

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.015

喷头动态定向成型对机械臂3D打印成型件质量的影响

章其胜^{1,2}, 赵冬梅^{1,2}, 乌日开西·艾依提^{1,2}

(1. 新疆大学机械工程学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆增材再制造技术重点实验室, 乌鲁木齐 830017)

摘要:为解决传统三轴熔融沉积成型在制造曲面薄壳结构时表面质量差、力学性能低以及原位修复打印中易发生干涉等问题,本文搭建了一种多自由度机械臂3D打印平台,并通过梯度向量公式实时求解曲面路径点法向量并转换为机械臂末端姿态角,从而实现动态调整喷头轴线方向与沉积曲面法向对齐,进一步研究了喷头竖直定向与动态定向两种成型策略对试样表面质量及弯曲承载性能的影响。首先,对比了两种策略在0°、15°、30°、45°倾斜面上成型的表面精度,并采用动态定向策略实现了大倾角曲面的高质量成型。而后,分析了两种策略下曲面试样的弯曲性能,最后基于动态定向策略实现了曲面缺损区域的原位修复。结果表明,在斜面共形打印中,竖直定向成型试样的表面粗糙度随倾角增大显著增加,而动态定向成型试样的表面粗糙度在不同倾角下均保持稳定。在曲面结构中,动态定向策略在X、Y及Y-X三个方向的最大弯曲载荷较竖直定向策略分别提高了8.15%、4.62%、5.91%。此外,曲面分层结合动态定向策略成型的试样在Y方向的最大弯曲载荷达到528.867 N,相较于采用传统平面分层策略的185.845 N提高了184.57%。在原位修复实验中,修复后的试样最大弯曲载荷为412.484 N,与完整试样最大弯曲载荷相比差距不足1%。研究表明,动态定向策略成型质量优于传统竖直定向策略。

关键词:机械臂;熔融沉积成型;3D打印;成型策略;成型质量;共形打印

中图分类号:TH161+.1TP242.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)01-0114-10

Influence of dynamic nozzle orientation on robotic-arm 3D printed part quality

ZHANG Qisheng^{1,2}, ZHAO Dongmei^{1,2}, AIYITI Wurikaixi^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Key Laboratory of Additive Remanufacturing Technology of Xinjiang, Urumqi 830017, China)

Abstract: To address the poor surface quality, low mechanical performance and interference is prone to occur during in-situ repair printing when conventional three-axis fused-deposition modelling is used for curved thin-shell parts, a multi-degree-of-freedom robotic-arm 3D printing platform was built. By solving surface path point normal vectors in real-time using gradient vector formulas and converting them into end-effector attitude angles, the platform dynamically adjusted the nozzle axis orientation to align with the deposition surface normal. Furthermore, the effects of two forming strategies—vertical nozzle orientation and dynamic orientation on specimen surface quality and flexural load-bearing performance were investigated. First, surface accuracy produced by each strategy was compared on inclined planes at 0°, 15°, 30° and 45°, and dynamic orientation was further employed to achieve high-quality printing on steeply curved surfaces. Subsequently, the flexural performance of curved specimens fabricated with both strategies was analysed. Finally, dynamic orientation was exploited to realise in-situ repair of damaged curved regions. The results show that the surface roughness of vertically oriented specimens increases significantly with tilt angle during conformal printing on inclined planes, whereas specimens printed with dynamic orientation maintain constant roughness across all angles. For curved architectures, dynamic orientation raises the maximum flexural load by 8.15%, 4.62% and 5.91% along X, Y and Y-X directions, respectively, relative to vertical orientation. Moreover, curved-layer slicing combined with dynamic orientation yields a maximum Y-direction flexural load of 528.867 N m showing an improvement of 184.57% over 185.845 N obtained with conventional planar-layer slicing.

基金项目:新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2025D04009)

通信作者:乌日开西·艾依提, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为增材制造(3D打印)技术

收稿日期:2025-10-26

引用格式:章其胜, 赵冬梅, 乌日开西·艾依提. 喷头动态定向成型对机械臂3D打印成型件质量的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(1): 114–123.

ZHANG Qisheng, ZHAO Dongmei, AIYITI Wurikaixi. Influence of dynamic nozzle orientation on robotic-arm 3D printed part quality[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 114–123.

In in-situ repair experiment, the repaired specimen achieves a maximum flexural load of 412.484 N, differing by less than 1% from that of the intact counterpart. The study demonstrates that dynamic-orientation strategy provides superior forming quality compared with the traditional vertical-orientation approach.

Keywords: robotic arm; fused deposition modeling; 3D printing; forming strategy; forming quality; conformal printing

薄壳结构具有承载能力强、质量轻等优良特性,已被广泛应用于航空航天、车辆工程及生物医疗领域^[1-3]。然而,面对具有复杂几何特征的薄壳结构制造需求时,传统的制造工艺如铸造、冲压等存在显著挑战,主要表现为复杂曲面模具的开发周期长、制造成本高、模型易变形以及材料利用率低等问题^[4,5]。此外,由于这类结构壁厚较小、在实际工况中易发生损伤与失效行为,严重影响结构的完整性与功能可靠性。因此,发展高效的修复或更换策略对保障结构安全运行具有重要意义^[6]。相较于整体更换,修复技术不仅能显著恢复结构性能,还具备更优的经济性与可持续性^[7]。

增材制造技术又称3D打印,是一种基于三维数字模型,通过材料逐层累积构建实体的先进制造技术^[8]。该技术凭借其一体化成型与近净成型能力,能高效制备具有复杂几何形状和定制化功能构件^[9-10],为薄壳结构制造提供了一种有效方法。其中熔融沉积成型(FDM)因其材料适应性广、成本低等优势,已成为制备聚合物及非金属材料薄壳结构的方式之一^[11]。然而,传统三轴FDM打印技术通常基于2.5轴运动结构和水平分层策略,在成型曲面薄壳结构时易产生阶梯效应,导致表面质量降低^[12-13]。

为克服上述限制,多自由度3D打印技术提供了可行的解决方案。该技术通过动态调整喷头方向变化,显著提升了制造灵活性与质量^[14-16]。Zhao等^[14]研制了一种Delta并联式3D打印平台,成功实现在曲面上打印船舶型薄壁零件。Jing等^[14]通过将打印平台安装在六自由度机械臂末端,实现了空心薄壁零件的无支撑成型。黄志勇等^[17]通过在多自由度机械臂末端夹持打印喷头,实现了空间复合路径打印,有效提升了结构件的力学性能。Sun等^[18]将六自由度机械臂与二轴翻转平台相结合,实现了假肢接受腔的Z轴力学性能增强。尽管多自由度3D打印技术已得到多方面探索,然而针对聚合物材料结构修复方面的应用研究仍相对较少。

本文基于六自由度机械臂3D打印平台,首先研究了喷头竖直定向与动态定向在0°、15°、30°、45°倾斜面上成型件表面精度,其次通过喷头动态定向

策略,实时调整打印喷头位姿,使其始终与沉积表面保持垂直,实现了大倾角曲面共形打印,显著提升了打印质量。最后分析了不同成型策略与打印路径对曲面试样弯曲性能的影响,通过喷头动态定向策略开展了缺损构件的原位修复实验,通过三点弯曲试验对修复试样与完整试样的弯曲强度进行对比分析,验证了该修复方法的可行性与有效性。

1 实验部分

1.1 机械臂3D打印平台

搭建的机械臂3D打印平台如图1所示,打印平台主要由运动机构和材料挤出机构组成,运动机构采用六自由度机械臂HSR-CR605,其臂展为785 mm,重复定位精度为 ± 0.02 mm,额定负载为5 kg,可满足大尺寸变角度的打印需求。材料挤出机构由步进电机、打印喷头和温度控制器组成。

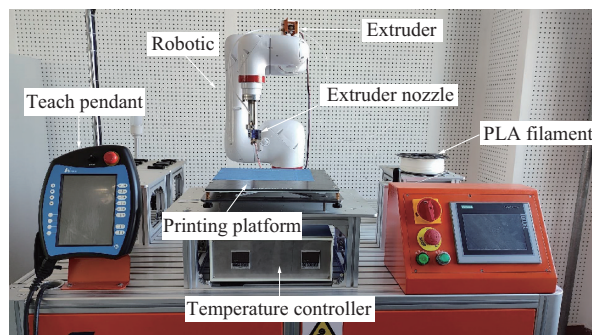


图1 机械臂3D打印平台

Fig. 1 3D printing platform with robotic arm

1.2 试样制备与实验设计

采用三维建模软件设计了尺寸为50 mm×30 mm×2 mm的斜面薄壳试样,扫描路径如图2所示。在不同倾斜角度斜面,对比喷头竖直定向和喷头动态定向两种不同打印策略对倾斜面薄壳成型试样表面粗糙度的影响。

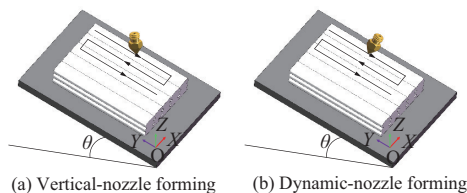


图2 喷头竖直定向成型和动态定向成型

Fig. 2 Vertical-nozzle forming and dynamic-nozzle forming

而后,为系统评估动态定向策略在成型曲面结构时的成型精度,设计了一种大倾角曲面,其三维尺寸示意图如图3所示。通过动态调整喷头方向,对其进行大倾角曲面的成型。

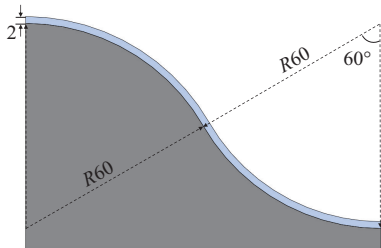


图3 大倾角曲面三维尺寸图

Fig. 3 Three-dimensional size diagram of a high-angle curved surface

为进一步探究不同成型策略在曲面成型中力学性能差异,设计了一种小倾角曲面试样,其三维尺寸示意图如图4a所示。针对小倾角曲面试样,采用了喷头竖直定向和喷头动态定向两种策略以及三种扫描路径进行成型对比:(1) X 向平行路径,所有轨迹均沿 X 轴方向;(2) Y 向共形路径,轨迹沿 Y 轴方向并贴合曲面曲率;(3) X - Y 交叉共形路径,先沿 Y 向曲线轮廓打印,再叠加 X 向平行路径。最后通过喷头动态定向策略开展了缺损试样的原位修复实验,缺损区域尺寸示意图如图4b所示。实验过程中采用实心填充,填充方式为直线往复式填充,其他成型工艺参数见表1。

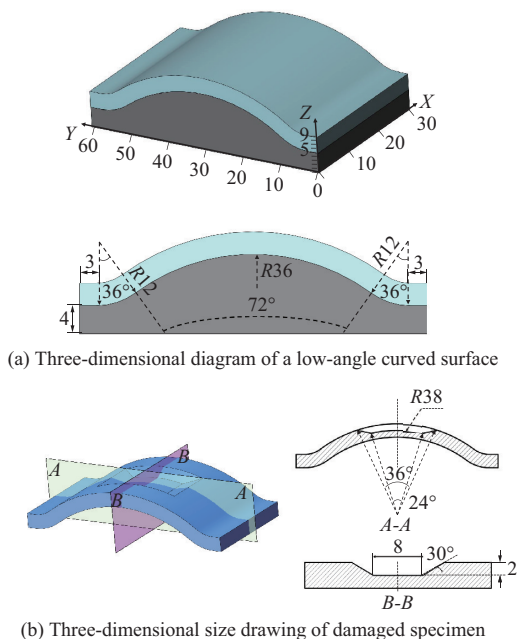


图4 小倾角曲面及其缺损试样三维尺寸图

Fig. 4 Three-dimensional size drawing of a gentle inclination curved surface and its defective specimen

表1 多自由度机械臂3D打印成型工艺参数

Tab. 1 3D printing process parameters for multi-DOF robotic arm

Nozzle temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Nozzle diameter/mm	Layer height/mm	Print speed/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Filament feed speed/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
210	0.6	0.3	5	0.6

2 曲面共形打印路径生成技术

对于具有曲面特征的结构,传统三轴3D打印机受限于平面分层策略,易导致成型表面质量下降;而多轴3D打印可采用曲面分层方法,并动态调整喷头方向,使其始终与曲面法向量对齐,从而提高成型精度。然而,曲面分层策略也增加了路径规划的复杂性。曲面共形打印的路径规划主要涉及三个参数:分层厚度、扫描路径方向及机械臂末端姿态。如图5a所示,分层厚度由层高 h 确定,扫描路径沿曲面轮廓线方向规划,由图中橙色虚线所示。并可通过调整打印道宽 b 与扫描间距 L 合理控制相邻熔融道之间的搭接率。机械臂末端姿态由各路径点处的法向量决定,其准确求解对保证打印质量、避免喷头与已打印结构发生干涉尤为关键。

如图5b所示,曲面上点 P 的法向量本质上是该点处曲面的垂直方向。对于空间曲面 $F(X,Y,Z)$ 上路径点 P 的法向量 $N(a,b,c)$ 由空间曲面 $F(X,Y,Z) = 0$ 的梯度给出,梯度定义见式(1)。

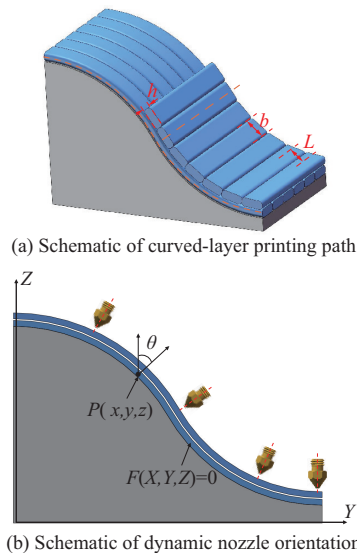


图5 曲面分层打印路径生成

Fig. 5 Curved-layer printing path generation

$$\nabla F = \left(\frac{\partial F}{\partial X}, \frac{\partial F}{\partial Y}, \frac{\partial F}{\partial Z} \right) \quad (1)$$

式中: $\frac{\partial F}{\partial X}$ 、 $\frac{\partial F}{\partial Y}$ 、 $\frac{\partial F}{\partial Z}$ 分别是函数 $F(X,Y,Z) = 0$ 关于 X 、 Y 、 Z 的偏导数。

而后将 P 点坐标 (x, y, z) 带入梯度 ∇F 中,得到该点法向量 $N(a, b, c)$,见式(2)和式(3)。

$$\begin{cases} a = \frac{\partial F}{\partial X}(x, y, z) \\ b = \frac{\partial F}{\partial Y}(x, y, z) \\ c = \frac{\partial F}{\partial Z}(x, y, z) \end{cases} \quad (2)$$

$$N = \left(\frac{\partial F}{\partial X}(x, y, z), \frac{\partial F}{\partial Y}(x, y, z), \frac{\partial F}{\partial Z}(x, y, z) \right) \quad (3)$$

得到空间曲面上任一点 P 的法向量,为便于计算机械臂末端偏转角度 θ ,使打印基体的长度与机械臂的 Y 轴平行,宽度与机械臂的 X 轴平行,设机械臂末端姿态为 $(0, 0, \theta)$,其中 θ 为与绕 X 轴旋转角度,同时将 P 的法向量 $N(a, b, c)$ 进行单位化得 N_{unit} ,见式(4)。

$$N_{\text{unit}} = \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}, \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}, \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right) \quad (4)$$

且图示中的角度 θ 可以转换为单位法向量 N_{unit} 与 Z 轴上的单位向量 $e(0, 0, 1)$ 的夹角,其值可以通过点积来计算,见式(5)和式(6)。

$$\cos \theta = \frac{(0, 0, 1) \cdot N_{\text{unit}}}{\|(0, 0, 1)\| \|N_{\text{unit}}\|} = \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (5)$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right) \quad (6)$$

计算得到打印路径上任意一点 P 的法向量,在完成单层打印后,需将当前空间曲面沿法向量方向偏移一个层高距离以获得下一打印层的基准曲面。该偏移过程中,曲面上每一点的空间坐标发生变化,但其局部法向姿态保持不变。对任一点 $P(x, y, z)$,及其单位法向量 N_{unit} ,设偏移后对应点 P_1 坐标为 (x_1, y_1, z_1) ,计算公式见式(7)和式(8)。

$$(x_1, y_1, z_1) = (x, y, z) + h \cdot N_{\text{unit}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_1 = x + h \cdot \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \\ y_1 = y + h \cdot \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \\ z_1 = z + h \cdot \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \end{cases} \quad (8)$$

3 结果与讨论

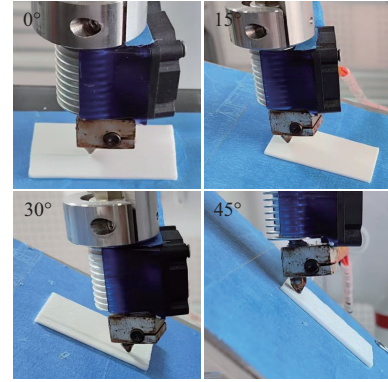
3.1 不同成型策略对斜面薄壳成型精度影响

在相同的实验环境和成型工艺参数及打印系

统稳定条件下,采用白色聚乳酸(PLA)丝材开展喷头竖直定向成型和喷头动态定向成型两种策略的成型实验。

3.1.1 喷头竖直定向成型

不同角度倾斜面上喷头竖直定向成型过程如图6a所示,对其成型试样表面通过超景深显微镜进行观察分析,测量其表面粗糙度,得到不同角度倾斜面上各表面平均粗糙度变化趋势如图6b所示,不同角度倾斜面上的三维形貌图及其表面粗糙度如图7所示。



(a) Vertical forming process

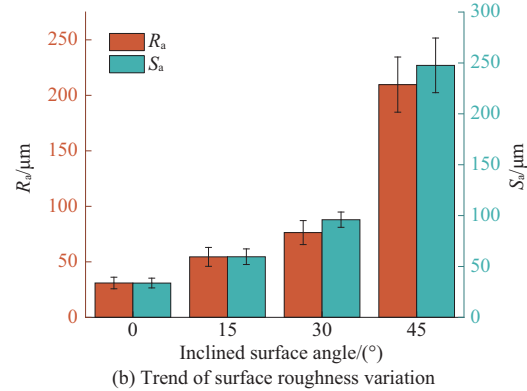


图6 喷头竖直定向时在不同角度斜面上成型过程及粗糙度变化
Fig. 6 Forming process and roughness variation on inclined surfaces at different angles when nozzle is vertically oriented

统的轮廓算术平均高度(R_a)是二维轮廓线参数难以全面表征,故本研究采用表面算术平均高度(S_a)以更客观地评价其成型表面质量。

FDM成型试样表面具有显著的各向异性,即在不同方向上(如平行于层纹和垂直于层纹)的粗糙度差异较大。如图6b、图7所示,随着斜面倾角的增大,喷头竖直定向策略成型试样的 S_a 值显著增加。在 0° 水平面下, S_a 值为 $33.70 \mu\text{m}$;而当倾角增至 15° 、 30° 和 45° 时,其 S_a 值分别上升至 59.58 、 95.96 、 $247.62 \mu\text{m}$,分别增加了 76.8% 、 184.75% 、 634.78% 。这是因为成型过程中喷头方向始终竖直向下,随着斜面倾

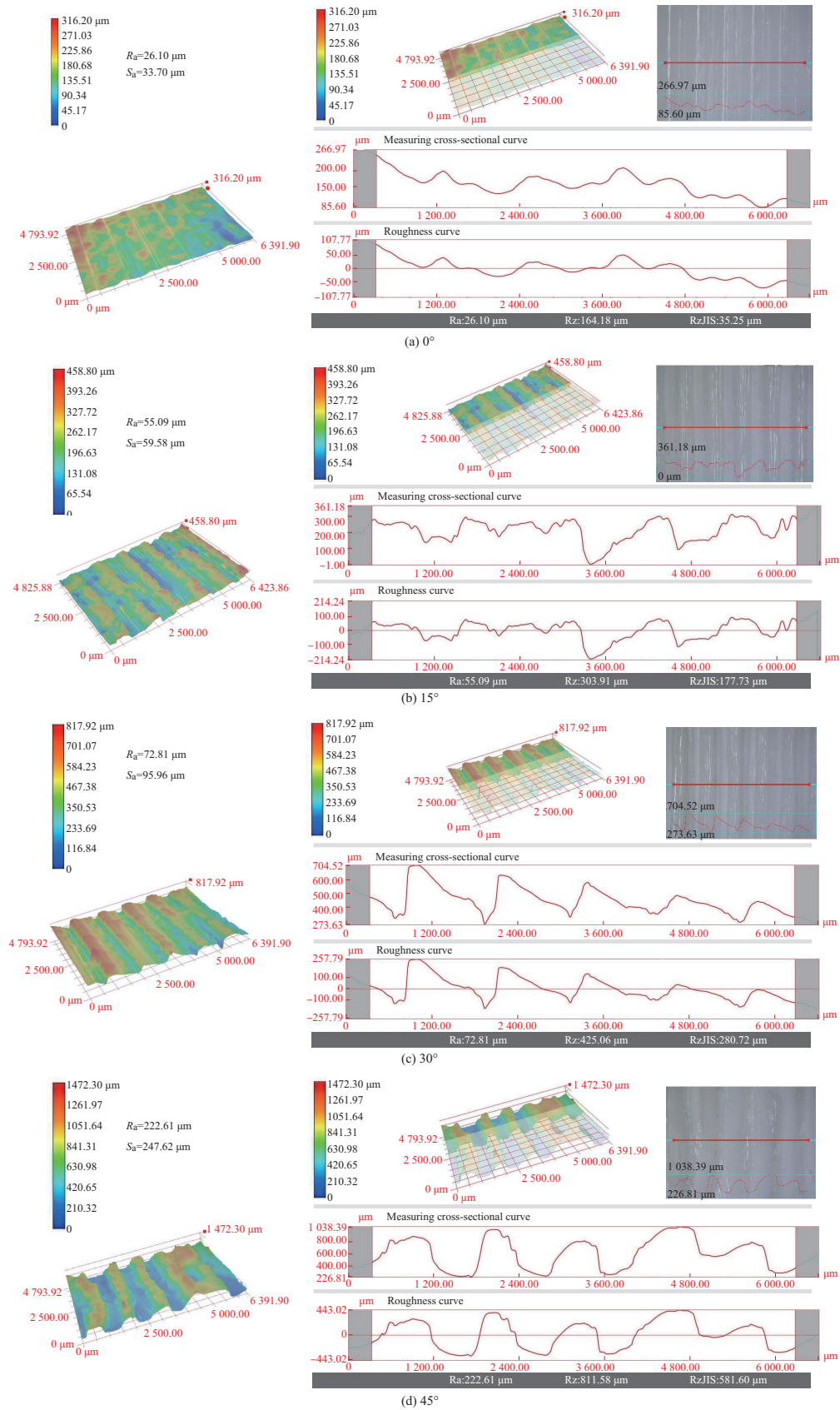


图7 喷头竖直定向时不同角度(0°、15°、30°、45°)倾斜面上的三维形貌图及其表面粗糙度

Fig. 7 3D morphology maps and surface roughness on inclined surfaces at different angles (0°, 15°, 30°, 45°) when nozzle is vertically oriented

角增大,喷头左右两端与成型面之间的间隙出现差异。当喷头沿Y轴正向移动时,打印方向为由下至上,材料在挤出力和重力共同作用下仍发生下淌,加之喷头右侧间隙增大,挤出的单道材料高度异常;而当喷头沿Y轴负向移动时,打印方向为由上至下,熔融材料在重力作用下向下流动,同时喷头左端对右侧材料产生挤压,导致挤出材料形貌失控^[9],造成相邻熔融材料之间搭接不良、高度不一,最终导致试样表面粗糙度显著增加。

3.1.2 喷头动态定向成型

不同角度倾斜面上喷头动态定向成型过程如图8a所示,对其成型试样表面通过超景深显微镜进行观察分析,测量其表面粗糙度,得到不同角度倾斜面上各表面平均粗糙度变化趋势如图8b所示,不同角度倾斜面上的三维形貌图及其表面粗糙度如图9所示。

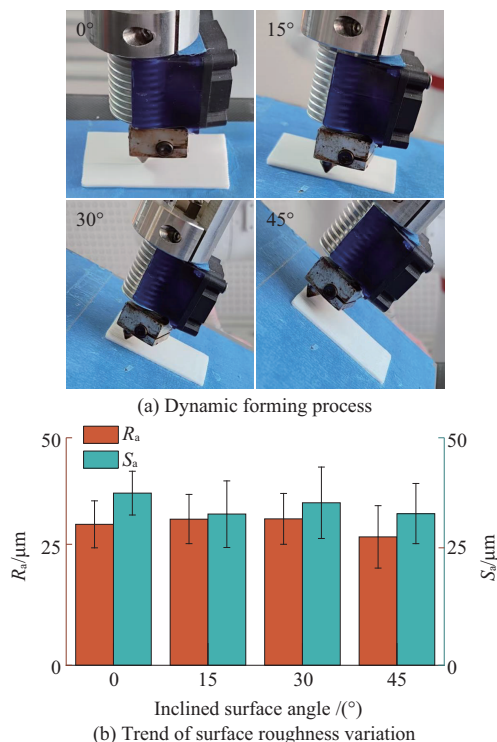


图8 喷头动态定向时在不同角度斜面上成型过程及粗糙度变化
Fig. 8 Forming process and roughness variation on inclined surfaces at different angles when nozzle is dynamically oriented

如图8b和图9所示,随着斜面倾角的增大,喷头动态定向策略成型试样的 S_a 值保持稳定,未出现随斜面角度增大而 S_a 值增高。这是因为在打印过程中,喷头姿态始终动态保持与斜面法向一致,使得喷头左右两端与成型面之间的间隙保持一致。同时,在挤出力作用下,熔融材料与基面的接触面积

增大,有效抑制了因重力引起的材料流淌,从而使得相邻两道熔融材料之间搭接紧密规整,最终获得较好的表面成型质量。

3.2 动态定向策略对曲面成型精度分析

上述实验表明,在非平面轮廓打印过程中,喷头竖直定向成型方式易出现打印质量下降问题;尤其在轮廓倾角过大的情况下,还存在喷头与打印平台或已成型部件发生干涉的风险。相比之下,喷头动态定向成型能够有效避免上述问题。如图10所示,该方式通过实时调整喷头方向,使其始终与曲面法向方向保持一致,从而实现大倾角曲面的共形打印,显著提高了曲面成型精度。

3.3 不同成型策略对曲面试样成型质量影响

上述实验结果表明,在斜面成型过程中,采用喷头动态定向策略所制备试样的表面精度显著优于采用竖直定向策略成型的试样。对于曲面试样,动态定向策略实现了大倾角曲面的共形打印,显著提高了曲面成型精度。然而,在实际工程应用中,构件的力学性能是评价其服役可靠性的关键指标。因此,为系统评估喷头动态定向与喷头竖直定向策略在曲面共形打印中的综合性能差异,本研究进一步制备了曲面弯曲试样进行对比分析。此外,为明确多轴打印相较于传统方法的优势,还将传统平面分层打印试样作为对照组。如图11所示为不同打印策略的示意图。

为对比曲面分层与传统平面分层策略对成型件表面质量的影响,对制备试样的表面进行观察分析。如图12a所示,采用传统平面分层策略成型的试样表面呈现显著的阶梯状纹理及几何偏差。如图12b至图12d所示,采用喷头动态定向的曲面分层策略通过实时调整喷头姿态,使其始终与局部曲面法向保持一致,从而确保了打印路径的连续性,有效抑制了因平面分层引起的表面误差。

为了进一步探究不同分层策略对曲面试样阶梯效应的影响,通过超景深显微镜对成型试样的侧面进行观察分析。如图13a所示,使用传统平面分层策略打印的弯曲试样呈现明显的阶梯效应。如图13b至图13d所示,采用曲面分层策略打印的弯曲试样在三种扫描路径上均具有较好的轮廓连续性。结果表明,在打印具有曲面几何特征的结构时,通过动态调整喷头方向,使喷头始终与沉积表面保持垂直,可以有效缓解阶梯效应明显的问题。

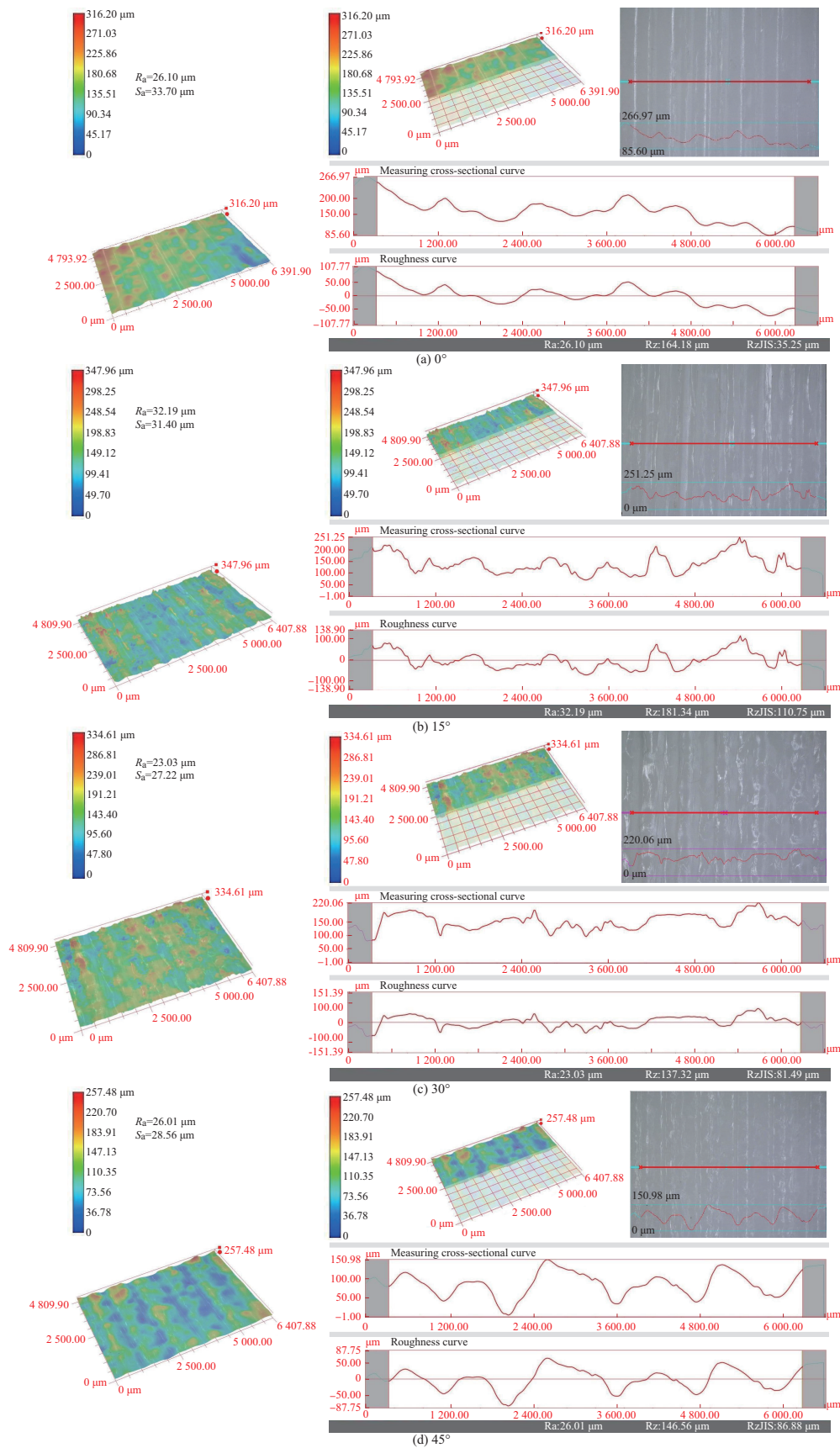
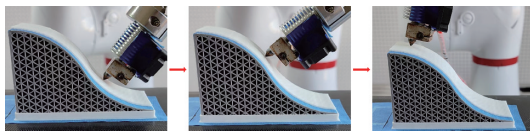


图9 喷头动态定向时在不同角度(0°、15°、30°、45°)倾斜面上的三维形貌图及其表面粗糙度

Fig. 9 3D morphology maps and surface roughness on inclined surfaces at different angles (0°, 15°, 30°, 45°) when nozzle is dynamically oriented



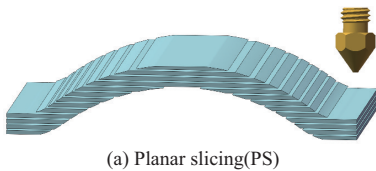
(a) Formation process of high-curvature curved specimens



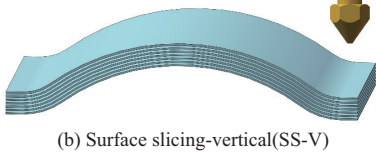
(b) Printed high-curvature curved specimen image

图10 大倾角曲面试样成型过程和打印成品图片

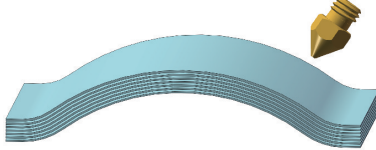
Fig. 10 Formation process of high-curvature curved specimens and printed specimen image



(a) Planar slicing(PS)



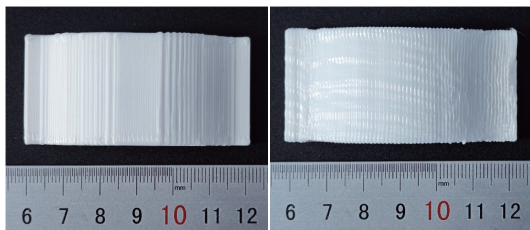
(b) Surface slicing-vertical(SS-V)



(c) Surface slicing-dynamic(SS-D)

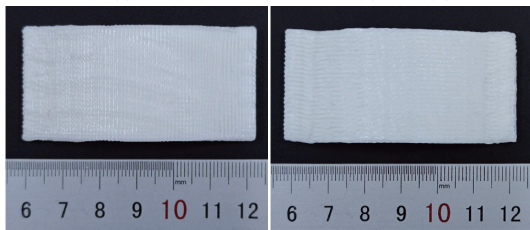
图11 曲面试样不同打印方式示意图

Fig. 11 Schematic diagram of different printing strategies for curved specimens



(a) PS

(b) SS-D(X)

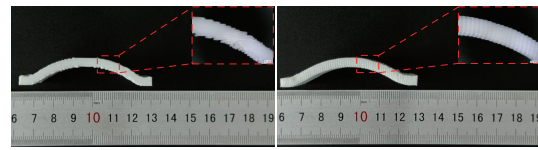


(c) SS-D(Y-X)

(d) SS-D(Y)

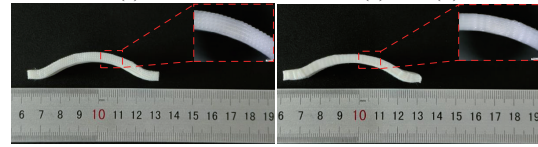
图12 不同分层策略与打印路径对曲面试样表面质量的影响

Fig. 12 Influence of different slicing strategies and printing paths on surface quality of curved specimens



(a) PS

(b) SS-D(X)



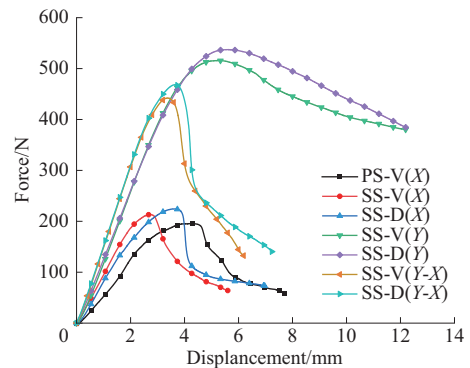
(c) SS-D(Y-X)

(d) SS-D(Y)

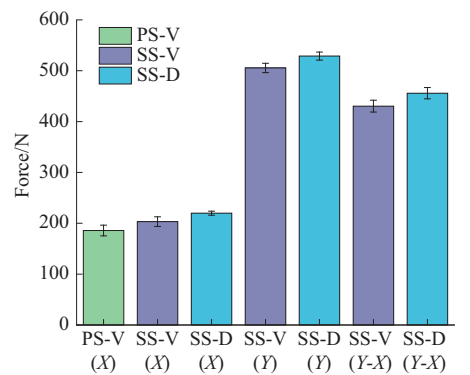
图13 不同分层策略与打印路径对曲面试样阶梯效应的影响

Fig. 13 Influence of different slicing strategies and printing paths on staircase effect of curved specimens

此外,为探究不同打印方式与不同扫描路径对曲面试样力学性能的影响,将以上7种打印方式打印的弯曲试样通过万能力学试验机进行三点弯曲性能测试,跨距为52 mm,加载速度为2 mm/min,五个试样为一组并取平均值。得到力-位移曲线如图14a所示,曲面试样的弯曲力的结果如图14b所示。



(a) Force-displacement curves of curved specimens



(b) Maximum bending-load results for curved specimens

图14 曲面试样弯曲实验结果

Fig. 14 Bending-test results of curved specimens

如图14a、图14b所示,相较于曲面分层打印(SS),传统平面分层打印(PS)所得试样的最大弯曲载荷最低,仅为185.845 N。而在相同扫描路径下,采用喷头动态定向成型(SS-D)的试样最大弯曲载荷

达到219.825 N,较PS方式提高了18.28%。这一差异主要源于PS策略中打印路径间断导致力学性能下降;而SS-D策略打印路径连续,且喷头始终与曲面法线对齐,同时挤出力在法向上施加正压力,有助于提升丝材成型质量和界面结合,最终改善弯曲性能。

在不同打印路径中, Y 方向成型的试样弯曲性能最优, YX 交叉路径次之, X 方向最差。这是由于 Y 方向打印路径与加载方向一致,充分发挥了丝材本体强度;而 X 方向路径与载荷方向垂直,试样强度主要依赖于层间结合力,因此性能显著降低,该结果与既有研究结论一致^[20]。

在曲面分层打印中,动态定向策略(SS-D)在各路径下的弯曲性能均优于竖直定向策略(SS-V)。SS-V在 X 、 Y 、 YX 方向的最大弯曲载荷分别为203.258、505.491、430.386 N,而SS-D在 X 、 Y 、 YX 方向的最大弯曲载荷分别为219.825、528.867、455.811 N,分别提高了8.15%、4.62%、5.91%。值得注意的是,SS-D(Y)相比PS试样,弯曲力提高了184.57%。

对于曲面弯曲试样,曲面分层打印方式的弯曲性能优于平面分层打印,而在曲面分层打印中,喷头动态定向策略(SS-D)打印的试样较采用喷头竖直定向策略(SS-V)的更具更优秀的弯曲性能。

3.4 原位修复打印成型实验

复合材料凭借高强度、轻量化等优势,已成为航空航天与高端装备制造等领域的关键材料。然而,该类材料在复杂服役环境下易因冲击、疲劳损伤等出现结构缺陷,因此实现高效可靠的修复尤为重要。目前,原位增材修复研究在金属再制造与生物医用材料领域已取得显著进展,相比之下,复合材料结构的原位修复相关研究尚处于发展阶段。

图15a、图15b为制备的完整和有缺陷的曲面薄壳试样。缺陷为试样中心区域预先设置的沟槽状损伤,以模拟实际工况中可能出现的结构缺损。基于机械臂3D打印平台,采用动态定向策略对损伤试样进行原位修复,图15c为经原位修复后的试样形貌。为便于区分修复区域与基体材料,损伤试样选用蓝色PLA丝材打印,修复材料则采用白色PLA丝材,两种颜色的PLA丝材均为同一厂家同一规格的丝材,而且根据ISO 178:2019分别制备了白色和蓝色PLA丝材的弯曲试样,并使用万能力学试验机根据GB/T 9341-2008标准进行三点弯曲测试,测试结果表明两种颜色的PLA弯曲性能相当。

为便于观察修补材料与缺损表面之间的结合

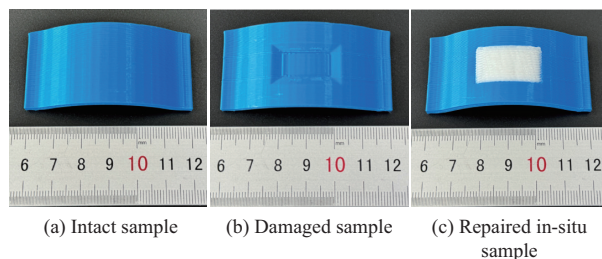


图15 弯曲测试前制备的试样

Fig. 15 Manufactured specimens before bending testing

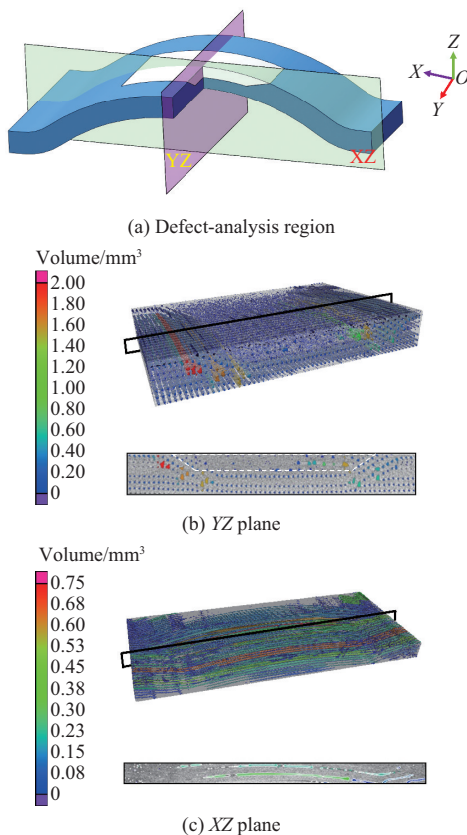


图16 修复试样内部孔隙缺陷分析

Fig. 16 Analysis of internal pore defects in repaired specimen

质量和试样内部缺陷,采用微米X射线检测设备对修复后的试样内部缺陷进行分析,选取位置为修复试样内部长方体,其具体内部缺陷分布情况如图16所示。图16b、图16c表明,修补材料成功填充于试样缺损区域(白色虚线区域),与基体结合界面致密,未出现明显缺陷,从而有效改善了缺损构件的力学性能。为系统评估原位修复3D打印技术对试样力学性能的恢复效果,对完整试样和修复后试样进行三点弯曲实验,实验参数与前述曲面试样的三点弯曲实验参数保持一致,如图17所示。由图17可见,完整试样的最大弯曲载荷为416.387 N,经原位修复处理后,修复试样的最大弯曲载荷达到412.484 N,较完整试样相比差距不足1%。该结果证实,所采用

的机械臂3D打印原位修复方法可有效恢复损伤结构的弯曲性能。

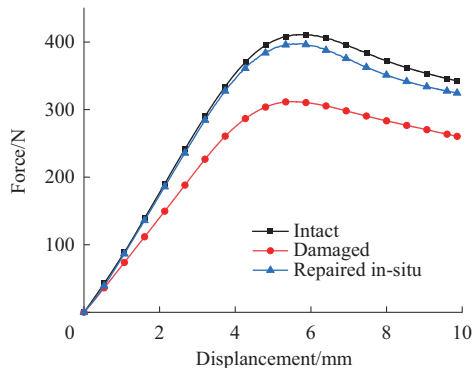


图17 完整、损伤和原位修复试件的力-位移曲线

Fig. 17 Force - displacement curves of intact,damaged and in-situ repaired specimens

4 结论

(1)搭建了一种六自由度机械臂3D打印平台,研究了不同打印策略对薄壳件成型质量的影响,并采用动态定向策略实现了缺损构件的原位修复。实验结果表明,动态定向策略成型质量优于传统竖直定向策略,通过动态定向策略原位修复后试样最大弯曲载荷与完整试样最大弯曲载荷相当。

(2)竖直定向策略中,随着斜面倾角增加,试样的 S_a 值逐渐增高。在 0° 水平面的 S_a 值为 $33.70\ \mu\text{m}$,而在 15° 、 30° 和 45° 斜面上成型试样的 S_a 值分别为 59.58 、 95.96 、 $247.62\ \mu\text{m}$,分别增高了 76.8% 、 184.75% 和 634.78% 。而动态定向策略中,随着斜面倾角增加,成型试样的 S_a 值均维持在较低水平,在 15° 、 30° 和 45° 的试样的 S_a 值为 28.56 、 31.4 、 $27.22\ \mu\text{m}$ 。

(3)曲面试样成型中,曲面分层成型试样的表面精度与最大弯曲载荷均优于传统平面分层成型方式。传统平面分层(PS)试样的最大弯曲载荷为 $185.845\ \text{N}$,而曲面分层结合动态定向成型在Y方向打印[SS-D(Y)]的最大弯曲载荷达到 $528.867\ \text{N}$,提高了 184.57% 。在曲面分层成型中,喷头动态定向策略(SS-D)在各打印路径下均优于喷头竖直定向(SS-V),X、Y、YX方向分别提高 8.15% 、 4.62% 和 5.91% 。

(4)通过对曲面缺损模型开展原位修复实验,验证了原位修复对构件力学性能的高度恢复能力。三点弯曲实验结果表明,完整试样的最大弯曲载荷为 $416.387\ \text{N}$,而缺陷试样经原位修复后,修复试样的最大弯曲载荷达到 $412.484\ \text{N}$,较完整试样相比差距不足 1% 。

参考文献

- [1] BHUVANESH KUMAR M, SATHIYA P. Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 159. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107228.
- [2] MA J Y, CHAI S B, CHEN Y. Geometric design, deformation mode, and energy absorption of patterned thin-walled structures[J]. Mechanics of Materials, 2022, 168. DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104269.
- [3] 赵冬华, 张国权, 阮凯程, 等. 面向航空航天轻量化结构的机器人化增材制造技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2024, 67(19): 71-91. ZHAO Donghua, ZHANG Guoquan, RUAN Kaicheng, et al. Research progress on robotic additive manufacturing technology towards aerospace lightweight structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(19): 71-91.
- [4] ZHAO X C, MA W J, AIYITI W, et al. Investigation of influence of printing modes on the quality of 6-PSS FDM 3D printed thin-walled parts[J]. Results in Engineering, 2023, 17. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.100926.
- [5] BAO Y, WANG B, HE Z X, et al. Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: A review[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(3): 10-26.
- [6] RASHVAND K, EDER M A, SARHADI A. In-situ and adhesive repair of continuous fiber composites using 3D printing[J]. Additive Manufacturing, 2024, 80. DOI: 10.1016/j.addma.2024.103975.
- [7] ZINNO R, HAGHSHEENAS S S, GUIDO G, et al. The state of the art of artificial intelligence approaches and new technologies in structural health monitoring of bridges[J]. Applied Sciences, 2023, 13(1). DOI: 10.3390/app13010097.
- [8] ZOHDHI N, YANG R. Material anisotropy in additively manufactured polymers and polymer composites: A review[J]. Polymers, 2021, 13(19). DOI: 10.3390/polym13193368.
- [9] JIANG J C, MA Y S. Path planning strategies to optimize accuracy, quality, build time and material use in additive manufacturing: A review[J]. Micromachines, 2020, 11(7). DOI: 10.3390/mi11070633.
- [10] 战丽, 李莞, 李久振, 等. 响应面法优化 CGF/PEEK 增材制造试样冲击性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 89-95. ZHAN Li, LI Wan, LI Jiuzhen, et al. Optimization of impact performance of CGF/PEEK additive manufactured samples using response surface methodology[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 89-95.
- [11] BOCHNIA J, BLASIAK M, KOZIOR T. A comparative study of the mechanical properties of FDM 3D prints made of PLA and carbon fiber-reinforced PLA for thin-walled applications[J]. Materials, 2021, 14(22). DOI: 10.3390/ma14227062.
- [12] LI Y M, HE D, YUAN S Q, et al. Vector field-based curved layer slicing and path planning for multi-axis printing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 77. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102362.