



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.06

超超临界锅炉水冷壁MIG堆焊修复工艺研究

张焱¹, 石天琪¹, 王强¹, 刘洋², 赵义瀚², 姜英龙^{2*}, 徐玉君², 王唯一²

1. 陕西榆林能源集团横山煤电有限公司, 陕西 榆林 719000

2. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

摘要: 针对火力发电厂锅炉水冷壁管减薄失效的问题, 提出采用 MIG 立向下堆焊 ERNiCrMo-3 的工艺修复方法, 探索堆焊工艺参数的影响规律并获取最优参数, 通过对焊缝进行目视检测、X 射线检测、力学检测、金相分析来验证焊接工艺的稳定性。研究表明: 锈蚀深度在 450 μm , 焊丝与母材热膨胀系数位于同一量级不会导致焊接接合面的剥离, 目视检测及 X 射线检测结果 I 级, 剪切强度 491 MPa 高于 15CrMoG 基材标准值 440 MPa, 侧弯无裂纹缺陷, 焊缝区组织构成为 γ 固溶体+析出相, 过热区组织构成为贝氏体, 正火区组织构成为贝氏体+少量珠光体, 不完全正火区组织构成为铁素体+贝氏体+珠光体, 硬度显示在粗晶区出现小峰值, 由于此区域内出现贝氏体的缘故。本研究为堆焊修复水冷壁管提供技术支持, 并为实际修复水冷壁工作提供新的思路。

关键词: MIG 立向下; 堆焊; ERNiCrMo-3; 焊接工艺

中图分类号: TG455 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)02-0056-07

Research on MIG Cladding Repair Technology for Water-cooled Walls in Ultra-supercritical Boilers

ZHANG Yan¹, SHI Tianqi¹, WANG Qiang¹, LIU Yang², ZHAO Yihan², JIANG Yinglong^{2*}, XU Yujun²,
WANG Weiyi²

1. Shaanxi Yulin Energy Group Hengshan Coal and Electricity Co., Ltd., Yulin 719000, China

2. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China

Abstract: To address the thinning failure of water wall tubes in coal-fired power plant boilers, this study proposes a repair method using MIG vertical-down overlay welding with ERNiCrMo-3 filler wire. The influence of welding parameters was systematically investigated to optimize the process. The welding stability was verified through visual inspection (VT), radiographic testing (RT), mechanical testing, and metallographic analysis. Key findings include: The corrosion depth was measured at approximately 450 μm . The similar thermal expansion coefficients between the filler wire and base metal (15CrMoG) prevented interfacial delamination. Both VT and RT results met Class I acceptance criteria. The shear strength reached 491 MPa, exceeding the standard value (440 MPa) of 15CrMoG base material. No cracks were observed in side bend tests. Microstructural characterization revealed: Weld zone: γ solid solution with precipitated phases. Overheated zone: Bainite. Normalized zone: Bainite with minor pearlite. Partially normalized zone: Ferrite, bainite, and pearlite. A slight hardness peak in the coarse-grained zone was attributed to bainite formation. This study provides technical support for overlay welding repair of water wall tubes and offers a new approach for practical maintenance applications.

收稿日期: 2025-07-19 修回日期: 2025-12-18

作者简介: 张焱(1975—), 高级工程师, 主要从事先进金属材料焊接性及焊接冶金研究。E-mail: 865620690@qq.com。

通讯作者: 姜英龙(1989—), 高级工程师, 主要从事先进材料焊接性研究及焊接工艺开发。E-mail: jiangyinglong27@163.com。

Keywords: MIG downward; surfacing; ERNiCrMo-3; welding process translation

引用格式:张焱,石天琪,王强,等. 超超临界锅炉水冷壁 MIG 堆焊修复工艺研究[J]. 电焊机,2026,56(2):56–62.

Citation: ZHANG Yan, SHI Tianqi, WANG Qiang, et al. Research on MIG Cladding Repair Technology for Water-cooled Walls in Ultra-supercritical Boilers[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 56–62.

0 前言

超超临界锅炉水冷壁长期服役于高温、高压以及复杂腐蚀环境下,会发生腐蚀、磨损和开裂的现象,严重影响锅炉的安全运行和使用寿命。在实际工程应用中,锅炉水冷壁不同部位受损情况不同,若采用大面积更换水冷壁的方式,成本高昂。因此尝试水冷壁的修复工作具有重要的工程意义^[1-4]。

目前吴肖等^[5]认为材料经长期服役后,其微观组织结构及力学性能会发生退化现象,退化导致材料的强度、韧性、硬度等关键力学数值发生变化,材料组织发生劣化,影响相关设备的服役安全。Zheng 等^[6]认为超临界锅炉水冷壁集箱管座的失效是延迟断裂,属于热应力裂纹,水冷壁管之间热应力过大是裂纹的主要影响因素。刘福广等^[7]认为采用焊接修复的方式能有效解决高温、高压条件下,部件产生的气孔、裂纹等缺陷。Nachimuthu 等^[8]认为堆焊是修复损坏零件的一种潜在方式,因其具备更高的生产效率,且 ERNiCrMo-3 堆焊层具有优异的抗高温腐蚀性。黄继忠等^[9]开展自动 TIG 焊接工艺试验,对 15CrMo 水冷壁管进行焊接修复,确定了焊接工艺用于水冷壁焊接修复的可行性。徐冰^[10]表明压力容器堆焊修复主要采用药芯焊丝电弧焊、手工电弧焊、TIG 焊以及 MIG 焊的焊接方式,相对而言, MIG 焊的堆焊成本较手工电弧焊降低 40%,且堆焊效果优于 TIG 焊接。

综上所述,本文针对 15CrMoG 服役失效的水冷壁管进行堆焊修复工艺试验,在提高焊接效率的同时保证接头力学性能满足相关规范要求,在此基础上,结合实际工程需求,制定科学合理的修复方式,以提升水冷壁管的服役性能和使用寿命。

1 试验材料及方法

选用 15CrMoG(服役失效管)作为试验基材,规

格: $\varnothing 40\text{ mm}\times 1.5\text{ m}$,壁厚 8 mm,具体化学成分详见表 1,水冷壁管母材满足 GB/T 5310—2023《高压锅炉用无缝钢管》的标准要求,服役失效水冷壁管及实际焊接工况见图 1。堆焊工艺采用 ERNiCrMo-3 焊丝,焊丝直径为 1.2 mm,其化学成分信息见表 2,焊丝满足 GB/T 15620—2008《镍及镍合金焊丝》标准要求。试验设备为弧焊机器人工作站, KUKA 机器人型号 KRC4,焊机型号为福尼斯 TPS 500i。

表 1 15CrMoG 钢管的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 15CrMoG steel (wt. %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	P	S
0.16	0.24	0.52	0.96	0.46	0.064	0.008	0.006 7

表 2 焊丝化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical composition of welding wire (wt. %)

C	Si	Mn	P	Ti	Al	Nb+Ta
0.013	0.1	0.06	0.004	0.19	0.1	3.6
Cr	Ni	Fe	Mo	Cu	S	
22.07	64	0.18	9.35	0.02	0.002	



图 1 水冷壁管(服役失效)+焊接工况

Fig. 1 Service-failed water wall tube + welding condition

2 试验结果和分析

2.1 水冷壁管的焊接前处理

水冷壁管表面锈皮化学成分见表 3,成分显示硫元素质量分数占比异常,为进一步判断管壁锈蚀深度,制备金相试样,由表面锈蚀区域向管壁内侧线扫分析见图 2,结果表明,在锈蚀与母材金属交界处硫元素恢复正常数值,锈蚀深度在 450 μm ,利用 ICAP 全谱直读等离子体原子发射光谱仪测得打磨

后水冷壁管硫元素含量正常,由此判断,金属表面打磨或除锈剂清理至露出金属光泽时,可进一步完成表面堆焊工作。

表3 锈皮化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of oxide scale (wt. %)

C	O	S	K	Cr	Mn	Fe
3.73	29.31	0.58	0.17	0.71	0.34	65.17

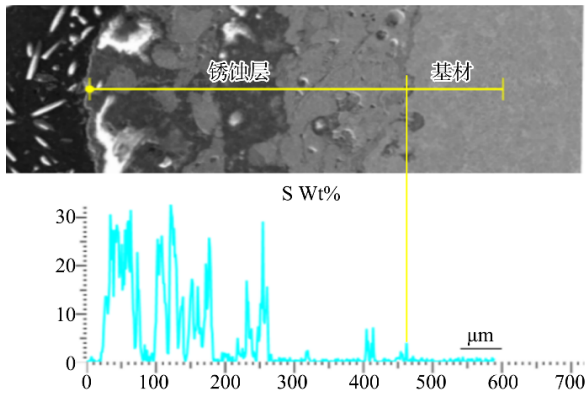


图2 水冷壁管(向火侧)硫元素分布

Fig. 2 Sulfur element distribution map of the water-wall tube (fireside)

Gleeble-3800 模拟锅炉水冷壁实际工况,测得 15CrMoG、ERNiCrMo-3 金属热膨胀系数见图3,在室温~700 °C之间,15CrMoG 向火侧和背火侧热膨胀系数为 0.04~0.05 mm,ERNiCrMo-3 热膨胀系数为 0.06~0.07 mm,焊丝与母材热膨胀系数相近,在同一水平,不会由于温度变化导致焊接结合面剥离。

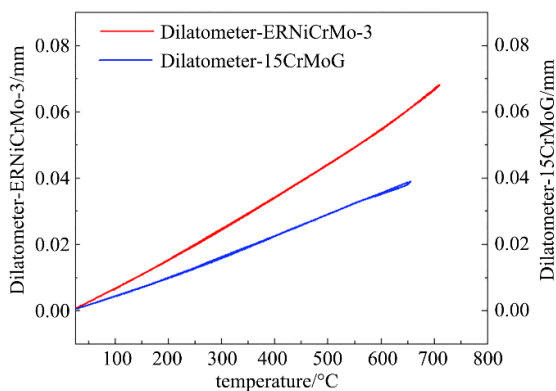


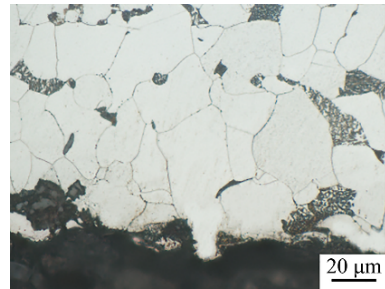
图3 母材/焊材膨胀系数

Fig. 3 Thermal expansion of base metal/weld metal

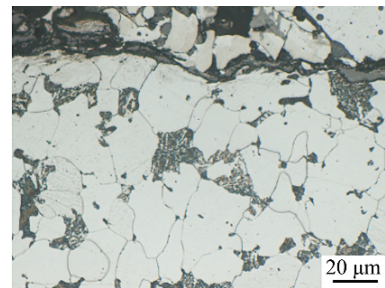
水冷壁显微组织表明:内壁、管壁中心、外壁均为珠光体+铁素体,见图4。其中内壁铁素体含量相对较多,外壁和心部铁素体分布均匀性一致。

2.2 焊接工艺参数优选

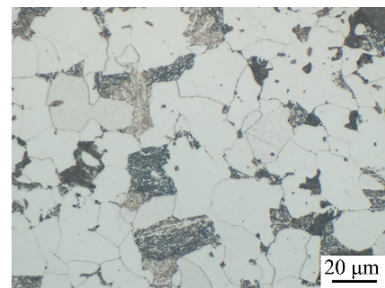
焊接参数一元化控制,当调节送丝速度时,焊



(a)管(内壁)



(b)管(外壁)



(c)管(心部)

图4 水冷壁显微组织

Fig. 4 Microstructure of the water-wall tube

接电流、电压自动匹配,焊前打磨除锈至漏出金属光泽,彻底去除水冷壁管表面水分油污等对焊接过程中有害的物质元素,并进行工艺调试,除锈管及焊接工况见图5。试验影响因素:送丝速度、摆动周



图5 除锈管及焊接工况

Fig. 5 Rust-removed pipe and welding operation conditions

期的前进长度、焊接速度、摆宽、弧长修正、干伸长度,响应因素:焊缝熔深、熔宽、余高、接触角,为更

加直观表述各个影响因素与响应值的对应关系,建双Y轴影响因素与响应值的点线图见图6。

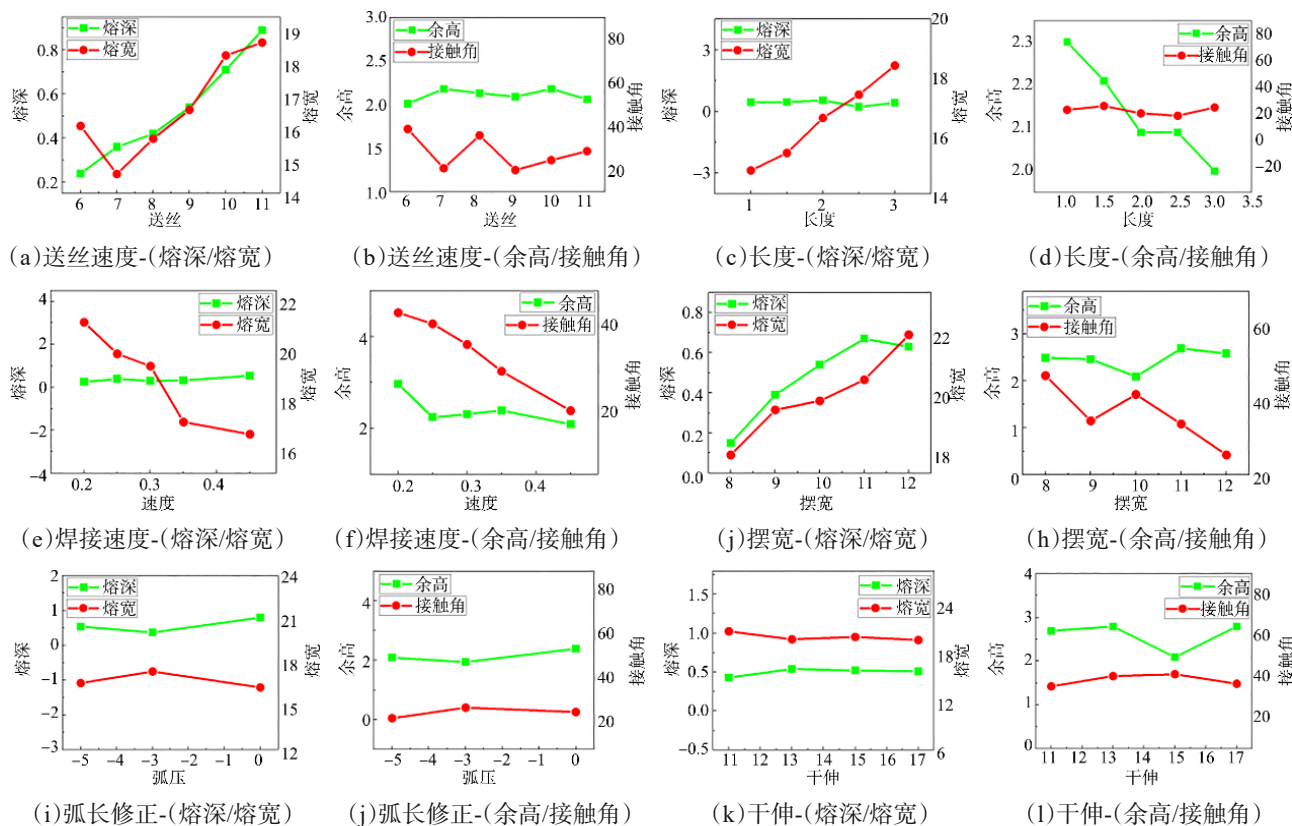


图6 双Y轴影响因素与响应值规律

Fig. 6 Dual-Y-axis plot of influencing factors vs. response behavior

调试结果表明:焊接速度增加,熔宽减小;送丝速度、摆动周期的前进长度、摆宽增加,熔宽增大;送丝速度、摆宽增加,熔深增大;摆动周期的前进长度增加,余高减少;摆宽、焊接速度增加,接触角减小。应项目需求,焊缝余高控制在2 mm左右,并确保焊道成形良好,选择最优堆焊参数见表4。

表4 堆焊参数

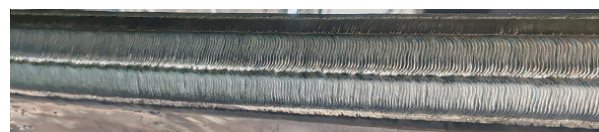
Table 4 Overlay welding parameters

送丝速度 /(mm·min ⁻¹)	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	干伸长 /mm	弧压 /V	摆宽 /mm	摆动周期的前 进长度/mm
9	250	15	-5	10	1.5

2.3 接头组织与力学性能

采用最优参数对15CrMoG(服役失效管)进行堆焊修复,水冷壁管堆焊见图7a;堆焊完成后,依据GB/T 32259—2015《焊缝无损检测 熔焊接头目视检测》对焊缝表面进行目视检查,焊缝成形良好,未见裂纹、咬边、未熔合、气孔焊接缺陷。表面渗透试验

见图7b,无裂纹、气孔等缺陷的产生,后进行X射线检测,检测结果均为I级合格。



(a) 水冷壁管堆焊



(b) 渗透

图7 水冷壁堆焊渗透

Fig. 7 Overlay weld penetration in the water-wall tube

2.4 接头微观组织

接头微观组织由左至右分为焊缝、熔合区、过热区、正火区、不完全正火区、母材六部分,图8a为焊缝微观组织,组织构成为 γ 固溶体+析出相,焊缝初始状态为液态,在冷却过程中,以 γ 固溶体为初生

相形核长大,由于冷却速率加快,溶质原子来不及充分扩散,使得 γ 固溶体处于过饱和状态,从而发生固态相变,伴有析出相产生;图8b为焊缝与热影响区交界位置;图8c为过热区微观组织,组织构成为贝氏体,焊接热循环导致该区域高温奥氏体化+中温转变,内含元素Cr、Mo等抑制碳元素的扩散,使其稳定下降,形成贝氏体组织;图8d为正火区微观组织,组织构成为贝氏体+少量珠光体,正火区冷速介于过热区和回火区之间,形成贝氏体+少量珠光体形式;图8e不完全正火区微观组织构成为铁素体+贝氏体+珠光体,焊接热循环温度加载到完全奥氏体化慢冷形成铁素体+贝氏体+珠光体共存状态;图8f母材微观组织,组织构成为铁素体+珠光体,其中铁素体的含量多于不完全正火区的含量,焊接前后母材微观组织展现形貌基本一致。综上所述,焊缝区域出现 γ 固溶体+析出相使其具备优良的接头强度及抗高温蠕变能力;过热区、正火区、不完全正火区出现贝氏体使其具备高强、高韧的能力,由此判断接头的性能优良。

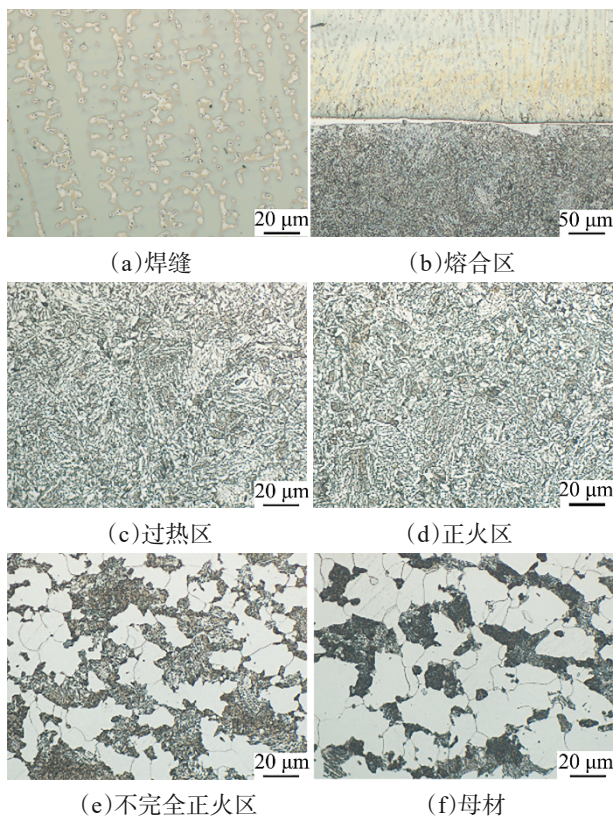


图8 接头微观组织

Fig. 8 Microstructure of the Joint

2.5 接头力学性能

水冷壁堆焊完成后制备拉伸试样(见图9),再进行室温拉伸性能试验(见表5),接头抗剪强度491 MPa高于基体母材强度440 MPa(GB/T5310—2023《高压锅炉用无缝钢管》),拉伸试验均断裂于母材位置,由此说明接头界面结合良好,符合堆焊层紧密附着于水冷壁管的结构设想,不会因外力作用下发生脱落现象。

表5 接头拉伸试验结果

Table 5 Tensile test results of the joint

试样 编号	计算尺寸 /mm	剪面面积 /mm ²	试验力 /kN	抗剪强度 /(N·mm ⁻²)	断裂 位置	试验温度 /°C
1	1.5×10	15	7.36	491	焊缝	20

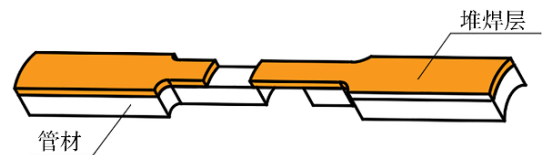


图9 拉伸试样示意

Fig. 9 Schematic diagram of tensile test specimen

取弯曲试样,见图10,按照GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》进行侧弯试验,见表6,试样厚度10 mm,压头直径40 mm,弯曲角度180°,试验结果表明,接头弯曲性能良好,弯曲试样未出现裂纹,这是由于镍基焊丝(ERNiCrMo-3)线膨胀系数与15CrMoG相近,且塑性较好,有效抑制裂纹扩展,焊接残余应力未集中于某一区域而产生裂纹,其次,焊接工艺稳定性良好,避免了焊接区域过热,晶粒粗大等问题。

表6 接头弯曲试验结果

Fig. 6 Schematic diagram of tensile test specimen

试样 编号	弯曲 类型	试样厚度 /mm	压头直径 /mm	弯曲角度 /(°)	弯曲 结果
1	侧弯	10	40	180	无裂纹

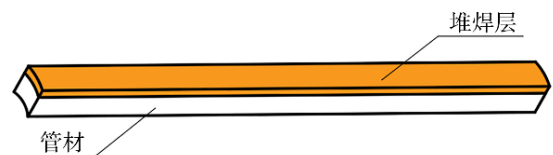


图10 弯曲试样示意

Fig. 10 Schematic Diagram of Bend Test Specimen

依据国标GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》对焊接接头进行硬度试验,载荷为HV10的

维氏硬度试验。堆焊层、熔合线、热影响区、母材分别取点,由堆焊层→母材硬度数值降低,结合微观组织分析,焊缝区域组织构成 γ 固溶体+析出相,硬度高于热影响区和母材,熔合线部位无明显缺陷,组织平滑过渡,略低于焊缝硬度,热影响区(粗晶区)冷却后形成高硬高韧的贝氏体,硬度在此区域位置会有明显提升,因此硬度整体分布从焊缝向母材逐渐下降的趋势,但由于热影响区组织转变,出现局部小峰值,见图11。

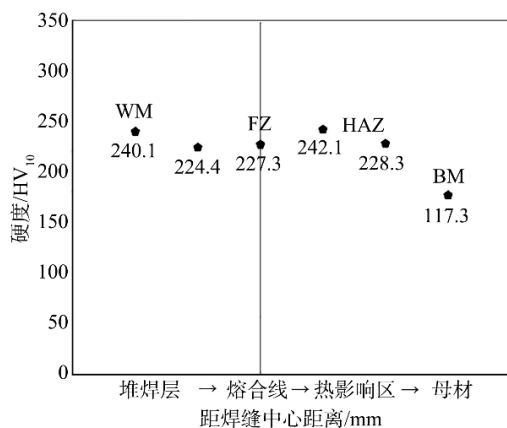


图11 接头硬度试验结果

Fig. 11 Hardness Test Results of the Joint

3 结论

(1)水冷壁管表面锈皮化学成分中硫元素超标,判定锈蚀深度在450 μm ,可在表面处理至露出金属光泽后进行焊接;ERNiCrMo-3焊丝与15CrMoG基材测得热膨胀系数在同一量级,水冷壁运行过程中的高温因素,不会导致焊接接合面的剥离;内外壁及心部管材铁素体分布均匀一致。

(2)调试工艺发现,焊接速度增加,熔宽减小;送丝速度、摆动周期的前进长度、摆宽增加,熔宽增大;送丝速度、摆宽增加,熔深增大;摆动周期的前进长度增加,余高减少;摆宽、焊接速度增加,接触角减小,并获得一组最优焊接参数。

(3)接头组织焊缝区无气孔裂纹等缺陷,过热区、正火区、不完全正火区均含有贝氏体组织,使其具有较高的强度和较强的韧性,综合性能稳定。

(4)接头剪切强度491 MPa高于15CrMoG基材标准值440 MPa,侧弯试验无裂纹缺陷,硬度显示在

粗晶区硬度出现小峰值,是由于在此区域内贝氏体的出现造成硬度向上波动。

(5)结合水冷壁管失效情况以及堆焊修复的组织力学性能分析证明堆焊工艺可靠稳定,可为实际修复水冷壁工作提供技术参考。

参考文献:

- [1] 荆象阳,尹志铁,李建生,等.超超临界锅炉水冷壁补焊区失效原因分析[J].热加工工艺,2016,45(05):249-252.
JING X Y, YIN Z Y, LI J S, et al. Failure Analysis on Welding Zone in Water-cooled Wall Pipe of Ultra Supercritical Power Plant Boiler [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(5): 249-252.
- [2] 校林飞,杨占君,郑准备,等.火电厂锅炉水冷壁焊缝泄漏失效分析[J].电焊机,2024,54(04):84-90.
XIAO L F, YANG Z J, ZHENG Z B, et al. Failure Analysis on Weld Leakage of Boiler Water Wall in Thermal Power Plant [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 84-90.
- [3] 孙佳孝,杨可,郭余庆,等.膜式水冷壁表面堆焊Inconel625合金成形工艺研究[J].电焊机,2022,52(07):93-99.
SUN J X, YANG K, GUO Y Q, et al. Study on Forming Technology of Membrane Water-wall with Inconel625 Alloy Cladding [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(7): 93-99.
- [4] 肖东平,华金良,高森森,等.某12Cr1MoVG水冷壁管对接焊缝热裂纹成因分析及预防[J].电焊机,2019,49(10):92-96.
XIAO D P, HUA J L, GAO M M, et al. Cause analysis and prevention of hot cracking in 12Cr1MoVG water-wall tube butt welds [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(10): 92-96.
- [5] 吴肖,周云,张怡.15CrMo管道服役损伤及应力-应变关系研究[J].化工安全与环境,2025(02):24-29.
WU X, ZHOU Y, ZHANG Y. Study on service induced damage and stress-strain relationship of 15CrMo piping [J]. Chemical Safety & Environment, 2025(2): 24-29.
- [6] Zheng X F, Jiang Y J, Feng Y T, et al. Failure Analysis on Tube Socket Crack of Supercritical Boiler Water Wall Header [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 1975(204-208): 4616-4619.
- [7] 刘福广,张巍,冯琳杰,等.15CrMo钢免热处理现场焊接修复工艺研究[J].热加工工艺,2022(15):138-141.

- LIU F G, ZHANG W, FENG L J, et al. Study on heat-treatment-free in-situ welding repair technology for 15CrMo steel[J]. Hot Working Technology, 2022(15): 138-141.
- [8] Nachimuthu P K, Gosipathala S, Arasappan R K, et al. High temperature corrosion performance of Inconel 625 hard overlays deposited on stainless steel substrate[J]. Materials and Corrosion, 2024, 75(7): 875-890.
- [9] 黄继忠, 胡德浩, 黄晓明, 等. 15CrMo 水冷壁 TIG 自动焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2024(10): 66-70.
- HUANG J Z, HU D H, HUANG X M, et al. Study on TIG automatic welding process for 15CrMo water-wall tubes[J]. Welding Technology, 2024(10): 66-70.
- [10] 徐兵. MIG 立向下堆焊 Inconel 625 焊接工艺研究[J]. 压力容器, 2019(12): 70-74.
- XU B. Research on MIG vertical-down overlay welding process for Inconel 625[J]. Pressure Vessel Technology, 2019(12): 70-74.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 47 页

- Rupture analysis of 12Cr1MoV super-heater tubes in power plants[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 153: 107593.
- [2] WANG Z C, ZHAO J P, CAI H X, et al. Failure analysis of a 12Cr1MoV superheater tube after 280,000 h of service[J]. Nuclear Materials and Energy, 2024, 40: 101707.
- [3] LIU J W, LI Y Z. Influence of 12Cr1MoV material on tissue properties at high temperature and long operating time[J]. Processes, 2022, 10(2): 192.
- [4] DING Y P, LIU R, YAO J P, et al. Stellite alloy mixture hardfacing via laser cladding for control valve seat sealing surfaces[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 329: 97-108.
- [5] Singh R, Kumar D, Mishra S K, et al. Laser cladding of Stellite 6 on stainless steel to enhance solid particle erosion and cavitation resistance[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 251: 87-97.
- [6] ZHU L D, XUE P S, QING L, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [7] Navas C, Conde A, Cadenas M, et al. Tribological properties of laser clad Stellite 6 coatings on steel substrates[J]. Surface Engineering, 2006, 22(1): 26-34.
- [8] Jeyaparakash N, Yang C H, Karuppasamy S S, et al. Stellite 6 cladding on AISI type 316L stainless steel: microstructure, nanohardness and corrosion resistance[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2023, 76(2): 491-503.
- [9] LI M K, HUANG K P, YI X M. Crack formation mechanisms and control methods of laser cladding coatings: A review[J]. Coatings, 2023, 13(6): 1117.
- [10] CHEN J Y, WANG S H, XUE L Y. On the development of microstructures and residual stresses during laser cladding and post-heat treatments[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47: 779-792.
- [11] SHEN Q, LI Y, ZHAO J, et al. Effects of annealing on the microstructure and wear resistance of laser cladding CrFeMoNbTiW high-entropy alloy coating[J]. Crystals, 2021, 11(9): 1096.
- [12] ZHANG H, YE P, HE Y Z. Effects of annealing on the microstructure and properties of 6FeNiCoCrAlTiSi high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Journal of thermal spray technology, 2011, 20: 1049-1055.
- [13] FENG Y Q, GAO Z Y, HU Z F. Influence of annealing treatment on microstructure and properties of Ni-Rich NiTi alloy coating prepared by laser cladding[J]. Materials, 2022, 15(9): 3298.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>