

熔化极电弧增材制造 18Ni 马氏体钢组织和性能

杨东青, 王小伟, 黄勇, 李晓鹏, 王克鸿

(南京理工大学, 受控电弧智能增材技术工信部重点实验室, 南京, 210094)

摘要: 采用熔化极电弧增材工艺制备了成形良好的 18Ni 马氏体钢单墙体, 研究了增材构件热处理前、后的组织力学性能. 结果表明, 增材构件的微观组织主要是柱状树枝晶, 沉积态增材构件组织和力学性能存在局部差异: 构件组织顶部为马氏体, 硬度平均值为 360 HV; 中部和底部区域则为马氏体和奥氏体且中部硬度平均值为 468 HV, 略高于底部硬度平均值 437 HV; 构件纵向抗拉强度 (1375 MPa) 高出横向抗拉强度 (1072 MPa) 约 28.3%, 对应的断后伸长率分别为 1.1% 和 0.8%. 对增材构件进行 825 °C 保温 1 h 的固溶热处理后, 析出相重新溶入奥氏体, 构件组织转变为马氏体, 硬度值下降 (平均值为 328 HV), 变化波动小; 纵向和横向抗拉强度相当, 分别为 1025 MPa 和 1034 MPa, 断后伸长率分别为 6% 和 14%.

关键词: 熔化极电弧增材制造; 18Ni 马氏体钢; 固溶处理; 组织性能

中图分类号: TG 441.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20200608002

0 序言

马氏体时效钢是一种以马氏体为基体, 通过金属间化合物沉淀强化获得超高强度和良好塑性韧性的钢种^[1]. 目前, 该钢种在航空、航天以及军事等领域拥有广阔的应用前景^[2].

增材制造具有生产周期短、制造柔性高等特点^[3-4]. 现阶段, 马氏体时效钢增材研究集中在激光增材制造领域^[5-7]. 然而, 激光增材制造存在熔敷效率低, 零件致密度难以保证的问题. 以电弧为热源的熔丝电弧增材制造技术具有熔敷效率高、零件致密度高的特点^[8]. 但是, 采用电弧增材制造生产马氏体时效钢已见报道的研究较少. Xu 等人^[9]

采用等离子弧进行 18Ni 马氏体钢电弧增材试验, 研究了构件热处理前、后的组织性能. 结果发现, 热处理后构件抗拉强度提高 (热处理前 1118 MPa、热处理 1410 MPa), 断后伸长率下降 (热处理前 11.7%、热处理后 8.5%).

基于此, 文中拟采用熔化极电弧增材制造 18Ni 350 单墙体, 分别研究增材构件沉积态和固溶态的组织力学性能.

1 试验方法

使用直径 1.2 mm 的马氏体时效钢焊丝作为填充材料, 尺寸 450 mm × 200 mm × 10 mm 316L 不锈钢板为基板. 所用丝材和基板材料成分如表 1 所示.

表 1 丝材与基板化学元素组成 (质量分数, %)
Table 1 Chemical component of wire and substrate

材料	C	Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Al	Mn	Si	Fe
丝材	0.008	18	—	12	4.0	1.6	0.1	—	—	余量
基板	0.019	13.4	16.9	—	2.67	—	—	1.97	0.69	余量

增材试验系统包括熔化极脉冲电源、ABB 机器人、熔化极焊枪以及送气、送丝装置等, 以此增材

一个长 160 mm, 高 90 mm 的单墙体. 增材工艺参数如下: 送丝速度 8 m/min, 电弧移动速度 10 m/min. 使用 100% Ar 作为保护气, 气体流量 20 L/min. 试验采用往复堆积路径, 层间高度 2 mm, 层间温度 150 °C. 金相样和拉伸件切取位置及拉伸件尺寸如

收稿日期: 2020-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51805266, 51805265); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (30919011411).

图 1 所示. 每个位置各切取 2 个试样并分成 A, B 两组. 其中 B 组做 825 °C 保温 1 h 固溶热处理, A 组不做热处理. 分别进行微观组织观察和力学性能测试.

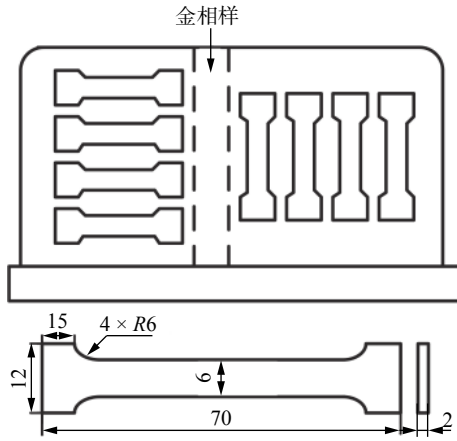


图 1 单墙体取样位置示意图 (mm)
Fig. 1 Sampling position of thin-walled part

2 试验结果分析

2.1 增材件宏观结构分析

图 2 是熔化极电弧增材的 18Ni 马氏体钢单墙



图 2 单墙体纵向截面宏观形貌
Fig. 2 Macro-graph of as-fabricated parts

体及其纵向截面图. 单墙体成形良好, 层与层之间形成冶金结合, 纵向截面未见气孔、裂纹等缺陷.

2.2 显微组织分析

如图 3a ~ 3c 所示, 沉积态单墙体组织主要为马氏体, 其形态是沿着增材方向生长的柱状树枝晶. 构件不同部位的组织存在局部差异: 直壁件顶部组织中马氏体占比较大 (作为基体), 奥氏体镶嵌在马氏体基体上; 底部区域组织组成与中部区域一致, 组织形貌较为细小. 沉积态单墙体顶部区域与中部及底部区域组织差异与电弧增材过程中热循环有关^[10]. 构件顶部区域没有后续层的再加热和局

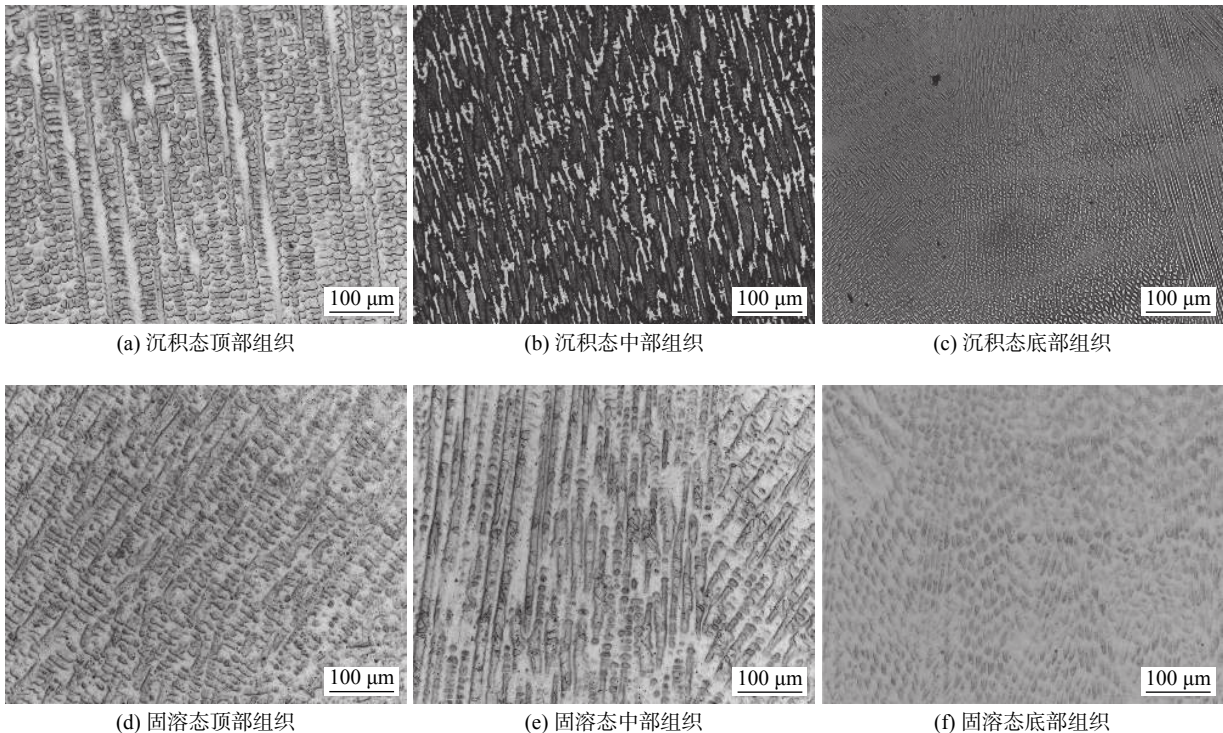


图 3 马氏体时效钢增材件不同位置显微组织

Fig. 3 Microstructure of maraging steel parts at different position. (a) top microstructure of the as-deposited sample; (b) middle microstructure of the as-deposited sample; (c) bottom microstructure of the as-deposited sample; (d) top microstructure of the solution-treated sample; (e) middle microstructure of the solution-treated sample; (f) bottom microstructure of the solution-treated sample

部熔化, 冷却后为熔池金属直接凝固组织. 构件中部和底部区域受到后续层电弧的多次加热, 导致部分溶质原子 (如 Ni, Ti, Mo 等) 发生富集, 降低了奥氏体回复温度, 因此这些区域有少量逆转变奥氏体^[9]. 底部区域靠近基板, 冷却速率快, 晶粒来不及长大, 组织形态细小.

如图 3d ~ 3f 所示, 单墙体经固溶处理后依然保持原有的组织形态. 不同的是, 固溶态构件组织全部转变为马氏体, 组织变粗大. 固溶处理使得溶质原子重新溶入奥氏体, 降低了沉积态富集区的元素浓度, 室温冷却后转变为成分均匀的马氏体组织^[11]. 同时, 固溶处理提供了晶粒继续形成和长大的条件, 因此, 构件经固溶处理后组织变粗大.

如图 4 所示, 沉积态和固溶态构件 XRD 衍射结果与上述组织分析基本一致.

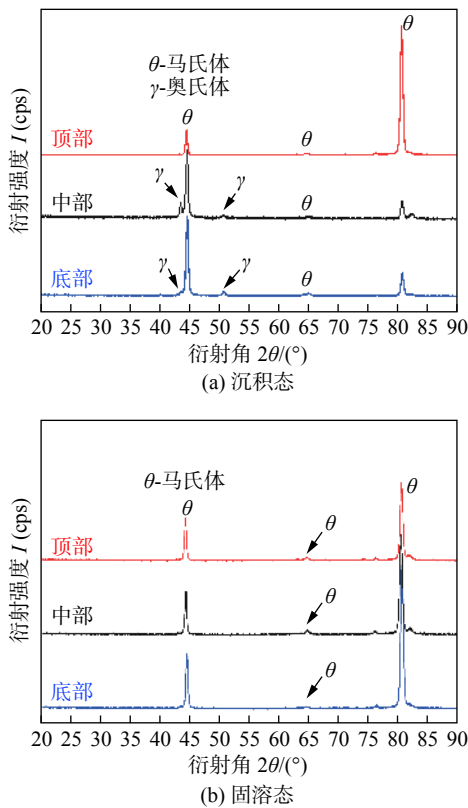


图 4 单墙体 XRD 衍射结果

Fig. 4 XRD diffraction result of thin-walled part. (a) as-deposited sample; (b) solution-treated sample

2.3 显微硬度

如图 5 所示, 沉积态构件硬度 (平均硬度 451 HV) 高于固溶态硬度 (平均硬度 328 HV). 沉积态硬度变化波动较大. 其中, 构件顶部区域硬度较低, 顶部以下区域硬度值较高. 固溶态构件硬度与沉积态顶部区域硬度值相当且波动较小. 沉积态构件这种硬

度差异主要是由于增材过程中顶部以下区域受到热循环多次加热, 导致这些区域有沉淀强化相析出^[9]. 构件顶部区域缺少后续层加热, 没有析出相, 硬度较低. 固溶处理使得析出相重新溶入奥氏体, 室温组织为全马氏体, 故构件硬度下降.

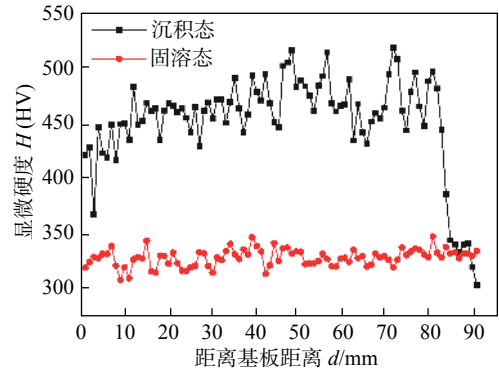


图 5 增材件横截面显微硬度

Fig. 5 Micro-hardness on the cross-section of specimens

2.4 拉伸试验结果

如图 6 所示, 沉积态构件纵向抗拉强度 (1 375 MPa) 高出横向抗拉强度 (1 072 MPa) 约 28. 3%, 纵向和横向对应的断后伸长率分别为 1.1% 和 0.8%. 固溶态构件横向和纵向抗拉强度相当, 分别为 1 025

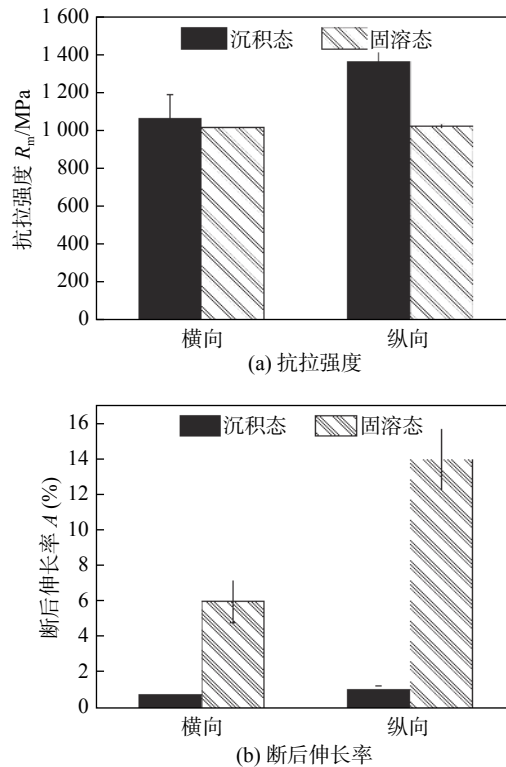


图 6 增材件拉伸结果

Fig. 6 Result of tensile testing. (a) tensile strength; (b) elongation

MPa 和 1 034 MPa, 断后伸长率分别为 6% 和 14%。单墙体热处理前、后拉伸力学性能变化与构件微观组织树枝晶晶间元素浓度有关。单墙体增材过程中发生元素偏析, 导致晶体之间溶质浓度高, 溶质原子在这些区域富集形成脆硬化合物, 构件延伸率低。固溶处理后各溶质原子均匀分布, 组织趋于均匀。因此, 固溶处理后单墙体断后伸长率提高。

图 7 为拉伸件热处理前后的断口 SEM 图。从图中可以看出, 两种状态下的断口形貌存在差异。如图 7a 所示, 沉积态断口形貌以韧窝为主, 部分韧窝中可见球形小颗粒。韧窝分布不均, 深度较浅, 面积较小。固溶态断口上分布有大量的韧窝, 韧窝深度较深, 面积较大, 如图 7b 所示。

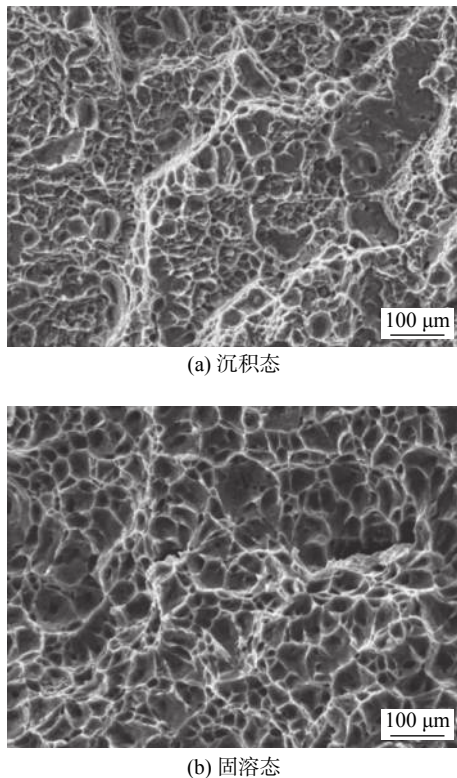


图 7 拉伸件断口形貌

Fig. 7 Fracture morphologies of the specimens. (a) as-deposited sample; (b) solution-treated sample

3 结论

(1) 采用熔化极电弧脉冲工艺可以增材出成形良好的马氏体时效钢构件, 表面无明显缺陷。

(2) 采用上述工艺获得的单墙体组织存在不均匀性。顶部组织为马氏体, 中部和底部区域为马氏体和奥氏体, 单墙体进行 825 °C 保温 1 h 的固溶处理后, 构件组织转变为全马氏体。

(3) 沉积态构件硬度为 451 HV, 高于固溶态硬度 (328 HV); 拉伸试验结果显示, 沉积态构件横向抗拉强度 (1 072 MPa) 低于纵向抗拉强度 (1 375 MPa) 约 28.3%, 断后伸长率分别为 1.1% 和 0.8%。固溶态构件纵向和横向抗拉强度分别为 1 025 MPa 和 1 034 MPa, 断后伸长率分别为 6% 和 14%。

参考文献

- [1] Li Y C, Yan W, Cotton J D, *et al.* A new 1.9 GPa maraging stainless steel strengthened by multiple precipitating species[J]. *Materials and Design*, 2015, 82: 56 – 63.
- [2] Rajkumar V, Arivazhagan N. Role of pulsed current on metallurgical and mechanical properties of dissimilar metal gas tungsten arc welding of maraging steel to low alloy steel[J]. *Materials and Design*, 2014, 63: 69 – 82.
- [3] 党晓玲, 王婧. 增材制造技术国内外研究现状与展望 [J]. *航空精密制造技术*, 2020, 56(02): 35 – 38.
Dang Xiaoling, Wang Jing. Research status and prospects of additive manufacturing technology at home and abroad[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2020, 56(02): 35 – 38.
- [4] 王天琪, 李天旭, 李亮玉, 等. 复杂结构薄壁件电弧增材制造离线编程技术 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(5): 46 – 47.
Wang Tianqi, Li Tianxu, Li Yuliang, *et al.* Off-line programming technology for arc additive manufacturing of thin-walled components with complex structures[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(5): 46 – 47.
- [5] Kempen K, Yasa E, Thijs L, *et al.* Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12(Part A): 255 – 263.
- [6] Casati R, Lemke J, Tuissi A, *et al.* Aging behaviour and mechanical performance of 18-Ni 300 steel processed by selective laser melting[J]. *Molecular Diversity Preservation International*, 2016, 6(9): 2 – 18.
- [7] Bai Y C, Yang Y Q, Wang, *et al.* Influence mechanism of parameters process and mechanical properties evolution mechanism of maraging steel 300 by selective laser melting[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 703(Supplement C): 116 – 123.
- [8] 王钰, 王凯, 丁东红, 等. 金属熔丝增材制造技术的研究现状与展望 [J]. *电焊机*, 2019, 49(1): 69 – 77.
Wang Yu, Wang Kai, Ding Donghong, *et al.* Research status and prospect of metal wire additive manufacturing technology[J]. *Electric Welding Machine*, 2019, 49(1): 69 – 77.
- [9] Xu Xiangfang, Gangulya Supriyo, Dinga Jialuo, *et al.* Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc additive manufacture process[J]. *Materials Characterization*, 2018, 143: 152 – 162.