

轧制与激光选区熔化成形316L不锈钢组织与性能对比研究

陶俊杰^{1, 2}, 张宁², 葛进国³, 裴智奥^{1, 2}

1. 盐城工学院机械工程学院 江苏盐城 224051

2. 徐州工程学院机电工程学院 江苏徐州 221018

3. 桂林电子科技大学机电工程学院 广西桂林 541010

摘要: 用激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 技术成形316L不锈钢, 与轧制316L不锈钢进行显微组织、显微硬度、拉伸性能、弯曲性能和耐腐蚀性能对比研究。研究发现: SLM成形不锈钢宏观上成形质量较高, 仅存在一些气孔和未熔融孔洞等缺陷; 由于SLM制造过程的高热梯度和凝固过程的高冷却速率, SLM成形316L不锈钢侧面的显微组织不同于轧制不锈钢, 主要为柱状晶; 因SLM成形316L不锈钢具有亚晶组织结构, 所以其硬度、拉伸性能、弯曲性能优于轧制不锈钢, 受孔隙率影响, 顶面显微硬度均值略高于侧面; 并且SLM成形316L不锈钢耐腐蚀性能略优于轧制成形。研究表明: SLM成形316L不锈钢具有较好的硬度、拉伸性能、弯曲性能和耐腐蚀性能。

关键词: 激光选区熔化; 316L不锈钢; 显微组织; 耐腐蚀性能

Microstructure of 316L stainless steel formed by rolling and selective laser melting

TAO Junjie^{1, 2}, ZHANG Ning², GE Jinguo³, PEI Zhiao^{1, 2}

1. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou, 221018 Jiangsu, China

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541010, Guangxi, China

Abstract: The microstructure, microhardness, tensile properties, bending properties and corrosion resistance of 316L stainless steel formed by selective laser melting (SLM) and rolled 316L stainless steel were compared. It is found that the SLM formed stainless steel has a high forming quality on the macro level, and there are only some defects such as pores and unmelted holes. Due to the high thermal gradient of SLM manufacturing process and the high cooling rate of solidification process, the microstructure of 316 L stainless steel side formed by SLM is different from that of rolled stainless steel, which is mainly columnar crystal. Because SLM formed 316L stainless steel has

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目 (2024M750584); 江苏省产学研合作项目 (BY20230206); 徐州市科技计划项目 (KC23313, KC23404); 桂林市科技计划项目青年创新人才专项 (20220125-2); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室主任课题 (22354S016); 徐州工程学院重大培育项目 (2024)。

第一作者: 陶俊杰, 硕士, 主要从事金属增材制造研究, E-mail: t1054382232@163.com。

通信作者: 张宁, 副教授, 博士, 主要从事增材制造、金属基复合材料材料与连接技术的研究, E-mail: sprningzn@126.com。

a sub-grain structure, its hardness, tensile properties and bending properties are better than those of rolled stainless steel. Due to the influence of porosity, the average microhardness of the top surface is slightly higher than that of the side surface. Moreover, the corrosion resistance of SLM formed 316L stainless steel is slightly better than that of rolling forming. The results show that the SLM formed 316L stainless steel has good hardness, tensile properties, bending properties and corrosion resistance.

Keywords: laser selective melting; 316L stainless steel; microstructure; corrosion resistance

1 序言

316L是一种超低碳奥氏体不锈钢,由于其优越的性能,被广泛用于运输、汽车和航空航天工业^[1, 2]。当前,开发异形不锈钢部件具有巨大的市场需求,鉴于对零件精度和制造时间的要求,传统的制备方法已无法满足。增材制造(Additive Manufacturing, AM)方法以逐层原理工作,具备强大的自由曲面制造技术,可以制造能直接展开的组件,而无需特殊加工,定制零件的制造效率高^[3, 4]。因此,利用增材制造制备不锈钢零件成为一种可行的方案。

激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)是工业应用中最常用的增材制造工艺之一,具有精度高、制造时间短和操作过程更智能等优点^[5, 6]。该技术利用激光束作为热源,在振镜控制下,通过计算机辅助设计数据引导,逐层熔化金属粉末选区,使金属粉末堆积成固体。此外,SLM技术的快速凝固有助于形成更精细的微观结构并消除局部偏析。然而,以这种方式制备的材料容易产生许多缺陷,如气孔、残余应力和裂纹等^[7, 8]。这些缺陷影响着材料的性能,成为有待解决的问题。另外,SLM工艺容易形成柱状晶体,这可能导致材料的微观结构和各向异性性质不均匀^[9]。

近年来,许多研究人员对SLM成形316L不锈钢开展了相关研究。SUN等^[10]研究发现层间旋转的扫描策略打破了SLM成形316L不锈钢晶粒的柱状生长,有助于晶粒细化。LIU等^[11]用SLM技术制备不同扫描速度下的316L不锈钢,发现扫描速度的改变显著影响了熔池边界、残余孔隙、凝固单元、纳米夹杂物以及晶粒尺寸和分布,随着能量密度的增加,极限抗拉强度略有下降,而伸长率则相反。SUN等^[12]在SLM成形316L不锈钢中添加TiAl颗粒,研究发现,TiAl的加入改善了拉伸性能,显著提

高了极限抗拉强度。ZHAO等^[13]研究了SLM技术成形添加纳米晶TiC后的316L不锈钢,发现掺杂后的316L不锈钢的晶粒尺寸得到细化,显微硬度和拉伸性能增强。BARTOLOMEU等^[14]研究SLM、热压和铸造3种不同工艺下的316L不锈钢耐磨性能,研究发现,通过SLM生产的316L不锈钢耐磨性能最佳,其高磨损性能主要是由该工艺引起的亚晶结构形成的。ZHANG等^[15]进行了SLM成形和锻造316L不锈钢的电化学对比试验,发现SLM成形316L不锈钢样品的点蚀电位高于锻造样品。HUANG等^[16]研究发现,由于SLM成形316L不锈钢的典型的蜂窝状晶体结构,SLM成形316L不锈钢的磨损性能优于轧制态。WU等^[17]研究了轧制与SLM成形316L不锈钢在CO₂和空气中的抗氧化性,结果表明,在600℃的CO₂、800℃和900℃的空气中,SLM成形316L的抗氧化性能优于轧制态。

目前,SLM成形316L不锈钢大部分研究主要集中在工艺参数优化与后处理改善,对于SLM成形与轧制不锈钢的差异性研究较少。因此,探究轧制与SLM成形316L不锈钢组织与性能综合分析,对SLM成形不锈钢实际应用与后续工艺优化具有指导意义,有必要对此方面进行研究。本文使用316L不锈钢粉末为材料,分析研究SLM成形与轧制成形316L不锈钢组织结构。此外,还分析了显微组织对显微硬度、拉伸性能、弯曲性能和耐腐蚀性能的影响,为SLM成形316L不锈钢的应用及后续工艺优化提供理论参考。

2 试验材料与方法

本试验使用上海泰迪贸易有限公司生产的轧制态316L不锈钢。SLM-316L不锈钢采用SLM设备型号为EOS M290制备,其过程采用氩气保护,打印策略为逐层选择67°,具体的沉积参数如下:激光功率为160W、扫描速度为1000mm/s、扫描间距为

0.1mm、层厚为30 μ m。通过INSPECT S50扫描电子显微镜（SEM）观察，316L不锈钢粉末显微形貌如图1a所示，其粉末颗粒近似球形，球形度较高。成形试样示意图如图1b所示。

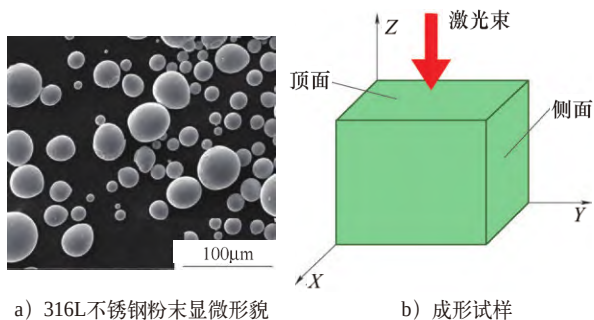


图1 粉末形貌与SLM成形示意

使用环氧树脂对SLM成形和轧制316L不锈钢进行冷镶嵌，使用金相砂纸和抛光液对样品打磨和抛光，利用王水溶液（HNO₃与HCl体积比为1:3）对镶嵌好的样品进行腐蚀。采用MDS400型号金相显微镜（OM）和INSPECT S50型号扫描电子显微镜（SEM）分别观察试样宏观组织和微观组织。使用X射线衍射仪（Rigaku SmartLab）对SLM成形316L不锈钢进行物相鉴定和分析，扫描速度8°/min，扫描范围为40°~100°。使用自动显微硬度计（HVS-1000A），在测试力0.2kgf（1.96N）下进行维氏硬度检测，每个试样检测10个点，取平均值。利用万能力学试验机（TSMT-EM6.105）测试拉伸力学性能，拉伸速度为1mm/min，拉伸试样尺寸如图2所示。使用万能试验机进行三点弯曲试验，试样尺寸为长100mm、宽10mm、厚4mm，支辊跨距设置为55mm，压头下移速度设为1mm/min。采用电化学工作站（RST5090F）对试件耐腐蚀性能进行测试，电解液（质量分数）为3.5%NaCl溶液，使用三电极测量系统。测试前先将试样在电解质溶液中浸泡1h。

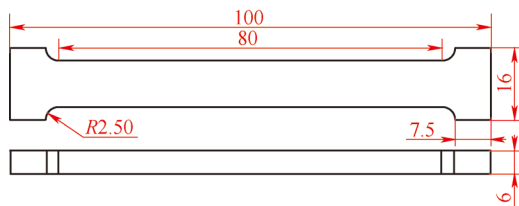


图2 拉伸试样尺寸

3 试验结果与讨论

3.1 物相分析

图3所示为SLM成形态不锈钢的XRD图谱。由

图3可见，轧制316L的XRD衍射图存在少量 α' 马氏体。SLM成形316L不锈钢只形成了奥氏体相 γ ，其特征是4个奥氏体峰（111）、（200）、（220）和（311），并且（111）峰最突出。

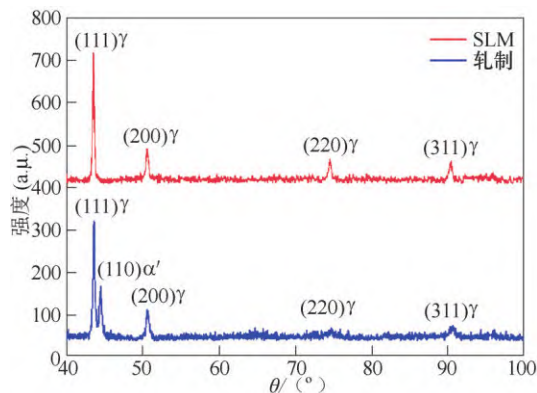


图3 SLM制备316L不锈钢XRD图

3.2 显微组织

图4所示为316L不锈钢腐蚀前的光学显微形貌。由图4可知，尽管SLM不锈钢成形质量较高，但仍存在未熔化粉末、气孔和匙孔状孔隙，由于SLM工艺的特点，侧面的表面粘粉情况更为严重，因此出现更多的未熔化孔隙。图5所示为316L不锈钢腐蚀后金相显微组织图。图5a所示为轧制316L不锈钢的微观结构，可以看到许多形状规整的等轴晶，晶粒尺寸分布均匀。图5b所示为SLM成形不锈钢顶面的显微形貌，主要显示了打印过程中激光扫描路径痕迹，晶粒以等轴晶为主。图5c所示为SLM成形不锈钢侧面的显微形貌，逐层旋转使得侧面上的柱状晶发生一定程度上的扭转，呈现不规则的晶粒形貌。层与层之间呈明显的鱼鳞纹特征，熔池边界清晰。这是由于SLM成形过程中，金属粉末经历周期性急速加热和冷却，金属粉末熔化并快速凝固收缩，再经历熔覆沉积的退火、回火作用，形成了鱼鳞纹特征（见图5c）^[18]。某些晶粒跨越多个熔池生长，与成形方向平行的柱状晶。这归因于SLM成形过程中，逐层沉积使新一层部分材料覆盖上一层产生重熔，温度梯度在该方向最大，在此方向上已凝固成形试样所散逸的热量有利于促进柱状晶的形成，容易形成柱状晶；熔池顶部的温度梯度小，生长速率大，容易形成等轴晶。因此柱状晶通过外延生长的方式逐层延伸，而等轴晶组织通常较少^[19]。

为进一步研究晶粒组织，对试样进行SEM高

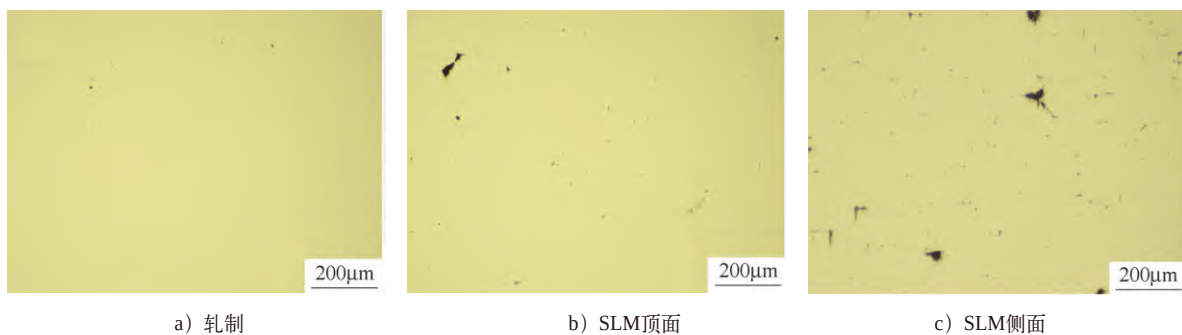


图4 SLM-316L不锈钢腐蚀前OM图

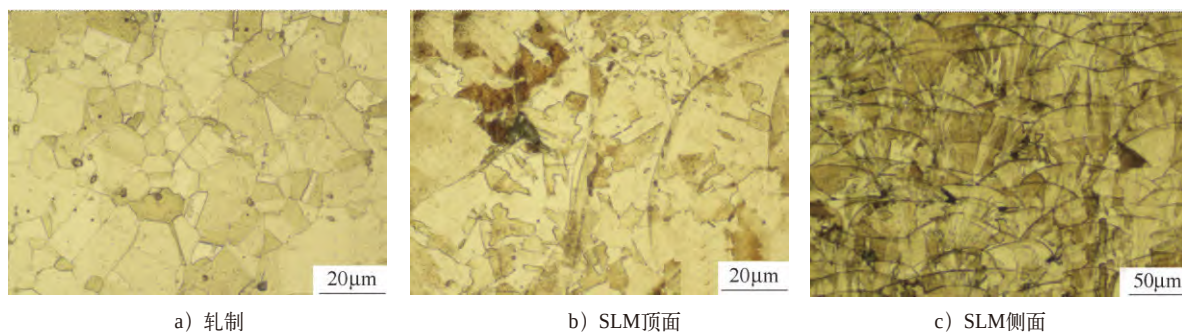


图5 不锈钢腐蚀后OM图

倍观察，图6所示为扫描电镜下的不锈钢显微组织。图6a所示为轧制316L不锈钢的微观结构，可以看出，大量的矩形晶粒分布均匀。图6b、c所示为SLM成形316L不锈钢的组织形貌，与轧制的316L不锈钢不同，SLM成形316L不锈钢具有特别的亚结构。这是由于SLM过程中熔池凝固前具有较高的温度梯度和凝固速率所形成的。从图6b、c可以看到，SLM态试样亚晶组织主要为条状和胞状晶，实际上，不同的亚晶粒形貌是由于亚结构和截面之间的取向关系不同造成的。细小的胞状亚结构尺寸均在 $1\mu\text{m}$ 以下，不同区域内亚结构沿不同方向生长。这种亚结构不仅在激光选区增材制造工艺中存在，在激光焊接及激光熔覆等工艺中也能发现这种亚结构的存在^[20]。

总的来说，微观结构清楚地显示了轧制态与沉积态的主要差异。

3.3 显微硬度

显微硬度是金属材料在摩擦和接触应用中的重要力学性能，图7a所示为轧制与SLM成形316L不锈钢试样的维氏硬度柱状图。由图7a可知，轧制316L不锈钢的维氏硬度为170HV，显著低于SLM成形不锈钢的硬度，这是因为SLM成形样品存在大量晶界及亚晶界，阻碍位错运动，使其显微硬度提高。SLM制备不锈钢在不同方向上的硬度也存在差异，顶面硬度略高于侧面，根据图4可知，侧面略多于顶面的孔隙进而影响到不同成形面硬度差异。图7b所示为硬度分布折线图可知，SLM不锈钢的硬度误差

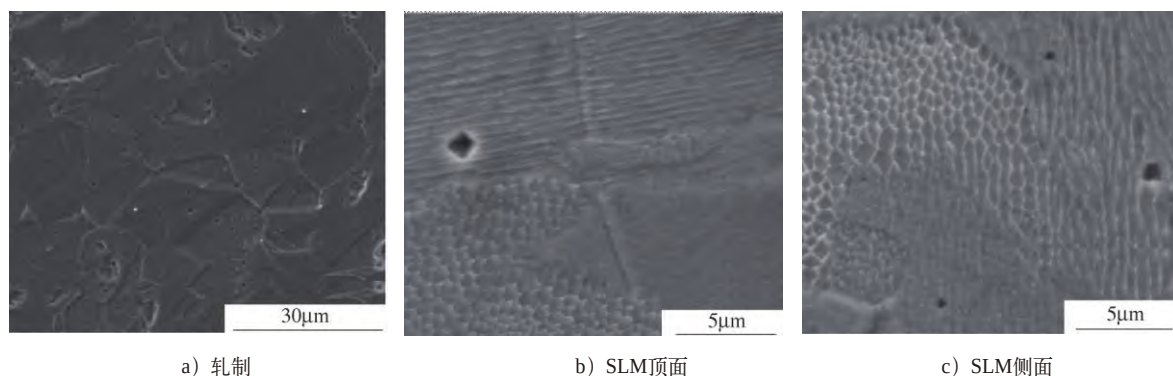
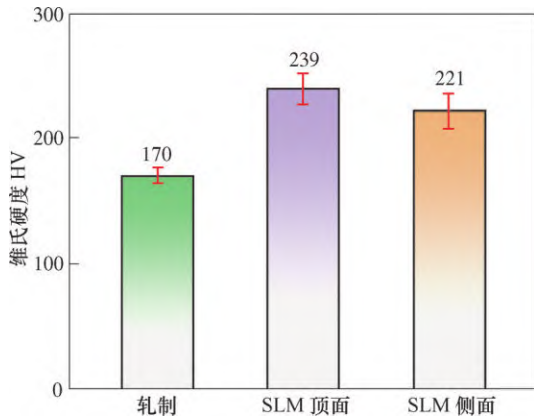
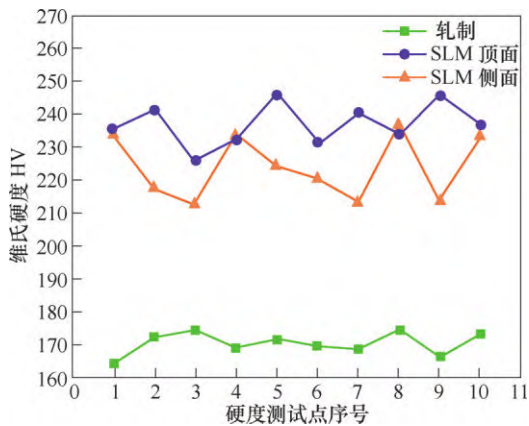


图6 不同成形工艺下不锈钢SEM图

较机械加工大，这是受SLM不锈钢内部孔洞缺陷的影响。



a) 硬度柱状图



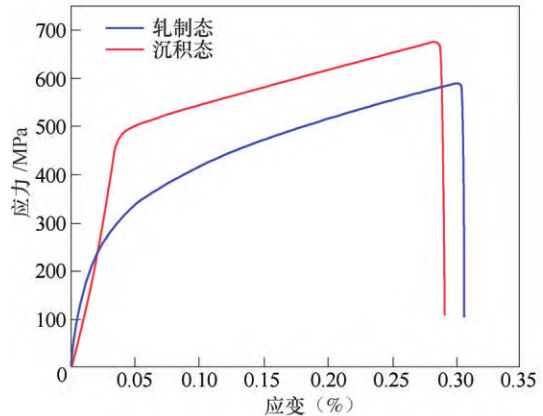
b) 硬度分布折线图

图7 轧制与SLM成形不锈钢维氏硬度

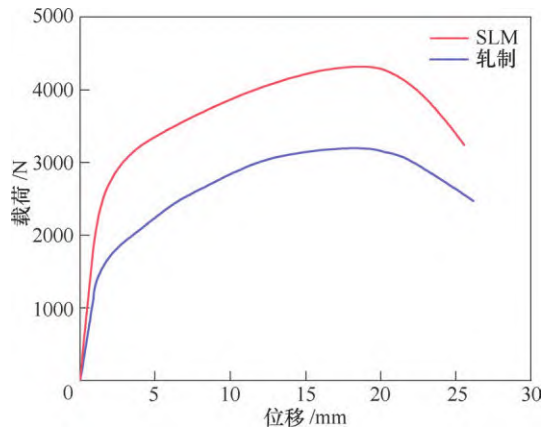
3.4 拉伸性能与弯曲性能

图8a所示为室温下轧制态与沉积态316L不锈钢的拉伸曲线。轧制316L不锈钢屈服强度为335.4MPa、抗拉强度为587.7MPa、伸长率为30.5%。SLM制备试样的屈服强度为509.6MPa、抗拉强度为678.3MPa、伸长率在29%。与轧制态相比，沉积态的屈服强度、抗拉强度分别提升了174.2MPa和90.6MPa，两种状态的不锈钢伸长率区别不大。图8b所示为不同方式制造的316L不锈钢弯曲测试曲线，SLM成形316L不锈钢的抗弯强度明显高于轧制态。从图3XRD可知，轧制态存在少量马氏体，能提升试样的强度。但轧制态的拉伸和弯曲性能却低于沉积态，因此判断拉伸性能和弯曲性能很大程度上取决于样品的微观结构，结合图6可知，由于成形工艺不同，沉积态细小晶粒的致密排列使其具有更高的位错密度，能够抵抗裂纹扩展，提高

其抗拉强度、屈服强度与弯曲性能，具有更好的综合力学性能。



a) 拉伸性能



b) 弯曲性能

图8 轧制与SLM成形不锈钢拉伸与弯曲测试曲线

3.5 耐腐蚀性能

不锈钢广泛用于需要抗点蚀和缝隙腐蚀的应用，图9所示为轧制和SLM成形316L不锈钢极化曲线，课件两条曲线基本走势一致。轧制与SLM成形316L不锈钢极化曲线的腐蚀电流密度和腐蚀电位（见表1），腐蚀电压和腐蚀电流密度的大小反映了试样的腐蚀难易程度和腐蚀速率的大小，SLM成形316L不锈钢的电压较大，电流密度较小，表明SLM成形不锈钢更耐腐蚀，且腐蚀速率更慢。这是因为SLM样品中存在大量亚结构，晶界会影响不锈钢的腐蚀行为，较小的晶粒尺寸意味着晶界面积较大，这是导致其耐腐蚀性能较高的主要原因。此外，不锈钢耐腐蚀性能与材料孔隙率密切相关，SLM成形不锈钢的孔隙率较大，孔隙变大会使钝化膜击穿敏感性率提高，导致钝化膜完整性较差，降低耐腐蚀性能，使其耐腐蚀性能比轧制成形316L不锈钢提升

不大。

表1 电化学试验各项指标

试样	腐蚀电压 /V	腐蚀电流密度 / ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
轧制	-0.171	2.27×10^{-8}
SLM	-0.146	1.63×10^{-8}

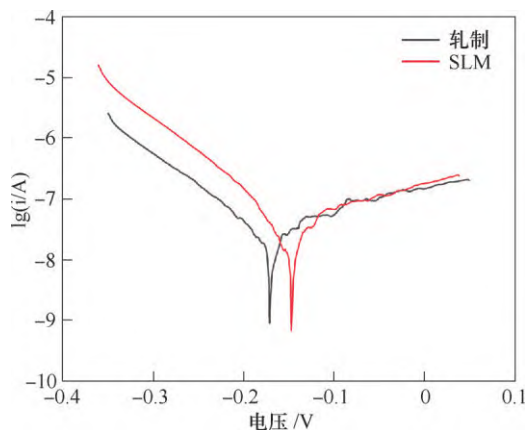


图9 轧制与SLM不锈钢电化学腐蚀极化曲线

4 结束语

本文对比研究了轧制与SLM制备316L不锈钢的微观结构、显微硬度、耐腐蚀性能和拉伸性能，得出以下结论。

1) 轧制的316L不锈钢由分布均匀的矩形晶粒组成，SLM成形不锈钢顶面主要由等轴晶组成，而侧面表现出独特的鱼鳞熔池结构，柱状晶沿熔池边界垂直呈外延生长，并且存在亚结构。

2) 由于SLM工艺成形的316L不锈钢具有更好抵抗裂纹扩展的亚结构，SLM成形316L不锈钢的显微硬度、屈服强度、拉伸强度和弯曲性能明显优于轧制不锈钢。

3) SLM成形316L不锈钢耐腐蚀性能略优于轧制不锈钢。由于组织中细小亚晶，提高了晶界面积，因此使SLM成形不锈钢的表面抗腐蚀性提高，但内部的孔隙缺陷导致耐腐蚀性能提升较少。

参考文献:

[1] SHANG Y, YUAN Y, LI D, et al. Effects of scanning speed on in vitro biocompatibility of 316L stainless steel parts elaborated by selective laser melting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 4379-4385.

[2] ANTONY K, ARIVAZHAGAN N, SENTHILKUMARAN K. Numerical and experimental investigations on laser melting of stainless steel 316L metal powders[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16 (3) : 345-355.

[3] 艾岳巍, 王亿元. 激光增材制造技术在轨道交通装备中的应用及发展趋势[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (7) : 1-11, 39.

[4] 张勇, 王斌斌, 刘琛, 等. 增材制造金属材料在海洋环境下的耐蚀性能——综述[J/OL]. 材料导报: 1-20[2024-08-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20240614.0941.002.html>.

[5] JEON J M, PARK J M, YU J H, et al. Effects of microstructure and internal defects on mechanical anisotropy and asymmetry of selective laser-melted 316L austenitic stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 763: 138152.

[6] 温家浩, 杨中桂, 丁永春, 等. 选区激光熔化增材制造技术研究现状与展望[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (10) : 14-19.

[7] 宗学文, 叶凡, 刘登科, 等. 选区激光熔化不锈钢全流程关键问题研究现状与进展[J]. 精密成形工程, 2023, 15 (12) : 116-133.

[8] ZHANG B, LI Y, BAI Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30: 515-527.

[9] SGHAIER T A M, SAHLAOU H, MABROUKI T, et al. Selective laser melting of stainless-steel: a review of process, microstructure, mechanical properties and post-processing treatments[J]. International Journal of Material Forming, 2023, 16 (4) : 41.

[10] SUN Q, GUO K, WANG X, et al. Effect of scanning strategies on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 793: 139879.

[11] LIU J, SONG Y, CHEN C, et al. Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. Materials & Design,

- 2020, 186: 108355.
- [12] SUN P, QIU C. Influence of addition of TiAl particles on microstructural and mechanical property development in a selectively laser melted stainless steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 826: 141925.
- [13] ZHAO S, SHEN X, YANG J, et al. Densification behavior and mechanical properties of nanocrystalline TiC reinforced 316L stainless steel composite parts fabricated by selective laser melting[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103: 239-250.
- [14] BARTOLOMEU F, BUCIUMEANU M, PINTO E, et al. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior—A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting[J]. Additive Manufacturing, 2017, 16: 81-89.
- [15] ZHANG Z, YUAN X, ZHAO Z, et al. Electrochemical noise comparative study of pitting corrosion of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting and wrought[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2021, 894: 115351.
- [16] HUANG Y, YANG S, GU J, et al. Microstructure and wear properties of selective laser melting 316L[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 254: 123487.
- [17] WU H, LIANG Z, ZHU Z, et al. Oxidation resistance of the 316L manufactured by cold-rolled and selective laser melting in CO₂ and air[J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104889.
- [18] 王陆阳, 孙东辉, 黄瑞, 等. 热处理对SLM成形15-5PH不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48 (11): 132-136.
- [19] 李超. 激光增材制造成形316L不锈钢的研究进展[J]. 机械工程材料, 2022, 46 (8): 1-7.
- [20] 黄玉宝. 激光增材制造316L不锈钢组织及疲劳损伤研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.

MW 20241123

(上接第41页)

- [14] 周玥丞, 赵阳. 增材制造技术制备316L不锈钢的拉伸性能[J]. 土木工程学报, 2020, 53 (10): 26-35.
- [15] WANG Z T, YANG S L, HUANG Y B, et al. Microstructure and fatigue damage of 316L stainless steel manufactured by selective laser melting (SLM) [J]. Materials, 2021, 14 (24): 7544-7544.
- [16] 谭峰亮, 蒋博文, 汪力, 等. 选区激光熔化成形与热轧316L不锈钢的组织与性能[J]. 铸造技术, 2018, 39 (12): 2694-2697.
- [17] 汪洋扬, 孙明艳, 陈捷, 等. 热处理温度对选区激光熔化成形316L不锈钢冲击韧性及各向异性的影响[J]. 中国激光, 2024, 5 (12): 147-155.
- [18] 尹燕, 刘鹏宇, 路超, 等. 选区激光熔化成形316L不锈钢微观组织及拉伸性能分析[J]. 焊接学报, 2018, 39 (8): 77-81, 132-133.
- [19] 宋仁伯, 项建英, 侯东坡, 等. 316L不锈钢热加工硬化行为及机制[J]. 金属学报, 2010, 46 (1): 57-61.
- [20] KUMAR D, JHAVAR S, ARYA A, et al. Mechanisms controlling fracture toughness of additively manufactured stainless steel 316L[J]. International Journal of Fracture, 2021: 1-18.
- [21] 侯东坡, 宋仁伯, 项建英, 等. 固溶处理对316L不锈钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31 (12): 61-65.
- [22] 张乐, 王威, BABAR SHAHZAD M, 等. 新型多层金属复合材料的制备与性能[J]. 金属学报, 2020, 56 (3): 351-360.
- [23] 孙亚东, 周芸, 郭坤山, 等. 泡沫钢的制备及3点弯曲性能[J]. 航空材料学报, 2017, 37 (4): 77-83.
- [24] 程灵钰, 朱小刚, 刘正武, 等. 热处理对激光选区熔化成形316L不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41 (7): 80-86.
- [25] 沈旭婷. 316L不锈钢激光增材再制造工艺、性能及机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [26] LIU L F, DING Q Q, ZHONG Y, et al. Dislocation network in additive manufactured steel breaks strength-ductility trade-off[J]. Materials Today, 2018, 21 (4): 354-361.

MW 20241224