DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4133

基于激光选区熔化技术的金属悬垂圆孔结构无支撑成形工艺优化与质量研究

王　迪[1],李浩然[1],胡伟南[1],牛吉梅[2],刘林青[1],马　迎[1]
(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院,广东 广州 510641; 2. 广州城市理工学院,广东 广州 510800)

摘　要:基于激光选区熔化(SLM)技术制造的随形冷却模具,凭借其优异的冷却性能,能够显著提高加工效率,有效降低生产成本,成为未来注塑成型模具的重要发展方向,但目前在使用 SLM 技术成形随形冷却模具内部的圆形流道方面仍存在诸多挑战。在 SLM 成形时,随形冷却模具内部圆形流道的结构主要表现为悬垂圆孔结构,若直接使用传统工艺策略成形悬垂圆孔结构易出现翘曲、粘粉等缺陷,同时由于随形冷却模具内部流道复杂的特点,其内部流道无法通过添加支撑辅助成形。采用在模具外侧添加支撑结构的方法,可调整模具成形角度,增强悬垂圆孔结构自支撑性,但会增加额外成形时间与成形材料,导致生产成本增高。优化悬垂圆孔结构无支撑成形工艺,实现在不添加支撑结构的前提下满足随形冷却模具对流道成形质量要求,能够有效降低随形冷却模具生产成本并获得高质量成型件。本文对金属悬垂圆孔结构成形工艺策略进行优化,以 316L 不锈钢悬垂圆孔结构为对象,分析了工艺策略、孔径对悬垂圆孔成形质量的影响。采用一种基于加工层角度自适应的下表面工艺区域划分策略,研究该工艺区策略对于无支撑金属悬垂圆孔成形的适用性,并使用该工艺制造冷却模具样件,对成件的成形质量进行分析。结果表明采用基于加工层角度自适应的下表面工艺区域划分策略可明显抑制成形过程中的翘曲行为。使用该工艺策略成形的随形水冷模具样件无明显质量缺陷,内部流道的表面质量与成形精度满足使用要求。

关键词:激光选区熔化;悬垂圆孔结构成形;无支撑成形;工艺优化;成形质量;随形水冷模具

中图分类号:TG665　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)08-0752-11

Research on the Optimization and Quality of a Support-free Forming Process for Metal Overhanging Circular Hole Structures Based on Laser Selective Melting Technology

WANG Di[1], LI Haoran[1], HU Weinan[1], NIU Jimei[2], LIU Linqing[1], MA Ying[1]
(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China)

Abstract: Conformal cooling molds manufactured via laser selective melting (SLM) technology can significantly improve processing efficiency and effectively reduce production costs because of their excellent cooling performance, making it an important development direction for future injection molding molds. However, there are still many challenges in using SLM technology to form circular flow channels inside conformal cooling molds. During SLM, the structure of the circular flow channel inside the conformal cooling mold mainly presents as an overhanging circular hole structure. Defects such as warping and powder sticking are likely to occur if the overhanging circular hole structure is formed directly via the traditional processing strategy. Moreover, owing to the complex characteristics of the internal flow channel, it cannot be formed by adding support assistance. By adding a support structure on the outside of the mold, the forming angle of the mold can be adjusted to enhance the self-supporting ability of the overhanging circular hole structure, but this increases the additional forming time and material, resulting in increased production costs. Optimizing the non-supporting forming

收稿日期:2024-07-16
基金项目:国家自然科学基金(52475349)
作者简介:王　迪,1986 年生,教授.研究方向为金属激光选区熔化技术.Email:mewdlaser@scut.edu.cn
通讯作者:牛吉梅,1975 年生,副教授.研究方向为增材制造及应用.Email:jimeiniu@163.com
引用格式:王迪,李浩然,胡伟南,牛吉梅,刘林青,马迎.基于激光选区熔化技术的金属悬垂圆孔结构无支撑成形工艺优化与质量研究[J].铸造技术,2024,45(8):752-762.
WANG D, LI H R, HU W N, NIU J M, LIU L Q, MA Y. Research on the optimization and quality of a support-free forming process for metal overhanging circular hole structures based on laser selective melting technology[J]. Foundry Technology, 2024, 45(8): 752-762.

中国知网　https://www.cnki.net

process of the overhanging circular hole structure to meet the quality requirements of the conformal cooling mold for runner forming without adding support structures can effectively reduce the production cost of the conformal cooling mold and obtain high-quality molded parts. In this study, the forming process strategy for metal overhanging circular hole structures was optimized. Taking the 316L stainless steel overhanging circular hole structure as the object, the influences of the process strategy and hole diameter on the forming quality of overhanging circular holes were analysed. A bottom surface process area division strategy based on the adaptive angle of the processing layer was adopted to study its applicability for the formation of unsupported metal overhanging circular holes. The process was then used to manufacture a cooling mold sample, and the forming quality of the finished part was analysed. The results show that the adaptive lower surface process area division strategy based on the processing layer angle significantly suppresses the warping behavior during the forming process. The conformal water-cooled mold sample formed via the optimized process strategy has no significant quality defects, and the surface quality and forming accuracy of the internal flow channel meet the requirements for use.

Key words: selective laser melting; overhanging round hole structure forming; unsupported forming; process optimization; forming quality; conformal water-cooled molds

激光选区熔化技术(selective laser melting, SLM)是金属增材制造领域的重要分支,常用于成形复杂结构金属零件。它利用三维模型的切片数据,采用高能量激光束扫描粉末床表面，局部熔化金属粉末,逐层叠加制造复杂零件[1]。该技术具有材料利用率高、成型精度高、设计自由度高与可成形复杂零件的优点,被广泛应用于模具制造、生物医学、航空航天等领域。相比减材制造技术,SLM 技术对成型内部结构复杂的零件具有更高的适用性。然而受限于成形原理,成形过程中热量分布不均匀、热变形与残余应力等问题使得 SLM 技术在制造薄壁结构、悬垂结构、锐角尖端结构等特定类型结构时面临质量挑战[2-4]。悬垂结构通常指在成形过程中成形角度相对水平方向超出某个角度阈值且在下方没有足够支撑的部分。由于悬垂结构下方缺少足够支撑,下方粉末的导热性较差,成形悬垂结构时凝固金属易在热应力作用下产生变形,导致挂渣、粘粉、翘曲等缺陷的产生[5]。对于 SLM 成形中低角度悬垂结构零件,可采用多种方法来减少翘曲等缺陷对成件质量的影响,目前常用方法有两种:①通过改进零件几何形状或调整零件成形方向,减少成形过程中低角度悬垂结构的出现；②优化成形工艺方法,通过添加辅助支撑或优化成形工艺参数,提高低角度悬垂结构的成形质量。

为改进零件几何形状或调整零件成形方向,刘杰等[6]以减小零件模型整体难成型悬垂面的面积为目标,建立成型方向的优化模型并利用遗传算法求解,最终使零件难成型悬垂面的面积从 555.12 mm^2 减小为 16.211 mm^2。Zhu 等[7]在使用 SLM 打印时通过优化内流道结构,发现脊形流道在表面质量和尺寸精度方面比圆形流道具有优势。对于优化成形工艺方面,目前较成熟的策略是软件识别模型低角度悬垂结构的悬垂下表面区域，并在该区域下方添加辅助支撑结构来减小热应力与阻止热应力导致的翘曲行为。添加辅助支撑结构会导致零件成形时间与材料成本增加,且零件内部的支撑结构难以去除[8],后处理难度大,并可能影响到最终成型件质量。因此近年来国内外研究者进行悬垂结构成形工艺方法的优化，在不添加支撑情况下提高悬垂特征结构的成形质量。低角度悬垂结构成形的主要缺陷是悬垂下表面粘粉、挂渣和悬垂结构翘曲变形。Feng 等[9]发现高能量密度对悬垂面表面质量具有恶化作用。Han 等[10]研究了激光功率和扫描速度两个与能量密度相关的参数对样件悬垂表面质量的影响，发现在相同的能量密度下,随着激光功率增加,悬垂面的表面质量呈下降趋势。Zhang 等[11]研究了扫描路径对 AlSi10Mg 悬伸试样残余应力和变形的影响,发现交替扫描路径相比单一的横向或竖向扫描路径引起的翘曲变形更小。刘婷婷等[12]研究了“Z”字形和岛式两种扫描策略下熔池行为与悬垂角度、成形质量之间的关系,发现相比“Z”字形扫描策略,岛式扫描策略下的熔池面积较小,熔池更为不稳定,悬垂面的粗糙度更高。根据各工艺参数对悬垂结构质量的影响,研究人员开始针对悬垂结构探索，设计特定工艺策略。Yuan 等[13]使用散焦激光打印获得球化和溅射效应得到抑制的结构层，该层作为水平悬垂结构的初始层,可以取代传统的支撑结构。Cloots 等[14]对 SLM 模型采取分割处理成形策略，将零件分割成内部和外壳区域并采用不同的工艺参数成形，通过在外壳使用针对悬垂结构优化过的工艺参数，最终成形斜面与水平方向夹角小于 35°的无支撑悬垂结构。

悬垂圆孔结构是一种典型悬垂结构，常见于随形冷却模具、换热器与发动机喷注器等增材制造零

中国知网　https://www.cnki.net

件内部流道[15-16]。悬垂圆孔各区域成形难度不同，在悬垂圆孔竖直向上方向，悬垂圆孔在结构上由无悬垂结构依次过渡到高角度悬垂结构、低角度悬垂结构与水平悬垂结构，且悬垂结构与水平方向夹角越小，翘曲和粘粉现象[17]越严重。对于悬垂圆孔成形，其低角度悬垂结构与水平悬垂结构的无支撑成形存在困难。对零件成形方向或者成形工艺进行优化，以便得到高质量悬垂圆孔。Mertens 等[18]通过仿真模型分析了不同工艺参数下悬垂结构熔池尺寸变化，根据悬垂结构不同位置的熔池尺寸大小将悬垂结构划分成不同的区域，采用不同工艺参数，在圆孔悬垂结构成形中获得了很好的优化效果。辛艳喜[19]以致密度、显微硬度为指标，考虑多种激光因素对成型铝合金悬垂圆孔质量的影响并优化悬垂圆孔工艺参数，将圆孔表面按照表面形貌划分为非悬垂区、倾斜悬垂区与水平悬垂区，各区域使用不同工艺参数组合成形，其整体成形质量相比使用单一工艺参数更高。

当前研究局限于工艺参数的优化及其对成形质量的影响，对工艺区域划分相关研究较少，且工艺区域划分规则与方法尚不明确。本研究采用了一种基于下表面划分准则成形低角度悬垂样件的工艺策略，基于下表面划分准则将悬垂结构切片划分下表面区域和内表面区域并使用不同工艺参数成形。通过该策略成形不同孔径的悬垂圆孔，并与单一工艺成形策略即传统策略成形悬垂圆孔对比，分析成形策略、孔径大小、圆孔不同悬垂角度对悬垂圆孔成形质量的影响，并进一步讨论该工艺策略对于悬垂圆孔成形的适用性。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

使用球形 316L 粉末作为实验材料，该金属粉末为长沙骅骝冶金粉末有限公司生产，粉末粒径范围在 15~53 μm，粉末形貌如图 1 所示，其化学成分如表 1 所示。

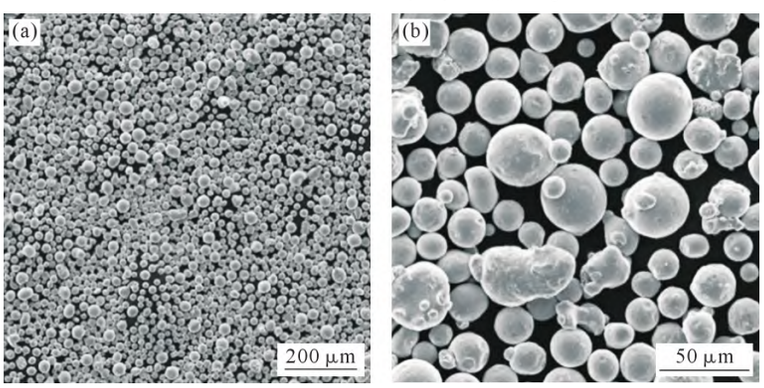


图 1 316L 粉末形貌：(a) 200 倍；(b) 1000 倍

Fig.1 Morphology of the 316L powders: (a) at 200x magnification; (b) at 1000x magnification

表 1 316L 粉末化学成分

Tab.1 Chemical composition of the 316L powder

(mass fraction/%)

C	Si	Cr	Mn	Mo	Cu	S	P	O	Ni	Fe
≤0.03	≤1.0	16~18	≤2.0	2.0~3.0	0.15~0.25	≤0.03	≤0.045	≤0.08	10~14	Bal.

1.2 实验设备

SLM 成形设备为广州雷佳增材科技有限公司所提供的 Dimetal-150，装备有 IPGYLR-500-WC 掺镱光纤激光器，其最大功率可达 500 W。同时配有高速高精度的 Scanlab 扫描振镜单元和 f-θ 透镜，成形精度高、稳定性强。该设备成形原理如图 2 所示，当成形缸下降一个切片厚度，粉末缸上升相同高度，随后柔性刮刀移动粉末缸最上层粉末，在成型缸表面铺设均匀粉层，多余粉末落入落粉缸中。光纤激光器产生的激光在扫描振镜控制下，沿零件切片轮廓扫描成型缸表层粉末，使粉末层熔融凝固并与基体结合。

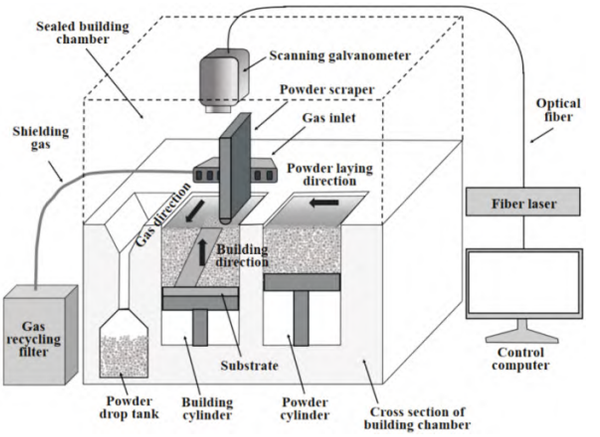


图 2 Dimetal-150 成形原理

Fig.2 Physical drawing of Dimetal-150

中国知网 https://www.cnki.net

1.3　基于下表面划分准则的区域划分原理

采用一种基于下表面划分准则的工艺策略来成形悬垂圆孔，该策略重点是基于下表面划分准则，将悬垂结构切片划分为下表面区域和内表面区域，并分别使用不同能量密度的工艺参数成形。具体划分准则为：悬垂结构部分的第 N 层切片，与该层向下 T 层即第 N-T 层进行比较，第 N 层相对第 N-T 层在成形方向上的悬空区域定义为下表面工艺区，其余部分定义为内表面工艺区。如图 3 所示，该工艺策略在倾斜角为 25°或 45°、向下层数 T=1或 T=2 的悬垂结构切片中得到的下表面工艺区长度不同，对第 N 层成形层其下表面工艺区的长度 l_n 的调控公式为：

$$l_n=hT\times\cot(a) \tag{1}$$

式中，h 为打印层厚；T 为向下比较层数；a 为成形层在圆孔上的倾斜角度。

由式(1)可知，下表面区域长度 l_n 与向下比较层数 T 成正相关。提高向下比较层数 T，可实现下表面工艺区域向切片内部的延伸，如图 3a 悬垂结构向下比较层数 T=2 时，相比图 3b 中 T=1 时下表面工艺区的长度 l_n 有所增加。由于悬垂结构切片悬空区域长度一定，因此向下表面工艺区的长度 l_n 增加导致下表面工艺区域向切片内部非悬空区域延伸。基于下表面划分准则的工艺策略成形悬垂样件，调节比较层数 T 大小划分，控制悬垂结构成形时下表面工艺区域的占比。此外下表面区域长度 l_n 随悬垂结构的倾斜角度减小而增加，使悬垂结构中成形难度较高的低角度悬垂位置具有较大的下表面工艺区域，实现加工层下表面工艺区长度随该层倾斜角度变化而改变的自适应调控。

1.4　实验方案

使用基于下表面划分准则的工艺策略与单一工艺参数工艺策略(传统工艺策略)分别成形试样。试样模型如图 4 所示，样件具有多个孔径为 3~15 mm 的悬垂圆孔，以探究孔径尺寸对不同工艺策略的悬垂圆孔成形能力的影响。基于下表面划分准则的工艺策略的不同区域所使用工艺参数如表 2 所示。使用传统成形工艺成形相同尺寸的圆孔样件，工艺参数选择如表 3 所示，激光功率、扫描速度及扫描间距同基于下表面划分准则的工艺策略的内表面工艺区域对应参数一致。

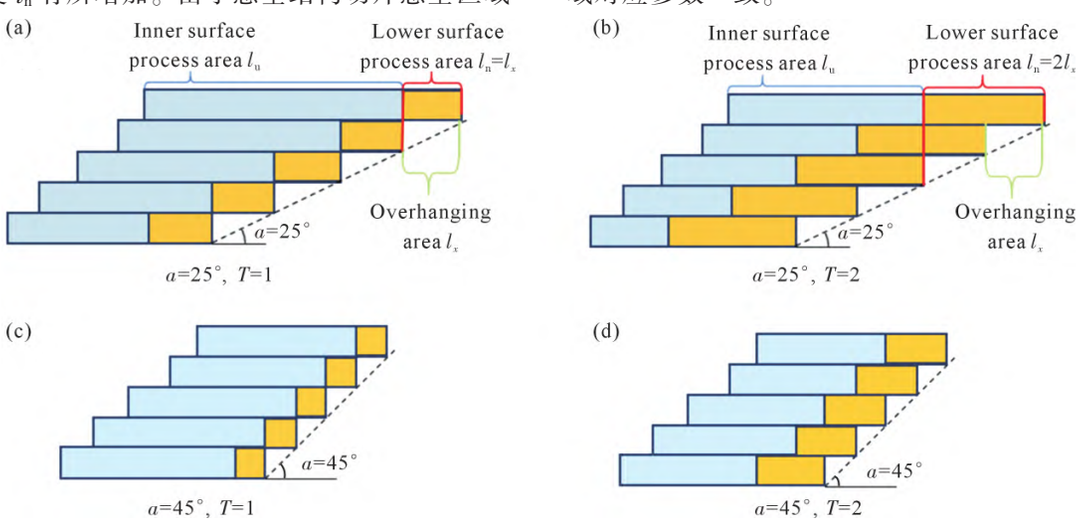


图 3　基于下表面划分准则的区域划分原理图：(a) a=25°, T=1; (b) a=25°, T=2; (c) a=45°, T=1; (d) a=45°, T=2

Fig.3　Schematic diagram of the area division based on the lower surface division criterion: (a) a=25°, T=1; (b) a=25°, T=2; (c) a=45°, T=1; (d) a=45°, T=2

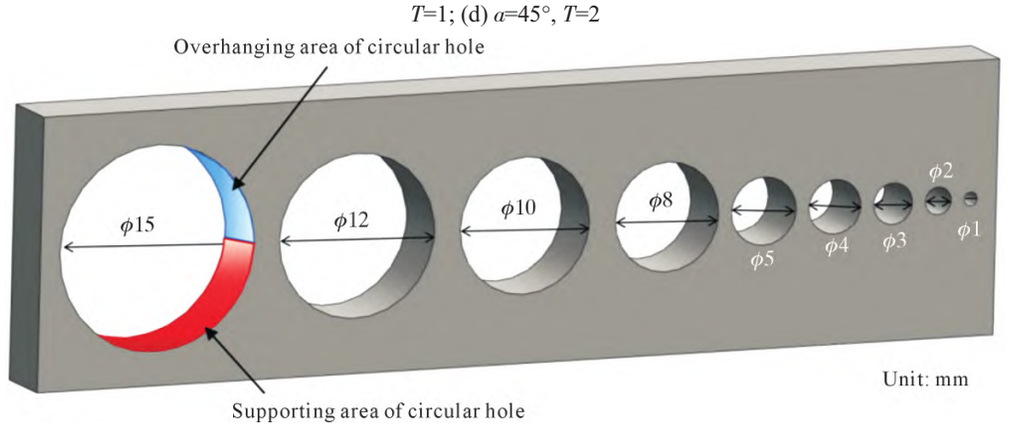


图 4　悬垂试样模型

Fig.4　Model of the overhanging sample

中国知网　https://www.cnki.net

表 2 基于下表面划分准则的工艺策略工艺参数
Tab.2 Parameters of the process strategy based on the lower surface division criterion

Different process area	Laser power/W	Scanning speed /(mm·s^{-1})	Scanning spacing /mm	Scanning strategy	Number of layers downwards, T
Lower surface process area	140	2 600	0.02	135°, 225°	40
Inner surface process area	170	1 000	0.08		

表 3 传统工艺策略工艺参数
Tab.3 Parameters of the traditional process strategy

Laser power /W	Scanning speed /(mm·s^{-1})	Scanning spacing /mm	Scanning strategy
170	1 000	0.08	135°, 225°

对于两种工艺策略所成形样件，采用基恩士 VHX-5000 超景深三维显微镜观察两样件的悬垂圆孔形貌，观察各自不同尺寸悬垂圆孔的悬垂表面质量与缺陷情况，分析缺陷机理，讨论基于下表面划分准则的工艺策略是否能有效提高悬垂圆孔的表面质量并抑制缺陷产生。同时使用基恩士 VHX-5000 超景深三维显微镜测量悬垂圆孔不同方向的直径大小，用两点法计算平均圆度。用圆度这一指标对悬垂圆孔成形精度进行量化分析，对比两种样件不同尺寸圆孔的圆度数据，讨论不同工艺与不同孔径对悬垂圆孔的成形精度的影响。

测量圆度所使用的两点法如图 5 所示，借助显微镜测量圆孔不同方向的直径长度，将测的最大直径与最小直径之差除以 2 即为被测圆平均圆度，其计算公式如下

$$\text{圆度} = \frac{\phi_{max} - \phi_{min}}{2} \tag{2}$$

式中，ϕ_{max} 为测量最大直径；ϕ_{min} 为测量最小直径。

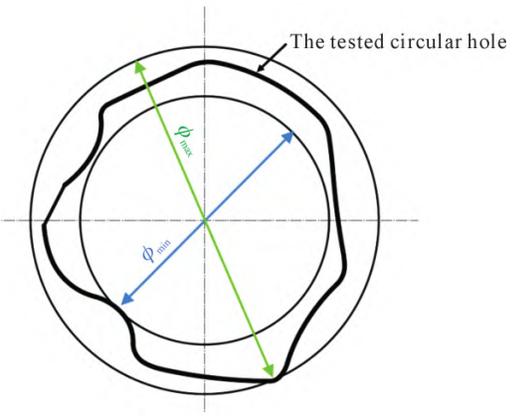


图 5 圆度测量方法示意图
Fig.5 Diagram of the roundness measurement method

2 实验结果及讨论

2.1 实验现象

传统工艺策略与基于下表面划分准则的工艺策略所获得的不同尺寸悬垂圆孔样件形貌如图 6 所示。观察可得传统工艺策略与基于下表面划分准则的工艺策略对于 1~8 mm 的小尺寸悬垂圆孔都展示出良好的成形性，皆未出现明显的翘曲现象，然而圆孔悬垂区域表面皆由粘粉覆盖，有明显粘粉现象。传统工艺策略成形的 10~15 mm 大尺寸悬垂圆孔其悬垂区域表面粘粉现象明显，此外出现明显翘曲与不规则塌陷现象。翘曲现象随着圆孔直径的增大不断加剧，15 mm 悬垂圆孔顶端发生明显翘曲。相比之下基于下表面划分准则的工艺策略成形的 10、12、15 mm 直径悬垂圆孔未发生明显翘曲现象，圆孔顶端表面平整，但悬垂区域表面依然有大面积粘粉覆盖，悬垂角度越低、越靠近悬垂圆孔粘粉现象越明显。

2.2 翘曲机理与不同工艺策略对翘曲行为的影响

由于 SLM 成形一般使用高斯激光作为能量源，该激光光斑中心位置获得能量高于两侧，同时成形

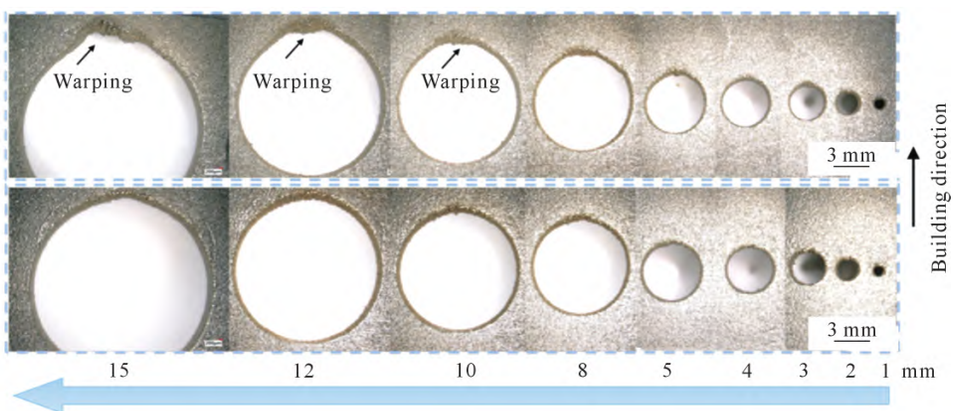


图 6 不同工艺成形圆孔样件形貌：(a) 传 统工艺策略；(b) 基于下表面划分准则的工艺策略
Fig.6 Morphology of samples formed via different processes: (a) conventional process; (b) process based on the lower surface division criterion

中国知网 https://www.cnki.net

层厚度导致粉层上方获得能量高于下方，这种温度分布不均匀导致熔融区域发生不均匀收缩，形成收缩热应力，使成形层产生翘曲倾向。然而熔融区域下方的已凝固金属支撑区域对熔融区域的翘曲倾向产生束缚作用，形成拉伸应力，抑制翘曲行为[19]。但成形悬垂结构时成形层部分区域悬空，底部缺乏金属支撑。如图 6a 所示，在成形悬垂圆孔上半圆悬垂区域时，其成形层边缘有一定悬空区域，悬空区域下方为疏松的金属粉末，缺乏已凝固金属支撑，其单层金属强度无法抵御热应力变形从而导致成形层在悬空区域出现向上翘曲行为。悬垂结构其成形层的悬空区域长度通过下式计算获得：

$$l_x=h\times\cot(\theta) \tag{3}$$

式中，h 为打印层厚；θ 为悬垂结构的倾斜角度。

如式(3)所示，悬垂结构的成形层悬空区域长度随成形层位置倾斜角度增加而增加，导致相同的热应力作用下，成形层翘曲幅度有所区别。如图 7a 和 b 所示，在 15°悬垂构件与 20°悬垂构件成形中，即使仅在支撑区域与悬空区域的交界处产生相同角度的翘曲变形，悬空区域长度差异导致 15°悬空区域末端最大变形高度 $\Delta Z_{15°}$ 大于 20°最大变形量 $\Delta Z_{20°}$，可知即使使用相同工艺参数，悬垂角度越低，其样件翘曲现象越严重。此外翘曲现象具有累加恶化特征，如图 7c 所示，在单层发生翘曲后下一层的实际悬空区域长度由 l_x 增长为 $l_x+\Delta l$。由上文可知下一层悬空区域程度增加致使下一层翘曲的幅度增大，从而陷入一种恶性循环，翘曲现象随成形层的层层累积愈发严重，如图 7d 所示多层翘曲累加最终导致该区域整体大幅度翘曲，影响最终成件质量。此外在成形低角度悬垂结构时，高能激光束扫描临近悬空区域的支撑区域，尽管该区域下方存在支撑金属，然而过薄的实体厚度难以抵抗高能激光产生的热应力，从而在支撑区域便开始发生翘曲变形。

分析悬垂圆孔结构成形中翘曲行为特征，由于悬垂圆孔结构边缘位置的倾斜角度随靠近圆孔顶端逐渐减小，最终在圆孔顶端达到水平悬垂状态。由于悬垂结构发生翘曲行为几率随悬垂结构倾斜角度减小而增加，同时在使用相同粉末层厚参数的情况下，圆孔尺寸越大悬垂结构所需的成形层数量越多，翘曲行为的多层累积现象越严重。综上所述，在使用传统工艺成形悬垂圆孔时，圆孔尺寸越大，越靠近圆孔顶端位置，翘曲现象应当更加明显，理论分析与实验现象中所观察情况一致。

对比基于下表面划分准则的工艺策略成形样件与传统工艺策略成形样件，基于下表面划分准则的工艺策略可有效抑制 12、15 mm 等大尺寸悬垂圆孔成形中的翘曲缺陷。基于下表面划分准则的工艺策略对大尺寸圆孔成形翘曲的抑制能力由两方面原因引起，一是基于下表面划分准则划分工艺区域，使得圆孔的成形层悬空区域在能量密度更小的下表面工艺参数下成形，在低能量密度条件下激光扫描产生热应力较小，从而悬空区域的翘曲变形小。如图 8a 和 b 所示，在成形悬垂圆孔的悬垂区域过程中，随着成形高度上升与悬垂倾角减小，下表面工艺区域宽

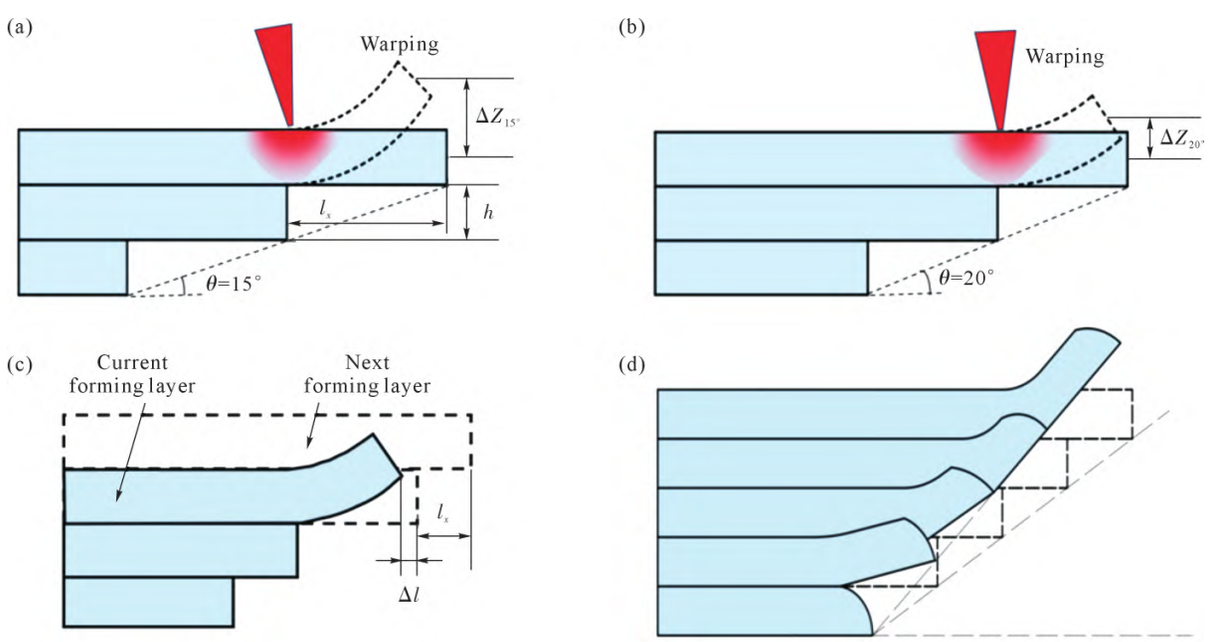


图 7　悬垂结构翘曲机理示意图：(a) 15°悬垂结构翘曲；(b) 20°悬垂结构翘曲；(c) 单层翘曲对下一成形层影响；(d) 成形层翘曲累积

Fig.7　Warpage mechanism of the overhanging structure: (a) 15° overhanging structure warpage; (b) 20° overhanging structure warpage; (c) effect of single-layer warpage on the next molding layer; (d) accumulation of molding layer warpage

中国知网　https://www.cnki.net

度增加，高能激光扫描区域收缩，高能激光扫描区域下方的支撑最小厚度增加，能够有效抑制因支撑区域下方支撑金属过薄无法抵抗变形导致的翘曲变形。二是采用基于下表面划分准则的工艺策略成形圆孔，如图 8c 和 d 所示，在悬垂区完全成形时，即将成形的非悬垂区第 N 成形层仍被下方悬垂区的第 $N–T$ 层边缘划分为两种工艺区域，从而在悬垂区上方形成了下表面工艺区向内表面工艺区的稳定过渡。因此在圆孔刚刚构建完成时的后续层成形中，圆孔顶端上方区域依旧保持着较低能量的下表面工艺参数，直到圆孔顶端构建出一定厚度并趋于稳定后，再逐渐切换为内表面高能打印工艺，避免低能激光构建的脆弱圆孔顶端被后续高能激光破坏情况的发生。

通过分析悬垂结构翘曲缺陷的形成机理，结合传统工艺策略成形圆孔出现的缺陷，可知使用传统工艺成形圆孔，圆孔直径增加与同一圆孔悬垂角度的降低都容易导致翘曲现象的出现，同时翘曲会随着成形层数的累加愈发严重。而使用基于下表面划分准则的工艺策略，通过工艺划分规则在悬垂部分与圆孔顶端形成过渡区域，使用更低能量密度的工艺抑制圆孔顶端翘曲，获得 1~15 mm 直径成形性较为良好的悬垂圆孔。

2.3 粘粉机理与不同工艺策略对翘曲行为的影响

表面粘粉是 SLM 成形悬垂结构时不可避免的一种缺陷，由于悬垂边界处台阶效应与熔池沉积的影响，粉末粘附使悬垂表面轮廓表现为锯齿形状，从而导致悬垂区域表面粗糙度的增加[20]。在 SLM 成形中，为了实现相邻成形层间的冶金结合，激光熔化穿透深度需要大于粉末层厚度，如图 9b 所示，当这种穿透现象出现在成形层悬空区域时，成形层悬空区域下方的粉末部分也被熔化或烧结，最终导致在悬垂表面观察到明显粘粉现象。悬垂结构倾角会影响粘粉，图 9a~d 展示了在不同倾斜角度下悬垂构件的粘粉情况，悬垂角度越低，悬空区域越长，即成形层与粉末的接触面积增大，在成形时悬空区域会有更多粉末粘附，导致低角度悬垂结构下表面的表面粗糙度加剧。这与实验现象中观察到的越靠近悬垂圆孔顶端粘粉现象越明显的情况一致。因此使用基于下表面划分准则的工艺策略，由于下表面工艺区域下方仍有部分支撑金属，激光能量需保证足够实现成形层间冶金结合，因此使用基于下表面划分准则的工艺策略时悬垂圆孔大部分悬垂表面仍会出现沾粉现象。

但是对于倾角接近水平方向的悬空区域，水平悬空区域越大，激光能量越高，激光在粉末区域作用的时间越久，熔池冷却时间延长，熔池会在毛细力和重力作用下渗透入粉末当中，导致悬垂表面出现坍塌缺陷，这也与在传统工艺成形的 12、15 mm 圆孔顶端再出现翘曲变形的同时向下塌陷的情况相符合。而基于下表面划分准则的工艺策略如前文所探

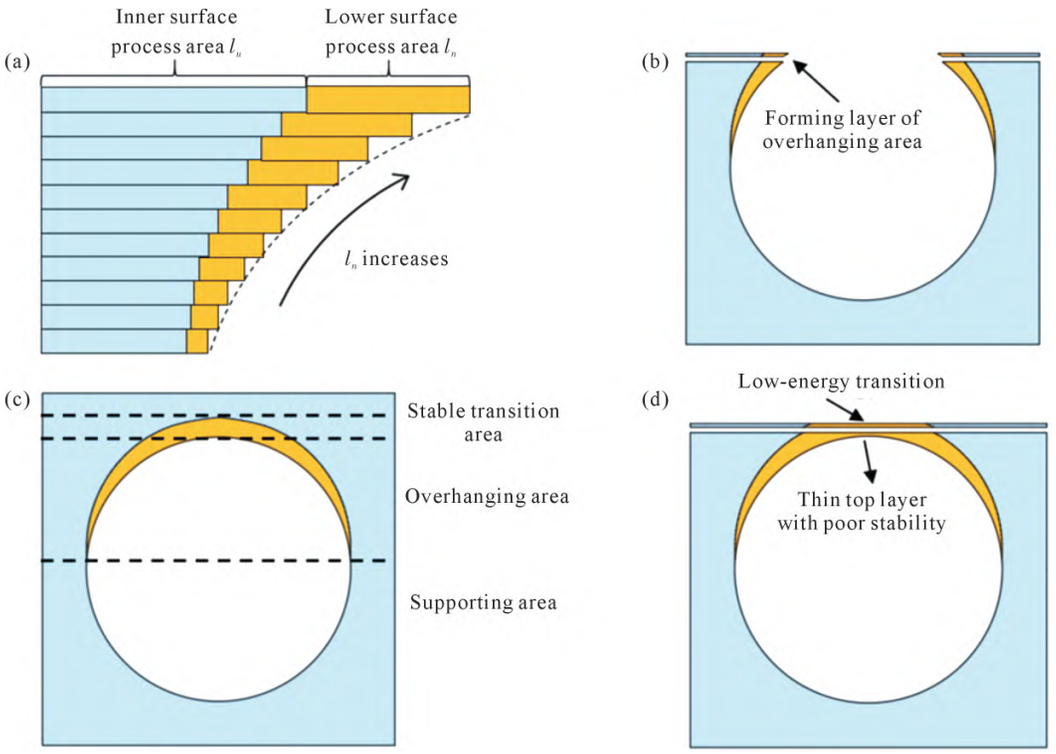


图 8 悬垂圆孔构建示意图：(a) 悬垂区切片；(b) 悬垂圆孔成形中；(c) 悬垂圆孔区域划分；(d) 悬垂圆孔成形完成时

Fig.8 Schematic diagram of overhanging circular hole construction: (a) slices in the overhanging area; (b) during overhanging circular hole molding; (c) delineation of the area of overhanging circular holes; (d) at the completion of overhanging circular hole molding

中国知网 https://www.cnki.net

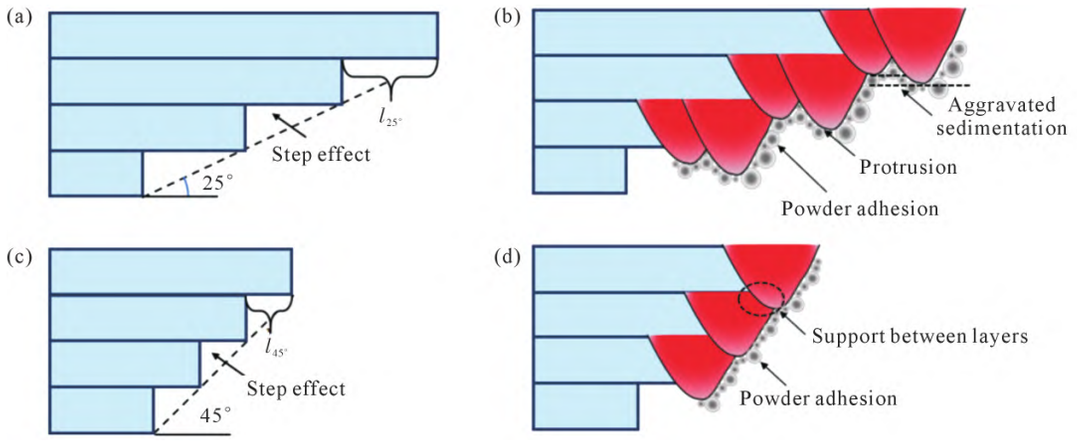


图 9　不同悬垂角度切片及形貌成形示意图：(a) 45°切片；(b) 45°下表面形貌成形；(c) 25°切片；(d) 25°下表面形貌成形

Fig.9　Schematic diagrams of slicing and topographic molding at different overhang angles: (a) 45° slice; (b) 45° lower surface topographic molding; (c) 25° slice; (d) 25° lower surface topographic molding

究情况，通过在悬垂圆孔顶端形成稳定过渡区，防止刚刚成形的圆孔顶端被高能激光严重熔透并产生明显塌陷。

分析粘粉机理，可得在成形悬垂圆孔结构时，悬垂角度越低，粘粉现象严重，导致悬垂表面粗糙度增大，同时相比于传统工艺策略，基于下表面划分准则的工艺策略对沾粉现象并没有显著的抑制作用。

2.4　成形精度与不同工艺策略对成形精度的影响

为探究悬垂圆孔成形精度与悬垂圆孔孔径尺寸之间的联系，分析基于下表面划分准则的工艺策略对圆孔成形精度的影响，本研究使用圆度这一指标量化分析不同悬垂圆孔的成形精度，圆孔圆度低说明圆孔直径变化幅度小，成形精度高。

如图 10 所示，随悬垂圆孔直径增大，传统工艺策略与基于下表面划分准则的工艺策略成形悬垂圆孔的圆度皆呈明显上升趋势，表明圆孔直径增大，成形难度增加。对比可得两种工艺策略成形得到的 1~5 mm 小尺寸圆孔其圆度无明显差异，证明两种工艺都能较好地实现小尺寸圆孔成形，这与图 6 中两种工艺成形的小尺寸悬垂圆孔的良好外观形貌相符合。然而对于 8 mm 以上的较大直径圆孔，使用基于下表面划分准则的工艺策略成形 15 mm 圆孔时圆度仅有 0.3 mm，成形精度良好。而传统工艺成形在成形 8 mm 圆孔时其圆度便达到 0.36 mm，并随圆孔的进一步增大，其 15 mm 直径圆孔圆度达到最大值 1.63 mm。结合图 6 分析可得传统工艺策略成形圆孔随直径增大所导致的翘曲、塌陷行为是导致圆度剧增的重要原因，因此 8 mm 是本次实验使用传统工艺成形圆孔时的直径极限尺寸。综上由圆度数据得到结论，使用基于下表面划分准则的工艺策略相比传统工艺策略可使得圆孔最大有效成形尺寸提高近 88%。

3　工艺策略在随形水冷模具无支撑成形中的应用研究

选择随形水冷模具作为悬垂圆孔结构典型零件，讨论成形具有悬垂圆孔结构的随形水冷模具时，基于下表面划分准则的工艺策略相比传统工艺策略的优势。基于下表面划分准则的工艺策略来无支撑 SLM 成形随形水冷模具样件，模具流道截面直径达 10 mm 。分析成形件质量，评估基于下表面划分准则的工艺策略对随形水冷模具成形适用性。

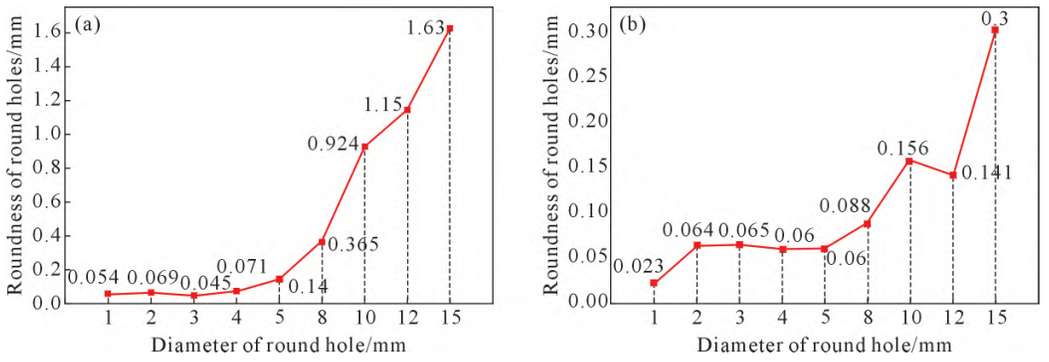


图 10　不同工艺成形悬垂圆孔圆度：(a) 传统工艺策略；(b) 基于下表面划分准则的工艺策略

Fig.10　Roundness of round holes formed by different processes: (a) traditional process strategy; (b) process strategy based on the lower surface division criterion

中国知网　https://www.cnki.net

3.1 基于下表面划分准则的工艺策略对随形水冷模具的适用性

注塑成形是聚合物复杂零件的大批量生产中最广泛使用的加工方法之一，其成形周期主要分为5个阶段：塑化、填充、包装、冷却和顶出。冷却阶段是注塑成型周期中关键阶段，该过程占据了整个工艺流程的70%~80%[21]。由于注塑成形成本的控制很大程度上依赖于成型周期的长短，因此缩短模具的冷却阶段可以有效降低加工成本。随形水道冷却模具技术是随增材制造技术发展而被广泛应用的新型模具冷却技术。相比传统冷却模具，随形冷却模具特点在于其冷却流道布局形成的几何形状与模具型腔表面的几何形状一致，冷却流道随型腔形状的变化而改变，并始终以一定距离均匀包络覆盖整个模具型腔的表面。该特点使随形水冷模具能够实现对熔融原料的均匀快速冷却，有利于提高成型件的质量和生产效率，降低生产成本。圆形管道具备较大的体积与表面积比，冷却效率高，因此圆形成为最常见的流道截面形状之一，悬垂圆孔结构成为随形水冷模具中最常见结构之一。

成形如图11a和b中含有10 mm直径圆形流道结构的随形水冷模具，若使用SLM传统工艺策略直接成形孔径较大的悬垂圆孔极易出现翘曲等缺陷，成形性较差。然而若在流道内使用辅助支撑结构提高成形性，由于流道布局复杂，成件内部流道中的支撑结构难以拆除，同时流道与支撑结构之间的连接痕迹会降低流道表面质量。因此实际应用中使用传统SLM工艺策略成形该零件时，如图11c需添加外部支撑将内部水冷通道倾斜摆放至斜45°角，提高悬垂圆孔结构自支撑性，降低成形难度。但该方法导致外部支撑的额外成本及成形高度的上升，使得零件成形过程需要更多耗材与成形时间，生产成本增加。而结合上文可知本研究采用的基于下表面划分准则的工艺策略能够无支撑直接成形最大15 mm直径的高质量悬垂圆孔结构，因此使用基于下表面划分准则的工艺策略直接无支撑成形该随形水冷模具零件。成形零件如图11d所示，其样件内部流道被完全水平放置成形且未添加任何支撑，在后处理时只需采用线割工艺使样件脱离基板后即可投入应用。

3.2 基于下表面划分准则的工艺策略成形随形水冷模具的质量分析

为方便观察随形水冷模具样件内部流道的成形质量，将样件沿平行于流道截面方向进行竖向切割，

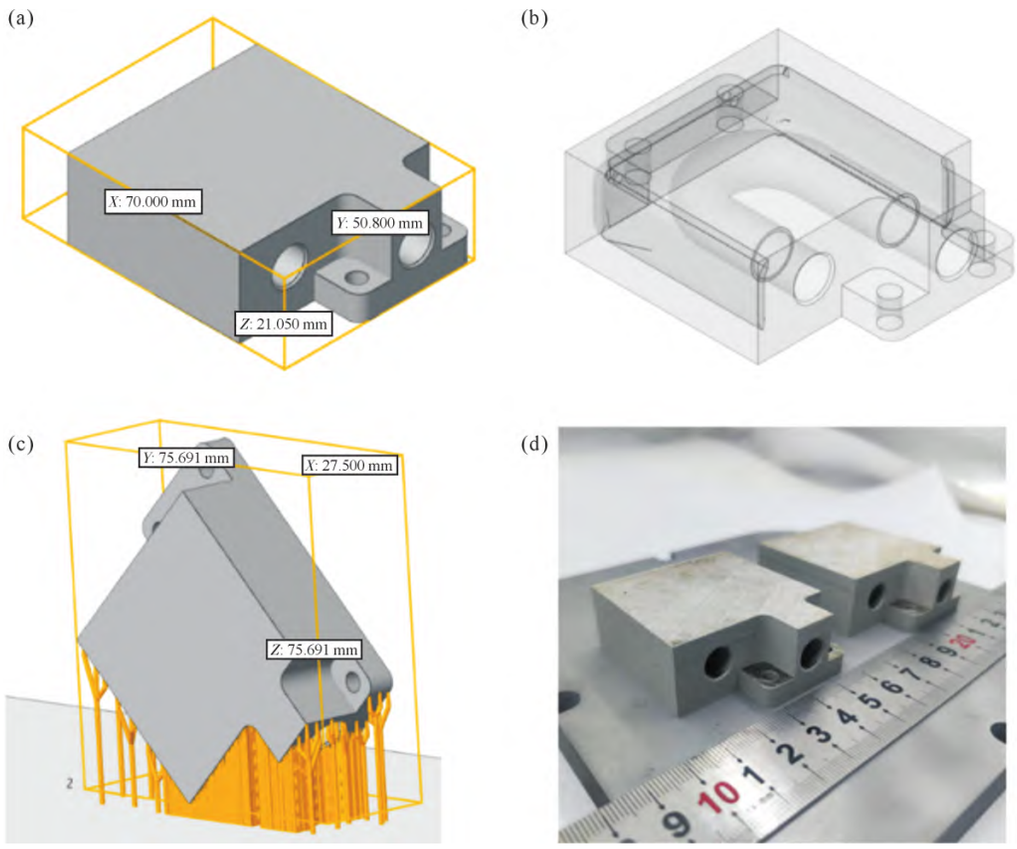


图11 随形水冷模具：(a) 模型；(b) 透视图；(c) 传统工艺摆放角度；(d) 优化工艺成形样件

Fig.11 Conformal water-cooled molds: (a) model; (b) perspective view; (c) placement angle in the traditional process; (d) optimized process molding sample

中国知网 https://www.cnki.net

切面可观察流道的圆孔截面成形质量，随后在流道圆形截面的圆心位置沿水平方向进行横向切割，使流道的下表面与上悬垂表面分离。切割完成后分别对零件的流道纵截面与圆孔横截面进行观察与分析，在流道纵截面可观察到成形流道的上悬垂表面样貌，如图 12a 所示该表面平整性良好，未出现塌陷或翘曲缺陷，悬垂表面有部分粘粉现象，圆孔顶端区域最为明显，然而总体对零件的成形质量影响较小。其悬垂圆孔横截面如图 12b 所示，对圆孔直径进行测量，其圆孔截面直径为 10.105 mm，其成形误差保持在 0.1 mm 左右，证明所采用工艺能够达到较高的成形精度，满足随形水冷模具的流道对成形精度的要求。

4　结论

(1)在成形悬垂圆孔结构过程中，圆孔直径增大或者悬垂角度减小均会导致成形过程发生翘曲现象几率增加，若大幅度翘曲会严重影响悬垂圆孔成形质量。使用传统工艺成形直径大于 8 mm 的悬垂圆孔结构难以获得高质量悬垂圆孔，而使用基于下表面划分准则的工艺策略，其下表面工艺区域的划分策略可有效抑制低角度悬垂结构边缘的翘曲现象，能够成形质量良好的最大直径达 15 mm 的悬垂圆孔结构。

(2)成形悬垂圆孔结构悬垂区域时，圆孔悬垂区域表面会发生粘粉现象。结合粘粉形成机理，发现悬垂倾角越小，粘粉现象越严重，对于悬垂圆孔结构，其顶端表面粘粉现象最为严重。研究发现基于下表面划分准则的工艺策略对粘粉现象无明显抑制作用。

(3)以圆度作为成形精度衡量标准，分析两种工艺成形得到的不同直径悬垂圆孔成形精度变化，研究发现悬垂圆孔直径越大，圆孔成形难度上升，成形精度降低。与传统工艺策略相比，基于下表面划分准则的工艺策略相比传统工艺策略最大有效成形尺寸提高近 88%。

(4)使用基于下表面划分准则的工艺策略成形具有悬垂圆孔结构的随形水冷模具，可免去辅助支撑结构的添加，降低生产成本。使用基于下表面划分准则的工艺策略成形流道直径为 10 mm 的随形水冷模具样件，样件无明显质量缺陷，流道表面质量与成形精度皆满足水冷模具流道要求。

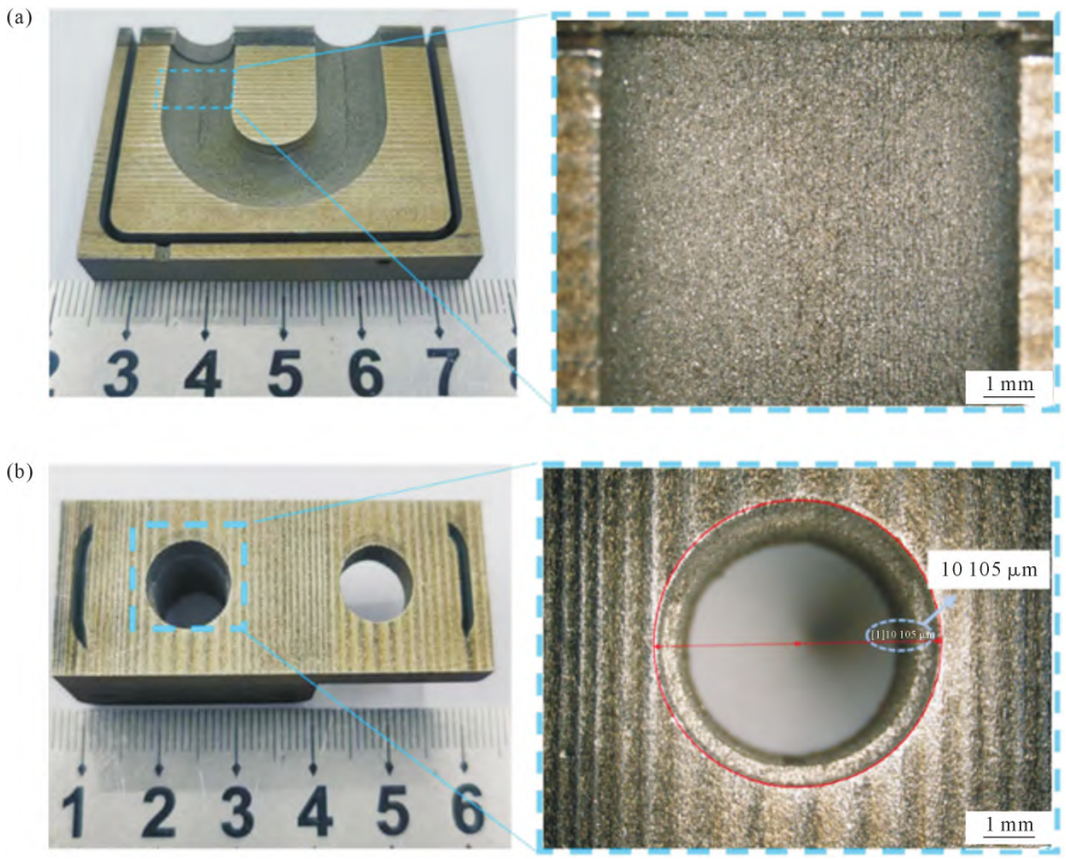


图 12　随形水冷模具截面图：(a) 上悬垂表面截面；(b) 悬垂圆孔截面

Fig.12　Cross section of a conformal water-cooled mold: (a) cross section of the upper overhanging surface; (b) cross section of the overhanging round hole

中国知网　https://www.cnki.net

参考文献：

[1] 田杰，黄正华，戚文军，李亚江，刘建业，胡高峰. 金属选区激光熔化的研究现状[J]. 材料导报，2017, 31(S1): 90-94, 101.
TIAN J, HUANG Z H, QI W J, LI Y J, LIU J Y, HU G F. Research progress on selective laser melting of metal [J]. Materials Reports, 2017, 31(S1): 90-94, 101.

[2] 赵春富. 悬垂结构激光选区熔化成形质量及其切削加工变形研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2022.
ZHAO C F. Study on the laser-selective melting printing quality of overhanging structures and their cutting properties [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.

[3] 杨志成. 钛合金薄壁结构选区激光熔化成形机理及力学性能研究[D]. 太原：中北大学，2023.
YANG Z C. Study on the mechanism and mechanical properties of selective laser melting of titanium alloy thin-walled structures [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.

[4] 何骏驰，张李超，王森林，汤名锴，史玉升. 基于骨架线特征识别的激光选区熔化区域性能匹配成形方法[J/OL].机械工程学报，2024. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240314.1430.007.html.
HE J C, ZHANG L C, WANG S L, TANG M K, SHI Y S. Region performance matching forming method for selective laser melting based on feature recognition of skeleton line [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240314.1430.007.html.

[5] WANG D, MAI S Z, XIAO D M, YANG Y Q. Surface quality of the curved overhanging structure manufactured from 316-L stainless steel by SLM[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 781-792.

[6] 刘杰，杨永强，王迪，肖冬明，苏旭彬. 选区激光熔化成型悬垂结构的计算机辅助工艺参数优化[J]. 中国激光，2012, 39(5): 88-94.
LIU J, YANG Y Q, WANG D, XIAO D M, SU X B. Computer-aided optimization of the process parameters for fabricating overhanging structure by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 88-94.

[7] ZHU X G, DONG A P, WANG L F, SUN J, CHENG L Y, QI C Q, GUO L J. Influence of inclination angle, shape and size of the flow channels on the AlSi10Mg complex products fabricated by selective laser melting [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 83: 157-171.

[8] 吴根丽，刘婷婷，张长东，廖文和. Ti6Al4V 激光选区熔化成形悬垂结构的质量研究[J]. 中国机械工程，2016, 27(13): 1810-1815.
WU G L, LIU T T, ZHANG C D, LIAO W H. Research on forming quality of overhanging structure by selective laser melting[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(13): 1810-1815.

[9] FENG S C, KAMAT A M, SABOONI S, PEI Y T. Experimental and numerical investigation of the origin of surface roughness in laser powder bed fused overhang regions[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2021, 16(S1): S66-S84.

[10] HAN J T, DUAN W P, MAO Y Y, XIA Q F, WANG L, SONG D L. Comparison of laser power and scan speed in SLM [J]. ISIJ International, 2022, 62(1): 200-208.

[11] ZHANG X C, KANG J W, RONG Y M, WU P Y, FENG T. Effect of scanning routes on the stress and deformation of overhang structures fabricated by SLM[J]. Materials, 2018, 12(1): 47.

[12] 刘婷婷，张长东，廖文和，张凯，吴根丽. 激光选区熔化成形悬垂结构熔池行为试验分析[J]. 中国激光，2016, 43(12): 70-76.
LIU T T, ZHANG C D, LIAO W H, ZHANG K, WU G L. Experimental analysis of pool behavior in overhang structure fabricated by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (12): 70-76.

[13] YUAN Z J, CHEN X D. Novel approach for fabricating horizontal overhanging structures in selective laser melting [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85: 793-801.

[14] CLOOTS M, ZUMOFEN L, SPIERINGS A B, KIRCHHEIM A, WEGENER K. Approaches to minimize overhang angles of SLM parts[J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(2): 362-369.

[15] 曾绍连，刘建业，牛留辉，彭景光. 基于金属 3D 打印技术的随形冷却模具设计与应用研究[J]. 模具技术，2024(1): 49-58.
ZENG S L, LIU J Y, NIU L H, PENG J G. Research on design and application of conformal coolingdie based on metal 3D printing technology[J]. Die and Mould Technology, 2024(1): 49-58.

[16] XIE Z W, WU M P, SHI X J,LU P P, MIAO X J. Study on the forming precision optimization of built-in flow channel structure manufactured by selective laser melting[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2023, 237(6-7): 1048-1059.

[17] 朱小刚，董安平，程灵钰，孙靖，刘正武，郭立杰. 激光粉末床熔融成形 AlSi10Mg 铝合金复杂流道构件研究[J]. 激光与光电子学进展，2023, 60(7): 203-213.
ZHU X G, DONG P A, CHENG L Y, SUN J, LIU Z W, GUO L J. Study on AlSi10Mg alloy with complex flow channels by laser powder bed fusion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60 (7): 203-213.

[18] MERTENS R, CLIJSTERS S, KEMPEN K, KRUTH J P. Optimization of scan strategies in selective laser melting of aluminum parts with downfacing areas [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(6): 061012.

[19] 辛艳喜. 铝合金悬垂圆孔结构选区激光熔化成形质量研究及工艺优化[D]. 杭州：浙江理工大学，2023.
XIN Y X. Research on selective laser melting forming qualityand process optimization of aluminum alloy overhang circular hole[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023.

[20] 段声勤. 金属悬垂圆孔结构激光选区熔化成形工艺优化[D]. 南京：南京理工大学，2019.
DUAN S Q. Optimization of laser selective melting forming process for metal suspended circular hole structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.

[21] 吴根丽. 金属悬垂特征结构件激光选区熔化成形工艺研究[D]. 南京理工大学，2017.
WU G L. Research on laser selective melting forming process of metal suspension characteristic structural parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

中国知网 https://www.cnki.net