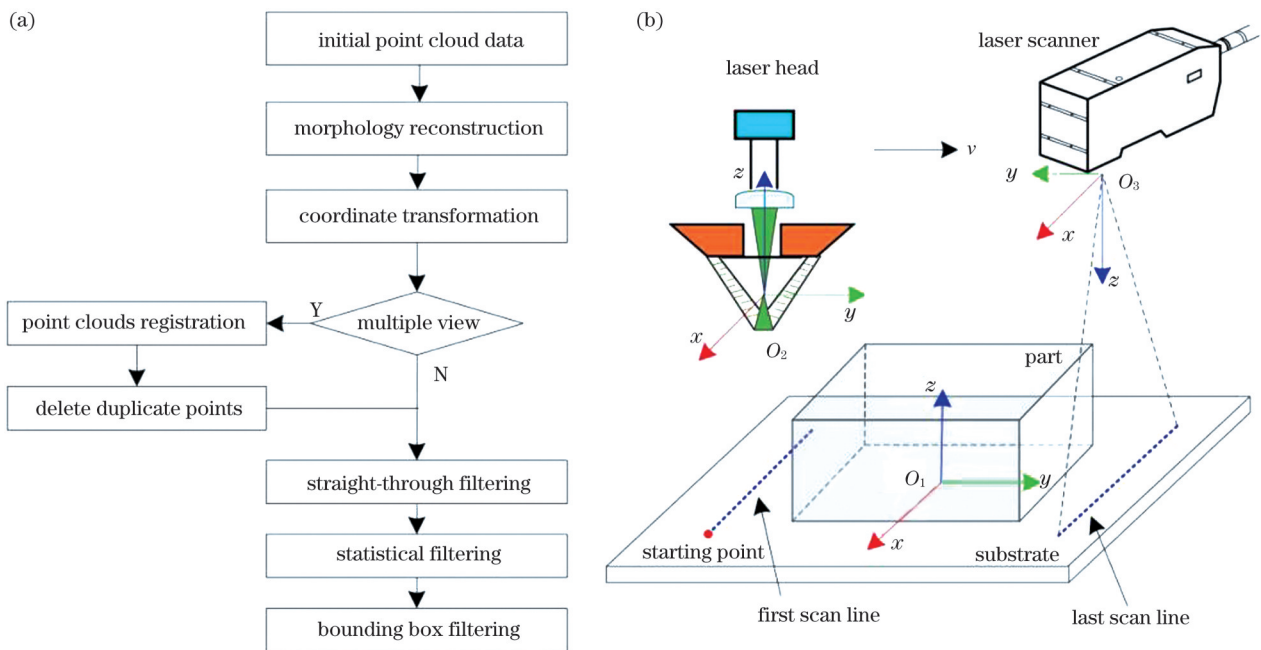


图 3 算法流程与检测原理。(a)坐标系校准与点云预处理算法流程;(b)原位检测原理

Fig. 3 Algorithm flow and detection principle. (a) Coordinate system calibration and point cloud data pre-processing flow; (b) *in-situ* detection principle

扫描线长度为 240 mm。扫描线间隔  $\Delta y$  由采样频率 (一般为 20 Hz) 与移动速度共同决定, 当扫描速度为 600 mm/min 时, 扫描线间隔为 0.5 mm。若采样数 (扫描线条数) 为 400, 则扫描范围为 240 mm  $\times$  200 mm。

首先, 通过步进电机将扫描仪的“零基准面”与基板上表面对准, 保证扫描数据  $Z$  向高度值与制品实际高度的一致性; 然后, 利用式 (1) 和式 (2) 将高度数据转换为三维点云  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ , 遍历数据点完成形貌



重构。

$$x = -(n - 1)\Delta x, \quad (1)$$

$$y = (m - 1)\Delta y, \quad (2)$$

式中： $m$  表示第  $m$  条扫描线； $n$  表示第  $m$  条扫描线上的第  $n$  个数据点。

手眼标定的目的在于实现表面形貌数据在加工坐标系  $O_1$  与点云坐标系  $O_3$  之间的变换。加工坐标系  $O_1$  位于工件底部中心，形貌重构后的点云坐标系  $O_3$  位于扫描线起始点，方向与加工坐标系相同，故只需求解式(3)所示坐标转换矩阵  $T$  中的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  值。“零基准面”对准已实现坐标系  $O_1$  与坐标系  $O_3$  在高度方向上的变换，即坐标转换矩阵  $T$  中的  $z$  值为 0，而  $x$ 、 $y$  值需要通过工具坐标系  $O_2$  获得。由于扫描仪刚性连接在激光头上，激光中心点与扫描线起始点的水平位置关系固定，即工具坐标系  $O_2$  与点云坐标系  $O_3$  之间的水平变换关系  $T_1$  固定。经测量， $x$  值和  $y$  值分别为 58 mm 和 75 mm。加工坐标系  $O_1$  与工具坐标系  $O_2$  之间的水平变换关系  $T_2$  可由激光沉积制造系统获得，故坐标变换矩阵  $T = T_1 \times T_2$ 。

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 3.2 翘曲变形检测算法

在激光沉积制造过程中，工艺参数不当<sup>[27]</sup>、不合适的扫描策略<sup>[28]</sup>均会导致热应力累积，复杂的热力演化引起的基板与制件的弯曲变形现象即翘曲变形<sup>[29]</sup>。翘

曲变形的主要衡量指标有翘曲度与翘曲长度(适用于平面)、翘曲距离与翘曲张角(适用于曲面)。进行翘曲变形原位检测能够量化激光沉积过程中周期性膨胀收缩累积的热变形，从而避免变形过大导致尺寸精度降低甚至开裂。

如图 4 所示，切片平面与重构表面垂直相交得到交线，算法坐标系、重构表面坐标系与加工坐标系保持一致。切片平面可采用参数化方程式表示为

$$\sin \alpha \cdot (x - x_0) - \cos \alpha \cdot (y - y_0) + D = 0, \quad (4)$$

式中： $\alpha$  为旋转切片的旋转角； $D$  为平行切片的间距； $x_0$  和  $y_0$  为重构表面中心点在算法坐标系下的位置。由交线最低点引出一条平行于基板的水平参考线，翘曲度  $H$  为高度方向上交线到参考线的最大垂直距离，翘曲长度  $L$  为相应的水平距离。研究人员结合翘曲度与翘曲长度提出了一种用于衡量激光沉积制造平面翘曲变形的指标——翘曲角  $Q$ ，并定义交线的翘曲角  $Q$  为  $H$  与  $L$  比值的反正切值，即

$$Q = \arctan\left(\frac{H}{L}\right), \quad (5)$$

$Q$  值越小表示当前表面越平缓。结合制件尺寸与允许变形程度设定翘曲阈值  $Q_0$ ，即

$$Q_0 = \arctan\left(\frac{H_0}{\frac{1}{2} \max\{a, b\}}\right), \quad (6)$$

式中： $a$  为制件长度； $b$  为制件宽度； $H_0$  为允许的最大翘曲度。

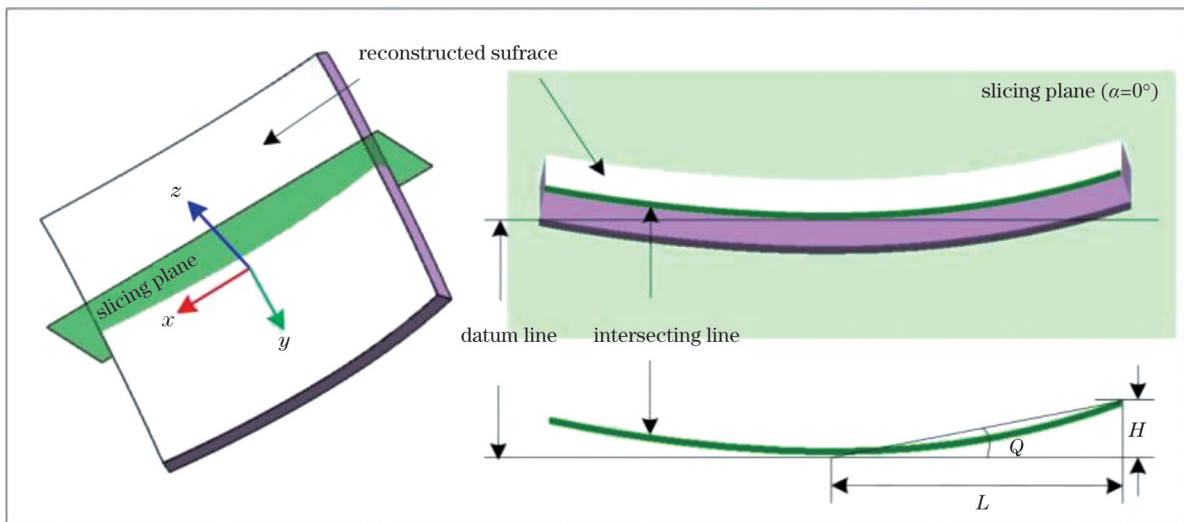


图 4 翘曲角定义

Fig. 4 Definition of warping angle

针对 X 向翘曲、Y 向翘曲、对角翘曲等翘曲类型，笔者设计了两种翘曲变形检测的切片方案：旋转切片和平行切片。旋转切片方案如下：自制件表面的形心处开始，沿对角线或其他预设方向设置第一个切片，以旋转角  $\alpha$  偏移切片直至切片均匀分布于整个表面，如

图 5(a) 所示。平行切片方案如图 5(b) 所示，第一个切片过形心，选定一个方向，以增量  $D$  向两侧偏移直至切片均匀分布于整个表面。

对于大型结构件的翘曲变形检测，旋转切片方案的计算量较小，但切片方向单一，均为过形心的发射

线,适用于环状、圆盘状零件的对角翘曲等球面变形类型。平行切片方案的检测范围更全面,均匀覆盖整个表面,但计算量较大,需要通过比较与计算来获取最大变形方向和变形量,适用于完整计算分析任意水平方

向上的翘曲变形分布情况。对于难以判定翘曲类型的零件,可采用旋转切片确定一个容易翘曲变形的角度范围,在该角度范围内采用平行切片方案进一步检测整个表面,如图 5(c)所示。

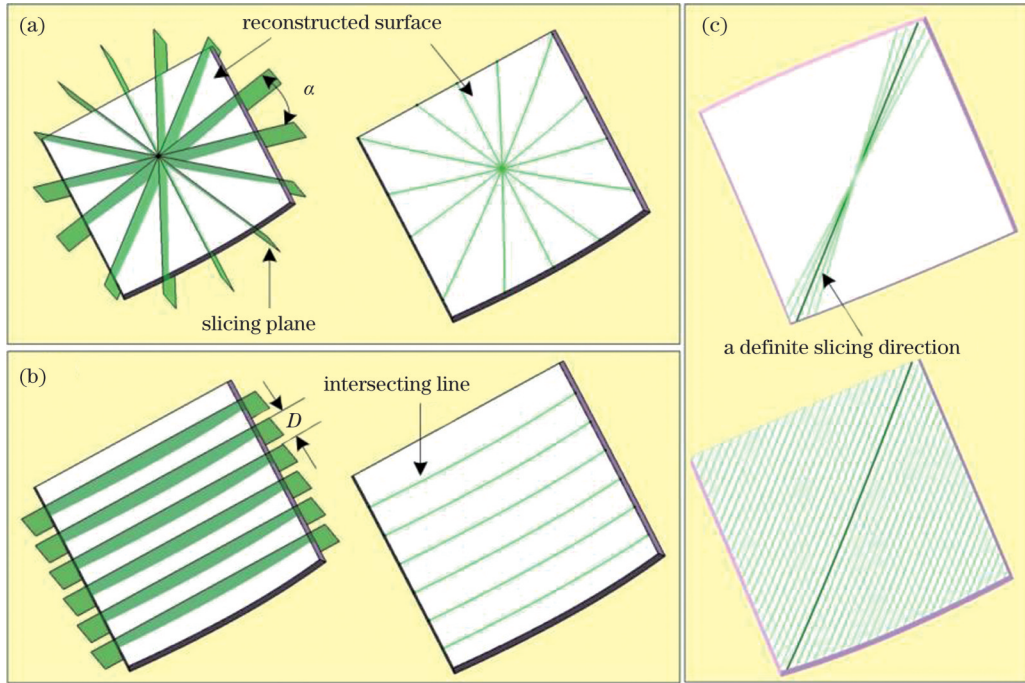


图 5 两种翘曲变形检测方案。(a)旋转切片组及其交线;(b)平行切片组及其交线;(c)旋转切片和平行切片相结合

Fig. 5 Two warping detection schemes. (a) Rotary slicing planes and intersecting lines; (b) parallel slicing planes and intersecting lines; (c) rotary slicing planes and parallel slicing planes were combined

图 6 为翘曲变形检测算法流程图。首先,采用贪婪投影网格化算法<sup>[30]</sup>对滤波降噪后的点云数据进行曲面重构,该算法可以获得与大型结构件分块扫描所得相同的具有多个连接处的散乱点云,适用于多视角测量数据的表面重构,减小了由切片附近点云直接拟合交线的误差。然后,过形心沿某一固定方向以旋转角  $\alpha$  偏移得到  $m$  个旋转切片平面,自第一个切片平面开始与重构表面求交,计算所得交线的翘曲角  $Q$ ,若该翘曲角  $Q$  未超出翘曲阈值  $Q_0$ ,则求取下一个切片平面与重构表面的交线,直至所有交线的翘曲角均未超出翘曲阈值,继续沉积。若某条交线的翘曲角超出翘曲阈值,则在该切片方向以偏移增量  $D$  向两侧偏移水平切片直至切片覆盖整个表面,得到  $p$  个平行切片,若一半以上交线的翘曲角均超出翘曲阈值,则判定当前表面发生翘曲变形,反之则继续沉积。

### 3.3 开裂预测算法

由于激光沉积制造具有周期性快速加热和冷却的特点,沉积件中存在应力累积,基板与制件在热应力、组织应力、约束应力等的综合作用下先后发生翘曲变形,变形量逐渐变大直至应力累积超出材料应力极限时发生开裂<sup>[31-33]</sup>。目前激光沉积制造开裂现象的研究多集中于形成机理及检测上,而实现开裂预测

可以提高激光沉积制造的效率,避免零件报废造成的材料浪费,对激光沉积制造技术的发展具有重要意义。

实际沉积过程的大量观测表明,制件在临界开裂前的翘曲角呈连续正增长,连续 5 层的翘曲角变化量相比沉积前期更大,制件开裂时翘曲角发生突变。因此,本文基于翘曲角的变化趋势提出了一种开裂预测算法。如图 7 所示,第  $n$  层的翘曲角最大值  $Q_n$  由当前层变形最大的交线计算得到,根据交线对应的数据点坐标值计算翘曲度  $H$  与翘曲长度  $L$ ,二者比值的反正切值即为  $Q_n$ 。同理可得第  $n+5$  层的翘曲角最大值  $Q_{n+5}$ ,则连续 5 层的翘曲角变化量  $K$  为

$$K = Q_{n+5} - Q_n. \quad (7)$$

结合制件尺寸和连续 5 层的翘曲度变化量来设定临界开裂状态下对应的翘曲角变化量,即开裂阈值  $K_0$ ,其表达式为

$$K_0 = \arctan \left( \frac{\Delta H}{\frac{1}{2} \max \{a, b\}} \right), \quad (8)$$

式中: $\Delta H$ 为连续 5 层允许的翘曲度变化量。

图 8 为开裂预测算法流程图。对第  $n$  层的点云数据进行预处理并表面重构后,为防止误判,在开裂

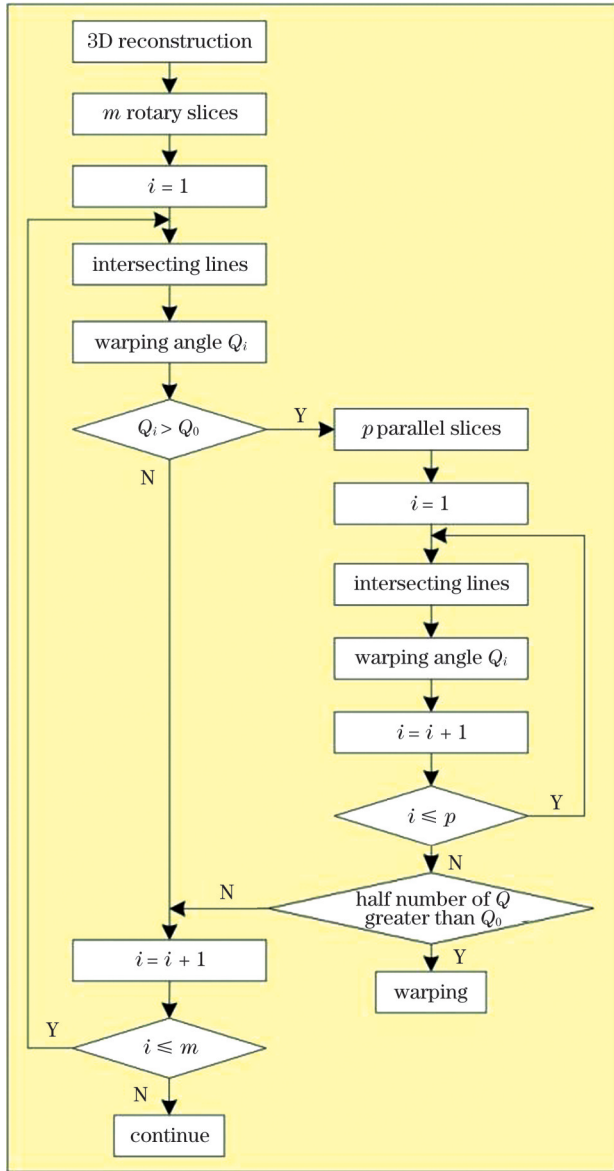


图 6 翘曲变形检测算法流程  
Fig. 6 Algorithm flow of warping detection

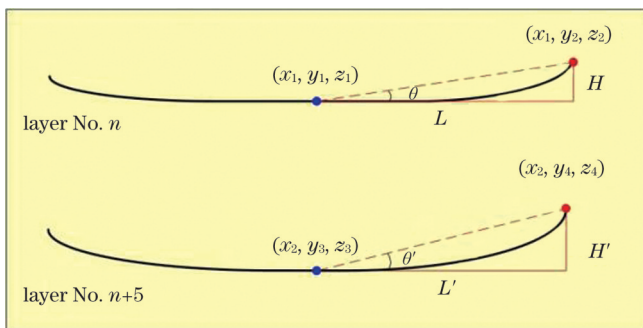


图 7 翘曲角变化量示意图  
Fig. 7 Schematic of the variation in warping angle

影响区内结合不同交线的变化趋势进行综合判断。首先,采用平行/旋转切片组与重构表面求交,将交线的翘曲角按从大到小的顺序排列,记录当前沉积层的翘曲角最大值,即  $Q_n$ ;其次,如图 9 所示,选择旋转切片组,在  $Q_n$  对应切片附近取 4 个切片作为开裂

影响区,旋转角  $\alpha$  根据制件尺寸确定,计算 4 条交线的翘曲角  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ 。若  $Q_n$  呈正增长,则计算连续 5 层的翘曲角变化量;若超出设定的开裂阈值  $K_0$ ,则进一步判断开裂影响区内其他交线的翘曲角变化量  $K_1, K_2, K_3, K_4$ 。若一半以上交线的翘曲角变化量均具有开裂趋势,则判断制件可能即将开裂,反之则继续沉积。

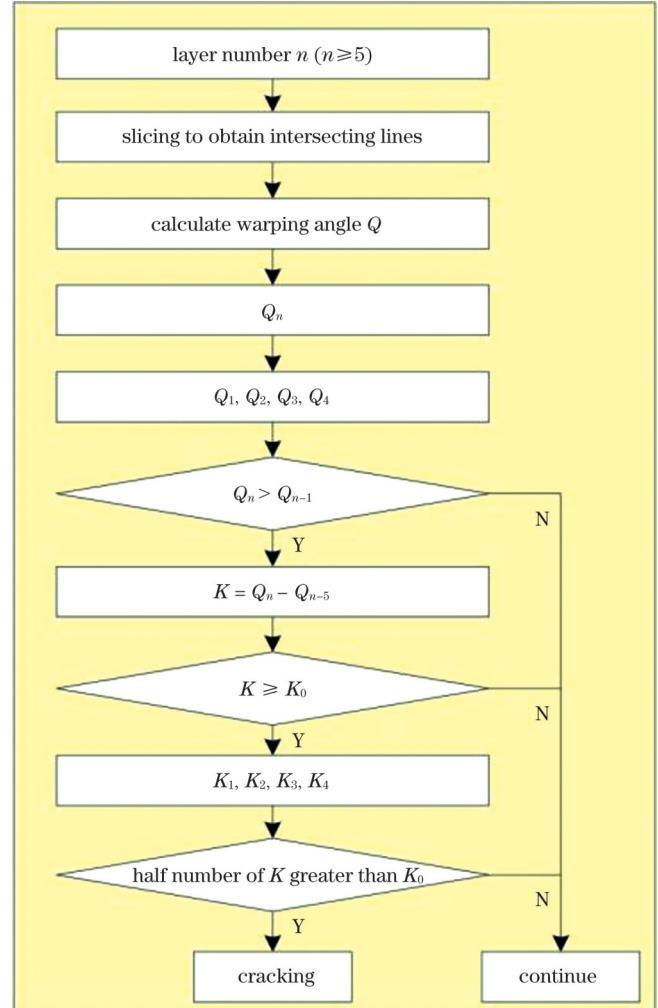


图 8 开裂预测算法流程  
Fig. 8 Cracking prediction algorithm flow

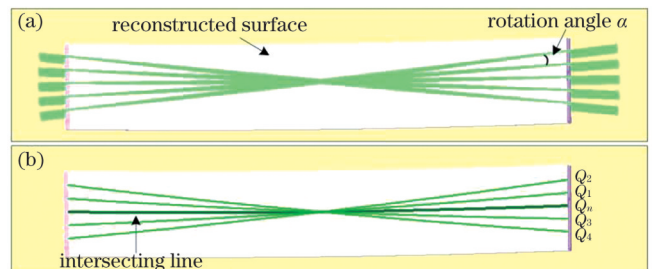


图 9 通过旋转切片确定开裂影响区。(a) 旋转切片;(b) 翘曲角最大的交线及其附近的 4 条交线  
Fig. 9 Cracking affected area determined by rotary slices. (a) Rotary slices; (b) intersecting line with the largest warping angle and four nearby intersecting lines



## 4 实验验证

### 4.1 翘曲变形检测实验

为了验证翘曲变形检测算法的有效性,采用激光沉积工艺制备了 TC4 试样,基板材料为 TC4,零件尺寸为  $140\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。激光功率为  $1900\text{ W}$ ,送粉速率为  $8\text{ g/min}$ ,扫描速度为  $10\text{ mm/s}$ ,Z 轴抬升量为  $0.8\text{ mm}$ 。扫描仪采样频率为  $20\text{ Hz}$ ,采样次数为  $400$ ,移动速度为  $10\text{ mm/s}$ ,单次触发的扫描范围为  $200\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ 。允许的最大翘曲度不高于 5 层层厚,即  $H_0$  为  $4\text{ mm}$ , $L_0$  取制件长度的一半,即  $70\text{ mm}$ ,故

设定翘曲阈值  $Q_0$  为  $3.27^\circ$ 。

图 10(a) 为待检测表面翘曲样件的照片,图 10(b) 为预处理后的表面形貌数据,图 10(c) 为重构后的翘曲表面。选择旋转切片组确定翘曲变形的角度范围,根据零件形状,自形心沿 X 轴方向开始,顺时针旋转  $180^\circ$  进行切片,切片旋转角度增量  $\alpha$  为  $15^\circ$ ,如图 10(d) 所示。所得交线的翘曲角计算结果如表 1 所示,可见,平行 X 轴方向切片所得交线的翘曲角最大,超出翘曲阈值  $Q_0$ ,其附近切片翘曲角相对减小,且其余交线的 Q 值未超出阈值,判定该制件易发生 X 向翘曲。

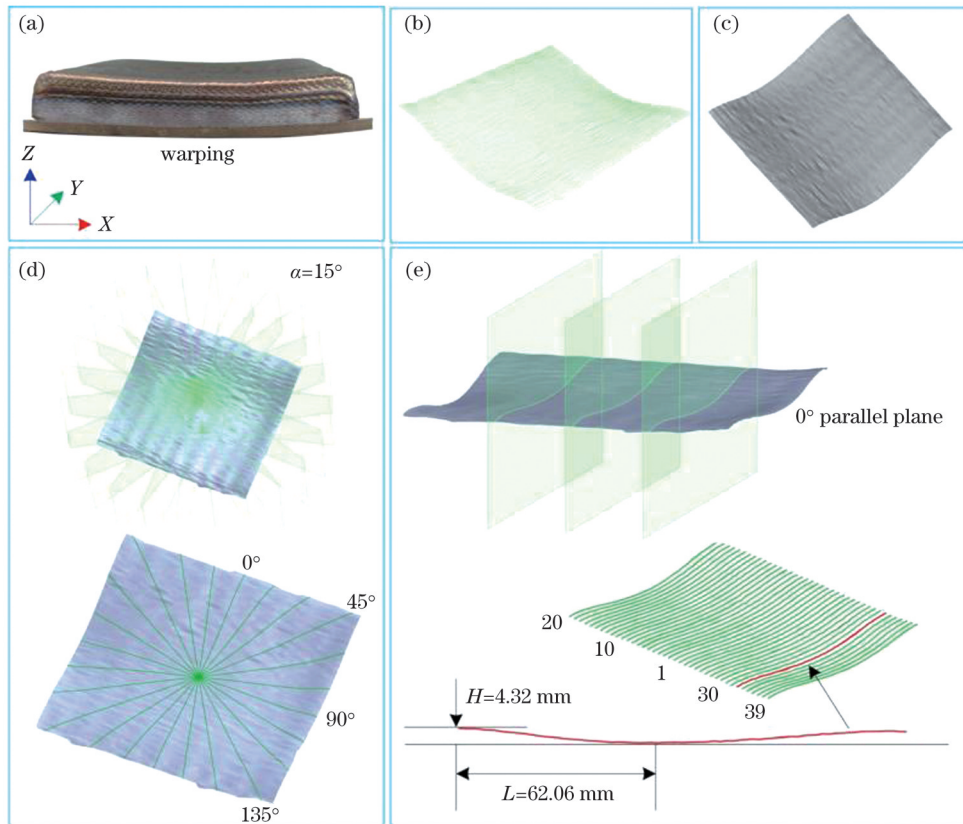


图 10 翘曲检测实验。(a) 表面翘曲;(b) 预处理后的点云数据;(c) 重构表面;(d) 选用旋转切片求取交线;(e) 选用平行切片求取交线  
Fig. 10 Warping detection experiment. (a) Surface warping; (b) point cloud data after pre-processing; (c) reconstructed surface; (d) obtain the intersection lines by rotary slicing planes; (e) obtain the intersection lines by parallel slicing planes

选择 X 轴方向 ( $0^\circ$ ) 的平行切片组进一步检测整个制件的翘曲变形程度。偏移增量  $D$  设置为  $4\text{ mm}$ ,图 10(e) 中给出了第 1、10、30 个切片及所有切片对应的 39 条交线,图中箭头所指为翘曲角最大的一条交线,翘曲角约为  $3.98^\circ$ 。按切片顺序计算交线的翘曲角,第一条交线的翘曲角约为  $3.36^\circ$ ,超出翘曲阈值  $Q_0$ ,其附近 4 个切片平面交线的翘曲趋势检测结果如表 2 所示。可见,所有交线的翘曲角均超出翘曲阈值  $Q_0$ ,判定当前表面发生翘曲变形,证实了该算法检测翘曲变形的有效性。

### 4.2 开裂预测实验

为了验证开裂预测算法的有效性,选用焊接性、塑

性较差的钛合金材料 Ti65 作为开裂实验验证对象,采用激光沉积工艺制备 Ti65 薄壁件,选择 TC4 材料为基板,制件尺寸为  $150\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。激光功率为  $2000\text{ W}$ ,送粉速率为  $10\text{ g/min}$ ,Z 轴抬升量为  $1\text{ mm}$ ,扫描仪采样频率为  $20\text{ Hz}$ ,采样次数为  $400$ ,移动速度为  $10\text{ mm/s}$ 。根据前期的大量实验观测结果,临近开裂前连续 5 层的翘曲度变化量均高于两倍层厚,故连续 5 层允许的翘曲度变化量  $\Delta H$  取  $2\text{ mm}$ ,开裂阈值  $K_0$  设为  $1.53^\circ$ 。

对点云数据进行预处理后重构表面,采用水平偏移增量  $D$  为  $1\text{ mm}$  的平行切片组与重构表面求交,计算交线的翘曲角并记录每层的翘曲角最大值  $Q_n$ 。同

表 1 通过旋转切片所得交线的翘曲角计算结果

Table 1 Calculated warping angle of intersecting lines obtained by rotary slicing planes

Number	$\alpha /(^{\circ})$	$H / \text{mm}$	$L / \text{mm}$	$Q /(^{\circ})$	Trend of warping
1	0	4.04	68.81	3.36	Yes
2	15	3.32	67.20	2.83	No
3	30	3.96	85.59	2.65	No
4	45	3.02	77.67	2.23	No
5	60	1.23	77.21	0.91	No
6	75	1.39	85.62	0.93	No
7	90	1.34	79.78	0.96	No
8	105	2.24	78.79	1.63	No
9	120	2.68	90.33	1.70	No
10	135	2.35	68.32	1.97	No
11	150	2.62	64.11	2.34	No
12	165	3.82	73.98	2.96	No

表 2 第一个切片及其附近 4 条交线的翘曲趋势检测结果

Table 2 Warping trend detection results of the first slicing plane and four adjacent intersecting lines

Number	$H / \text{mm}$	$L / \text{mm}$	$Q /(^{\circ})$	Trend of warping
1	4.04	68.81	3.36	Yes
2	4.18	66.16	3.62	Yes
3	4.15	64.88	3.66	Yes
21	4.07	66.79	3.49	Yes
22	4.14	65.16	3.64	Yes

时,采用旋转角度增量  $\alpha$  为  $1^{\circ}$  的旋转切片记录开裂影响区内其他交线的翘曲角。表 3 为第 45~55 层翘曲角最大值  $Q_n$  对应的翘曲度  $H$ 、翘曲长度  $L$ 、连续 5 层的翘曲角变化量  $K$  值,以及附近 4 条交线对应的翘曲角及其变化量。

图 11(a) 为第 45~55 层翘曲角最大值  $Q_n$  及其变化量  $K$  的变化趋势图,可见:第 45~55 层的翘曲角最大值  $Q_n$  呈连续正增长,第 45~50 层翘曲角的变化量在阈值范围内 ( $K=1.46^{\circ}$ );第 46~51 层翘曲角的变化量为  $1.58^{\circ}$ ,超出开裂阈值  $K_0$ ,判定制件可能有开裂趋势。为避免误判,进一步分析其开裂影响区内翘曲角的变化趋势。图 11(b)~(c) 为第 51 层开裂影响区内 5 条交线对应的翘曲角及其变化量的对比图,可见,所有交线的翘曲角均为连续正增长趋势,且有一半以上(约占 80%)的  $K$  值超出阈值  $K_0$ ,判定制件即将开裂。

为验证该算法预测开裂的有效性,继续沉积,沉积至第 55 层时制件发生开裂,相应的翘曲角  $Q$  值和  $K$  值均发生突变。如图 11(d) 所示,在两侧靠近基板处均

表 3 第 45~55 层翘曲角  $Q$  及其连续 5 层变化量  $K$  的计算结果

Table 3 Calculated warping angle  $Q$  and variation  $K$  in five consecutive layers at layer 45 - 55

Layer number	$L / \text{mm}$	$H / \text{mm}$	$Q_n /(^{\circ})$	$K /(^{\circ})$	$Q_1 /(^{\circ})$	$K_1 /(^{\circ})$
45	48.23	4.09	4.85		4.82	
46	49.51	4.28	4.94		4.91	
47	48.98	4.57	5.33		5.3	
48	49.02	4.83	5.63		5.58	
49	47.63	5.11	6.12		6.08	
50	47.9	5.3	6.31	1.46	6.25	1.43
51	49.08	5.61	6.52	1.58	6.47	1.56
52	46.37	5.91	7.26	1.93	7.19	1.89
53	44.73	6.28	7.99	2.36	7.93	2.35
54	45.36	6.89	8.64	2.52	8.61	2.53
55	44.42	8.9	11.33	5.02	11.27	5.02

Layer number	$Q_2 /(^{\circ})$	$K_2 /(^{\circ})$	$Q_3 /(^{\circ})$	$K_3 /(^{\circ})$	$Q_4 /(^{\circ})$	$K_4 /(^{\circ})$
45	4.78		4.83		4.8	
46	4.88		4.93		4.91	
47	5.26		5.31		5.28	
48	5.53		5.59		5.55	
49	6.03		6.07		6.04	
50	6.2	1.42	6.26	1.43	6.21	1.41
51	6.41	1.53	6.46	1.53	6.38	1.47
52	7.13	1.87	7.2	1.89	7.12	1.84
53	7.88	2.35	7.94	2.35	7.87	2.32
54	8.57	2.54	8.6	2.53	8.51	2.47
55	11.23	5.03	11.28	5.02	11.19	4.98

发生了不同程度的开裂,右侧出现了一条较严重的裂纹(1号),开裂高度约为 1.77 mm,向内延伸长度约为 18.5 mm;左侧出现了两条裂纹,2号裂纹向内延伸长度约为 28.2 mm,3号裂纹长度约为 19.1 mm,验证了该算法预测开裂的有效性。

## 5 结 论

提出了一种激光沉积制造翘曲变形检测与开裂预测的新算法,以制件表面的翘曲角及其变化量作为判断依据,根据翘曲度、翘曲度变化量与制件尺寸的正反切值设定翘曲阈值与开裂阈值,实现了翘曲检测与开裂预测,并通过实验验证了算法的有效性。所得主要结论如下:

1) 依据翘曲类型的不同,设计了两种切片方案——旋转切片与平行切片,旋转切片可用于确定制件易发生翘曲的方向,平行切片可用于判定翘曲变形的分布情况。将切片与重构表面求交后计算交线的翘曲角,



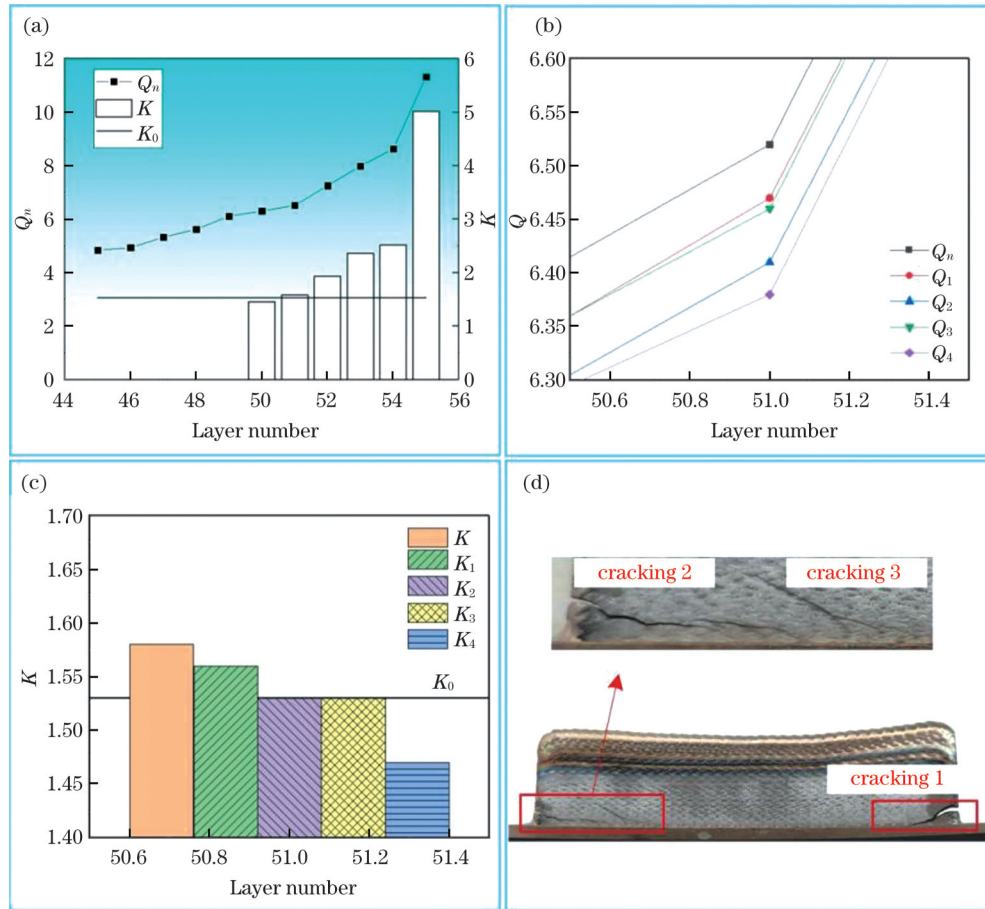


图 11 开裂预测实验结果。(a)  $Q_n$  和  $K$  的变化趋势; (b) 第 51 层开裂影响区内的翘曲角; (c) 第 51 层的翘曲角变化量; (d) 第 55 层开裂  
Fig. 11 Experiment result of cracking prediction. (a) Variation trend of  $Q_n$  and  $K$ ; (b) warping angle in cracking affected area at layer 51; (c) variation of warping angle at layer 51; (d) cracking at layer 55

并将其与翘曲阈值进行比较完成翘曲变形检测。

2) 提出了一种开裂预测算法, 即: 计算切片与重构表面交线的翘曲角, 并记录每层的翘曲角最大值, 结合开裂影响区内翘曲角的变化趋势, 将翘曲角变化量与开裂阈值相比较以预测开裂。

3) 开展了翘曲变形检测与开裂预测实验, 实验结果表明, 该算法能够快速有效地判定制件的 X 向翘曲变形, 并可以通过开裂影响区内的翘曲角变化趋势及变化量成功预测薄壁件的开裂现象。

### 参 考 文 献

- [1] Liu M, Kumar A, Bukkapatnam S, et al. A review of the anomalies in directed energy deposition (DED) processes & potential solutions-part quality & defects[J]. Procedia Manufacturing, 2021, 53: 507-518.
- [2] Svetlizky D, Das M, Zheng B L, et al. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: physical characteristics, defects, challenges and applications[J]. Materials Today, 2021, 49: 271-295.
- [3] Masaylo D, Igoshin S, Popovich A, et al. Effect of process parameters on defects in large scale components manufactured by direct laser deposition[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 30: 665-671.
- [4] Zhang X, Shen W J, Suresh V, et al. *In situ* monitoring of direct energy deposition via structured light system and its application in remanufacturing industry[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(3): 959-974.
- [5] Stehmar C, Gipperich M, Kogel-Hollacher M, et al. Inline optical coherence tomography for multidirectional process monitoring in a coaxial LMD-w process[J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2701.
- [6] Li Z W, Liu X J, Wen S F, et al. *In situ* 3D monitoring of geometric signatures in the powder-bed-fusion additive manufacturing process via vision sensing methods[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1180.
- [7] Wang Z Y, Liu R W, Sparks T, et al. Stereo vision based hybrid manufacturing process for precision metal parts[J]. Precision Engineering, 2015, 42: 1-5.
- [8] Qin L Y, Zhao D X, Wang W, et al. Geometric defects identification and deviation compensation in laser deposition manufacturing[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 155: 108374.
- [9] 钦兰云, 谢永凯, 杨光, 等. 激光沉积制造形貌偏差检测与控制研究[J]. 中国激光, 2021, 48(10): 1002113.
- [10] Qin L Y, Xie Y K, Yang G, et al. Detection and control of morphology deviation in laser deposition manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(10): 1002113.
- [11] Babkin K, Zemlyakov E, Ivanov S, et al. Distortion prediction and compensation in direct laser deposition of large axisymmetric Ti-6Al-4V part[J]. Procedia CIRP, 2020, 94: 357-361.
- [12] Afazov S, Okioga A, Holloway A, et al. A methodology for precision additive manufacturing through compensation[J]. Precision Engineering, 2017, 50: 269-274.
- [13] Chen L Q, Yao X L, Xu P, et al. Rapid surface defect identification for additive manufacturing with *in situ* point cloud processing and machine learning[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2021, 16(1): 50-67.
- [14] Garmendia I, Flores J, Madarieta M, et al. Geometrical control of

- DED processes based on 3D scanning applied to the manufacture of complex parts[J]. *Procedia CIRP*, 2020, 94: 425-429.
- [14] Garcia-Diaz A, Panadeiro V, Lodeiro B, et al. OpenLMD, an open source middleware and toolkit for laser-based additive manufacturing of large metal parts[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 53: 153-161.
- [15] Biegler M, Graf B, Rethmeier M. *In-situ* distortions in LMD additive manufacturing walls can be measured with digital image correlation and predicted using numerical simulations[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 20: 101-110.
- [16] Xie R S, Chen G Q, Zhao Y, et al. *In-situ* observation and numerical simulation on the transient strain and distortion prediction during additive manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 38: 494-501.
- [17] 樊爽, 郭玉荣. 基于逐点移动最小二乘拟合的数字图像相关测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 60(6): 0612001.  
Fan S, Guo Y R. Digital image correlation measurement based on pointwise moving least square fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 60(6): 0612001.
- [18] 崔陆军, 李海洋, 郭士锐, 等. 基于卷积模块注意力机制深度学习模型的激光熔覆裂纹识别[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(20): 2014001.  
Cui L J, Li H Y, Guo S R, et al. Laser cladding cracks recognition based on deep learning combined convolutional block attention module[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(20): 2014001.
- [19] 鹿旭飞, 马良, 林鑫, 等. 激光立体成形 TC4 热-变形行为数值分析[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(9): 1450-1456.  
Lu X F, Ma L, Lin X, et al. Numerical analysis of thermal distortion behavior for laser solid formed TC4 alloy[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2020, 39(9): 1450-1456.
- [20] Heigel J C, Michaleris P, Palmer T A. *In situ* monitoring and characterization of distortion during laser cladding of Inconel® 625[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 135-145.
- [21] 祝子笛. 激光增材制造薄壁件表面粗糙度以及翘曲变形的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020: 18.  
Zhu Z D. The research on surface roughness and warping displacements of thin wall parts by laser additive manufacturing[D]. Changsha: Hunan University, 2020: 18.
- [22] Tan H, Chen Y G, Feng Z, et al. A real-time method to detect the deformation behavior during laser solid forming of thin-wall structure[J]. *Metals*, 2020, 10(4): 508.
- [23] 孙玲玉, 刘长超, 姜明顺, 等. 基于光纤布拉格光栅阵列的铝合金疲劳裂纹预测方法[J]. *中国激光*, 2021, 48(13): 1306003.  
Sun L Y, Liu C C, Jiang M S, et al. Fatigue crack prediction method for aluminum alloy based on fiber Bragg grating array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1306003.
- [24] 马国庆, 刘丽, 于正林, 等. 大尺寸曲面形貌测量系统的点云拼接技术[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0504001.  
Ma G Q, Liu L, Yu Z L, et al. Point-cloud splicing technology for large-scale surface topography measurement system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0504001.
- [25] 郎威, 薛俊鹏, 李承杭, 等. 基于旋转台参数标定实现多视角点云拼接[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1104003.  
Lang W, Xue J P, Li C H, et al. Splicing of multi-view point clouds based on calibrated parameters of turntable[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1104003.
- [26] 李茂月, 马康盛, 王飞, 等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 55-66.  
Li M Y, Ma K S, Wang F, et al. Research on the preprocessing method of blade point cloud based on structured light on-machine measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(8): 55-66.
- [27] 赵宇辉, 赵吉宾, 王志国. Inconel 625 镍基高温合金激光增材制造翘曲变形行为研究[J]. *真空*, 2020, 57(2): 88-93.  
Zhao Y H, Zhao J B, Wang Z G. Research on warp distortion of Inconel 625 nickel-based alloys fabricated by laser melting additive manufacturing[J]. *Vacuum*, 2020, 57(2): 88-93.
- [28] Sun L, Ren X B, He J Y, et al. Numerical investigation of a novel pattern for reducing residual stress in metal additive manufacturing[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 67: 11-22.
- [29] 王霞, 王维, 杨光, 等. 激光沉积薄壁结构热力演化的尺寸效应[J]. *金属学报*, 2020, 56(5): 745-752.  
Wang X, Wang W, Yang G, et al. Dimensional effect on thermo-mechanical evolution of laser depositing thin-walled structure[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2020, 56(5): 745-752.
- [30] 刘翔宇, 王健, 常清法, 等. 改进贪婪投影三角化算法的激光点云快速三维重建[J]. *激光与红外*, 2022, 52(5): 763-770.  
Liu X Y, Wang J, Chang Q F, et al. Fast 3D reconstruction of point cloud based on improved greedy projection triangulation algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(5): 763-770.
- [31] Li P, Yang T P, Li S, et al. Direct laser fabrication of nickel alloy samples[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(11): 1288-1294.
- [32] 殷俊, 张英伟, 赵宇辉. Inconel 625 镍基高温合金激光增材制造零件的开裂行为研究[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(12): 73-76.  
Yin J, Zhang Y W, Zhao Y H. Research on cracking behavior of Inconel 625 Ni based superalloy parts by laser additive manufacturing[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(12): 73-76.
- [33] 邵玉呈, 陈长军, 张敏, 等. 关于 Deloro 40 镍基合金粉末激光增材制造成型件裂纹问题研究[J]. *应用激光*, 2016, 36(4): 397-402.  
Shao Y C, Chen C J, Zhang M, et al. Research on crack issue of Deloro 40 Ni alloys prototype fabricated by laser additive manufacturing[J]. *Applied Laser*, 2016, 36(4): 397-402.

## Warping Detection and Cracking Prediction of Laser Deposition Manufacturing

Qin Lanyun<sup>1</sup>, Wang Kun<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>1</sup>, Wang Xiangming<sup>2</sup>, Yang Guang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechatronic Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China;

<sup>2</sup>Shenyang Aircraft Design Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Shenyang 110035, Liaoning, China

### Abstract

**Objective** Due to uneven heating and cooling characteristics, parts accumulate thermal distortions during periodic expansion and contraction during laser deposition. Geometrical defects, such as flatness defects, melting collapse, warping and cracking, seriously affecting the parts' size accuracy. In particular, the warping and cracking of large-scale structural parts can easily cause material wastage and limit the development of laser deposition manufacturing technology. Therefore, realizing the online detection of warping

and cracking prediction is an urgent problem for laser deposition manufacturing. In the current research, scholars have utilized digital image correlation technology and laser displacement sensor to monitor the transient strain field, warping and instant cracking. The detection accuracy was also improved by combining it with a machine-learning algorithm. However, while the results show the laws of warping and cracking, the global detection of warping and prediction of cracking have yet to be achieved. This study aimed to realize warping detection and cracking prediction through the changing trend and variation of the warping angle during the deposition process and to improve the forming quality.

**Methods** A warping detection and cracking prediction system were built based on a laser deposition manufacturing system and laser scanner to monitor the surface morphology of parts in real-time. A new algorithm for warping detection and cracking prediction was proposed based on the warping angle and was verified by experiments. First, the surface topography data of the current deposition layer were obtained using a laser scanner, and *in-situ* detection was realized through morphology reconstruction and hand-eye calibration. The point cloud data were then pre-processed by straight-through filtering, statistical filtering, and bounding box filtering to prepare for surface reconstruction. Next, the warping angle of the intersecting line was calculated using the rotary and parallel slices that vertically crossed the reconstructed surface. Simultaneously, warping threshold  $Q_0$  and cracking threshold  $K_0$  were set according to the part size and allowable distortion degree. Finally, warping was determined according to whether the warping angle exceeded the threshold  $Q_0$ , and cracking was predicted by the changing trend of the warping angle and the variation in five consecutive layers ( $K$ ). Cracking may occur when the warping angle increases and the variation  $K$  exceeds the threshold  $K_0$ .

**Results and Discussions** This study proposes a new warping distortion measurable indicator for laser deposition manufacturing (for the plane), that is warping angle (Fig. 4), which can be used to achieve warping detection and cracking prediction through rotary and parallel slices (Fig. 5). The software framework (Fig. 2) includes three main modules: visualization, system control and data processing, the whole process can be visualized using the PCL point cloud library. The effectiveness of the warping detection algorithm (Fig. 6) was experimentally verified. The experimental results showed that the algorithm could determine the direction prone to warping using rotary slices (Table 1) and conduct complete coverage detection on the surface of the parts (Fig. 10) using parallel slices. When the warping angle of an intersecting line exceeds threshold  $Q_0$ , a locally accurate judgment is made (Table 2). The cracking prediction algorithm (Fig. 8) was verified experimentally. By calculating the warping angle  $Q$  in the cracking influence area and the variation  $K$  in five consecutive layers (Table 3), the results for layer 51 indicate that cracking may occur. With continued deposition, three cracks appeared in layer 55. The cracking phenomenon of Ti65 components during the laser deposition manufacturing process was successfully predicted (Fig. 11).

**Conclusions** In this study, a new algorithm for warping detection and cracking prediction based on the changing trend and variation in the warping angle was verified experimentally. The two schemes of rotary and parallel slices have their own characteristics. The former requires fewer calculations and can be used to determine the direction of warping, and the latter has a more comprehensive and uniform detection range and can be used to determine the warping distribution. The warping angle of the intersection lines between the slices and the reconstructed surface was calculated, and warping detection was completed by comparing them with the warping threshold. The maximum warping angle of each layer was recorded, and the changing trend and warping angle in the cracking influence area were combined with the cracking threshold to complete the cracking prediction. The experimental results demonstrated that the proposed algorithm is reasonable, logical, and robust. It can detect warping quickly and effectively and predict the occurrence of cracking. The warping detection and cracking prediction system enhances the quality and process monitoring ability of laser deposition manufacturing and provides essential evidence for process optimization.

**Key words** laser technique; laser deposition manufacturing; warping detection; cracking prediction; *in-situ* monitoring