

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.10

焊接热循环及焊后热处理对新型Fe-Ni基高温合金焊接接头的组织和力学性能的影响

张松^{1,2}, 徐祥久^{1,2}, 刘海^{1,2}, 刁旺战^{1,2}, 王萍^{1,2}, 赵卫君^{1,2}

1. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046

2. 低碳热力发电技术与装备全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150046

摘要: 针对新型铁镍基高温合金GH2070P在时效状态下进行钨极氩弧焊(GTAW), 研究焊接热循环及焊后时效处理对焊接接头显微组织与室温力学性能的影响规律。焊接接头两侧母材分别经800℃/20 h和800℃/4 h焊前预热处理, 焊后进行800℃/4 h时效处理。结果表明, 焊态接头宏观及微观组织完好, 母材及热影响区主要析出相为MC、M₂₃C₆和γ'相, 焊缝主要析出相为M₆C、MC及少量γ'相, 未见其他有害析出相。焊接热循环导致HAZ中M₂₃C₆部分回溶、γ'相大量回溶, 硬度大幅降低、存在1.5 mm宽的软化区, 室温拉伸试样于HAZ断裂; 经800℃/4 h时效强化热处理后, HAZ晶界M₂₃C₆及晶内γ'相重新弥散析出, 焊缝基体亦析出少量γ'相, 软化区硬度恢复至母材水平, 拉伸断裂位置由HAZ转移至焊缝中心, 接头抗拉强度与屈服强度分别提升23.3%和16.1%。研究证实, 焊后时效处理可有效消除GH2070P焊接接头HAZ软化问题, 为该合金在650℃及以上超超临界锅炉中的焊接应用提供了试验依据。

关键词: GH2070P 高温合金; 钨极氩弧焊; ERNiCrCoMo-1; 焊接热循环; 析出相与软化行为

中图分类号: TG444 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)08-0097-08

Effects of Welding Thermal Cycle and Post-Weld Aging on the Microstructure and Mechanical Properties of GH2070P Fe-Ni-Based Superalloy Welded Joints

ZHANG Song^{1,2}, XU Xiangjiu^{1,2}, LIU Hai^{1,2}, DIAO Wangzhan^{1,2}, WANG Ping^{1,2}, ZHAO Weijun^{1,2}

1. Harbin Boiler Company Limited, Harbin 150046, China

2. State Key Laboratory of Low-carbon Thermal Power Generation Technology and Equipment, Harbin 150046, China

Abstract: The gas tungsten arc welding (GTAW) of the precipitation-strengthened Fe-Ni-based superalloy GH2070P in the aged condition was investigated, with emphasis on the influence of welding thermal cycling and post-weld heat treatment (PWHT) on the microstructural evolution and room-temperature mechanical properties of the welded joints. The base metals on each side of the joint were pre-treated at 800℃ for 20 h and 4 h, respectively, followed by post-weld aging at 800℃ for 4 h. The results reveal that the as-welded joint is free of macroscopic and microscopic defects. The precipitates in the base metal (BM) and heat-affected zone (HAZ) are identified as MC, M₂₃C₆, and γ' phases, while the weld metal (WM) contains M₆C, MC, and a trace amount of γ'. The welding thermal cycle causes partial dissolution of M₂₃C₆ carbides and substantial dissolution of γ' precipitates in the HAZ, producing a softened zone approximately 1.5 mm in width, where tensile fracture occurs at room temperature. Following PWHT at 800℃ for 4 h, M₂₃C₆ carbides and γ' precipitates re-precipitate in a fine, dispersed distribution within the HAZ, and a small quantity of γ' phase also forms in the WM. The hardness of the softened zone recovers to the BM level, and the tensile fracture location shifts from the HAZ to the WM center, with the tensile strength and yield strength increasing by 23.3% and 16.1%, respectively. The study demonstrates that post-weld aging effec-

收稿日期: 2026-07-01 修回日期: 2026-08-05

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB4102303)

作者简介: 张松(1994—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电站锅炉耐热钢及高温合金焊接及热处理工艺研究工作。E-mail: zhangs@hbc.com.cn。



重点
专利
—
高
强
钢
优
质
高
效
焊
接

tively eliminates the HAZ softening problem in GH2070P welded joints, providing experimental support for the welding application of this alloy in ultra-supercritical boilers operating at 650 °C and above.

Keywords: GH2070P superalloy; gas tungsten arc welding (GTAW); ERNiCrCoMo-1; welding thermal cycle; precipitate dissolution and softening behavior

引用格式:张松,徐祥久,刘海,等. 焊接热循环及焊后热处理对新型Fe-Ni基高温合金焊接接头的组织和力学性能的影响[J]. 电焊机, 2026, 56(8): 97-104.

Citation:ZHANG Song, XU Xiangjiu, LIU Hai, et al. Effects of Welding Thermal Cycle and Post-Weld Aging on the Microstructure and Mechanical Properties of GH2070P Fe-Ni-Based Superalloy Welded Joints[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 97-104.

0 引言

随着我国国民经济发展,各领域对用电需求越来越大,虽然我国正在积极开发水电、核电、风电、太阳能等绿色能源,但是火电作为能源结构主体的格局并未发生改变。加速电力绿色转型升级的同时,积极推进煤电清洁高效发展,提高机组参数是促进超超临界燃煤发电技术高效化的重要举措^[1]。650 °C及以上超超临界锅炉发电技术与现役600 °C超超临界发电技术在发电装备结构上差异不大,高温段部件材料的研发及其部件制造决定了高参数超超临界锅炉的发展进度。

在役机组最高温段大口径管为P92马氏体耐热钢,其使用金属温度上限为628 °C;G115马氏体耐热钢大口径厚壁管金属壁温上限可达650 °C,已应用于山东鄒城630 °C超超临界燃煤示范项目^[2]。Inconel 617B、Inconel 740H、Haynes 282等镍基合金均为700 °C级先进超超临界锅炉的备选材料,但因价格昂贵、焊接工艺严苛及现场无法实现焊后热处理等因素限制了其在超超临界机组锅炉中的应用^[3-5]。GH2070P是我国自主研发的新型铁镍基高温合金,作为650 °C及以上超超临界锅炉集箱与管道的候选材料,其强化机制以Ti、Al元素形成的 γ' 相沉淀强化为主,Cr、Co、Mo元素的固溶强化为辅^[6]。此前已有学者研究了GH2070P在固溶状态下焊后进行稳定化处理(980 °C/3 h,空冷)的焊接接头组织及性能^[7],也对Inconel 740H合金焊接接头的长时效

行为开展了相关研究^[8],但目前尚缺乏该合金在时效状态下焊接接头的系统研究。

北京科技大学HT700锅炉高温部件近服役条件试验验证平台存在一道现场焊缝,两侧母材分别随集箱进行800 °C/20 h热处理、随阀门进行800 °C/4 h热处理,焊后采用800 °C/4 h时效处理降低残余应力。本文为模拟上述现场焊接工艺条件,以一侧经800 °C/20 h、另一侧经800 °C/4 h焊前预处理的时效态GH2070P手工钨极氩弧焊接接头为研究对象,重点探究焊接热循环及焊后热处理(PWHT)对焊接接头显微组织与力学性能的影响规律,旨在为650 °C及以上超超临界燃煤锅炉用GH2070P铁镍基合金的焊接工程应用提供试验数据与理论支撑。

1 试验材料和方法

试验用GH2070P母材以固溶供货态,两侧母材分别进行800 °C/20 h和800 °C/4 h焊前预处理,管段规格为 $\varnothing 89 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。母材及焊丝的实测化学成分如表1所示。焊接材料选用AWS ERNiCrCoMo-1焊丝,规格为 $\varnothing 2.4 \text{ mm}$,其化学成分满足ASME II卷C篇SFA-5.14标准要求。

焊接采用手工钨极氩弧焊(GTAW),坡口形式为单边30°V型坡口,实施多层多道焊,共焊接15层。第1~3层每层单道,第4~15层每层2~5道,焊接参数如表2所示。层间采用水冷强制冷却,控制层间温度不超过100 °C。保护气体采用99.99 %氩气,正

表1 GH2070P合金和ERNiCrCoMo-1焊丝实测化学成分(质量分数,%)

Table 1 The chemical compositions of GH2070P alloy and ErNiCrCoMo-1 welding wires (wt. %)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Co	Al	Ti	Fe	Ni
GH2070P	0.05	0.03	0.01	0.004	0.002	15.03	0.44	2.98	1.22	2.17	41.87	Bal.
ERNiCrCoMo-1	0.06	0.03	0.08	0.006	0.001	21.67	8.80	10.78	1.43	0.36	0.96	Bal.



面保护气体流量为 8~12 L/min, 背面保护气体流量为 15~25 L/min, 背面氩气保护至第 3 层焊接完成。焊后接头经 100%RT+100%PT 无损检测均合格。焊后热处理制度为 800 °C/4 h 时效强化热处理。

表 2 焊接工艺参数

焊层	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(mm·s ⁻¹)
1~3	90~110	10~11	10~15
4~15	110~125	10~12	10~15

本文分别选取焊态及热处理态 GH2070P 焊接接头进行试验分析。采用 ZEISS AXIOVERT 200MAT 型金相显微镜(OM)、TESCAN AMBER 型扫描电子显微镜(SEM)进行组织观察和分析及断口形貌观察。采用 10% 草酸溶液(wt.%)电解腐蚀焊缝微观组织, 采用体积比 1:5:7 的 HNO₃+HCl+C₃H₈O 混合溶液腐蚀显示焊接接头母材微观组织; 采用 HYS-1000A 型显微硬度仪检测维氏硬度; 采用 CSS-44300 型电子拉伸试验机进行室温拉力测试。

2 试验结果与讨论

2.1 焊接接头显微组织

焊后对焊接接头进行微观组织观察, 未发现裂纹、未熔合、气孔、夹渣等缺陷。

(1) 母材及热影响区组织。

两侧母材金相组织如图 1 所示, 均呈现等轴奥氏体基体, 部分晶粒内部少量存在孪晶结构, 晶粒内部和晶界处随机分布短棒状析出物。对该析出相进行 EDS 能谱检测(见图 1f), 推测为富 Ti 的 MC 型一次碳化物。由于本试验采用 GTAW, 热输入较低, 靠近焊缝的两侧 HAZ 晶粒未见明显长大。

如图 2 所示, 焊后 SEM 观察表明, 两侧母材及 HAZ 晶界处均分布有颗粒状碳化物。经 EDS 能谱检测(见图 2e), 判定为富 Cr、Fe 的 M₂₃C₆ 碳化物。对比两侧母材与热影响区组织可见, 经历焊接热循环后, HAZ 中晶界上尺寸较小的 M₂₃C₆ 溶解, 数量明显减少, 而较大尺寸的 M₂₃C₆ 颗粒仍保留, 表明焊接热循环导致了 HAZ 中 M₂₃C₆ 的部分溶解。

晶粒内部 γ' 析出相形貌如图 3 所示。经统计, 经历 800 °C/20 h 和 800 °C/4 h 焊前预热处理的两侧

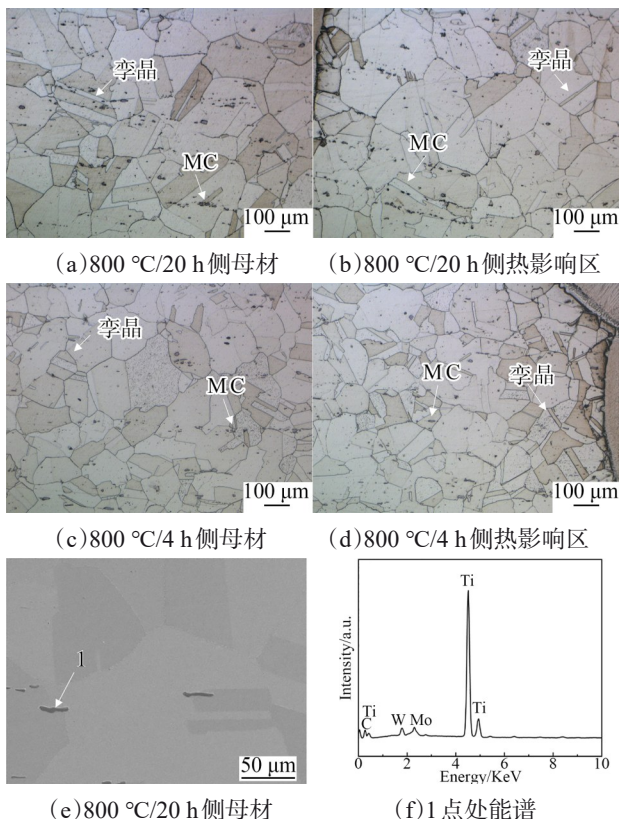


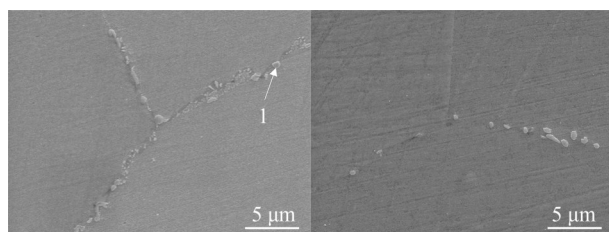
图 1 焊态母材及热影响区组织照片及 EDS 能谱

Fig. 1 Microstructure of BM and HAZ in as-welded condition and EDS spectra

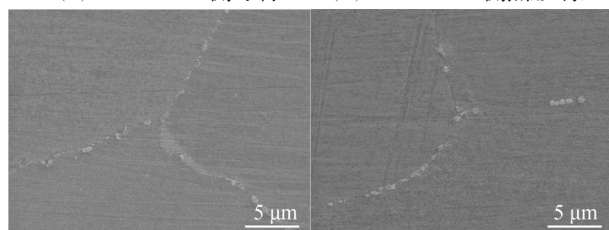
母材 γ' 析出相平均尺寸分别约为 34.3 nm 和 23.1 nm。对比可知, 经历焊接热循环后, 热影响区中 γ' 相大量溶解, 仅残留少量尺寸较大的 γ' 颗粒。

(2) 焊缝组织。

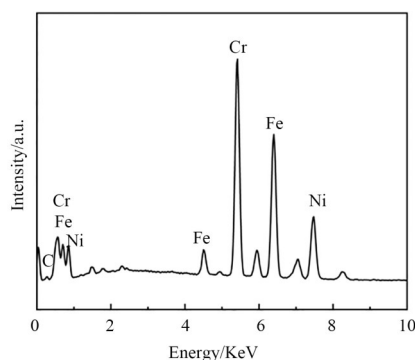
焊缝金相组织如图 4a 所示, 呈现典型的胞状树枝晶奥氏体和凝固晶界(SGB)。在焊缝快速凝固过程中, 元素偏析形成枝晶结构, 枝晶间区域称为凝固亚晶界(SSGB), 多组亚晶界相交成为凝固晶界(SGB)^[9]。焊缝凝固过程中各溶质平衡分配系数 k 不同, 当 $k < 1$ 时, 溶质元素呈现向枝晶间区域偏析; 当 $k > 1$ 时, 溶质元素向枝晶芯区域偏析; 其中焊缝熔覆金属中 Mo 和 Ti 元素的 k 值 < 1 , Mo 和 Ti 两种元素表现出强烈的枝晶间偏聚倾向, 在焊缝金属中会出现明显的偏析现象^[10]。在焊缝中枝晶间位置发现微米级析出物, 对各析出物进行 EDS 能谱分析(见图 4c、4d), 推测在亚凝固晶界(SSGB)枝晶间分布有富 Mo 的 M₆C 碳化物和富 Ti 的颗粒状 MC 碳化物。焊态焊缝中未发现 γ' 析出相及其他有害相。



(a) 800 °C/20 h 侧母材 (b) 800 °C/20 h 侧热影响区



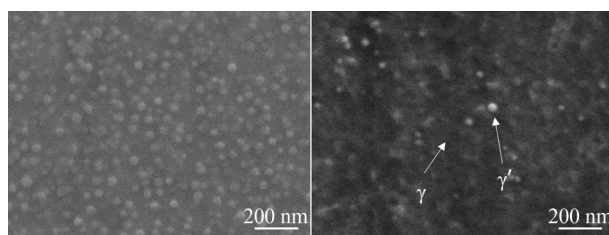
(c) 800 °C/4 h 侧母材 (d) 800 °C/4 h 侧热影响区



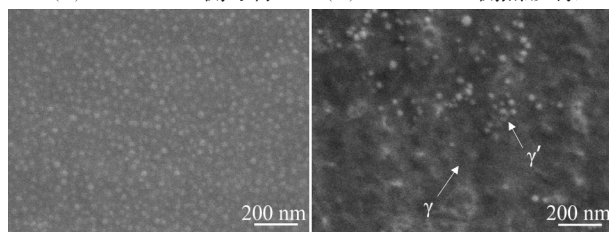
(e) 1 点处能谱

图 2 焊态各区域晶界碳化物和 EDS 能谱

Fig. 2 SEM images of the intergranular carbides in various regions in the as-welded condition and EDS spectra



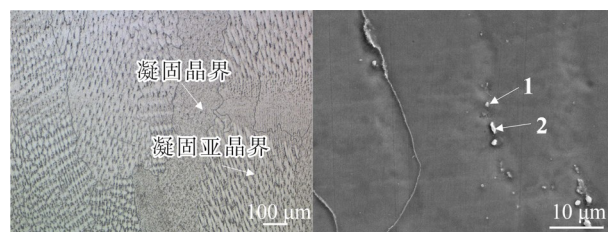
(a) 800 °C/20 h 侧母材 (b) 800 °C/20 h 侧热影响区



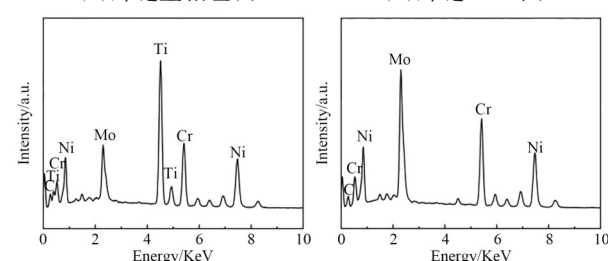
(c) 800 °C/4 h 侧母材 (d) 800 °C/4 h 侧热影响区

图 3 焊态各区域 γ' 相形貌

Fig. 3 SEM images showing the γ' phase in various regions in the as-welded condition



(a) 焊缝金相组织 (b) 焊缝 SEM 图



(c) 1 点处能谱 (d) 2 点处能谱

图 4 焊态焊缝显微组织及 EDS 能谱

Fig. 4 Microstructure of as-welded weld metal

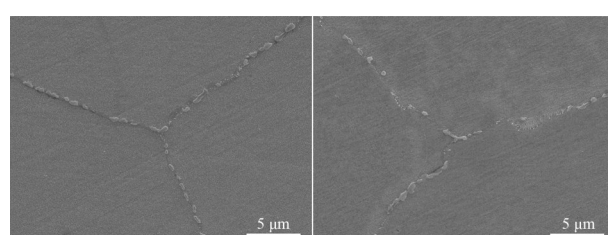
2.1.2 热处理态组织

经 800 °C/4 h 时效处理后,对接头进行 SEM 观察。

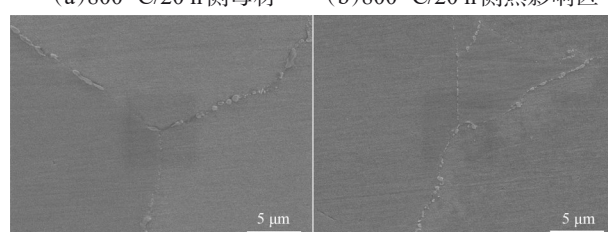
(1) 母材及热影响区组织。

如图 5 所示,与焊态相比,母材晶界处 $M_{23}C_6$ 碳化物形态及分布无明显变化,而 HAZ 晶界处重新析出颗粒状 $M_{23}C_6$ 碳化物,表明焊后时效处理促使 HAZ 中溶解的 $M_{23}C_6$ 重新析出。

两侧母材及热影响区中 γ' 相形貌如图 6 所示。



(a) 800 °C/20 h 侧母材 (b) 800 °C/20 h 侧热影响区



(c) 800 °C/4 h 侧母材 (d) 800 °C/4 h 侧热影响区

图 5 热处理态各区域晶界碳化物

Fig. 5 SEM images of the intergranular carbides in various regions after PWHT



与焊态相比,母材中 γ' 相发生了粗化长大:800 °C/20 h侧和800 °C/4 h侧母材 γ' 相平均尺寸分别长大至约41.8 nm和29.1 nm。根据LSW熟化理论^[11],在时效热处理过程中较小的 γ' 相因更高的溶解度而逐渐溶解,较大的 γ' 相则持续吸收基体中自较小颗粒溶解的Al、Ti元素而长大。同时,两侧HAZ中均重新弥散析出了大量新的 γ' 相,800 °C/20 h侧和800 °C/4 h侧HAZ的 γ' 相平均晶粒尺寸分别约为26.8 nm和23.9 nm。

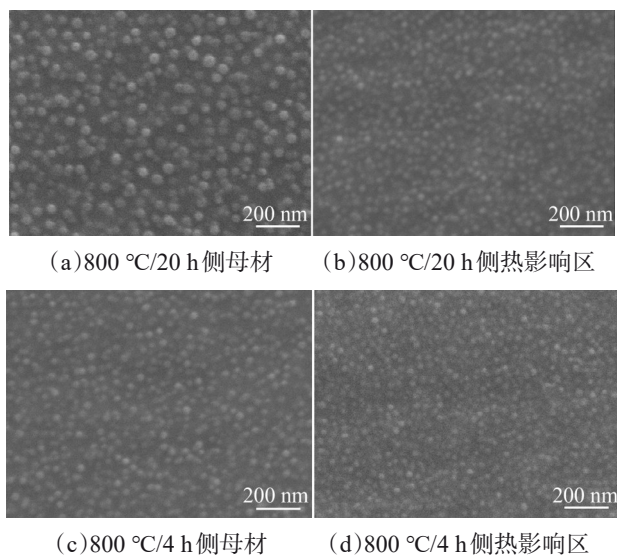


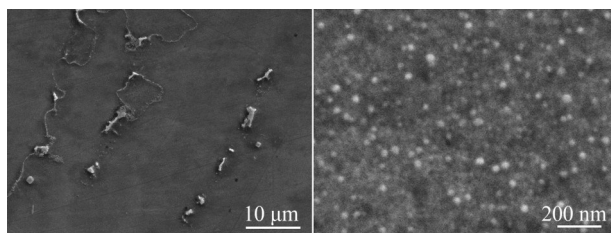
图6 热处理态各区域 γ' 相形貌

Fig. 6 SEM images showing the γ' phase in various regions after PWHT

(2) 焊缝组织。

热处理态焊缝SEM形貌如图7所示。焊缝中碳化物种类与焊态相比未见明显变化,但基体上出现了少量弥散分布的 γ' 析出相(见图7b)。已有研究表明,Inconel 617B焊接接头在持久过程中会少量析出 γ' 相,表明该类Ni-Cr-Co-Mo系焊缝金属在高温长期服役条件下具有一定的 γ' 相析出倾向^[12]。本试验所用ERNiCrCoMo-1焊丝中Al+Ti含量为1.79%,是 γ' -Ni₃(Al,Ti)相的重要形成元素。在800 °C时效强化热处理过程中,Al、Ti原子充分扩散并参与沉淀析出,促使焊缝基体中形成少量弥散 γ' 相。

综合上述观察结果可知,母材经历焊接热循环后,HAZ中发生两个显著变化:晶界处部分小尺寸M₂₃C₆碳化物溶解,数量减少;晶内 γ' 相大量回溶。



(a) 焊缝SEM图 (b) 焊缝 γ' 相

图7 热处理态焊缝显微组织

Fig. 7 SEM images of the weld metal after PWHT

经800 °C/4 h焊后时效处理,HAZ晶界M₂₃C₆重新析出、晶内重新弥散析出细小 γ' 相;两侧母材中 γ' 相均发生粗化;焊缝基体中析出少量 γ' 相。上述组织演变将直接影响接头的力学性能。

2.2 焊接接头硬度测试

2.2.1 硬度测试结果

对焊态及热处理态接头沿中间厚度位置进行维氏硬度测试,维氏硬度采用HYS-1000A型显微硬度仪,加载载荷1 kg,加载时间10 s。以焊缝中心为原点,测量点间隔0.25 mm,结果如图8所示。

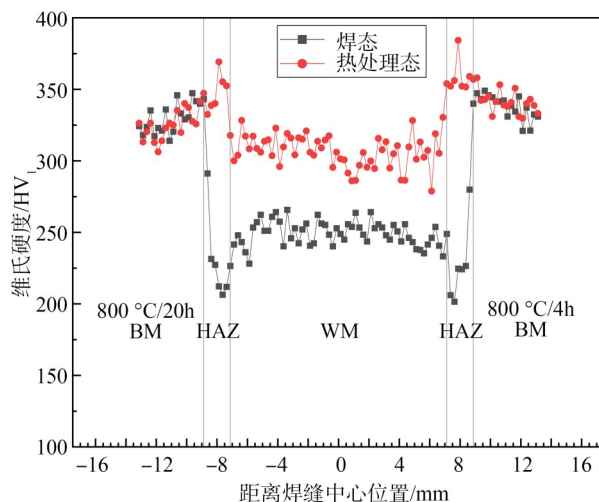


图8 焊态与热处理态焊接接头维氏硬度

Fig. 8 Vickers hardness of as-welded and heat-treated welded joints

焊态下:焊缝硬度范围228.1~265.7 HV₁(平均值249.3 HV₁);800 °C/20 h侧母材硬度范围314.0~345.8 HV₁(平均值330.2 HV₁);800 °C/4 h侧母材硬度范围为321.0~349.1 HV₁(平均值338.1 HV₁);熔合线外侧HAZ各存在1.5 mm宽的软化区间,硬度范围分别为206.4~291.2 HV₁和206.1~279.9 HV₁。

热处理态下:焊缝硬度范围为278.8~330.4 HV₁(平均值306.8 HV₁);800 °C/20 h侧母材硬度范围

306.3~340.1 HV₁ (平均值 324.9 HV₁); 800 °C/4 h 侧母材硬度为 329.7~358.5 HV₁ (平均值 341.9 HV₁); 热影响区硬度分别为 332.4~369.2 HV₁ 和 351.6~384.2 HV₁。

2.2.2 硬度分布的机理分析

(1) 焊态 HAZ 软化机理。

焊态下, 熔合线外侧两侧母材均存在约 1.5 mm 宽的硬度软化区。结合微观组织观察可知, 该软化源于两个方面: 其一, HAZ 晶界处颗粒状 M₂₃C₆ 碳化物部分回溶, 降低了晶界强化效果; 其二, 晶内 γ' 相大量回溶, 沉淀强化作用显著减弱, 位错运动阻碍降低。距熔合线距离越远, 焊接热循环的峰值温度越低, 对 M₂₃C₆ 和 γ' 相的溶解效应越弱, 因此硬度逐渐回升至母材水平。

(2) 热处理态硬度变化机理。

经 800 °C/4 h 时效处理后, 焊缝平均硬度提升 57.5 HV₁, 主要归因于时效过程中 γ' 相在焊缝基体中的析出强化。HAZ 软化区的硬度恢复至母材硬度水平以上, 有效消除了软化现象, 对应 HAZ 中 M₂₃C₆ 与 γ' 相的重新析出。800 °C/4 h 侧母材硬度略有升高 (平均值由 338.1 HV₁ 升至 341.9 HV₁), 而 800 °C/20 h 侧母材硬度略有降低 (平均值由 330.2 HV₁ 降至 324.9 HV₁)。两侧母材在时效热处理后硬度变化趋势的差异, 与 γ' 相尺寸演变及其对应的强化机制转变密切相关。

(3) γ' 相强化机制分析。γ' 相的沉淀强化作用取决于其与位错的交互作用方式, 其强化增量与临界分剪切应力 CRSS 成正比。γ' 相与位错的交互作用机制随 γ' 相尺寸不同而存在三种典型模式: 当 γ' 尺寸较小时, 位错通常以弱耦合位错对的形式切割粒子继续前进, 临界分剪切应力 CRSS 随 γ' 直径增大而增大; 当 γ' 相尺寸长大到临界尺寸后, 位错以强耦合位错对或奥罗万位错环机制绕过粒子继续运动, CRSS 随 γ' 直径增大而减小; 当 γ' 相尺寸处于两种机制过渡区间时, 强化效果达到峰值。GH2070P 合金的 γ' 相临界直径约为 30.8 nm^[12]。据此分析: 800 °C/4 h 侧母材 γ' 相由 23.1 nm 长大至 29.1 nm, 仍处于临界直径以下, CRSS 随 γ' 相增大而升高, 因此硬度升高; 800 °C/20 h 侧母材 γ' 相由 34.3 nm 长大至 41.8 nm, 已超过临界直径, 进入奥罗万绕过机制

区间, CRSS 随 γ' 增大而降低, 因此硬度降低。上述硬度测试结果与显微组织观察结果相吻合, 充分验证了 γ' 相尺寸效应对 GH2070P 合金焊接接头硬度分布的决定性影响。

2.3 焊接接头拉伸性能

2.3.1 拉伸试验结果

按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》, 垂直于焊接方向取样, 对焊态及热处理态焊接接头进行室温拉伸试验, 力学性能如表 3 所示, 室温拉伸断裂试样如图 9 所示。与焊态相比, PWHT 后焊接接头抗拉强度由 798 MPa 提高至 984 MPa, 提升幅度为 23.3%; 屈服强度由 577 MPa 提高至 670 MPa, 提升幅度为 16.1%; 断后伸长率略有提高 (16.5%→17.0%); 断裂位置由 800 °C/20 h 侧 HAZ 转变为焊缝中心。如图 9 所示, 焊态拉伸试样塑性变形集中于焊缝及两侧热影响区位置, 而热处理态拉伸试样塑性变形集中在焊缝区域, 表明经 800 °C/4 h 时效强化热处理后 HAZ 软化区已被有效消除。

表 3 室温拉伸性能

Table 3 Room-temperature tensile properties

编号	状态	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	断裂位置
1#	焊态	577	798	16.5	800 °C/20 h 侧 HAZ
2#	PWHT	670	984	17.0	焊缝

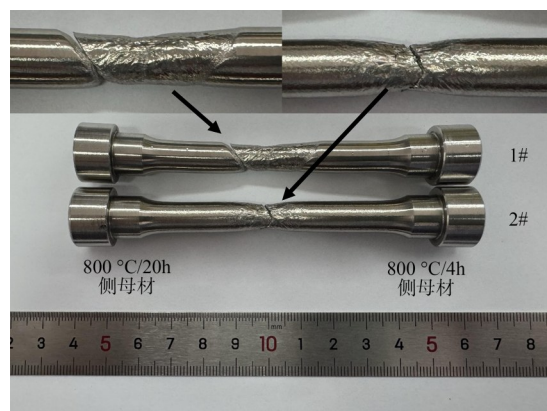


图 9 室温拉伸断裂试样

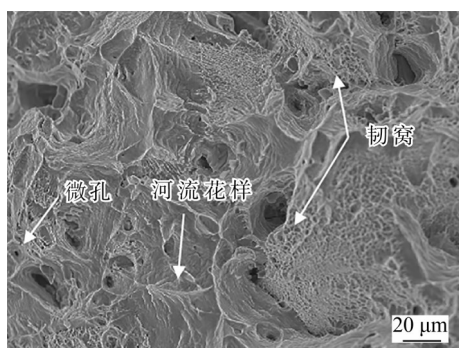
Fig. 9 Fractured samples after room temperature tensile test

2.3.2 断口形貌与断裂机理

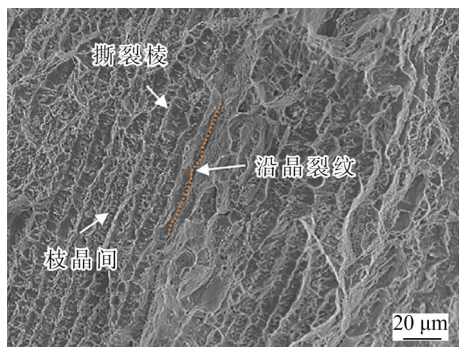
对拉伸断口启裂区域进行 SEM 形貌观察。焊态下启裂在 HAZ, 如图 10a 所示, 断面观察到韧窝、微孔洞及少量河流花样特征, 属于韧脆混合断裂模式。未观察到明显的冰晶状颗粒沿晶特征, 为穿晶



断裂。这表明 γ' 相的大量溶解使晶内强度下降幅度远大于晶界,导致裂纹优先在晶内萌生与扩展。如图10b所示,热处理态拉伸试样断裂于焊缝中心,在枝晶界处存在明显的撕裂棱,枝晶内分布小韧窝,晶界处存在沿晶开裂。



(a) 焊态室温拉伸HAZ位置断口形貌



(b) 热处理态室温拉伸焊缝位置断口形貌

图10 室温拉伸断口形貌

Fig. 10 Morphology of tensile fracture at room temperature

2.3.3 断裂位置转变的机理分析

在焊接热循环作用下,HAZ中 $M_{23}C_6$ 部分溶解、 γ' 相大量溶解,导致晶界和晶内强度同步下降,且晶内强度降幅更大(断口表现为穿晶断裂),使HAZ成为接头的薄弱环节,拉伸试样于HAZ断裂。经 $800\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$ 时效处理后,HAZ晶界 $M_{23}C_6$ 与晶内 γ' 相重新弥散析出,该区域强度显著恢复,使其不再为接头最薄弱区域。与此同时,时效处理虽使焊缝基体析出少量 γ' 相(增强了焊缝晶内强度),但焊缝晶界仍为相对薄弱区域,拉伸断裂位置因此转移至焊缝中心,断裂模式转变为沿晶开裂特征。

3 结论

(1) 针对HT700平台现场焊缝两侧母材经历不

同时效处理的特殊工况,采用GTAW对时效态GH2070P进行焊接。组织分析表明,无论焊前时效时间长短,焊接热循环对HAZ的影响均以析出相回溶为核心特征:晶界 $M_{23}C_6$ 碳化物部分溶解,晶内 γ' 相大量回溶且不受焊前时效制度差异的影响,是造成HAZ软化的根本原因。

(2) 焊后 $800\text{ }^{\circ}\text{C}/4\text{ h}$ 时效强化热处理能够有效消除HAZ软化。时效过程中,HAZ晶界与晶内分别重新析出 $M_{23}C_6$ 碳化物和弥散 γ' 相,焊缝基体亦析出少量 γ' 相,使软化区硬度恢复至母材水平以上。接头抗拉强度与屈服强度均获得显著提升,拉伸断裂位置由HAZ转移至焊缝,证实HAZ软化区已被有效消除。

(3) γ' 相的尺寸效应是决定时效强化效果的关键因素。 γ' 相尺寸低于临界直径($\sim 30.8\text{ nm}$)时,沉淀强化效果随颗粒长大而增强;超过临界直径后,粗化反而削弱强化效果。该规律可解释两侧母材在时效后硬度变化趋势的差异,也为时效工艺参数的制定提供了理论判据。

(4) 拉伸断裂模式的转变揭示了接头各区域强度的相对变化。焊态HAZ断口呈穿晶断裂,表明 γ' 相回溶使晶内弱化程度大于晶界;PWHT后焊缝呈沿晶与韧窝混合断裂,表明时效析出强化使HAZ强度超过焊缝,焊缝晶界转变为新的相对薄弱环节。

参考文献:

- [1] 王倩,王卫良,刘敏,等.超(超)临界燃煤发电技术发展展望[J].热力发电,2021,50(2):1-9.
WANG Q, WANG W L, LIU M, et al. Development and prospect of (ultra) supercritical coal-fired power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 1-9.
- [2] 刘正东,陈正宗,何西扣,等.630~700 $^{\circ}\text{C}$ 超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展[J].金属学报,2020,56(4):539-548.
LIU Z D, CHEN Z Z, HE X K, et al. Systematical innovation of heat resistant materials used for 630~700 $^{\circ}\text{C}$ advanced ultra-supercritical (A-USC) fossil fired boilers[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 539-548.
- [3] 刘彩云,刘士伟,孙元,等.高温合金熔化焊焊接性的研究进展[J].电焊机,2021,51(1):28-36.
LIU C Y, LIU S W, SUN Y, et al. Research progress on



- fusion welding weldability of superalloys [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(1): 28-36.
- [4] 尹宏飞, 袁勇, 严靖博, 等. 700 °C 先进超超临界电站用高温合金焊接研究进展 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(19): 12-19.
- YIN H F, YUAN Y, YAN J B, et al. Research progress of welding of superalloys for 700 °C advanced ultra-supercritical power plant [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(19): 12-19.
- [5] 谢锡善, 赵双群, 董建新, 等. 超超临界电站锅炉用 Inconel 740 镍基合金的组织稳定性及其改进型研究 [J]. 动力工程学报, 2011, 31(8): 638-643.
- XIE X S, ZHAO S Q, DONG J X, et al. Structural stability and improvement of Inconel Alloy 740 for ultra supercritical power plants [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(8): 638-643.
- [6] 西安热工研究院, 中国华能集团有限公司. HT700P 先进超超临界电站高温部件用材料 (管材) [Z]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2021.
- [7] 刁旺战, 张松, 王萍, 等. 铁镍基合金 HT700P 焊接接头力学性能和微观组织研究 [J]. 电焊机, 2024, 54(10): 53-60.
- DIAO W Z, ZHANG S, WANG P, et al. Mechanical properties and microstructure of iron-nickel based alloy HT700P welded joint [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(10): 53-60.
- [8] 刁旺战, 王萍, 张松, 等. Inconel 740H 焊接接头长时效后的力学性能和组织稳定性 [J]. 电焊机, 2025, 55(10): 148-158.
- DIAO W Z, WANG P, ZHANG S, et al. Mechanical properties and microstructural stability of Inconel 740H welded joint after long-term aging [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 148-158.
- [9] DUPONT J N, LIPPOLD J C, KISER S D. Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- [10] 叶建水, 董建新, 张麦仓, 等. 700 °C 超超临界锅炉用高温合金 617B 和 740H 管道氩弧焊接头微观组织特征 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(9): 2189-2195.
- YE J S, DONG J X, ZHANG M C, et al. Microstructure characteristics of 617B tube and 740H pipe TIG welding joints for 700 °C ultra-supercritical power plant boilers [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(9): 2189-2195.
- [11] LIFSHITZ I M, SLYOZOV V V. The kinetics of precipitation from supersaturated solid solutions [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1961, 19(1-2): 35-50.
- [12] 刘岩岩, 朱丽慧, 周任远, 等. Inconel 617B 合金焊接接头 750 °C 持久微观组织演变对性能的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42(5): 62-67.
- LIU Y Y, ZHU L H, ZHOU R Y, et al. Effect of microstructure evolution on properties of Inconel 617B alloy welded joint creep tested at 750 °C [J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(5): 62-67.
- [13] HUANG Y S, ZHANG R, ZHOU Z J, et al. Effect of long-term aging on microstructural stability and tensile deformation of a Fe-Ni-based superalloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 847: 143298.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

