



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.06

过热器管道CMT立向下自动堆焊修复工艺研究

张焱¹, 高利孝¹, 白爱平¹, 刘洋², 王强¹, 郭泉^{2*}, 孙洪伟², 付文俊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: 为解决某高硫煤种的超超临界火电机组12Cr1MoV钢过热器管因高温侵蚀、颗粒冲刷导致的减薄开裂失效问题, 提出CMT立向下堆焊ERNiCrMo-3镍基焊丝的修复方法, 研究送丝速度(7~11 mm/min)、摆动周期前进长度(1~5 mm)、摆宽(5~9 mm)、焊接速度(200~400 mm/min)对焊道成形(熔宽、余高、接触角)的影响, 并对堆焊接头的组织和性能进行测试分析。结果表明, 送丝速度(电流、电压)和焊接速度对焊道成形的影响相对较大; 摆动周期前进长度与摆宽通过调控接触角优化焊缝搭接质量, 余高可通过摆动周期前进长度调控。最优工艺参数下(送丝速度10 mm/min、焊接速度300 mm/min、摆宽7 mm、摆动周期前进长度3 mm), 堆焊层厚度达2~3 mm, 无裂纹、气孔等缺陷, 与母材形成良好冶金结合。力学性能测试显示, 堆焊层平均硬度233.4 HV, 高于母材的157 HV; 堆焊熔合面剪切强度545 MPa, 优于母材标准要求(490 MPa)。焊缝组织为 γ 固溶体+析出相, 过热区组织为贝氏体, 正火区组织为贝氏体+少量珠光体, 珠光体显著球化, 不完全正火区组织为铁素体+贝氏体+珠光体, 母材组织为铁素体+珠光体。该研究成果可以给12Cr1MoV过热器管的高效高质量修复提供参考。

关键词: CMT立向下; 堆焊; ERNiCrMo-3; 12Cr1MoV; 焊接工艺

中图分类号: TG455 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)12-0039-06

Study on the CMT Downward Automatic Surfacing Repair Process for Overheater Pipelines

ZHANG Yan¹, GAO Lixiao¹, BAI Aiping¹, LIU Yang², WANG Qiang¹, GUO Xiao^{2*}, SUN Hongwei²,
FU Wenjun²

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 and cracking failure issues caused by high-temperature corrosion and particle erosion in 12Cr1MoV steel superheater tubes of ultra-supercritical coal-fired power units burning high-sulfur coal, a repair method using CMT downward vertical surfacing with ERNiCrMo-3 nickel-based welding wire was proposed. The effects of wire feeding speed (7-11 mm/min), oscillation forward distance per cycle (1-5 mm), weaving width (5-9 mm), and welding speed (200-400 mm/min) on weld bead formation (weld width, reinforcement height, contact angle) were investigated. Microstructure and mechanical properties of the surfacing joints were systematically analyzed. Results indicated that wire feeding speed (current, voltage) and welding speed had relatively significant influences on weld bead geometry. The oscillation for-

收稿日期: 2025-07-08 修回日期: 2025-08-22

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: 郭泉(1988—), 博士, 研究员, 主要从事先进金属材料焊接性及焊接冶金研究。E-mail: guoxiaogarden@163.com。

ward distance and weaving width optimized weld overlapping quality through contact angle adjustment, while reinforcement height could be controlled by oscillation forward distance. Under optimal process parameters (wire feeding speed: 10 mm/min; welding speed: 300 mm/min; weaving width: 7 mm; oscillation forward distance: 3 mm), the surfacing layer thickness reached 2-3 mm without defects like cracks or porosity, achieving metallurgical bonding with the base metal. Mechanical testing showed the surfacing layer exhibited an average hardness of 233.4 HV, higher than the base metal's 157 HV. The shear strength at the fusion interface reached 545 MPa, exceeding the required standard for base metal (490 MPa). Micro-structural analysis revealed γ solid solution + precipitates in the weld zone, bainite in the overheated zone, bainite + minor pearlite in the normalized zone with significantly spheroidized pearlite, ferrite + bainite + pearlite in the incompletely normalized zone, and ferrite + pearlite in the base metal. This study provides reference for efficient and high-quality repair of 12Cr1MoV superheater tubes.

Keywords: CMT Downward position; surfacing welding; ERNiCrMo-3; 12Cr1MoV; welding procedure

引用格式:张焱,高利孝,白爱平,等. 过热器管道CMT立向下自动堆焊修复工艺研究[J]. 电焊机,2025,55(12):39-44.
Citation:ZHANG Yan, GAO Lixiao, BAI Aiping, et al. Study on the CMT Downward Automatic Surfacing Repair Process for Overheater Pipelines [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 39-44.

0 引言

12Cr1MoV 钢是一种低合金耐高温高强结构钢,因其具备良好的塑性、强度、抗氧化性及优良的工艺性能,被广泛应用于高压锅炉的过热器管、蒸汽管等^[1-4],但长期在高温、高压、烟熏环境下服役,会出现因高温烟气侵蚀造成管壁减薄失效的情况^[5-6]。梁秀兰等^[7]通过失效分析证实,12Cr1MoV 过热器管的长期过热开裂属于高温蠕变失效,内壁氧化层脱落与堵管物堆积引发的局部过热是主要原因。邓化凌等^[8]则指出,锅炉内颗粒的冲刷与撞击造成过热器管屏的磨损,磨损引起的壁厚减薄是管材失效的主要原因。针对某高硫煤种的超超临界火电机组过热器管减薄开裂而失效的实际工程应用问题,通过在失效的 12Cr1MoV 管材表面堆焊镍基合金焊材是主要的解决方法。姜海峰^[9]采用热丝 TIG 焊在表面堆焊 ERNiCrMo-3 焊丝,使其达到服役要求。Nachimuthu^[10]认为堆焊是修复坏损零件的一种潜在方式,因其具有更高的生产效率,且 ERNiCrMo-3 堆焊层具有优异的抗高温腐蚀性。徐冰^[11]阐述压力容器堆焊 ERNiCrMo-3 主要以药芯焊丝、焊条电弧焊、TIG 焊为主,MIG 焊堆焊成本比焊条节省 40%,堆焊效果优于 TIG 焊接。但采用 MIG 立向下堆焊 ERNiCrMo-3 焊接过程中,在较大热输入作用下,形成的熔池受重力影响滴落,造成焊丝浪费现象,若减少热输入,则堆焊层厚度减薄,达不到管壁修复的目的。

因此,本文为保证堆焊修复的焊接质量、修复效率以及工艺的稳定性,采用 KUKA 机器人进行 CMT 立向下堆焊修复工艺的研究,通过分析送丝速度、焊接速度等关键参数对焊道成形的影响,优化工艺参数组合,并结合力学性能测试与微观组织分析,验证修复接头的可靠性,为 12Cr1MoV 过热器管的高效高质量修复提供理论支撑与工程参考。

1 试验材料及方法

试验选用 Q355 钢板为基材,板厚 20 mm,其化学成分如表 1 所示;堆焊修复对象为服役条件下受损的 12Cr1MoV 钢管,尺寸为 $\varnothing 56\text{ mm}\times 1500\text{ mm}$,壁厚 8 mm,化学成分见表 2;堆焊焊丝选用哈尔滨威尔焊接有限责任公司生产的 ERNiCrMo-3,规格为 $\varnothing 1.2\text{ mm}$,其化学成分见表 3。

表 1 Q355 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Q355 steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.16	0.14	0.66	0.016	0.01	0.04	0.02

表 2 12Cr1MoV 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of 12Cr1MoV steel (wt. %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Cu	P	S	Ni
0.094	0.26	0.56	1.04	0.33	0.19	0.0057	0.014	0.0048	0.028

试验设备采用 KUKA 焊接机器人,搭配 CMT 焊接系统。测试设备包括:HTZ-NKV 型图像体式显微镜(用于焊道成形尺寸测量)、AG-Xplus 型电

表 3 ERNiCrMo-3 焊丝化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of ERNiCrMo-3 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	

子拉伸试验机(用于剪切强度测试)、WE-600A 液压式万能试验机(用于弯曲试验)、HVS-50 型数显维氏硬度计(用于硬度测试)、GX51 型金相显微镜(用于微观组织观察)。

采用 CMT 立向下焊接工艺,以控制变量的方式研究关键参数对焊道成形的影响规律。焊接机器人影响因素包括:干伸长度、弧长修正、送丝速度、焊接速度、摆幅、摆动周期的前进长度,其中送丝速度同时控制焊接电流与电压,焊接环境温度为室温。先在 Q355 钢板上进行工艺探索试验,通过 HTZ-NKV 型号的图像体式显微镜测量不同参数下的熔宽、余高、接触角等成形指标,剔除成形不良的参数组合,筛选出最优参数后应用于 12Cr1MoV 失效过热器管的堆焊修复。

2 试验结果和分析

2.1 参数影响规律

采用控制单一变量法,系统探究送丝速度、焊接速度、摆宽及摆动周期前进长度等关键参数对焊

道成形的影响,试验参数区间如表 4 所示,参数与成形响应值的对应关系如表 5 所示,影响规律如图 1 所示。

由图 1 可知,送丝速度、摆动周期的前进长度、焊接速度、摆宽对焊道熔宽、余高、接触角均有影响,呈线性关系。摆动周期前进长度增加,余高呈

表 4 堆焊试验参数区间

Table 4 Build-up welding test parameter ranges

送丝速度 /(mm·min ⁻¹)	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)	干伸长度 /mm	弧长 修正	摆宽 /mm	摆动周期前进 长度/mm
7~11	200~400	13~17	-1~5	5~9	1~5

表 5 堆焊参数及响应值

Table 5 Build-up welding parameters and response values

参数	摆动周期前进长度/mm				
	1	2	3	4	5
接触角均值/(°)	82.9	50.48	54.57	44.74	46.56
余高均值/mm	3.51	3.21	2.85	2.94	3.21
熔宽均值/mm	9.3	12.7	13.2	13.8	13.3
参数	摆宽/mm				
	5	6	7	8	9
熔宽/mm	9.6	11.1	13.2	13.7	14.7
接触角均值/(°)	69.5	60.23	54.58	42.82	39.85
参数	送丝速度/(mm·min ⁻¹)				
	7	8	9	10	11
熔深均值/mm	0.19	0.13	0.16	0.36	0.27
熔宽均值/mm	12.8	13.2	14.0	17.1	19.4
参数	焊接速度/(mm·min ⁻¹)				
	200	250	300	350	400
熔宽均值/mm	15.2	14.57	13.2	11.52	9.5

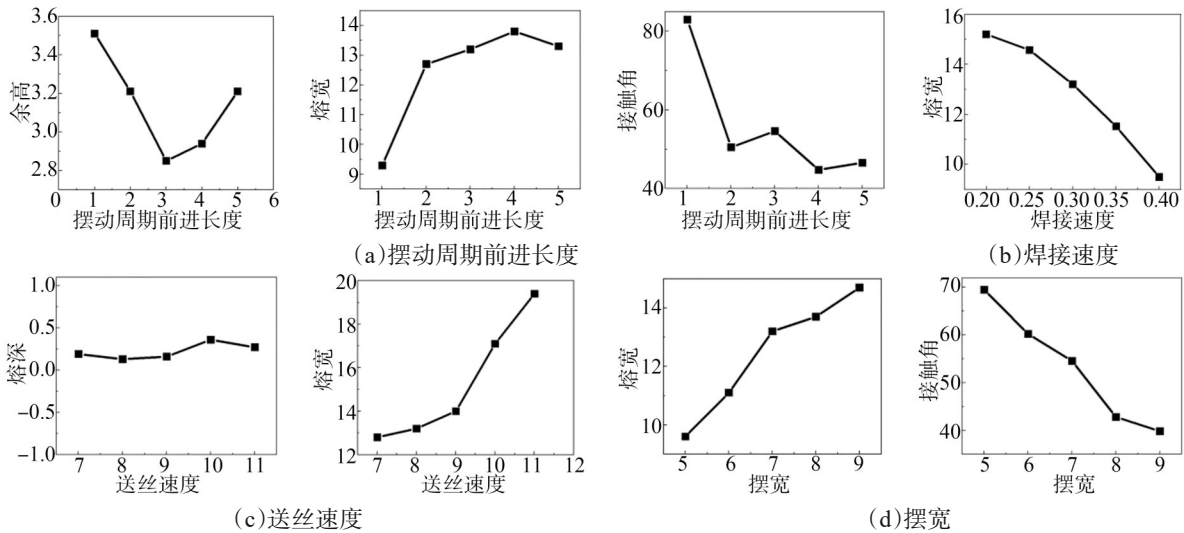


图 1 工艺参数对焊道成形的影响规律

Fig. 1 Influence law of process parameters on weld bead formation

先减小后增大的趋势,熔宽整体呈增大趋势,接触角持续减小(见图1a);焊接速度增加,熔宽呈减小趋势(见图1b);送丝速度增加,熔宽呈增大趋势(见图1c);摆宽增加,熔宽呈增大趋势,接触角呈减小趋势(见图1d)。干伸长度、弧长修正、送丝速度、焊接速度、摆幅、摆动周期的前进长度对熔深影响不大,这是由于CMT为冷金属过渡,焊丝接触工件短路回抽,热输入持续时间较短,熔深较浅,稀释率低,显著减少了堆焊层对母材的影响。

依据上述规律进行总结:接触角对焊缝的搭接质量有显著作用,可以通过摆动周期的前进长度、摆宽进行反向调控;熔宽可以有效减少焊接层道数并加快生产效率,可以通过送丝速度、摆动周期的前进长度、摆宽进行正向调控,焊接速度进行反向调控;余高是决定焊丝消耗的主要影响因素,可以

通过摆动周期的前进长度进行调控。

试验总结了影响因素作用规律,并结合焊缝表面成形情况能更好地反映出不同焊接工艺参数的优劣性,堆焊焊缝表面成形如图2所示。

焊缝摆动周期前进长度从左至右依次递增,见图2a。图像对比分析,摆动周期前进长度越大,焊缝两侧出现咬边的概率增加,焊缝成形越差,因此摆动周期前进长度在1~3 mm时,焊缝成形较为理想。

送丝速度从左至右依次递增,见图2b,图像对比分析,送丝速度越大,焊缝成形越饱满,焊缝表面缺陷越少,因此,送丝速度在9~11 mm/min时,焊缝成形较为理想。

摆宽从左至右依次递增,见图2c,图像对比分析,摆宽越大,焊缝出现的缺陷越多,咬边现象越严重,因此,送丝速度在5~7 mm/min时,焊缝较为理想。

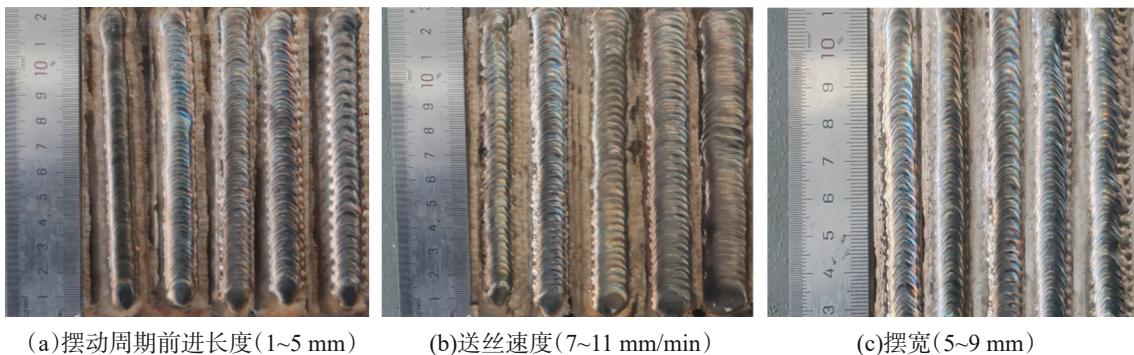


图2 堆焊焊缝表面成形形貌

Fig. 2 Weld surface formation of build-up welding

综合考虑参数影响规律与表面成形质量,确定12Cr1MoV失效过热器的最优堆焊参数:送丝速度10 mm/min,焊接速度300 mm/min,干伸长度15 mm,弧长修正-5,摆宽7 mm,摆动周期前进长度3 mm。

2.2 力学性能

采用最优工艺参数对12Cr1MoV失效过热器管进行堆焊修复,焊后对修复接头进行力学性能测试。在管壁堆焊处取样,剪切试样取样实物如图3所示,硬度测试结果如图4所示。



图3 剪切取样实物

Fig. 3 Physical specimen of shear sampling

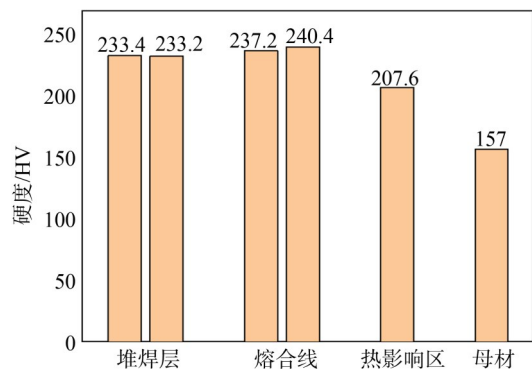


图4 硬度试验数据柱状图

Fig. 4 Bar chart of hardness test data

力学性能测试结果表明,堆焊熔合面的剪切强度达545 MPa,高于12Cr1MoV母材的标准抗拉强度要求值(490 MPa),此堆焊工艺下的焊接接头强度满足服役要求。堆焊试验管的弯曲试验无裂纹

缺陷,表明堆焊层与母材形成良好的冶金结合和组织均匀性,能够在高应力条件下保持结构完整性,有效抑制裂纹的萌生与扩展。堆焊层平均硬度为 233.4 HV,显著高于母材的 157 HV,熔合线与热影响区硬度显著增加,分别为 233.2 HV、207.6 HV,这与热影响区组织转变及堆焊层的合金强化有关。堆焊层力学性能优异的原因:一是 ERNiCrMo-3 镍基焊丝中合金元素的固溶强化作用;二是 CMT 工艺低稀释率保障了堆焊层成分的稳定性;三是堆焊层材料具有更强的原子间结合能和更稳定的晶体结构,在摩擦剪切应力作用下,其晶格畸变能较高,位错运动阻力较大,可有效抑制表面材料的塑性流动和粘着磨损。

2.3 组织形貌

针对堆焊修复后的 12Cr1MoV 过热器管进行微观组织分析,微观组织形貌如图 5 所示,检验面为焊

缝横截面。焊缝金相形貌见图 5a,焊缝区因快速冷却保留 γ 固溶体并伴随着析出相形成,过热区金相形貌见图 5c,过热区高温作用下晶粒长大形成贝氏体;正火区金相形貌见图 5d,正火区温度略低于组织转变温度,均匀出现贝氏体+少量珠光体,珠光体显著球化;不完全正火区金相形貌见图 5e,不完全正火区冷却不均匀形成铁素体+贝氏体+珠光体的组织结构;母材金相形貌见图 5f,母材区受热较少组织变化较小,组织为铁素体+珠光体,珠光体发生球化。由于焊缝区组织为 γ 固溶体+析出相,热影响区组织为贝氏体,造成此区域位置硬度显著升高,析出物呈不连续网状分布于枝晶偏析处,未见气孔、裂纹、夹渣、未焊透、未熔合等焊接缺陷。此外,析出相可以在不显著降低韧性和塑性的前提下进一步提高材料强度,因此焊接试件抗剪强度优于母材强度。

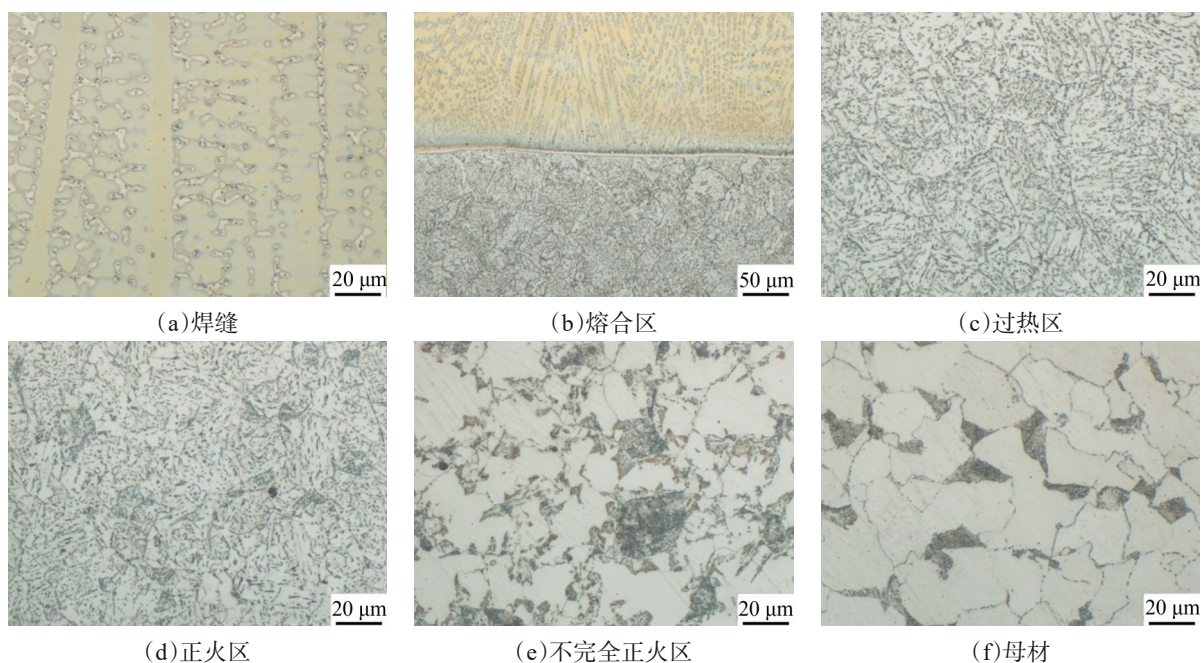


图 5 微观组织形貌

Fig. 5 Microstructure morphology

3 结论

通过 CMT 立向下堆焊工艺试验及对 12Cr1MoV 失效过热器管堆焊修复试验的分析,结合现有文献,得出以下结论:

(1) 摆动周期前进长度增加,余高先减小后增大,熔宽增大,接触角减小;焊接速度增加,熔宽减小;送丝速度增加,熔宽增大;摆宽增加,熔宽增大,接触角减小;由于 CMT 冷金属过渡焊接的特性,各焊接影响因素对熔深影响不大。

(2)通过确定的堆焊参数完成 12Cr1MoV 失效管的焊接修复,验证了试验工艺的有效性且焊缝成形良好。

(3)堆焊层平均硬度高于母材,熔合面剪切强度优于母材,弯曲试验无裂纹产生。焊缝区为 γ 固溶体+析出相,热影响区为贝氏体、球化珠光体等组织,析出相的弥散强化与贝氏体的高硬度特性共同保障了接头强韧匹配,满足过热器管再次服役的性能需求。

(4)CMT 立向下堆焊 ERNiCrMo-3 镍基焊丝修复技术,有效解决了 MIG 立向下堆焊熔池滴落、热输入难以调控的技术瓶颈,为高硫煤超超临界火电机组 12Cr1MoV 钢过热器管的减薄开裂失效修复提供了可靠的工艺方案与理论支撑,具有重要的工程应用价值与推广前景。

参考文献:

- [1] 汤鹏杰,梁斌. 某余热锅炉低温过热器 U 型管爆管原因[J]. 腐蚀与防护,2024(03):101-105.
TANG P J, LIANG B. Burst Reason of Low Temperature Superheater U-Tube of a Waste Heat Boilerr [J]. Corrosion and Protection, 2024(03): 101-105.
- [2] 张兆林. SA-213TP347HFG 膜式水冷壁角焊缝热裂纹原因分析[J]. 电焊机,2021(12):50-55.
ZHANG Z L. Analysis of Hot Crack in Fillet Weld of SA-213TP347HFG Membrane Water Wall [J]. Electric Welding Machine, 2021(12): 50-55.
- [3] 陈明,王文涛,董鹏,等. 超超临界锅炉过热器连通管焊接接头开裂原因分析与处理[J]. 电焊机,2018,48(01):28-31.
CHEN M, WANG W T, DONG P, et al. Analysis and Treatment of Welding Joint Cracking of Ultra Supercritical Boiler Superheater Pipe [J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(01): 28-31.
- [4] 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(04): 84-90.
- [5] 黄超. 锅炉过热器管道爆管原因分析[J]. 现代制造技术与装备,2024,60(12):108-110.
HUANG C. Analysis of the Cause of Boiler Superheater Pipe Explosion [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(12): 108-110.
- [6] 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(07): 93-99.
- [7] 梁秀兰,有移亮,张峥. 12Cr1MoV 锅炉过热器管长期过热开裂原因分析[J]. 机械工程学报,2014,50(08):81-86.
LIANG X L, YOU Y L, ZHANG Z. Long-term Overheating Cracking Analysis of 12Cr1MoV Boiler Superheater Tube [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(08): 81-86.
- [8] 邓化凌,王勇,宋云京,等. 某一循环流化床锅炉 II 级过热器管材失效分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2006(05):84-87.
DENG H L, WANG Y, SONG Y J, et al. Failure analysis for second superheater tubes in a circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2006(05): 84-87.
- [9] 姜海峰,彭先宽,彭杏娜,等. 12Cr1MoVG 耐热钢堆焊技术研究[J]. 焊接技术,2019(10):63-65.
JIANG H F, PENG X K, PENG X N, et al. Study on surfacing welding process of 12Cr1MoVG heat resistant steel [J]. Welding Technology, 2019(10): 63-65.
- [10] 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.
- [11] 徐兵. MIG 立向下堆焊 Inconel 625 焊接工艺研究[J]. 压力容器,2019,36(12):70-74.
XU B. Research on Surfacing Technology of MIG Vertical-down Surfacing Inconel 625 [J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(12): 70-74.