

Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头 微观组织及力学性能

乔小丽¹, 曹帅², 武靖伟³, 张建晓¹, 黄健康², 樊丁²

(1. 兰州兰石重型装备股份有限公司, 兰州, 730314; 2. 兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州, 730050; 3. 中国科学院兰州化学物理研究所, 固体润滑国家重点实验室, 兰州, 730000)

摘要: 针对 Inconel 600 镍基合金在石化装备行业的应用焊接问题, 选择合适的焊接工艺是其所面临的一项挑战. 采用 PAW + TIG 工艺流程对厚度为 6 mm 的 Inconel 600 镍基合金进行焊接, 应用光学显微镜、扫描电镜和拉伸试验机等对 Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头的微观组织及其性能进行研究. 微观组织分析结果表明, 接头焊缝表面成形光滑平整, 半椭圆状的鱼鳞纹均匀分布, 接头母材区域和热影响区的组织均为细小的等轴晶奥氏体, 其中热影响区晶粒的尺寸大于母材区, 焊缝区域的组织为树枝晶; 接头的抗拉强度达到 589 MPa, 接头断裂类型为韧性断裂, 焊接接头具有良好的塑性和抗弯曲性能; 焊缝处电化学腐蚀测试结果表明, 在焊接热影响区域局部腐蚀敏感性增加, 说明焊接接头的耐腐蚀性降低; 对焊缝退火处理并进行性能测试的结果表明, 退火后焊接接头析出针状第二相, 其在晶界和孪晶界处形成了一定的强化效应, 能够抑制晶粒长大并影响材料的整体性能. 综合分析焊接接头微观组织及其性能表明, 采用 PAW + TIG 的接头热稳定性较好, 能够满足其在高温条件下的工作要求.

创新点: (1) 采用 PAW + TIG 工艺流程可实现对厚度为 6 mm 的 Inconel 600 镍基合金的有效焊接, 焊缝表面光滑整洁.
(2) 焊接接头具有较好的综合力学性能, 抗拉强度达 589 MPa, 具有较好的塑性和抗弯曲性能.
(3) 经退火后焊缝析出第二相, 有利于焊接接头塑性的提高.

关键词: 镍基合金; PAW + TIG; 微观组织; 力学性能; 退火

中图分类号: TG 442 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20231225002

Microstructure and mechanical properties of Inconel 600 nickel-based alloy PAW + TIG joints

QIAO Xiaoli¹, CAO Shuai², WU Jingwei³, ZHANG Jianxiao¹, HUANG Jiankang², FAN Ding²

(1. Lanzhou LS Heavy Equipment Co., Ltd., Lanzhou, 730314, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of technology, Lanzhou, 730050, China; 3. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: Addressing the welding challenges of Inconel 600 nickel-based alloy in the petrochemical equipment industry, selecting an appropriate welding process is challenging. A 6 mm thick Inconel 600 nickel-based alloy is welded using the PAW + TIG process. The microstructure and mechanical properties of the Inconel 600 nickel-based alloy PAW + TIG joints are studied using optical microscopy, scanning electron microscopy, and tensile testing machine. Microstructure analysis shows that the joint weld surface is smooth and even, with a semi-elliptical fish scale pattern uniformly distributed. Both the base material area and the heat-affected zone exhibit fine equiaxed austenite crystals, with the grain size in the heat-affected zone being larger than in the base material area. The weld zone has a dendritic structure. The tensile strength of the joint reaches 589 MPa, and the fracture type is ductile, indicating good plasticity and bending resistance of the welded joint. Electrochemical corrosion tests at the weld indicate increased localized corrosion sensitivity in the heat-affected zone, suggesting reduced corrosion resistance of the welded joint. Post-

weld annealing and performance testing shows that annealing precipitated needle-like second phases, forming a certain strengthening effect at grain boundaries and twin boundaries, which can inhibit grain growth and affect the overall performance of the material. A comprehensive analysis of the microstructure and performance of the welded joints shows that the PAW + TIG joints have good thermal stability, meeting the requirements for high-temperature operation.

Highlights: (1) The use of PAW + TIG process allows for effective welding of 6 mm thick Inconel 600 nickel-based alloy, achieving a smooth and neat weld surface.

(2) The welded joints possess good comprehensive mechanical properties, with a tensile strength of 589 MPa, and exhibit good plasticity and bending resistance.

(3) Post-annealing, the weld precipitates a second phase, which is beneficial for enhancing the plasticity of the welded joints.

Key words: nickel-based alloy; PAW + TIG; microstructure; mechanical properties; anneal

0 序言

随着石油和精细化工行业的快速发展,在各类具有严峻腐蚀特性的环境中,如何选择合适的设备材料成为产品制造中的一项重大挑战^[1-3]。Inconel 600 是一种 Ni-Cr-Fe 固溶强化合金,国内牌号为 N06600,在 700 °C 以下具有优良的耐热性和高塑性,其特点是熔点高、耐热、耐腐蚀、强度高,具有良好的抗氧化性能、力学性能和加工性能,因为其良好的耐高温腐蚀性和抗氧化性能,所以常用于制造化工设备和石油化工装备^[4-6]。

镍基合金传统的焊接方法有埋弧焊、钨极氩弧焊、焊条电弧焊等^[7-9]。TIG 对镍基合金焊接应用最为广泛^[10],焊接接头组织及性能与工艺参数密切相关。杨子威等人^[11]采用等离子和 TIG 分别对 Inconel 600 进行焊接,研究不同焊接方法对其显微组织和力学性能的影响,结果表明焊缝显微硬度均低于母材,TIG 接头的硬度低于等离子焊接接头。PAW 是在钨极氩弧焊的基础上通过压缩电弧的方法来获得的一种高效焊接方法^[12]。TIG 自由的电弧具有良好的覆盖能力,添加适当的填充金属,可达到正面成形美观的效果,但焊接时需开坡口,且很

难实现单面焊双面成形^[13]。PAW + TIG 可同时发挥两种焊接方法的优势,将电弧易控制、焊缝成形美观、焊缝质量高、焊接变形小和探伤合格率高等优点体现出来,从而提高生产效率^[14]。文中采用 PAW + TIG 方法对 Inconel 600 镍基合金进行焊接,考察了焊缝的微观组织及力学性能,从而为 Inconel 600 镍基合金的实际生产应用提供有力的理论支撑和参考依据。

1 试验方法

试验选用规格为 600 mm × 65 mm × 6 mm 的 Inconel 600 钢板作为试验母材,选用直径为 1.0 mm 的 ERNiCr-3 作为 TIG 填充材料,母材及焊丝的化学成分如表 1 所示,母材抗拉强度为 585 MPa,屈服强度为 35 MPa,断后伸长率为 20%。试验所选用的焊接设备为专用 PAW + TIG 焊机,其焊接示意图如图 1(a) 所示,Inconel 600 板材选用如图 1(b) 所示焊接坡口,等离子弧焊枪喷嘴应选择铜制三孔扩散式喷嘴。PAW 和 TIG 焊枪均选择直径为 3.2 mm 的钨钨极,选用直流正接。PAW + TIG 组合焊接时,以 PAW 打底,填丝 TIG 紧随其后盖面,依次盖面 3 次,填充示意图如图 1(b) 所示。

表 1 Inconel 600 及焊丝 ERNiCr-3 化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of the Inconel 600 and ERNiCr-3 metal wire

材料	Ni	Cr	Fe	Cu	Mn	C	Si	S	P	Al	Ti
Inconel 600	73.41	15.98	7.83	0.50	1.00	0.150	0.50	0.015	0.015	0.30	0.3
ERNiCr-3	74.75	19.58	1.75	0.01	3.22	0.021	0.28	0.005	0.004	0.08	0.3

在焊接过程中焊枪固定不动,起弧后焊枪随着焊接平台移动完成焊接,待试板冷却后拍照记录焊

缝表面成形,取样、打磨和腐蚀并观察焊缝形貌和焊缝组织,按照 GB/T 228—2002 《金属材料室温冲

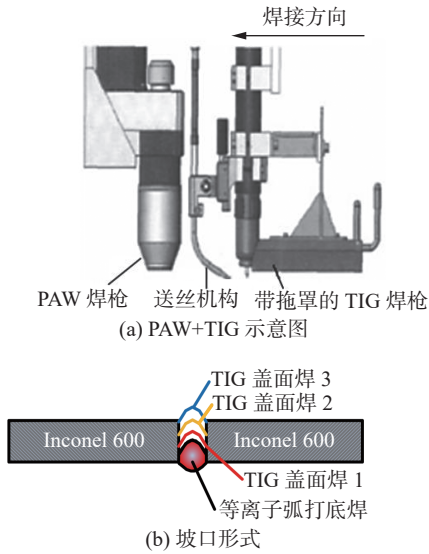


图 1 Inconel 600 PAW + TIG 接头填充示意图

Fig. 1 Schematic diagram and welding test diagram of Inconel 600 PAW + TIG joints. (a) PAW + TIG diagram; (b) groove form

击试验方法》^[15] 制备焊接接头拉伸试样. 焊接基本工艺参数如表 2 所示, 焊接速度为 240 ~ 250 mm/min, 保护气采用 95%Ar + 5%H₂, 流速为 8 ~ 12 L/min, 保护罩 Ar 气流量为 10 ~ 15 L/min.

表 2 基本工艺参数

Table 2 Basic welding process parameters

层数	焊接方法	送丝速度 $v_f(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V
1	PAW	—	210 ~ 250	27 ~ 29
3	TIG	22	230 ~ 260	15 ~ 17

2 试验结果与分析

2.1 接头宏观形貌

Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 焊接接头形貌如图 2 所示, 由图 2(a) 可知, 焊缝呈银白色, 焊缝

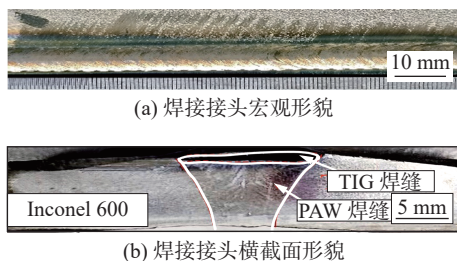


图 2 Inconel 600 PAW + TIG 接头形貌

Fig. 2 Morphology of the Inconel 600 PAW + TIG joint. (a) macroscopic morphology; (b) cross-sectional morphology

表面成形均匀、光滑, 鱼鳞纹均匀分布, 未出现明显的夹渣、咬边和未熔合等宏观缺陷. 接头横截面形貌如图 2(b) 所示, 接头呈上大下小的形貌, PAW 焊缝和 TIG 焊缝两部分, 且具有清晰的分界线.

2.2 接头微观组织

Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头微观组织如图 3 所示, 熔合线附近无明显的孔洞和裂纹等缺陷, 两者完全熔合. 母材和热影响区的组织为奥氏体, 与母材相比, 热影响区晶粒的尺寸较大. 焊缝区域的组织为树枝晶, 垂直于熔合线生长. Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头熔合线 EDS 线扫描如图 4 所示, 焊缝到母材方向 Ni 元素含量明显增加、Fe 元素含量减少、C 元素和 Cr 元素含量几乎保持不变. 焊缝部位的 Ni 元素和 Fe 元素含量之比为 3:1, 故判断焊接接头的物相主要为 Ni₃Fe 相. 如图 5 所示为焊接接头 XRD 图谱, 分析结果表明接头物相主要为 FeNi₃ 相, 经退火热处理后出现第二相, 为 γ -(Fe,Ni) 化合物, 结合图 3 中 SEM 可知焊缝处 Fe 元素、Ni 元素形成了固溶体相, 并且焊接接头熔合线 XRD 分析结果与 EDS 线扫描结果一致.

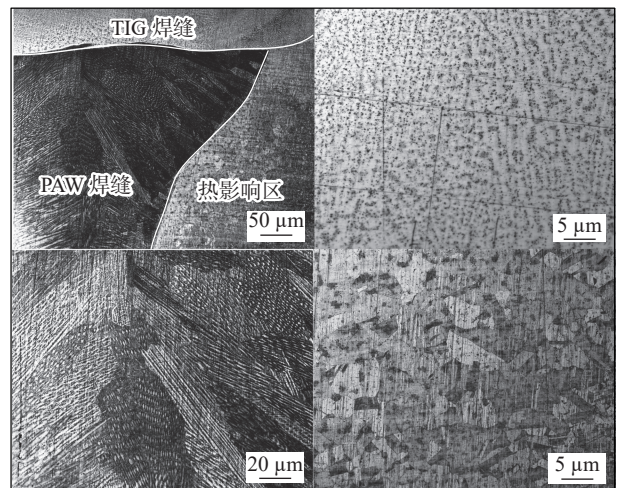


图 3 Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头微观组织
Fig. 3 Cross section of the Inconel 600 PA + TIG joint

2.3 接头力学性能

采用维氏显微硬度计对热处理前后的 Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头分别进行硬度测量, 硬度分布如图 6 所示, 焊接接头硬度分布规律基本一致, 焊缝区域硬度最低, 热影响区硬度次之, 母材硬度最高. 随着焊接热输入的增加, 界面的未熔合缺陷在逐渐减少, 晶粒的尺寸逐渐增大. 随着晶粒的细化, 硬度随之升高. 由于热影响区的晶粒尺寸较母材小, 焊缝区域晶粒尺寸较热影响小, 故接头

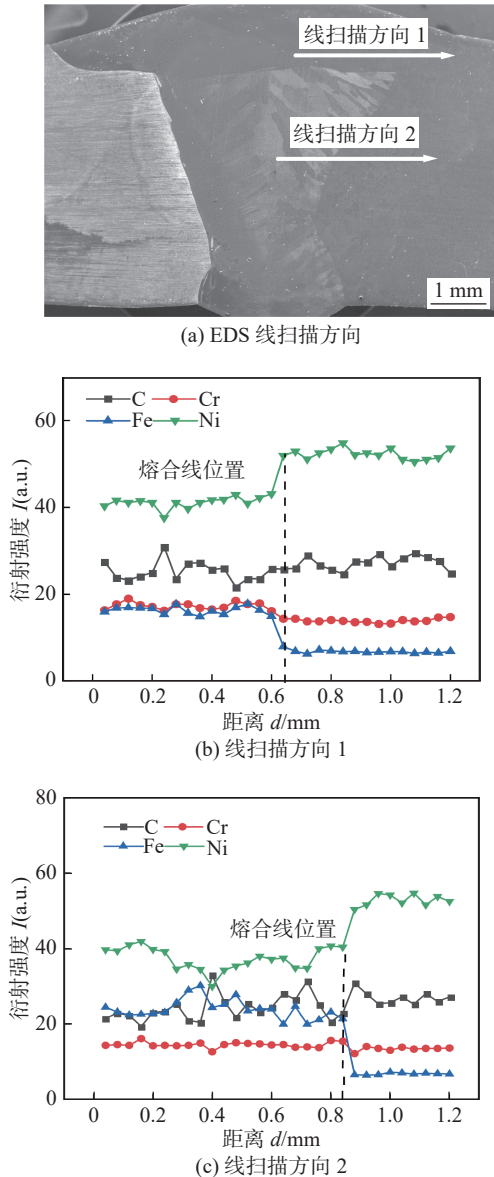


图 4 Inconel 600 PAW + TIG 接头元素线扫描分析

Fig. 4 EDS liner scan of the Inconel 600 PAW + TIG joint. (a) EDS liner scan direction; (b) EDS liner scan 1; (c) EDS liner scan 2

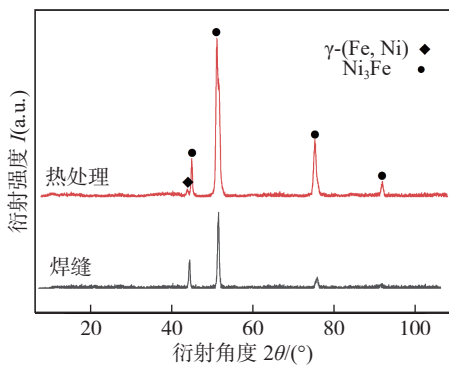


图 5 Inconel 600 PAW + TIG 接头 XRD 分析

Fig. 5 XRD analysis of Inconel 600 PAW + TIG joints

的显微硬度分布呈现出该趋势。

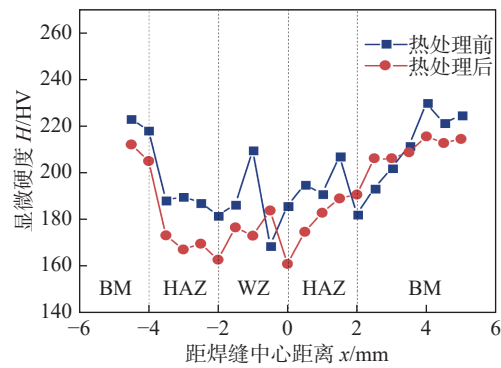


图 6 焊接接头显微硬度分布规律

Fig. 6 Microhardness distribution of the welded joints

对焊后试样在 700 °C 下保温 8 h 进行退火试验, 通过高温保温退火, 有助于晶粒再结晶, 使晶粒尺寸重新分布, 提高晶界的稳定性, 改善材料的力学性能和耐腐蚀性. 图 7 可以看出两个焊接试样均断裂在 Inconel 600 镍基合金母材. 通过扫描电镜对 Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头拉伸断口进行观察. 在图 8(b) 的局部放大图中可以看出断口由少量韧窝和未熔合孔洞组成, 结合文献 [16] 分析可知接头的断裂形式为韧性断裂. 对退火前后两个试样力学性能进行对比, 图 9(a) 所示为拉伸工程应力—应变曲线, 焊接接头的屈服强度为 305 MPa, 抗拉强度为 589 MPa, 从图 9(b) 中可以看出退火后的焊接接头抗拉强度和屈服强度都有所增加, 抗拉强度和屈服强度分别达到了 632 MPa 和 311 MPa, 较未进行退火的焊接接头抗拉强度提高了 7.3%, 但是退火试验后的焊接接头断后伸长率有所下降, 说明高温退火试验使得焊接接头的塑性降低. 如图 10 所示, Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 面弯和背弯试样经 180° 弯曲后, 正面和侧面均未发现裂纹、气孔及夹渣等缺陷, Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头的塑性较好.

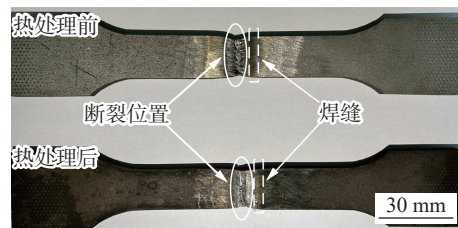


图 7 Inconel 600 镍基合金 PA + TIG 接头拉伸试样

Fig. 7 Macromorphology of Inconel 600 tensile samples of the Inconel 600 PA + TIG joints

2.4 接头腐蚀性能

图 11 给出了焊缝和母材的位置的电化学腐蚀极化曲线. 通过 Tafel 外推法拟合曲线, 得到了腐蚀

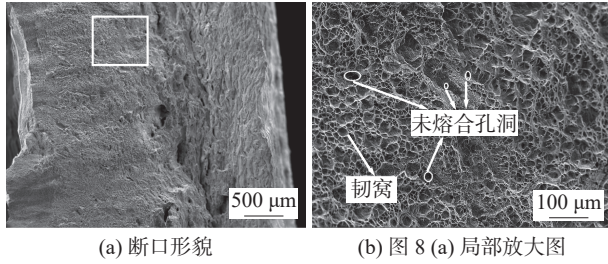


图 8 Inconel 600 镍基合金 PA + TIG 接头断口形貌
Fig. 8 Tensile fracture morphologies of Inconel 600 tensile samples. (a) fracture morphology; (b) a partial enlargement of Fig.8(a)

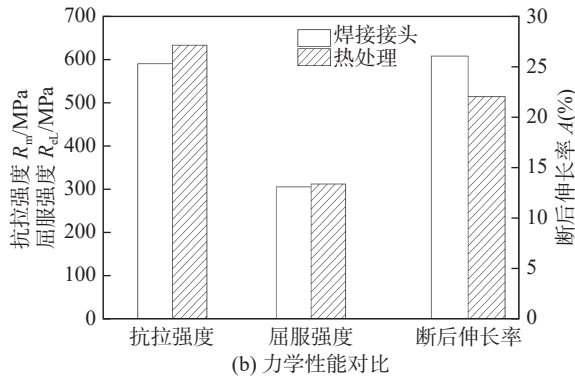
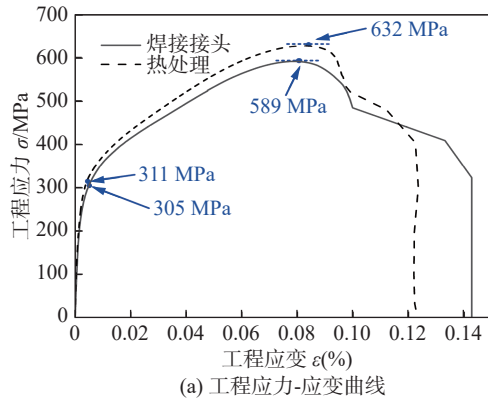


图 9 热处理前后接头工程应力—应变曲线与力学性能对比
Fig. 9 Comparison of stress-strain curves and mechanical properties of the welded joints before and after heat treatment. (a) engineering stress-strain curves; (b) comparison of mechanical properties

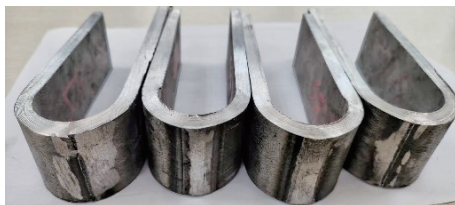


图 10 接头弯曲宏观形貌
Fig. 10 Macro morphology of the welded joints bend samples

电位 (E_{corr})、腐蚀电流密度 (i_{corr}), 计算结果列于表 3 中. 焊缝区域和母材区域自腐蚀电流密度分别为 $0.7316 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 和 $0.7399 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 焊缝区域自

腐蚀电流密度较小, 因此认为焊缝处腐蚀速率较母材区域小. 焊缝与母材处自腐蚀电位分别为 -0.7867 V 和 -0.3346 V , 母材处自腐蚀电位明显高于焊缝处, 因此焊缝处更趋向发生电化学反应.

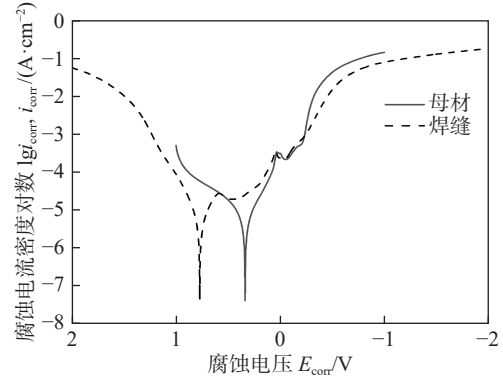


图 11 焊缝与母材位置极化曲线
Fig. 11 Polarization curves of weld seam and base metal

表 3 Tafel 拟合的自腐蚀电流密度与自腐蚀电位
Table 3 Self corrosion current density and self corrosion potential fitted by Tafel

位置	自腐蚀电流密度 $i_{corr}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	腐蚀电位 E_{corr}/V
母材	0.7399	-0.3346
焊缝	0.7316	-0.7867

图 12 为 Nyquist 图与 Bode 图, 图 12(a) 所示为 Nyquist 图, 显示不完全电容回路, 通常由于较大电容回路的样品具有较低的溶解速率和较高的耐腐蚀性, 因此母材区域溶解速率较低且耐腐蚀性较好. Bode 图如图 12(b) 所示, 阻抗 Z 的模值在低频范围内表示极化电阻, 在低频时相位角较大, 这可归因于保护膜的形成, 因此可见母材区域易于形成保护膜, 降低其腐蚀发生的倾向, 导致其腐蚀电位较低.

图 13 为母材与焊缝位置经电化学腐蚀后的形貌, 可以明显发现母材位置点蚀坑较小, 焊缝处明显有较大点蚀坑且相互连接. Cl^- 提供电子给金属表面, 促使合金溶解. 局部产生的酸性环境进一步加速金属的腐蚀, 导致表面出现小孔洞或凹坑. 这是由于在焊接过程中, 在快速冷却的焊接热影响区域, 形成析出相以及晶粒边界变化, 导致局部腐蚀敏感性增加, 从而降低了焊接接头的耐腐蚀性.

为研究 Inconel 600 镍基合金 PAW + TIG 接头的耐蚀性, 以确保焊接接头在特殊的环境中达到设备的使用要求, 因此在 100% 射线检验合格的焊接

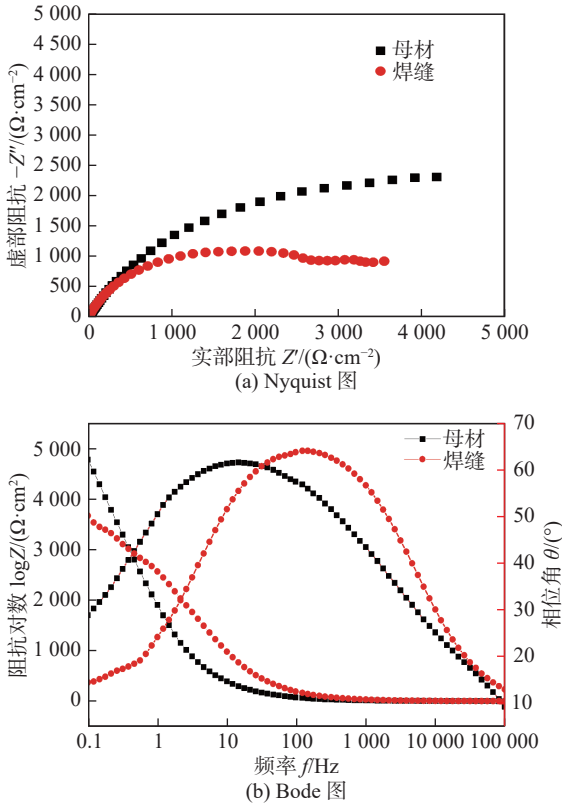


图 12 Nyquist 图与 Bode 图

Fig. 12 Nyquist curves and Bode diagram. (a) Nyquist curves; (b) Bode digram

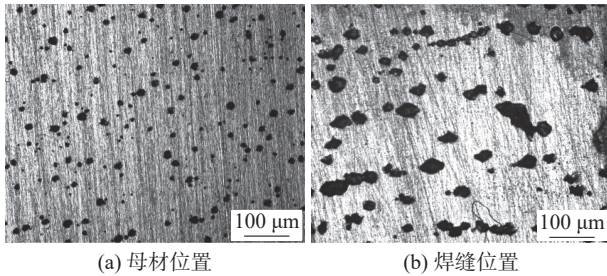


图 13 母材与焊缝位置电化学腐蚀形貌

Fig. 13 Electrochemical corrosion morphology of base metal and weld seam positions. (a) base material position; (b) weld position

接头中部分别取样选择 ASTM A262-15^[17] 中的 Practice E 和 ASTM G28-22^[18] 中的 Method A 进行腐蚀试验. ASTM A262-15^[17] 为奥氏体不锈钢抗晶间腐蚀的试验方法, Practice E 为铜-硫酸铜-16% 硫酸试验用于检测晶间腐蚀敏感性, ASTM G28-22^[18] 为富镍铬合金抗晶间腐蚀的试验方法, Method A 为硫酸铁-硫酸试验. 采用扫描电镜对焊接接头的晶间腐蚀进行 SEM 形貌进行观察, 如图 14 所示, 可以看出整个接头腐蚀形貌仅存在凹凸不平的相, 在晶界部位未发现晶间腐蚀的现象.

2.5 退火对接头性能的作用分析

经退火处理后焊接接头析出 δ 相的 TEM 图像

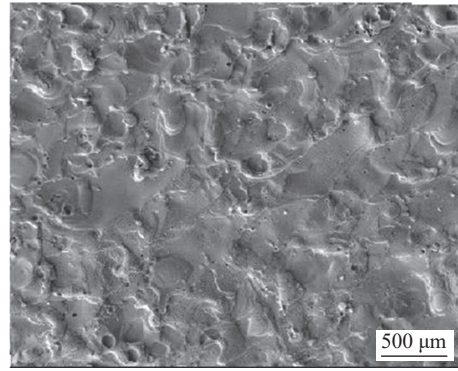


图 14 Inconel 600 合金 PA + TIG 接头晶间腐蚀 SEM
Fig. 14 Corrosion SEM image of Inconel 600 PA + TIG joint

如图 15 所示, 通过 TEM 可以清楚地观测到有 δ 相析出且分布较为密集. 在退火处理的过程中, Inconel 600 镍基合金晶体结构发生变化, 形成新的 δ 相. δ 相的出现会影响材料的硬度、强度和塑性. 高温退火后 δ 相的出现导致了焊接接头的抗拉强度以及屈服强度的增加, 与图 9(a) 中所描述的结果一致. 晶粒内孪晶的对称性为 δ 相的析出提供了有利的条件. 结合文献 [19] 可知, 在保温过程中, 随着时间的推移, δ 相逐渐从基体中分离出来, 而空洞则逐渐合并形成裂纹.

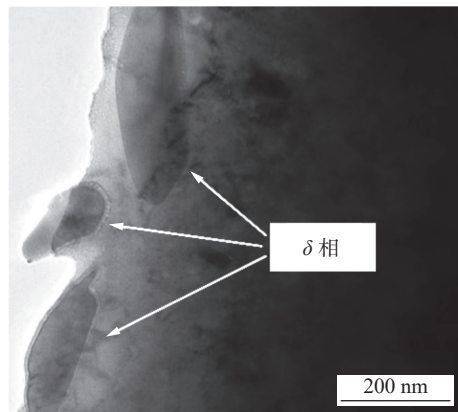


图 15 退火处理后焊接接头析出 δ 相的 TEM 显微图像
Fig. 15 Precipitation in welded joints after annealing treatment TEM micrographs of δ phases

退火过程中的微观结构示意图如图 16 所示. 在退火过程中, 随着温度的升高, γ' 强化相逐渐拉长和粗化, 最终演变成为针状的 δ 相. 结合文献 [20] 可知, 针状的 δ 相在晶粒内部的析出不仅影响了晶体的力学性能, 还在晶界和孪晶界处作为物理障碍阻碍了晶界的移动, 从而形成了一定的强化效应, 因此退火中 γ' 强化相和 δ 相的形成及演变抑制了晶粒的长大, 同时还影响了材料的整体性能.

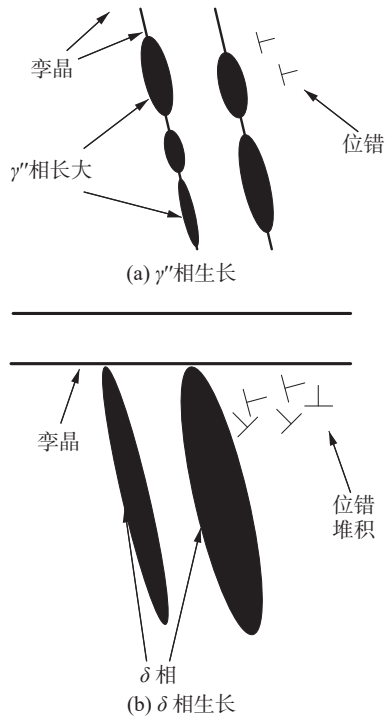


图 16 退火过程中微观结构转变示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the microstructure changes during annealing. (a) γ'' phases growth; (b) δ phases growth

3 结论

(1) 采用 PAW + TIG 方法可实现厚度为 6 mm 的 Inconel 600 镍基合金的有效焊接, 焊缝表面成形光滑平齐, 半椭圆状的鱼鳞纹均匀分布。

(2) 焊缝分为 PAW 焊缝和 TIG 焊缝两部分, 且具有清晰的分界线。母材和热影响区的组织均为等轴晶奥氏体, 但热影响区晶粒的尺寸比母材大, 焊缝区域的组织为树枝晶, 该部位金属间化合物为 Ni_3Fe 相。

(3) 退火后的焊接接头抗拉强度和屈服强度都有所增加, 较未进行退火的焊接接头抗拉强度提高了 7.3%, 退火后的焊接接头断后伸长率有所下降, 说明高温退火试验使得焊接接头的塑性降低。

参考文献

[1] Liu T, Wang Q Q, Guan K S. Analysis of the ductility dip cracking in the nickel-base alloy welding overlay on heat exchanger tube sheet[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 147: 107158.

[2] 徐秀清, 王玮, 陈之腾, 等. 加氢换热器用 321 不锈钢、镍基合金 825 氢脆敏感性研究 [J]. *材料导报*, 2022, 36(14): 166 – 171.

Xu Xiuqing, Wang Wei, Chen Zhiteng, *et al.* Research on hydrogen embrittlement sensitivity of 321 stainless steel and nickel-based alloy 825 for hydrogen heat exchanger[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(14): 166 – 171.

- [3] 吴栋, 董文超, 鲁艳红, 等. 大厚度 NiCrFe-7 熔化焊焊缝微裂纹 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(6): 15 – 19.
- Wu Dong, Dong Wenchao, Lu Yanhong, *et al.* Micro-cracks of the NiCrFe-7 weld metal with large thickness[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(6): 15 – 19.
- [4] Lindmark H, Phother J, Olausson M D, *et al.* A material degradation study of novel FeCrAl alloys, stainless steels and nickel base alloy in fluidized bed heat exchangers of a waste-fired CFB boiler[J]. *Fuel*, 2023, 338: 127299.
- [5] 王诗洋, 刘士伟, 侯星宇, 等. 焊丝成分对镍基高温合金 TIG 焊接性的影响 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(3): 31 – 36, 60.
- Wang Shiyang, Liu Shiwei, Hou Xingyu, *et al.* Effect of wire composition on weldability of a Ni-based superalloy welded by TIG method[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(3): 31 – 36, 60.
- [6] 李伟, 杨笑瑾, 马东华. 镍基合金换热管分段式机械胀接试验 [J]. *压力容器*, 2015, 32(9): 75 – 79.
- Li Wei, Yang Xiaojin, Ma Donghua. Process test of sectional mechanical rolling on nickel-base alloy tube[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2015, 32(9): 75 – 79.
- [7] Ming T Y, Peng Q J, Han Y L, *et al.* Effect of water jet cavitation peening on electrochemical corrosion behavior of nickel-based alloy 600 in NaCl solution[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 295: 127122.
- [8] Cui Y H, Zhang J L, Zhao K. Establishment of stress corrosion cracking quantitative prediction model of nickel-based alloy 600 and analysis of influencing factors[J]. *Strength of Materials*, 2022, 54(1): 41 – 46.
- [9] Feng X Y, Xie J Y, Huang M Z, *et al.* The intergranular oxidation behavior of low-angle grain boundary of alloy 600 in simulated pressurized water reactor primary water[J]. *Acta Materialia*, 2022, 224: 117533.
- [10] Hinchy E, Pomeroy M J, Tanner D A. The effect of single crystal and welded substrates on the development of braze microstructures[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 690: 856 – 863.
- [11] 杨子威, 余进, 洪浩源, 等. Inconel 600 热电偶套管焊接的组织性能研究 [J]. *电焊机*, 2020, 50(2): 99 – 102.
- Yang Ziwei, Yu Jin, Hong Haoyuan, *et al.* Study on the microstructure and properties of Inconel 600 thermowell welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(2): 99 – 102.
- [12] Lyczkowska K, Michalska J. Studies on the corrosion resistance of laser-welded Inconel 600 and Inconel 625 nickel-based superalloys[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, 62(2): 653 – 656.
- [13] Neelima P, Agilan M, Saravanan K, *et al.* Optimisation of flux

- and weld parameters during flux bounded tungsten inert gas welding (FBTIG) of nickel based superalloy Inconel 600[J]. Transactions of the Indian National Academy of Engineering, 2021, 6(1): 123 – 131.
- [14] Liu K, Li Y J, Wang J. Microstructure and low-temperature mechanical properties of 304 stainless steel joints by PAW + GTAW combined welding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25: 4561 – 4573.
- [15] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料室温拉伸方法: GB/T228–2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- National Technical Committee on Steel of Standardization Administration. Metallic materials-tensile testing at ambient temperature: GB/T228 –2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [16] Wang X J, Wang B S, Zhang L L, *et al.* Mechanical properties and microstructure of pure nickel PAW and PAW-TIG welded joints[J]. China Welding, 2017, 26(4): 37 – 47.
- [17] American Society for Testing and Materials. Standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels: ASTM A262-15[S]. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2021.
- [18] American Society for Testing and Materials. Standard test methods for detecting susceptibility to intergranular corrosion in wrought, nickel-rich, chromium-bearing Alloys: ASTM G28-22[S]. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International, 2023.
- [19] Tian S G, Sun H F, Jin Y. Investigation on γ' to γ'' transition in an IN718G superalloy during heat treatment, using first principle[J]. Materials Characterization, 2020, 162: 110168.
- [20] Maristany H G, Rodriguez M A, Kappes M A, *et al.* Localized corrosion of alloys UNS N06690 and N06600 in steam generator lay-up conditions [C]// Corrosion Conference and Expo 2018, April 15-19, 2018, Phoenix, Arizona. Houston: NACE International, 2018: 4345-4359.
-
- 第一作者: 乔小丽, 硕士, 高级工程师; 主要从事压力容器设计、制造及管理工作; Email: qiaoxiaoli@lshec.com
通信作者: 黄健康, 博士, 教授; Email: sr2810@163.com

(编辑: 汤明日)

[上接第 104 页]

- [20] 刘政军, 裘荣鹏, 武丹, 等. 960 MPa 高强度金属粉芯型药芯焊丝焊缝金属韧化机理 [J]. 焊接学报, 2018, 39(1): 102 – 106.
- Liu Zhengjun, Qiu Rongpeng, Wu Dan, *et al.* Research on toughening mechanism of weld metal with metal powder flux-cored wire for 960 MPa high strength steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(1): 102 – 106.
- [21] Srivatsa K, Srinivas P, Balachandran G, *et al.* Room temperature microstructure and property evaluation of a heat treated fully bainitic 20CrMoVTiB410 steel[J]. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2016, 68(10): 2704 – 2712.
- [22] Soleimani M, Kalhor A, Mirzadeh H. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: a review[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 795: 140023.
- [23] Lambert A, Drillet J, *et al.* Microstructure of martensite-austenite constituents in heat affected zones of high strength low alloy steel welds in relation to toughness properties[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(3): 168 – 173.
- [24] 陈剑虹, 曹睿. 焊缝金属解理断裂微观机理 [J]. 金属学报, 2017, 53(11): 1427 – 1444.
- Chen Jianhong, Cao Rui. Micromechanism of cleavage fracture of weld metals[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(11): 1427 – 1444.
-
- 第一作者: 于庭祥, 硕士研究生; 主要从事焊接材料与焊接工艺方面的研究. Email: 446556207@qq.com
通信作者: 冯伟, 硕士, 正高级工程师; Email: fengwei323412@163.com

(编辑: 汤明日)