

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.006

基于熔体发泡法的跨尺度多孔结构 SLM 成型工艺研究

张永涛,米铁,黄博强

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:采用选区激光熔融技术(SLM),以316L不锈钢粉末为基体,加入不同质量分数的氮化铬粉末作为发泡剂进行打印实验,成功制备了316L不锈钢跨尺度多孔结构。介绍SLM实验的材料设备需求以及打印方案,确定孔隙率和平均等效孔径为跨尺度多孔结构的关键评估参数。分析发泡剂质量分数、激光功率和扫描速率对多孔结构成型结果的影响规律。结果表明:在激光功率为150 W,扫描速度为1 000 mm/s时,添加7%质量分数的发泡剂,成功制备出具有小微米(100 μm 以下)孔结构的跨尺度多孔结构,整体结构孔隙率大于50%。

关键词:选区激光熔化;跨尺度多孔结构;316L不锈钢;发泡剂;成型工艺

中图分类号:TG142.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0026-05

Research on SLM Forming Process of Cross-scale Porous Structure Based on Melt-based Route

ZHANG Yongtao, MI Tie, HUANG Boqiang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A 316L stainless steel cross-scale porous structure is successfully produced by using Selective Laser Melting (SLM) with 316L stainless steel powder as the substrate and adding different mass fraction of chromium nitride powder as the blowing agent for printing experiments. The paper presents the material and equipment demands as well as the printing scheme for the SLM experiments, identifies porosity and average equivalent pore diameter as the key evaluation parameters for the cross-scale porous structures, and analyzes the influence patterns of blowing agent mass fraction, laser power and scanning rate on the porous structure forming results. The results show that at a laser power of 150 W and a scanning rate of 1 000 mm/s, a cross-scale porous structure with small micron (below 100 μm) pore structure is produced with an overall structural porosity of more than 50%, by adding a foaming agent with a mass fraction of 7%.

Keywords: selective laser melting; cross-scale porous structure; 316L stainless steel; foaming agent powder system; molding process

0 引言

跨尺度多孔结构具备多级孔隙、可控孔隙、高表面积、高孔隙率等特点。这种结构提供了多层次孔隙,通过精确控制制备条件和工艺可实现对孔隙大小、形状和壁厚的调控^[1-3]。其高表面积为材料提供了卓越的吸附、催化和电化学性能,而高孔隙率则使其成为低密度、轻质材料的理想选择。国内外材料科学界对激光熔化制备多孔金属的研究给予了极大关注^[4-5]。

作为一种3D打印技术,选区激光熔融技术(selective laser melting, SLM)是通过激光束的高能量将金属粉末熔化并逐层堆积以创建3D物体。研究表明SLM技术与熔体发泡法相结合可以制备出具有多孔结构和轻质化特性的金属部

件。JEONG等^[6]使用镁作为发泡剂,通过SLM技术制备了闭孔泡沫铝合金,镁的添加可以显著提高材料的微观硬度值。AN等^[7]以 CaCO_3 为发泡剂,采用SLM工艺生产闭孔泡沫铝。研究发现随着发泡剂含量的增加孔隙率也随之增加;孔隙数量增多和平均孔径增大,孔隙间的合并现象也增多。KARUNAKARAN等^[8]研究了镁和常见的生物相容性合金元素,为医学植入体骨骼的合金材料加入合适的添加剂。但熔体发泡法与SLM相结合需要考虑到多个因素,包括选择合适的发泡剂、发泡剂的加入方式、工艺参数的优化等。

本文主要将SLM成型方法与熔体发泡法相互结合,以316L不锈钢为基体,氮化铬(CrN)粉末为发泡剂,通过调节其发泡剂的使用质量分数和SLM的相关激光工艺参数,来制备跨尺度的多

第一作者简介:张永涛(1998—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向为智能制造,yongtao.zhang@nuaa.edu.cn。

孔不锈钢的三周期极小曲面 (triply - periodic minimal surfaces, TPMS) 模型结构。

1 跨尺度多孔结构制备实验工艺

1.1 实验材料及设备

本研究选择 316L 不锈钢粉末作为 SLM 实验的基体。316L 不锈钢为铬镍奥氏体不锈钢主要由 Fe、Cr、Ni、Mn 等元素构成,图 1 为 316L 不锈钢粉末的微观形貌。其性能与 316 不锈钢类似,但 316L 不锈钢中含碳量更低,故其在具有 316 不锈钢优异性能的同时塑形和韧性更加优异,而且 316L 不锈钢还兼具奥氏体不锈钢的优良的性能^[9-11]。

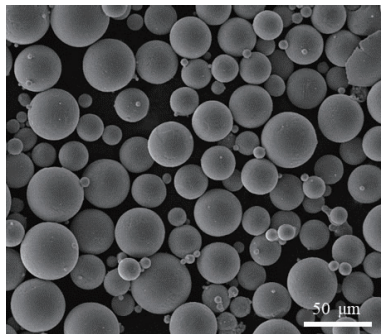


图 1 316L 不锈钢粉末微观形貌

本次实验使用的设备如图 2 所示,电磁筛机进行混粉,使用的电磁筛机设备如图 2(a)所示。实验使用的 SLM 成型设备是某公司生产的 Titanium Ti150,如图 2(b)所示。



图 2 实验设备

1.2 实验工艺方案

SLM 实验在室温下进行,无预热装置,以氩气作为保护气体,激光扫描方式为简单的线性光栅扫描。设计了关于激光功率、扫描速度和发泡剂质量分数的多因子混合实验,具体参数如表 1 所示,制备得到 18 个尺寸为 10 mm×5 mm×5 mm 的

长方体,然后使用孔隙率和孔径尺寸最合适的配方进而制备出 16 mm×16 mm×16 mm 的 P 型 TPMS 模型。

表 1 实验参数表

扫描速度/ (mm/s)	CrN 质量分数/ (wt.%)	激光功率/(W)		
		80	150	220
800	3	1	2	3
	5	4	5	6
	7	7	8	9
1 000	3	10	11	12
	5	13	14	15
	7	16	17	18

1.3 设计模型

本实验以 P 型 TPMS 模型为研究对象,并使用 MATLAB 编程建模,根据 MUNA 等^[12]所编写的 MATLAB 简易 TPMS 模型生成程序得出 P 型面的隐函数

$$f = \cos(x) + \cos(y) + \cos(z) \quad (3)$$

模型构建程序设计思路是通过利用隐函数生成模型,并将面片数据和顶点数据存储,最后按照模型三角面片的顶点数据顺序存入 STL 文件。程序分为 5 部分,包括 P 型面建模、STL 文件生成、生成三角面片存储、程序运行监控以及模型验证与参数调整,其流程如图 3 所示。在程序运行测试中发现,模型的单元大小与隐函数内 x 、 y 、 z 缩放比例相关。 x 、 y 、 z 取值范围划分越细,生成的模型越光滑,但运行时间和内存占用越大,反之,模型具有较明显棱角,可能出现三角面片错误。

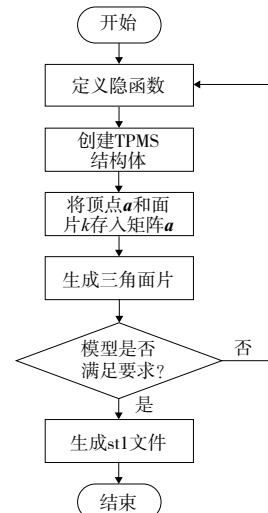


图 3 TPMS 结构体建模流程图

TPMS 模型如图 4 所示。首先生成 $3 \times 3 \times 3$ 共 27 单元模型,如图 4(a)所示,并对程序进行修改。如果没有问题便生成 $10 \times 10 \times 10$ 的模型保证单元数量大于等于 1 000,满足指标要求,如图 4(b)所示。将生成的 STL 文件导入到 Magics 软件添加厚度和修补,得出最终模型的 STL 文件,如图 4(c)所示,使用软件检测所设计孔尺寸平均为 $550 \mu\text{m}$,如图 4(d)所示。

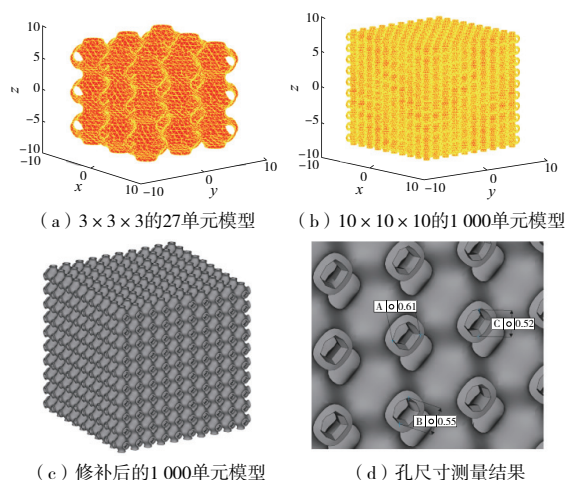


图 4 TPMS 模型

1.4 选区激光扫描和固化完成

SLM 选区激光扫描的激光功率和扫描速度工艺参数是影响打印产品的重要工艺参数,根据 1.2 节的实验方案,在 STL 文件输入特定编程后,在确定每组配方的激光功率和扫描速度情况下,可以在激光扫描打印时同时打印 6 个,在打印每一份时按照需要改变成不同的激光功率和扫描速度进行打印,节省时间和成本,如图 5 所示。



图 5 SLM 实验一次性打印的第一组配方成品

本实验研究的跨尺度多孔结构是一种由多个尺度的孔隙组成的多孔材料。对于这种材料,孔隙率和平均等效孔径是两个关键的评估参数。孔隙率考虑到不同尺度孔隙对总体孔隙率的贡献,更准确地描述了材料的孔隙分布。微小尺度孔的平均等效孔径描述了多孔材料中孔隙大小的统计平均值。

用金相处理将每份发泡剂质量分数相同的 6 个元件按顺序用金相镶嵌粉压缩加热处理,再用金相研磨机研磨,如图 6 所示,然后利用超景深数字显微镜测量实验成品内部的孔径。使用 Image Pro 软件利用孔隙和实体灰度值的差异对光学显微镜图的孔隙率进行统计计算,最后各组样品的孔隙率数据如表 2 所示。



图 6 金相处理研磨所得到的 3%、5%、7% 3 组实验成品

表 2 SLM 成型试样孔隙率测定结果 单位: %

样品名	孔隙率	样品名	孔隙率	样品名	孔隙率
1	17.19	7	26.08	13	25.67
2	9.45	8	18.34	14	19.02
3	5.54	9	14.63	15	15.78
4	21.42	10	21.51	16	30.13
5	13.84	11	14.13	17	23.76
6	9.87	12	9.69	18	19.89

2 制备跨尺度多孔结构的测试分析

本节内容是根据实验结果进行研究,分析发泡剂质量分数及工艺参数对孔隙率和平均等效孔径的影响,并了解相关的孔隙成型机制并制备出符合要求的 TPMS 模型的跨尺度多孔金属结构。

2.1 发泡剂质量分数对孔隙率和孔径的影响

遵循 1.2 节实验方案,当激光功率和扫描速度固定时,随着使用的氮化铬粉末质量分数增加,孔隙数量显著增加,金相测量孔隙结果如图 7 所示。氮化铬质量分数从 3% 增至 7%,孔隙率从 21.51% 增至 30.13%,形成大孔隙增多,部分孔隙相互连通。对孔径影响显示,7% 氮化铬质量分数导致大孔隙生成,但大多数区域保持 $45 \mu\text{m}$ 孔隙,5% 质量分数时孔隙有相互联通和无孔隙区域,说明氮化铬分布不均匀。相比之下,添加 7% 氮化铬生成更多搭接的孔隙,呈长条状,孔隙尺寸主要在 $35 \sim 60 \mu\text{m}$,而 5% 质量分数的孔隙也在这范围,但存在相连通的情况,7% 质量分数的孔隙大部分在 $80 \mu\text{m}$ 以下,只有部分连通的大孔隙接近 $95 \mu\text{m}$ 。

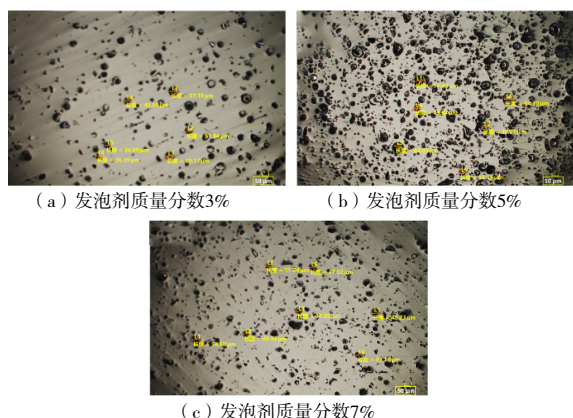


图7 金相测量孔隙图(激光功率 150 W, 扫描速度 1 000 mm/s)

在加工激光功率和扫描速度固定时,随着发泡剂 CrN 质量分数的增加,分解产生的气体含量也随之增加,导致气泡核数量的增加,从而促进了更多的孔隙形成,使得孔隙率增加。当孔隙数量达到一定水平后,它们之间就会相互连接,从而形成连通孔隙或是大型孔隙,使得孔径增大。

2.2 工艺参数对孔隙率和孔径的影响

当发泡剂质量分数相同和扫描速度固定时,由图 8(a)、图 8(b)、图 8(c) 三图对比分析可以看出,当激光功率从 80 W 升至 220 W,在孔隙大小方面,激光功率 80 W 时存在很多大孔隙或者较为明显的长条状孔隙,且会有明显反光的小凸起,说明了激光功率过低和扫描速度太快,钢粉未能完全熔化,小的孔隙存在较少。而随着激光功率增大,整体孔隙大小减小,孔隙数量逐渐减少,孔隙率从 25.67% 降低到了 15.78%。这说明了当激光功率较低时,钢粉未完全熔化导致熔池黏度上升,使得热分解产生的气体难以逸出。这由于 Marangoni 对流^[13-14] 导致气体过多时,气泡相互连通而逸出,由于熔池黏度大无法回流填补从而凝固形成了大而长的孔隙。而对整体孔隙数量在 150 W 时最多,而 220 W 的孔隙数量相反的减少,这是因为激光功率高,导致钢粉很好熔化且黏度下降,发泡剂分解产生的气体逸出,从而使得凝固后的孔隙较少。

当选用的发泡剂质量分数相同和激光功率固定,由图 8(c)、图 8(d) 两图对比,可以明显地看出孔隙数量在 1 000 mm/s 比 800 mm/s 多,并且在扫描速度较大时,大孔径的数量更多,但整体的小孔隙比例更大,说明扫描速度快时,不锈钢熔池可以更快进入凝固阶段保证气体不逸出,从而使得孔隙率上升,而对孔径的影响不是很大。

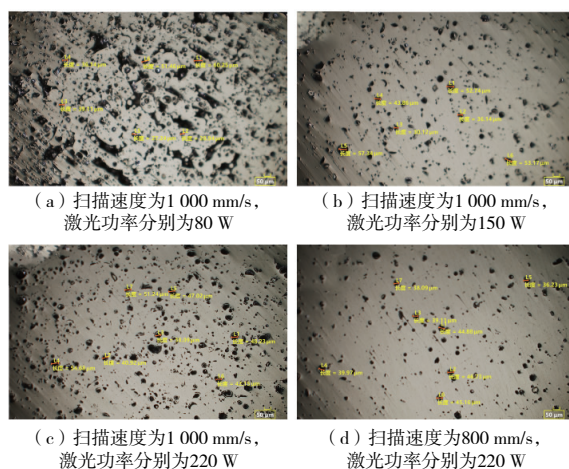


图8 发泡剂质量分数 5% 金相测量孔隙图

2.3 制备跨尺度多孔结构

根据上述分析,由于激光功率越高,生成的孔隙大尺寸的数量越多,但激光功率过小会产生过多的球化现象,综合考虑选用激光功率 150 W 进行实验。同时,在保证发泡剂可以充分受热分解的情况下,激光扫描速度快可以更好地保证分解产生的氮气停留在熔池内形成孔隙,扫描速度慢,加热时间越长气体溢出越多,所以综合考虑采用扫描速度 1 000 mm/s 制备跨尺度多孔结构。最后根据发泡剂质量分数越多,孔隙率越大,而且对孔径的影响不大,所以最终采用 7% 发泡剂质量分数制备 TPMS 跨尺度多孔结构。

打印生成的跨尺度多孔结构 TPMS 模型如图 9 所示,图 9(a) 共有 1 000 单元。同时,利用超景深数字显微镜进行观察,如图 9(c)、图 9(d),发现所制备的孔尺寸如 1.3 节所描述的宏观尺寸相差不大为 500 μm 以上。除此之外,可以发现图 9(d) 所圈出的有明显的孔隙阻断了形成的熔道,根据测量为 71 μm ,这说明了宏观多孔 TPMS 的设计打印符合实验的要求并且存在着发泡剂形成的微观孔隙,组成了跨尺度的多孔结构,而所设计的宏观孔隙和形成的微观孔隙的体积占据总体积的 50% 以上。

3 结语

本文以 316L 不锈钢粉末为基体,氮化铬粉末作为发泡剂,利用选区激光熔融技术,成功制备跨尺度多孔结构。通过实验得出以下结论:

1) 在激光功率和扫描速度固定时,发泡剂质量分数越高,会使得孔隙率越高,大孔径孔隙的数量增多,孔径波动范围也变得更大,但在发泡剂质

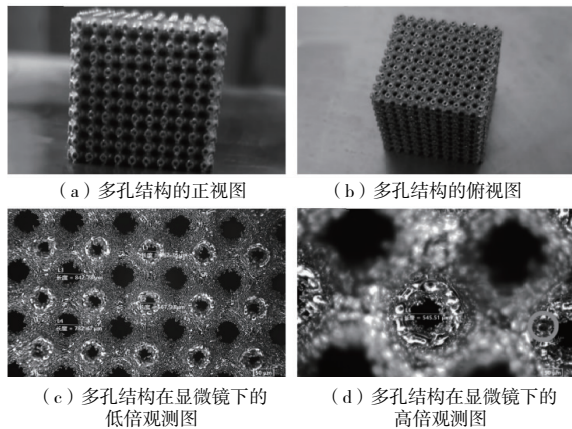


图9 跨尺度多孔 TPMS 模型

量分数较低的实验中,平均等效孔径在 $60\ \mu\text{m}$ 以下,发泡剂质量分数 7% 的平均等效孔径在 $80\ \mu\text{m}$ 以下。

2) 当发泡剂质量分数,扫描速度固定时,激光功率过低会产生球化现象,且会有较多的孔隙连通形成大的孔隙,激光功率升高时,大孔隙的数量会减小,且孔隙率会降低。当发泡剂质量分数,激光功率固定时,扫描速度大时孔隙率会增加,相应形成的孔径增大。

3) 借助 MATLAB 进行宏观设计的 TPMS 模型可通过 SLM 技术打印成形,采用的激光功率为 150 W,扫描速度为 $1\ 000\ \text{mm/s}$,发泡剂质量分数为 7%。其宏观孔径尺寸为 $500\ \mu\text{m}$ 以上,单元数为 1 000 且整体孔隙率为 50% 以上。

参考文献:

[1] ZHAO J Q, ZHANG M, ZHU Y, et al. A novel optimization design method of additive manufacturing oriented porous structures and experimental validation [J]. *Materials & Design*, 2019, 163: 107550.

[2] GUO Z P, ZHOU C. Recent advances in ink-based additive manufacturing for porous structures [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 48: 102405.

[3] PODSHIVALOV L, GOMES C M, ZOCCA A, et al. Design, analysis and additive manufacturing of porous structures for biocompatible micro-scale scaffolds [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 5: 247-252.

[4] 张艺海,商鹏,马奔原,等. 径向梯度三周期极小曲面骨小梁支架结构设计与力学性能分析[J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(5): 741-746.

[5] DONG L, ZHU Q, LIU X F, et al. 3D printing Al porous metamaterials with triply periodic minimal surfaces (TPMS) for hydrogen generation from Al-water reaction [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 1426-1435.

[6] JEONG KIM H, LEE K Y, SHIN G Y, et al. Fabrication of aluminum ($\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$) matrix particle (Ti and Zr) reinforced composite foam using directed energy deposition [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 167: 109806.

[7] AN J T, CHEN C J, ZHANG M. Effect of CaCO_3 content change on the production of closed-cell aluminum foam by selective laser melting [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 141: 107097.

[8] KARUNAKARAN R, ORTGIES S, TAMAYOL A, et al. Additive manufacturing of magnesium alloys [J]. *Bioactive Materials*, 2020, 5(1): 44-54.

[9] MIRZABABAEI S, PASEBANI S. A review on binder jet additive manufacturing of 316L stainless steel [J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, 3(3): 82.

[10] KURGAN N, VAROL R. Mechanical properties of P/M 316L stainless steel materials [J]. *Powder Technology*, 2010, 201(3): 242-247.

[11] SURYAWANSHI J, PRASHANTH K G, RAMAMURTY U. Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 696: 113-121.

[12] MUNA N, PATTERSON A E. Simple 3-D visualization of some common mathematical minimal surfaces using MATLAB [R]. Urbana - Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2018.

[13] NIU H J, CHANG I T H. Instability of scan tracks of selective laser sintering of high speed steel powder [J]. *Scripta Materialia*, 1999, 41(11): 1229-1234.

[14] 曾广豪. 透气模具钢 S136 的激光 3D 打印 & 增材制造 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

收稿日期: 2024-03-01