

选区激光熔化成形4Cr5MoSiV1钢 无支撑悬垂结构质量研究

毕延超¹, 陶凤和¹, 贾长治¹, 陈帅²

1. 陆军工程大学石家庄校区 河北石家庄 050003

2. 32562部队 贵州龙里 522730

摘要: 为揭示选区激光熔化成形无支撑悬垂结构的特点规律, 采用Dimetal-50 SLM设备选取4Cr5MoSiV1模具钢粉末成形不同试样, 研究无支撑悬垂结构倾斜角 α (悬垂结构轮廓切线与水平面夹角) 和成形高度 h 对成形质量的影响。结果表明: 当倾斜角 $\alpha < 35^\circ$ 时, 悬垂曲面出现塌陷和表面粘粉等缺陷, 且 α 越小缺陷越明显; 当 $\alpha \geq 35^\circ$ 时, 悬垂曲面成形质量较好, 且 α 越大悬垂结构尺寸误差越小; 对于 $35^\circ \leq \alpha < 45^\circ$ 的悬垂平面, 当成形高度 h 大于一定高度时会出现不同程度的翘曲缺陷, α 越小极限成形高度越小, 且翘曲缺陷越明显; 当 $\alpha < 35^\circ$ 时, 悬垂平面由于翘曲等缺陷导致无法成形。

关键词: 选区激光熔化; 4Cr5MoSiV1钢; 悬垂结构; 质量

1 序言

选区激光熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM) 作为最具前景的增材制造技术之一, 以数字化模型为基础采用原材料逐层堆积的方法直接成形构件^[1], 是目前应用面最广、成形结构最复杂、适应材料较广泛的一种增材制造技术^[2]。与传统加工工艺相比, 选区激光熔化技术具有构件开发周期短、精度高、成形复杂、结构能力强等优点^[3], 但同时在成形悬垂结构时容易出现表面粘粉和翘曲变形等缺陷, 严重时甚至无法成形。

国内外学者从添加支撑和优化工艺参数等角度出发, 探索研究了提高悬垂结构的成形质量。陈超等^[4]总结了添加支撑的规律, 并结合支撑添加和成形过程的仿真对规律进行了验证; 张国庆等^[5]研究了支撑结构对零件翘曲变形的影响规律, 提出通过优化支撑结构可以减少零件的翘曲变形; 段声勤^[6]分析了激光功率对悬垂圆孔成形质量的影响, 提出当激光功率大于一定数值后, 随激光功率增大悬垂结构最大塌陷量将逐渐增大。

添加支撑虽然可以提高悬垂结构的成形质量, 但也增加了拆除工序, 降低了成形精度, 特别是复杂内腔结构拆除支撑较为困难, 甚至无法拆除。

本文在成形件综合力学性能最佳工艺参数^[7]下, 开展悬垂结构倾斜角 α 和成形高度 h 对无支撑悬垂结构成形质量的影响研究, 进一步揭示选区激光熔化成形无支撑悬垂结构的特点规律, 为选区激光熔化成形件结构设计提供参考。

2 试验设备、材料和方法

(1) 试验设备 试样成形设备采用广东信达雅三维科技有限公司研制的选区激光熔化设备DiMetal-50。其激光器为200W光纤激光器, 聚焦光斑为70 μ m, 最快扫描速度为6000mm/s, 最大成形尺寸为50mm $\times$ 50mm $\times$ 50mm, 保护气体采用高纯氩气。

(2) 试验材料 试验选用雾化法制备的4Cr5MoSiV1钢粉末, 该粉末粒径分布为15~45 μ m, 粉末化学成分见表1。

表1 4Cr5MoSiV1钢粉末化学成分 (质量分数) (%)

C	Cr	Mo	V	Ni	Si	Mn	S	P	Fe
0.39	5.24	1.27	1.05	0.23	0.87	0.48	0.01	0.02	Bal

(3) 试验方法 建立内半径5mm、外半径7mm、长度为4mm的柱面体三维模型, 如图1所示。选区激光熔化成形工艺参数: 激光功率为

190W, 扫描速度为210mm/s, 扫描间距为70 μ m, 铺粉厚度为25 μ m, 扫描策略为S形正交扫描。成形试样(0号试样)后, 采用电子快显卡尺(分辨力0.01mm)按照图2所示方法测量柱面体内半径尺寸, 并采用三目体视显微镜和扫描电镜观察试样内侧悬垂表面形貌。



图1 柱面体三维模型

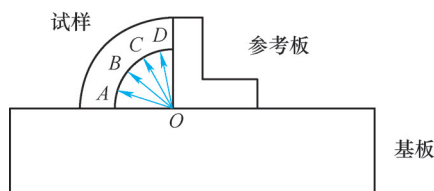


图2 柱面体曲率半径测量

建立倾斜角分别为15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°、60°和75°, 截面10mm×10mm、厚度8mm的三维模型, 如图3所示。选区激光熔化成形工艺参数为: 激光功率为190W, 扫描速度为210mm/s, 扫描间距为70 μ m, 铺粉厚度为25 μ m, 扫描策略为S形正交扫描。成形试样(分别为1~9号试样)后, 采用电子快显卡尺(分辨力0.01mm)按照图4所示方法测量试样水平方向误差, 并采用三目体视显微镜和扫描电镜观察试样内侧悬垂表面形貌。

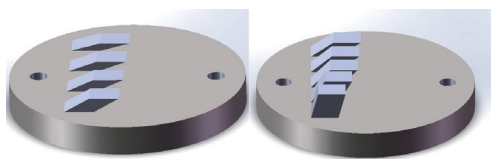


图3 不同倾斜角试样模型

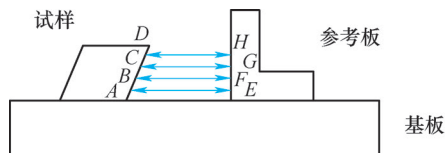
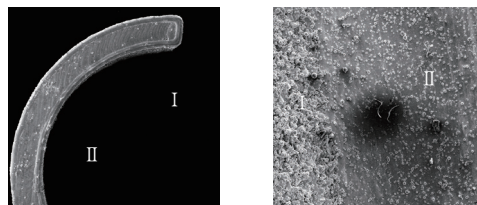


图4 试样水平方向误差测量示意

3 结果与分析

(1) 倾斜角度对悬垂结构成形质量的影响 从

0号试样外观(见图5)可得, 当倾斜角 $\alpha \geq 35^\circ$ 时(见图5 II区)成形悬垂曲面外貌较好; 当倾斜角 $\alpha < 35^\circ$ 时(见图5 I区)成形悬垂曲面塌陷和粘粉等缺陷较为明显。随着倾斜角 α 减小, 成形悬垂曲面曲率半径 ρ 的误差逐渐增大, 如图6所示。



a) 柱面体侧视图 b) 悬垂表面形貌

图5 柱面体形貌

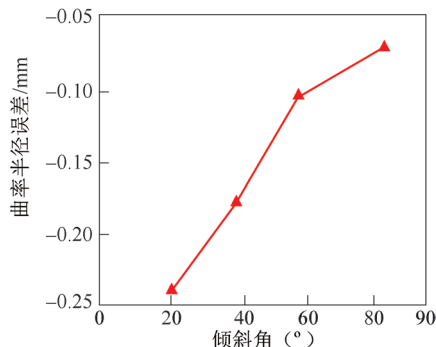


图6 柱面体悬垂曲面曲率半径误差

结果分析: 选区激光熔化成形的原理是原材料的逐层堆积, 无支撑悬垂曲面的任意一点可近似看作第 n 层和第 $n+1$ 层的叠加, 如图7所示。当 l 大于激光器光斑直径(70 μ m)时, 激光熔化的金属粉末完全落于未熔化的金属粉末区域上, 熔化的金属粉末凝固前在重力和对流等作用下部分渗入到未熔化的金属粉末区, 因此出现塌陷和粘粉现象。由于未熔化金属粉末的热导率远小于金属实体, 因此 l 越大, 液态金属粉末保持时间越长, 渗入到未熔化金属粉末区的金属液就越多, 塌陷和粘粉现象也就越明显, 同时成形结构的尺寸精度也越差。为成形可靠的悬垂结构, 取 l 等于激光器光斑半径(即 $l=35\mu\text{m}$), 此时 $\alpha=\arctan(b/l)\approx 35^\circ$, 计算结果与试验结果基本一致。

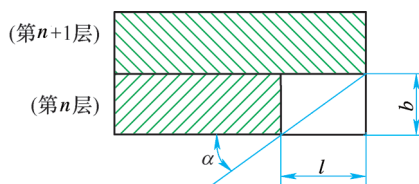
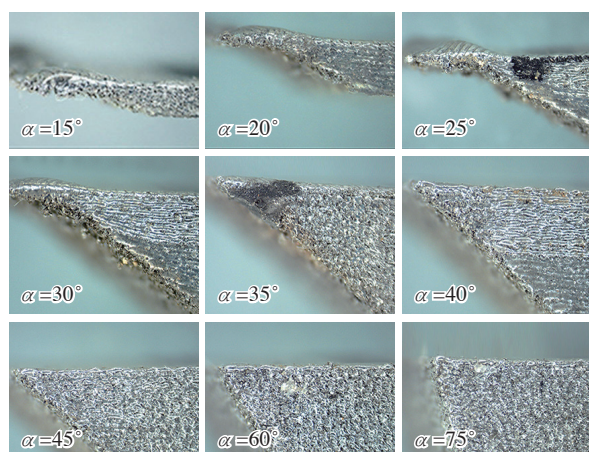
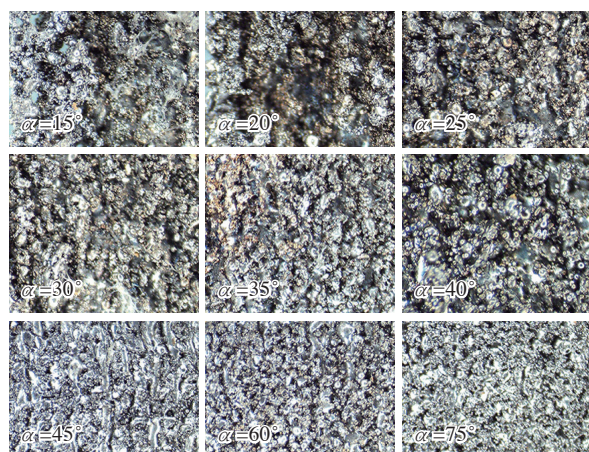


图7 悬垂结构成形

(2) 成形高度对悬垂平面成形质量的影响 从1~9号试样外观(见图8)可得,当倾斜角 $\alpha < 35^\circ$ 时悬垂平面粘粉和翘曲变形极为明显,无法成形相应的悬垂平面;当 $35^\circ \leq \alpha < 45^\circ$ 时,悬垂平面成形到一定高度时出现明显的翘曲变形,倾斜角 α 越小,成形悬垂平面的极限高度就越低;当倾斜角 $\alpha \geq 45^\circ$ 时,随着成形高度增加,成形的悬垂结构在水平方向上尺寸误差逐渐增大,如图9所示。



a) 悬垂平面侧视图



b) 悬垂表面形貌

图8 悬垂平面形貌

结果分析:在选区激光熔化成形过程中,吸收激光能量熔化的金属粉末在快速凝固时需要散失热量,由于无支撑悬垂结构下方金属粉末的热导率远小于金属实体的热导率,熔化的金属粉末凝固时间延长出现表面粘粉现象,随着倾斜角 α 的减小,悬垂部分面积变大,粘粉现象更为突显;同时由于无支撑悬垂结构热量传递的效率较低、热应力较大,故应力释放过程中会导致已成形实体端部翘曲变形,倾斜角 α 越小,翘曲变形越明显。

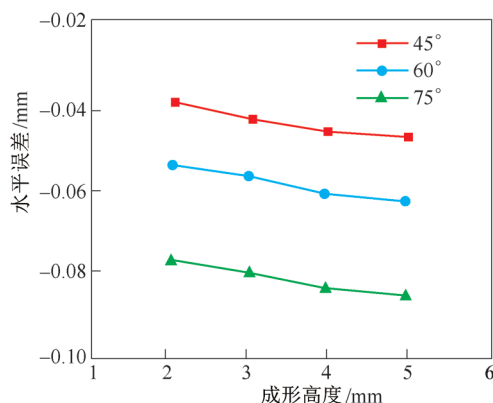


图9 悬垂平面水平方向误差

4 结束语

1) 选区激光熔化成形4Cr5MoSiV1钢无支撑悬垂结构,当倾斜角 $\alpha \geq 35^\circ$ 时,成形质量较好;当 $\alpha < 35^\circ$ 时,悬垂结构塌陷和粘粉缺陷较为明显, α 越小缺陷越明显。

2) 对于选区激光熔化成形4Cr5MoSiV1钢无支撑悬垂平面,当倾斜角 $\alpha < 35^\circ$ 时,无法有效成形;当 $35^\circ \leq \alpha < 45^\circ$ 时,存在极限成形高度 h ,悬垂平面高度小于 h 部分的成形质量较高,悬垂平面高度大于 h 部分会出现翘曲等缺陷;当 $\alpha \geq 45^\circ$ 时,悬垂平面不存在极限成形高度,且 α 越大成形质量越高。

参考文献:

- [1] 田杰,黄正华,戚文军,等.金属选区激光熔化的研究现状[J].材料导报,2017,31(29):90-94.
- [2] 马明明,陈贞韬.激光选区熔化成形受电弓滑板连接座工艺与性能研究[J].金属加工(热加工),2020(10):43-47.
- [3] 李海亮,贾德昌,杨治华,等.选区激光熔化3D打印钛合金及其复合材料研究进展[J].材料科学与工艺,2019,27(2):1-11.
- [4] 陈超,武姝婷,丁红瑜,等.选区激光熔化悬垂结构支撑添加研究[J].工具技术,2019,53(12):56-59.
- [5] 张国庆,杨永强,张自勉,等.激光选区熔化成型零件支撑结构优化设计[J].中国激光,2016,42(12):21-27.
- [6] 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,2018.
- [7] 陈帅.选区激光熔化成形火炮备件的组织性能与工艺优化研究[D].石家庄:陆军工程大学,2020.