

316L 不锈钢和镍基合金梯度材料 MIG 焊电弧增材制造工艺研究

温淳杰^{1a}, 姚屏^{1b}, 范谨锐^{1a}, 曾祥坤^{1a}, 喻小燕², 武威^{1a*}

(1. 广东技术师范大学 a. 汽车与交通工程学院 b. 机电学院, 广州 510635;

2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘要: **目的** 采用 MIG 焊电弧增材制造的工艺方法, 实现 316L 不锈钢和 625 镍基合金 2 种材料的增材制造, 以获得无缺陷、性能优异的功能梯度材料。**方法** 采用双脉冲电弧模式, 利用 316L 和 Inconel625 2 种焊丝在钢板上分别以 25% 和 5% 梯度比例进行 50 层往复堆积实验, 对沉积样品进行形貌外观、沉积效率、微观组织、硬度和拉伸性能的研究, 并采用多级指标的评价系统综合评价沉积样品的成形质量。**结果** 2 个试样成功过渡堆积 50 层, 表面成形良好, 无未熔合、流淌、裂纹等缺陷。从宏观来看, 样品横截面无气孔、热裂纹等缺陷。研究发现, 5% 梯度样品沉积效率高于 25% 梯度样品, 硬度随着镍基合金比例的增大而增加, 并通过电镜扫描方法发现 25% 梯度样品中 75% (质量分数) 316L+25% Inconel625 区域出现裂纹, 硬度和拉伸性能下降, 降低了样品总体质量, 而 5% 梯度比例的样品无此区域, 总体质量良好。**结论** 电弧增材制造采用 5% 的过渡比例工艺获得的梯度材料具有较高的强度与韧性, 优良的拉伸性能为工业生产中的应用提供了可靠的保障, 在工业上具有很好的应用前景。

关键词: 增材制造; 316L 不锈钢; 镍基合金; 梯度材料; MIG 焊

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.10.022

中图分类号: TG434 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2024)10-0208-09

Arc Additive Manufacturing Process of 316L Stainless Steel and Ni-Based Alloy Gradient Materials by MIG Welding

WEN Chunjie^{1a}, YAO Ping^{1b}, FAN Jinrui^{1a}, ZENG Xiangkun^{1a}, YU Xiaoyan², WU Wei^{1a*}

(1. a. School of Automobile and Transportation Engineering, b. School of Mechatronic Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510635, China; 2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

ABSTRACT: The work aims to achieve the additive manufacturing process of 316L stainless steel and 625 Ni-based alloys by MIG welding arc additive manufacturing method, in order to obtain functional gradient materials with excellent and defect-free

收稿日期: 2024-03-18

Received: 2024-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(51805099); 广东省教育厅项目(2020ZDZX2019); 创新强校工程冲补强项目(2021SDKYA086)

Fund: National Natural Science Foundation of China, China (51805099); Project of Educational Commission of Guangdong Province of China (2020ZDZX2019); Innovative and Strong School Engineering Flushing and Reinforcement Project (2021SDKYA086)

引文格式: 温淳杰, 姚屏, 范谨锐, 等. 316L 不锈钢和镍基合金梯度材料 MIG 焊电弧增材制造工艺研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(10): 208-216.

WEN Chunjie, YAO Ping, FAN Jinrui, et al. Arc Additive Manufacturing Process of 316L Stainless Steel and Ni-Based Alloy Gradient Materials by MIG Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(10): 208-216.

*通信作者 (Corresponding author)

properties. The 50-layer reciprocating stacking experiments were carried out on the steel plate with 316L and Inconel625 welding wires at 25% and 5% gradient ratios respectively in the double-pulse arc mode, and the deposited samples were investigated in terms of morphology, deposition efficiency, microstructure, hardness, and tensile properties, and the molding quality of the deposited samples was comprehensively evaluated by an evaluation system with multilevel indicators. The two samples were successfully transitioned and stacked with 50 layers, and the surfaces were well molded without defects such as non-fusion, flowing, and cracking. From a macroscopic view, there were no defects such as porosity and thermal cracks in the cross-section of the sample. It was found that the deposition efficiency of 5% samples was higher than that of the 25% samples, and the hardness increased with the increase of the proportion of Ni-based alloys. It was also found that the gradient region of 75% 316L+25% Inconel625 in 25% sample had cracks and the hardness and tensile properties decreased, which reduced the overall quality of the sample, while the sample with 5% gradient ratio had no such region with great overall quality through electron microscopy scanning method. The gradient materials obtained by the 5% transition ratio process in wire arc additive manufacturing have higher strength and toughness and excellent tensile properties, providing a reliable guarantee and a bright prospect for its application in industrial production.

KEY WORDS: additive manufacturing; 316L stainless steel; Ni-based alloys; gradient materials; MIG welding

增材制造技术 (Additive Manufacturing, AM) 又称 3D 打印技术, 基于离散、堆积原理, 相比于传统的减材制造技术, 具有无模化、材料利用率高、生产时间短、可生产复杂结构件等优点^[1-2]。2013 年, 卢秉恒^[3]认为, 增材制造以其制造原理的优势成为具有巨大发展潜力的制造技术。AM 已经广泛应用于多个领域, 例如航空航天、汽车、医疗和工业制造等^[4-6]。

利用 AM 获取功能梯度材料 (Functionally Graded Material, FGM) 被视为一种高效而经济的方法, FGM 通过逐层堆叠不同材料或改变材料配比, 可以制造出具有不同力学、热学或生物学性质的材料, 并且可以提高材料的性能和革新零部件设计^[7]。陆连种^[8]研究了双丝电弧增材制造钛-镍功能梯度材料, 探究了其堆叠层数与显微组织和性能的关系及不同梯度材料的显微组织和力学性能变化。王晓光等^[9]以冷金属过渡电弧增材制造的方法成形了 316L 奥氏体不锈钢单道多层薄壁件, 分析了不同焊接参数下材料的成形宽度、侧面成形误差、沉积效率及显微组织变化。Grandhi 等^[10]采用激光增材制造方法成功制备了 CuSn10 和 718 镍基合金的功能梯度材料, 观察了微观结构, 研究了物理和力学性能, 实现了梯度材料的过渡。此外, 李鹏飞等^[11]研究了激光增材制造 316L 不锈钢和 718 镍基合金的功能梯度材料, 并通过各项实验分析了功能梯度材料的组织及力学性能, 为选择合适的梯度提供了实验依据。

316L 不锈钢是工业生产中最常用的金属, 以其为原材料的成形工艺及性能分析数不胜数, 但其在苛刻环境 (风吹、日晒、雨淋) 下容易被腐蚀^[12-14], 性能下降^[15], 需要加入镍基高温合金提高耐腐蚀性等性能^[16], 但综合现状来说, 针对 316L 不锈钢和 625 镍基合金的增材制造的研究较少, 因此, 本文通过 MIG 焊电弧增材制造 316L 不锈钢和 625 镍基合金梯度材

料, 探究梯度比例与梯度过渡层的组织和性能关系, 以及与整体增材制造样件的质量关系, 以期获得较好的工艺参数, 从而提高材料的使用寿命和性能, 降低材料成本。

1 实验样品制备与评判指标

1.1 实验材料及制备过程

实验所用材料化学成分见表 1, 采用 1.2 mm 直径 316L 不锈钢和 Inconel625 镍基合金 2 种焊丝, 基板选用 250 mm×100 mm×5 mm 的 316L 不锈钢板。实验中使用的的气体流量为 20~25 L/min、纯度为 99.999% 的高纯氩气以保护焊接过程^[17]。此外, 焊丝伸长量为 12 mm, 送丝速度和梯度比例关系设置见表 2。本文采用往复堆积、逐层堆积的方法堆焊 50 层, 完成一层长为 150 mm 的堆焊之后焊枪会上提 1.5~2.0 mm, 继续开始下一层堆积, 直至最后完成^[18], 整个增材制造系统如图 1 所示。试样 M1 采用 25% 过渡比例, 每个梯度堆积 10 层; 试样 M2 采用 5% 过渡比例, 每个梯度堆积 5 层, 具体比例见表 2, 其中 75% 316L+25% Inconel625 样品是指该区间样品 316L 不锈钢含量占比 75% (质量分数), Inconel625 含量占比 25% (质量分数)。

1.2 试样外貌、取材及评判指标

本文增材制造的 2 个试样都过渡堆积了 50 层, 其中试样 M1 高度约为 55 mm, 试样 M2 高度约为 62 mm, 试样表面无明显未熔合等缺陷。

待试样冷却后, 首先测量沉积墙体的宽度及高度, 使用线切割机在各个沉积墙体中切取金相、水平拉伸的试样 H1~H5, 如图 2 所示, 在电弧移动的垂直方向切取水平拉伸试样 V1、V2。最后, 对沉积墙体的成形情况、金相组织和力学性能进行测试分析,

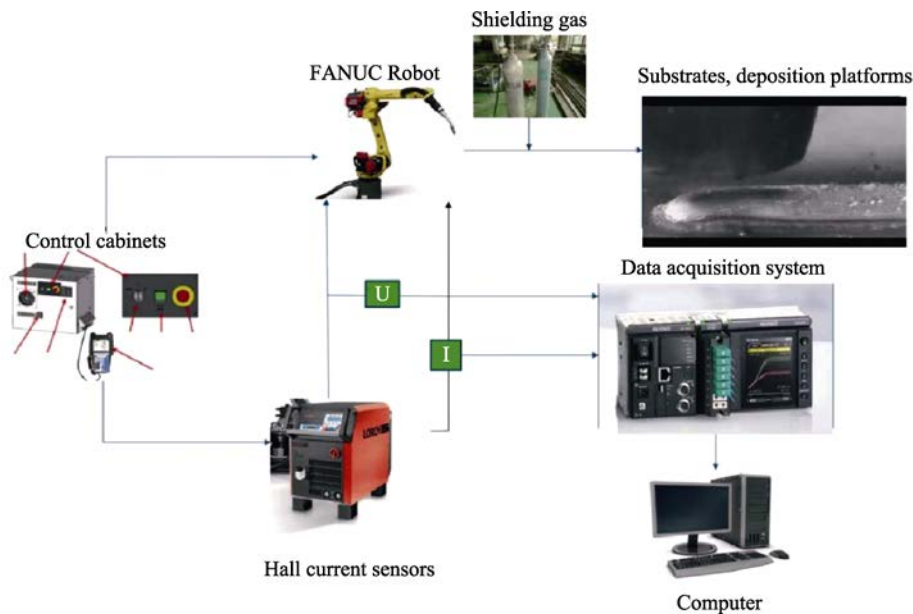


图1 增材制造系统
Fig.1 Additive manufacturing system

表1 化学组成元素
Tab.1 Chemical composition elements

| Materials | C | Si | Mn | S | Cu | P | Cr | Ni | Mo | Fe | Nb |
|------------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 316L | 0.016 | 0.51 | 2.14 | 0.014 | 0.03 | 0.013 | 18.96 | 12.73 | 2.32 | Bal. | — |
| Inconel625 | 0.006 | 0.15 | 0.15 | 0.001 | — | 0.001 | 22.04 | 64.9 | 8.75 | — | 3.49 |

表2 样品送丝速度及材料所占比例
Tab.2 Wire feeding speed of sample and proportion of material

| Sample | 316L content/wt. % | 316L speed/(m·min ⁻¹) | Inconel 625 content/wt. % | Inconel 625 speed/(m·min ⁻¹) |
|--------|--------------------|-----------------------------------|---------------------------|--|
| M1 | 100 | 6 | 0 | 0 |
| | 75 | 4.5 | 25 | 1.5 |
| | 50 | 3 | 50 | 3 |
| | 25 | 1.5 | 75 | 4.5 |
| | 0 | 0 | 100 | 6 |
| M2 | 100 | 6 | 0 | 0 |
| | 67 | 4 | 33 | 2 |
| | 62 | 3.7 | 38 | 2.3 |
| | 57 | 3.4 | 43 | 2.6 |
| | 52 | 3.1 | 48 | 2.9 |
| | 47 | 2.9 | 53 | 3.2 |
| | 42 | 2.6 | 58 | 3.4 |
| | 37 | 2.3 | 63 | 3.7 |
| | 33 | 2 | 67 | 4 |
| | 0 | 0 | 100 | 6 |

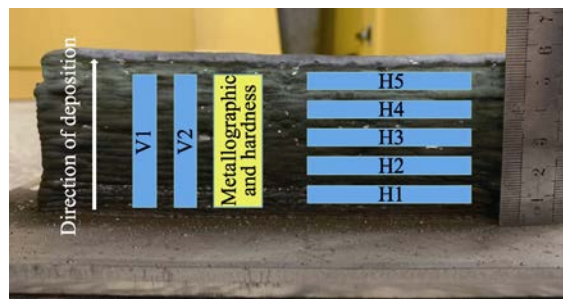


图2 增材制造样品的取样位置
Fig.2 Sampling location of the additive manufacturing sample

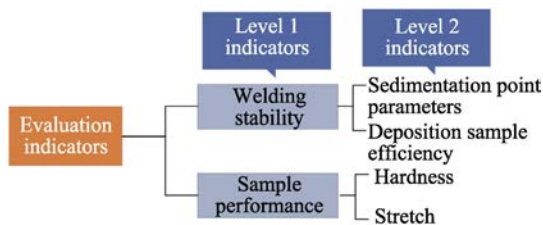


图3 电弧增材制造评价系统
Fig.3 Arc additive manufacturing evaluation system

2 实验结果与分析

2.1 焊接稳定性

2.1.1 沉积效率

为了得到本次增材制造的沉积效率,对样品进行

获取更多的实验数据。实验评判方法采用多级指标法,如图3所示,其中焊接稳定性及样品性能为一级指标,在每个一级指标下都有2个二级指标,具体为沉积电参量、沉积样品效率、硬度、拉伸性能。

切割, 观察横截面, 未发现气孔、热裂纹等缺陷, 通过测量得到样品的有效面积, 如图 4 所示, 以有效面积作为计算参数, 来评估增材制造的效率。

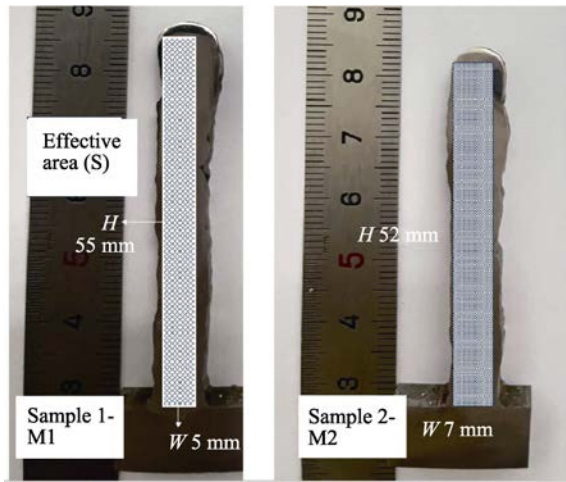


图 4 样品横截面的有效面积
Fig.4 Effective area of sample cross section

依据文献[19]中公式, 由图 4 和表 3 的数据计算出样品沉积效率, 见表 4, M1 有效沉积效率为 0.437 4 kg/h, M2 有效沉积效率为 0.578 4 kg/h, M2

的沉积效率更高, 梯度设计更加合理。

2.1.2 电参量波形

在电弧增材制造过程中, 电流和电压都可能产生波动, 用霍尔电流、电压传感器采集数据。本文选择在沉积过程第六层中的第 10~11 s 进行分析, 沉积过程双脉冲模式电参量波形如图 5 所示, 电弧模式为双脉冲模式, 通过观察可以看出, 电弧增材制造过程中的波形相对稳定, 说明该电弧模式下沉积过程相对稳定。

2.2 微观组织分析

本文对 2 个试样横截面的中、下部位微观组织进行研究。如图 6 所示, 316L 金相组织通常由铁素体及奥氏体组成。Inconel625 通常为以钼、铌为主要强化元素的固溶强化型镍基变形高温合金, 组织呈现出典型的树枝晶组织形貌^[20]。图 6 中柱状枝晶由奥氏体和铁素体组成。常温下 316L 组织为奥氏体平衡相, 而增材制造过程具有高温梯度、高冷却速率和反复加热处理等特点, 由于后一层对前层的热影响, 部分铁素体溶解于奥氏体中, 容易产生非平衡相。其自下而上连续生长的粗大柱状晶是由温度梯度和重熔处理工艺引起的外延生长导致的。

表 3 样品沉积数据

Tab.3 Sample deposition data

| Wire radius/mm | Deposit length/mm | Number of layers | Cooling time/s | Scanning speed/(mm·s ⁻¹) | 316L density/(g·cm ⁻³) | Inconel625 density/(g·cm ⁻³) |
|----------------|-------------------|------------------|----------------|--------------------------------------|------------------------------------|--|
| 0.6 | 150 | 50 | 30 | 10 | 7.93 | 8.44 |

表 4 沉积过程的效率

Tab.4 Efficiency of the deposition process

| Sample | Effective deposition volume/mm ³ | Total sedimentation volume/mm ³ | Deposition efficiency/% | Effective deposition efficiency/(kg·h ⁻¹) |
|--------|---|--|-------------------------|---|
| M1 | 41 250 | 84 780 | 48.7 | 0.437 4 |
| M2 | 54 600 | 84 780 | 64.4 | 0.578 4 |

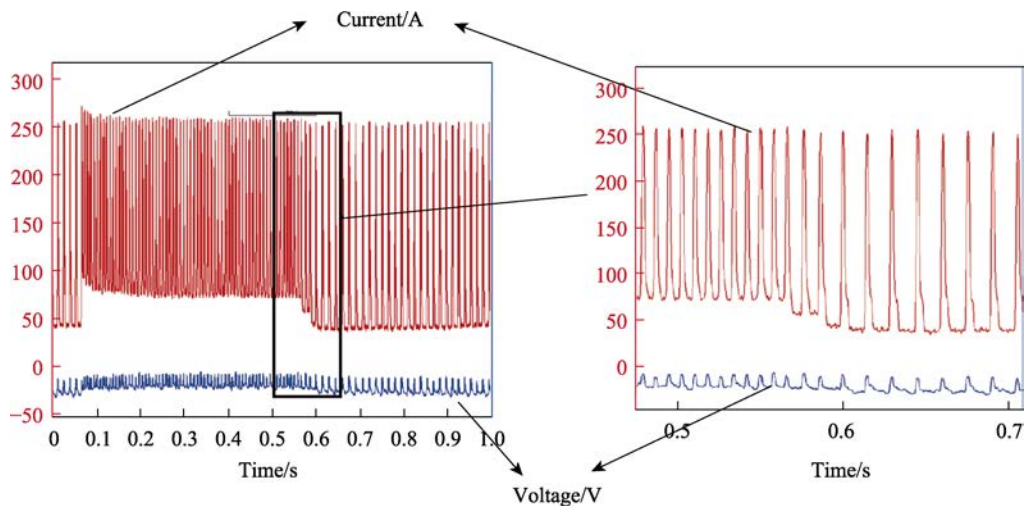


图 5 沉积过程双脉冲模式电参量波形图

Fig.5 Waveform of the electrical parameters in the double pulse mode of the deposition process

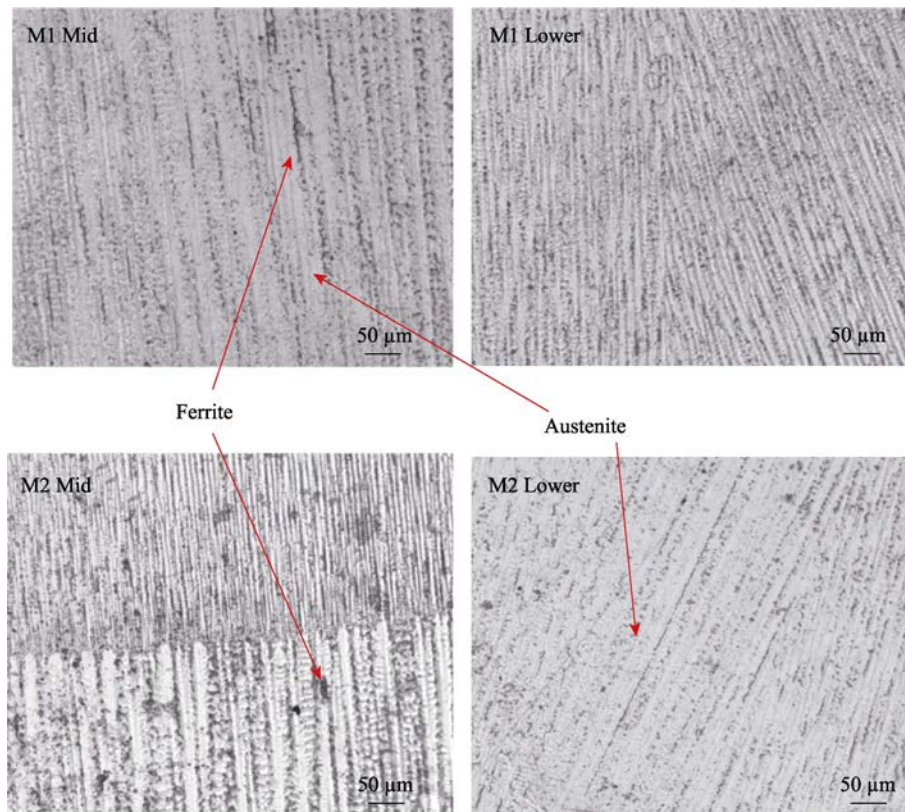


图6 试样截面金相图

Fig.6 Metallographic diagram of the sample section

取3个试样进行EDS电镜扫描,如图7所示,3个样品的微观组织都以Ni、Fe、Cr元素为主,如表5所示。随着Ni元素占比增大,Ni元素在钢中与Fe元素发生无限固溶,扩大Fe的奥氏体区,提高钢的强度,Cr和Ni在电弧增材过程中起到固溶强化作用^[21]。Mn元素占比增大,使金属强度和耐磨性提高^[22]。从图7c电镜扫描可以看出,75%316L+25%Inconel625样品存在明显的裂纹。裂纹周围析出相以Nb和Mo元素为主,Nb与Mo元素占比增大会导致laves相的出现,laves相是一种脆性相、有害相,会使焊缝性能急剧下降,但其他比例梯度样品无此裂纹现象,照应下文硬度测试中此梯度硬度较差的现象。

2.3 力学分析

2.3.1 硬度测试

如图8所示,随着316L不锈钢含量的减少,即Inconel625的占比增加,M1和M2试样的整体硬度呈上升趋势,最大硬度分别可达(219±11)HV和(206±10)HV。因合金中Ni元素含量增大,容易出现富含奥氏体的组织,会使其硬度增加,然而在图8a中75%316L+25%Inconel625梯度区间下,硬度会降低,同样图8b中61%~67%316L梯度区间也有此现象。Wei等^[23]在增材制造316L和Cu10Sn铜锡化合物的功能梯度部件时也出现了此现象。综合其他文献^[24]推测,可能是因为产生了脆化相。

2.3.2 拉伸测试

如图9所示,试样M1的H1~H5的平均屈服强度为(301±22)MPa,平均最大强度为(557±30)MPa。M1-H2这个比例的拉伸性能较差,平均最大强度为(488±25)MPa。同时可发现,其他比例均在两者之间;在图9b中,试样M2的H1~H5的平均屈服强度为(92±18)MPa,平均最大强度为(560±12)MPa。由于M1-H2梯度的性能很差,为了尽量排除这个梯度对样品整体质量的影响设计了M2梯度,如图10所示,从试样M2的伸长率来看,M2-H5这个梯度比例拥有比较好的拉伸性能,M2-H4部位拉伸性能偏低,利用归一化方法进行数据处理,得到表6的结果^[25]。随着Inconel625含量的增加,抗拉强度和屈服强度都呈上升趋势,但M1-H2出现了裂纹致,使其性能变差,样品归一化总和为0。

在拉伸过程中,材料最先在内部分离形成微孔,随后微孔在滑移作用下不断长大并与其他孔洞聚集,当塑性变形达到一定程度时,就会形成韧窝,因此断口出现韧窝,表明焊缝强度与塑性得到增强。如图9所示,样品M1和M2的断裂口出现多尺度等轴韧窝,这表明在拉伸过程中应力分布均匀,材料塑性得到充分发挥。从断口可以看出具有较好的塑性^[26]。这也就意味着在承受张力时能保持较高的初始形态和阻力,同时在达到一定强度时能够持续拉伸不断裂,具备出色的弹性和可塑性。这种总体拉伸性能的优良特性为

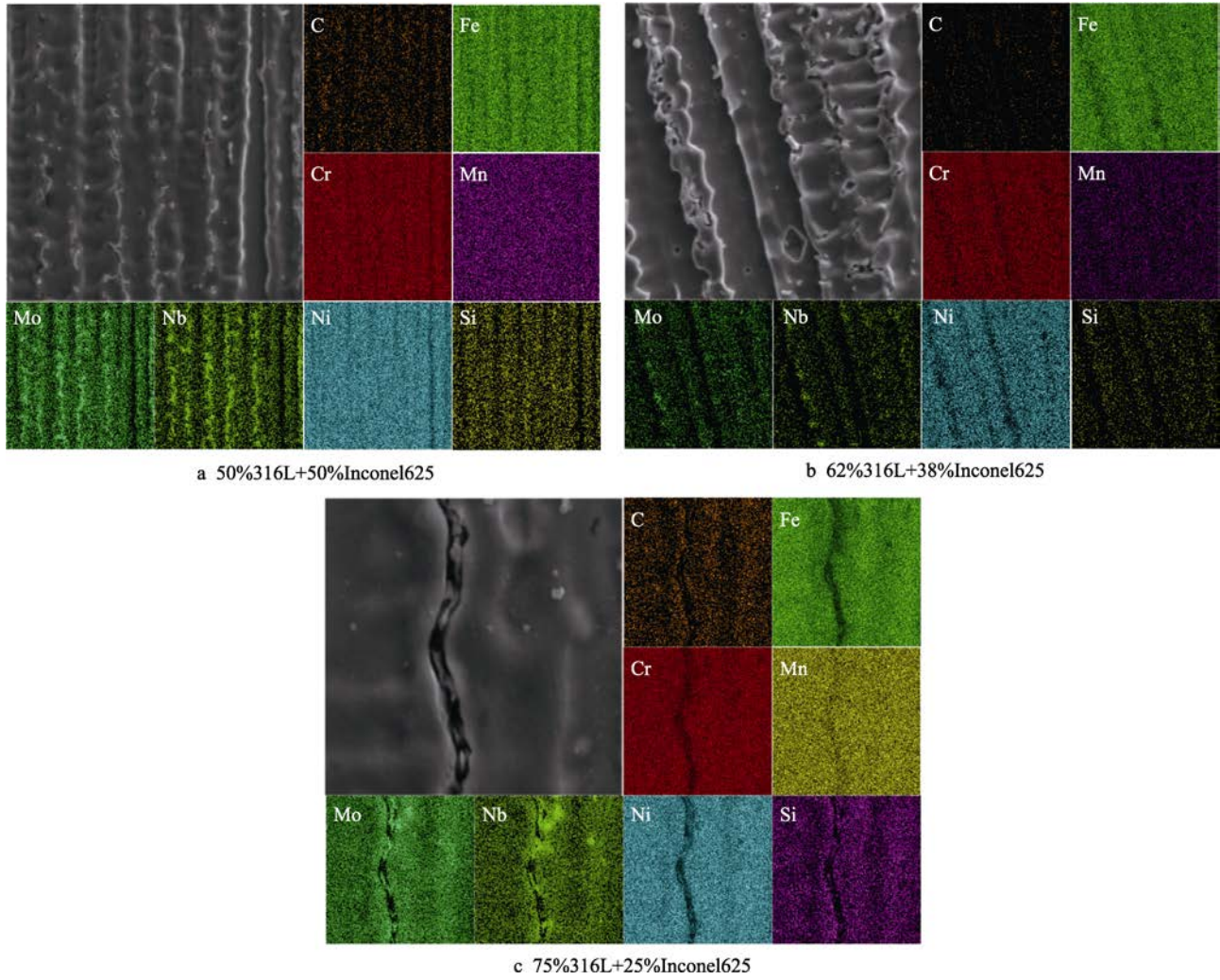


图 7 EDS 能谱图
Fig.7 EDS energy spectrum

表 5 试样元素含量
Tab.5 Sample element content

| Sample | C | Fe | Cr | Mn | Mo | Nb | Ni | Si | wt.% |
|--------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|
| a | 5.92 | 31.59 | 19.68 | 0.93 | 5.46 | 2.85 | 32.66 | 0.57 | |
| b | 6.03 | 43.54 | 19.23 | 1.31 | 3.82 | 1.53 | 23.49 | 0.66 | |
| c | 4.80 | 47.43 | 19.19 | 1.30 | 3.47 | 1.27 | 21.78 | 0.68 | |

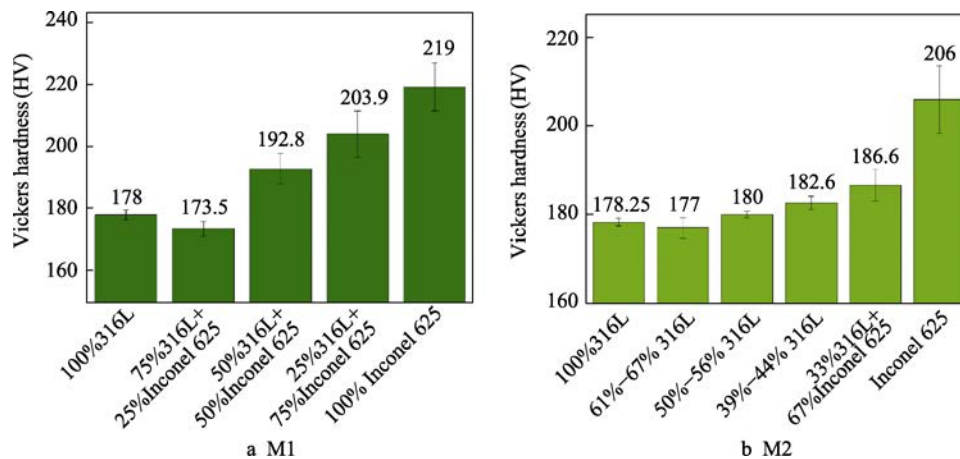


图 8 硬度柱状图
Fig.8 Hardness histogram

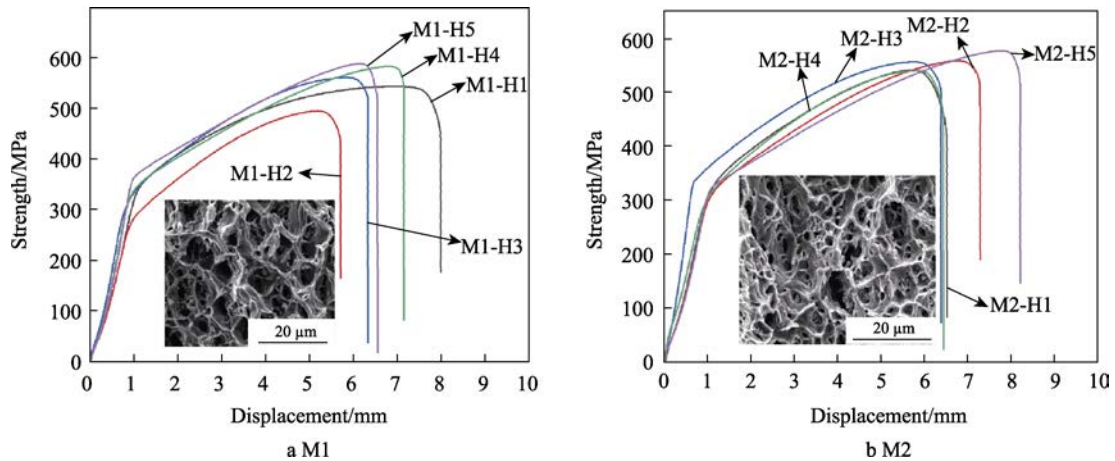


图9 试样的位移抗拉强度曲线及断裂韧窝
Fig.9 Displacement tensile strength curve and fracture dimple of the sample

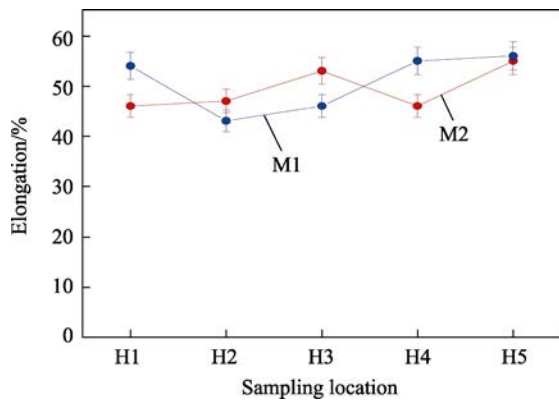


图10 试样伸长率
Fig.10 Elongation of the sample

表6 样品归一化处理
Tab.6 Sample normalization treatment

| Experiment number | Intensile strength | Elongation | Sum | Experiment number | Intensile strength | Elongation | Sum |
|-------------------|--------------------|------------|------|-------------------|--------------------|------------|------|
| M1-H1 | 0.45 | 0.85 | 1.3 | M2-H1 | 0.06 | 0 | 0.06 |
| M1-H2 | 0 | 0 | 0 | M2-H2 | 0 | 0.11 | 0.11 |
| M1-H3 | 0.57 | 0.23 | 0.8 | M2-H3 | 0.58 | 0.78 | 1.36 |
| M1-H4 | 0.83 | 0.92 | 1.75 | M2-H4 | 0.42 | 0 | 0.42 |
| M1-H5 | 1 | 1 | 2 | M2-H5 | 1 | 1 | 2 |

该制造方法在工业生产中的应用提供了可靠的保障，可以满足多种特殊需求。

3 结论

1) MIG 焊电弧增材制造 316L 和 Inconel625 功能梯度材料得到的试样成形质量良好，无气孔、热裂纹现象。

2) 沉积效率受多个因素影响，包括送丝速度、扫描速度、层间冷却时间等。实验表明，5%过渡比例梯度设计更加合理，有效沉积效率更高，达到 0.578 4 kg/h。

3) 单方向柱状晶的出现会提高金属的力学性能和耐久性。Ni 含量增加后，会与 Fe 发生反应，出现无限固溶现象，使奥氏体区扩大，提高样品强度。但 75%316L+25%Inconel625 样品出现裂纹，硬度达到最低值(173.5±3)HV。

4) 拉伸后出现断裂现象，说明其具有非常好的塑性。5%过渡比例梯度设计更加合理，平均最大强度达到(560± 12) MPa，平均屈服强度为(292±18) MPa，拉伸性能良好，该梯度材料样品具有较高强度和韧性，可以满足多种工业上的需求。

参考文献:

- [1] 王瑞超, 蔡川崎, 韩善果, 等. CMT 增材制造 316L 不锈钢成形效率与组织分析[J]. 金属加工(热加工), 2023(6): 18-23.
WANG R C, CAI C Q, HAN S G, et al. Analysis of Forming Efficiency and Microstructure of 316L Stainless Steel Made with CMT Additives[J]. MW Metal Forming, 2023(6): 18-23.
- [2] 田彩兰, 陈济轮, 董鹏, 等. 国外电弧增材制造技术的研究现状及展望[J]. 航天制造技术, 2015(2): 57-60.
TIAN C L, CHEN J L, DONG P, et al. Current State and Future Development of the Wire Arc Additive Manufacture Technology Abroad[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(2): 57-60.
- [3] 卢秉恒. 西安交通大学先进制造技术研究进展[J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 4-8.
LU B H. Research Progress of Advanced Manufacturing Technology in Xi'an Jiaotong University[J]. Engineering Science, 2013, 15(1): 4-8
- [4] FANG Y J, KIM M K, ZHANG Y L, et al. Particu-

- late-Reinforced Iron-Based Metal Matrix Composites Fabricated by Selective Laser Melting: A Systematic Review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 74: 592-639.
- [5] KANDUKURI S, ZE C. Progress of Metal AM and Certification Pathway[J]. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*, 2021, 6(4): 909-915.
- [6] 冯斐, 曹兴冈. 航空航天增材制造技术的应用及发展[J]. *航空精密制造技术*, 2021, 57(6): 45-49.
FENG F, CAO X G. Additive Manufacturing Technologies for Aerospace Applications and Development[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2021, 57(6): 45-49.
- [7] 杜东方, 张明, 余盈燕, 等. 增材制造高性能功能梯度材料研究进展[J]. *锻压装备与制造技术*, 2022, 57(5): 101-110.
DU D F, ZHANG M, YU Y Y, et al. Research Progress in Additive Manufacturing of High Performance Functional Gradient Materials[J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2022, 57(5): 101-110.
- [8] 陆连种. 双丝电弧增材制造钛-镍功能梯度材料微观组织与力学性能研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
LU L Z. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-Ni Functionally Graded Materials Made by Double Wire Arc Additive[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022.
- [9] 王晓光, 刘奋成, 方平, 等. CMT 电弧增材制造 316L 不锈钢成形精度与组织性能分析[J]. *焊接学报*, 2019, 40(5): 100-106.
WANG X G, LIU F C, FANG P, et al. Forming Accuracy and Properties of Wire Arc Additive Manufacturing of 316L Components Using CMT Process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(5): 100-106.
- [10] GRANDHI M, NGUYEN V, LIU Z C, et al. Copper-Nickel Functionally Magnetic Gradient Material Fabricated via Directed Energy Deposition[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 100: 47-54.
- [11] 李鹏飞, 李亮亮, 周建忠, 等. 激光增材制造不同成分变化率 316L/IN718 功能梯度材料组织性能研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(17): 226-239.
LI P F, LI L L, ZHOU J Z, et al. Microstructure and Properties of 316L/IN718 Functionally Graded Materials with Different Composition Gradients Fabricated by Laser Additive Manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(17): 226-239.
- [12] 招晶鑫, 淡振华, 孙中刚, 等. 增材制造 316L 不锈钢应力腐蚀研究进展[J]. *材料工程*, 2023, 51(5): 1-13.
ZHAO J X, DAN Z H, SUN Z G, et al. Research Progress in Stress Corrosion of Additively Manufactured 316L Stainless Steels[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(5): 1-13.
- [13] 李坤, 郑嘉懿, 杨庆超, 等. 316L 不锈钢应力腐蚀研究进展[J]. *有色金属材料与工程*, 2023, 44(5): 36-46.
LI K, ZHENG J Y, YANG Q C, et al. Research Progress on Stress Corrosion of 316L Stainless Steel[J]. *Nonferrous Metal Materials and Engineering*, 2023, 44(5): 36-46.
- [14] 张敏, 王新宝, 王浩军, 等. 激光熔覆 TC4/Inconel 625/316L 不锈钢梯度材料组织与性能[J]. *焊接学报*, 2023, 44(7): 16-23.
ZHANG M, WANG X B, WANG H J, et al. Structure and Properties of Laser Cladding TC4/Inconel 625/316L Stainless Steel Gradient Materials[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(7): 16-23.
- [15] 李杰, 周江维. 船用 316L 不锈钢管耐海水腐蚀研究[J]. *广船科技*, 2023, 43(1): 92-94.
LI J, ZHOU J W. Research on Corrosion Resistance of Marine 316L Stainless Steel Pipe to Seawater[J]. *GSI Shipbuilding Technology*, 2023, 43(1): 92-94.
- [16] WANG Z, ZHANG Z R, ZHANG L, et al. Comparison Study on the Semiconductive and Dissolution Behaviour of 316L and Alloy 625 in Hydrochloric Acid Solution[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(3): 403-414.
- [17] 肖华, 彭必荣, 欧阳忠华. 不同保护气体对连续激光线焊熔池的影响研究[J]. *电焊机*, 2023, 53(10): 103-108.
XIAO H, PENG B R, OUYANG Z H. Effect of Different Shielding Gas on Molten Pool of Laser Welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2023, 53(10): 103-108.
- [18] 方力, 侯智文, 黄俊润, 等. 电弧熔丝增材制造复合填充路径规划算法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(1): 98-104.
FANG L, HOU Z W, HUANG J R, et al. Composite Filling Path Planning Algorithm for Wire and ARC Additive Manufacturing[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(1): 98-104.
- [19] WU W, XUE J X, WANG L L, et al. Forming Process, Microstructure, and Mechanical Properties of Thin-Walled 316L Stainless Steel Using Speed-Cold-Welding Additive Manufacturing[J]. *Metals*, 2019, 9(1): 109.
- [20] HU Y L, LIN X, ZHANG S Y, et al. Effect of Solution Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Inconel 625 Superalloy Fabricated by Laser Solid Forming[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 767: 330-344.
- [21] 顾小燕, 林筱鹏, 王金凤, 等. 固溶处理对 CMT 电弧熔丝增材 Inconel 625 合金组织与性能调控[J]. *焊接学报*, 2023, 44(5): 70-76.
GU X Y, LIN X P, WANG J F, et al. Control of the Microstructure and Mechanical Properties of CMT Arc Wire Additive Manufactured Inconel 625 Alloy by Solution Treatment[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(5): 70-76.
- [22] DWIVEDI S, DIXIT A R, DAS A K, et al. A Novel Additive Texturing of Stainless Steel 316L through Binder Jetting Additive Manufacturing[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2023, 10(6): 1605-1613.

- [23] WEI C, SUN Z, CHEN Q, et al. Additive Manufacturing of Horizontal and 3D Functionally Graded 316L/Cu10Sn Components via Multiple Material Selective Laser Melting[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering: Transactions of the ASME*, 2019, 141(8): 081014.
- [24] SONAR T, BALASUBRAMANIAN V, MALARVIZHI S, et al. Maximizing Strength and Corrosion Resistance of InterPulsed TIG Welded Superalloy 718 Joints by RSM for Aerospace Applications[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, 35: 474-493.
- [25] 陈珮琳, 赵艳君, 李平珍, 等. 316L 不锈钢高温氧化及高温拉伸性能[J]. *材料热处理学报*, 2022, 43(11): 103-110.
- CHEN P L, ZHAO Y J, LI P Z, et al. High Temperature Oxidation and High Temperature Tensile Properties of 316L Stainless Steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2022, 43(11): 103-110.
- [26] 吴随松, 郭纯, 刘武猛, 等. ER316L 不锈钢电弧增材制造的组织与性能分析[J]. *新余学院学报*, 2023, 28(2): 10-18.
- WU S S, GUO C, LIU W M, et al. Analysis of Microstructure and Properties of ER316L Stainless Steel Wire Arc Additive Manufacturing[J]. *Journal of Xinyu University*, 2023, 28(2): 10-18.