

# 316L 不锈钢电弧增材制造工艺研究

朱强<sup>1</sup>, 姚屏<sup>2\*</sup>, 许斯帆<sup>1</sup>, 许可昱<sup>1</sup>

(1. 广东开放大学, 广州 510091; 2. 广东技术师范大学, 广州 510630)

**摘要:** 目的 研究电弧增材制造过程中焊接速度和层间冷却时间对成形件精度和力学性能的影响。方法 使用 316L 不锈钢焊丝在钢板上进行 20 层往复式堆积试验, 设置了不同的焊枪运行速度和层间冷却时间, 完成了 4 个金属薄壁墙体的制备, 对沉积样品的形貌外观、显微组织、硬度和拉伸性能进行了研究。结果 4 组试样的制备过程都比较稳定, 表面成形良好, 层与层结合较为平滑, 层间分明, 无裂纹、塌陷等缺陷出现。当层间冷却时间达到一定值时, 熔池凝固, 样品的成形精度和高度较为稳定。单位时间内加入熔池的金属质量和热输入均随着焊接速度的增大而减小, 不同焊接速度下沉积样品的层高和层宽不同。由于焊接速度增大、热输入减小, 试样的硬度略微增大, 拉伸性能增强。沿薄壁件的构建方向, 4 组试样的维氏硬度曲线呈波浪形, 从每个熔合层的底部到顶部逐渐降低。**结论** 增材制造工艺参数对产品的成形质量、显微组织和力学性能都有影响, 在保证成形过程稳定的前提下, 提高焊枪堆积速度能提高产品的力学性能。

**关键词:** 电弧增材制造; 316 不锈钢; 成形质量; 显微组织; 力学性能

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.11.019

中图分类号: TG444<sup>+.72</sup> 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2023)11-0164-07

## Wire and Arc Additive Manufacturing Technology of 316L Stainless Steel

ZHU Qiang<sup>1</sup>, YAO Ping<sup>2\*</sup>, XU Si-fan<sup>1</sup>, XU Ke-yu<sup>1</sup>

(1. Guangdong Open University, Guangzhou 510091, China;  
2. Guangdong Technical Normal University, Guangzhou 510630, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of welding speed and interlayer cooling time during wire and arc additive manufacturing (WAAM) on the accuracy and mechanical properties of formed parts. Here, deposition speed and cooling time between layers were examined and arc welding was used to conduct 20-layer reciprocating deposition experiments on 316L stainless steel. Four thin-walled metal walls were prepared. The morphology, microstructure, and hardness and tensile property of the deposited specimens were researched. The results showed that the preparation process of the 4 groups of specimens were relatively stable, the surface forming was good, the bonding between layers was smooth with clear stratification and without cracks, collapse and other defects. When the cooling time between layers reached a certain value, the molten pool would solidify, the forming width and height stability of the specimens were stable and the amount of molten metal per unit time added to the

收稿日期: 2023-05-16

Received: 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(51805099); 广东省普通高校科研项目(2022ZDZX3046); 广州市科技计划(202201011747); 广东大学生科技创新培育专项资金(pdjh2022b0844)

**Fund:** The National Natural Science Foundation of China (51805099); Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Guangdong Province (2022ZDZX3046); Science and Technology Projects in Guangzhou (202201011747); Special Funds for Cultivating Scientific and Technological Innovation of Guangdong College Students (pdjh2022b0844)

引文格式: 朱强, 姚屏, 许斯帆, 等. 316L 不锈钢电弧增材制造工艺研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(11): 164-170.

ZHU Qiang, YAO Ping, XU Si-fan, et al. Wire and Arc Additive Manufacturing Technology of 316L Stainless Steel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(11): 164-170.

\*通信作者 (Corresponding author)

molten pool decreased as the deposition speed increased. The layer height and layer width of deposited specimens varied at different welding speeds. The hardness and tensile properties of the specimens increased slightly due to the increase of welding speed and the decrease of heat input. The Vickers hardness value curves of four groups of specimens exhibited a wave shape, gradually decreasing from the bottom to the top of each fused layer. Additive manufacturing process parameters have an effect on the forming quality, microstructure and mechanical properties of the product. Under the premise of ensuring the stability of the forming process, increasing the welding torch stacking speed can improve the mechanical properties of the product.

**KEY WORDS:** wire and arc additive manufacturing; 316 stainless steel; forming quality; metallographic structure; mechanical property

电弧增材制造(Wire and Arc Additive Manufacture, WAAM)技术是一种以电弧为热源, 同步添加金属丝材并在程序的控制下打印出金属零件的技术<sup>[1-2]</sup>。与激光增材(Laser Additive Manufacturing, LAM)和电子束增材(Electron Beam Additive Manufacturing, EBAM)技术相比, WAAM技术具有成本低、原材料利用率高、成形效率高等优点, 更适合生产大尺寸零件<sup>[3-7]</sup>。

许多科研工作者对WAAM技术进行了深入的研究<sup>[8-11]</sup>。为了减小零件的表面粗糙度, 提高成品精度, Geng等<sup>[12]</sup>设计了机器人增材制造的切线重叠模型, 该模型通过采用严格的中心距概念实现了稳定的多层增材堆积。Li等<sup>[13]</sup>研究表明, 对于大型复杂构件, 与常规制造相比, 电弧增材制造技术的材料损耗更低和周期时间更短, 但是高精度的电弧增材制造产品需要更长的周期时间来校正尺寸误差, 而通过机器学习算法优化工艺参数、根据传感器的过程反馈调整参数、控制制造过程中的热输入是提高产品精度的发展方向。黄强等<sup>[14]</sup>建立了电弧线能量、送丝速度、基体预热温度与高熔覆层尺寸的二阶回归模型, 与传统电弧增材制造相比, 采用热源解耦策略制造的薄壁件表面更光滑平整。制造过程中的热输入对试件冷却速率和层间温度有一定影响, Xing等<sup>[15]</sup>通过控制热输入打印出了薄壁贝氏体钢墙体, 并测试了显微硬度和拉伸性能, 研究表明, 从微观上看, 墙体试件没有裂缝, 且每一层都与前一层形成了良好的结合。张天奕等<sup>[16]</sup>采用旁路耦合三丝方法进行了Q345低碳钢增材制造, 试验结果显示, 该方法的熔敷效率高、热量输入低, 同时能改善增材试样的显微组织, 提高试样的平均硬度。保护气体CO<sub>2</sub>和Ar气成分的不同会影响增材试件的微观组织和力学性能<sup>[17]</sup>。当电弧模式不同时, 增材制造过程中的稳定性、成品外貌、微观结构和力学性能也会有一定区别<sup>[18]</sup>, 通过工艺试验可以找

到适合的电弧模式。姜淑馨等<sup>[19]</sup>详细研究了层间温度变化对增材制造产品的影响, 在H13钢基板上的试验结果表明, 当每个堆积层间温度为150~200℃时, 能够得到外观形貌好、成形质量优良的成形件。为了提高成品力学性能, 超声振动、热处理等方法都被应用于电弧增材制造中<sup>[20-21]</sup>, 有些研究人员对增材成品的腐蚀性能也进行了系统测试<sup>[22]</sup>。通过电弧增材方式, 不同材料、不同类型的零部件被制造出来<sup>[23-26]</sup>, 可以看出, 这种制造方法未来有着广阔的应用空间。

316L不锈钢材料具有良好的耐高温、耐腐蚀性, 在医学、食品、化工和海洋工程等行业具有广泛的应用空间, 是制造手术器械、压力容器和其他复杂形状构件的理想材料。316L不锈钢电弧增材制造的成形外貌和微观组织受多种制造工艺参数的影响, 为了进一步探索制造过程中工艺参数对成品外观、微观组织和力学性能的影响, 采用316不锈钢丝材设计4组20层往复式薄壁墙体堆积试验, 通过对堆积速度和层间冷却时间差异对沉积样的影响, 为工艺参数的优化提供思路。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验基板采用尺寸为250 mm×100 mm×5 mm的316L不锈钢板, 焊丝选用直径为1.2 mm的316L不锈钢焊丝, 其化学成分如表1所示。

### 1.2 方法

试验平台采用GMAW机器人电弧增材制造系统, 该系统由LORCH公司的S5-RoboMIG焊机、RF-06送丝机及FANUC M-10iA机器人组成。在增材制造过程中, 由于堆积件的热量不断增多, 导致母材容易变形, 需要利用夹具固定基板两端, 以防

表1 ER316L焊丝的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of ER316L welding wire

C	Si	Ni	Cr	Mn	P	Mo	S	Cu	Fe	wt.%
≤0.03	0.30-0.65	11.0-14.00	18.0-20.00	1.00-2.50	≤0.03	2.00-3.00	≤0.03	≤0.75	Bal.	

止基板变形对后续生产过程产生影响。采用不同堆积速度和层间冷却时间设计了4组不同的试验,制备长度为160 mm、层数为20的沉积样,工艺参数如表2所示。

表2 增材成形工艺参数  
Tab.2 Additive forming process parameters

Experiment number	Deposite speed/(cm·min <sup>-1</sup> )	Cooling time between layers/s
1 <sup>#</sup>	30	30
2 <sup>#</sup>	30	40
3 <sup>#</sup>	40	30
4 <sup>#</sup>	40	40

试验采用往复堆积的形式进行,第一层堆积导电嘴与基板的距离为15 mm,在堆积过程中焊枪始终与钢板保持垂直,每堆积完一层,焊枪往上提升2 mm,直至20层堆积结束为止。焊接电源的参数设置如下:焊接电流为80 A,焊接电压为20 V,占空比为50%,电流差为50%,低频频率为1.5 Hz。保护气成分为Ar+CO<sub>2</sub>(体积分数分别为98%和2%),气体流量为20 L/min。

待20层薄壁墙体堆积完成后,用研磨机清除掉表面的氧化物,使用线切割机在墙体两侧水平方向的对称位置提取拉伸件试样,并在中间取样观察金相结构和硬度。取样位置如图1所示,提取拉伸试样后用水冷方式将试样研磨至2 mm厚度,其尺寸如图2所示。

对金相样品进行电解抛光。电解质由冰醋酸和高氯酸按10:1的体积比例构成,电解池中的电压为22 V,电流密度为0.1 A/cm<sup>2</sup>,温度保持在20 ℃,样品抛光时间为120 s,然后用清水和酒精冲洗并干燥。之后用Leica DMI3000M光学显微镜分析金相组织。

在室温下采用具有50 kN测力传感器的AG-IC万能试验机进行拉伸试验,应变速率为2 mm/min,

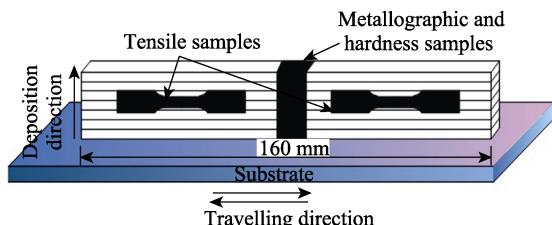


图1 金相和拉伸件取样位置  
Fig.1 Metallographic structure and sampling position of tensile specimens

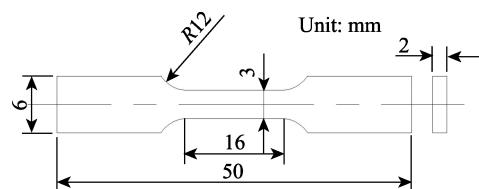


图2 拉伸件尺寸  
Fig.2 Dimensions of tensile specimens

最大载荷为100 kN。采用Shimadzu HMV-2T硬度测试仪沿垂直堆积方向进行硬度试验,从试样底部以1 mm为间隔进行测量。在测试硬度时,对所有测试点施加0.5 kg的载荷,并维持10 s。

## 2 结果与分析

### 2.1 增材墙体外观形貌

4组增材成形件的堆积墙体外观形貌如图3所示。可以看出,4组试验形成的墙体表面均成形良好,层与层结合得较为平滑,且层间分明,无裂纹、塌陷等缺陷出现。

由于堆积速度不同,单位时间的金属熔覆量也不同,在堆积长度相同的情况下,堆积速度慢的试验所消耗的焊丝也多一些。经测量,1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>试验墙体的平均高度分别为27.60、27.35、24.66、24.66 mm,可以看出,1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>墙体明显比3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>的墙体高。

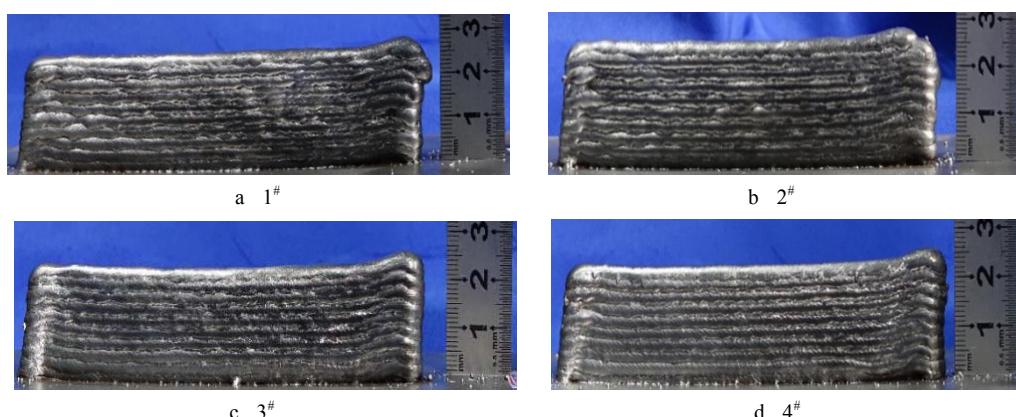


图3 增材制造墙体外观形貌  
Fig.3 Surface morphology of deposited walls

## 2.2 显微组织

1#试验增材墙体的金相组织如图 4 所示。图 4a 为墙体中间部分的宏观图像, 可以明显看到各堆积层的分界线, 在图像显示范围内一共有 3 个堆叠层, 层与层之间熔合良好, 熔合区清晰可见, 显示区域内没有明显的裂纹、气孔或其他宏观缺陷。从图 4b 可以看到, 母材和增材部分区别明显, 在远离第一层熔合线的沉积方向上可以看到向上生长的柱状晶体。母材晶粒和增材晶粒大小结构明显不同, 增材的晶粒更细。图 4c 为图 4a 的 2 层结合处放大图, 可以看出,

层与层熔合区附近的柱状晶体生长得稍显杂乱, 沿垂直于堆积方向慢慢生长为较细的柱状晶, 观察其他层可以发现, 晶粒以相同的方式生长, 每层都是由粗到细, 循环变化。从图 4d 可以看到, 有白色的奥氏体以及少量的灰色铁素体。

垂直于墙体堆积方向的 EBSD 方位图如图 5 所示。其中, 不同颜色对应晶粒相对于晶格的不同取向, 每种颜色代表一种独特的欧拉角组合。由图 5a 可以看到, 几乎整个图都是同一种颜色, 表明大多数晶粒都沿着垂直方向(001)生长。由图 5b 可以看到, 晶粒内部的应变变形并不均匀。

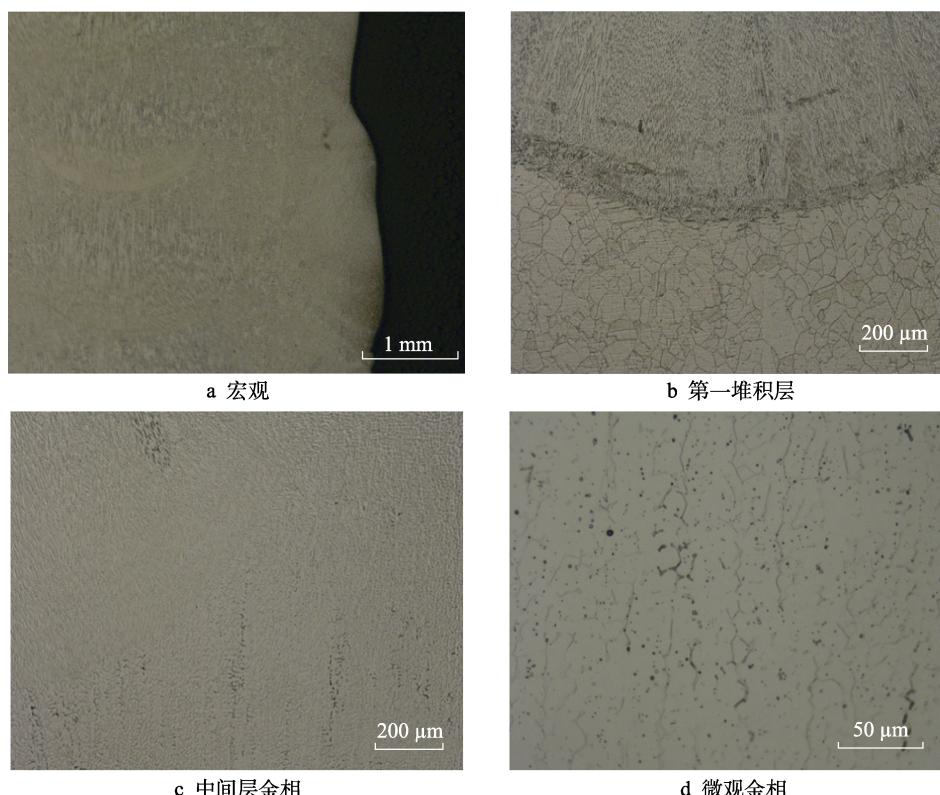


图 4 1#试验增材墙体金相组织

Fig.4 Metallographic structure of 1# deposited walls: a) macroscopic metallography; b) the first deposition layer; c) intermediate deposition layer metallography; d) microscopic metallography

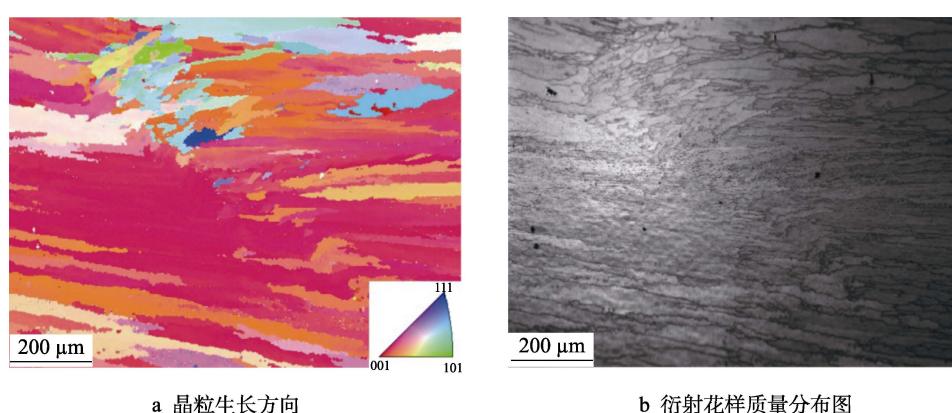


图 5 1#试验样品的 EBSD 图

Fig.5 EBSD maps of 1# experimental specimens: a) grain growth orientation; b) image quality (IQ) map

### 2.3 拉伸及硬度

2#和4#试验样品在第一层和中间层附近区域的硬度如图6所示。可以看出，母材附近硬度值较高，主要分布在185HV~210HV，上部增材样品的硬度值稍微低一些，主要分布在175HV~185HV，在每层内部，沿垂直堆积方向上的硬度值也呈现出逐渐降低的趋势。分析认为，当产生第一层堆积层时，母材温度还比较低，第一层焊缝过冷度较高，熔池中的液体以较快的速度冷却，生核率大大增大，形成了均匀细小的等轴晶，硬度较高。4组试验样品的硬度平均值如图7所示，4组试样的平均硬度值分别为182.4HV、182.8HV、187.6HV、186.5HV。可以看出，堆积速度相同、层间冷却时间不同的2组试样的平均硬度值差别不大，这是因为当冷却时间为30 s时，熔池已经凝固，晶粒成长基本完成，更多的冷却时间对微观金相影响不大。堆积速度不同的样品的平均硬度不同，速度快的试样（3#和4#）的平均硬度值更高，3#的平均硬度比1#的提高了2.85%。这是因为堆积速度快导致热量的累积输入更小，熔池冷却更快，晶粒更小，更容易凝结。

4组试样的水平应力-应变曲线如图8所示。可以

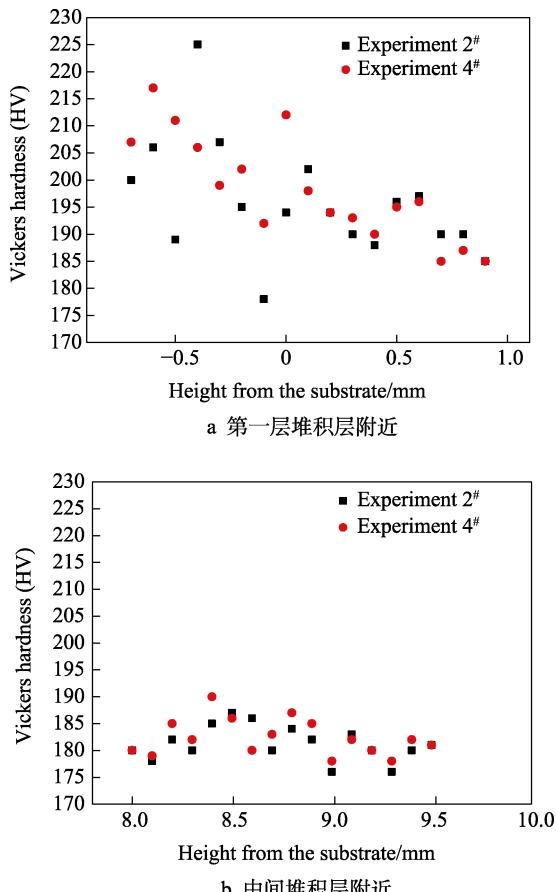


图6 增材样品维氏硬度变化分布图对比

Fig.6 Vickers hardness distributions of additive specimens: a) the first deposition layer; b) intermediate deposition layer

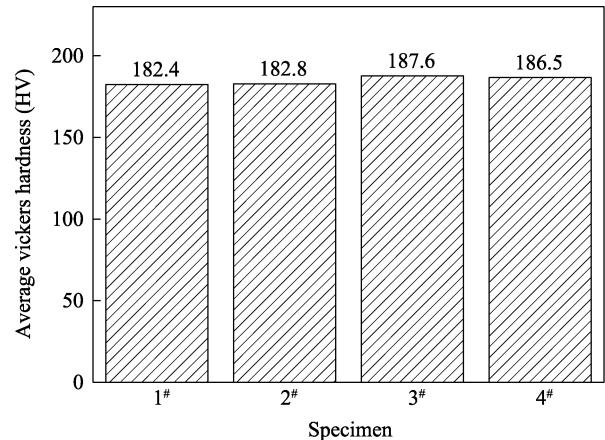


图7 4组样品平均硬度

Fig.7 Average hardness of four groups of specimens

看到，所有试样在断裂前都经历了弹性和塑性变形。4组试样的抗拉强度和屈服强度如表3所示。可以看到，3#和4#试样的拉伸性能比1#和2#的强，这与图7中硬度测试结果相吻合。从微观分析可知，增材件内部的柱状晶粒沿垂直于堆积方向向上生长，横向和纵向拉伸数据结果存在各向异性<sup>[27]</sup>。横向拉伸主要抵抗晶界力，而纵向拉伸主要抵抗晶粒内部的力和层间结合力，由于壁高度的限制，试样在横向拉伸时拉伸值会小一些。

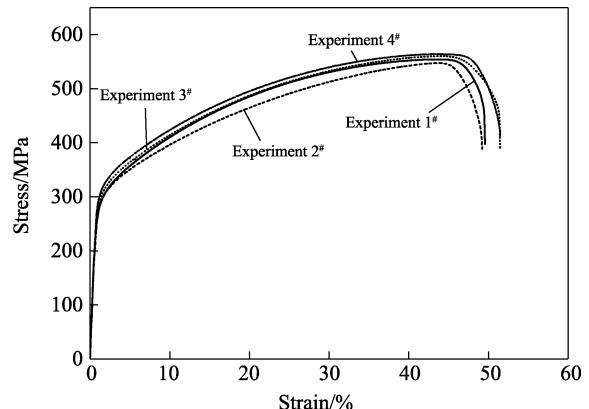


图8 增材试样拉伸曲线对比

Fig.8 Stress-strain curves of additive specimens

表3 4组样品的抗拉强度和屈服强度

Tab.3 Yield strength and ultimate tensile strength 4 groups of specimens MPa

Experiment number	Yield strength	Ultimate tensile strength
1#	328	554
2#	322	547
3#	327	560
4#	335	564

1#和3#拉伸件断裂形态的断口形貌如图9所示。在图9a和图9b上都能观察到分布相对均匀的韧窝，

这证明断裂模式为韧性断裂。整体对比来看, 2 组韧窝的尺寸和深度无差异, 2 组试样都具有良好的韧性。

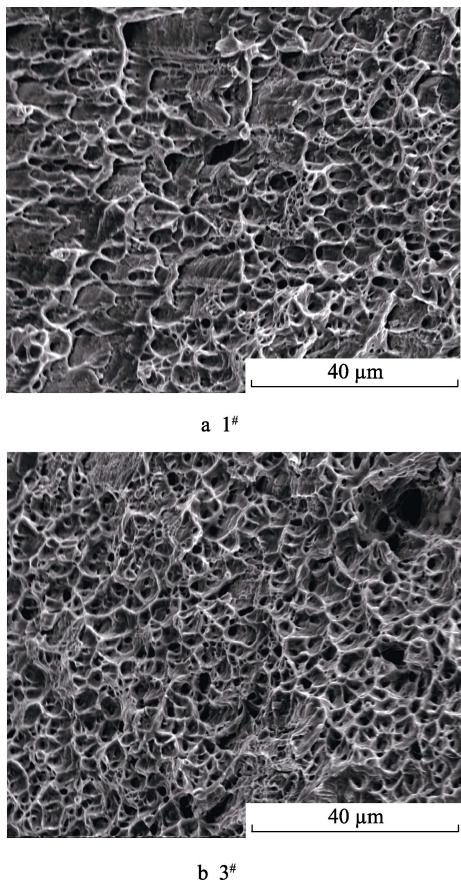


图 9 拉伸件断口形貌

Fig.9 Fracture morphologies of tensile specimens

### 3 结论

1) 利用优化的电弧增材制造工艺参数可以生产出力学性能良好的 316 不锈钢零部件, 堆积速度对最终部件的形状有一定影响。

2) 当层间冷却时间达到一定值时, 熔池完全凝固, 进一步延长冷却时间对成品零件的力学性能和微观结构影响较小。

3) 4 组试样的底部硬度均略高于上部硬度。在增材制造过程中, 晶粒呈柱状生长。各层熔合区附近硬度较高, 沿熔合线向上逐渐降低, 在每个堆叠层, 晶粒生长方式都类似。

### 参考文献:

- [1] BAI X W, COLEGROVE P, DING J L, et al. Numerical Analysis of Heat Transfer and Fluid Flow in Multilayer Deposition of PAW-Based Wire and Arc Additive Manufacturing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124(12): 504-516.
- [2] CHO J S, LEE D H, SEO G J, et al. Optimizing the Mean and Variance of Bead Geometry in the Wire Plus Arc Additive Manufacturing Using a Desirability Function Method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(11/12): 7771-7783.
- [3] HAUSER T, DA SILVA A, REISCH R T, et al. Fluctuation Effects in Wire Arc Additive Manufacturing of Aluminium Analysed by High-Speed Imaging[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56(8): 1088-1098.
- [4] DEREKAR K S. A Review of Wire Arc Additive Manufacturing and Advances in Wire Arc Additive Manufacturing of Aluminium[J]. Materials Science and Technology, 2018, 34(8): 895-916.
- [5] 韩启飞, 符瑞, 胡锦龙, 等. 电弧熔丝增材制造铝合金研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(4): 62-73.  
HAN Qi-fei, FU Rui, HU Jin-long, et al. Research Progress in Wire Arc Additive Manufacturing of Aluminium Alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(4): 62-73.
- [6] 易果强, 周亚举, 张鹏, 等. 电弧熔丝增材制造 ODS 钢的成型工艺及组织性能[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(6): 128-136.  
YI Guo-qiang, ZHOU Ya-ju, ZHANG Peng, et al. Forming Process, Microstructure and Properties of ODS Steel Prepared by Wire Arc Additive Manufacturing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(6): 128-136.
- [7] KIM J S, KIM J. Analysis of Mechanical Properties on Ni-Al-Bronze Block Deposited by WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)[J]. Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, 2020, 22(5): 959-964.
- [8] 赵海洋, 高多龙, 张童, 等. 电弧增材制造航空 AA2024 铝合金的微观结构及其腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 42(4): 621-628.  
ZHAO Hai-yang, GAO Duo-long, ZHANG Tong, et al. Microstructure and Corrosion Evolution of Aerospace AA2024 Al-Alloy Thin Wall Structure Produced Through WAAM[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2022, 42(4): 621-628.
- [9] 李旭锋, 林健, 夏志东, 等. 不同沉积路径冷金属过渡电弧增材制造 H13 钢成形件的显微组织和硬度[J]. 机械工程材料, 2022, 46(4): 42-47.  
LI Xu-feng, LIN Jian, XIA Zhi-dong, et al. Microstructure and Hardness of CMT Wire-Arc Additive Manufactured H13 Steel Formed Parts in Different Deposition Paths[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(4): 42-47.
- [10] YAO Ping, ZHOU Kang, HUANG Shu-wei. Process and Parameter Optimization of the Double-Pulsed GMAW Process[J]. Metals, 2019, 9(9): 1-22.
- [11] SINGH S, JINOOP A N, TARUN KUMAR G T A, et al. Effect of Interlayer Delay on the Microstructure and Mechanical Properties of Wire Arc Additive Manufactured Wall Structures[J]. Materials, 2021, 14(15): 4187

- [12] GENG H B, LI J L, XIONG J T, et al. Optimisation of Interpass Temperature and Heat Input for Wire and Arc Additive Manufacturing 5A06 Aluminium Alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 22(6): 472-483.
- [13] LI Y, DONG Z, MIAO J, et al. Forming Accuracy Improvement in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review[J]. Rapid Prototyping Journal, 2023, 29(4): 673-686.
- [14] 黄强, 吕彦明, 钱云杰, 等. 热源解耦对 316L 不锈钢电弧增材薄壁件精度的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(2): 66-72.  
HUANG Qiang, LYU Yan-ming, QIAN Yun-jie, et al. Effect of Heat Source Decoupling on Accuracy of 316L Stainless Steel Arc Additive Thin-Walled Parts[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2023, 46(2): 66-72.
- [15] XING X L, QIN G K, ZHOU Y F, et al. Microstructure Optimization and Cracking Control of Additive Manufactured Bainite Steel by Gas Metal Arc Welding Technology[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(8): 5138-5145.
- [16] 张天奕, 张兆栋, 王泽力, 等. 旁路耦合三丝间接电弧增材制造成形特性[J]. 焊接学报, 2022, 43(9): 25-30.  
ZHANG Tian-yi, ZHANG Zhao-dong, WANG Ze-li, et al. Forming Characteristics of Bypass Coupling Triple-Wire Gas Indirect Arc Additive Manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(9): 25-30.
- [17] SILWAL B, NYCZ A, MASUO C J, et al. An Experimental Investigation of the Effectiveness of Ar-CO<sub>2</sub> Shielding Gas Mixture for the Wire Arc Additive Process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5/6): 1285-1296.
- [18] WANG L L, XUE J X, WANG Q. Correlation between Arc Mode, Microstructure, and Mechanical Properties during Wire Arc Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2019, 751(4): 183-190.
- [19] 姜淑馨, 李峰光. 层间温度对 H13 钢丝材电弧增材制造成形质量的影响[J]. 精密成形工程, 2022, 14(6): 111-116.  
JIANG Shu-xin, LI Feng-guang. Effect of Interpass Temperature on Forming Quality of H13 Steel by Wire and Arc Additive Manufacture[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(6): 111-116.
- [20] 陈伟, 陈玉华, 温涛涛, 等. 超声振动对电弧增材制造铝青铜合金组织和拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(10): 2280-2294.  
CHEN Wei, CHEN Yu-hua, WEN Tao-tao, et al. Effect of Ultrasonic Vibration on Microstructure and Tensile Properties of Aluminum Bronze Alloy Produced by Wire Arc Additive Manufacturing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(10): 2280-2294.
- [21] 徐亮, 杨可, 王秋雨, 等. 热处理对电弧增材制造 316L 不锈钢组织和性能的影响[J]. 电焊机, 2020, 50(10): 29-34.  
XU Liang, YANG Ke, WANG Qiu-ru, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure Properties of Austenitic Stainless Steel 316L Using Arc Additive Manufacturing[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(10): 29-34.
- [22] 王爽. 新型奥氏体不锈钢微观组织及电化学腐蚀性能研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020: 12-13.  
WANG Shuang. The Investigation on Microstructure and Electrochemical Corrosion Performance of New Austenitic Stainless Steels[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020: 12-13.
- [23] HUANG J, GUAN Z, YU S, et al. Simulation and Control of Metal Droplet Transfer in Bypass Coupling Wire Arc Additive Manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(1/2): 383-395.
- [24] TREUTLER K, LORENZ S, HAMJE J, et al. Wire and Arc Additive Manufacturing of a CoCrFeMoNiV Complex Concentrated Alloy Using Metal-Cored Wire-Process, Properties, and Wear Resistance[J]. Applied Sciences-Basel, 2022, 12(13): 6308.
- [25] WU B, PAN Z, ZIPING Y, et al. Robotic Skeleton Arc Additive Manufacturing of Aluminium Alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(9/10): 2945-2959.
- [26] ZIESING U, LENTZ J, ROETTGER A, et al. Processing of a Martensitic Tool Steel by Wire-Arc Additive Manufacturing[J]. Materials, 2022, 15(21): 7408.
- [27] WU W, XUE J X, ZHANG Z, et al. Comparative Study of 316L Depositions by Two Welding Current Processes[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(13): 1502-1508.

责任编辑: 蒋红晨