

文章编号: 1001-3806(2011)02-0148-04

选区激光熔化成型悬垂面质量的影响因素分析

卢建斌, 杨永强*, 王迪, 罗子艺, 苏旭彬
(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 悬垂结构是选区激光熔化成型存在的固有几何限制, 其容易导致成型件形状与尺寸精度变差。为了掌握悬垂面成型出现缺陷的原因, 在自主研发的选区激光熔化成型设备上, 采用 316L 不锈钢粉末, 进行了高速与低速条件下成型不同倾斜角度和不同扫描线长度的悬垂结构实验。结果表明, 倾斜角越小和扫描速度越小, 翘曲变形越严重, 理论分析了最小成型角度与可靠成型角度分别与高速扫描、低速扫描的实验结果吻合。高速扫描可成型具有最小成型角度的悬垂面, 而低速扫描下只能成型可靠成型角度的悬垂面。悬垂面沿着长线扫描方向更容易发生翘曲变形。通过对悬垂面进行局部成型参量控制, 可以明显改善成型质量。本研究从工艺与设计的角度为选区激光熔化技术成型悬垂面提供了依据, 并给出了初步解决方法。

关键词: 激光技术; 快速成型; 选区激光熔化; 悬垂面; 最小成型角度

中图分类号: TN249; TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.002

Analysis of affecting factors of overhanging surface quality by selective laser melting

LU Jian-bin, YANG Yong-qiang, WANG Di, LUO Zi-yi, SU Xu-bin

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Overhanging structure is an inherent geometric process limitation of selective laser melting (SLM), which would easily reduce the shape and dimension accuracy of built parts. To find the causes of defects in building overhanging surface, overhanging structure building experiments were carried out on 316L stainless steel at different inclined angle, scanning length and different speed. The results showed that at smaller inclined angle and the lower scanning speed, more serious warpage would happen, and the theoretical minimum building angle and reliable building angle fit with the experimental results at high and low scanning speed. High-speed scanning can build the overhanging surface with the minimum building angle, while low-speed scanning can only build the overhanging surface with a reliable building angle. Warp of scanned overhanging surface would be more likely to happen along the long line direction. By control of local processing parameters, the quality of overhanging surface can be significantly improved. The basis for building overhanging surface by SLM was provided from the perspective of process and design, and the preliminary solution was proposed.

Key words: laser technique; rapid prototyping; selective laser melting; overhanging structure; minimum building angle

引言

选区激光熔化(selective laser melting, SLM)技术理论上可以成型任意复杂形状的金属零件,但不能完美地成型所有的几何特征,特别是悬垂面结构^[1-2]。此类结构使 SLM 成型零件的局部形状精度、尺寸精度不能达到要求,严重时导致加工件报废,甚至使成型过程失败。针对悬垂面的加工,目前主要是先通过添加大

量的金属支撑保证成型过程稳定,再以后续去除支撑和表面打磨的方法保证悬垂面形状。也有少数情况下是在 SLM 成型结束后,通过机加工方式获得悬垂面。但是当加工件精细复杂,或者悬垂面在零件的内部时,此时添加支撑或者后续机加工的手段都不再合适。所以,如果能够在不添加支撑情况下将悬垂面直接成型完整,或者在设计阶段避免或尽量减少悬垂面出现,对 SLM 工艺的提升和应用范围拓展具有很大的意义。目前,国内外针对 SLM 成型悬垂面的研究很少,比利时鲁文大学 KRUTH^[3-4]带领的团队对其进行了初步的研究,提出通过在光路系统中增加监测和反馈装置,灵活改变激光功率大小的方式改善悬垂面的成型质量。

本文中详细阐述了悬垂面成型缺陷的发生原理,并分析倾斜角度、扫描速率与扫描线长度对悬垂面成型的影响。本实验为 SLM 成型提供设计依据,并对

基金项目:2007 粤港关键领域突破中标项目(广州市专项)资助项目(2007Z1-D6091);广东省教育部产学研结合项目资助项目(2007A090302004)

作者简介:卢建斌(1985-),男,硕士研究生,研究方向为精细零件的选区激光熔化直接成型。

* 通讯联系人。E-mail: meiyqyang@scut.edu.cn

收稿日期:2010-09-06;收到修改稿日期:2010-09-14

SLM 成型悬垂面进行了初步的工艺优化。

1 实验条件

1.1 SLM 成型悬垂面的理论分析

图 1 所示为任意曲面零件分层后的示意图。其

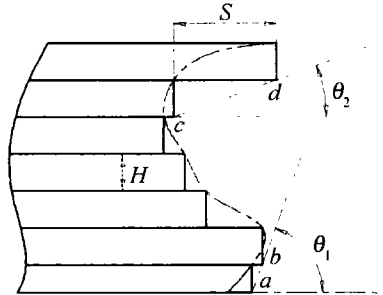


Fig. 1 Slicing model of overhanging surface

中, $a \sim b$ 段与 $c \sim d$ 段在 SLM 成型过程中将遇到悬垂面成型, 在分层切片时会形成没有自我支撑的悬空部分, 层与层之间悬空部分的长度 S 可由下式获得:

$$S = H \cot \theta \quad (1)$$

式中, H 为切片厚度, 倾斜角 θ 为切片层轮廓与水平面所成的夹角。在 SLM 成型中, S 值越大越容易造成悬垂物与翘曲变形, 对成型很不利。

根据(1)式可知, S 值大小与层厚 H 和倾斜角 θ 密切相关, H 值越大, 或者 θ 越小, 将使 S 增大。目前 SLM 使用的工艺层厚一般由材料的粉末粒径确定, 优化的层厚范围为 $20\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ ^[5-6]。本实验中层厚 H 值设为 $35\mu\text{m}$, 所以 S 值大小主要与倾斜角 θ 相关。 $a \sim b$ 段倾斜角 θ_1 明显大于 $c \sim d$ 段倾斜角 θ_2 , 所以 $c \sim d$ 段成型更容易发生缺陷。

SLM 成型悬垂面经常发生的两种缺陷是悬垂物和翘曲变形。当激光入射到实体支撑区(见图 2 中的

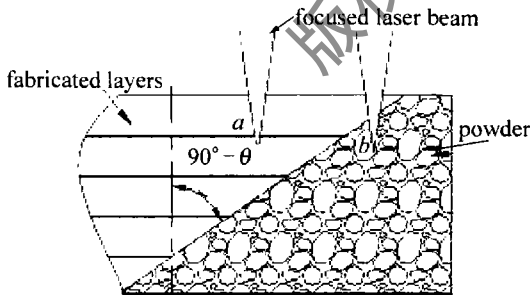


Fig. 2 Schematic diagram of overhanging surface scanned by laser beam

a 点), 热导率高, 而当激光入射到粉末支撑区(见图 2 中的 b 点), 热导率只有相应实体材料的 $1/100$ 。所以, 在相同的激光加工参量条件下, 粉末支撑区比实体支撑区的能量输入大得多, 导致在粉末支撑区的熔池过大, 熔池因重力和毛细管力的作用沉陷到粉末中。这些原因导致成型悬垂面时出现悬垂物, 下表面质量差, 尺寸精度也差。翘曲变形是由于 SLM 成型过程中存在的热应力超过材料的强度, 发生塑性变形引起的。

悬垂面翘曲变形很大的原因是缺少支撑将其固定住, 热应力拉伸致其向中心翘曲。

1.2 实验设备和材料

本实验中使用的 SLM 系统包括光纤激光器、自动化成型机主体、扫描振镜、聚焦组件、预置粉末装置、成型室等。该系统的最大优势是使用英国 SPI 200W 波长 1090nm 掺镱双包层连续式光纤激光器, 具有转换效率高、性能可靠、寿命长、光束模式接近基模等优点。由于激光光束质量很好, 激光束能被聚集成极细微的光束, 而且其输出波长短, 因而使光纤激光器在精密金属零件的选区激光熔化快速成型中有着极为明显的优势。激光由扫描振镜导向, 然后通过 $f-\theta$ 透镜聚焦, 扫描速率为 $10\text{mm/s} \sim 5000\text{mm/s}$, 加工层厚 $20\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$, 激光聚焦光斑直径 $70\mu\text{m}$ 。成型时, 将设计的 3 维模型进行切片及扫描路径规划, 得到可控制激光束扫描的切片轮廓信息, 然后向计算机调入切片轮廓信息, 控制激光束选择性地熔化金属粉末, 逐层堆积成与模型相同的 3 维实体。金属材料熔化过程中易发生氧化, 因此, 在成型过程使用氮气或者氩气作为保护气体。

实验中使用气雾化 500 目 316L 不锈钢粉末, 粉末成分组成(质量分数)为 $w(\text{C}) = 0.0003$, $w(\text{Cr}) = 0.175$, $w(\text{Ni}) = 0.1206$, $w(\text{Mo}) = 0.0206$, $w(\text{Si}) = 0.0086$, $w(\text{Mn}) = 0.003$, $w(\text{O}) = 0.0013$, 余量是 Fe; 粉末为球形粉, 粒度分布(质量分数)为: 小于 $15\mu\text{m}$ (0.5); 小于 $30\mu\text{m}$ (0.9); 平均粒径是 $17.11\mu\text{m}$; 粉末的松装密度是 4.04g/cm^3 。

1.3 实验方法

首先设计具有不同倾斜角 θ 的悬垂面, 讨论 θ 大小对成型质量的影响, 获得 SLM 成型悬垂面的最小成型角度。切片层厚为 $35\mu\text{m}$, 加工层数为 150 层, 每一加工层面尺寸为 $10\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。激光功率固定为 150W , 采用 $x-y$ 方向层间错开正交扫描策略^[7], 分别以扫描速率 $v = 200\text{mm/s}$ 和 $v = 600\text{mm/s}$ 成型不同倾斜角 θ 的悬垂面, 讨论扫描速率对其成型结果的影响, 实验参量如表 1 所示

Table 1 Building different inclined angle overhanging surface at different scanning speed

No.	scanning speed	$\theta/(^\circ)$	No.	scanning speed	$\theta/(^\circ)$
1	200mm/s	45	6	600mm/s	45
2		40	7		40
3		35	8		35
4		30	9		30
5		25	10		25

SLM 成型过程中产生内应力是导致悬垂面翘曲变形的的外力, 不同的扫描线长度产生的内应力大小也不一样。实验设计扫描线长度分别为 20mm 和 80mm 的悬垂面, 其底面添加了相同密集程度的支撑, 以验证不同扫描线长度对悬垂面成型的影响。

2 结果与讨论

图3为在200mm/s与600mm/s速率下分别成型

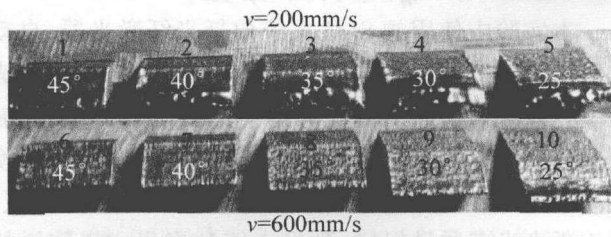


Fig. 3 Overhanging structures at different angles θ and scanning speed of 200mm/s and 600mm/s (laser power: 150W, layer thickness: 35 μ m, spot diameter: 70 μ m, scan spacing: 80 μ m)

倾斜角度 θ 从 25° ~ 45° 的悬垂面效果比较。从图中可以看出,样品 2 ~ 5 翘曲变形严重,且悬垂结构顶部有严重的悬垂物,样品 1 和 10 有轻微翘曲变形,成型面有沉陷的趋势,样品 6 ~ 9 能够成型获得平整的表面,几乎无翘曲变形发生,悬垂物也很少。

从图 4 看出,扫描线长度为 80mm 的悬垂面两端

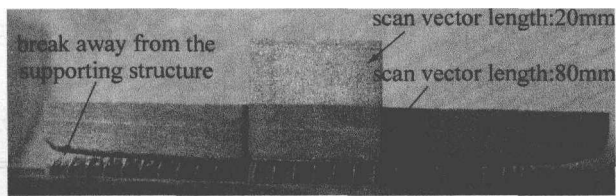


Fig. 4 Overhanging surface (supported) with the scan line length 20mm and 80mm (laser power: 150W, scan speed: 200mm/s, layer thickness: 35 μ m, spot diameter: 70 μ m, scan spacing: 80 μ m)

已经完全脱离支撑(成型 200 层),两端翘曲变形严重。而扫描矢量长度为 20mm 的悬垂面成型状态良好(成型 500 层),与支撑接触的悬垂结构看不出变形。

2.1 倾斜角度对悬垂面影响

从上述结果看出,倾斜角度 θ 对悬垂面成型影响很大。扫描速率 $v = 200\text{mm/s}$ 时,几乎所有样件都发生翘曲变形。随着倾斜角度从 45° 逐渐减小到 25°,样品翘曲变形越来越严重,成型的上表面面积也越来越小,悬垂面上的悬垂物越来越多。扫描速率 $v = 600\text{mm/s}$ 时,只有 $\theta = 25^\circ$ 时有轻微的翘曲, $\theta \geq 30^\circ$ 时悬垂面成型良好。根据图 1 可知, θ 越小意味着层与层间悬空部分 S 越大,当 S 大于光斑直径时,激光聚焦光斑完全落在粉末支撑区域上成型悬垂面,导致熔池体积很大,并沉陷到粉末中。为了稳定成型悬垂面, S 须小于光斑半径,使激光光斑大部分在实体支撑区域进行扫描。所以当层厚 $H = 35\mu\text{m}$,根据(1)式, S 需小于光斑直径 70 μm ,得出 $\theta = 27^\circ$ 是 SLM 成型悬垂结构的最小倾斜角。而当 $H\cot\theta$ 小于光斑半径时,得出 $\theta = 45^\circ$ 是 SLM 成型悬垂结构的可靠成型角度。上述分析结果与图 3 中实验结果吻合:当 $v = 600\text{mm/s}$, $\theta = 25^\circ$ (样品 10) 的悬垂面发生变形,当 $\theta = 30^\circ$ (样品 9) 悬垂

结构成型无恙,说明最小成型角度介于 25° 和 30° 之间,与理论推算的最小成型角度 $\theta = 27^\circ$ 吻合。而当 $v = 200\text{mm/s}$ 时,热输入量大概为 $v = 600\text{mm/s}$ 时的 3 倍,造成 SLM 成型过程中内应力迅速增大。所以,要求 $v = 200\text{mm/s}$ 时悬垂面的倾斜角度提高,即最小成型角度变大。图 3 中 $v = 200\text{mm/s}$ 时, $\theta \leq 40^\circ$ 时或者更小成型角度的悬垂面成型都有严重翘曲变形,而 $\theta = 45^\circ$ 时悬垂面只有轻微的变形,说明 $v = 200\text{mm/s}$ 时的最小成型角度略大于 45°,也与上述理论分析 $\theta = 45^\circ$ 是 SLM 成型悬垂面的可靠成型角度结论吻合。

2.2 扫描速率对悬垂结构成型影响

在激光功率相同的情况下,扫描速率反映了激光能量输入大小。扫描速率越小,激光对粉末的加热时间越长,当前层与上一层,以及当前层上下部分的温差越大,导致制件变形越大。从图 3 分别对比样品 1 和样品 6,样品 2 和样品 7,样品 3 和样品 8,样品 4 和样品 9,样品 5 和样品 10 发现, $v = 200\text{mm/s}$ 比 $v = 600\text{mm/s}$ 变形严重得多,说明低速扫描时将产生更大的内应力,相应的最小成型角度也要提高。结合倾斜角 θ 对悬垂结构的影响分析可知,最小成型角度与扫描速率(能量输入)互为制约。当悬垂面倾斜角 θ 固定且较小时,必须提高扫描速率;当需要低速扫描获得更致密化的成型时,在无法添加支撑的情况下,必须从设计上提高倾斜角度 θ 。通过多次实验在不同扫描速度下成型图 3 的悬垂结构实验,可得出最小成型角度与扫描速率的关系如图 5 所示。

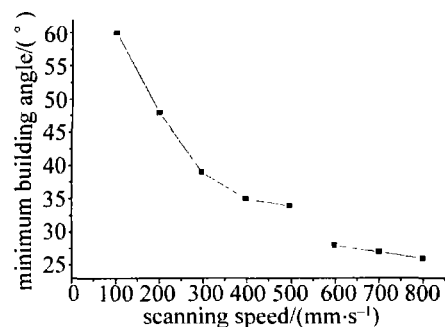


Fig. 5 Relationship between the minimum building angle and scanning speed of overhanging surface

2.3 扫描线长度对悬垂面成型影响

图 4 的样件属于 SLM 成型悬垂面倾斜角 $\theta = 0^\circ$ 的情况,扫描线 80mm 的悬垂面两端翘曲变形严重,且已拉断下方的支撑。试验结果说明了长扫描线比短扫描线累积更大的内应力。分析认为,当扫描线方向与截面的长边平行时,层内收缩主要依靠扫描线的纵向收缩来完成,这就使得收缩补偿过程进行得很不充分,层内的应力较大。MATSUMOTO 等人^[8]通过有限元方法分析激光快速熔化与凝固粉末的热传导和弹性变

形,得出翘曲程度与扫描线的长度成正比关系,提出可以采用分区扫描的方法防止大的翘曲变形和裂纹。

上述分析了影响悬垂结构成型相对比较重要的几点因素,包括倾斜角 θ 、扫描速率和扫描线长度。还有一些因素对悬垂面成型影响也较大,如激光功率、扫描策略、支撑添加的方式、零件空间位置摆放等。限于文章的篇幅,并不能对这些影响因素逐一详细讨论。所有这些影响因素在不同条件下,对悬垂结构成型质量将产生主要或者次要的影响。目前解决悬垂面成型缺陷的方法主要为添加支撑。作者提出根据悬垂面的位置,通过局部的参量控制来优化其成型质量。当SLM成型到悬垂面(特别是第1层出现的时候),扫描速率或者激光功率在扫描过程实时变化,根据悬垂面倾斜角 θ 大小适当的提高扫描速率或者降低激光功率以减小能量输入,减小翘曲变形趋势和挂渣量。图6是典

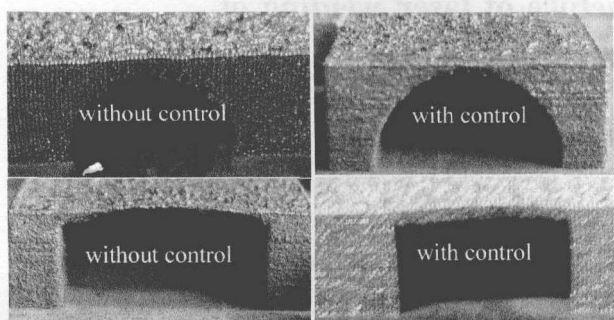


Fig. 6 Contrast of local parameters optimization in building overhanging surface

型的悬垂面是否施加了局部参量控制后的成型效果比较,从图中可以发现,经过局部参量控制后悬垂结构成型质量明显改善许多。

3 结论

悬垂面是SLM方法成型金属零件固有的几何限制。实验讨论倾斜角度、扫描速率、扫描线长度对悬垂面成型质量的影响。倾斜角度 θ 越小悬垂结构越难以精确成型。扫描速率越小,悬垂结构越容易翘曲。扫

描速率与最小成型角度相互制约。长扫描线更有利于悬垂结构应力累计,进而导致严重翘曲发生。实验通过局部参量控制后,能够明显的改善悬垂结构的成型质量。

本文内容为SLM技术的前期设计提供了重要依据:必须考虑最小成型角度和加工参量的关系。对于如 $\theta=0^\circ$ 这样特殊的悬垂结构,即使在添加支撑的情况,也并不能保证其顺利成型。

一些未在本文中讨论的因素,如支撑的添加方式、激光功率等对悬垂结构的成型也很重要。为了尽量准确地成型悬垂结构,SLM实验前需要综合的考虑大多数的因素达到最优化。

参考文献

- [1] KRUTH J P, VANDENBROUCKE B, VANDENBROUCKE J, *et al.* Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques[DB/OL]. (2005-04-20). <http://en.scientificcommons.org/21374842>.
- [2] WANG D, YANG Y Q, WU W H, *et al.* Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3233-3239 (in Chinese).
- [3] KRUTH J P, MERCELIS P, VAN VAERENBERGH J, *et al.* Feed-back control of selective laser melting [DB/OL]. (2008-02-17). <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/185342/1/krufcs.pdf>.
- [4] YASA E, CRAEGHS T, BADROSSAMAY M, *et al.* Rapid manufacturing research at the catholic university of Leuven[DB/OL]. (2009-09-17). https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/245245/1/Yasa_RMRResearchKUL_RapidTech09.pdf.
- [5] YADROITSEV I, BERTRAND Ph, SMUROV I. Parametric analysis of the selective laser melting process[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(19): 8064-8069.
- [6] MUMTAZ K A, ERASENTHIRAN P, HOPKINSON N. High density selective laser melting of Waspaloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 195(1/3): 77-87.
- [7] WANG D, YANG Y Q, HUANG Y L, *et al.* Impact of inter-layer scan strategy on quality of direct fabrication metal parts in SLM process[J]. Laser Technology, 2010, 34(4): 447-451 (in Chinese).
- [8] MATSUMOTO M, SHIOMI M, OSAKADA K. Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid Prototyping by selective laser processing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(1): 61-67.

(上接第147页)

- at 1.5 μm [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. Baltimore, America: Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007: CTuBB1.
- [4] LEIGH M, SHI W, ZONG J, *et al.* High peak power single frequency pulses using a short polarization-maintaining phosphate glass fiber with a large core[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(18): 181108/1-181108/3.
- [5] LIU Y, LIU J Q, CHEN W B. An all-fiber single frequency laser for eye-safe coherent Doppler wind lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1857-1860 (in Chinese).
- [6] ZHANG P, DUAN Y F, HUANG B, *et al.* Experimental study about all-fiber high-gain pulse fiber amplifiers[J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 452-454 (in Chinese).
- [7] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 222-240 (in Chinese).
- [8] ZHOU L, NING J P, CHEN Ch, *et al.* Stimulated Brillouin scattering in Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers [J]. Laser Technology, 2009, 33(5): 482-485 (in Chinese).
- [9] WU B. The research on 1.5 μm erbium-doped narrow line-width fiber laser[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007: 25-30 (in Chinese).
- [10] LICHTMAN E, FRIESEM A A, WAARTS R G, *et al.* Stimulated Brillouin scattering excited by two pump waves in single-mode fibers[J]. Journal of the Optical Society of America, 1987, 4(9): 1397-1403.