

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.03.16

基于高通量实验的增材制造工艺快速筛选方法

吴旭东¹, 赵毅², 何勇², 何戈宁³, 王长春⁴, 黄科^{1*}

1. 四川大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610051
2. 先进核能技术全国重点实验室, 四川 成都 610213
3. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213
4. 四川省增材制造技术协会, 四川 成都 611930

摘要: 增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术在先进零部件制备中展现出显著潜力,但传统实验方法效率低,使得工艺参数筛选周期长、成本高。为解决这一瓶颈,以M350马氏体时效钢激光粉末床熔融(Laser Powder Bed Fusion, LPBF)工艺为研究对象,构建了一种适用于金属增材制造的新型高通量样品制备-性能测试平台,并发展相应的工艺优化方法和策略。该体系在72小时内快速制备并测试了体能量密度(Volume Energy Density, VED)范围为90.58~277.78 J/mm³的32组工艺参数组合共96个样品,所得样品的屈服强度(Yield Strength, YS)介于1 215.97~1 345.37 MPa、极限抗拉强度(Ultimate Tensile Strength, UTS)介于1 237.35~1 447.72 MPa、延伸率(Elongation, EL)介于16.10%~28.50%。在此基础上,筛选最优工艺参数对应样品(YS=1 345.37 MPa, UTS=1 447.72 MPa, EL=24.77%)并对其进行了系统的微观组织表征,包括物相组成、晶体取向以及位错分析等,从而进一步验证了高通量技术在工艺优化与力学性能优化方面的有效性。本研究为M350马氏体时效钢的LPBF工艺优化提供了关键技术支撑,并为金属增材制造的快速发展和规模化应用提供可推广的技术路径。

关键词: 高通量实验; 工艺参数优化; 激光粉末床熔融; 马氏体时效钢

中图分类号: TG457 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)03-0119-08

High-Throughput R&D-Driven Additive Manufacturing Process Optimization

WU Xudong¹, ZHAO Yi², HE Yong², HE Gening³, WANG Changchun⁴, HUANG Ke^{1*}

1. College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610051, China
2. State Key Laboratory of Advanced Nuclear Energy Technology, Chengdu 610213, China
3. Nuclear Power Additive Manufacturing key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China
4. Sichuan Association for Additive Manufacturing, Chengdu 611930, China

Abstract: Additive Manufacturing (AM) has demonstrated substantial potential in the fabrication of advanced components; however, conventional experimental workflows are often inefficient, resulting in slow process-parameter screening and high research costs. To address this limitation, this study focuses on the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) fabrication of M350 maraging steel and establishes a new high-throughput fabrication and performance-testing framework tailored for metal AM, together with the corresponding process-optimization strategy. Using this framework, 96 specimens of 32 sets of processing parameters with a Volume Energy Density (VED) range of 90.58-277.78 J/mm³ were rapidly fabricated and evaluated within 72 hours. The resulting samples exhibited a yield strength (YS) of 1215.97-1345.37 MPa, an ultimate tensile strength (UTS) of 1237.35-1447.72 MPa, and an elongation (EL) of 16.10%-28.50%. On this basis, the sample produced under the optimal process conditions (YS=1345.37 MPa, UTS=1447.72 MPa, EL=24.77%) was subjected to comprehensive microstructural characterization, including phase analysis, crystallographic texture, and dislocation-density assessment. These results further confirm the effectiveness of the high-throughput approach for process optimization and mechanical-property assurance. This

收稿日期: 2025-12-02 修回日期: 2026-03-08

基金项目: 中国核能研究院核能增材制造实验室(STRFML-2022-05, K9011027001-05-FWHT-WU-20240427); 四川大学联合创新基金(HG2022173)

作者简介: 吴旭东(2002—), 男, 硕士, 主要从事核能增材制造研究。E-mail: m17311044998@163.com。

通讯作者: 黄科, E-mail: kehuang84@outlook.com。

work provides essential technical support for the efficient LPBF fabrication of M350 maraging steel and offers a broadly applicable pathway for the accelerated development and industrial deployment of metal additive manufacturing.

Keywords: high-throughput testing; process optimization; laser powder bed fusion (LPBF); martensitic stainless steel

引用格式:吴旭东,赵毅,何勇,等. 基于高通量实验的增材制造工艺快速筛选方法[J]. 电焊机,2026,56(3):119-126.

Citation: WU Xudong, ZHAO Yi, HE Yong, et al. High-Throughput R&D-Driven Additive Manufacturing Process Optimization[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(3): 119-126.

0 引言

增材制造(Additive Manufacturing, AM)俗称3D打印,是一种融合多学科技术的前沿制造工艺,它颠覆传统减材制造思路,以数字模型为基础,通过“逐层堆积”的方式实现三维实体部件制造,如今已在航空航天、生物医疗等多个行业发挥关键作用^[1]AM作为一项革命性技术,具有生产周期短、材料利用率高、成形自由度大、绿色低碳等优势,是Industry 4.0中最具代表的颠覆性技术之一^[2]。当前,增材制造可制备金属、陶瓷、高分子、生物组织等材料,并且根据材料和成形方式,ISO/ASTM 52900标准将增材制造分粘结剂喷射工艺(BJT),定向能量沉积工艺(DED),材料挤出成形(MEX),材料喷射工艺(MJT),粉末床熔融工艺(PBF),薄片层压工艺(SHL),光聚合成形(VPP)七大类,细分下工艺20种(Wohlers Report 2024),并且新技术正在发展。总之,增材制造工艺多、材料广、应用领域大,是先进制造领域的前沿并驱动着产业革新。

在众多增材制造工艺中,当前应用最广的为金属增材制造,尤其是激光粉末床熔融(Laser powder bed fusion, LPBF)技术,它以激光为热源,以金属粉末为原料,按照预设的激光路径进行逐层熔化金属粉末,通过逐层累积最终形成三维实体部件。LPBF技术已经广泛应用于铝合金(AlSi10Mg^[3])、钛合金(TC4^[4])、316L不锈钢^[5]、镁合金(AZ91D^[6])等材料的制备,并且在传统工艺难以制备的内部流道^[7]、超结构^[8]、复杂构件的一体化成形等结构中已经崭露头角。对于LPBF制造而言,影响制备效率最为关键的一步是工艺开发,特别是打印工艺参数优化。当前,无论在工程还是学术上,几乎都是通过试错法或工艺参数优化(如RSM^[9]、正交^[10])来优化得到最致密的打印参数,然后基于该参数打印建立P-S-

P工艺组织性能映射关系、热处理调控、部件拓扑优化等研究。然而,当前增材制造已经逐渐从“开放式”过渡到“精细化”研究,如在Nature子刊中,曾报道仅通过粉末粒度控制^[11]、工艺参数精细化组织调控^[12]、可编程扫描策略优化^[13]就能获得高强韧的316L不锈钢。换言之,保证材料致密的情况下,并非就能获得高性能金属。特别对于不锈钢而言,致密工艺参数区间范围广,区间内任一选择样品虽然是致密的但性能并不一定最佳。工艺参数优化的最终目标是为了获得最优性能,如若直接以性能为目标进行工艺参数优化并且,兼顾致密度,这将极大地提高研发效率^[11-12]。

以性能作为工艺参数优化的目标,已经展示了它的优势。如Huang等人^[14-15]选择了36组工艺参数来LPBF打印316L不锈钢,发现致密参数有34组($RD \geq 99.5\%$, $50.0 \text{ mm}^3 \leq VED \leq 156.3 \text{ mm}^3$),其屈服强度(YS),抗拉强度(UTS),和延伸率(EL)差异率分别为15.0%、17.1%、49.9%,这充分说明仅以致密度作为优化目标过于粗略,因为致密工艺参数制备的不锈钢性能差异显著。因此,以致密度作为优化目标,较为粗略,容易忽视性能最优的工艺参数。因此,在增材制造工艺参数优化中,不仅是LPBF,对于L-DED,WAAM等增材制造工艺而言,同样存在致密度高的打印参数并非一定是性能最优的样品。然而,要想以性能为目标,实现工艺参数对微观组织的精密调控,首先就要获得大量的性能数据。传统的测试方法是单一多次的测量方法,比如测量拉伸力学性能时使用的电子万能拉伸试验机,每个工艺参数都要加工成拉伸样,逐个重复测试,耗时费力,较为缓慢,并且成本较高,显然难以满足以性能为目标的增材制造工艺参数优化构想。

高通量是一类以“并行化、集成化、高效化”为核心特征的多领域研究技术或者研发思路,核心价

值在于突破传统单一变量研究的效率瓶颈^[16]。对于材料学而言,包括但不限于高通量制备、表征、测试、分析等多流程手段。如在增材制造的Cr-Nb-Ti-Zr合金的高通量表征^[17]、气溶胶的高通量3D打印制备^[18]、Nb-Zr-W难熔合金高通量增材制造^[19]等已经验证了高通量与增材制造结合的优势。目前,与增材制造相配套的高通量力学性能测试设备鲜有报道,团队属于较早进行高通量力学性能测试设备研发的团队之一^[15,16,20],并且一直在优化设备,致力于加快增材制造研发效率,更好地发挥增材制造的战略优势。

凭借着增材制造的工艺特点,不少传统的合金被重新制备,并获得了意想不到的性能以及应用优势,如低膨胀Invar36合金^[21]。M350马氏体时效钢作为传统合金体系中尚未被增材制造技术充分开发的潜力材料,为实现其工艺参数的精准优化与力学性能的提升,本研究采用自主研发的高通量制备及测试系统,展现了以性能为导向的工艺参数优化策略的核心优势,进而推动高通量制备-测试技术在高性能金属构件增材制造领域的应用。

1 材料和实验方法

1.1 粉末表征

M350马氏体时效钢球形粉末由宁波众远新材料科技有限公司提供,采用气雾化方法制备。霍尔流速为12.5 s/50 g, M350马氏体时效钢粉末的化学成分见表1,符合AMS 6515/MIL-S-46850标准。图1为M350马氏体时效钢粉末的整体分布和表面形貌,总体而言,粉末粒度分布均匀,无明显团聚现象,并且粉末表面光洁,球形度较高($\geq 98.5\%$),粒度直径为50~320 μm ,适用于LPBF工艺。

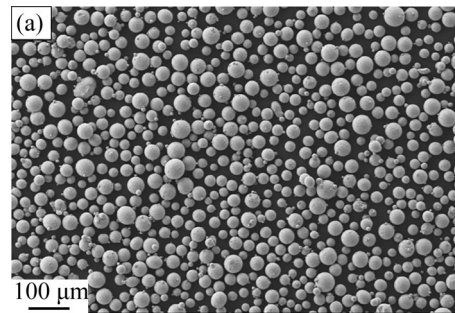
表1 M350马氏体时效钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of M350 maraging steel

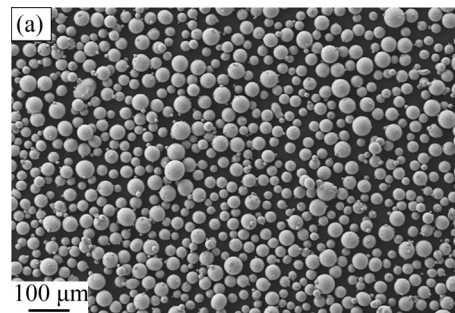
C	Ni	Mo	Co	Ti	Al	Fe
≤ 0.01	17.5~18.5	3.5~4.0	11~12	1.5~1.7	0.10~0.15	余量

1.2 打印设备

激光粉末床熔融(LPBF)增材制造设备为HBD-80机器(上海汉邦联航激光科技有限公司),LPBF如图2a所示,设备配备YLR-500光纤激光器,光斑



(a)整体分布



(b)表面形貌

图1 M350马氏体时效钢粉末

Fig. 1 Morphology of M350 steel powder

直径约为33 μm ,波长为1 064 nm。打印前,为保证其打印质量,将粉末在60 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中(充满Ar气)进行8 h的烘干处理。在打印过程中,全程保持Ar气惰性环境,氧含量控制在5 ppm以下,以防止试样氧化。激光扫描策略采用Stripe模型,层间旋转角为67 $^{\circ}$,如图2c所示。LPBF工艺参数如表2所示,共计32组参数。

表2 通过LPBF工艺制备的M350马氏体时效钢工艺参数

Table 2 Process parameters of M350 maraging steel prepared by LPBF

参数	值
激光功率/W	200~350
扫描速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	600~1 200
舱口间距/mm	0.07~0.115
层厚/mm	0.03
体能量密度($\text{VED}=\rho/vht$)/($\text{J}\cdot\text{mm}^{-3}$)	90.58~277.78

1.3 材料表征手段

LPBF打印样品的表征面为BD方向(见图2b)。采用阿基米德排水法测量样品的实际密度,设备为MAY-D80。利用Zeiss 40MAT金相显微设备观察M350马氏体时效钢样品的冶金结合质量。利用电子背散射衍射技术(EBSD)对试样的微观结构(晶粒取向、相分布和取向关系等)进行表征。在测试

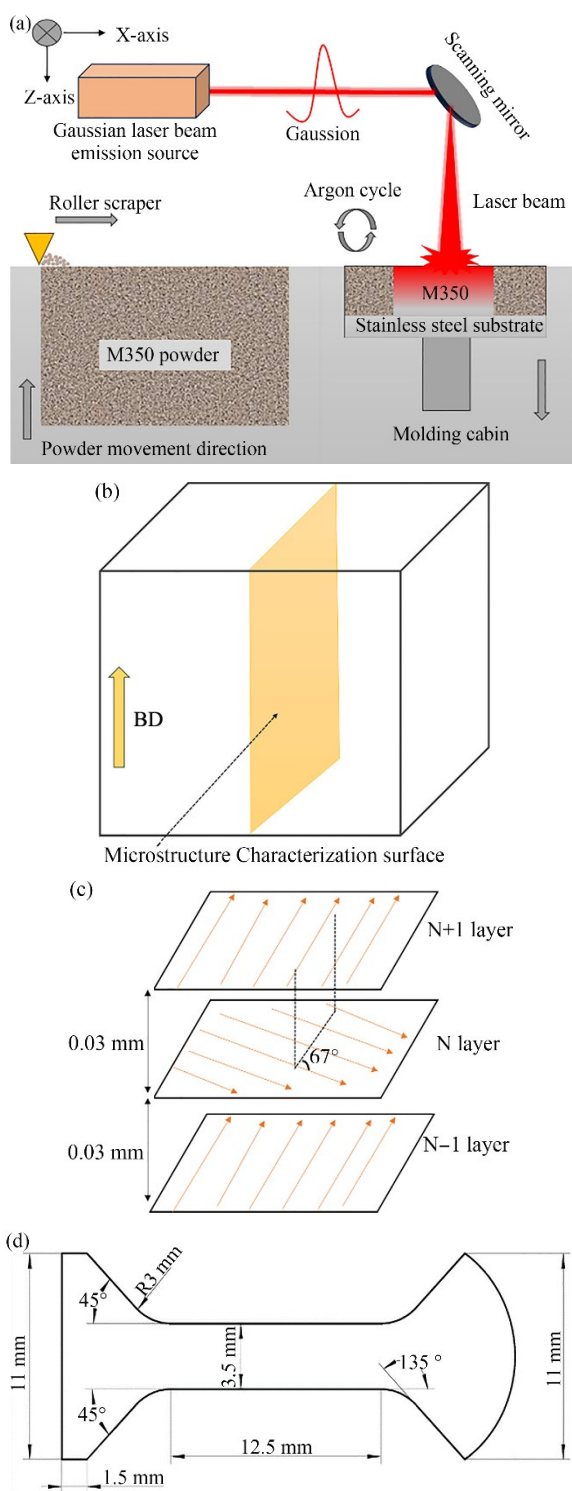


图2 (a) LPBF 技术原理; (b) 微结构表征面; (c) 扫描策略; (d) 拉伸试样尺寸

Fig. 2 (a) Principle of LPBF technology; (b) Microstructure characterization surface; (c) Scanning strategy; (d) Tensile specimen size

前,利用氩离子抛光技术对样品进行抛光处理。测试时,设置工作电压为 15 kV,步长为 $0.4 \mu\text{m}$,EBSD

实验数据使用 AztecCrystal 2.1 软件进行分析。用布鲁克 D8 DISCOVER X 射线衍射仪(XRD)进行物相测试,扫描速度为 $1^\circ/\text{min}$ 。

1.4 高通量力学性能测试

力学性能测试样品示意图如图 2d 所示,打印完成后实物如图 3 所示。高通量力学性能测试测试使用自主研发的高通量拉伸测试平台,该平台已经在增材制造 IN617^[16]镍基高温合金和 316L 不锈钢^[20]两种材料的工艺参数优化中得以应用,文献中已提供了详细的设备介绍。高通量拉伸试样共计 32 组,每组参数测试 3 次,共获得 96 条拉伸曲线,从曲线中进一步得到力学性能数据,也即屈服强度(Yield Strength, YS)、极限拉伸强度(Ultimate Tensile Strength, UTS)和伸长率(Elongation, EL)。

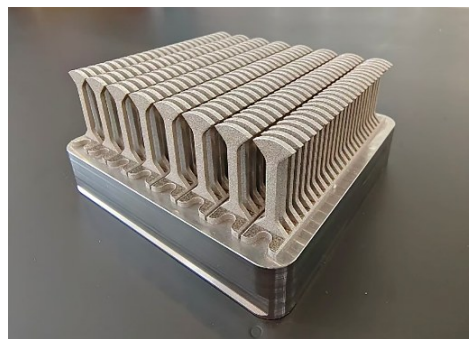


图3 高通量拉伸测试实物

Fig. 3 Physical image of high-throughput tensile testing

2 结果与讨论

2.1 高通量力学性能

对 32 组样品进行高通量拉伸测试,发现屈服强度(YS)介于 $1215.97\sim 1345.37 \text{ MPa}$ 、极限抗拉强度(UTS)介于 $1237.35\sim 1447.72 \text{ MPa}$ 以及延伸率(EL)介于 $16.10\%\sim 28.50\%$ 之间。32 组样品的 YS、UTS、EL 各自差异率分别为 10.64% 、 17.00% 、 77.02% ,这表明尽管打印的样品致密,但工艺参数不同,力学性能之间差异显著。如果仅仅以致密度作为优化目标,很容易忽视掉最优性能所对应的打印参数。综合考虑 YS、UTS、EL 之间的数据,选择强韧性最佳的样品,图 4a 为最优样品的应力应变曲线,图 4b 为该试样的力学性能,YS 为 1345.37 MPa ,UTS 为 1447.72 MPa ,EL 为 24.77% ,强韧性均为最佳。通

过高通量筛选得到的性能,显著优于当先通过LPBF制备的最优性能^[26](YS=1 111±20 MPa,UTS=1 199±20 MPa,EL=9.5±2.2%)。因此,通过高通量拉伸测试筛选得到的力学性能是有优势的。

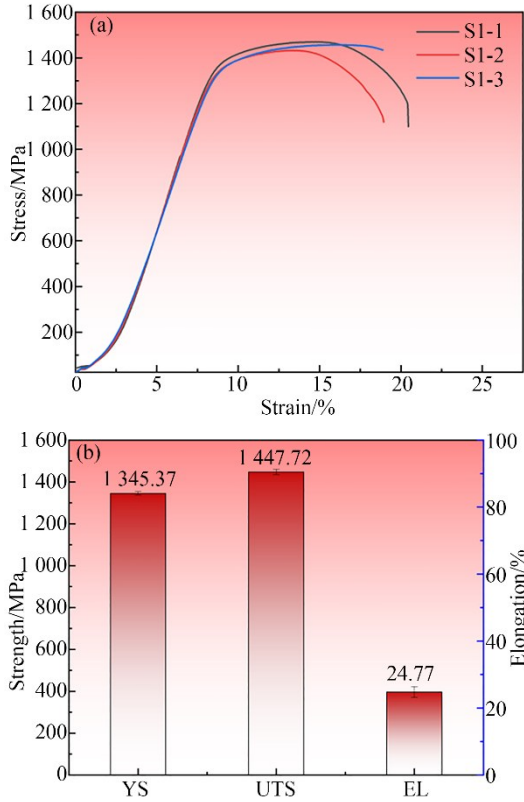


图4 (a)工程应力-应变曲线;(b)力学性能

Fig. 4 (a)Engineering stress-strain curves;(b)Mechanical performance

2.2 致密度

对上述得到的高通量筛选得到性能最优的样品(VED=148.81 J/mm³)进行致密度表征,通过阿基米德排水法得到样品致密度为99.94%。通过光镜进一步验证样品的致密度,从样品的不同面进行观察,如图5所示,在样品的沉积方向(//BD)以及水平方向(⊥BD)均为观察到孔洞、裂纹、未熔粉末等缺陷,表明冶金结合效果好,最优样品致密度较高。

2.3 微观组织

2.3.1 物相分析

图6为M350马氏体时效钢的XRD图谱。可以看到,LPBF所制备的M350马氏体时效钢,主要物相为马氏体,其衍射峰对应的晶面分别为(110)、(200)以及(211)以及存在少量的残余奥氏体相,其

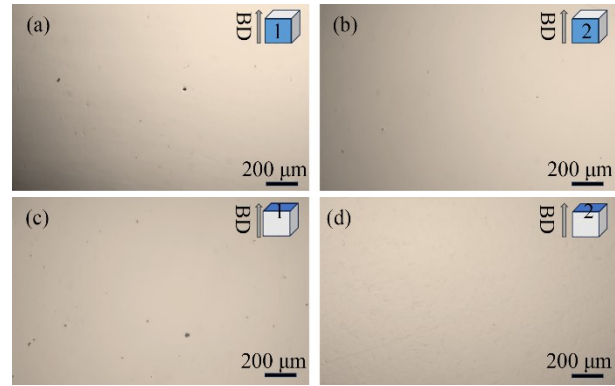


图5 OM图:(a)沿BD正面金相;(b)沿BD侧面金相;(c)顶面金相;(d)底面金相

Fig. 5 Density: (a)Front view metallographic image along BD;(b)Side view metallographic image along BD;(c)Metallographic image of the top surface;(d)Metallographic image of the bottom surface

衍射峰对应的晶面分别为(200)和(220)。物相中存在少量的金属间化合物的沉淀相(例如Fe₂Mo^[22], Ni₃(Mo, Ti)等^[23]),其衍射峰并不明显,其他文献也有类似的报道^[14,24-26]。

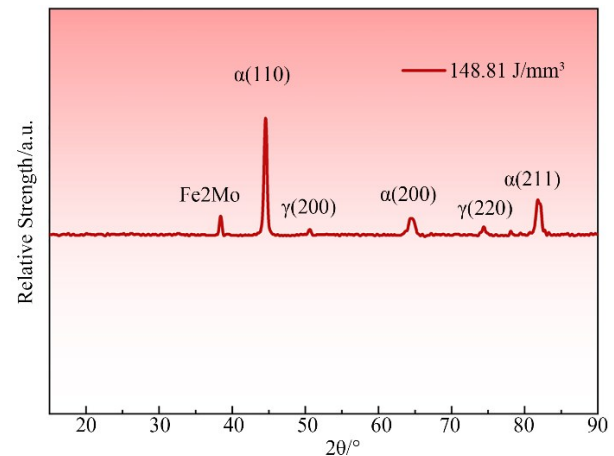


图6 M350钢的XRD衍射图谱

Fig. 6 XRD diffraction pattern of M350 steel

2.3.2 EBSD表征

为进一步研究快速筛选性能优异样品的微观结构状态,本研究选取其中综合性能最优的样品进行微观结构表征。图7为M350马氏体时效钢的微观组织测试结果。M350马氏体时效钢经激光粉末床熔融(LPBF)增材制造后,微观组织呈现出显著的工艺依赖性特征。图7a为反极图(Inverse Pole Figure, IPF)测试结果,其中红色部分代表<001>晶体取向,绿色表示<101>,蓝色表示<111>晶体取向。分析结果可知,晶粒形貌呈现明显的柱状晶生长,但

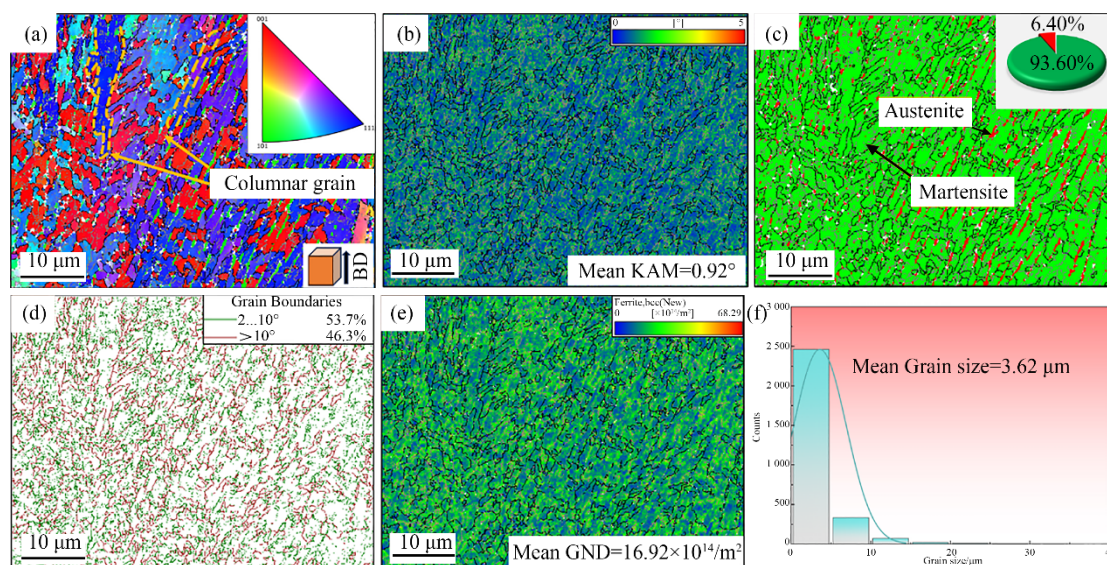


图7 M350马氏体钢微观组织:(a)IPF图;(b)平均KAM;(c)相分布;(d)晶界分布;(e)几何必须位错密度分布;(f)晶粒尺寸分布

Fig. 7 Microstructure of M350 martensitic steel: (a) IPF diagram; (b) Average KAM; (c) Phase distribution; (d) Grain boundary distribution; (e) Geometrically necessary dislocation distribution; (f) Grain size distribution

并未观察到明显的熔池边界。其次,通过反极图中颜色分布可知,晶粒存在着 $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 001 \rangle$ 晶体学织构,与文献[24]提及的M350马氏体钢一致。而造成这样特点的主要是由于LPBF过程中极高的温度梯度和定向凝固条件,促使晶粒沿热流方向择优生长所致。图7f统计了以等效直径的方式统计了该试样中的晶粒尺寸分布,结果证明其试样的平均晶粒为 $3.62 \mu\text{m}$,而细小的晶粒尺寸有效地提高了马氏体钢的机械强度^[27]。其次,图7b为该样品的平均取向差(Kernel Average Misorientation, KAM)值分布图,该值一定程度上反映了样品内部的微观应变分布和位错密度分布^[28]。根据结果显示,该样品内部的平均KAM为 0.92° ,这表明了在其样品内部存在一定的应力分布和位错,这一点与图7e中 $16.92 \times 10^{14}/\text{m}^2$ (这是很高的位错密度,文献^[25,29,30]等研究表明传统方法制备的马氏体钢的位错密度一般低于 $10 \times 10^{14}/\text{m}^2$)的几何必须位错密度(Geometrically Necessary Dislocation, GND)结果保持一致。而导致这样的结果与LPBF打印过程中快速加热和快速冷却的加工特性密切相关,M350粉末在受到激光束加热后快速熔化,随后以 $10^3 \sim 10^6 \text{ K/s}$ 进行快速冷却,在这样的过程中会产生热应力,从而导致晶格畸变和局部的取向差,这符合LPBF工艺的加

工特性^[21]。图7d为整个样品内部的大小角度晶界占比和分布,其中大角度晶界($>10^\circ$)占比46.3%,小角度晶界($2^\circ \sim 10^\circ$)占比53.7%。结果表明,在试样中小角度晶界较多,说明在整个样品中柱状晶的比例相对较高,这样的测试结果和图7a中所观察到的大量柱状晶结果相吻合。而大量小角度晶界的存在,可以有效地阻碍M350钢中的位错运动,导致位错含量上升,也就导致了图7e中的测试结果。对于LPBF工艺中的高密度位错,另一种理论认为制备过程中的快速加热使材料局部区域快速产生膨胀,与周围未被加热的区域就会产生诱导应力,当激光加热完毕后又会产生快速的冷却效应,这就会进一步导致与相邻已凝固层产生应力差^[21,31]。为了释放积攒的大量热应力,晶体内部就会通过产生大量位错来实现应变协调,进而也就导致了位错密度的升高。图7c展示了该样品的相分布,利用AztecCrystal 2.1软件对其相含量进行统计的饼状图结果。显然,物相以马氏体为主(93.60%),仅包含少量奥氏体(6.40%)。LPBF成形过程是一个快速非平衡凝固过程,冷却速度高达 $10^5 \sim 10^7 \text{ K/s}$ 快速冷却抑制了奥氏体向铁素体的转变,促使过冷奥氏体直接发生马氏体相变^[32],马氏体是强化相而奥氏体相塑性相,这表明LPBF增材制造有利于得到高强韧的

M350 马氏体时效钢,凸显了增材制造的优势。

3 结论

本研究采用自主研发的高通量工艺参数优化与性能快速表征技术,通过高通量快速筛选 32 组全致密工艺参数,采用自主研发的高通量自动力学性能测试平台,快速获取了力学性能测试数据。实现了 M350 马氏体时效钢的工艺-性能协同筛选。主要结论如下:

(1)通过 32 组高通量拉伸数据,发现致密工艺参数的区间比较广泛。屈服强度(YS)为 1 215.97~1 345.37 MPa、极限抗拉强度(UTS)为 1 237.35~1 447.72 MPa、延伸率(EL)为 16.10%~28.50%。32 组样品的 YS、UTS、EL 差异率为 10.64%、17.00%、77.02%,表明了致密区间内力学性能差异显著,以性能为目标筛选或优化工艺参数较为合理的。

(2)LPBF 制备的 M350 马氏体时效钢主要由马氏体(93.6%)和少量的奥氏体(6.4%)相组成,并且晶粒细小(3.62 μm),存在着<011>和<001>两种混合织构,位错密度高达 $16.92 \times 10^{14}/\text{m}^2$ 。

(3)通过高通量拉伸数据的筛选,最终选择了强韧性良好的力学性能(YS 为 1 345.37 MPa,UTS 为 1 447.72 MPa,EL 达 24.77%),优于其他文献报道的最佳力学性能。

综上,本研究基于自主搭建的高通量拉伸测试平台,以 M350 马氏体时效钢的力学性能优化为核心目标,通过系统性设计多组工艺参数组合、实现材料制备-性能测试的高效联动,快速筛选并确定了激光粉末床熔融(LPBF)增材制造该合金的最优工艺参数窗口,最终获得了兼具超高强度与良好韧性的最优力学性能。这一研究结果充分表明,高通量拉伸测试平台能够突破传统“单因素-逐次验证”工艺优化模式的效率瓶颈,显著缩短工艺参数迭代周期,在增材制造工艺与材料性能的精准匹配、高效调控中展现出突出的技术优势,为高性能金属构件的快速研发与工程化应用提供了有力支撑。

参考文献:

[1] GU D D, SHI X Y, Poprawe R, et al. Material structure

performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science(New York), 2021, 372: 6545.

- [2] Dilberoglu U M, Gharehpapagh B, Yaman U, et al. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 545-554.
- [3] Ramavajjala A K, Dandekar T R, Khatirkar R K, et al. A review on the correlation between microstructure, heat treatment and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg by LPBF[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2025: 50 (3): 239-274.
- [4] Yang Z, Li L, Qiao Y, et al. Cavitation erosion corrosion properties of as-cast TC4 and LPBF TC4 in 0.6 mol/L NaCl solution: A comparison investigation [J]. Ultrasonics sonochemistry, 2024, 108: 106947-106947.
- [5] Eichler F, Balc N, Bremen S, et al. Influence of Adjusted Melt Pool Geometries on Residual Stress in 316L LPBF Processes[J]. Metals, 2025, 15(9): 1010.
- [6] Klára N, Jan J, Ondřej Č, et al. Processing of AZ91D Magnesium Alloy by Laser Powder Bed Fusion[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1377.
- [7] Gandhi G, Sangid M D. Analysis of complex internal channels on high-cycle fatigue behavior of LPBF GRCo-42 [J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 171: 109335.
- [8] Hasanzadeh R, Ashrafián M M. Effects of hierarchy design on energy absorption behavior of an additively manufactured three-dimensional metastructure inspired by auxetic re-entrant lattice [J]. Progress in Additive Manufacturing, 2026, 11: 1341-1358.
- [9] Ibbam V, Martin S, Rizwanul F I M, et al. Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition [J]. Results in Engineering, 2023, 18: 101213.
- [10] Ramkumar K, Varatharajulu M, Priya C B, et al. Prediction of Optimal Input Parameters for Incremental Sheet Metal Forming Process with Taguchi-Based GRA and TOPSIS Technique Using AISI 316 [J]. JOM, 2023, 75 (9): 3985-3995.
- [11] Shubham C, Chengcheng W, Beng T S, et al. Powder-size driven facile microstructure control in powder-fusion metal additive manufacturing processes [J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 3094-3094.
- [12] Wang Y, Voisin T, McKeown J, et al. Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength

- and ductility[J]. *Nature Materials*, 2018, 17(1):63–71.
- [13] Gao S, Li Z, Petegem S V, et al. Additive manufacturing of alloys with programmable microstructure and properties[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1):6752.
- [14] Zhang H, Hou J, Liu X, et al. Martensitic steels via laser powder-based additive manufacturing: Recent advances in process parameters, microstructure tailoring, and mechanical performance[J]. *Materials & Design*, 2025, 258:114574–114574.
- [15] Huang G, Chen H, Ma Z, et al. Microstructure and mechanical properties of stainless steel additively manufactured via laser powder bed fusion in high-dense process parameter window[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2025, 928:148033–148033.
- [16] Huang K, Kain C, Urbano A, et al. High throughput testing platform and application in wire arc additive manufactured superalloy: anisotropy investigation and component qualification[J]. *Materialia*, 2021, 16:101086.
- [17] Krajňák T, Preisler D, Kout J, et al. High-throughput microstructure characterization of compositionally graded Cr–Nb–Ti–Zr complex concentrated alloys (CCA) prepared by laser directed energy deposition [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 39:3915–3926.
- [18] Su W M, Munina I, Cappelli G, et al. High throughput inkless printing using laser produced dry aerosols [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2026, 8(1):015511.
- [19] Mullin K M, Allgor E C, Holgate C S, et al. High-throughput refractory alloy design for additive manufacturing[J]. *Materials & Design*, 2025, 259:114911.
- [20] Huang K, Kain C, Diaz-Vallejo N, et al. High throughput mechanical testing platform and application in metal additive manufacturing and process optimization [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66:494–505.
- [21] Huang G L, Peng X Q, Yang L, et al. Microstructure evolution and corrosion behavior of Invar 36 alloy additively manufactured via laser powder bed fusion [J]. *Materials Characterization*, 2024, 217:114422.
- [22] Król M, Snopiński P, Hajnyš J, et al. Selective Laser Melting of 18Ni–300 Maraging Steel [J]. *Materials*, 2020, 13:4268.
- [23] Zhu H M, Zhang J W, Hu J P, et al. Effects of aging time on the microstructure and mechanical properties of laser-cladded 18Ni300 maraging steel[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(14):8835–8847.
- [24] Ge R, Yang D, Yang C, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 18Ni–350 maraging steel fabricated by Wire and Arc Additive Manufacturing [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 40:109793.
- [25] Wang D, Yang S, Jiang H, et al. Study on the relationship between the refined hierarchical microstructure, yield strength and impact toughness of low-carbon martensitic steel at different quenching temperatures [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2024, 896:146271.
- [26] Wu W, Wang X, Wang Q, et al. Microstructure and mechanical properties of maraging 18Ni–300 steel obtained by powder bed based selective laser melting process [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2020, 26(8):1379–1387.
- [27] Chandra C, Ghosh S, Gaur V. Effects of pre-processing and aging on microstructure and mechanical properties of 18Ni–300 maraging steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2025, 943:148715.
- [28] Huang G, Yang L, Liu Y. Mathematical modeling and parameter optimization for laser cladding of single-track TiAl coating on TA17 alloy via response surface methodology [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192:113535.
- [29] Liu X R, Zheng S J, Fang L M, et al. Exceptionally prolonged plastic strain in a severely deformed martensitic hardening high-strength steel under dynamic compression [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2025, 922:147661.
- [30] Liu H H, Fu P X, Liu H W, et al. Simultaneously enhancing strength and toughness of medium-carbon martensitic steel via nano precipitates and fine-grained structure[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2022, 842:143030.
- [31] Chen Y, Jiang M, He C, et al. Microstructures and mechanical properties of dissimilar joints between cobalt-based superalloy FSX-414 and additively manufactured 316L stainless steel[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 42:111087.
- [32] Bai Y, Yan Y, Chen J, et al. Microstructure and mechanical property evolution of 316L/18Ni300 bimetallic structure manufactured by laser powder bed fusion [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2025, 929:148141.