

316L板材与选区激光熔化成形材料的组织和性能对比

郝维勋¹, 史丹¹, 赵中赫², 车鹏程³, 段龙汉⁴

1. 低碳热力发电技术与装备全国重点实验室(哈尔滨锅炉厂有限责任公司) 黑龙江哈尔滨 150046

2. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司 黑龙江哈尔滨 150046

3. 哈尔滨能创数字科技有限公司 黑龙江哈尔滨 150046

4. 辽宁科技大学 辽宁鞍山 114051

摘要: 对比研究了通过选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)成形316L不锈钢和连铸连轧不锈钢板的微观形貌及其对力学性能的影响,并对比分析了不同工艺下成形试样的微观组织形貌、室温拉伸性能和高温拉伸性能的差异。结果表明:通过光学显微镜(OM)观察,不锈钢板试样中可以看出等轴晶结构,从SLM打印试样则可以观察到鱼鳞状熔池形貌,放大后能观察到大量细胞状和纤维状的亚晶结构。通过电子背散射衍射(EBSD)分析,不锈钢板试样中可以看到大量等轴晶结构,小角度晶界较多。相比之下,SLM打印试样可以看到的晶粒形状大多为柱状晶结构,且大角度晶界较多。SLM打印试样的室温和高温拉伸性能均优于不锈钢板试样。在硬度方面,SLM打印试样的硬度性能高于不锈钢板试样。

关键词: 选区激光熔化; 316L不锈钢; 微观组织; 力学性能

Comparison of microstructure and properties between 316L plate and materials formed by selective laser melting

HAO Weixun¹, SHI Dan¹, ZHAO Zhonghe², CHE Pengcheng³, DUAN Longhan⁴

1. State Key Laboratory of Low-carbon Thermal Power Generation Technology and Equipments, Harbin Boiler Company Limited, Harbin 150046, Heilongjiang, China

2. Harbin Boiler Company Limited, Harbin 150046, Heilongjiang, China

3. Harbin Energy Innovation Digital Technology Co., Ltd., Harbin 150046, Heilongjiang, China

4. University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China

Abstract: The microstructure and its influence on mechanical properties of casting and rolling 316L stainless steel plate and 316L stainless steel formed by selective laser melting (SLM) were studied. The differences in microstructure morphology, tensile properties at room temperature and high temperature were compared and analyzed under different processes. The test results show that the equiaxed grain structure can be seen in the stainless steel plate specimens by optical microscope (OM). In contrast, there are fish-scale molten pool morphologies in

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2022E079)。

第一作者: 郝维勋, 硕士, 高级工程师, 主要从事电站锅炉用耐热材料研发及应用等相关工作, E-mail: hwx7518@126.com。

the SLM printed specimens, a large number of cell and fibrous subcrystalline structures can be observed after magnification. By electron backscatter diffraction (EBSD) analysis, a large number of equiaxed crystal structures and low angle grain boundaries can be seen in the stainless steel plate specimens. In contrast, the grain shapes of SLM printed specimens are mostly columnar crystal structures, and there are more high angle grain boundaries. In terms of tensile properties, the tensile properties of SLM-printed specimens at room temperature and high temperature are better than those of 316L stainless steel plate specimens. In terms of hardness, the hardness performance of SLM printed sample is higher than that of stainless steel plate sample.

Keywords: selective laser melting; 316l stainless steel; microstructure; mechanical properties

1 序言

316L不锈钢因其优异的力学性能,耐腐蚀性能被广泛应用于航空航天、船舶和化工等领域^[1-3]。在加工这些领域复杂精密的零部件时,传统的316L不锈钢的加工工艺(轧制、锻造、铸造等)由于设计自由度低且需要后期处理,耗费大量的时间和材料^[4],尤其在复杂结构生产制造或局部修复时,生产难度逐渐加大。

选区激光熔化(SLM)技术的问世成功克服了上述的诸多困难^[5]。SLM是一种将CAD模型直接导入3D打印机的程序中,通过激光熔融金属粉末的方法把金属粉末打印成复杂的金属结构的制造技术^[6]。与传统的铸造、锻造等工艺相比,SLM成形是一个快速加热熔化和快速非平衡凝固的过程^[7,8]。因此,传统工艺与SLM成形试样的微观组织有所差异。GEENEN等^[9]通过将铸造和SLM打印316不锈钢的微观结构和腐蚀性能进行对比分析,结果发现,与铸造316L不锈钢相比,虽然SLM打印试样的晶粒更细,但孔隙率较高,这导致了SLM打印试样的耐蚀性较差。RAMAR等^[10]通过对比分析了铸造和SLM打印316L不锈钢的微观组织和磨损性能,发现由于SLM工艺会使316L不锈钢内部产生较精细的结构,从而磨损性能有所提高。WOELK等^[11]分别对比了锻造和SLM打印316L不锈钢的腐蚀性能,发现由于SLM打印316L不锈钢试样内部孔隙较多,导致耐蚀性较差。

本文通过探究SLM打印316L试样和316L不锈钢板试样的微观组织和力学性能,对不同工艺制备试样的室温拉伸性能、高温拉伸性能和硬度性能进行对比分析,探究了两种制造工艺对316L不锈钢微观组织和力学性能的影响,为复杂结构形状的316L产品的制造和应用提供性能对比和技术支撑,并为

316L不锈钢板产品的局部修复提供可能,有望降低相应的制造和修复成本,具有一定的经济效益。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

SLM打印所得的试样通过采用气雾化法制备的316L不锈钢粉末制备,粉末在真空环境80℃烘粉6h。粉末扫描电镜形貌观察如图1所示,大部分呈球形,少量形状不规则,部分存在卫星粉附着。

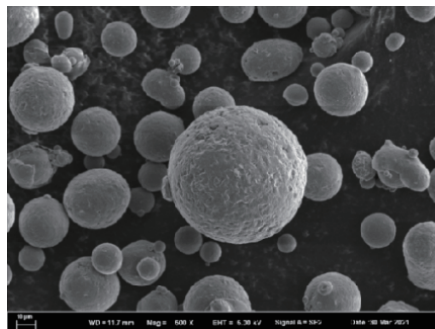


图1 SLM打印用316L不锈钢粉末扫描电镜观察形貌

试验前需要将粉末材料放进真空干燥箱内进行干燥处理。316L不锈钢粉末的化学成分见表1。

表1 316L不锈钢粉末的化学成分(质量分数)(%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.025	0.35	0.86	0.033	0.011	14.41	8.05	1.92	余量

其化学成分采用5110 VDV型电感耦合等离子体原子发射光谱仪进行定量测量。粉末颗粒为大小不均匀的球状结构,其直径为15~53μm。

不锈钢板尺寸为100mm×100mm×16mm,材料为316L奥氏体不锈钢,采用连铸连轧工艺生产,钢板交货状态为固溶态+酸洗,热处理制度为固溶+水冷处理(1040~1090℃,水冷)。

2.2 SLM打印试验

制备试样的3D打印设备为EOS M290。试验所

使用功率为214W, 扫描速度为928mm/s, 扫描间距为0.1mm, 层厚为0.04mm。基板选用316L不锈钢材料。在打印前, 对每个基板进行深度清洗。所有样品的处理均采用层间旋转67°的扫描策略, 如图2a所示。用高纯氩气充满整个沉积区域以防止增材制造过程中高温金属的氧化与变质。SLM打印的试样包括室温拉伸试样和高温拉伸试样, 两种拉伸试样都是先水平打印出长方体形状, 经后期加工处理后制作形成的。打印完成后, 利用线切割将试样从基板上切割下来, 进行后续机械加工。316L不锈钢板的拉伸试样是将316L连铸板材切割后机械加工而成。打印后代加工试样的形状如图2b所示。

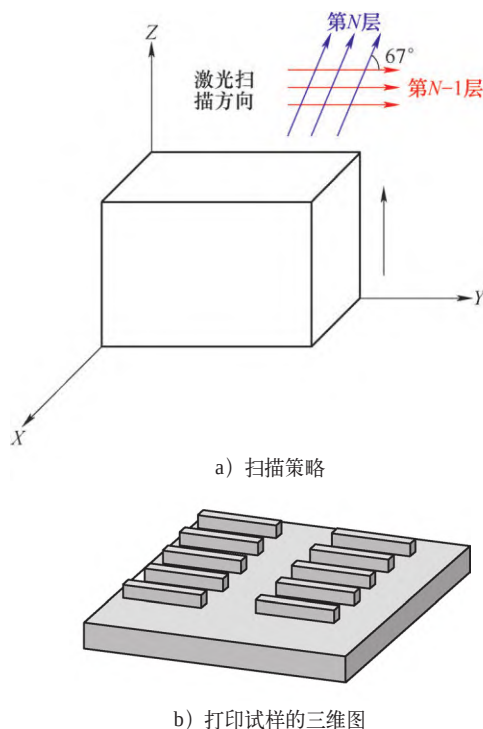


图2 SLM打印316L不锈钢试样的扫描策略与打印试样的三维图

2.3 微观组织表征

(1) 光学显微分析 为了确定通过SLM打印316L不锈钢和316L不锈钢板的微观形貌, 分别制作10mm×10mm×10mm的金相试样。试样分别在320目、600目、1000目2000目和3000目的碳化硅砂纸上进行打磨处理, 并利用2.5μm的金刚石悬浊液进行机械抛光。采用20mL盐酸+100mL无水乙醇+少量硫酸铜溶液混合而成的腐蚀液对二者进行化学腐蚀, 用SteREO型金相显微镜(OM)观察不锈钢板和SLM打印出的金相试样表面的微观组织形

貌和缺陷的分布情况。

(2) EBSD分析 从不锈钢板和SLM打印试样中分别切割出10mm×10mm×10mm的试样, 对试样进行打磨和机械抛光后, 用5%高氯酸+95%酒精溶液在室温40V下电解抛光30s。EBSD数据采集的图片尺寸为500μm×500μm, 步长为1μm, 设备型号为JSM-7900F。数据采集完后用Aztec Crystal软件进行处理。

2.4 力学性能测试

(1) 室温拉伸测试 为了研究不同的加工工艺对316L不锈钢拉伸性能的影响, 通过SLM打印和从不锈钢板中切割的方法制备室温拉伸试样, 拉伸试样为典型的狗骨头状的形貌, 拉伸试样的直径为5mm, 标距为25mm。样品的具体尺寸如图3a所示。当试样制备后, 用酒精对试样进行清洗。使用WDW-600E型电子拉伸试验机分别对二者的极限抗拉强度(R_m)、屈服强度(R_e)和伸长率(A)进行测试。拉伸试验时应变速率为0.001s⁻¹。在相同的条件下, 分别对不锈钢板和SLM打印制成的拉伸试样进行3次测试并记录相应数据。

(2) 高温拉伸测试 高温拉伸试样的具体尺寸如图3b所示。高温拉伸试验在450℃的环境下进行, 所用试验设备为具有高温加热功能的WED200型电子拉伸试验机, 拉伸试验应变速率为0.001s⁻¹。SLM打印和316不锈钢板的拉伸试样为狗骨头形状, 通过线切割的方式获得。使用机械攻螺纹工具对拉伸试样的两端进行攻螺纹加工, 使试样与夹具之间形成螺纹联接, 联接更可靠, 避免材料高温受热后性

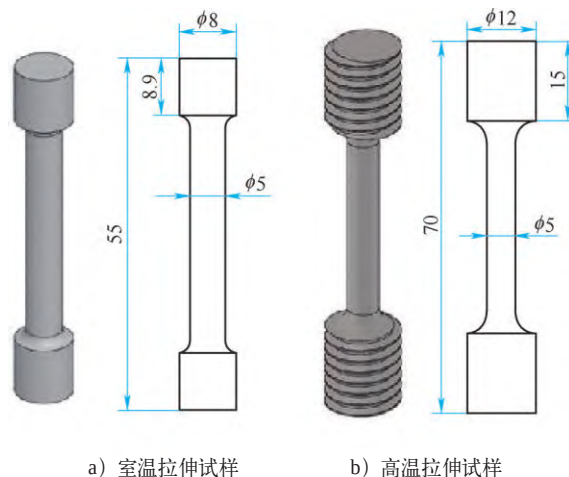


图3 SLM打印和316不锈钢板试样三维模型和具体尺寸

能下降, 试验受力时产生明显变形。拉伸试样的直径为5mm, 标距为25mm。制备完样品后, 分别对SLM打印和316L不锈钢板拉伸试样进行3次测试并记录相应数据。

(3) 硬度测试 为了探究不同加工工艺对316L不锈钢硬度性能的影响, 通过SLM打印和从不锈钢板切割的方式制备硬度测试试样, 试样尺寸均为10mm×10mm×10mm。使用维氏硬度计分别对两种加工工艺的316L试样进行维氏显微硬度的测量, 载荷(HV0.5)为0.5kg(4.9N), 保压时间为15s, 设备型号为ALHVS-650-XYZ。对每个样品进行5次测量, 计算出平均硬度值。

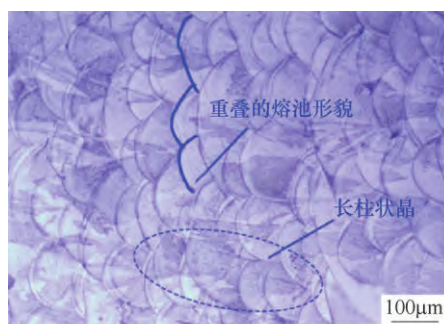
3 试验结果与讨论

3.1 微观结构分析

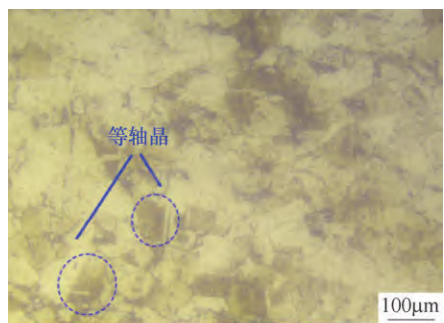
316L不锈钢板和SLM打印316L不锈钢试样的微观组织形貌如图4所示。其中, 图4a为SLM水平打印试样侧面的微观形貌。从图4a中可清晰地看出熔池重叠良好的致密结构, 从熔池的横截面形貌在平行于构件方向的平面上, 形状呈鱼鳞状。熔池的重叠性质表明, 在SLM打印过程中, 316L不锈钢粉末颗粒成功熔合, 并且层与层之间的结合牢固。在SLM加工过程中, 激光束熔化光束附近区域的粉末粒子, 形成熔池。随着激光束向前移动, 熔池迅速凝固, 并与相邻的熔池连接, 得到了鱼鳞状排列的熔池。此外, 从图4中也可以观察到典型的柱状晶结构。晶粒的生长不受熔合线的阻碍, 沿构建方向跨过多个熔池。图4b所示为316L不锈钢板试样的微观形貌, 其中可以看到典型的等轴晶粒形貌。

图5所示为放大后SLM打印试样的微观组织形貌。从图5黄色虚线范围内可以看出晶粒内部有大量精细的细胞状亚晶结构。这些细胞状亚晶结构几乎是等轴的, 类似于蜂窝状形状。细胞状亚晶结构的形状具体取决于与之相邻的亚结构数量, 如果一个细胞状亚晶结构被其他6个细胞状亚晶结构包围, 则形状显示为六边形。从红色虚线范围内可以发现大量的纤维状亚晶结构。这些纤维状亚晶结构具有较大的长宽比, 其宽度与细胞状亚晶结构的尺寸相当。

亚晶结构的形成与打印过程中受约束的介质因由316L不锈钢粉末熔化引起的热膨胀和凝固导致的热收缩而发生的变形密切相关。在SLM打印的过程



a) SLM打印316L不锈钢试样的微观组织形貌



b) 316L不锈钢板试样的微观组织形貌

图4 SLM打印与316L不锈钢板试样的微观组织形貌

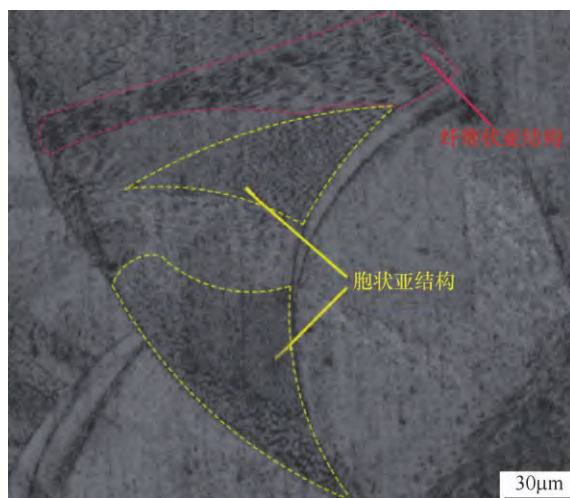


图5 放大后SLM打印试样的微观组织形貌

中, 激光束熔化局部粉末粒子并形成熔池, 随着激光束向前移动, 熔池迅速凝固。随着打印层数的不断增加, 热膨胀/热收缩的循环次数增加, 热膨胀/热收缩引起的局部变形的次数也随之增加, 最终导致试样内部产生大量的残余应力。此外, 与传统加工工艺过程中较慢的加热/冷却速率相比, SLM打印工艺的加热/冷却的速率更快。较快的加热/冷却速率进一步产生了大量的残余应力。由SLM打印过程中所产生应力的其中一部分可以被转化为促进位错增值和位错滑移的驱动力。随着应力的不断增加,

刃位错也不断增加,位错之间出现了相互传递的现象,形成了位错之间相互约束,导致了位错墙和位错缠结的形成。随着位错在此过程中继续缠绕与合并,位错墙数量逐渐增加,并且表面相互连接形成位错胞。这些在晶粒内部的位错胞会逐渐演化为亚晶界。亚晶界处的位错经历重新排列,最终形成了亚晶结构^[12]。

亚晶结构的大小与形状和两个凝固参数相关:温度梯度 G 和晶粒生长速率 R , G 与 R 的值取决于所采用的打印工艺参数以及组件的几何形状。在SLM打印316L不锈钢的过程中,相对较高的 G/R 值促进了细胞状亚晶的形成,随着 G/R 值的逐渐降低,亚晶结构由细胞状逐渐向纤维状亚晶转变。 $G \cdot R$ 值

(冷却速率)决定亚晶的大小, $G \cdot R$ 值越大,所获得的亚晶结构越精细^[13-15]。

3.2 EBSD分析

316L不锈钢板和SLM打印316L不锈钢试样的定向成像显微分析图、极图和晶粒尺寸如图6所示。从二者的定向成像分析图以及晶粒尺寸统计图中可以清晰的发现,不锈钢板试样的微观组织由大量的等轴晶和部分孪晶组成,而SLM打印的316L试样由大量的柱状晶和少量的等轴晶组成。316L不锈钢板试样的平均晶粒尺寸为 $9.29\mu\text{m}$,而SLM打印试样的平均晶粒直径为 $17.56\mu\text{m}$,SLM打印所得的316L不锈钢试样的晶粒尺寸要明显大于不锈钢板试样的晶粒尺寸。SLM打印试样内部粗大的柱状晶是冷却凝固

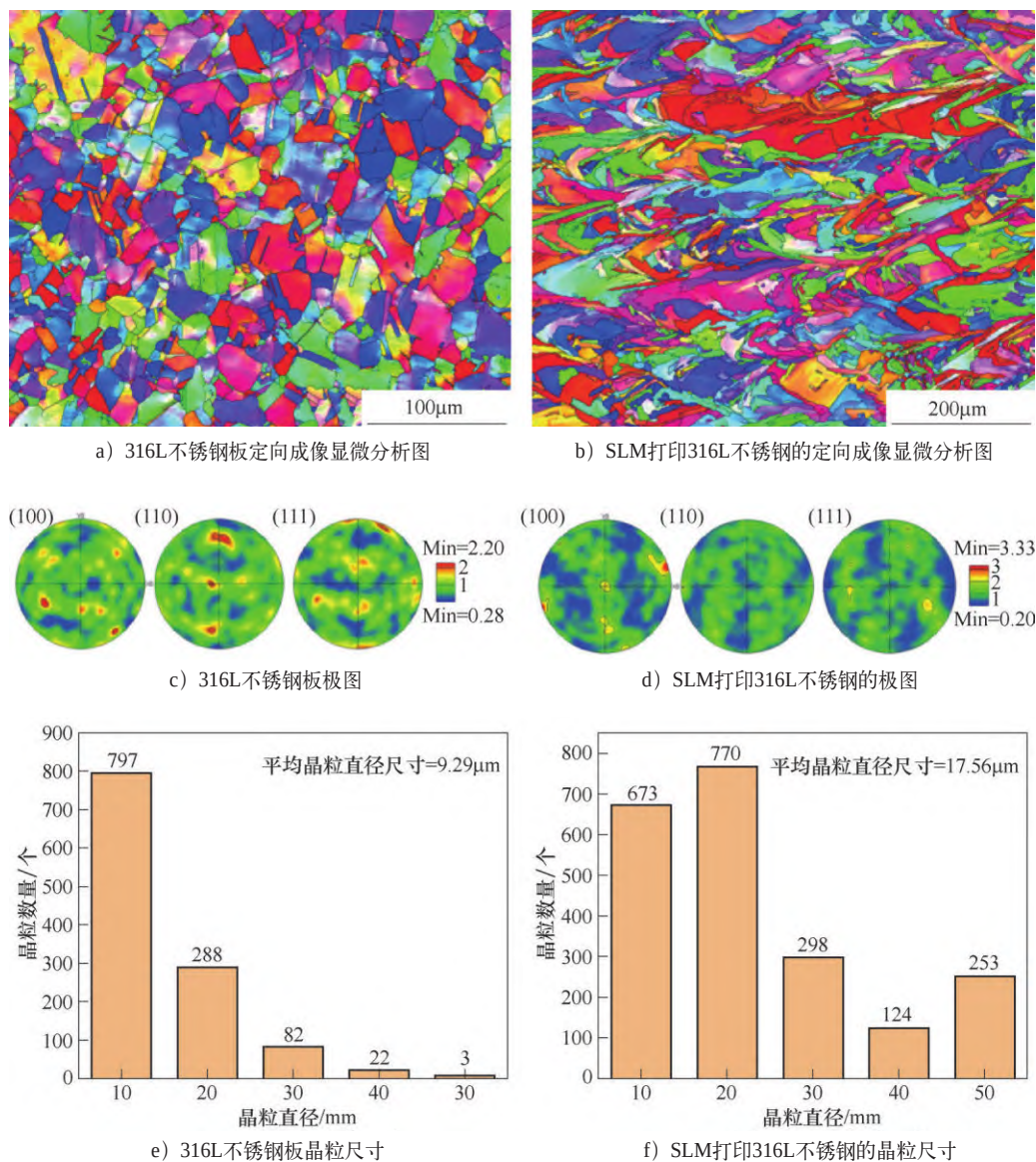


图6 316L不锈钢板和SLM打印316L不锈钢板试样的定向成像显微分析图、极图以及晶粒尺寸分布图

时构建方向存在较大的热梯度造成的。在SLM打印的过程中,主要的熔池热梯度从中心线向熔池边缘呈径向分布,陡峭的熔池热梯度抑制了成核现象的形成,从而导致了粗大的柱状晶的形成^[16]。

图6c、d为316L不锈钢板和SLM打印试样的极图。从图6中可看出,二者的最大织构强度是有差异的。不锈钢板试样中的最大织构强度为2.30,低于SLM打印试样的3.33。由于SLM打印过程中,熔池冷却凝固时构建方向的热梯度较大,熔体中温度分布不均匀,晶粒在生长过程中受到不同的热影响,晶粒沿热梯度方向生长,从而导致了SLM打印试样的织构强度高于不锈钢板试样的织构强度。

图7a、b为不锈钢板和SLM打印316L试样的晶界图。图7a、b中的绿色线条表示为小角度晶界(LAGBs),晶界取向差角为 $2^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。粗黑线为大角度晶界(HAGBs),晶界取向角 $\geq 15^{\circ}$ 。从图7中可看出,SLM试样的大角度晶界占比为

36.3%,小角度晶界为63.7%,SLM打印试样内部的晶界多为大角度晶界。与之相反,不锈钢板试样的大角度晶界为13.9%,小角度晶界占比为86.1%,试样内部有大量的小角度晶界聚集。

3.3 拉伸性能

图8所示为不同工艺下拉伸试样的极限抗拉强度、屈服强度和伸长率。从图8中可以清晰地看出,在极限抗拉强度方面,不锈钢板拉伸试样为 (633 ± 12) MPa,而SLM打印316L不锈钢试样为 (695 ± 20) MPa,SLM打印试样的极限抗拉强度比不锈钢板试样的极限抗拉强度提高了9.79%。不锈钢板拉伸试样的屈服强度为 (403 ± 15) MPa,低于SLM打印316L不锈钢试样的 (550 ± 11) MPa,经SLM打印所得的316L不锈钢拉伸试样的屈服强度比不锈钢板试样提升了36.48%。在伸长率方面,不锈钢板拉伸试样的伸长率为 $(39 \pm 1)\%$,SLM打印316L不锈钢试样为 $(48 \pm 0.8)\%$,SLM打印试样的

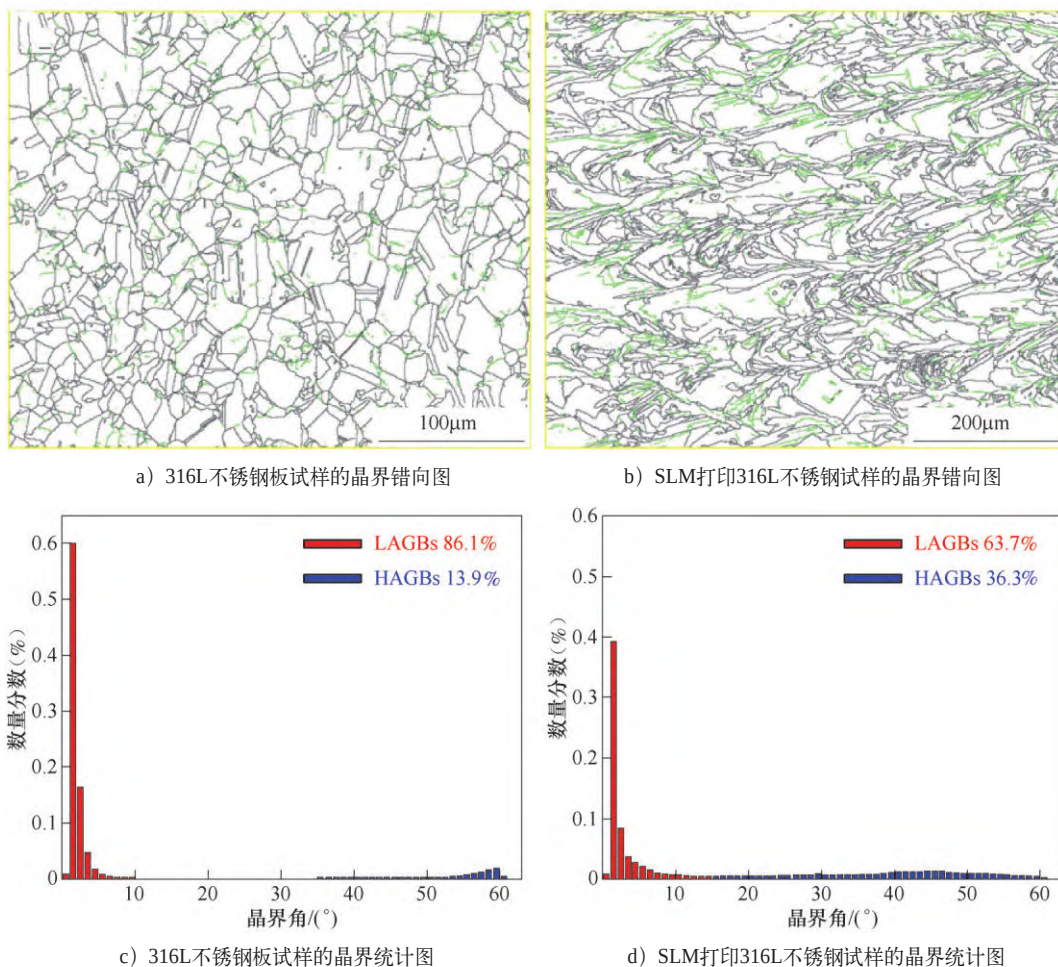


图7 316L不锈钢板和SLM打印316L不锈钢板试样的EBSD晶界错向图与晶界统计图

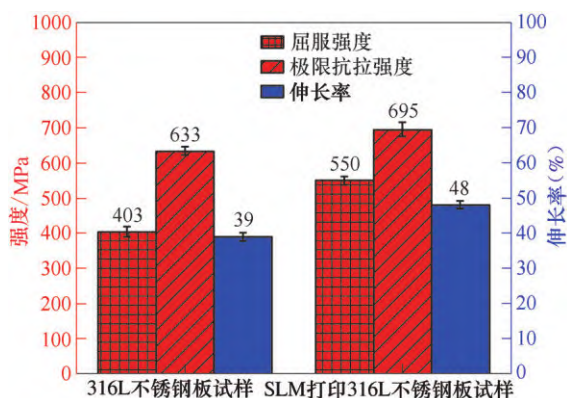


图8 室温下316L不锈钢板试样和SLM打印316L不锈钢试样的拉伸性能

伸长率要优于不锈钢板试样，性能提高了23.08%。

在450℃高温下316L不锈钢板与SLM打印316L不锈钢试样的拉伸性能如图9所示。从图9中可以清晰地看出，在高温条件下，SLM打印拉伸试样的屈服强度和极限抗拉强度分别为 (373 ± 13) MPa和 (444 ± 15) MPa，仍然高于316L不锈钢板拉伸试样 (304 ± 11) MPa和 (410 ± 21) MPa，二者分别提高了22.70%和8.29%。SLM打印拉伸试样的伸长率为 (35 ± 1.1) %，高于316L不锈钢板拉伸试样的伸长率 (29.5 ± 1.7) %。在伸长率方面，SLM打印试样比316L不锈钢板试样提高了18.64%。

根据Hall-Petch公式^[17]：

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

式中 σ_0 ——单个晶体的屈服强度，为常数；

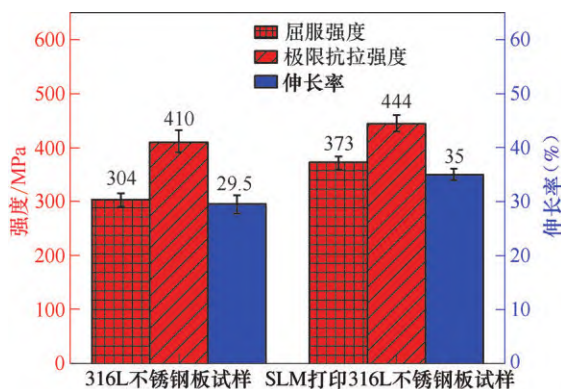


图9 450℃高温下316L不锈钢板试样和SLM打印316L不锈钢试样的拉伸性能

k ——Hall-Petch常数；

d ——平均晶粒尺寸（ μm ）。

从式中可以看出，拉伸试样的屈服强度与其内部晶粒尺寸密切相关，晶粒尺寸越小，其屈服强

度越大^[18, 19]。在本次试验中，虽然通过SLM打印的316L不锈钢试样内部晶粒的尺寸比316L不锈钢板内部的晶粒大，但是SLM打印过程中，晶粒内部会产生亚晶结构，其亚晶结构的尺寸要远远小于不锈钢板试样的晶粒尺寸。亚晶结构的出现伴随着亚晶界的增多，位错运动所需要的应力增加，位错在亚晶界处堆积，对位错运动的阻碍增加。因此SLM打印316L不锈钢拉伸试样的屈服强度要高于316L不锈钢板拉伸试样的屈服强度^[20, 21]。

此外，大角度晶界占比的增加有利于提高试样的拉伸性能。在拉伸试样断裂的过程中，大角度晶界通过扭曲和改变裂纹扩展路径，阻止裂纹的进一步扩展。与其相对应，小角度晶界对裂纹变形并没有起到明显改善的作用。因此，大角度晶界越多，断裂过程中需要消耗的能量越多，从而试样的屈服强度和极限抗拉强度越高。在拉伸试验中，由于SLM打印试样大角度晶界占比更大，因此其塑性变形能力和极限抗拉强度相应也得到了提高。

3.4 硬度性能

316L不锈钢板试样和SLM打印316L不锈钢试样的硬度性能如图10所示。从图10中可以清晰地看出，316L不锈钢板的硬度为 (198 ± 7) HV。与316L不锈钢板相比，SLM打印316L不锈钢试样的硬度性能为 (228 ± 10) HV，提高了15.2%。

SLM打印316L不锈钢试样硬度的提高与其试样内部位错相关。与传统的加工制造工艺相比，SLM打印过程中频繁的加热熔化/冷却凝固过程以及较快的加热/冷却速率，导致其试样结构内部产生了

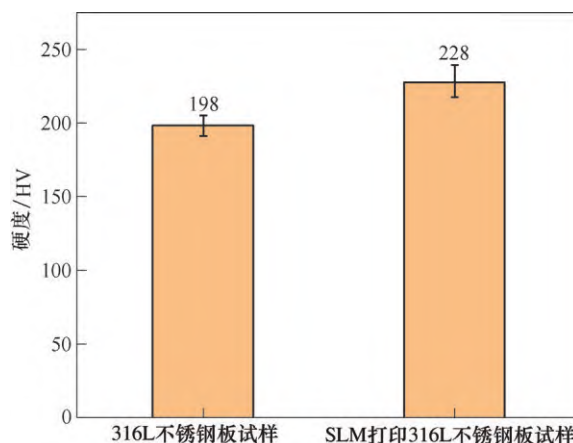


图10 316L不锈钢板试样和SLM打印316L不锈钢试样的硬度测试结果

大量的残余应力, 这些应力促进了材料内部位错的产生。此外, SLM打印316L不锈钢试样内部会产生大量的亚晶结构, 这些亚晶结构通常表现为高密度位错缠结的形成。这些位错缠结也积累了大量的应力, 从而为SLM提供了额外的硬度。

4 结束语

通过观察连铸连轧316L不锈钢板(固溶+水冷交货)和SLM打印316L不锈钢试样表面微观结构, 探究两种工艺对其力学性能的影响, 得到如下结果。

1) 通过光学显微镜可以看出, 316L不锈钢板试样晶粒为等轴晶, 且几乎没有空隙; 而SLM打印316L不锈钢试样可以观察到鱼鳞状熔池形貌, 且晶粒为粗大的柱状晶, 切换成高倍光镜后, 可以看到大量的细胞状和纤维状的亚晶结构。

2) 通过EBSD分析, 可以发现不锈钢板试样的晶粒尺寸小于SLM打印316L不锈钢试样的晶粒尺寸; 不锈钢板试样的织构强度小于SLM打印316L不锈钢的织构强度; 在晶界角度方面, 不锈钢板试样内部小角度晶界占比更大, 而SLM打印316L不锈钢试样的大角度晶界占比更大。

3) 在室温拉伸性能方面, SLM打印316L不锈钢试样的屈服强度和极限抗拉强度分别为 (550 ± 11) MPa和 (695 ± 20) MPa, 优于不锈钢板试样的屈服强度 (403 ± 15) MPa和极限抗拉强度 (633 ± 12) MPa。在伸长率方面, SLM打印316L不锈钢试样的伸长率为47.2%~48.8%, 高于不锈钢板试样的伸长率(38%~39%)。

4) 在450℃高温下, SLM打印试样的屈服强度和极限抗拉强度分别为 (373 ± 13) MPa和 (444 ± 15) MPa, 高于不锈钢板试样的屈服强度 (304 ± 11) MPa和极限抗拉强度 (410 ± 21) MPa。在伸长率方面, SLM打印试样的伸长率为33.9%~36.1%, 高于不锈钢板试样的伸长率(27.8%~31.2%)。

5) 在硬度方面, SLM打印试样的硬度为 (228 ± 10) HV, 高于不锈钢板试样的硬度 (228 ± 10) HV。相较于不锈钢板, SLM打印316L不锈钢试样的硬度提高了15.2%。

参考文献:

[1] 董小书, 章桥新. 选区激光熔化成形316L孔隙的产

生与降低[J]. 热加工工艺, 2023, 52(12): 105-113.

[2] 裴智奥, 张宁, 陶俊杰, 等. 激光选区熔化制备316L不锈钢力学性能研究[J]. 金属加工(热加工), 2025(2): 34-41, 48.

[3] TANPRAYOON D, SRISAWADI S, SATO Y, et al. Microstructure and hardness response of novel 316L stainless steel composite with TiN addition fabricated by SLM[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 129: 106238.

[4] LEMARQUIS L, GIROUX P F, MASKROT H, et al. Cold-rolling effects on the microstructure properties of 316L stainless steel parts produced by laser powder bed fusion (LPBF) [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4725-4736.

[5] 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.

[6] 刘伟, 刘成松, 王勇, 等. 激光增材制造316L不锈钢力学性能的各向异性[J]. 钢铁, 2024, 59(6): 155-165.

[7] 曹永青, 程欢欢, 李智, 等. 扫描间距对选区激光熔化316L不锈钢组织及硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2024(19): 22-30.

[8] 程军, 吴巍, 胡志明, 等. 加工工艺对高强度15-5PH钢力学性能与侵蚀性能的影响[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(3): 251-260.

[9] GEENEN K, RÖTTGER A, THEISEN W. Corrosion behavior of 316L austenitic steel processed by selective laser melting, hot isostatic pressing, and casting[J]. Materials and Corrosion, 2017, 68(7): 764-775.

[10] R A M A R M, L A K S H M A N A N M, KANAGASABAPATHY H, et al. Mechanical and tribological properties of SS316L with comparison of SLM and casting methods[J]. Materials Today: Proceedings, 2023(3): 333.

[11] WOELK D, KAZAMER N, M RGINEAN G. Comparative studies on the microstructure and corrosion behaviour of forged and SLM processed 316L stainless steel[J]. Advanced Technologies & Materials, 2021, 46(1): 1-6.

[12] EFE Y, KARADEMIR I, HUSEM F, et al.

- Enhancement in microstructural and mechanical performance of AA7075 aluminum alloy via severe shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 528: 146922.
- [13] KURZYNOWSKI T, GRUBER K, STOPYRA W, et al. Correlation between process parameters, microstructure and properties of 316 L stainless steel processed by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 718: 64-73.
- [14] LEICHT A, RASHIDI M, KLEMENT U, et al. Effect of process parameters on the microstructure, tensile strength and productivity of 316L parts produced by laser powder bed fusion[J]. *Materials Characterization*, 2020, 159: 110016.
- [15] DIXIT S, LIU S, MURDOCH H A, et al. Investigating build orientation-induced mechanical anisotropy in additive manufacturing 316L stainless steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 880: 145308.
- [16] YUAN B, GE J, CHEN H, et al. Printability and microstructure of Fe doped NiTi shape memory alloy fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Materials Letters*, 2022, 328: 133099.
- [17] 胡磊, 张莉芹, 胡锋, 等. 多尺度截面组织对调质海工钢强韧性的影响[J]. *钢铁*, 2023, 58 (2): 154.
- [18] CABRERA-CORREA L, GONZÁLEZ-ROVIRA L, DE DIOS LÓPEZ-CASTRO J, et al. Effect of the heat treatment on the mechanical properties and microstructure of Scalmalloy® manufactured by Selective Laser Melting (SLM) under certified conditions[J]. *Materials Characterization*, 2023, 196: 112549.
- [19] YAN F, XIONG W, FAIERSON E, et al. Characterization of nano-scale oxides in austenitic stainless steel processed by powder bed fusion[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 155: 104-111.
- [20] LI Y, MA C, QIN F, et al. The microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel prepared by forge and laser melting deposition[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 870: 144820.
- [21] WANG H, JIANG P, YANG G, et al. An investigation of the anisotropic mechanical properties of additive-manufactured 316L SS with SLM[J]. *Materials*, 2024, 17 (9): 17092017.
- (上接第141页)
- differentiation of human osteoblasts[J]. *PLoS One*, 2015, 10 (1): e0113426.
- [59] 朱颖. TiO₂纳米管表面细胞外基质的构建及其生物相容性的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [60] TAN J, LI J, CAO B, et al. Niobium promotes fracture healing in rats by regulating the PI3K-Akt signalling pathway: An in vivo and in vitro study[J]. *Journal of Orthopaedic Translation*, 2022, 37: 113-125.
- [61] ALAM K, JEONG G, JANG W, et al. Enhanced mechanical properties and in vitro biocompatibility of TiMoVWCr high-entropy alloy synthesized by magnetron sputtering[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 639: 158222.
- [62] YU B, JUMA T, WANG H, et al. Development of new Ti₅₀Zr₂₅Nb₂₀Cu_{5-x}Ag_x high-entropy alloys with excellent antibacterial property, osteo-conductivity and biocompatibility in vitro and in vivo[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 141: 209-220.
- [63] YANG W, LIU Y, PANG S, et al. Bio-corrosion behavior and in vitro biocompatibility of equimolar TiZrHfNbTa high-entropy alloy[J]. *Intermetallics*, 2020, 124: 106845.
- [64] WANG H, LIU P, CHEN X, et al. Mechanical properties and corrosion resistance characterization of a novel Co₃₆Fe₃₆Cr₁₈Ni₁₀ high-entropy alloy for bioimplants compared to 316L alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 906: 163947.
- [65] KUMAR P, PATEL M, JAIN N K, et al. Bio-tribological characteristics of 3D-printed Ti-Ta-Nb-Mo-Zr high entropy alloy in human body emulating biofluids for implant applications[J]. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 2023, 9 (1): 21.

MW 20250225

MW 20250129