

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5111

回火次数对超超临界机组用 P92 钢 焊缝显微组织及力学性能的影响

王 瑜¹, 胡鹏飞¹, 坚永鑫², 皇志富²

(1. 陕西省特种设备检验检测研究院 陕西 西安 710054 2. 西安交通大学 材料科学与工程学院 金属材料强度全国重点实验室 陕西 西安 710049)

摘 要:针对超超临界机组 P92 钢管道焊缝在安装过程中经历反复回火的问题,系统探讨了回火次数对焊缝显微组织与力学性能的影响规律。通过 OM、SEM、EBSD 和 TEM 等表征手段,重点分析了 P92 钢焊缝的晶粒形貌演变及析出相分布特征。研究发现,P92 钢焊缝组织主要由回火马氏体、板条界 $M_{23}C_6$ 碳化物和弥散 δ -Fe 相构成。随着回火次数增加, $M_{23}C_6$ 碳化物沿马氏体板条界显著聚集,并优先在 δ -铁素体晶界处形核生长,最终形成连续碳化物网络。分析结果表明,多次回火通过调控碳化物析出行为和位错亚结构重组,使焊缝显微硬度呈下降趋势,而冲击韧性则逐步提升。值得注意的是,经过 4 次回火处理后,部分亚晶粒转变为等轴晶,同时 $M_{23}C_6$ 碳化物在晶界处发生粗化偏聚。该现象不仅导致焊缝中大角度晶界数量急剧增加,还显著弱化了固溶强化效果,最终造成显微硬度出现快速下降。

关键词:P92 钢焊缝;回火处理;显微组织;晶粒取向;冲击性能

中图分类号: TG379

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)10-1003-11

Influence of Tempering Times on the Microstructure and Mechanical Properties of P92 Steel Welds for Ultra-supercritical Units

WANG Yu¹, HU Pengfei¹, JIAN Yongxin², HUANG Zhifu²

(1. Shaanxi Institute of Special Equipment Inspection and Testing, Xi'an 710054, China; 2. School of Materials Science and Engineering, State Key Laboratory of Metal Material Strength, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the issue of repeated tempering during the installation of P92 steel welded joints in ultra-supercritical units, the influence of tempering cycles on the microstructure and mechanical properties of a weld was systematically investigated. The evolution of the grain morphology and the distribution of precipitates in the P92 steel welds were analysed via OM, SEM, EBSD, and TEM characterization techniques. The results reveal that the weld microstructure primarily consists of tempered martensite, $M_{23}C_6$ carbides along lath boundaries, and dispersed δ -Fe phases. With increasing tempering cycles, $M_{23}C_6$ carbides significantly aggregate along martensite lath boundaries and preferentially nucleate and grow at δ -ferrite grain boundaries, eventually forming a continuous carbide network. These findings indicate that multiple tempering treatments regulate carbide precipitation and dislocation substructure rearrangement, leading to a gradual decrease in the microhardness and an improvement in the impact toughness. Notably, after four tempering cycles, some subgrains transform into equiaxed grains, whereas the $M_{23}C_6$ carbides coarsen and segregate at the grain boundaries. This phenomenon not only induces a rapid increase in high-angle grain boundaries but also significantly weakens the solid solution strengthening effect, ultimately resulting in a sharp decline in the microhardness.

Key words: P92 steel weld seam; tempering treatment; microstructure; grain orientation; impact performance

P92 钢作为 P91 钢的改进型材料,通过钨合金化及微硼强化的成分优化,将使用温度提升至 650~700℃ 级别,为超超临界机组实现主蒸汽压力 ≥ 35 MPa、

热效率 $\geq 45\%$ 的性能突破提供了关键材料支撑^[1]。该钢种优异的综合性能主要得益于固溶强化、细晶强化和第二相强化等多种强化机制的协同作用,因此

收稿日期: 2025-06-14

基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划(2019MK162HZ)

作者简介: 王 瑜,1981 年生,博士,高级工程师,研究方向为锅炉、压力容器、压力管道检验及相关研究。Email: 2440023458@qq.com

引用格式: 王瑜,胡鹏飞,坚永鑫,皇志富. 回火次数对超超临界机组用 P92 钢焊缝显微组织及力学性能的影响[J]. 铸造技术,2025,46(10): 1003-1013.

WANG Y, HU P F, JIAN Y X, HUANG Z F. Influence of tempering times on the microstructure and mechanical properties of P92 steel welds for ultra-supercritical units[J]. Foundry Technology, 2025, 46(10): 1003-1013.

锅炉用 P92 钢通常采用正火+回火的热处理工艺^[2], 以确保获得细化的马氏体组织以及 $M_{23}C_6$ 与 MX 相的弥散析出, 从而充分发挥材料的性能优势。

P92 钢因 Cr-Mo-V-Nb-B 多元合金化体系的特性, 在焊接过程中易产生显著的冷裂纹敏感性, 焊后微观组织与力学性能的不均匀性较为突出, 这使得 P92 钢焊接接头常被认定为设备安全运行的薄弱环节^[3]。根据 DL/T 868-2014《火力发电厂焊接工艺规程》与 ASME B31.1-2021《动力管道系统建造规范》规定, P92 钢焊接作业完成后须立即实施焊后消应力热处理(回火), 并通过硬度与金相双重指标进行质量验证, 其中硬度要求降低至 HBW 180~HBW 270(HV 190~HV 285)范围之内。

当前 P92 钢焊接接头的研究多集中于单次热处理工艺优化, 主要考虑回火温度^[4-5]、时间和加热方式^[6-7]等因素。Pal 等^[8]研究表明, 当回火温度低于 760 °C 时, 组织中析出的细小夹杂物数量明显减少, 这将直接影响材料的强度与硬度。杨云志等^[9]与 Sirohi 等^[10]研究也证实了 P92 钢焊接接头最佳的回火温度为 760 °C, 此时材料兼具良好的强度、塑性以及均匀的显微组织。后续, 丁光柱等^[2]和屈国民等^[11]在此温度下研究了回火对 P92 钢焊接接头显微硬度的影响。二者结果均表明, 由于焊缝马氏体板条合并和晶内大量沉淀相析出, 760 °C 回火后焊缝较母材或热影响区的硬度降幅更大。徐忠锋等^[7]研究了电阻覆带式与中频感应加热方式对接头性能的影响。上述研究结果为 P92 钢焊接接头的显微组织调控与力学性能优化提供了理论依据和技术支撑。

在工程实践中, 通常将硬度值趋近于标准范围下限作为工艺控制优良判据, 这促使机组在现场安装阶段对 P92 钢焊接接头实施多次回火处理或延长热处理周期, 从而达成低硬度(HBW 180±10)的超规范质量控制目标。基于这种情况, P92 钢同一焊接接头可能受到多重热循环的影响。本课题组前期研究揭示了多次回火对 P92 钢母材的显微组织及硬度的影响^[12-13]。结果表明, 随着回火次数增加, 马氏体板条宽度逐渐增加, 界面处析出相发生粗化, 马氏体基体中固溶元素逐渐析出, 基体的固溶强化效果减弱, 最终导致了 P92 钢的硬度下降。此外, 李晓

东等^[14]通过蠕变试验(873 K/160 MPa)证实, 经 3 次修复的接头其断裂寿命仅为原始接头的 22%。分析表明, 这一性能劣化主要归因于多重热循环作用下热影响区晶粒尺寸增加以及 $M_{23}C_6$ 相的加速长大。多次修复并未对焊缝产生多次热循环影响, 因此针对 P92 钢焊缝金属在多重热循环下的显微组织演化及力学性能变化规律研究仍存在空白。

本文采用 OM、SEM、XRD、EBSD 和 TEM 等多尺度表征方法, 重点解析 P92 钢多次回火过程中的位错亚结构重组、 $M_{23}C_6$ 相变化及晶粒取向差分布等显微组织演化特征, 进一步明确多次回火工况下 P92 钢焊缝的晶粒演化行为对硬度与冲击韧性的影响。

1 实验材料与方法

选用钢管材料为供货态 ASME-A335 P92 钢, 规格为 OD426 mm×THK40 mm。焊接工艺采用钨极氩弧焊(gas tungsten arc welding, GTAW)进行根部打底, 通过手工电弧焊(shielded-arc-welding, SMAW) 进行填充和盖面工序。针对 V 型坡口对接接头, 施焊前实施 200 °C 预热处理, 并采用多层多道焊接工艺, 严格控制层间温度, 具体工艺参数详见表 1。通过该项焊接工艺调控层间温度, 使焊缝区域形成梯度冷却条件, 可有效抑制 δ -Fe 相的产生^[15-18]。

焊后冷却阶段采用分段控温冷却程序, 待焊缝金属温度降至 80~100 °C 区间后, 保温 1~2 h, 以促进焊接残余应力再分布及晶粒细化。回火热处理采用 SHIMADEN SRS13A 型高精度温度控制器(PID 参数: P=2.0%, I=240 s, D=60 s) 的箱式电阻炉实施, 炉膛有效区温度偏差≤5 °C, 稳态控制精度达±2 °C。热处理工艺设定 250 °C 预热处理温度, 760 °C 回火温度, 回火保温时间 6 h, 确保 P92 钢焊缝金属中元素分布及显微组织均匀化。此外, 升/降温速率严格遵循 150 °C/h 阈值管控。

根据标准 GB/T 3323.1 标准《焊缝无损检测—射线检测》规定, 利用 X 射线探伤仪对首次回火处理后 P92 钢焊接接头进行无损检测, 确认焊接接头符合规定要求。为保证焊材选用可靠性, 采用聚光 M5000 光谱仪测定 P92 钢焊缝成分, 环境温度(23±1) °C, 关键元素 Cr、Mo 检测 RSD≤0.8%, 满足焊材数据可

表1 P92钢焊接工艺参数
Tab.1 Welding process parameters for P92 steel

Weld layer	Welding method	Welding material grade	Welding material diameter/mm	Welding current/A	Arc voltage /V	Welding speed /(mm·min ⁻¹)	Interpass temperature/°C
1~2	GTAW	CARBOROD P92	2.4	90~120	10~14	30~60	≤ 250
3~13	SMAW	CROMOCORD P92	3.2	100~130	20~25	80~140	

表 2 焊缝合金成分
Tab. 2 Alloy composition of the weld seam

(mass fraction/%)														
C	Mn	Si	Cr	Mo	Co	V	W	Ni	N	Cu	B	Al	P	S
0.116	1.099	0.165	8.631	0.488	0.838	0.233	1.881	0.054	0.03	0.019	0.001	0.006	0.008	0.009

靠性验证需求,焊缝成分测试结果见表 2 所示。采用电火花线切割制备 P92 焊缝试样,设置 1 次回火组和多次回火组(3 组,分别实施 1~3 次增量回火)。

采用线切割法分别制备焊缝 1~4 次回火的显微组织分析试样和力学性能试件。显微试样经磨制抛光后,使用优化腐蚀剂^[19](4 mL 30%的 H_2O_2 +3 mL 65%的 HNO_3 +20 mL 洗洁精+2 mL 40%的 HF+100 mL 蒸馏水,质量分数)刻蚀 15 s,随后通过 Leica DM5500 金相显微镜与蔡司 Gemini SEM 500 型扫描电镜进行多尺度形貌观测。采用 EBSD 技术对焊缝的晶粒取向进行分析,设定步长 0.05 μm ,加速电压 15 kV,试件预先倾斜 70°,借助 Channel 软件解析晶粒取向

数据。使用 Bruker D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪和 JEM-2100 型 HRTEM 进行物相表征,并结合 Image Pro Plus 与 GM 3 软件进行衍射图谱解析。

力学性能测试严格遵循 DL/T868-2014 规范。显微硬度检测采用 HXD-1000TMC 型硬度计,在 0.49 N 载荷、10 s 保压条件下,沿垂直方向以 0.04 mm 间隔采集 3 组数据。夏比冲击试验使用 ZBC2302-B 试验机,设定摆锤能量 150 J,砧座跨距(40 $\pm$ 0.2) mm,获取 3 次有效冲击功均值。采用线切割法制备冲击试样,如图 1 所示。冲击断口经 SEM 形貌观测与 Oxford EDS 联用分析,针对性表征第二相析出物的尺寸、形貌及成分分布等。

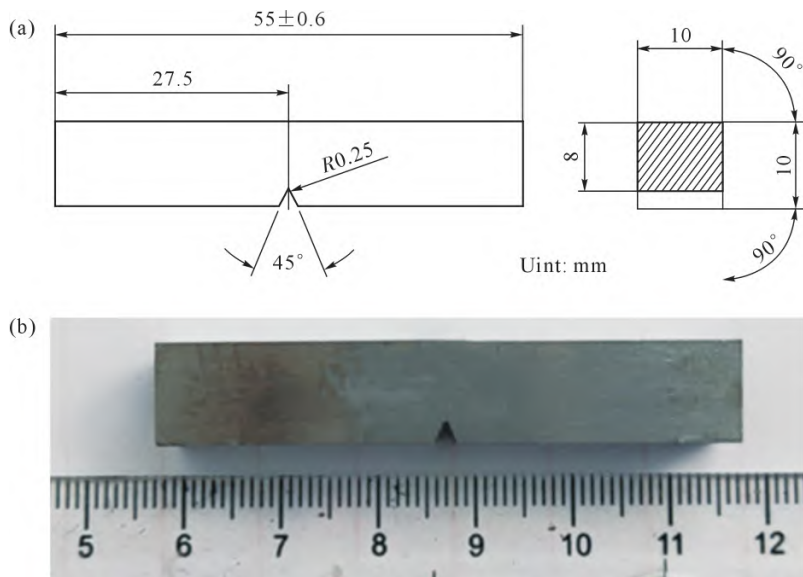


图 1 P92 钢焊缝冲击测试:(a) 制备示意图;(b) 试样实物

Fig.1 Impact test specimen of the P92 steel weld: (a) schematic diagram of preparation; (b) physical image of the sample

2 实验结果及讨论

2.1 微观组织

如图 2 所示,P92 钢焊缝显微组织呈现非均匀回火马氏体基体与弥散分布的 δ -Fe 的复合结构,其中 δ -Fe 体积分数约为 1.4%。在多层多道焊接过程中,焊缝金属发生多次重熔,液态金属自熔合区向焊缝中心方向结晶,最终形成不均匀的铸态马氏体组织^[20]。靠近熔合区的液态金属定向凝固形成较为粗大的柱状晶,而焊缝中心金属均匀形核,形成较为细小的等轴晶。经 760 $^{\circ}C$ 回火处理后,原始凝固组织部分保留,马氏体板条因热激活产生粗化,同时 $M_{23}C_6$ 型碳化物发生脱溶分解。这些微观组织演化

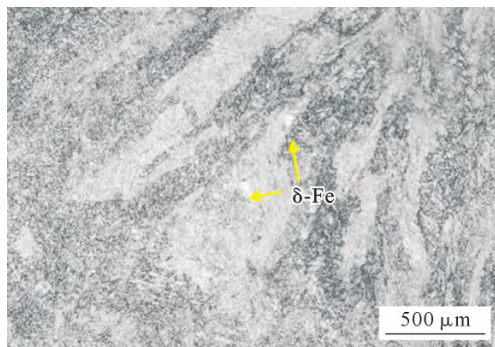


图 2 P92 钢一次回火后焊缝金相组织

Fig.2 Metallographic structure of the weld of P92 steel after once tempering

导致图 2 中板条马氏体形貌的完整性显著降低。

P92 钢焊缝金属合金元素含量较高,尤其是富

含 W、Mo、V、Cr 等高熔点、低扩散性的合金元素,这些元素的添加使得 P92 钢 δ 相区扩大, γ 相区缩小且奥氏体相区向右移动^[21]。因此,在快速冷却过程中,凝固末期残留的液相因 Cr、Mo 等铁素体形成元素的显著富集,会抑制奥氏体转变动力学,最终促使 δ -铁素体相在室温组织中被稳定保留^[16]。从图 2 中可以清晰地看到焊缝中存在块状 δ -铁素体相。

2.2 微观组织演化

图 3 显示了 P92 钢焊缝在不同次数回火处理后显微组织的变化。经 1 次回火处理后,试样呈现典型的回火马氏体板条结构,不同位向板条马氏体构成的马氏体板条束界面不明显,此时 $M_{23}C_6$ 碳化物和 MX 析出相在基体中弥散分布,如图 3a 所示。随着回火次数增加,马氏体组织结构呈现不同阶段的演化特征。2 次回火促使析出相沿马氏体板条界排列,这使得马氏体板条界面更加清晰。3 次回火后,组织仍处于回复阶段,马氏体板条界面处出现粗化析出相,原马氏体板条“竹节”特征已基本消失,这意味着马氏体板条发生明显合并。4 次回火后晶粒形貌变化最为明显,板条型马氏体转变为等轴晶,晶粒尺寸约 $2.9\ \mu\text{m}$ 。此时,晶界处形成连续链状分布的碳化物,在光学显微镜下呈现典型的类回火索氏体形貌。这种组织演变通常会显著材料的塑性变形能力和冲击韧性。研究表明,回火次数对焊缝中碳化物的析出行为与马氏体晶粒形貌具有决定性影响,其中 4 次回火后组织转变最为显著。

为系统分析回火次数对 P92 焊缝晶粒形态的

影响,本文采用电子背散射衍射(EBSD)技术对不同热处理次数下焊缝的晶粒取向特征进行分析。图 4 展示了不同回火次数下焊缝 EBSD 取向成像,其中黑色粗线($\theta > 15^\circ$)与黑色细线($\theta < 15^\circ$)分别表征大角度晶界与小角度晶界。图中清晰地显示了马氏体板条束内部呈现典型亚结构特征,单个板条束由若干取向差较小的平行板条构成,其内部进一步分割为亚晶粒单元,板条束间则形成显著取向差。

随着回火次数增加,晶界演化具有一定的规律性。1 次回火阶段组织表现为典型板条马氏体形貌,取向分布无明显择优特征。经 2 次回火处理后,马氏体板条界发生迁移重组,局部区域出现断续晶界及细小等轴晶,这表明亚晶界通过位错攀移机制启动迁移过程。晶界统计数据显示,小角度晶界比例在 2 次回火时达到峰值(76.52%),如图 5 所示,该现象与亚结构重组初期形成的过渡性界面密切相关。当回火次数增至 4 次时,板条结构逐渐消解,不同取向的等轴晶比例显著增加,同时大角度晶界比例呈上升趋势,表明亚晶通过连续回复机制向更稳定的大角度晶界转变。

位错导致的晶格局部畸变通常表现为相邻测量点间的微小取向差(通常 $<5^\circ$)。因此,通过 KAM 图量化微小取向差,可间接反映位错密度的分布趋势。图 6 为不同回火次数下 P92 钢焊缝微小取向差图。可以看出,1 次试样呈现高位错密度聚集区,这主要是焊后应力未完全消散。2 次回火后,位错重排导致低位错区域扩展,位错密度分布趋于均匀化。随着热处理

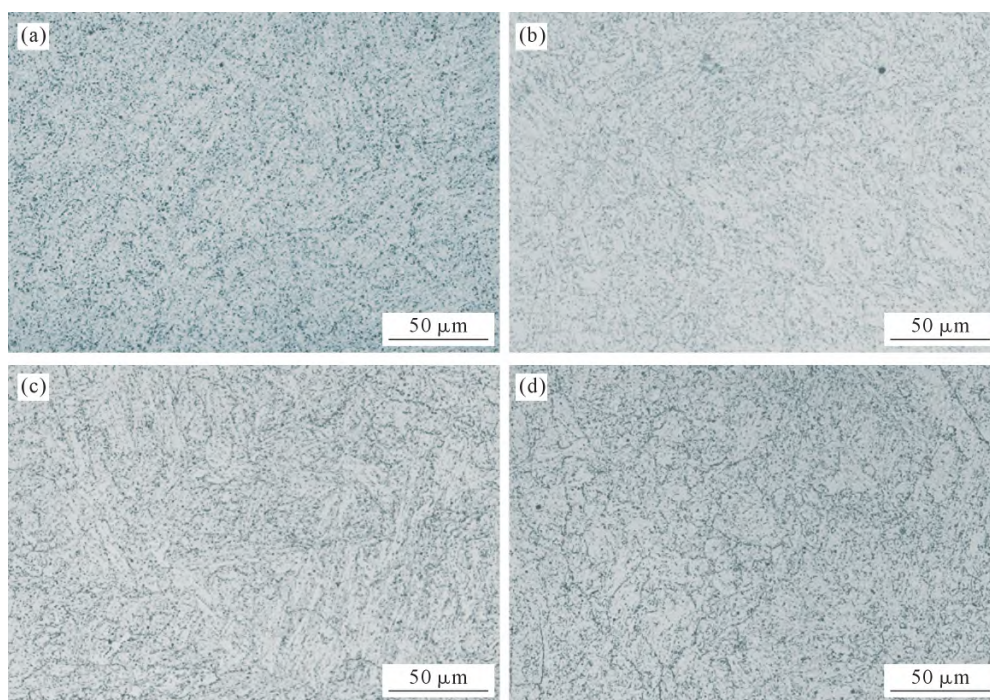


图 3 不同回火次数下焊缝金相组织: (a) 1 次; (b) 2 次; (c) 3 次; (d) 4 次

Fig.3 Microstructure of the weld seam under different tempering frequencies: (a) once; (b) twice; (c) 3 times; (d) 4 times

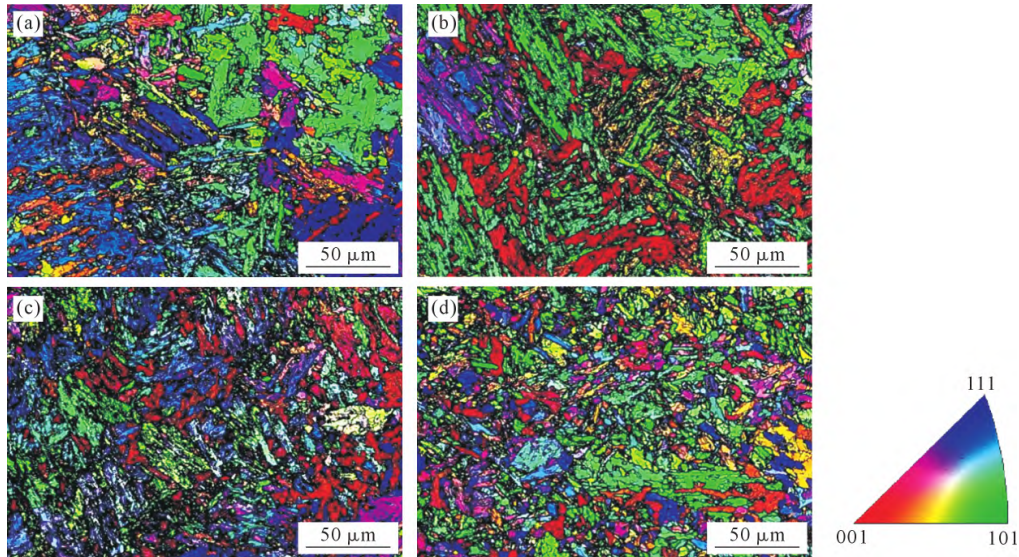


图4 不同回火次数下焊缝 EBSD 取向差:(a) 1 次;(b) 2 次;(c) 3 次;(d) 4 次

Fig.4 EBSD orientation difference diagrams of welds under different tempering frequencies: (a) once; (b) twice; (c) three times; (d) four times

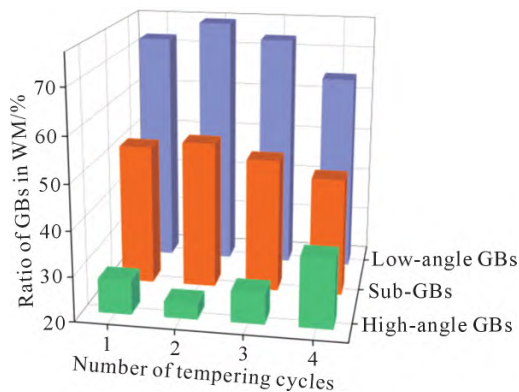


图5 不同回火次数下焊缝晶界占比

Fig.5 Percentage of grain boundaries in the weld zone under different tempering frequencies

次数增加,焊缝 KAM 值整体呈下降趋势,证明位错湮灭与重排机制的协同作用。值得注意的是,纳米级 MX 型碳氮化物在多次回火过程中可有效钉扎位错运动,抑制位错强化的快速衰减,这种弥散强化效应不仅改善材料韧性,还可增强高温下组织稳定性^[12]。

2.3 物相分析

图 7 为不同回火次数下 P92 钢焊缝 XRD 物相分析结果。结果显示,焊缝的衍射峰位与 α -Fe 相标准卡片(PDF#87-0721)高度吻合,其对应晶面指数(110)、(200)及(211)的布拉格衍射峰均完整显现,表明不同热处理次数下焊缝基体均保持体心立方(BCC)结构的 α -Fe 相特征。随着回火次数增加,衍

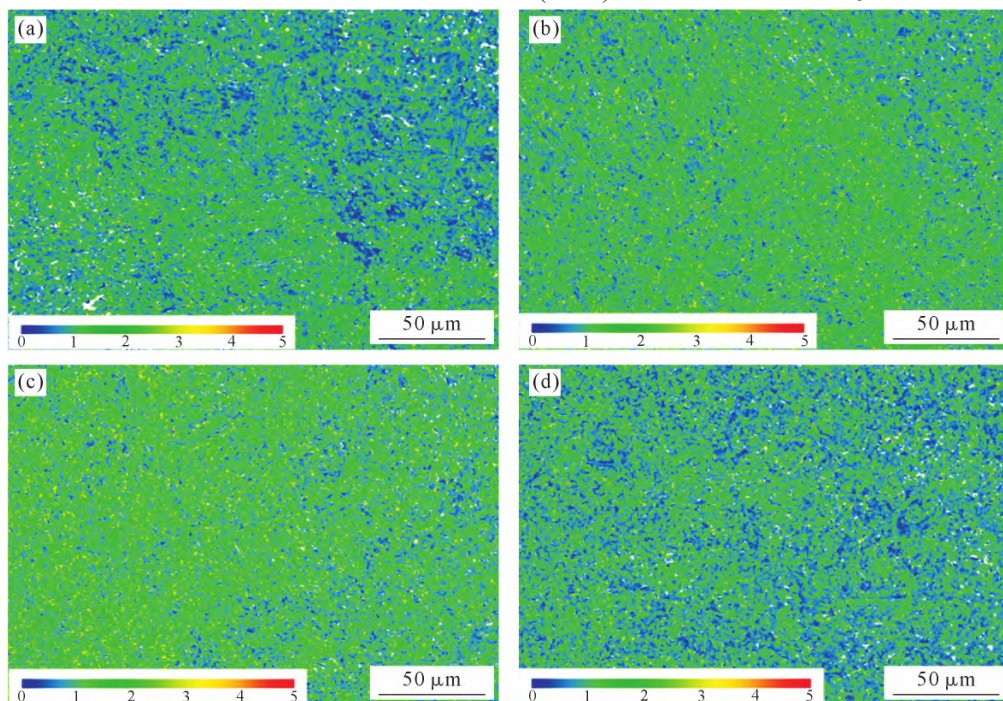


图6 不同回火次数下焊缝 KAM 图:(a) 1 次;(b) 2 次;(c) 3 次;(d) 4 次

Fig.6 KAM map of the welds under different tempering times: (a) once; (b) twice; (c) three times; (d) four times

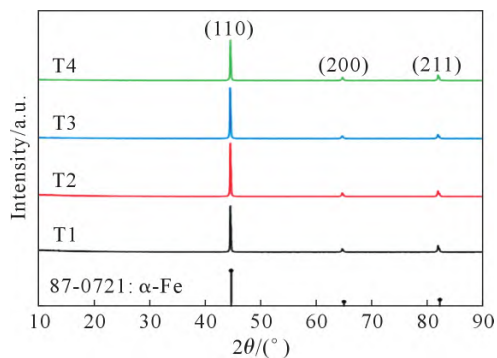


图7 不同回火次数下焊缝 XRD 谱
Fig.7 XRD patterns of welds under different tempering frequencies

射峰仅发生小于 0.1° 的半峰宽偏移,表明多次回火后马氏体相仍为焊缝组织的主要相。XRD 谱中未检测到强度值(I 值)超过基底噪声水平的其他衍射峰,

这直接反映出多次回火后焊缝中碳氮化物总量仍处于较低水平。

图8为场发射扫描电子显微镜(FESEM)对焊缝组织析出相分布特征的显微表征结果。SEM 分析表明,纳米级析出相优先分布于原始奥氏体晶界(prior austenite grain boundaries, PAGBs)及马氏体板条界面区域。定量分析显示,经1~4次回火处理后析出相平均粒径由199.8 nm增至212.8 nm,增幅达6.5%,这一分析证实 P92 钢焊缝组织根据 Ostwald 熟化机制主导 $M_{23}C_6$ 相粗化过程。1次回火后,组织中析出相呈现均匀分散状态, $M_{23}C_6$ 相尺寸约216 nm。随着回火次数增加,析出相呈现明显的晶界偏聚倾向,马氏体晶界和亚晶界处 $M_{23}C_6$ 相的粗化与偏聚程度较大, MX 相相对稳定。

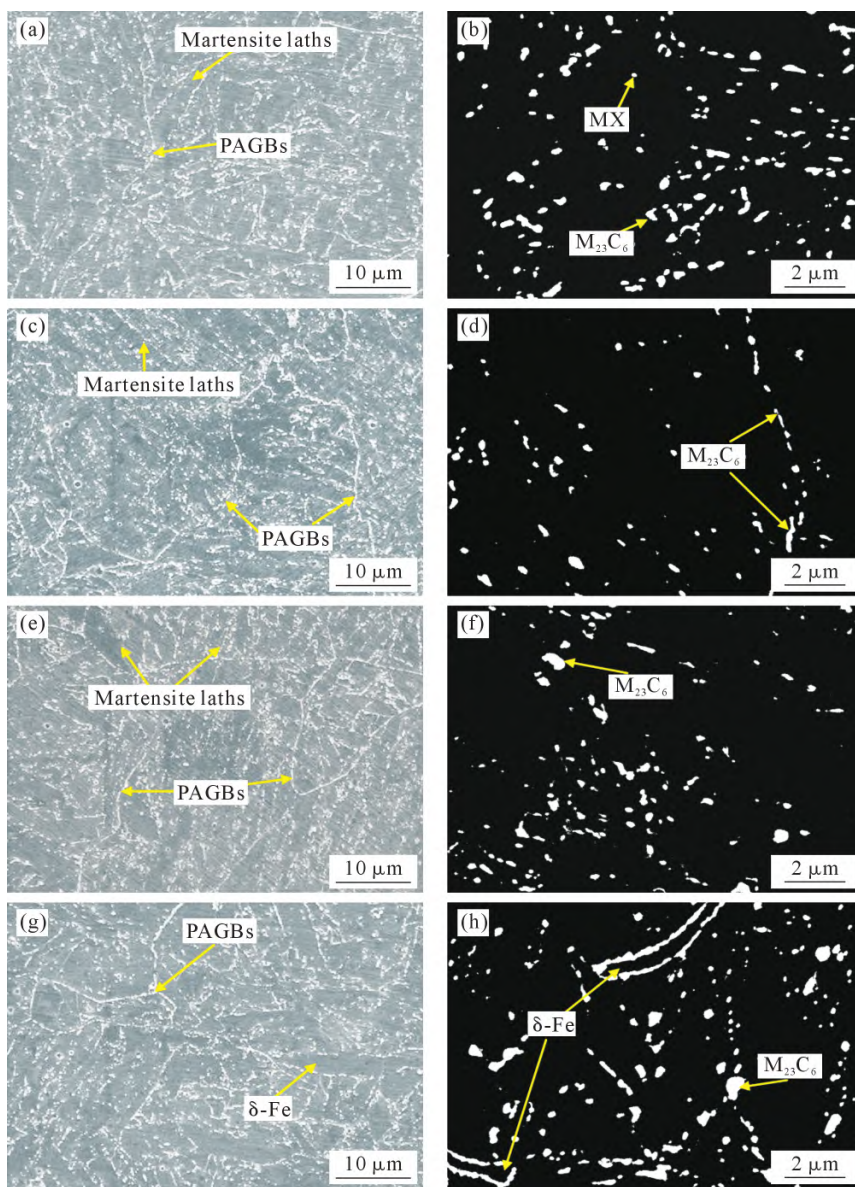


图8 不同回火次数下焊缝 SEM 形貌: (a, c, e, g) 低倍下回火1~4次试样; (b, d, f, h) 高倍暗背景下回火1~4次试样
Fig.8 SEM images showing the morphology of the weld under different tempering frequencies: (a, c, e, g) samples after tempering 1 to 4 times under low magnification; (b, d, f, h) samples after tempering 1 to 4 times under a dark high-magnification background

值得注意的是, $M_{23}C_6$ 碳化物在 δ -铁素体晶界处偏聚倾向更为严重, 4 次回火可清晰地看到 δ -铁素体晶界形成连续分布的 $M_{23}C_6$ 碳化物网络, 如图 8 h 所示。前期研究表明, δ -铁素体作为 Cr、W、Mo 等合金元素的快速扩散通道, 其界面能量状态直接影响了 $M_{23}C_6$ 碳化物的形核动力学, 使得碳化物优先于 δ -铁素体晶界处形核生长^[13]。多次回火过程中, δ -铁素体/马氏体两相界面处元素浓度梯度驱动析出相形核生长, 导致界面应力集中系数提高, 以及焊缝的缺口敏感性增强。尽管 δ -铁素体本征界面能较高, 对室温下晶界强度有益^[22], 但沿其晶界形成的连续碳化物会显著降低材料力学性能。此外, δ -铁素体的高能晶界通常伴随局部应力集中, 这种界面

在高温(>620 °C)下性能劣化尤为显著, 容易引发材料的沿晶开裂^[23-26]。

由于析出相尺寸处于纳米级, SEM 能谱分析仪在相组成与合金元素含量变化的表征中存在局限性。为精确解析 P92 钢焊缝中析出相随回火次数演变的微观演化机制, 采用透射电子显微镜(TEM)及其配套能谱分析系统进行表征, 如图 9 所示。图 9a 和 b 分别展示了 1 次和 4 次回火焊缝的 TEM 明场相。马氏体基体为 α -Fe, 通过选区电子衍射进一步分析验证, 1 次与 4 次回火试样的 α -Fe 均保持体心立方马氏体结构, 如图 9c 和 d 所示; 基体界面处则存在约 200 nm 的短棒状 $M_{23}C_6$ 碳化物, 其晶体学特征通过衍射斑点标定得以确认, 见图 9e 和 f; 基体内部分布有

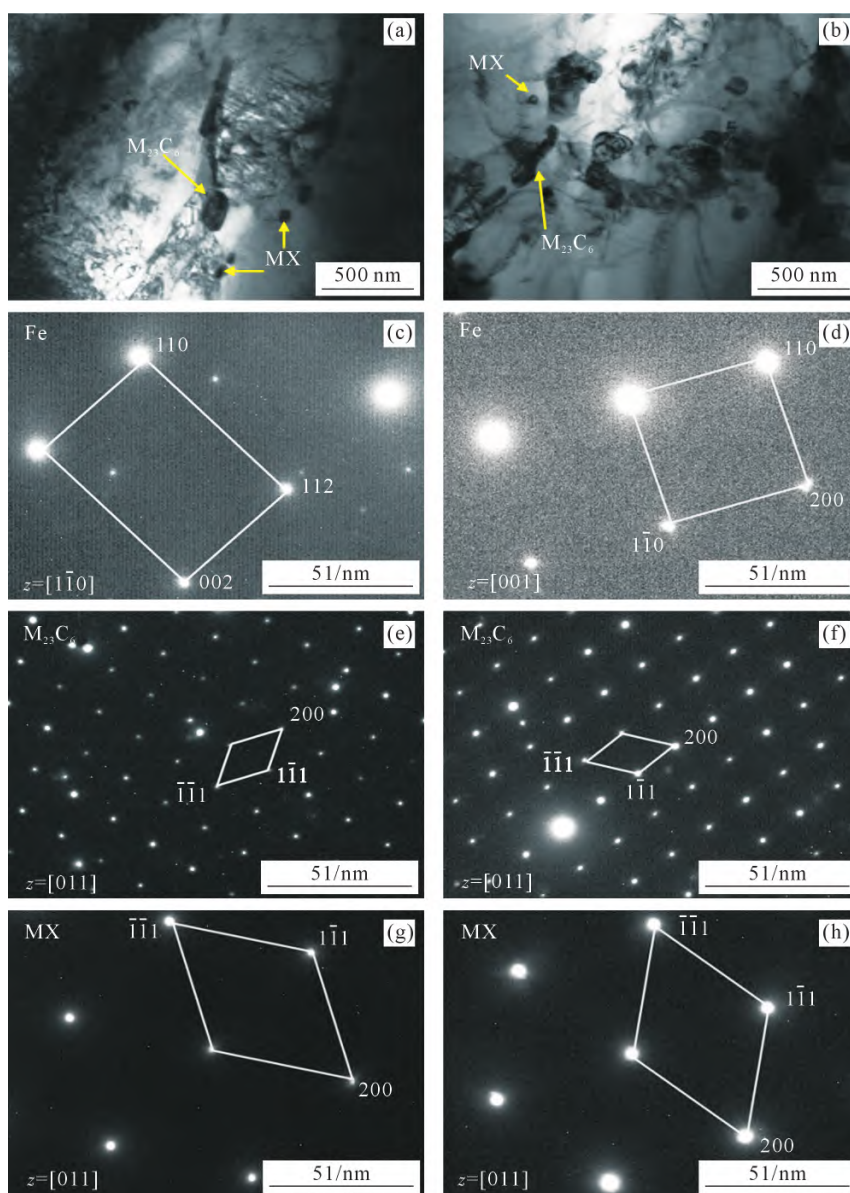


图 9 不同回火次数下焊缝组织 TEM 像:(a, b) 回火 1 次及 4 次试样明场像;(c, d) 回火 1 次及 4 次试样基体衍射斑点;(e, f) 回火 1 次及 4 次试样 $M_{23}C_6$ 相衍射斑点;(g, h) 回火 1 次及 4 次试样 MX 相衍射斑点

Fig.9 TEM images of the weld microstructure under different tempering times: (a, b) bright-field images of samples tempered once and four times; (c, d) diffraction spots of the matrix of samples tempered once and four times; (e, f) diffraction spots of the $M_{23}C_6$ phase of samples tempered once and four times; (g, h) diffraction spots of the MX phase of samples tempered once and four times

约 50 nm 的等轴状 MX 型碳氮化物,同时可见少量位错结构,如图 9g 和 h 所示。随着回火次数增加,板条马氏体内部位错密度显著降低,但 MX 相未呈现明显粗化趋势。

多次回火过程中,沿晶界持续析出的 $M_{23}C_6$ 碳化物通过钉扎位错运动可有效调节晶界取向差分布。焊缝可通过多次回火处理调整析出相分布位置,提升焊缝的强度。随着回火次数增加,马氏体及 δ -铁素体界面为 Cr、W 和 Mo 等合金元素打开的快速扩散通道^[27],使得 $M_{23}C_6$ 碳化物沿晶界快速聚集,这不可避免地导致了界面应力集中与界面能的降低。当焊缝承受冲击载荷或发生裂纹扩展时,马氏体界面能的降低将导致裂纹扩展所需能量耗散减少,致使裂纹在大角度晶界处的偏折程度减弱。

多次回火过程中,焊缝组织中马氏体板条内固溶元素不断析出,Fe 与 Cr+Mo+W 元素含量比值变化可以间接反映材料固溶强化效果变化^[13]。借助 SEM 能谱仪对马氏体板条和析出相中合金元素进行分析,结果如图 10 所示。分析表明,随着回火次数增加,马氏体内 Fe/(Cr+Mo+W)元素比值先增加后降低,析出相中上述元素比值成相反趋势。回火 1~3 次时马氏体内 Cr、Mo 和 W 元素逐渐析出,而析出相中上述元素的富集程度显著提升,这一变化表明 1~3 次回火时焊缝组织固溶强化效应的逐步衰减。值得注意的是,析出相在多次回火条件下发生明显的晶界粗化与偏聚现象,该现象源自于 Cr、Mo 和 W 元素沿晶界的快速扩散。从上述晶界占比分析可知,多次回火过程中大角度晶界先增多后减少。因此,大角度晶界的占比影响着 Cr、Mo 和 W 元素扩散速率。多次回火导致的合金元素迁移扩散与位错亚结构回复重构具有耦合作用,由此引发的固溶强化与第二相强化协同作用衰退,进而影响 P92 钢焊缝硬度与韧性。

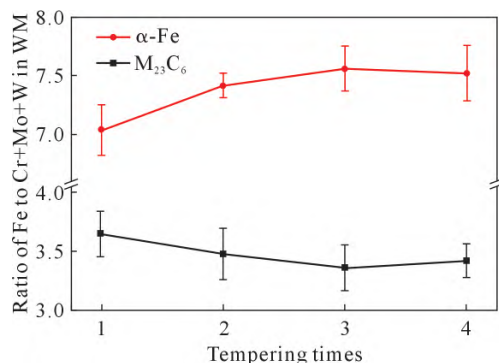


图 10 P92 焊缝中 Fe/(Cr+Mo+W) 比值变化规律

Fig.10 Variation pattern of the Fe/(Cr+Mo+W) ratio in the P92 weld

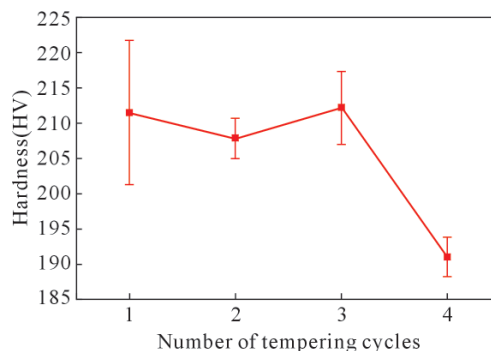


图 11 不同回火次数下焊缝组织显微硬度变化

Fig.11 Microhardness changes in welded joints under different tempering frequencies

2.4 显微硬度

随着回火次数增加, $M_{23}C_6$ 相中 Cr、Mo、W 元素的富集度呈递增趋势,而马氏体内合金元素固溶度呈现逆向衰减特征,这些元素迁移过程与位错亚结构动态回复形成协同作用机制,影响焊缝显微硬度的变化。图 11 显示了 1~4 次回火后焊缝的平均显微硬度变化。试验结果表明,随着回火次数增加,焊缝显微硬度呈非线性衰减趋势。1 次回火后焊缝平均硬度为 211.5 HV,此时焊缝显微硬度不均匀程度较大,这主要是焊缝组织的焊后内应力仍有残余。2 次回火以后,显微硬度的差异化明显减小,内应力得以消除。1 次回火使得组织中第二相部分析出,而 2 次回火后组织中固溶元素析出, $M_{23}C_6$ 相发生熟化,位错密度随之降低,进而引发了显微硬度衰退。回火 4 次后试样显微硬度显著降低,其较 3 次试样的显微硬度降低约 10%。从图 6 可以看出,4 次回火后试样亚晶转变为等轴晶,大角度晶界占比明显增多。随着马氏体晶粒尺寸的显著降低,晶界面积明显增大,过量晶界导致了材料显微硬度的快速降低。此外,随着合金元素沿晶快速扩散,马氏体基体的固溶强化效果降低,进一步影响了焊缝硬度的下降。

P92 钢焊缝呈现硬度分布不均匀特征,局部区域显微硬度相对较低,可以发现软化区有 δ -铁素体相存在。 δ -Fe 相与马氏体基体在晶体结构及热力学稳定性方面存在显著差异,其作为力学性能薄弱相,在高温循环载荷作用下易萌生微裂纹并扩展为断裂源^[28]。然而,在室温下 δ -Fe 相则表现为韧性有益相。

2.5 冲击韧性

图 12 显示了不同回火次数对 P92 钢焊缝冲击韧性的演化规律。结果表明,1 次回火后焊缝冲击功为 68.82 J,经 4 次回火后提升至 138.48 J,呈现 101% 的增幅。这表明多次回火处理可有效优化焊缝的冲击性能。多次回火后位错密度降低和促进板条合并改善了冲击韧性,同时也影响了亚结构稳定性,导致了

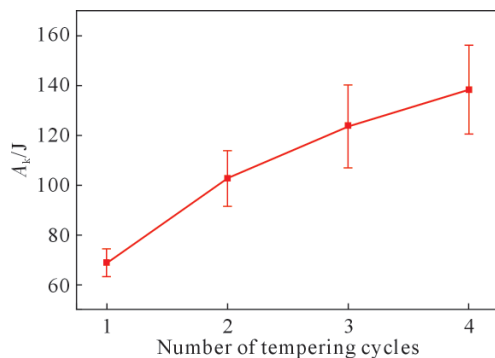


图 12 不同回火次数下焊缝冲击吸收功变化

Fig.12 Variations in weld impact absorption energy under different tempering frequencies

析出相弥散性的降低,因此需关注多次回火引发的亚结构失稳风险,其可能削弱长期服役性能。林永祥等^[29]试验结果显示,P92 钢焊条熔覆金属在 600 °C、加载应力 220 MPa 条件下持续加载至 1 070 h 时,大量细小的 Laves 相在晶界上析出。Aghajania 等^[30]利用透射电镜观察证实, $M_{23}C_6$ 碳化物中 Mo、Cr 元素借助晶界快速扩散通道,加速了 Laves 相的在晶界处的优先形核与粗化。粗化后的 Laves 相与基体形成非共格界面,成为微裂纹的优先萌生位置。Laves 相的粗化与焊缝中 $M_{23}C_6$ 相的演化过程相似,通过分析多次回火对焊缝组织和力学性能的影响可进一步优化 P92 钢焊接热处理工艺,同时也可避免 P92 钢焊缝高温性能的过早劣化。

为进一步分析多次回火后 P92 钢焊缝冲击性能的变化规律,借助 SEM-BSE 对焊缝冲击试样断

口进行微观分析,如图 13 所示。结果表明,焊缝冲击断口截面典型的韧脆混合断裂特征,可划分为裂纹萌生区与裂纹扩展区。图 13a 显示,1 次回火试样裂纹萌生区以浅韧窝为主,韧窝内可见纳米级析出相,平均尺寸 182.6 nm,这与析出相弥散析出密切相关。随着回火次数增加至四次,韧窝尺寸显著增大至 5.8 μm ,析出相平均粒径粗化至 201.2 nm,见图 13b,这表明析出相粗化导致对位错的钉扎作用与应力集中效应减弱,材料塑性显著提高。扩展区呈现河流状解理断裂特征,见图 13c 和 d。1 次回火试样解理面平整,没有观察到撕裂棱,而 4 次回火试样解理面粗糙度增加,撕裂棱宽度约 2.5~5 μm ,同时可观察到细小韧窝,反映出马氏体基体韧性的提升。较小的解理面通过撕裂棱连接,而撕裂棱分布着大量的韧窝带,局部表现为同方向的解理面,这些局部解理面表现出沿晶断裂的特征。这一现象可能是由于 $M_{23}C_6$ 碳化物与 δ -铁素体界面较为薄弱,裂纹更易沿马氏体与 δ -铁素体晶界扩展^[28]。

多次回火处理显著改善了 P92 钢焊缝的常温冲击性能,其机制主要源于马氏体基体固溶强化效应弱化。析出相的阻碍作用也促使裂纹扩展阻力提升,焊缝的室温冲击韧性得以提高。然而, $M_{23}C_6$ 碳化物粗化导致界面应力集中,其与马氏体界面结合强度降低,裂纹扩展路径也由穿晶主导转向为沿 δ -铁素体/马氏体晶界扩展,这些因素可能加剧大角度界面脱粘倾向。因此,P92 钢焊接接头的回火次数需

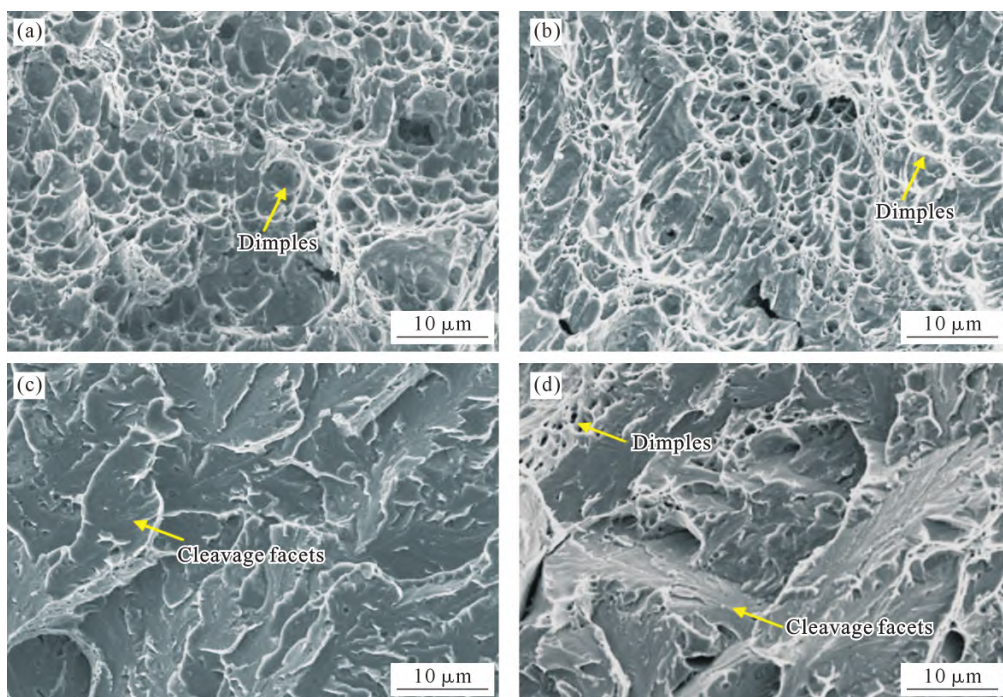


图 13 不同回火次数下焊缝冲击断口微观形貌:(a, b) 回火 1 次和 4 次试样裂纹萌生区;(c, d) 回火 1 次和 4 次试样裂纹扩展区

Fig.13 Microscopic morphology of weld fracture under different tempering frequencies: (a, b) fracture initiation zones of samples tempered once and four times; (c, d) expanded areas of samples tempered once and four times

在维持材料初始服役性能的条件下进行优化控制,避免过度回火。

3 结论

(1)1次回火后,焊缝呈现典型板条状回火马氏体形貌, δ -铁素体、 $M_{23}C_6$ 碳化物和MX析出相弥散分布。随着回火次数增加,碳化物沿晶界逐渐析出,位错运动驱动亚晶界迁移合并形成等轴亚晶粒,并伴随不同晶界比例变化。回火2次时,小角度晶界达到峰值76.52%。这一结果表明,多次回火通过板条碎化与亚晶重组机制,加速了亚晶界的形成和亚晶向等轴晶的改变,因而主要沿大角度晶界扩散的Cr、Mo等合金元素的扩散速率随之大角度晶界比例改变。随着回火次数增加, $M_{23}C_6$ 相向晶界偏聚程度逐渐减缓。

(2)4次回火后 $M_{23}C_6$ 碳化物平均尺寸较1次回火增大6.5%,且沿 δ -铁素体/基体界面形成连续碳化物网络。 δ -铁素体作为高扩散速率通道,通过界面能调控机制促进 $M_{23}C_6$ 优先形核,同时引发局部应力集中。随着马氏体板条宽化与板条内析出相密度降低,回火导致焊缝位错钉扎效应与固溶强化效果显著弱化。

(3)多次回火处理使焊缝显微硬度由初始211.5 HV降至4次回火后191.1 HV,冲击韧性则由68.82 J提升至138.5 J,该结果归因于马氏体基体软化、位错密度降低及析出相分布优化。4次回火后 $M_{23}C_6$ 碳化物晶界偏聚及应力集中更为严重,过量晶界和固溶强化效果降低导致了材料显微硬度急剧变化,较3次回火试样降低约10%。

参考文献:

- [1] ADHITHAN B, PANDEY C. Study on effect of grain refinement of P92 steel base plate on mechanical and microstructural features of the welded joint[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2021, 192: 10426.
- [2] 丁光柱,郭未昀,孙松涛,李世会,胡传华,李红武,李报,王顺兴. 焊后热处理对P92钢焊接接头显微组织和力学性能的影响[J]. 电焊机, 2020, 50(10): 44-49, 127.
DING G Z, GUO W Y, SUN S T, LI S H, HU C H, LI H W, LI B, WANG S X. Effect of postweld heat treatment on microstructure and mechanical properties of P92 steel welded joint[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(10): 44-49, 127.
- [3] 洪鼎华,王环丽,李武平,蔡文河,董树青,刘茂生,曾燕屏. 在役P92钢蒸汽管道焊接接头中缺陷的研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(18): 113-120.
HONG D H, WANG H L, LI W P, CAI W H, DONG S Q, LIU M S, ZENG Y P. Study on defects in welded joints of hot reheat steam pipe of ultra supercritical units after long-term service[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(18): 113-120.
- [4] 郑海臣,张丰收,李俊峰,刘绍威,姚鹏乐. 正、回火对P92钢焊缝及母材组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(12): 182-185.
ZHENG H C, ZHANG F S, LI J F, LIU S W, YAO P L. Effect of normalizing and tempering on microstructure and properties of P92 steel weld and base metal[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(12): 182-185.
- [5] 郑东升,刘丹,罗登,李慧中,张青学,张永东,杨小军. 回火温度对超高强度钢微观组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(12): 90-96.
ZHENG D S, LIU D, LUO D, LI H Z, ZHANG Q X, ZHANG Y D, YANG X J. Effect of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of ultra-high strength steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(12): 90-96.
- [6] 赵强,盛慧,安威,彭先宽,徐广信. P92钢正火均温性控制[J]. 热力发电, 2016, 46(24): 100-104, 109.
ZHAO Q, SHENG H, AN W, PENG X K, XU G X. Control of thermal homogeneity of normalizing process for P92 steel [J]. Thermal Power Generation, 2016, 46(24): 100-104, 109.
- [7] 徐忠锋,王淦刚,鲁立,朱平,杨佳. 焊后热处理对P92钢焊接接头显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(1): 148-151.
XU Z F, WANG G G, LU L, ZHU P, YANG J. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of P92 steel welded joint[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(1): 148-151.
- [8] PAL V K, SINGH L P. Study on normalizing and tempering treatment regime of homogenization of P92 weldments[J]. Metallophysics & Advanced Technologies, 2024, 46(5): 431-452.
- [9] 杨云志,刘洪波,姚凤祥,赵艳荣. 超超临界机组P92钢的组织与力学性能研究[J]. 特钢技术, 2019, 25(2): 7-10, 17.
YANG Y Z, LIU H B, YAO F X, ZHAO Y R. Microstructure and mechanical properties of P92 steel used in ultra-supercritical units [J]. Special Steel Technology, 2019, 25(2): 7-10, 17.
- [10] SIROHI S, KUMAR A, SONI S, DAK G, KUMAR S, ŚWIERCZYŃSKA A, ROGALSKI G, FYDRYCH D, PANDEY C. Influence of PWHT parameters on the mechanical properties and microstructural behavior of multi-pass GTAW joints of P92 steel[J]. Materials, 2022, 15(12): 4045.
- [11] 屈国民,牛婧,胡彬,刘纯,马尚,谢亿. 回火温度对P92钢焊接接头组织和性能的影响[J]. 热处理技术, 2014, 43(9): 44-47.
QU G M, NIU J, HU B, LIU C, MA S, XIE Y. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of P92 steel welded joint[J]. Heat Treatment Technology, 2014, 43(9): 44-47.
- [12] 王瑜,坚永鑫,胡鹏飞,王耿洁,皇志富. 多次热处理对超超临界锅炉用P92钢显微组织及硬度的影响[J]. 铸造技术, 2023, 44(11): 997-1003.
WANG Y, JIAN Y X, HU P F, WANG G J, HUANG Z F. Effect of the tempering times on the microstructure and hardness of P92 steel for USC Boilers[J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 997-1003.
- [13] WANG Y, JIAN Y X, XU R B, WANG Q S, ZHANG X M, DANG

- W J, HUANG Z F. Microstructure evolution and mechanical behaviors of P92 steel welded joint with repetitive post tempering[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2023, 25(13): 2300018.
- [14] 李晓东, 麦雷, 王振, 姚赞新, 郝嘉琦, 车畅. 多次焊接修复对 P92 钢焊接接头运行安全的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2024, 36(4): 538-544.
- LI X D, MAI L, WANG Z, YAO Z X, HAO J Q, CHE C. Effect of multiple welding repairs on operational safety of P92 steel welded joint[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2024, 36(4): 538-544.
- [15] PANDEY C, MAHAPATRA M M, KUMAR P, SAINI N. Some studies on P91 steel and their weldments[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 743: 332-364.
- [16] SAINI N, MULIK R S, MAHAPATRA M M, KANNAN R, SHARMA N K, LI L J. Dissolution of δ -ferrite and its effect on mechanical properties of P92 steel welds[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 796: 139370.
- [17] SAINI N, MULIK R S, MAHAPATRA M M. Effect of welding process parameters on embrittlement of Grade P92 steel using Granjon implant testing of welded joints[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45: 10189-10198.
- [18] MADURAIMUTHU V, VASANTHARAJA P, VASUDEVAN M, PANIGRAHI B S. Microstructure and mechanical properties of 9Cr-0.5Mo-1.8W-VNb (P92) steel weld joints processed by fusion welding[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 813: 141186.
- [19] 梁碧珂, 田晓, 徐慧. 一种显示 P91 钢和 P92 钢原奥氏体晶界的浸蚀剂[J]. *理化检验(物理分册)*, 2019, 55(5): 318-320.
- LIANG B K, TIAN X, XU H. An etchant for displaying original austenite grain boundaries of P91 and P92 steels[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis(Part A: Physical Testing)*, 2019, 55(5): 318-320.
- [20] YUN H S, KOO J S, LEE Y K, BONG B U, NAHM S H. Effect of δ -ferrite in welded ER308 and ER316 microstructure on hydrogen embrittlement[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(50): 19297-19314.
- [21] 石如星, 刘正东, 张才明. P92 耐热钢 δ -铁素体含量的热力学计算与试验分析[J]. *钢铁*, 2011, 46(11): 89-92.
- SHI R X, LIU Z D, ZHANG C M. Thermodynamic calculation and experimental measurement of δ -ferrite amount in P92 heat-resistant steel[J]. *Iron & Steel*, 2011, 46(11): 89-92.
- [22] KNEZEVIC V, LEFEBVRE B, PAREZANOVIC I. P92 抗蠕变钢管微观组织对持久性能的影响[J]. *热力发电*, 2016, 45(3): 87-91.
- KNEZEVIC V, LEFEBVRE B, PAREZANOVIC I. Effect of microstructure on long term properties of P92 creep resistant steel[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(3): 87-91.
- [23] LI S Z, ELINIYAZA Z, ZHANG L T, SUN F, SHEN Y Z, SHAN A D. Microstructural evolution of delta ferrite in SAVE12 steel under heat treatment and short-term creep[J]. *Materials Characterization*, 2012, 73: 144-152.
- [24] ABE F, NAKAZAWA S. Microstructural evolution and creep behaviour of bainitic martensitic and martensite ferrite dual phase Cr2W steels[J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 8(12): 1063-1069.
- [25] SKLENIČKA V, KUCHAROVÁ K, KRÁL P, KVAPILOVÁ M, SVOBODOVÁ M, ČMAKAL J. The effect of hot bending and thermal ageing on creep and microstructure evolution in thick-walled P92 steel pipe[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 644: 297-309.
- [26] KHAYATZADEH S, TANNER D W J, TRUMAN C E, FLEWITT P E, SMITH D J. Influence of thermal ageing on the creep behaviour of a P92 martensitic steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 708: 544-555.
- [27] 雍岐龙, 孙新军, 郑磊, 雍兮, 刘振宝, 陈明新. 钢铁材料中第二相的作用[J]. *科技创新导报*, 2009(8): 2-3.
- YONG Q L, SUN X J, ZHENG L, YONG X, LIU Z B, CHEN M X. Effects of second phases in steel materials[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2009(8): 2-3.
- [28] SUN H L, XU Q F, LI D D, WEI L, YAN L C, PANG X L, GAO K W. Effect of δ -ferrite on the H-trapping behavior in the martensitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28: 2955-2961.
- [29] 林永祥. P92 钢焊条熔敷金属 600 °C 持久测试及微观组织演变研究[J]. *焊接技术*, 2021, 50(2): 13-17, 105-106.
- LIN Y X. Study on creep rupture tests and microstructure evolution of P92 steel electrode deposited metal at 600 °C[J]. *Welding Technology*, 2021, 50(2): 13-17, 105-106.
- [30] AGHAJANI A, SOMSEN C, EGGELER G. On the effect of long-term creep on the microstructure of a 12% chromium tempered martensite ferritic steel[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(17): 5093-5106.

(责任编辑: 宫文婧)