

## 选区激光熔化成形零件支撑结构性能差异研究

宜亚丽<sup>1</sup>, 程阳洋<sup>1,2</sup>, 贾长治<sup>2\*</sup>, 金贺荣<sup>1</sup><sup>1</sup>燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004;<sup>2</sup>陆军工程大学石家庄校区火炮工程系, 河北 石家庄 050003

**摘要** 利用选区激光熔化制造金属零件时,悬垂构件的可制造性和成形质量与添加的支撑结构密切相关。采用热弹塑性有限元分析方法,研究了不同支撑类型的热传导特性,并通过试验揭示了支撑类型对 316L 试件翘曲变形、表面形貌、显微组织及显微硬度的影响规律。结果表明:块状支撑的散热性能优于锥状支撑,将试件峰值温度降低了 6.7%,温度振荡幅度降低了 41.07%,而其较好的导热性能使试件下表面粗糙度降低了 6.23%,同时悬垂区域金属组织中出现了细化晶粒(18.42 μm)及脆而硬的网状 Cr、Ni 相,显微硬度提高到 234 HV。锥状支撑将试件变形降低了 1 mm,而试件底部较少的气孔缺陷使硬度波动降低了 14 HV。分析认为,组合支撑中增加块状结构的比例有利于提高试件成形精度和力学性能,增加锥状结构的比例有利于减小试件翘曲变形程度。

**关键词** 激光技术; 选区激光熔化; 支撑结构; 316L; 数值模拟; 显微组织

中图分类号 TG142.1; TG13; V261.8

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221225

## 1 引言

选区激光熔化(SLM)是应用最广泛的金属增材制造技术之一,被广泛应用于军工、航空航天、医疗和汽车等领域中的高性能零部件制造<sup>[1-5]</sup>。SLM 工艺快速制造的拓扑结构和晶格复杂零件具有显著优势<sup>[6-8]</sup>。同时,SLM 成形过程需要遵守悬垂角约束<sup>[9-11]</sup>。当激光扫描悬垂结构的粉末层时会形成一个微小熔池,底部未烧结的粉末层不能支撑这一熔池;此外,粉末层的导热率极低,导致熔池散热非常慢,如果熔池和周围区域之间的热梯度增加,它会在新的沉积的粉末层中引起显著的热应力,可能导致过度变形。因此,悬垂结构不能在未烧结的粉末层上直接成形<sup>[12-13]</sup>,需要在悬垂特征的下表面添加合适支撑结构,及时消散悬垂区域烧结过程产生的热量,抑制悬垂特征的变形,提高悬垂面的成形质量。

目前应用于 SLM 的支撑主要有块状支撑、面状支撑、树状支撑及锥状支撑,其中块状支撑适用性最高、应用最广泛<sup>[14-15]</sup>。国内外对支撑结构的研究主要集中在结构优化、强度及易去除性等方面。Leary 等<sup>[16]</sup>对 SLM 制备的块状支撑结构进行了机械强度测试,发现支撑结构强度与其高度成反比,并且随着支撑间距的减小,传热能力和支撑强度逐渐增加。Khobzi 等<sup>[17]</sup>研究了块状支撑设计参数对零件变形的影响,通过敏感性分析发现支撑与构件的接触面积对悬垂结构的变形

有显著影响,增加齿数可有效降低悬垂平台的残余应力与变形。杨建凯等<sup>[18]</sup>研究了块状支撑间距对选区激光熔化成形构件尺寸精度及性能的影响,发现增大支撑间距会使支撑表面的粗糙度和显微硬度降低,通过优化支撑间距可保证构件成形精度,也减少了打印支撑耗费的材料。Schmidt 等<sup>[19]</sup>系统研究了锥状支撑结构对支撑区域的影响,得到了支承面积与显微硬度、熔池几何形状和变形的关系。Cao 等<sup>[20]</sup>针对块状和圆锥状两类支撑结构进行了支撑易去除性研究,分析了在铣削加工过程中其对表面粗糙度、铣削力、切削能量、刀具磨损量的影响,结果表明块状支撑更适合用铣削加工去除。Subedi 等<sup>[21]</sup>采用等效静态载荷法对树形支撑结构尺寸进行优化,最大限度地减少热应力引起的零件变形。目前关于支撑结构的研究大多集中在某一种支撑结构的设计和优化方面,实际应用时主要依靠经验选择支撑结构。但不同支撑结构之间具有何种性能差异,及如何根据零件特点和实际需要,通过精准选择合适的支撑结构,提高支撑构件的利用率,实现零件高质量成形,有待系统研究。

本文基于数值模拟的方法模拟了锥状支撑试件、块状支撑试件以及组合支撑试件的增材制造过程,揭示了不同支撑结构的热传导特性对打印试件温度场的影响,然后采用 SLM 方法制备了以 316L 为材料的三种支撑试件,研究了不同支撑结构对成形试件翘曲变形、表面形貌、显微组织及显微硬度的影响规律,确定

收稿日期: 2022-09-08; 修回日期: 2022-11-01; 录用日期: 2023-02-23; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22351805D)

通信作者: \*chaoyang1974@126.com

了支撑类型的选取原则。研究结果为悬垂构件支撑结构的选择提供了参考。

## 2 支撑结构设计

采用 NX12.0 软件设计了具有悬垂结构的试件,试件的几何尺寸如图 1(a)所示。在 Materialise Magics 22.0 中为试件悬垂区域设计了锥状支撑、块状支撑和组合支撑,支撑结构模型如图 1(b)~(d)所示,其中组合支撑由块状结构和锥状结构组合而成。由前期研究可知,三种试件中块状支撑试件的变形较大,因此以块状支撑为设计基准,将三种试件的支撑间距都设置为  $d=0.7\text{ mm}$ 。图 2(a)所示为支撑试件的底视图。将锥状支撑上下圆形表面设置为相同直径,块状支撑与组合支撑中的块状结构采用相同的几何参数,以减小参数对仿真分析结果的干扰,块状支撑参数如图 2(b)所示。锥状支撑与悬垂区域的接触面积最大,组合支撑次之,块状支撑最小,较大的支撑面积有利于加快消散熔融产生的热量。三种支撑结构差异导致支撑体积的空间分布有很大不同:锥状支撑的每个支撑单元是非连续、均匀分布,悬垂板某一区域的热量仅能通过周

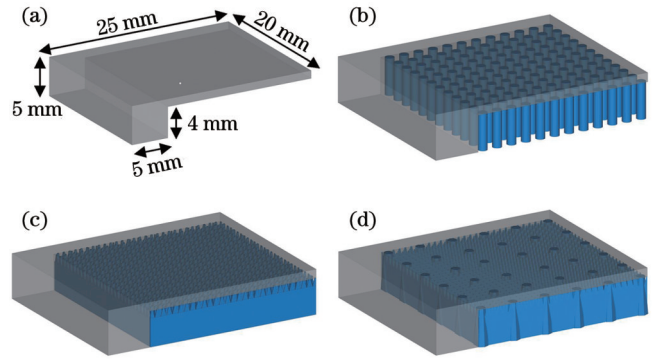


图 1 选区激光熔化悬垂板和三种支撑结构。(a)悬垂板;(b)锥状支撑;(c)块状支撑;(d)组合支撑

Fig. 1 Cantilevered plate and three support structures for SLM. (a) Cantilevered plate; (b) cone-type support structure; (c) block-type support structure; (d) combination-type support structure

围若干支撑柱消散;块状支撑下端是一体式结构,上端是梯形结构,这种整体式布局能够向更大空间传递热量,进而提高支撑散热效率。三种支撑结构的设计参数均为同类支撑中的最优设置,其设计参数如表 1 所示。

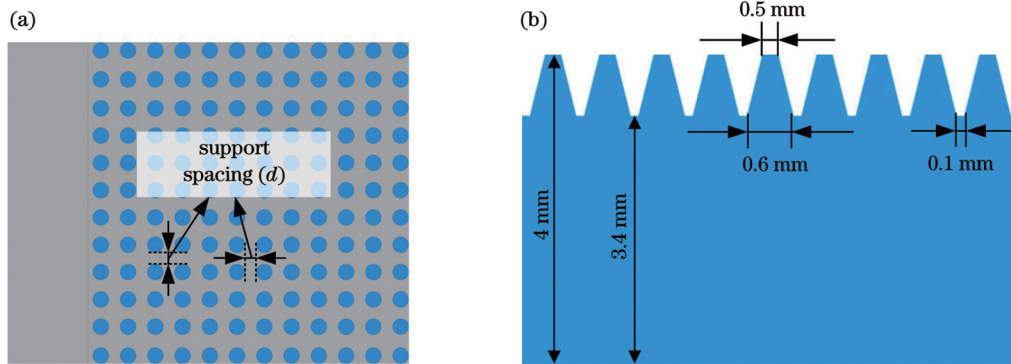


图 2 支撑结构底部视图和设计参数。(a)支撑试件底部视图;(b)块状支撑设计参数

Fig. 2 Bottom view and design parameters of support structure. (a) Bottom view of support sample; (b) design parameters of block-type support

表 1 三种支撑结构的设计参数

Table 1 Design parameters of three support structures

Support type	$d / \text{mm}$	Wall thickness / mm	Total contact area between support and part / $\text{mm}^2$
Cone-type support	0.7	$\Phi 1$	113.10
Block-type support	0.7	0.2	53.19
Combination-type support	1.5 (cone), 0.7 (block)	$\Phi 1$ (cone), 0.1(block)	59.63

## 3 成形过程的数值模拟

### 3.1 模型简化

基于热弹塑性有限元分析方法,预测增材制造

过程中支撑试件的温度场分布,由于模型复杂且每层切片面积是变化的,因此采用体积热源代替移动高斯热源,即将该热源均匀地施加在整个沉积层上。该方法在预测熔池附近的温度时存在一定局限,但能够准确估计支撑结构对悬垂板内部热场演化的影响。为减少计算规模,采用“粉末层聚集”模型简化方法<sup>[17]</sup>,将实际成形过程中的 5 个粉末层聚集成一个超级层,成形模拟中每次增加一个超级层的层高并进行仿真计算。为进一步提高计算效率,采用图 3 所示的可变层高的成形过程数值模拟方法。试件悬垂结构的成形过程为本文重要研究内容,因此在 4~5 mm 成形高度区间设定层厚为 0.1 mm,以捕捉更多的细节,0~4 mm 高度区间则设定每层层厚为 0.4 mm。

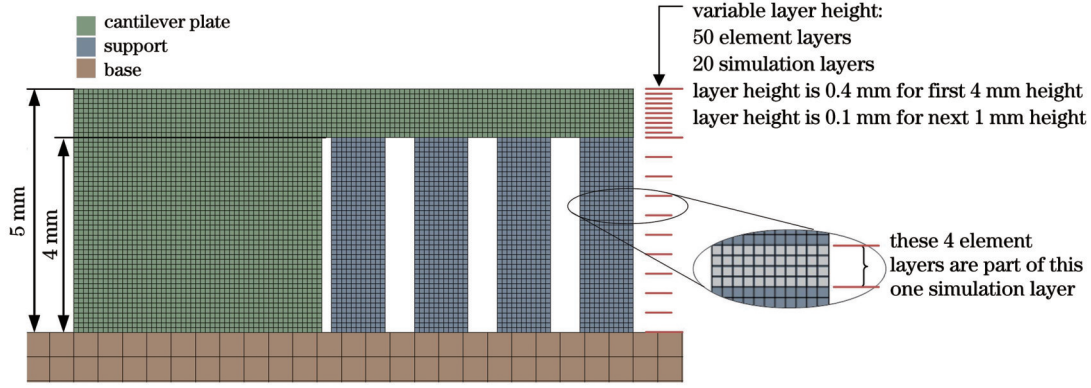


图 3 可变层高的增材制造模拟方法

Fig. 3 Variable layer height method for additive manufacturing simulation

### 3.2 网格划分

分析模型主要包括悬臂板、支撑结构和基板三部分,将三种支撑试件的几何模型以 stl 文件格式从 Materialise Magics 22.0 导入至 Ansys Workbench,悬臂板、支撑结构接触面设置为共享拓扑面,采用分层六面体网格划分方法统一进行划分,网格大小都为 0.1 mm,是沉积层厚(0.02 mm)的 5 倍。基板几何尺寸远大于打印部件(悬垂板和支撑),为控制整体网格数量,基于局部网格划分方法单独划分基板的网格,网格尺寸为 0.5 mm,基板与打印部件之间设置为绑定接触,确保能够进行数据传输,模型划分结果如图 4 所示。

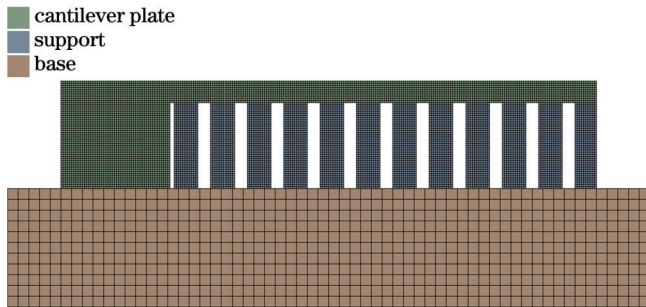


图 4 支撑试件网格模型

Fig. 4 Mesh topography for support samples

### 3.3 初始条件与边界条件

采用与 SLM 机器一致的初始条件,基板的初始温度为 22 °C,模型边界条件如图 5 所示。超级层顶部表面的热量主要通过对流换热、辐射换热和热传导消散,考虑到上表面成形质量不是本文研究重点,上表面重熔时仅考虑了导热系数的不同,公式描述为

$$q_c = h_c(T - T_a), \quad (1)$$

$$q_r = \epsilon\sigma(T^4 - T_a^4), \quad (2)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = q_1 - q_c - q_r, \quad (3)$$

式中: $q_c$ 为表面对流换热量; $q_r$ 为辐射换热量; $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为边界外法线方向上的热力学温度; $h_c$ 为热对流系数,取值

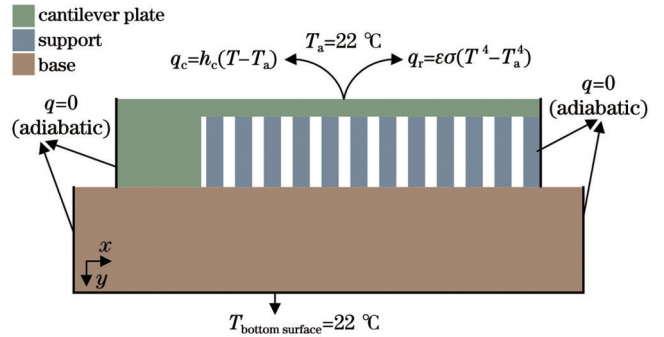


图 5 模型边界条件和初始条件

Fig. 5 Boundary and initial conditions applied to model

为  $1 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2$ ;  $T_a$  为环境温度,取值为 22 °C;  $\sigma$  为辐射常数;  $\epsilon$  为材料发射率,取值为 0.3;  $K$  为导热系数,316L 为粉末状态时取值为  $140 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 316L 为实体状态时取值为  $1.4 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $q_1$  为热源温度。其他边界条件如下:

1) 构件成形过程中基板的温度 ( $T_{\text{bottom surface}}$ ) 保持在 22 °C,打印完成后在冷却过程中,基板与环境的对流换热系数为  $1 \times 10^{-5} \text{ W/mm}^2$ 。

2) 粉末床的侧面假定为绝热,粉末床的侧面与成形舱侧壁接触,而粉末床的导热率不显著,因此舱室侧壁的导热率可以忽略不计。

3) 考虑悬垂板、支撑结构以及基板三者之间的接触传热过程,热流密度量化公式为

$$q = h_{\text{int}}(T_{\text{surface2}} - T_{\text{surface1}}), \quad (4)$$

式中: $q$ (单位为  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )为从一个表面到另一个接触表面的单位面积热流; $T_{\text{surface1}}$ 和  $T_{\text{surface2}}$ 分别为不同表面的温度; $h_{\text{int}}$ 为界面传热系数,取值为 0.5。

## 4 模拟结果与分析

### 4.1 支撑类型对温度场分布的影响

对三种支撑试件的成形过程进行数值模拟,打印完成时刻的试件温度场云图如图 6 所示,可以看出,支撑类型改变了悬垂板和支撑内部的温度分布。这是由于模型被传热效率较低的粉末包围,激光烧结产生的

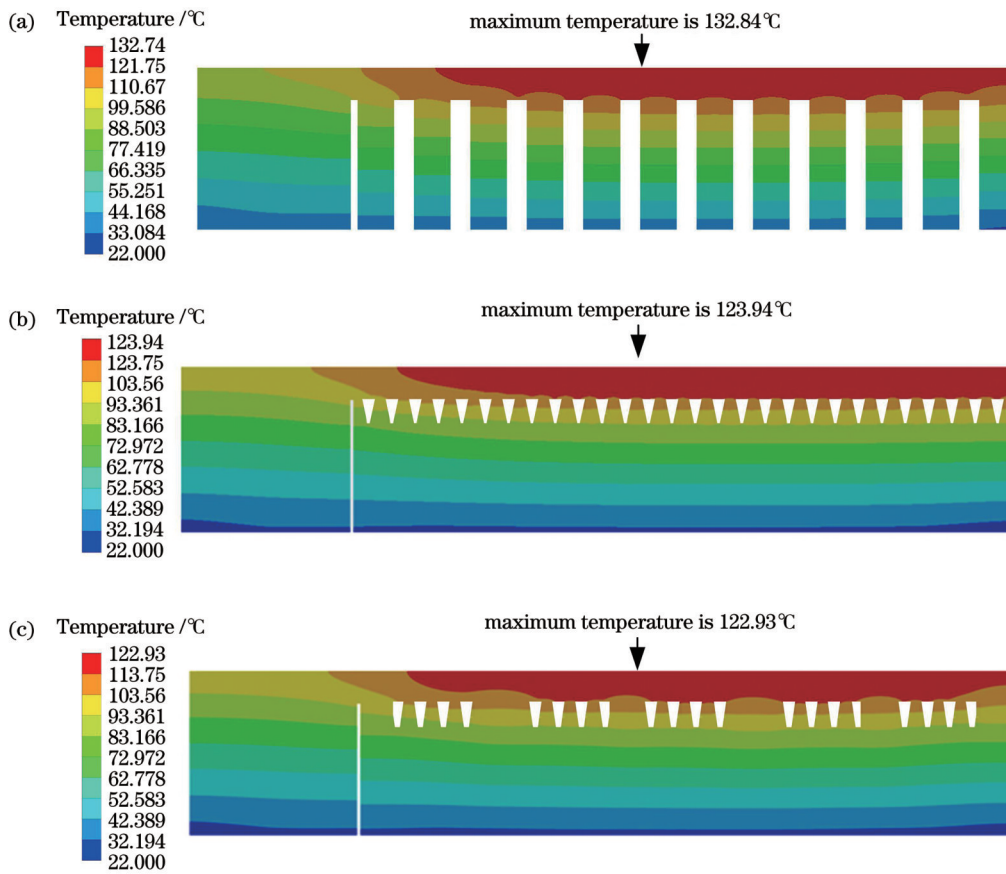


图 6 打印完成时刻成形试件的温度场。(a)锥状支撑试件;(b)块状支撑试件;(c)组合支撑试件  
Fig. 6 Temperature fields of formed samples at end of printing. (a) Cone-type support sample; (b) block-type support sample; (c) combination-type support sample

热量主要通过支撑结构垂直向下消散到基板,因此,试件的温度场分布与支撑结构相关。三种支撑试件中心区域的温度最高,因此中心区域与边缘区域冷却不均引起的应力容易导致试件发生翘曲。块状支撑试件边缘处的温度梯度明显低于其他两种支撑试件,较低的温度梯度有利于减小边缘处的热应变。进一步分析试件峰值温度发现,锥状支撑试件的峰值温度为 132.84 °C,与锥状支撑相比,在块状支撑与悬垂板接触面积显著降低的情况下,峰值温度降低了 6.7%,表现出良好的散热性能,而组合支撑与块状支撑的峰值温度接近,仅比块状支撑降低了 1.01 °C,因此组合支撑中的锥状结构对试件峰值温度的影响相对较小。

块状支撑的几何形状有助于降低边缘区域热应力引起的翘曲变形程度,锥状、组合支撑试件边缘处较高热应力引起的变形与支撑柱较强的变形抑制形成竞争关系。块状支撑的散热性能较好,能够及时消散悬垂区域烧结过程产生的热量,组合支撑的散热性能主要受块状结构的影响,通过调整块状结构占比能够提高散热性能。

#### 4.2 垂直方向的温度分布

温度场云图虽然有助于理解总体趋势,但缺乏必要的定量数据进行更深入评估。因此,从模型中提取

垂直路径(T1)和水平路径(H1)的温度数据进行定量分析,垂直路径如图 7(a)~(c)所示。图 7(d)比较了三种支撑试件垂直方向上的温度分布情况,为了描述成形过程中试件的悬垂平台、牙形结构的位置,在图 7(d)中添加了两条垂直分割线。

在悬垂板顶部( $y=0$ )和支撑与悬垂面接触的位置( $y=1.0\text{ mm}$ ),块状支撑试件的温度明显低于锥状支撑试件,而与组合支撑试件的温差较小。另外可以观察到,在悬垂平台垂直方向上( $0\text{ mm}<y<1\text{ mm}$ ),块状支撑的温度梯度  $14.04\text{ °C/mm}$  高于锥状支撑  $12.31\text{ °C/mm}$ ,组合支撑的温度梯度为  $13.84\text{ °C/mm}$ ,在支撑  $1.0\text{ mm}<y<1.5\text{ mm}$  之间也观察到类似的趋势,块状支撑的温度梯度  $14.44\text{ °C/mm}$  高于锥状支撑  $9.86\text{ °C/mm}$ ,组合支撑的温度梯度为  $13.97\text{ °C/mm}$ 。以上分析可得,块状支撑良好的散热性能,提高了悬垂区域 316L 金属凝固速率,并将温度梯度提高了 14.05%,较高的冷却速率有助于悬垂结构形成力学性能较好的细小晶粒组织。

#### 4.3 水平方向上的温度分布

从模型中提取图 8 所示的水平路径位置(H1)处的温度数据,从温度曲线图 8(d)可以观察到,水平方向上的温度存在周期性变化,峰值出现在支撑结

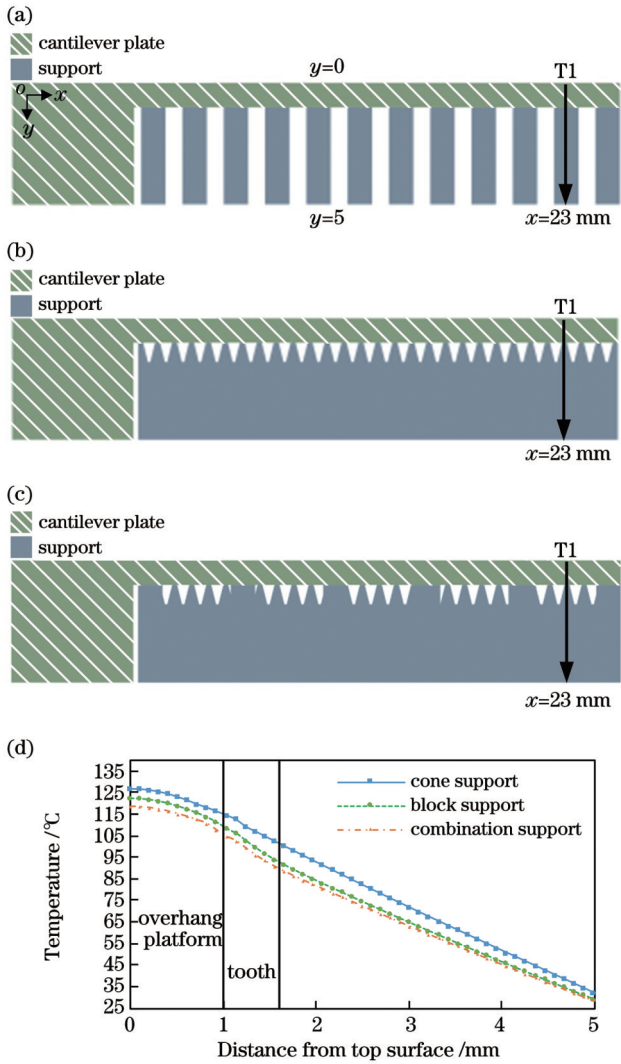


图 7 垂直方向温度提取路径定义及温度分布。(a)锥状支撑试件;(b)块状支撑试件;(c)组合支撑试件;(d)垂直方向支撑试件温度分布图

Fig. 7 Vertical paths defined to capture temperature and temperature distribution. (a) Cone-type support sample; (b) block-type support sample; (c) combination-type support sample; (d) vertical temperature distribution plots for support samples

构间隙处,因此支撑间隔分布会引起温度振荡。在  $17\text{ mm} \leq x \leq 18.6\text{ mm}$  区间内,锥状支撑试件的温度振荡幅值为  $5.21\text{ }^\circ\text{C}$ ,块状支撑试件的温度振荡幅值为  $3.07\text{ }^\circ\text{C}$ ,而组合支撑的块状牙型区域温度变化与块状支撑类似,温度振荡幅值为  $3.02\text{ }^\circ\text{C}$ 。组合支撑试件锥形区域的温度振荡幅值为  $5.62\text{ }^\circ\text{C}$ ,与锥状支撑试件的振荡幅值相近,但由于周围块状区域的存在,峰谷的温度显著降低。

通过比较不同支撑试件的温度振荡幅度可知,块状支撑试件的振荡幅值比锥状支撑试件减少了  $41.07\%$ ,组合支撑试件块状区域的温度振幅也显著降低,而较小的温度振荡有助于减小应变引起的试件翘曲变形程度。通过研究三种支撑试件温度场得到的热

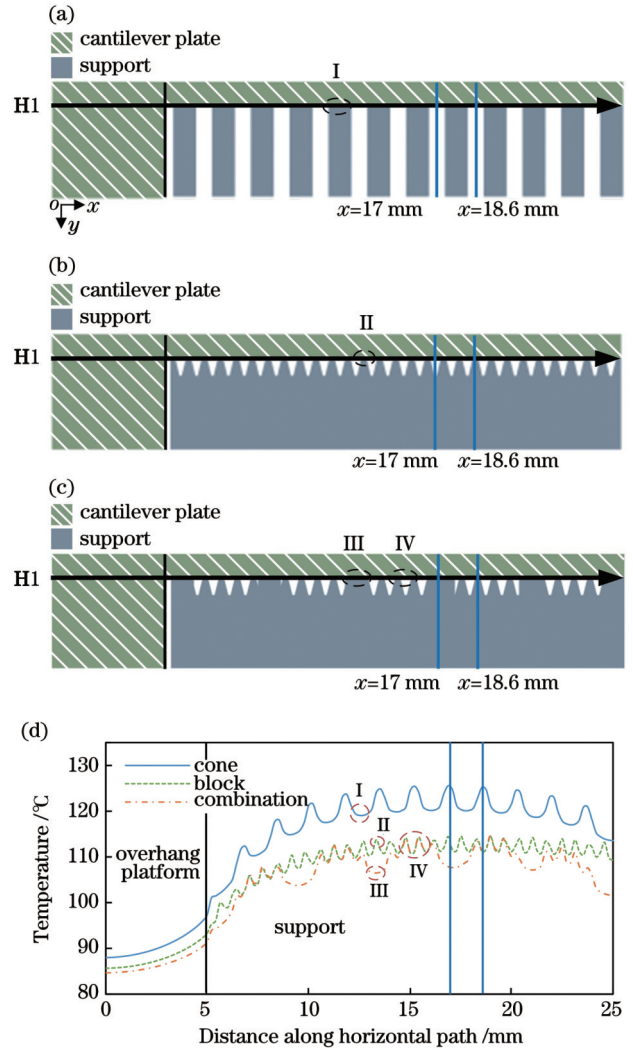


图 8 水平方向温度提取路径定义及温度分布。(a)锥状支撑试件;(b)块状支撑试件;(c)组合支撑试件;(d)水平方向支撑试件温度分布图

Fig. 8 Horizontal paths defined to capture temperature and temperature distribution. (a) Cone-type support sample; (b) block-type support sample; (c) combination-type support sample; (d) horizontal temperature distribution plots for support samples

力学差异结果,为进一步通过试验分析不同支撑类型对最终成形质量的影响提供了参考。

## 5 试验与结果

通过分析增材制造试件的温度场发现,支撑结构影响 316L 材料凝固过程的冷却条件,这将进一步影响悬垂结构金属组织的性能,因此对三种支撑试件进行成形制造及性能测试试验,分析支撑结构对最终成形质量的影响。

### 5.1 选区激光熔化成形

采用 Materialise Magics 22.0 软件对模型进行切分,SLM 加工原材料粉末采用雾化方法制备的球形 316L 粉末,平均粒径为  $30\text{ }\mu\text{m}$ ,其粉末化学成分如

表 2 所示。采用选区激光熔化设备, 主要包含最大功率为 500 W 的光纤激光器、氩气保护系统、运动成形系

统、计算机控制系统。基于前期对 SLM 成形 316L 工艺的探索, 选定的激光加工工艺参数如表 3 所示。

表 2 316L 粉末的化学成分

Table 2 Chemical compositions of 316L powder

Element	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	S	P	Fe
Mass fraction / %	16.900	10.710	0.750	2.380	0.690	0.002	0.026	Bal.

表 3 选区激光熔化设备的工艺参数

Table 3 Process parameters of SLM equipment

Process parameter	Value
Laser power for solid / W	150
Laser power for support / W	70
Scan speed for solid / (mm·s <sup>-1</sup> )	800
Scan speed for support / (mm·s <sup>-1</sup> )	900
Hatching distance / mm	0.08
Layer thickness / mm	0.02
Start plate temperature / °C	22

### 5.2 组织性能表征

试件完成打印后采用线切割机将悬垂区域底部支撑去除, 然后采用高度尺测量悬垂结构的翘曲高度, 测量位置如图 9 所示。采用激光共聚焦显微镜测量支撑表面的粗糙度, 并采用扫描电子显微镜(SEM)观察去除支撑后试件的下表面形貌组织。在进行显微组织观察前, 对成形试件侧表面按照金相制备标准步骤进行打磨、抛光处理, 并利用凯勒试剂对抛光后的试件进行腐蚀。采用光学显微镜对支撑结构与试件下表面交

界处的成形特征进行观察表征。利用 SEM 及电子探针(EPMA)对试件显微组织及元素分布进行观察表征。采用显微维氏硬度计测定成形试件侧面的硬度变化, 每个试件沿垂直方向测 7 个点, 间隔 0.1 mm, 载荷为 100 g, 保载时间为 20 s。

### 5.3 SLM 成形试件的变形分析

SLM 制备的三种支撑试件如图 10 所示, 锥状支撑试件和组合支撑试件的成形质量良好, 块状支撑试件则观察到明显缺陷, 在支撑结构与悬垂板接触区域出现断裂, 这是由于块状支撑壁厚较薄, 较弱的支撑强度导致试件边缘位置的支撑被拉断。去除支撑结构后测量三种试件悬垂区域的变形情况, 发现都发生了不同程度的翘曲, 测量结果如表 4 所示, 在锥状支撑试件悬垂区域与支撑结构的接触面积高于块状支撑试件(59.82 mm<sup>2</sup>)的情况下, 锥状支撑试件的变形比块状支撑试件低 1 mm, 组合支撑的变形最小, 为 0.29 mm。

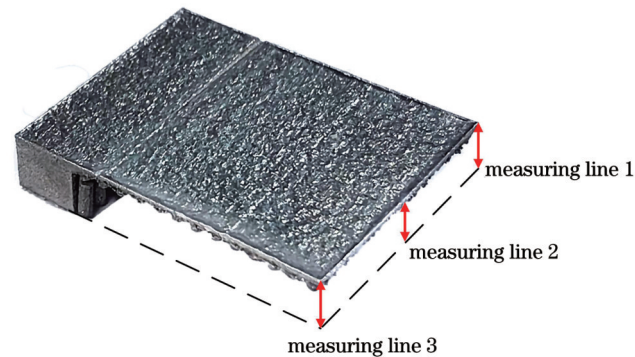


图 9 SLM 成形试件的翘曲高度测量

Fig. 9 Measurement of warping height of SLM forming samples

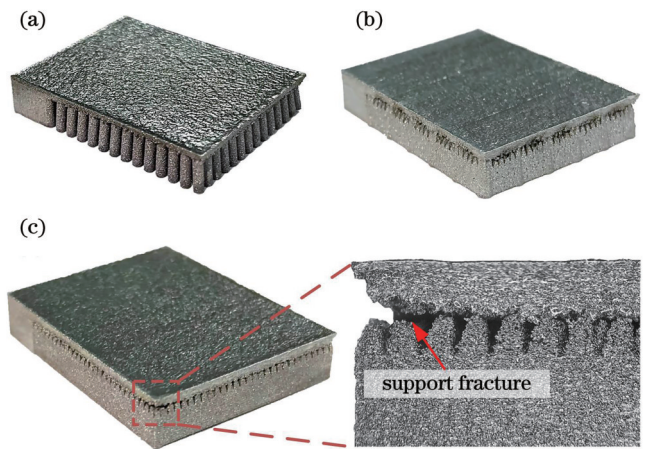


图 10 SLM 成形试件。(a) 锥状支撑试件; (b) 块状支撑试件; (c) 组合支撑试件

Fig. 10 SLM forming samples. (a) Cone-type support sample; (b) block-type support sample; (c) combination-type support sample

表 4 去除支撑后试件的变形高度

Table 4 Deformation heights of samples after support is removed

unit: mm

Sample	Measuring line 1	Measuring line 2	Measuring line 3	Average value
Cone-type support sample	5.60	5.50	5.64	5.58
Block-type support sample	6.72	6.22	6.80	6.58
Combination-type support sample	5.34	5.12	5.40	5.29

组合支撑比锥状支撑能更好抑制边缘翘曲, 验证了仿真分析结果中块状支撑对热应变的降低作

用。锥状支撑试件比块状支撑试件的翘曲更小, 表明锥状支撑较厚的壁厚和更大的支撑接触面积使得

其具有更好的支撑强度,有效抑制了热应变引起的边缘翘曲。因此,从降低热应变和提高支撑强度等方面综合考虑,选择组合支撑能更有效抑制悬垂试件的翘曲。

#### 5.4 SLM 成形试件表面形貌分析

去除支撑后试件悬垂区域下表面的 SEM 像如图 11 所示,可以看出,三种支撑结构的空隙处均有许多未熔金属粉末粘结在试件下表面,这是由于 SLM 成形过程中支撑之间的悬垂区域下方为金属粉末,穿透

到下层激光余热将金属颗粒表面熔化,因此附近区域的金属颗粒粘结在一起。对比三种支撑试件的粉末黏结情况,锥状支撑试件下表面黏结的未熔粉末形成的团簇较大且金属颗粒熔化明显,块状支撑试件与组合支撑试件未熔粉末的黏结情况类似,仅粉末的表面熔化粘结在一起,粉末团簇较小。根据数值模拟得到的三种支撑试件的散热性能可知,锥状支撑较差的散热性能致使激光产生的热量没有及时消散,从而形成了较多团簇。

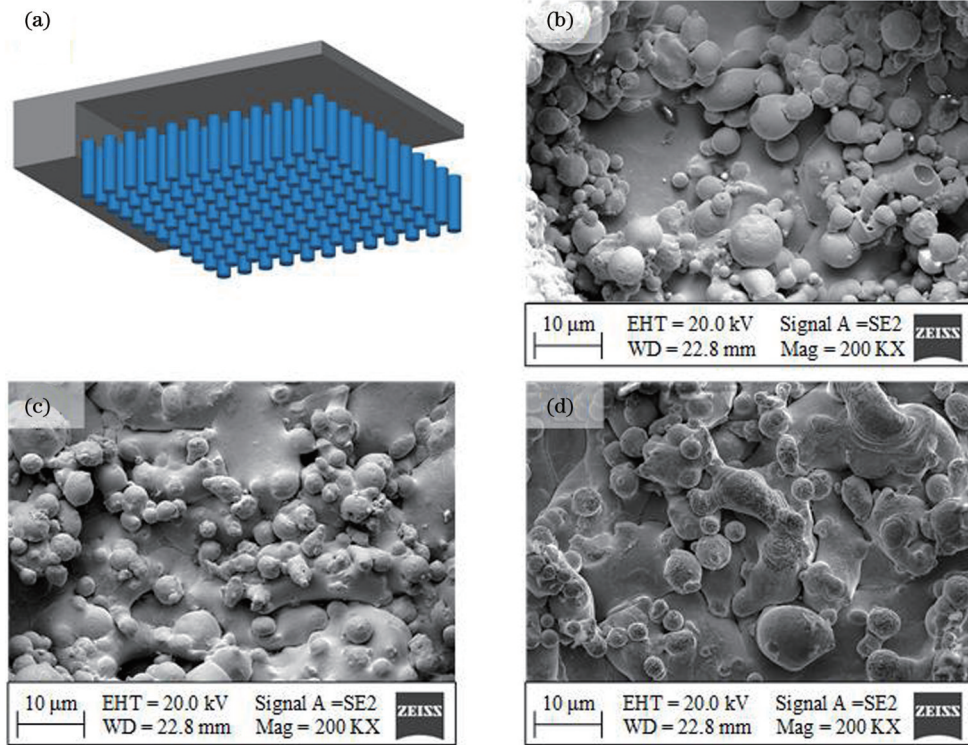


图 11 去除支撑后不同支撑试件下表面的 SEM 像。(a)观察区域位置;(b)锥状支撑试件;(c)块状支撑试件;(d)组合支撑试件  
Fig. 11 SEM images of lower surfaces of samples with different support types after support is removed. (a) Position of observation area; (b) cone-type support sample; (c) block-type support sample; (d) combination-type support sample

去除支撑后试件下表面的三维形貌轮廓如图 12 所示,锥状支撑试件的表面粗糙度值最大(80.518  $\mu\text{m}$ ),块状支撑试件的表面粗糙度值次之(73.080  $\mu\text{m}$ ),组合

支撑的表面粗糙度值最小(70.804  $\mu\text{m}$ )。由此可得,含有块状结构的组合支撑与块状支撑通过减少下表面的粉末团簇降低了粗糙度。因此,当采用组合支撑作为

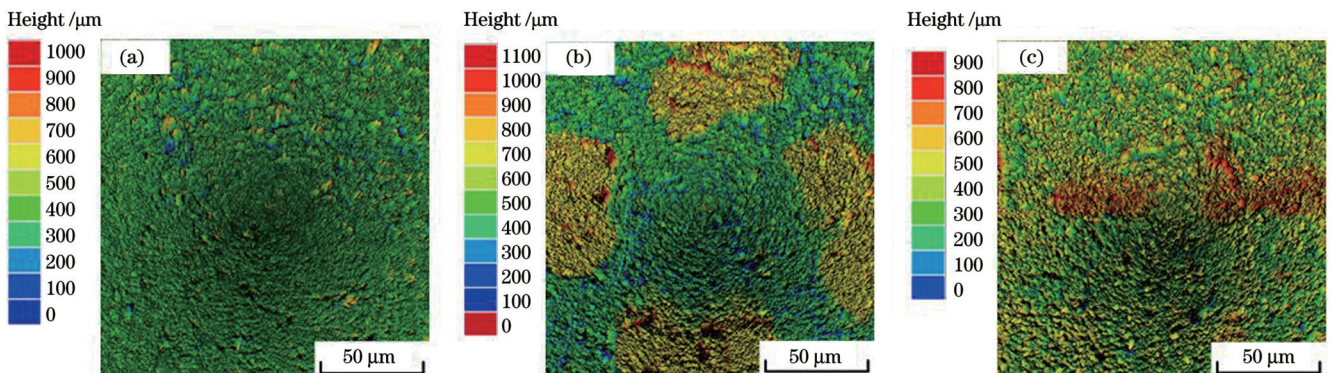


图 12 去除支撑后不同支撑试件下表面的三维形貌图。(a)锥状支撑试件;(b)块状支撑试件;(c)组合支撑试件  
Fig. 12 Three-dimensional morphologies of lower surfaces of samples with different support types after support is removed. (a) Cone-type support sample; (b) block-type support sample; (c) combination-type support sample

316L 材料构件悬垂面的支撑结构时,增加组合支撑中的块状结构比例,能够提高表面成形精度。

### 5.5 支撑结构对显微组织的影响

对支撑间隙上方的悬垂区域进行金相组织观测,观测位置如图 13(a)所示。由图 13(b)~(d)所示的金相组织可知:锥状支撑试件的晶粒粗大( $42.15\ \mu\text{m}$ )、均匀,而相比之下,块状支撑试件和组合支撑试件的晶粒尺寸更加细小( $18.42\ \mu\text{m}$ ),且随着成形高度的

上升,晶粒之间的竞争生长更为激烈,晶粒形态差异化更显著,同时观察到局部区域有缺陷。造成不同支撑试件金相组织差异化的原因是,熔池凝固过程的热力学条件不同,依据第 3 节温度场分析结果可知,块状支撑优异的散热性使得冷凝过程中的温度梯度更大,冷却速度更快,因此,形成的晶粒更加细小,金属组织更加致密,提高了试件悬垂结构的组织性能。

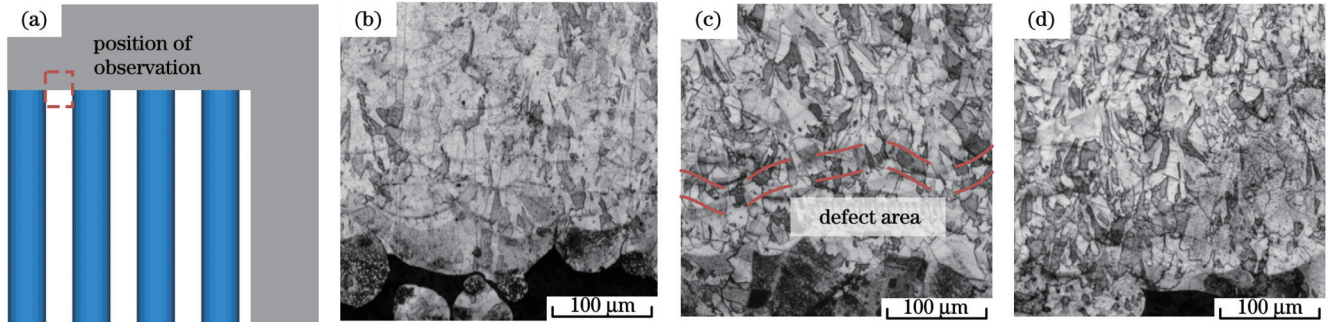


图 13 不同支撑类型试件金相图。(a)观察区域位置;(b)锥状支撑试件;(c)块状支撑试件;(d)组合支撑试件

Fig. 13 Metallographic diagrams of samples with different support types. (a) Position of observation area; (b) cone-type support sample; (c) block-type support sample; (d) combination-type support sample

进一步对块状支撑试件的缺陷区域进行 SEM 扫描,图 14 所示为缺陷区 SEM 像,在熔融层结合处观测到大量气孔。根据仿真得到的温度场分析结果可知,该缺陷产生的原因是:块状支撑试件的冷却速度较快,导致熔池中的空气未能及时溢出,而零件内部的气孔缺陷会降低成形试件的力学性能,因此当选择块状支撑作为悬垂区域的支撑结构时,需要通过后处理将悬垂结构底部的缺陷去除。

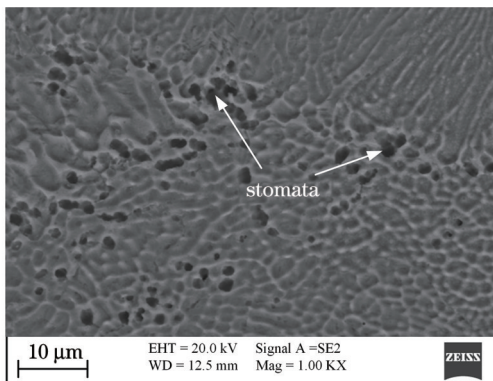


图 14 块状支撑试件缺陷区域的 SEM 像

Fig. 14 SEM image of defect area of block-type support sample

另外,还观察到,在晶粒内存在网状亚晶粒组织,对图 15(a)所示的亚晶界处的化学元素进行定性的点分析,EPMA 能谱如图 16 所示,测得的元素成分如表 5 所示。与 316L 粉末的元素含量进行对比发现,亚晶界处的 Cr、Ni 合金元素的质量分数略高,因此在亚晶界上可能存在元素富集。进一步对亚晶粒组织进行面扫描,从图 15 所示的元素偏析形貌结果可发现,Cr、Ni 合

金元素存在分布不均匀的情况,比 Fe 更重的合金元素偏聚到亚晶界上,形成网状的合金元素相。这是因为在 316L 选区激光熔化过程中,金属组织快速冷凝,而大原子合金元素的扩散缓慢,引起了成分波动,沿亚晶界富集形成了网状的 Cr、Ni 等相,富集的这类元素有助于降低断裂强度。

支撑结构通过改变冷却条件影响金属组织凝固、缺陷产生以及元素微观分布,块状支撑对提高组织性能具有显著效果,通过调整组合支撑中的块状结构比例,悬垂结构可获得性能优异的金属组织。

### 5.6 显微硬度随成形高度的变化

SLM 成形试件的硬度随成形高度的变化如图 17 所示,背景为锥状支撑试件金相图,可以看出:随着成形高度的增加,三种类型支撑试件的显微硬度都呈升高趋势。锥状支撑试件的硬度上升趋势缓慢,最小硬度与最大硬度相差 8 HV,硬度波动最小;组合支撑试件的硬度波动次之,为 19 HV;由于块状支撑试件底部存在局部缺陷,硬度波动最大,为 22 HV。锥状支撑试件最大显微硬度为 229 HV,组合支撑试件硬度得到提升,为 234 HV。支撑类型对显微硬度的影响主要有两方面原因:1)Cr、Ni 等合金元素偏聚到亚晶界上,形成的网状 Cr、Ni 相是脆而硬的相,密集的网状相使得硬度提高;2)在较高的冷凝速率下,形成的复杂位错网络和细小晶粒阻碍了压痕向下迁移,进而提高了显微硬度。

上述研究表明:通过优先选择综合性能更好的组合支撑结构并增加块状结构比例,悬垂结构可以形成硬度较高的金相组织,进而提高试件力学性能。当试



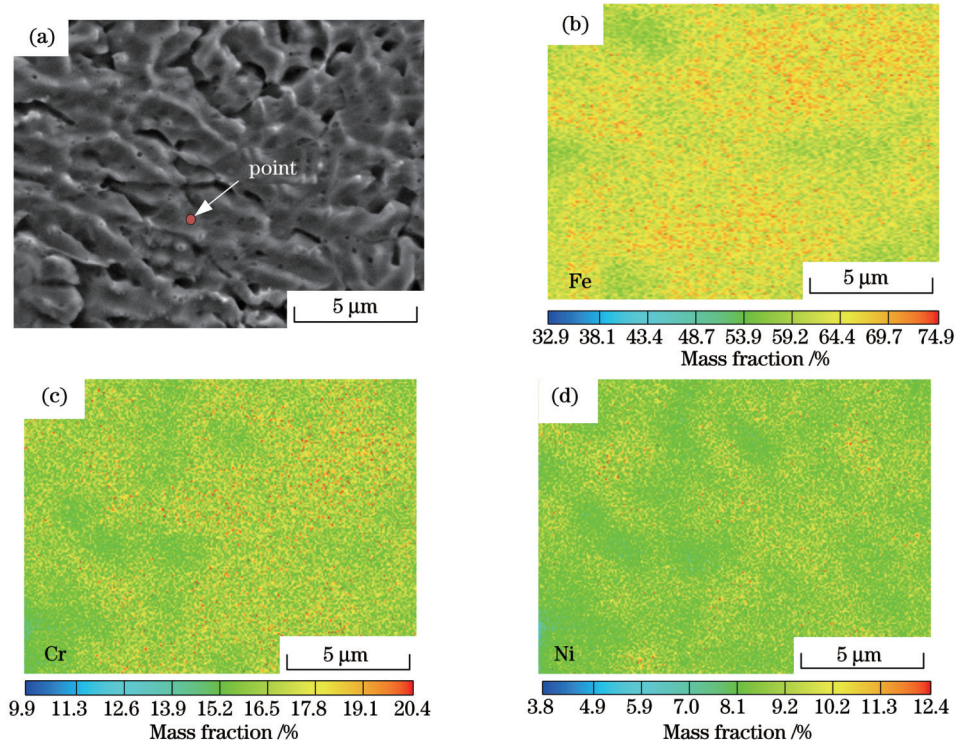


图 15 316L 金属组织的元素偏析形貌。(a)测量点位置;(b)Fe 元素;(c)Cr 元素;(d)Ni 元素

Fig. 15 Elemental segregation morphologies of 316L metal microstructure. (a) Position of measurement point; (b) Fe element; (c) Cr element; (d) Ni element

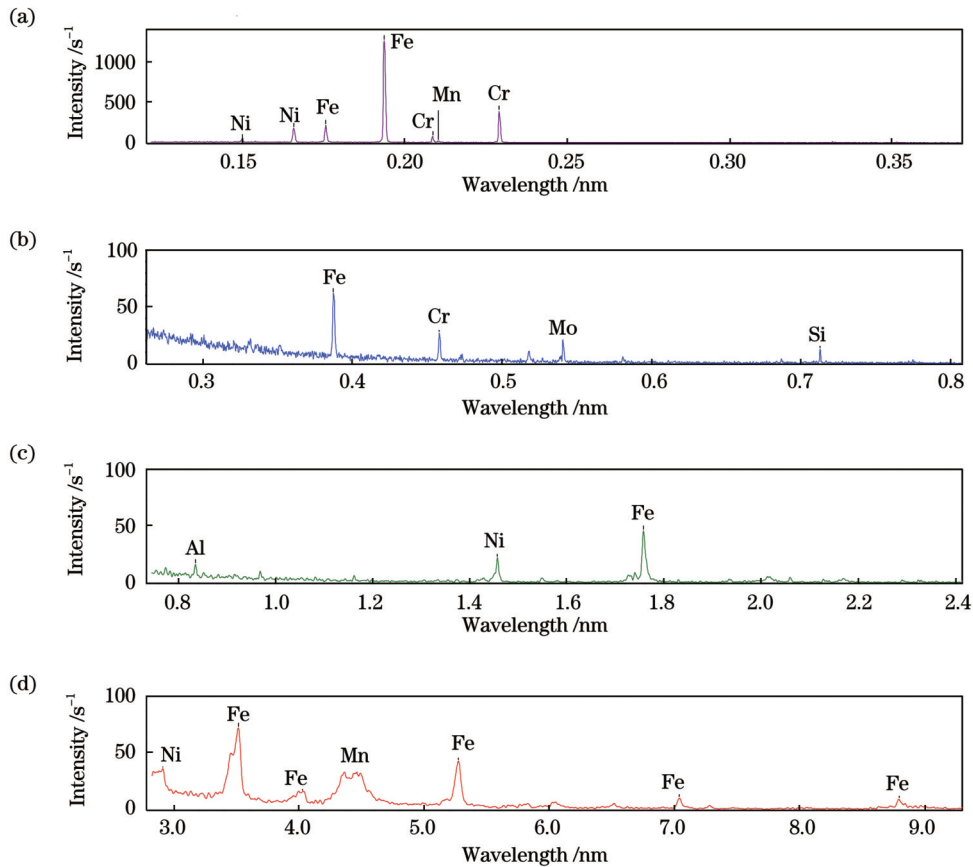


图 16 元素成分 EPMA 能谱分析结果。(a)CH4 通道;(b)CH3 通道;(c)CH2 通道;(d)CH1 通道

Fig. 16 EPMA energy spectrum analysis results of elemental compositions. (a) CH4 channel; (b) CH3 channel; (c) CH2 channel; (d) CH1 channel

表 5 测量点及 316L 粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 5 Chemical compositions of measurement point and 316L powder (mass fraction, %)

Element	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Fe
Point	18.03	11.06	0.75	1.62	0.57	67.59
316L powder	16.90	10.71	0.75	2.38	0.69	68.54

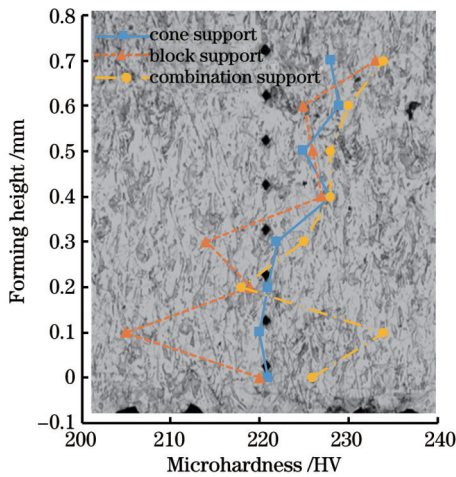


图 17 SLM 成形试件成形高度-硬度变化曲线

Fig. 17 Forming height-hardness curves of SLM forming samples

件对组织性能要求不高时,通过增加锥状结构比例,可以减少悬垂结构底部产生的缺陷。

## 6 结 论

分析了 SLM 成形过程中不同支撑结构对温度场分布、表面形貌、显微组织和显微硬度的影响,深入研究了支撑性能的内在差异,结论如下:

1) 支撑结构改变了悬垂板的热力演化过程,块状支撑较小的体积能够显著降低试件峰值温度、温度振荡幅度以及边缘温度梯度,验证了块状支撑良好的散热性能。在确保悬垂区域烧结过程产生的热量可及时消散的情况下,块状结构能够显著减少打印支撑消耗的粉末材料。

2) 组合支撑显著提高了试件成形精度,较高的支撑强度抑制了试件翘曲,并通过减少悬垂板下表面的粉末团簇,提高了表面形貌质量。优选组合支撑作为悬垂面的支撑结构,可制备尺寸精度更高的悬垂构件。

3) 锥状支撑试件的金属晶粒粗大、组织均匀,气孔缺陷较少,而块状支撑的金属组织生长竞争激烈,形成了更细小和差异化的晶粒,且亚晶粒中存在合金元素偏聚现象,表明支撑类型影响悬垂区域的金相组织。通过调整组合支撑中不同结构的比例,能够控制组织形态、缺陷和成分分布,提高悬垂结构的组织性能。

4) 锥状支撑试件较少的缺陷降低了硬度波动,块状支撑试件形成的细化晶粒及脆而硬的网状相提高了显微硬度,组合支撑兼具另两种支撑的优势。优选综

合性能优异的组合支撑制备悬垂构件,设定较小的加工余量即可将缺陷去除,从而减少材料浪费,为支撑结构选择提供了技术指导。

## 参 考 文 献

- [1] 顾冬冬,张红梅,陈洪宇,等.航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J].中国激光,2020,47(5):0500002.  
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
- [2] Efremenko B V, Zurnadzhy V I, Chabak Y G, et al. A comparison study on the effect of counter ball material on sliding wear response of SLM-printed biomedical 316L steel[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 66: 2587-2593.
- [3] Yin Y, Tan Q Y, Bermingham M, et al. Laser additive manufacturing of steels[J]. International Materials Reviews, 2022, 67(5): 487-573.
- [4] 蒋华臻,房佳钰,陈启生,等.激光选区熔化成形 316L 不锈钢工艺、微观组织、力学性能的研究现状[J].中国激光,2022,49(14):1402804.  
Jiang H Z, Fang J H Y, Chen Q S, et al. State of the art of selective laser melted 316L stainless steel: process, microstructure, and mechanical properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 1402804.
- [5] 刘伟,李能,周标,等.复杂结构与高性能材料增材制造技术进展[J].机械工程学报,2019,55(20):128-151,159.  
Liu W, Li N, Zhou B, et al. Progress in additive manufacturing on complex structures and high-performance materials[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(20): 128-151, 159.
- [6] Yan L, Zhang X, Fu Q, et al. Assembly-level topology optimization and additive manufacturing of aluminum alloy primary mirrors[J]. Optics Express, 2022, 30(4): 6258-6273.
- [7] Delissen A, Boots E, Laro D, et al. Realization and assessment of metal additive manufacturing and topology optimization for high-precision motion systems[J]. Additive Manufacturing, 2022, 58: 103012.
- [8] Günaydin K, Rea C, Kazancı Z. Energy absorption enhancement of additively manufactured hexagonal and re-entrant (auxetic) lattice structures by using multi-material reinforcements[J]. Additive Manufacturing, 2022, 59: 103076.
- [9] Jiang J C, Xu X, Stringer J. Support structures for additive manufacturing: a review[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2018, 2(4): 64.
- [10] Yuan L, Pan Z X, Ding D H, et al. Fabrication of metallic parts with overhanging structures using the robotic wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 63: 24-34.
- [11] 王雷,闫素娜,赵强强,等.基于单元过滤的自支撑结构拓扑优化方法[J].西安交通大学学报,2021,55(5):45-55.  
Wang L, Yan S N, Zhao Q Q, et al. A topology optimization method for self-supporting structures based on element filtering[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 45-55.
- [12] Chen J C, Cheng J X, Zhang X Y, et al. An additive manufacturing-oriented structural optimization design method to eliminate sacrificial support[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2022, 65(8): 230.
- [13] Mele M, Bergmann A, Campana G, et al. Experimental investigation into the effect of supports and overhangs on accuracy and roughness in laser powder bed fusion[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 140: 107024.
- [14] Sefene E M. State-of-the-art of selective laser melting process: a comprehensive review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 63: 250-274.
- [15] Zhu L, Feng R L, Xi J T, et al. A lightweight design of tree-shaped support structures for SLM additive manufacturing[J].

- Computer-Aided Design and Applications, 2019, 17(4): 716-726.
- [16] Leary M, Maconachie T, Sarker A, et al. Mechanical and thermal characterisation of AlSi10Mg SLM block support structures[J]. Materials & Design, 2019, 183: 108138.
- [17] Khobzi A, Farhang Mehr F, Cockcroft S, et al. The role of block-type support structure design on the thermal field and deformation in components fabricated by Laser Powder Bed Fusion[J]. Additive Manufacturing, 2022, 51: 102644.
- [18] 杨建凯, 顾冬冬, 葛庆, 等. 铝合金激光增材制造支撑布局及精确成形机制[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 525331.  
Yang J K, Gu D D, Ge Q, et al. Support layout and precise forming mechanism of aluminum alloy for laser additive manufacturing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 525331.
- [19] Schmidt M, Greco S, Müller D, et al. Support structure impact in laser-based powder bed fusion of AlSi10Mg[J]. Procedia CIRP, 2022, 108: 88-93.
- [20] Cao Q Q, Shi Z Q, Bai Y C, et al. A novel method to improve the removability of cone support structures in selective laser melting of 316L stainless steel[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 854: 157133.
- [21] Subedi S C, Shahba A, Thevamaran M, et al. Towards the optimal design of support structures for laser powder bed fusion-based metal additive manufacturing via thermal equivalent static loads[J]. Additive Manufacturing, 2022, 57: 102956.

## Performance Differences of Support Structures for Parts Formed by Selective Laser Melting

Yi Yali<sup>1</sup>, Cheng Yangyang<sup>1,2</sup>, Jia Changzhi<sup>2\*</sup>, Jin Herong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;*

<sup>2</sup>*Artillery Engineering Department, Shijiazhuang Branch, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, Hebei, China*

### Abstract

**Objective** When metal components are manufactured by selective laser melting, a suspension structure cannot be directly formed in the unmelted powder layer. A suitable support structure must be added in time to dissipate the heat generated during the metal powder melting process and restrain the deformation of the overhanging characteristics. Therefore, the manufacturability and formation quality of the overhang structure are related to the added support structure. Various types of support structures, such as block, plane, tree, and cone supports, have been designed for overhanging structures, and considerable research has been conducted on support structure optimization, support strength, and easy removal. However, the type of performance that differs between support structures is not clear. In practice, this depends primarily on the experience of selecting a certain support structure. In this study, the effects of cone, block, and combination supports on the thermodynamics and formation quality of overhanging specimens are studied, and the selection principle of the support type is formulated; this can provide a technical reference for the selection of supporting structures.

**Methods** First, the thermal elastic-plastic finite element method is used to simulate the additive manufacturing process of the cone, block, and combination support specimens. By quantitatively analyzing the temperature data at the end of the build process along vertical and horizontal paths, which are extracted from the model, the influence of the heat conduction characteristics of the different support structures on the temperature field of the specimen is revealed. Three types of supporting specimens made of 316L powder are prepared using the selective laser melting (SLM) method. The surface morphologies of the specimens after removing the support are analyzed using the laser scanning confocal microscope and scanning electron microscope. The effect of the supporting structure on the surface morphology is studied. The effects of the supporting structure on the microstructure and elemental distribution are studied using an optical microscope and electron probe. Finally, the microhardness of the formed specimens is measured using a microhardness tester to characterize their mechanical properties.

**Results and Discussions** The geometry of the support structure affects the distribution of the temperature field in the overhanging specimen. The block support reduces the temperature gradient in the edge region (Fig. 6), thus reducing the specimen warpage caused by thermal strain. The block support reduces the peak temperature by 6.7%, temperature gradient by 14.05%, and temperature oscillation amplitude by 41.07% of the specimen, indicating that the block support structure has excellent cooling performance, whereas a higher cooling rate helps the overhang structure to form fine grains with good microstructural properties. In addition, it is found that the combination support specimen has the smallest warpage (0.29 mm) and surface roughness (70.804  $\mu\text{m}$ ) among the three types of specimens (Fig. 12). The excellent support strength and heat dissipation performance of the combination support improve the formation accuracy of the specimen. The block and combination support specimens have refined grain and reticulated alloying element phases such as Cr and Ni in the sub-grains. The dense metal structure and the brittle and hard reticular phases increase the microhardness to 234 HV (Fig. 17). However, the microhardness fluctuation of the block support specimen is the largest owing to the existence of many porosity defects, and its value is 22 HV. Therefore, a combination support structure with better comprehensive performance is preferred to improve the mechanical properties of the overhanging structure.

**Conclusions** The support structure changes the thermomechanical evolution process of the overhang plate. The block support can

significantly reduce the peak temperature, temperature oscillation amplitude, and edge temperature gradient of the specimen, concluding that the block support structure exhibits excellent cooling performance. The combination support can not only restrain the specimen's warpage by providing sufficient support strength but also improve the surface topography quality by reducing the powder clusters on the lower surface of the overhanging specimen. Therefore, choosing a combination support is conducive to the preparation of overhang structures with higher dimensional accuracy. The support structure affects the microstructure of the overhanging area of the specimen. The metal structure of the cone support specimen is coarse, uniform, and has fewer porosity defects that can be removed by setting a small machining allowance. Owing to the intense competition of metal grain growth in the block support specimen, the refined grains and the brittle and hard reticular phases formed in the overhang area significantly improve the microhardness. The combination support has the advantages of the other two types of support. Increasing the proportion of block structures in combination-type supports is beneficial to improve the mechanical properties of specimens, and increasing the proportion of cone structures is conducive to reduce material consumption.

**Key words** laser technique; selective laser melting; support structure; 316L; numerical simulation; microstructure