

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.06

热处理温度对 316L 不锈钢电弧增材厚壁结构件组织与性能的影响

贾天英¹, 张洪超², 翟宗永³, 李长鑫⁴, 霍玉双^{1*}

1. 山东建筑大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250101

2. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300354

3. 山东济容热工科技有限公司, 山东 济南 250101

4. 济南法瑞纳焊接器材股份有限公司, 山东 济南 251618

摘要: 电弧增材制造(WAAM)316L 不锈钢厚壁结构件在沉积过程中经历复杂热循环, 易产生组织不均匀和残余应力, 焊后热处理是改善其综合性能的重要手段。本研究采用脉冲电流 WAAM 制备 316L 不锈钢厚壁构件, 分别实施了 800 °C、1 000 °C 和 1 100 °C 三种不同温度参数的热处理工艺, 探究热处理温度对电弧增材制造厚壁成形件的影响。结果表明, 800 °C 热处理后金相组织仍为奥氏体和少量铁素体, 硬度稍有下降, 自腐蚀电流密度降至热处理前的 63%~99%, 耐蚀性提升; 1 000 °C 热处理后树枝晶粗化明显, 硬度下降幅度增大, 自腐蚀电流密度增大至原来的 104%~169%, 耐蚀性降低; 1 100 °C 热处理后铁素体几乎全部溶入奥氏体中, 硬度显著下降, 自腐蚀电流密度增大至原来的 122%~265%, 耐蚀性急剧下降。

关键词: 电弧增材制造; 316L 不锈钢; 厚壁结构件; 热处理; 耐蚀性

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0052-09

Effect of Heat Treatment Temperature on Microstructure and Properties of WAAM 316L Stainless Steel Thick-Walled Components

JIA Tianying¹, ZHANG Hongchao², ZHAI Zongyong³, LI Changxin⁴, HUO Yushuang^{1*}

1. Shandong Jianzhu University, School of Materials Science and engineering, Jinan 250101, China

2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China

3. Shandong Jirong Thermal Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China

4. Farina (Jinan) Weldtec & Machinery Co., Ltd., Jinan 251618, China

Abstract: Thick-walled 316L stainless steel components fabricated by wire and arc additive manufacturing (WAAM) undergo complex thermal cycles during deposition, which tend to cause microstructural inhomogeneity and residual stress. Post-weld heat treatment is an important approach to improving their overall performance. In this study, 316L stainless steel thick-walled components were fabricated by pulsed-current WAAM and subjected to heat treatments at 800 °C, 1 000 °C, and 1 100 °C, respectively, to investigate the effect of heat treatment temperature on the as-deposited components. The results show that after heat treatment at 800 °C, the microstructure still consists of austenite and a small amount of ferrite, the hardness decreases slightly, and the self-corrosion current density drops to 63%-99% of the as-deposited value, indicating improved corrosion resistance. After heat treatment at 1 000 °C, dendritic coarsening becomes significant, the hardness decreases more markedly, and the self-corrosion current density increases to 104%-169% of the original value, indicating reduced corrosion resistance. After heat treatment at 1 100 °C, ferrite is almost completely dissolved into austenite, the hardness decreases significantly, and the self-corrosion current density increases to 122%-265% of the original value, indicating a drastic decline in corrosion resistance.

收稿日期: 2025-08-22 修回日期: 2025-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(2024TGC0066)

作者简介: 贾天英(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事电弧增材制造成型质量等方面的研究。

通讯作者: 霍玉双(1973—), 女, 副教授, 博士, 主要从事焊接数值模拟等方面的研究。E-mail: hys6789@126.com。

Keywords: wire and arc additive manufacturing; 316L stainless steel; thick-walled component; heat treatment; corrosion resistance

引用格式: 贾天英, 张洪超, 翟宗永, 等. 热处理温度对 316L 不锈钢电弧增材厚壁结构件组织与性能的影响[J]. 电焊机, 2026, 56(5): 52–60.

Citation: JIA Tianying, ZHANG Hongchao, ZHAI Zongyong, et al. Effect of Heat Treatment Temperature on Microstructure and Properties of WAAM 316L Stainless Steel Thick-Walled Components[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 52–60.

0 引言

厚壁结构件(厚度大于 20 mm 的厚板或外径与壁厚之比小于 20 的管道)广泛应用于航空航天、船舶、石油化工及压力容器等领域,其制造质量直接关系到装备的安全性与可靠性^[1-4]。传统制造模式难以兼顾成形效率与材料利用率,增材制造技术的快速发展为厚壁结构件制备提供了新途径^[5-6]。

电弧增材制造(Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM)以电弧为热源、丝材为原料进行逐层沉积,具有沉积速率高、材料利用率高、加工成本低及成形灵活等优势,适合大型零部件的增材制造^[7-11]。316L 奥氏体不锈钢因其耐腐蚀性能优异、力学性能良好,在高端装备制造领域应用广泛^[12-15]。WAAM 技术为复杂几何特征的 316L 构件制备提供了高效途径^[16]。Wang 等^[17]研究了不同电弧模式下的 WAAM 316L 单焊道多层薄壁件的显微组织,发现晶粒取向以<001>为主且生长方向与成形方向一致;任香会^[18]对比了 CMT、CMT 脉冲及直流脉冲三种模式下的 WAMM 316 单道多层薄壁件,三种模式下成形构件均无宏观气孔和塌陷等现象。然而,上述研究均会对薄壁构件,厚壁构件采用多层多道沉积方式,热循环更为复杂,易产生较高的残余应力、成分偏析及组织与性能的各向异性^[19-20],需通过热处理加以改善。

热处理是最常见的增材制造后处理工艺。当前,对于增材制造 316L 不锈钢构件,通常采用回复退火、均质化处理和固溶退火三种制度^[21-23]。Ronneberg 等^[22]和 Kong 等^[24]研究了选择性激光熔化(SLM)316L 试样在 700 °C 回复、800 °C~1 050 °C 均匀化和 1 200 °C 固溶退火后的组织和力学性能,发现均匀化热处理后各向异性的微观结构仍然存在,但高温固溶退火热处理后各平面上的晶粒逐渐变得均匀。Kurzynowski 等人^[25]对激光粉末床熔化

316L 试样进行 800 °C/5 h 热处理来消除残余应力,发现铁素体和奥氏体相界面中析出了 σ 相,消除应力降低了屈服强度但并不影响延伸率和抗拉强度。

综上,现有研究多集中于薄壁构件成形或 SLM 成形件的热处理,对 WAAM 厚壁构件热处理后的组织与性能缺乏系统研究。本文采用脉冲电流 WAAM 制备 316L 不锈钢厚壁构件,分别实施 800 °C、1 000 °C 均匀化和 1 100 °C 固溶退火处理,通过显微组织、硬度测试和电化学腐蚀分析,揭示热处理对 WAAM 厚壁构件组织、硬度及耐蚀性的影响规律。

1 实验材料及方法

沉积材料采用直径 1.2 mm 的 316L 奥氏体不锈钢焊丝,基体采用 Q235 低碳钢,化学成分见表 1。采用脉冲电流沉积模式进行 WAAM 制备,保护气氛为高纯度氩气(99.99%)。设计了四组工艺参数,具体见表 2。其中 1# 试样未采用摆动策略,2#、3#、4# 试样分别采用不同的摆动频率和振幅组合,道间停留时间均为 5 s。

表 1 基板及焊丝材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of substrate and welding wire (wt. %)

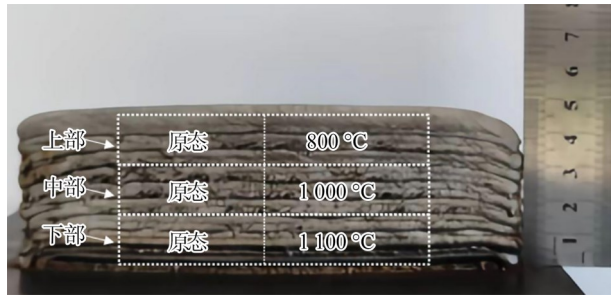
材料	C	Cr	Mn	Ni	
基板	≤0.18	—	0.35~0.8	—	
焊丝	≤0.03	18.0~20.0	1.0~2.5	11.0~14.0	
材料	Si	S	P	Cu	Mo
基板	0.30	0.04	0.04	—	—
焊丝	0.30~0.65	≤0.03	≤0.03	≤0.75	2.0~3.0

将四组成形件沿高度方向进行三等距轴向分割,获得上、中、下三个特征截面,取样策略见图 1。对四组试样的不同截面分别实施 800 °C、1 000 °C 和 1 100 °C 热处理,保温时间均为 1 h,冷却方式均为空冷,具体见表 3。采用金相显微镜系统对三个截面的显微组织进行表征。沿试样轴向以 0.4 mm 等间距分布选取 10 个测量点,建立从顶端至底部的硬度

表 2 成形件沉积工艺参数

Table 2 Deposition process parameters of formed parts

编号	沉积 电流 /A	沉积 电压 /V	沉积速度 /(mm·s ⁻¹)	层间停 留时间/s	工艺	摆动 频率 /Hz	振幅 /mm
1#	150	20	5	180	5道20层	—	—
2#	150	20	5	120	2道20层	2	5
3#	150	20	5	120	2道20层	3	5
4#	150	20	5	120	2道20层	4	5



(a) 横切



(b) 纵切

图 1 试样切割方式

Fig. 1 Specimen cutting method

表 3 热处理工艺参数

Table 3 Heat treatment process parameters

热处理 位置	热处理试样	热处理 温度/°C	热处理 时间/h	冷却 方式
上部	1#、2#、3#、4#	800	1	空冷
中部	1#、2#、3#、4#	1 000	1	空冷
下部	1#、2#、3#、4#	1 100	1	空冷

分布曲线。电化学腐蚀实验在标准三电极体系中完成。

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌

图 2 为四组工艺参数下 WAAM 厚壁构件的宏

观形貌。1#试样(无摆动)顶面几何形貌完整,熔覆轨迹清晰可辨,表面未观察到显著的飞溅物附着;侧壁区域 1~20 层因熔池重力作用呈现熔融金属溢流特征,其中 1~5 层未出现明显溢流,6~15 层溢流显著,16~20 层轻微溢流。2 号试样(振幅 5 mm、频率 2 Hz)顶面成形均匀性明显提高,表面呈现金属光泽且平整度优于 1#;侧壁层间分界清晰,沉积层结合致密,1~20 层整体几何形貌保持一致,表面粗糙度显著降低。3 号试样(振幅 5 mm、频率 3 Hz)顶面成形均匀性较好,但局部出现熔池失稳导致的微量溢流和局部塌陷缺陷,并伴随少量飞溅颗粒生成。4 号试样(振幅 5 mm、频率 4 Hz)顶面出现凹陷缺陷,侧视 1~5 层存在密集飞溅颗粒,5~10 层呈现异常层高增量,15~20 层因热输入累积效应导致塌陷加剧,顶面无法形成连续平整表面。对比可见,适当的摆动参数有利于改善侧壁成形质量,但摆幅或频率过大反而导致成形恶化。

2.2 金相组织

图 3 为热处理前四组试样的金相组织。1#试样组织为奥氏体+少量铁素体,熔合线上方为树枝晶,下方为密集分布的柱状晶,且随着沉积层数增加,树枝晶和柱状晶的数量逐渐减少,存在少量气孔。2#试样组织同为奥氏体+少量铁素体,熔合线上方为树状晶,下方为分布密集且细小的柱状晶,但粗大树枝晶较 1#减少,这与沉积时采用摆动策略使组织更加均匀有关。3#试样腐蚀后的边界颜色较深,与 2#相近,组织相似,且晶粒有缩短和细小的趋势,无气孔、夹杂和裂纹等缺陷;下部晶粒最细小、分布最密集。4#试样腐蚀形貌与 3#成形件极为相似,从上到下观察,下部的晶粒最细小分布最密集,无气孔、夹杂和裂纹等缺陷。

图 4 为成形件上部经过 800 °C 热处理后的金相组织。与热处理前相比,熔合线上方的树枝晶分布更加均匀,熔合线下方的柱状晶形状更接近短棒状,晶胞体积与热处理前变化不大,但整体组织分布更加均匀。2#、3#、4#试样中,热处理前存在的粒状或棒状树枝晶在 800 °C 热处理后数量增多、晶粒变得粗大且清晰可见,且随摆动频率的增加,显微组织均匀性提高,热处理后这一特征更加明显。

图 5 为成形件中部经过 1 000 °C 热处理后的金

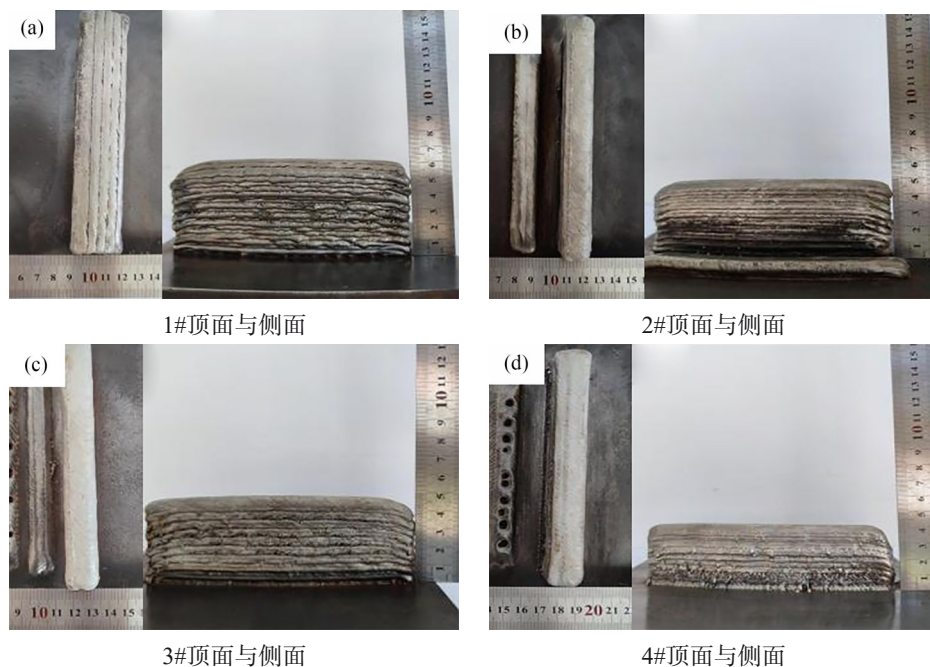


图2 成形件宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic appearance of formed parts

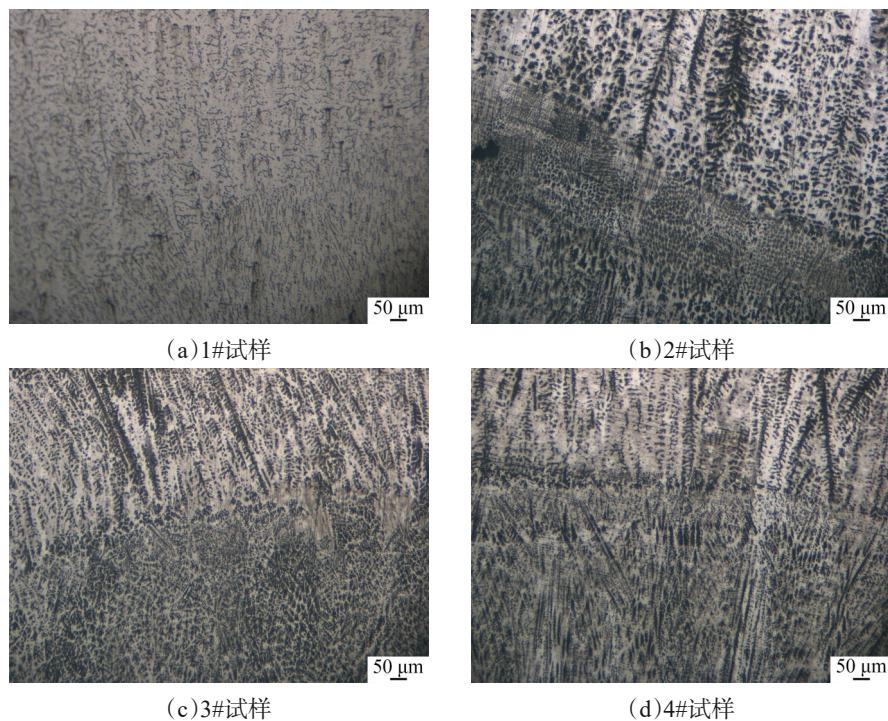


图3 热处理前成形件金相组织

Fig. 3 Metallographic diagram of formed parts before heat treatment

相组织。整体而言,1 000 °C热处理后,树枝晶变大的趋势非常明显,柱状晶变大的幅度小,但分布更加密集。在2#、3#、4#试样中观察到更多的树枝晶的一次枝晶以及二次枝晶,且一次枝晶较二次枝晶

粗大。对比未进行热处理的试样分析,熔合线上方的树枝晶与熔合线下方的柱状晶变得比热处理前的粗大,组织分布更加密集且均匀。800 °C和1 000 °C热处理又被称为均质化,从图4、图5的显微组织来

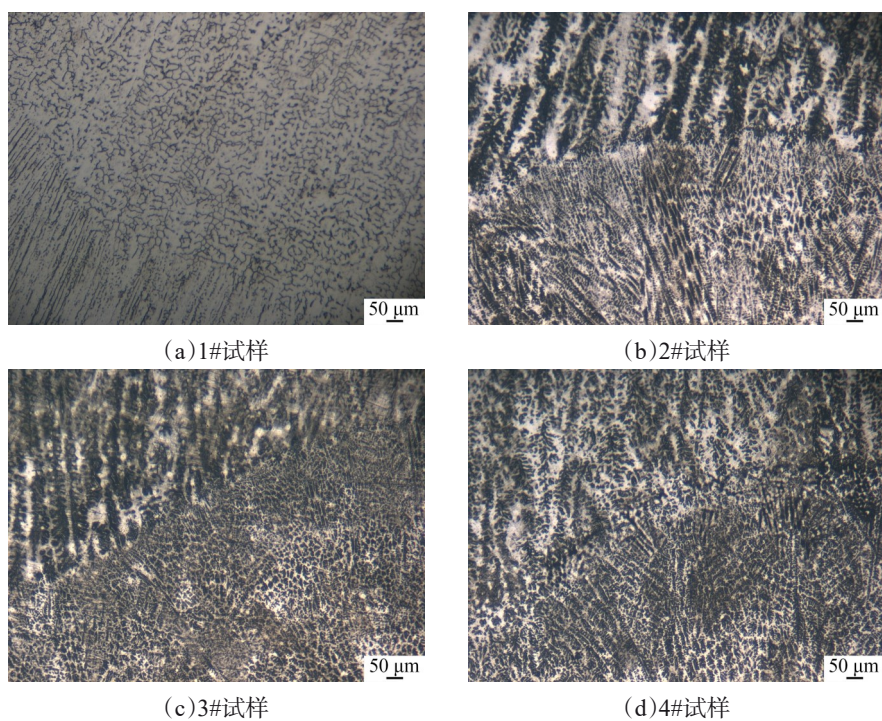


图4 成形件上部800 °C热处理状态下的金相组织

Fig. 4 Metallographic diagram of the upper part after 800 °C heat treatment

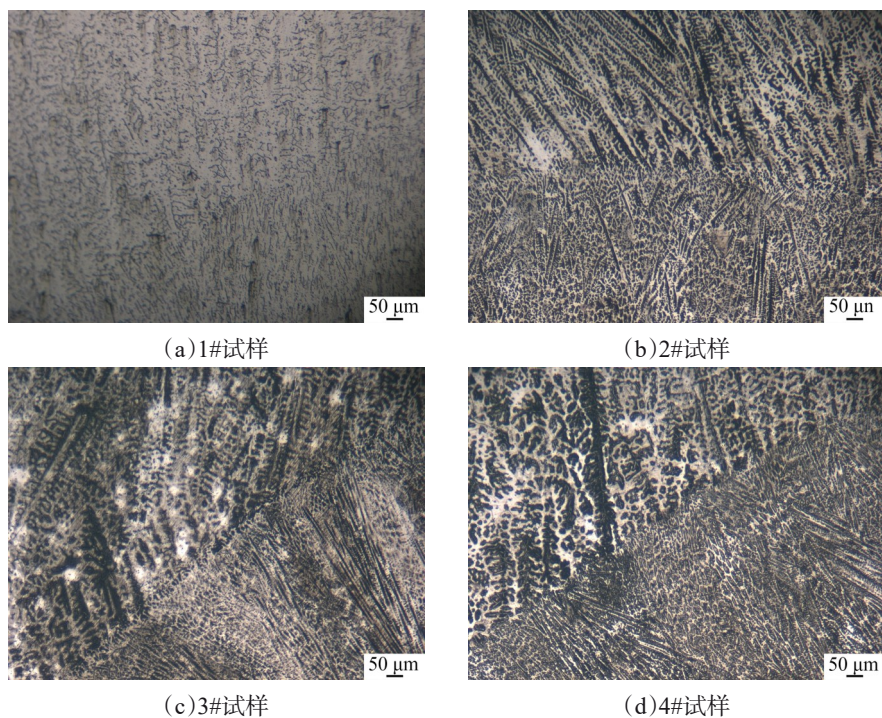


图5 成形件中部1 000 °C热处理状态下的金相图

Fig. 5 Metallographic diagram of the middle part of the formed part after 1 000 °C heat treatment

看,1 000 °C热处理比800 °C热处理可以更有效的实现均质化。

图6为成形件下部经过1 100 °C热处理后的金

相图。可以更加清晰的看到树枝晶与柱状晶的形貌,其中树枝晶和柱状晶都变得极为粗大。可以清晰的观察到树枝晶的一次枝晶和二次枝晶,4#试样

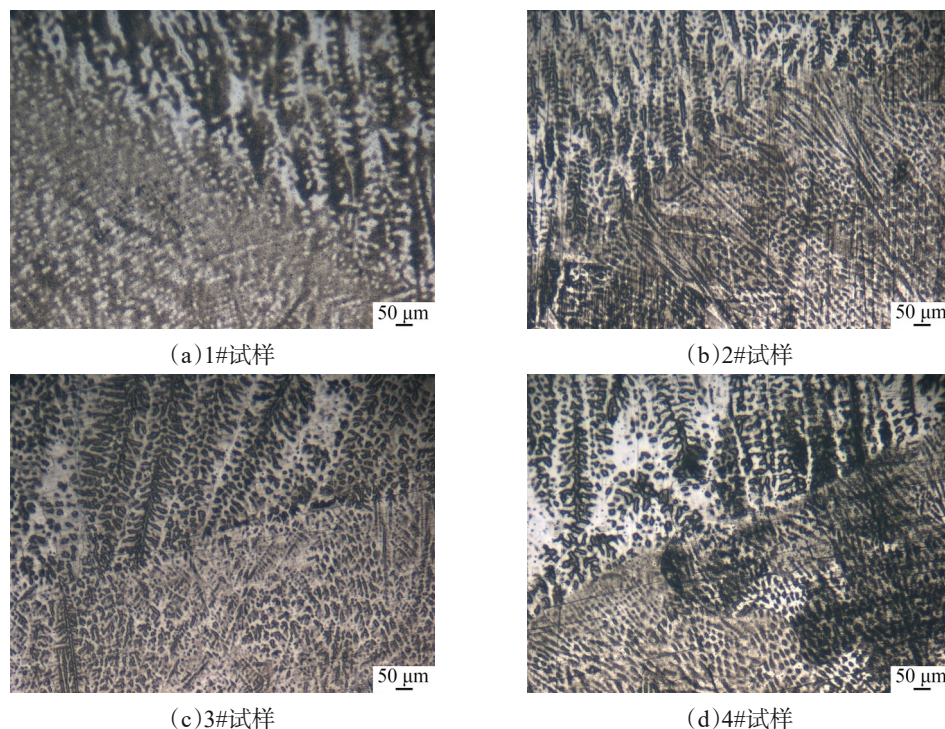


图6 成形件下部1100 °C热处理状态下的金相图

Fig. 6 Metallographic diagram of the lower part after 1100 °C heat treatment

显微组织中存在着极少量的三次枝晶,其附近分布着密集的树枝晶。树枝晶和柱状晶的形貌较800 °C和1000 °C热处理存在着晶胞大小的明显差异,1100 °C热处理时形成的粗大树枝晶和柱状晶较多。在热处理之前由于热积累而形成的极少量粗大树枝晶在1100 °C热处理后使得粗大树枝晶的数量急剧上升,对比热处理之前的金相图,粗大树枝晶和柱状晶所占图的面积急剧增大。

2.3 硬度分析

图7为四组试样热处理前后的硬度分布对比。1#试样的上部经800 °C热处理后硬度出现小幅度上升,可能与800 °C均质化作用有关,但上升幅度仅占原硬度的7%。2#、3#、4#试样经800 °C热处理后硬度均小幅下降,每组试样的硬度分布较热处理前更加均匀。1000 °C热处理后,下降幅度较800 °C和热处理前更大,均质化效果更加明显。1100 °C热处理后,显微组织急剧粗化,硬度急剧下降。总体而言,随着热处理温度从800 °C升高至1100 °C,硬度下降趋势加剧,1100 °C热处理下降幅度最大。

2.4 耐腐蚀性能分析

自腐蚀电流是用来评估材料抗腐蚀能力的重

要参数,自腐蚀电流密度越大,材料越容易腐蚀,自腐蚀电流密度越小,材料的抗腐蚀能力越强^[26]。

表4为成形件上部800 °C热处理后的电化学腐蚀数据。1#试样自腐蚀电流密度和自腐蚀电位均为最小,综合抗腐蚀能力最强,其原因是未采用摆动策略,熔池扰动小,更加稳定,钝化膜完整性好;其余试样则随摆动频率升高,枝晶粗化加剧,耐腐蚀性降低。根据自腐蚀电位,1#试样腐蚀倾向最小,4#试样腐蚀倾向最大。800 °C热处理后,试样自腐蚀电流密度降至热处理前的63%~99%,耐蚀性得到提升。

表5为成形件中部1000 °C热处理后的电化学腐蚀数据。3#试样的自腐蚀电流密度最小,抗腐蚀能力最强,原因可能是摆动扰动适中、组织分布更均匀。1#试样自腐蚀电位最大,腐蚀倾向最小。与800 °C热处理相比,1000 °C热处理后自腐蚀电流密度增大、自腐蚀电位降低,耐蚀性下降。1000 °C热处理后仅3#试样自腐蚀电流密度降至原来的62%,其余试样增大至原来的104%~169%,耐蚀性降低。

表6为成形件下部1100 °C热处理后的电化学腐蚀数据。1#试样自腐蚀电流密度最小,抗腐蚀能

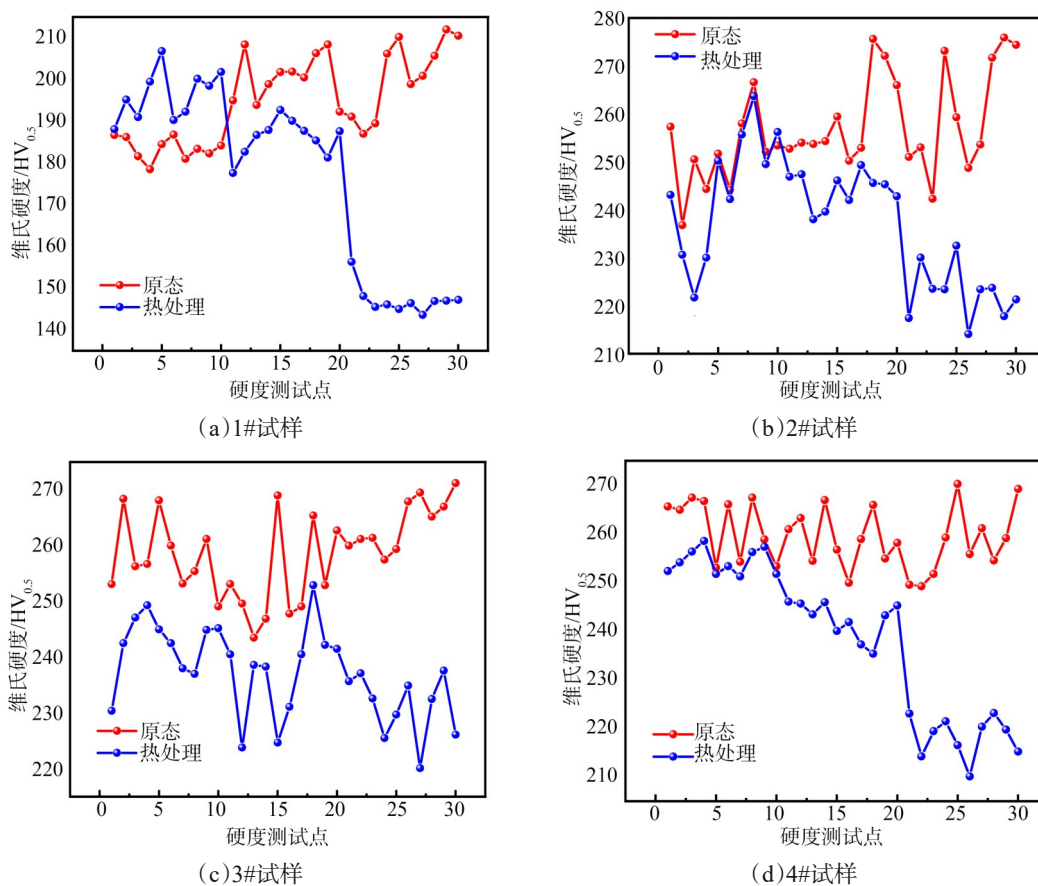


图7 热处理前后硬度对比

Fig. 7 Comparison of hardness before and after heat treatment

表4 成形件上部800℃热处理后的电化学腐蚀数据

Table 4 Electrochemical corrosion data of the upper part of the formed part after 800℃ heat treatment

试样 编号	自腐蚀电流密度 $\times 10^{-6}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	自腐蚀电 位/V	自腐蚀电流密度热处理 前后变化百分比/%
1#	2.069	-0.283	-14
2#	3.410	-0.362	-1
3#	3.565	-0.317	-37
4#	4.410	-0.383	-2

表5 成形件中部1000℃热处理后的电化学腐蚀数据

Table 5 Electrochemical corrosion data of the middle part of the formed part after 1000℃ heat treatment

试样 编号	自腐蚀电流密度 $\times 10^{-6}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	自腐蚀电 位/V	自腐蚀电流密度热处理 前后变化百分比/%
1#	4.061	-0.296	69
2#	3.565	-0.317	4
3#	3.515	-0.359	-38
4#	5.187	-0.361	15

力最强,其原因可能是未采用摆动的试样枝晶细化、耐蚀性更优,而采用摆动的试样经1100℃热处

理后粗大枝晶进一步长大,耐蚀性恶化。1100℃热处理后仅3#试样自腐蚀电流密度降至原来的72%,其余试样增大至原来的122%~265%,耐蚀性急剧下降。

表6 成形件下部1100℃热处理后的电化学腐蚀数据

Table 6 Electrochemical corrosion data of the lower part of the formed part after 1100℃ heat treatment

试样 编号	自腐蚀电流密度 $\times 10^{-6}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	自腐蚀电 位/V	自腐蚀电流密度热处理 前后变化百分比/%
1#	3.705	-0.266	54
2#	9.085	-0.249	165
3#	4.057	-0.391	-28
4#	5.501	-0.273	22

图8为不同温度下试样热处理前后的Tafel曲线对比。1#试样未采用摆动策略,热处理后自腐蚀电位变大,腐蚀倾向变小;2#、3#、4#试样均采用摆动策略,热处理后自腐蚀电位变小,腐蚀倾向变大。总体来看,采用摆动策略的构件热处理后自腐蚀电

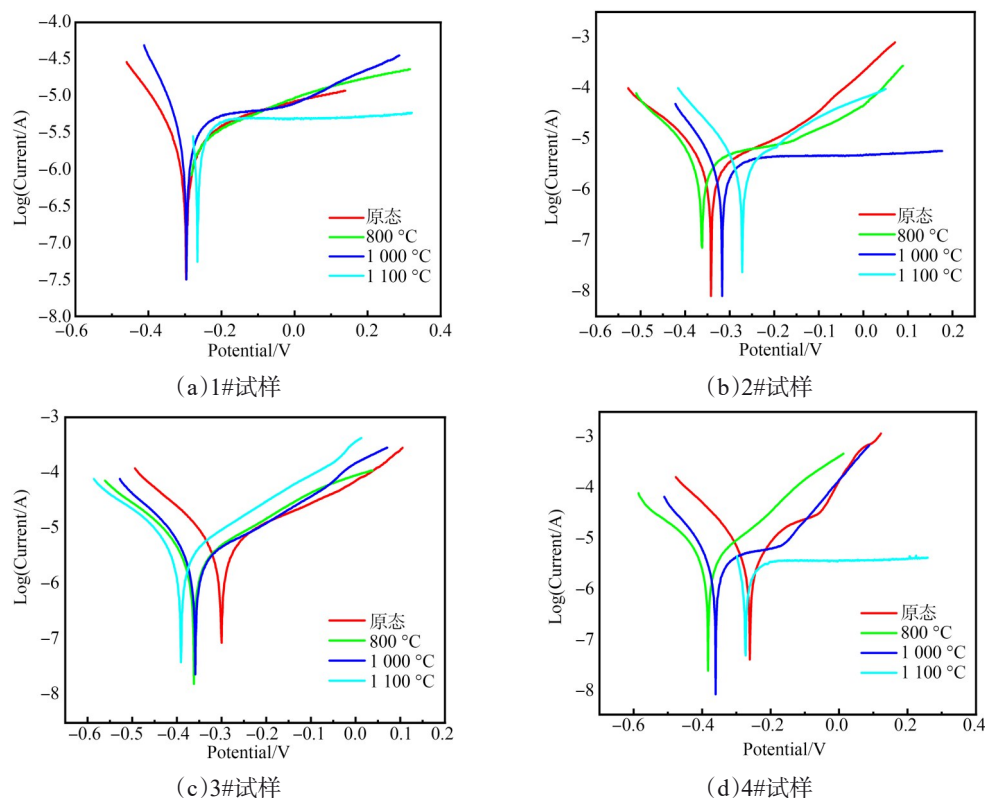


图8 成形件热处理前后Tafel曲线对比

Fig. 8 Comparison of Tafel curves before and after heat treatment

位呈下降趋势,腐蚀倾向增大。

3 结论

(2)电弧增材制造 316L 厚壁成形件经 800 °C、1 000 °C 和 1 100 °C 热处理后,树枝晶和柱状晶均随温度升高而粗化,其中 1 100 °C 固溶退火后粗化最为急剧。硬度总体呈下降趋势,800 °C 热处理后,采用摆动策略的试样硬度小幅下降(未摆动试样小幅上升约 7%),1 000 °C 下降幅度增大,1 100 °C 呈断崖式下降。

(2)800 °C 均匀化热处理后,四组试样自腐蚀电流密度均降至热处理前的 63%~99%,耐蚀性提升;1 000 °C 热处理使厚壁成形件的抗腐蚀能力降低,1 100 °C 热处理大幅降低了厚壁成形件的抗腐蚀能力。

(3)采用摆动策略的厚壁成形件经过热处理后其自腐蚀电位呈下降趋势,腐蚀倾向增大,抗腐蚀能力大幅度降低。

参考文献:

- [1] 周济. 智能制造—“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015(17): 2273-2284.
ZHOU J. Intelligent Manufacturing—Main Direction of “Made in China 2025” [J]. China Mechanical Engineering, 2015(17): 2273-2284.
- [2] 孙清洁, 李军兆, 刘一搏. 大型厚壁构件窄间隙激光焊接研究现状[J]. 电焊机, 2020, 50(7): 9-17.
SUN Q J, LI J Z, LIU Y B. Research status of narrow gap laser welding for large thick-wall component [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(7): 9-17.
- [3] 张双杰, 李强, 王丽娟, 等. 厚壁管件有芯棒开式冷挤压成形极限分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 53-57.
ZHANG S J, LI Q, WANG L J, et al. Analysis on the Forming Limit of Cold Open-die Extrusion with Mandrel for the Thick-walled Tube [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 53-57.
- [4] 马晓晖. P91 钢厚壁管立式挤压机工艺模拟研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2011.
MA X H. Simulation and Experimental Research on Vertical Extrusion Process for P91 Thick Wall Steel

- Tube [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2011.
- [5] 徐文虎, 张培磊, 蒋旗, 等. 电弧轨迹对 CMT 电弧增材制造 Inconel625 合金厚壁件组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2020, 44(10): 17-21.
- XU W H, ZHANG P L, JIANG Q, et al. Effect of Arc Trajectory on Microstructure and Properties of Inconel 625 Alloy Thick-Wall Parts by CMT Arc Additive Manufacturing[J]. Materials For Mechanical Engineering, 2020, 44(10): 17-21.
- [6] 孙跃, 冯曰海, 刘思余, 等. 大厚度高氮钢多层多道等离子弧增材构件的组织与性能分析[J]. 材料导报, 2020, 34(22): 22118-22123.
- SUN Y, FENG Y H, LIU S Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of the Large Thickness High Nitrogen Austenitic Stainless Steel Component Deposited by Multi-layer and Multi-pass Plasma Arc Additive Manufacturing Process[J]. Materials Reports, 2020, 34(22): 22118-22123.
- [7] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4): 465-481.
- [8] Busachi A, Erkoyuncu J, Colegrove P, et al. Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications [C]//4th CIRP Global Web Conference on Understanding the Life Cycle Implications of Manufacturing, 2015, 37: 48-53.
- [9] Williams S W, Martina F, Addison A C, et al. Wire plus arc additive manufacturing [J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(7): 641-647.
- [10] Dinovitzer M, Chen X H, Laliberte J, et al. Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure [J]. Additive Manufacturing, 2019, 26: 138-146.
- [11] 余圣甫, 禹润缙, 何天英, 等. 电弧增材制造技术及其应用的研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(3): 198-209.
- YU S F, YU R S, HE T Y, et al. Wire Arc Additive Manufacturing and Its Application: Research Progress [J]. Materials China, 2021, 40(3): 198-209.
- [12] Deb Roy T, Wei H L, Zuback J S, et al. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties[J]. Progress in materials science, 2018, 92: 112-224.
- [13] Chakkravarthy V, Jerome S. Printability of multiwalled SS 316L by wire arc additive manufacturing route with tunable texture[J]. Materials Letters, 2020, 260: 126981.
- [14] 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(05): 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(05): 100-106.
- [15] 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.
- [16] Jin W, Zhang C, Jin S, et al. Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review[J]. Appl. Sci., 2020, 10: 1563.
- [17] Wang L, Xue J, 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, 2019, 751: 183-190.
- [18] 任香慧, 梁文奇, 王瑞超, 等. 焊接模式对电弧增材制造 316 不锈钢组织及力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2024, 45(04): 79-85.
- REN X H, LIANG W Q, WANG R C, et al. Effects of different welding modes on microstructure and mechanical properties of 316 stainless steel by wire arc additive manufacturing [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2024, 45(04): 79-85.
- [19] Qiu Z, Wu B, Wang Z, et al. Effects of post heat treatment on the microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C276 alloy[J]. Materials Characterization, 2021, 177: 111158.
- [20] Tascioglu E, Karabulut Y, Kaynak Y. Influence of heat treatment temperature on the microstructural, mechanical, and wear behavior of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed additive manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(5-6): 1947-1956.
- [21] 李科, 林义民, 王飞, 等. 固溶处理对电弧增材制造超级双相不锈钢微观组织及摩擦磨损性能的影响[J].