激光选区熔化制备316L不锈钢力学性能研究

裴智奥[1,2]，张宁[2]，陶俊杰[1,2]，葛进国[3]

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：为了探究选区激光熔化制备316L不锈钢的力学性能，通过SLM、热轧及热轧后固溶处理制造出3种316L不锈钢试样，观察试样微观组织并采用拉伸、3点弯曲和冲击试验对其力学性能进行研究和对比分析。结果表明：SLM样品的抗拉强度和弯曲强度与传统成形的同质材料相比优势明显，但塑性和韧性较差。一方面由于SLM成形过程中快速熔化和快速冷却导致晶粒十分细小且排布致密，以及熔合界面处的变形阻力，因此导致材料的强度显著提高；另一方面认为是成形过程中形成了非平衡的微观组织结构，样品内部不同部位收缩及膨胀变形趋势不一致，内部残余应力不可避免，导致塑性偏低，伸长率下降。因热加工硬化的影响及升温使晶粒发生回复、再结晶和长大，使内应力减小，导致热轧态力学性能略高于固溶态。拉伸及冲击试验断口形貌显示，SLM样品呈现出脆性断裂特征，而热轧态和固溶态两者均表现出明显的韧性断裂特征且固溶态韧窝相对较少但尺寸较大，具有更好的塑性。

关键词：316L不锈钢；选区激光熔化；力学性能；固溶处理

Study on mechanical properties of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting

PEI Zhiao[1,2], ZHANG Ning[2], TAO Junjie[1,2], GE Jinguo[3]

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: In order to investigate the mechanical properties of 316L stainless steel prepared by selective laser melting, this study fabricated three types of 316L stainless steel samples through SLM, hot rolling, and solution treatment after hot rolling. The microstructure of the samples was observed, and their mechanical properties were studied and compared using tensile, three-point bending, and impact tests. The results showed that the tensile strength and bending strength of SLM samples were significantly superior to those of homogeneous materials formed by traditional methods, but their plasticity and toughness were poor. On the one hand, due to the rapid melting and cooling during SLM forming, the grains were very small and densely arranged, as well as the deformation

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：裴智奥，硕士研究生，主要从事增材制造方向合金材料的研究，E-mail：pza286056997@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。

resistance at the fusion interface, resulting in a significant increase in the strength of the material. On the other hand, it is believed that a non-equilibrium microstructure is formed during the forming process, and the shrinkage and expansion deformation trends of different parts inside the sample are inconsistent. Residual stresses inside are inevitable, resulting in low plasticity and decreased elongation. Due to the influence of hot work hardening and the recovery, recrystallization, and growth of grains caused by heating, the internal stress is reduced, resulting in slightly higher mechanical properties in the hot-rolled state than in the solid solution state. The fracture morphology of the tensile and impact tests shows that the SLM sample exhibits brittle fracture characteristics, while both the hot-rolled and solid solution states show obvious ductile fracture characteristics, and the solid solution state has relatively fewer toughness dimples but larger size, with better plasticity.

Keywords: 316L stainless steel; selective laser melting; mechanical property; solid solution treatment

1 序言

316L不锈钢因其良好的力学性能、优异的耐蚀性和生物兼容性，在航空航天、船舶、天然气和化工等行业具有重要的应用价值[1-3]。由于传统制造工艺存在生产周期长、机械加工性差、难以生产形状复杂的金属部件、易开裂等问题，使其在工程应用领域面临严峻的挑战。直到增材制造（AM）技术的出现突破了制造瓶颈，增材制造因其独特的优势（如近净成形产品、复杂设计的灵活性、一步生产等）在医疗、汽车、航空航天及模具等行业获得广泛的应用[4-6]，一跃成为当前全球制造业的发展趋势。其中，选区激光熔化（SLM）作为新型增材制造技术的关键技术之一，不仅是对传统铸造、锻造、焊接和机械加工等制造方法的有益补充，而且是一种新的金属零件制造模式[7]。SLM技术通过直接从计算机辅助设计文件中“打印”材料和零部件，使复杂零件无需模具即可自由设计，且直接成形的金属部件具有高尺寸精度以及良好的表面质量[8, 9]。

近年来，基于SLM技术的诸多优点及316L不锈钢应用的广泛性，研究人员通过优化工艺参数和成形后热处理对SLM成形316L的显微组织和力学性能开展了相关研究。李文清等[10] 采用SLM技术成形平行和垂直两种不同激光扫描方向的316L不锈钢试样，对其显微组织、拉伸性能、冲击性能及耐腐蚀性能进行研究，发现两种试样的组织形貌差异显著，平行方向表现为细小等轴状晶体，垂直方向则形成沿熔道外延生长的柱状晶体。拉伸性能方面平行方向优于垂直方向且拉伸断口具有典型的韧性断裂特征。解妙霞等[11]通过SLM制备不同扫描速度下的316L不锈钢样品，对其组织性能和热处理温度下耐腐蚀性能进行研究，发现高扫描速度下试样抗压缩性能更强，弹性模量更高，低扫描速度下试样抗拉强度、伸长率更高。热处理试样组织为粗大柱状晶，且随着热处理温度的提升柱状晶宽度略有增大，两种热处理试样中焊道轮廓鱼鳞纹形貌仍清晰可见。姚宇荃[12]使用SLM技术制备316L不锈钢试样，研究不同热处理工艺对其显微组织、显微硬度、力学性能以及残余应力的影响。研究发现，热处理后的试样组织致密，力学性能稳定，其中显微硬度和拉伸性能各向异性差异较小。

余晨帆等[13]对SLM制备316L不锈钢的拉伸性能及断裂机制进行了研究，发现采用SLM制备的316L不锈钢具有较好的强塑性匹配，其中晶粒内部纳米尺度胞状结构有助于强度的提升且拉伸性能明显优于传统手段。周玥丞等[14]采用两种SLM生产设备制备2种厚度、5个方向的共48个316L不锈钢制样，通过拉伸试验获得其基本力学性能。结果表明，试样屈服强度和极限强度均远高于经固溶处理的316L不锈钢型钢板和钢带规范值，且均高于未退火处理的锻件水平。WANG等[15]采用SLM技术对316L不锈钢粉末进行了成形加工。利用光学显微镜对试样的微观组织进行观察，发现不同成形方向SLM制备316L不锈钢试样表面形貌不同。在垂直于激光增材制造的方向上，样品相邻熔覆道之间搭接良好，在平行于SLM方向的样品中，可以看出明显鱼鳞纹状的熔池截面以及层与层之间的熔合线，每层连接致密且相互叠加。

目前，针对SLM成形316L不锈钢力学性能的研究主要集中于拉伸性能，对其他性能研究相对较

少。因此，本文以316L不锈钢为试验材料，通过SLM、热轧以及热轧后固溶处理制造出3种不锈钢试样。通过观察试样的微观组织并采用拉伸、3点弯曲和冲击试验对其力学性能进行研究和对比分析，为验证其力学性能和拓宽其实际应用范围提供了理论参考。

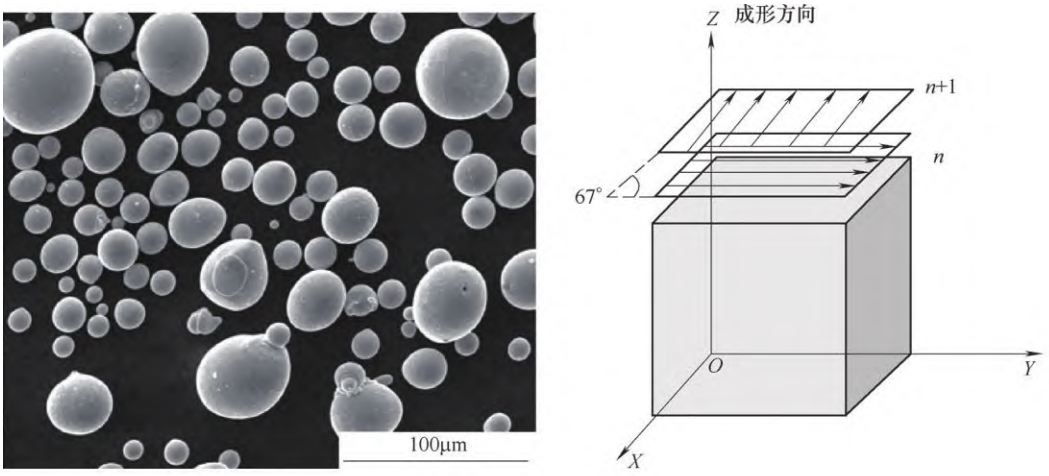
2 试验材料与方法

2.1 试验材料和样品的制备

本文所用材料为300mm×300mm×200mm的316L不锈钢热轧板材，将其在1050℃温度下进行固溶处理。SLM打印样品采用气雾化316L不锈钢粉末，在激光增材制造之前，将粉末在干燥炉中加热，以去除金属粉末表面的水分并增加粉末的流动性，避免增材制造样品内部的孔隙等缺陷。其扫描电镜（SEM）图像粉末形貌如图1a所示，316L粉末具有良好的球形度和流动性，粒度为20～50μm。SLM设备为HANS M450，在大量试验的基础上确定最佳参数。优化后的工艺参数为：激光功率200W、扫描速度500mm/s、扫描间距150μm、层厚50μm。采用如图1b所示的分块旋转扫描方式，分块宽度10mm，相邻层旋转67°。为了防止金属粉末在SLM成形过程中发生氧化反应，在整个成形腔内通入含量为99.99%的高纯氩气进行保护，打印完成后用电火花线切割（EDM）将样品从基板上切除。按照标准试样要求将3种样品线切割成图2所示的试样。

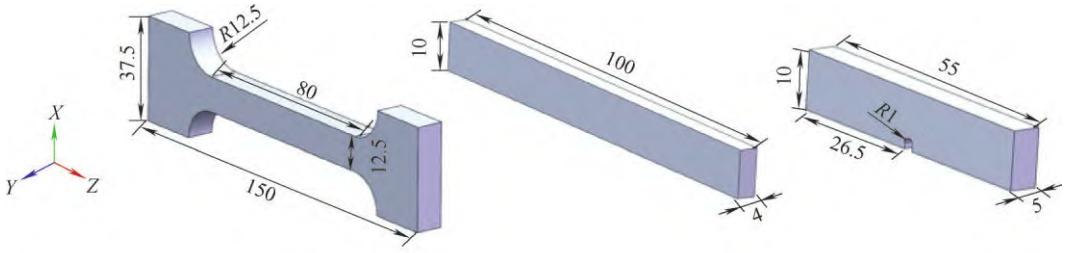
2.2 试验方法

采用美特斯微机控制电子万能试验机CMT5105（量程：100kN）在常温下以2mm/min的拉伸速度对图2a试样进行拉伸试验，试样进行3组两份的测试，取其平均值以确保准确性。3点弯曲试验采用的设备与拉伸试验一致，将夹具替换成两个支滚和一个弯曲压头，按照GB/T 232—2024《金属材料 弯曲试验方法》，加载速率为0.5mm/min进行弯曲测试，并用数码相机记录样品弯曲变形过程。冲击试验采用图2c所示的夏比U型缺口试样，根据GB/T 229－2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》在



a）粉末形貌　　b）SLM扫描策略

图1 316L不锈钢粉末形貌及SLM扫描策略示意



a）拉伸试样　　b）3点弯曲试样　　c）冲击试样

图2 不同试验的试样形状

JBNS-300冲击试验机上进行常温冲击试验。试样经研磨、抛光后，采用王水（HCl：HNO_3= 3：1）腐蚀6~10s，获得金相试样。利用光学显微镜观察试样的微观组织，采用美国FEI Inspect S50型扫描电子显微镜观察试样的断口形貌。

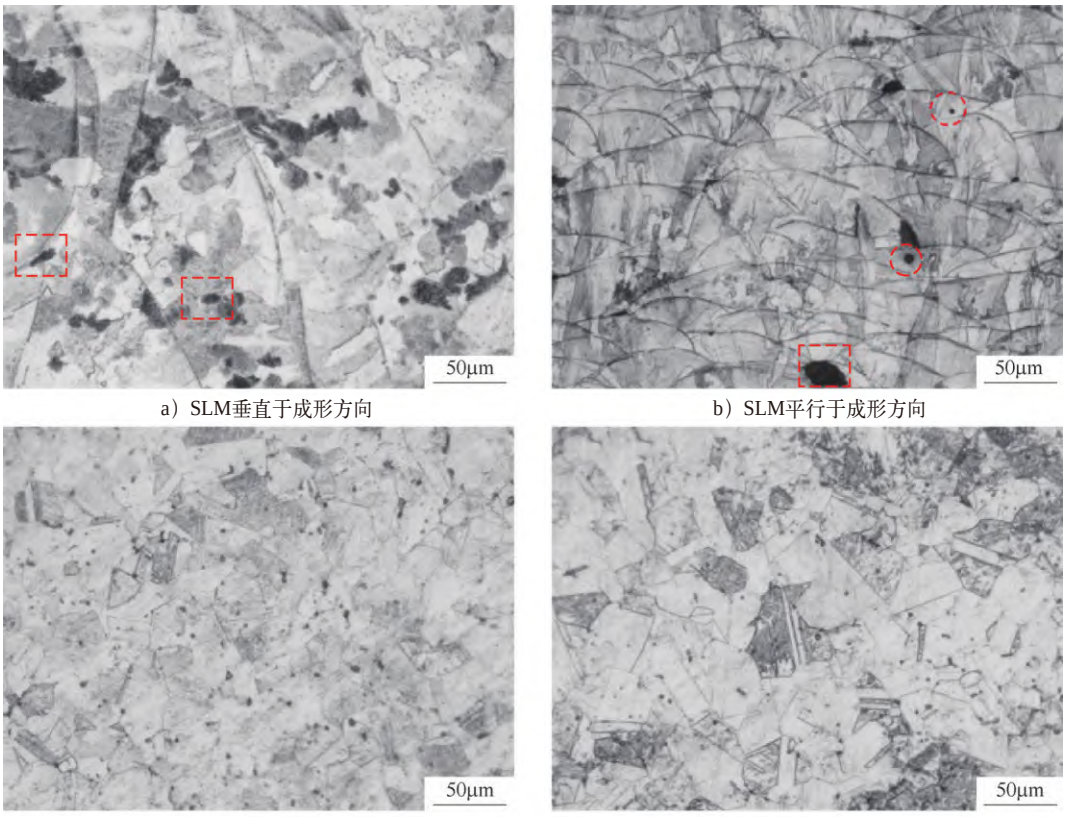
3 结果与分析

3.1 微观组织

图3所示为316L不锈钢金相显微组织。其中，图3a显示了SLM垂直于增材制造方向样品的微观结构，可以看到激光扫描粉末形成的痕迹。图3b显示了SLM平行于增材制造方向样品的微观结构，可以明显看出鱼鳞纹状的熔池截面及层与层之间的熔合线，每层连接致密且相互叠加，可能是由于金属粉末被激光光斑熔化形成微熔池，逐层凝固并相互堆叠而成。此外，在微熔池底部，温度梯度较高，形核晶粒沿着垂直于温度梯度的方向生长，形成一系列长柱状晶体，这些晶体穿过多个粉末层生长。与此同时，图3a、b中均存在一些缺陷，例如孔隙（红色圆圈）和未熔合孔隙（红色框），并且在熔化通道接触处出现间隙。这是由于成形过程中部分粉末未完全熔化，因此导致微熔池中金属液流动性变差而形成的。相比之下，热轧态显示出不同的显微组织。如图3c所示，可见较多等轴状奥氏体组织，组织均匀细小，含有大量孪晶，平均晶粒尺寸约27μm。固溶处理后大部分区域晶粒明显粗化且尺寸更加均匀，原始细晶区大幅度缩小，同时孪晶的数量和尺寸也随之增加（见图3d），可能是由于SLM制备过程中的快速熔化和快速冷却会导致熔池内部晶粒细小，而热处理会促进细晶发生重结晶和迁移，进而形成粗大晶粒[16, 17]。

3.2 拉伸性能及断口分析

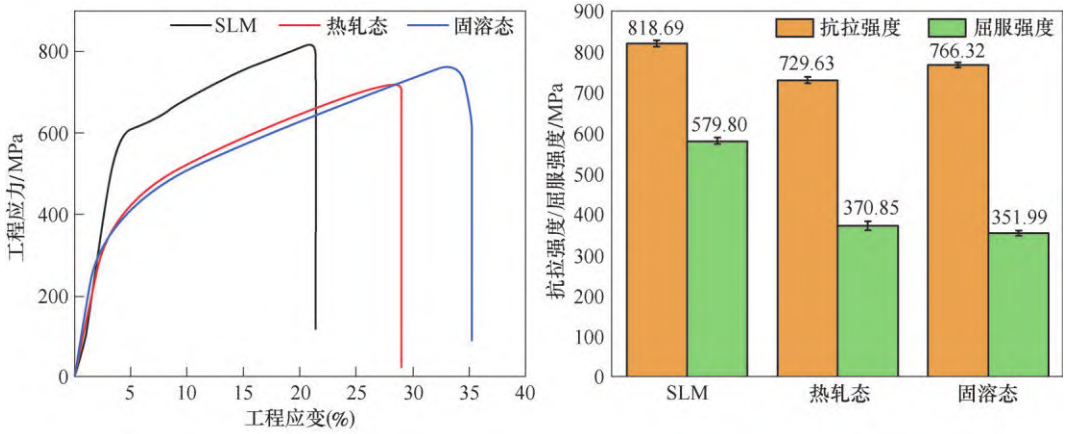
图4所示为316L不锈钢样品室温拉伸工程应力-应变曲线以及拉伸试验数据变化柱状图，相应的极限抗拉强度（*UTS*）、屈服强度（*YS*）和伸长率见表1。试验结果表明，SLM样品表现出最高的屈服强度（579.80MPa）和抗拉强度（818.69MPa），与传统成形方法相比强度明显提高，而热轧态与固溶态拉伸性能相对持平。其中，屈服强度的差异可能归功于样品的初始微观结构，由于SLM成形过程



a）SLM垂直于成形方向　b）SLM平行于成形方向

c）热轧态　d）固溶态

图3 316L不锈钢金相显微组织



a）工程应力-应变曲线　　b）屈服强度和极限抗拉强度变化柱状图

图4　316L不锈钢室温拉伸试验

表1　316L不锈钢室温拉伸性能试验数据

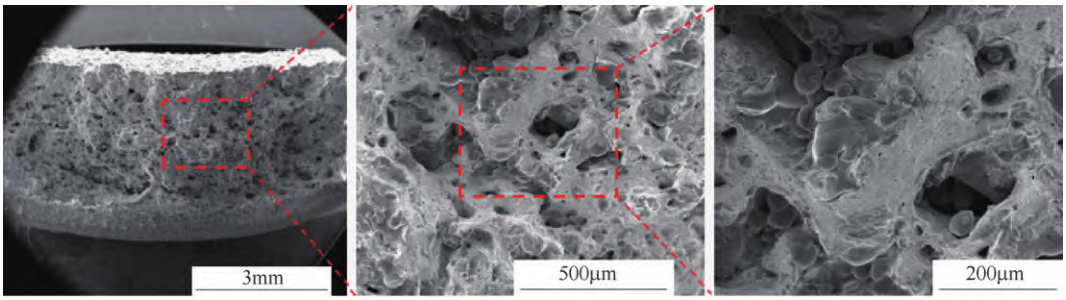
样品类型	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率（%）
SLM	579.80±5.39	818.69±5.97	21.31±1.12
热轧态	370.85±10.59	729.63±6.27	30.24±3.26
固溶态	351.99±5.72	766.32±3.35	35.34±2.24

中快速熔化和快速冷却导致晶粒十分细小且排布致密以及大量道道搭接、层层叠加熔合界面处的变形阻力，使得材料抗拉强度提高[18]。对于轧制态316L不锈钢，一方面受到热加工硬化的影响，组织产生的碳化物或σ相分解固溶到奥氏体中[19]；另一方面由于固溶处理时温度的升高使晶粒发生回复、再结晶，以及晶粒长大使得内应力减小、屈服强度降低，因此，屈服强度表现为热轧态略高于固溶态。值得注意的是，样品的断后伸长率显示出不同的趋势，固溶态表现出最高的断后伸长率（35.34%），其次是热轧态（30.24%），而SLM样品最差，仅达到21.31%。分析认为是SLM成形过程中形成了非平衡的微观组织结构，样品内部不同部位收缩及膨胀变形趋势不一致，内部残余应力不可避免，进而导致塑性偏低、伸长率下降。另外，通过测量应力-应变曲线下的面积粗略估计韧性[20]。可以看出，相对于其他两种样品，SLM样品显示出较差的韧性。

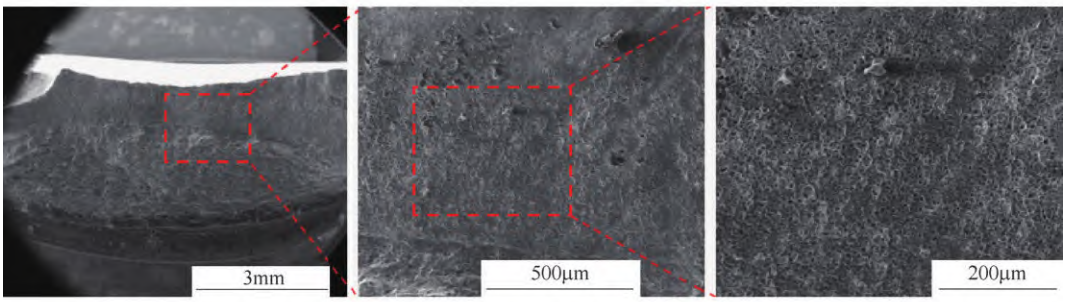
观察上述拉伸试样在拉伸过程中的变形特征和断口形貌，如图5所示，所有拉伸试样基本都在1/3处均匀变形，且断口都垂直于拉伸轴方向。值得注意的是，SLM样品断口处明显可见多处大小不一的空隙，断口为解理平面，表现出脆性特征，导致试样快速断裂的原因可能是应力优先在孔隙处累积。而固溶态和热轧态样品材质较为致密，宏观上显示出颈缩现象，断口处呈现相对平坦的断口刻面且存在大量韧窝，均表现出明显的韧性断裂特征。不同的是，热轧态试样断口处韧窝密集不均匀且尺寸较小，而固溶态韧窝相对较少但尺寸偏大。由于韧窝尺寸越大（平均直径越大深度越深），材料塑性就越好[21]，并且固溶处理后因温度的升高，奥氏体含量增大，碳化物有效溶解，伸长率增大，使材料组织表现出更好的塑性。因此，固溶态相比于热轧态塑性更优，这与拉伸试样的断后伸长率得出的结果相符合。

3.3 弯曲性能分析

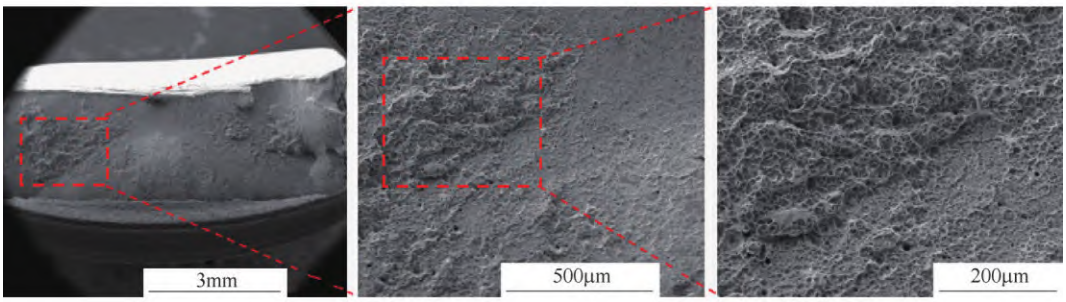
为研究316L不锈钢样品的弯曲性能，对其进行3点弯曲试验测试。宏观结果显示，试样表面光滑平整，未出现断裂现象，且没有明显的裂纹产生。图6所示为不同加工制造样品的载荷-位移曲线，可以看出，所有样品均呈现弹性、屈服、失稳3个变形阶段且曲线趋势走向大致相同，值得注意的是，SLM样品曲线显著高于其他两种样品。通过式（1）、式（2）计算得到3种样品的抗弯曲性能数据（见表2），进一步分析可知，SLM样品的极限弯曲载荷（4350N）远高于热轧态和固溶态，几乎是其1.5倍，同时呈现出更高的抗弯强度（2242.97MPa），与拉伸试验结果相符合，即与传统方法制造的同质材料相比强度提高明显。而热轧态和固溶态的抗弯性能差异不显著，表现为热轧态略高于固溶态，但固溶态展现出较好的弯曲变形能力，可能是经固溶



a）SLM



b）热轧态



c）固溶态

图5　拉伸试验样品断口SEM形貌

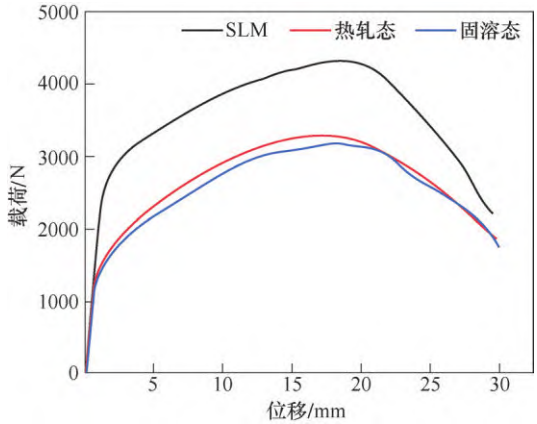


图6　316L不锈钢样品的载荷-位移曲线

处理后，因材料的回复和再结晶，使其承载能力降低[22]。

$$\sigma=M/W \tag{1}$$

式中　M——最大弯矩，3点弯曲时，$M=FL_s/4$；

W——试样抗弯截面系数，当宽度为b、高度为h的矩形试样时，$W=(bh^2)/6$。

整理可得，样品最大抗弯强度的计算式[23]为

$$\sigma_{bb}=\frac{3FL_s}{2bh^2} \tag{2}$$

式中　σ_{bb}——抗弯强度（MPa）；

F——极限弯曲载荷（N）；

L_s——跨距（mm）；

b——样品宽度（mm）；

h——样品厚度（mm）。

$L_s/(bh^2)$定义为尺寸因子。

表2　316L不锈钢样品弯曲性能比较

样品种类	长×宽×高/mm	极限弯曲载荷F/N	抗弯强度σ_{bb}/MPa	弯曲角度θ/（°）
SLM	100×10×4	4350	2242.97	140.0
热轧态	100×10×4	3270	1686.09	142.0
固溶态	100×10×4	3180	1639.69	145.0

3.4 冲击性能及断口分析

为进一步探究SLM、热轧态和固溶态样品的韧性，对其进行夏比冲击试验。宏观结果显示，SLM样品被完全冲断成两截且断口平齐，呈现出脆性断裂。而另外两种样品均出现破坏断口但未被冲断，呈现韧性断裂。冲击吸收能量反映材料的韧性好坏，在试样尺寸相同的情况下，冲击吸收能量越大，表明试样的韧性越好[24]。通过比较图7所示3种样品的冲击吸收能量和冲击韧度试验数值，可以明显看出，SLM样品的冲击吸收能量仅有22.4J，而热轧态和固溶态分别达到166.5J和183.1J，几乎是SLM样品的8倍。这可能与激光增材制造而成的试样存在层与层之间的台阶效应有关。此效应在缺口处的表现越发明显，断口的表面粗糙度提高，使得断口更加尖锐，这将导致较大的应力集中，使得试样在冲击载荷作用下更容易形成裂纹，从而降低试样冲击

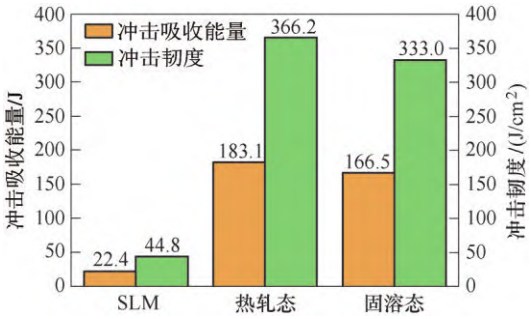


图7 316L不锈钢样品的冲击性能比较

断裂过程的冲击吸收能量[25]。

图8所示为样品的冲击断口SEM图像。由图8可看到，SLM样品断口不平整，存在数量较多、尺寸较大的光滑孔洞，表明在局部区域中发生了孔隙的聚集和生长。热轧态和固溶态样品呈现了韧性区域的韧窝细节，即断口是由细小韧窝和撕裂脊组成的，大小韧窝交替排列，说明在断裂时发生了明显

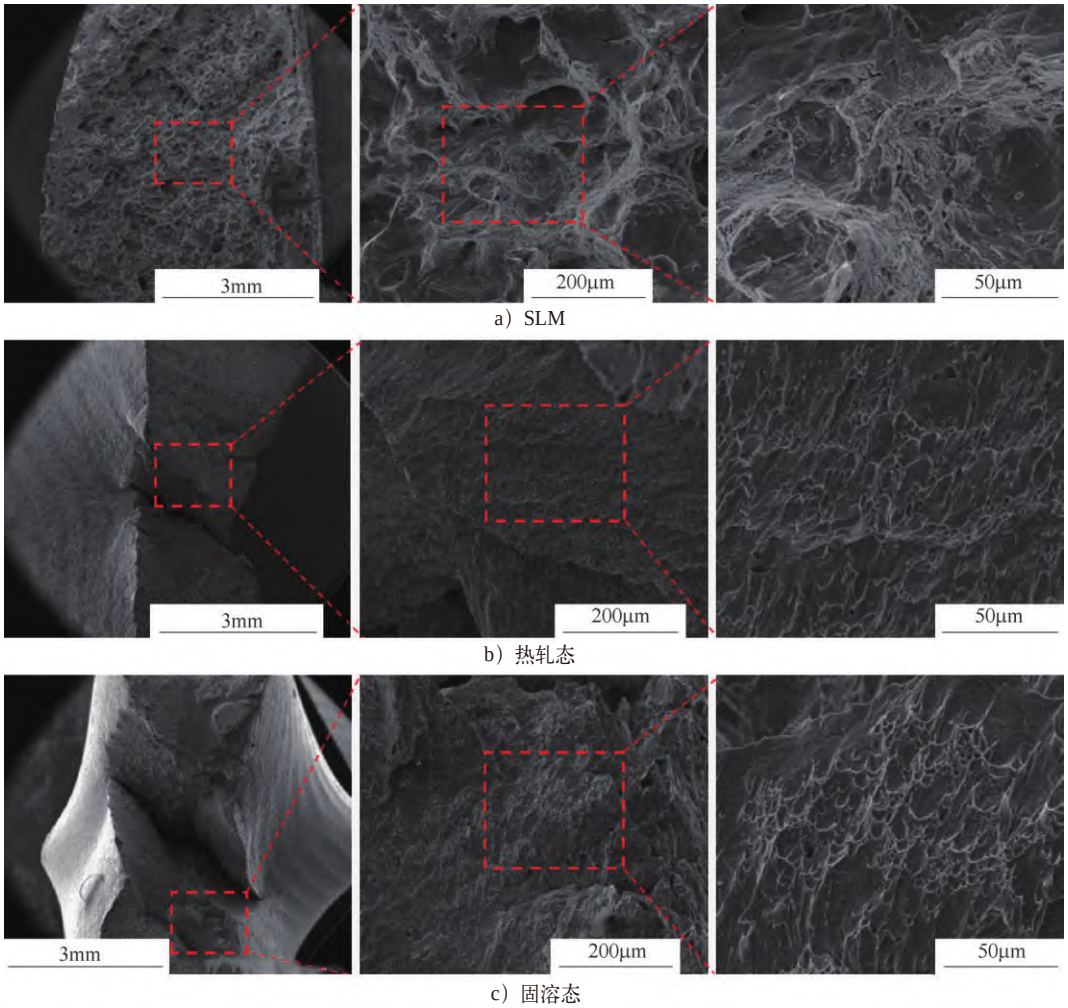


图8 冲击试验样品断口SEM图像

的塑性变形，此时引起断裂的缺陷为表面应力裂纹[26]。总的来说，SLM样品相对于其他两种样品，显现出较低的韧性，这与在上述拉伸试验中粗略讨论样品韧性结果保持一致。

4 结束语

本文通过SLM、热轧及热轧后固溶处理制造出3种不锈钢试样，观察试样微观组织，并采用拉伸、3点弯曲和冲击试验对其力学性能进行研究和对比分析，得出以下结论。

1）SLM样品的显微组织主要由鱼鳞纹状的熔池截面、层与层之间连接致密且相互叠加的熔合线，以及穿过多个粉末层生长的长柱状晶体和一些缺陷、间隙组成。而热轧态可见较多等轴状奥氏体组织，组织均匀细小，含有大量孪晶，固溶处理后大部分区域晶粒明显粗化且更加均匀，孪晶的数量和尺寸均增加。

2）SLM样品的抗拉强度和弯曲强度与传统成形方法制造的同质材料相比优势明显，热轧态与固溶态拉伸、弯曲性能相对持平。首先，固溶态表现出最高的断后伸长率（35.34%），其次，热轧态（30.24%），而SLM样品最差，仅为21.31%，表现出较差的塑性。对于冲击性能，SLM样品显现出较低的韧性，其冲击吸收能量仅有22.4J，而热轧态、固溶态分别达到166.5J和183.1J，几乎是SLM样品的8倍。

3）拉伸及冲击试验后试样的断口形貌表明，SLM样品断口不平整，存在数量较多、尺寸较大的光滑孔洞，说明在局部区域发生了孔隙的聚集和生长，呈现出脆性断裂特征。而热轧态和固溶态样品材质较为致密，断口处呈现相对平坦的断口刻面且存在大量韧窝，均表现出明显的韧性断裂特征，不同的是，热轧态试样断口处韧窝密集不均匀且尺寸较小，而固溶态韧窝相对较少但尺寸较大，具有更好的塑性。

参考文献：

[1] ADEYEMI A，AKINLABI E T，MAHAMOOD R M. Powder bed based laser additive manufacturing process of stainless steel: A review[J]. Mater. Today Proc.，2018，5：18510-18517.

[2] SABOORI A，PISCOPO G，LAI M，et al. An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by directed energy deposition[J]. Mater. Sci. Eng.：A，2020，780：139179.

[3] MAJUMDAR J D，PINKERTON A，LIU Z，et al. Mechanical and electrochemical properties of multiple-layer diode laser cladding of 316L stainless steel[J]. Appl. Surf. Sci.，2005，247：373-377.

[4] DEBROY T，WEI H L，ZUBACK J，et al. Additive manufacturing of metallic components - process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science，2018， 92：112-224.

[5] JIN W，ZHANG C，JIN S，et al. Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review[J]. Applied Sciences，2020，10（5）：1563.

[6] MACDONALD E，WICKER R. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality[J]. Science，2016， 353（6307）：aaf2093-aaf2093.

[7] 杨威，甘新基. 基于Ansys Additive对激光选择性烧结316L不锈钢工艺优化[J]. 金属加工（热加工），2024（2）：114-119.

[8] ZHAI W，ZHOU W，NAI S M L，et al. Characterization of nanoparticle mixed 316 L powder for additive manufacturing[J]. Journal of Materials Science & Technology，2020，47：162-168.

[9] 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.

[10] 李文清，郭纯，黄光灿，等. 316L不锈钢选区激光熔化成形不同方向组织与力学性能研究[J]. 黑龙江工业学院学报（综合版），2024，24（5）：149-156.

[11] 解妙霞，辛琪珂，李焱鑫，等. 选区激光熔化316L不锈钢组织性能调控研究[J]. 应用激光，2023，43（10）：10-21.

[12] 姚宇荃. 热处理温度对SLM成形316L不锈钢组织性能影响研究[J]. 机械科学与技术，2024，43（2）：249-257.

[13] 余晨帆，赵聪聪，张哲峰，等. 选区激光熔化316L不锈钢的拉伸性能[J]. 金属学报，2020，56（5）：683-692.

（下转第48页）

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 CO_2 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