



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.07.05

低合金钢回火焊道焊接温度场模拟计算分析及应用

杜佳军¹, 郭前鑫¹, 杨 涵², 王小迎¹, 曹忠友¹, 张建林²

1. 神华神东电力有限责任公司技术研究院, 陕西 西安 710065

2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004

摘要: 针对低合金钢关键设备构件现场修复中焊后热处理实施困难的问题, 本研究基于回火焊道焊接技术, 以A217 WC6低合金钢为研究对象, 采用基于双椭球热源模型的有限元方法, 模拟分析关键工艺参数(热输入量、焊道搭接量、层间打磨量)对焊接温度场分布规律的影响。模拟结果表明: 焊道搭接量主要影响温度场在水平方向的覆盖位置, 而层间打磨量则影响其在厚度方向的覆盖位置, 两者均不改变焊道本身的热量分布形态; 选用 $\varnothing 2.5$ mm和 $\varnothing 3.2$ mm两种规格焊条, 焊道搭接量控制在40%~60%、层间打磨量控制在1/3~1/2层厚, 后续焊道形成的回火温度区间(500 °C~AC1)能够有效覆盖前序焊道的粗晶热影响区(1 100 °C~1 505 °C), 实现最佳回火效果。基于优化的工艺参数, 制备的A217 WC6钢焊接接头符合工艺评定标准要求, 且成功应用于某电站阀体修复, 效果良好。

关键词: 低合金钢; 回火焊道焊接技术; 焊接温度场; 有限元模拟

中图分类号: TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)07-0057-07

Simulation and Analysis of Tempering Welding Temperature Field in Low Alloy Steel and Its Application

DU Jiajun¹, GUO Qianxin¹, YANG Han², WANG Xiaoying¹, CAO Zhongyou¹, ZHANG Jianlin²

1. ShenhuaShendong Electric Power Co., Ltd., Technology Research Institute, Xi'an 710065, China

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China

Abstract: Addressing the challenge of implementing post-weld heat treatment (PWHT) during on-site repair of critical low-alloy steel components, this study focuses on the temper bead welding (TBW) technique. Using A217 WC6 low-alloy steel as the research object, a finite element method based on a double ellipsoid heat source model was employed to simulate and analyze the influence of key process parameters (heat input, weld bead overlap, and interlayer grinding amount) on the distribution patterns of the welding temperature field. Simulation results indicate: weld bead overlap primarily affects the horizontal coverage position of the temperature field, while the interlayer grinding amount influences its coverage position in the thickness direction; neither alters the inherent heat distribution pattern of the weld bead itself. When using welding rods of $\varnothing 2.5$ mm and $\varnothing 3.2$ mm diameters, with the bead overlap controlled between 40% and 60% and the interlayer grinding amount maintained between 1/3 and 1/2 of the layer thickness, the tempering temperature range (500 °C to AC1) formed by subsequent weld beads effectively covers the coarse-grained heat-affected zone (CGHAZ, 1100 °C to 1505 °C) of the preceding beads, achieving optimal tempering effects. Based on the process parameters optimized through simulation, the prepared A217 WC6 steel welded joint met the requirements of the process qualification standard and was successfully applied to re-

收稿日期: 2024-11-08 修回日期: 2024-12-26

作者简介: 杜佳军(1983—), 高级工程师, 主要从事电站锅炉及金属材料技术研究工作。E-mail: 11170275@ceic.com。

通讯作者: 张建林(1988—), 硕士, 正高级工程师, 主要从事焊接技术开发及性能评价研究。E-mail: zhjianlin2008@163.com。

pair a valve body in a power plant, with satisfactory results.

Keywords: low alloy steel; temper bead welding(TBW); welding temperature filed; FEM

引用格式:杜佳军,郭前鑫,杨涵,等. 低合金钢回火焊道焊接温度场模拟计算分析及应用[J]. 电焊机,2025,55(7):57-63.

Citation:DU Jiajun, GUO Qianxin, YANG Han, et al. Simulation and Analysis of Tempering Welding Temperature Field in Low Alloy Steel and Its Application[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(7): 57-63.

0 引言

在电力行业中,阀门、泵、高中压外缸等重要设备在极端恶劣的环境下持续服役,往往导致它们易出现裂纹、腐蚀和变形等缺陷,可能会引起设备损坏、发生爆炸等重大事故^[1]。这些设备材料有诸多采用低合金钢,此类材料组织粗大、脆性大,并伴有缩孔和夹杂等,修复此类钢种时,焊接热循环更容易使焊接接头组织变差、硬度增加,从而影响接头的力学性能,且焊接残余应力还会增加,容易导致热影响区产生裂纹,需要进行焊后热处理^[2-3]。因受到厂内空间、安全等因素的影响,某些焊接区域无法完成焊后热处理。若要确保焊后的焊接头具有良好的组织性能,需应用一种能够无需后续处理即可达到良好性能的修复技术^[4]。

回火焊道焊接技术,是一种在焊道表面的指定位置熔敷焊道,以达到影响前一层焊道形成的热影响区或焊缝金属的冶金性能的新型焊接技术,可以通过控制形成特定的焊接热循环,使第二层焊道形成的细晶区能够最大程度覆盖第一层焊道所形成的粗晶区,从而改善粗晶区的冶金性能,以达到焊后热处理的实施效果,可以满足核电站主设备修复需求^[5-6]。

热输入量、搭接量、焊趾距离参量S都是影响回火焊道工艺的因素。Zhang等人^[7]研究发现表面较大的热输入能使得前序焊道的热影响区回火更加充分。搭接量影响着接头的回火作用和焊缝成形,搭接量过大回火更加充分,但焊缝容易形成瘤状,反之,搭接量太小易导致焊道间出现凹坑,处于40%~60%范围时有利于实现回火焊道工艺^[8-11]。秦建等人^[12]使用自动TIG焊方法对SA508-3钢焊趾部位回火焊道技术进行了研究,结果表明,焊趾距离参量S保持在2~2.8 mm范围内,焊趾部位的组织性能得到改善。影响回火焊道工艺的因素众多,工

艺评定和实际操作时应严格按照焊接工艺规程实施。Asadi^[13]、Aloraier^[14]等人使用有限元模拟计算、热模拟实验对回火焊道工艺及热循环对组织与性能的影响规律进行研究。

目前,国内针对低合金钢回火焊道技术的研究尚处于起步阶段,因此本文选取低合金钢A217 WC6作为研究对象,通过有限元方法,研究不同热输入量、搭接量、打磨量对回火焊道焊接A217 WC6钢温度场的影响规律,以得到回火效果最佳的工艺参数。基于模拟计算获得的优化参数,进行回火焊道焊接工艺评定实验。本研究为回火焊道焊接技术数字化研究提供了依据,对促进该技术在国内的工程化应用具有重要意义。

1 有限元模拟计算

1.1 焊接模型建立及验证

采用有限元软件对A217 WC6低合金钢回火焊道焊接过程温度场进行瞬态分析,母材为A217 WC6低合金钢,模型尺寸200 mm×100 mm×100 mm,焊材为R307焊条,规格选用 $\varnothing 2.5$ mm、 $\varnothing 3.2$ mm。两种规格焊材的焊接工艺参数分别如表1所示。

表1 不同规格焊条焊接工艺

Table 1 Welding process of different specifications of welding rods

焊条规格/mm	预热温度/℃	电流/A	电压/V	焊道宽度/mm	焊道厚度/mm
$\varnothing 2.5$	150~200	85	24	<7.5	2.0~2.5
$\varnothing 3.2$	150~200	110	24	<9.6	2.5~3.2

焊接热源为高斯双椭球热源模型,如图1所示。该模型是Goldak等人于1984年提出的^[15],其能量在三维空间中以高斯曲线衰减分布。椭球内热流密度分布如式(1),热源如式(2)

$$q_f(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}f_fQ}{abc\pi\sqrt{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{3x^2}{b^2}-\frac{3y^2}{c^2}-\frac{3z^2}{a^2}\right]$$

$$q_r(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}f_rQ}{abc\pi\sqrt{\pi}}\cdot\exp\left[-\frac{3x^2}{b^2}-\frac{3y^2}{c^2}-\frac{3z^2}{a_1^2}\right](1)$$

$$Q=\eta UI(2)$$

式中 x,y,z 坐标轴分别表示熔宽、熔深和施焊方向; q_f,q_r 分别表示前后四分之一椭球的体热流密度(单位: W/m^3); f_f,f_r 为前后椭球的能量分配系数; Q 为电源提供的有效功率; I 为电流, U 为电压, η 为热吸收率; a_1,a_2,b,c 为热源形状参数。材料物理参数由 Jmatpro 计算得到,其中固相线温度约 $1\,450\text{ }^\circ\text{C}$,熔点约 $1\,504\text{ }^\circ\text{C}$ 。

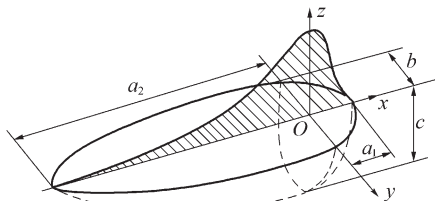


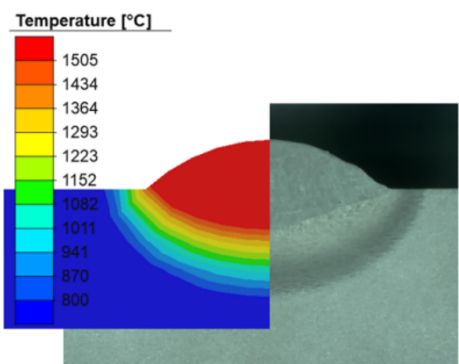
图 1 双椭球热源模型示意
Fig. 1 Schematic diagram of double ellipsoid heat source model

有限元模型通过试验单道焊金相校验,根据金相熔核区域尺寸参数和形貌,调整热源参数前椭球长度 a_2 、后椭球长度 a_1 、热源宽度 b 、热源深度 c 、热源位置 H_3 、表面换热系数 h ,如图 2 所示,经过参数调整后的焊道截面温度场与金相对比,可以看出代表熔合线的两个半弧线几乎可以连接成一段,有限元模型熔核区域与金相区域重合,说明温度场模型可靠。表 2 分别是 $\varnothing 2.5\text{ mm}$ 焊丝和 $\varnothing 3.2\text{ mm}$ 焊条单道焊,在有限元模拟过程中对应的参数。

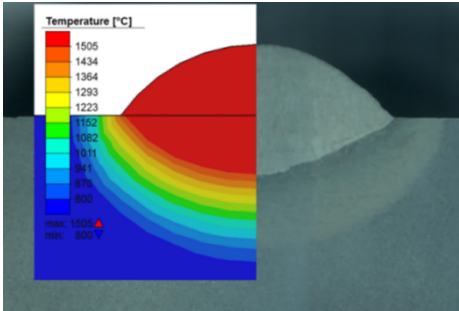
1.2 有限元计算与分析

1.2.1 热输入量对温度场的影响规律

由热源函数式(1)可知,影响计算热源的参数为电压 U 、电流 I 、吸收率 η 。在计算过程中,设定 I 、 η 、焊接速度 v 为固定值,通过改变 U 值影响热输入。计算的有限元模型为 $\varnothing 2.5\text{ mm}$ 和 $\varnothing 3.2\text{ mm}$ 焊条下单道焊模型。经有限元计算,不同焊条规格在不同线能量条件下,熔宽、熔深和热影响区尺寸的变化趋势如图 3 所示,即随着线能量增大,熔深熔宽均近似线性趋势增加。根据热输入量与熔深、熔宽的趋势推断,当热输入量一定时,熔宽增加,熔深减小,不同规格焊条的熔池面积基本相似, $W_1H_1\approx W_2H_2$ (W_1,H_1 分别为 $\varnothing 2.5\text{ mm}$ 焊条熔宽、熔深, W_2,H_2 分别为 $\varnothing 3.2\text{ mm}$ 焊条熔宽、熔深)。



(a) $\varnothing 2.5\text{ mm}$



(b) $\varnothing 3.2\text{ mm}$

图 2 不同规格焊条单道焊有限元模型校验
Fig. 2 Finite element model validation for single-pass welding with different welding rod specifications

表 2 不同规格焊条下单道焊有限元模型的计算参数
Table 2 Calculation parameters for single-pass welding finite element model with different welding rod specifications

项目	焊条 $\varnothing 2.5$	焊条 $\varnothing 3.2$
前椭球长度 a_1/mm	3	3.6
后椭球长度 a_2/mm	10	12
热源宽度 b/mm	9	10
热源深度 c/mm	1.5	2.1
热源位置 H_3/mm	1.9	2.7
环境温度/ $^\circ\text{C}$	25	25
初始温度/ $^\circ\text{C}$	192	192
焊道金属初始温度/ $^\circ\text{C}$	3 500	3 500
焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	2.55	2.3
电压 U/V	25	25
电流 I/A	85	110
热吸收率/ η	0.85	0.85
表面换热系数 $h/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	20	20

1.2.2 搭接量对温度场的影响规律

图 4 为 $\varnothing 2.5\text{ mm}$ 焊条不同搭接量下的温度场模拟,其中 $500\text{ }^\circ\text{C}\sim A_{c1}$ 表示回火温度区间, $1\,100\text{ }^\circ\text{C}\sim 1\,505\text{ }^\circ\text{C}$ 区间表示粗晶区,根据文献[16]描述,本文假设后续焊道/层回火温度区间温度场范围可以覆

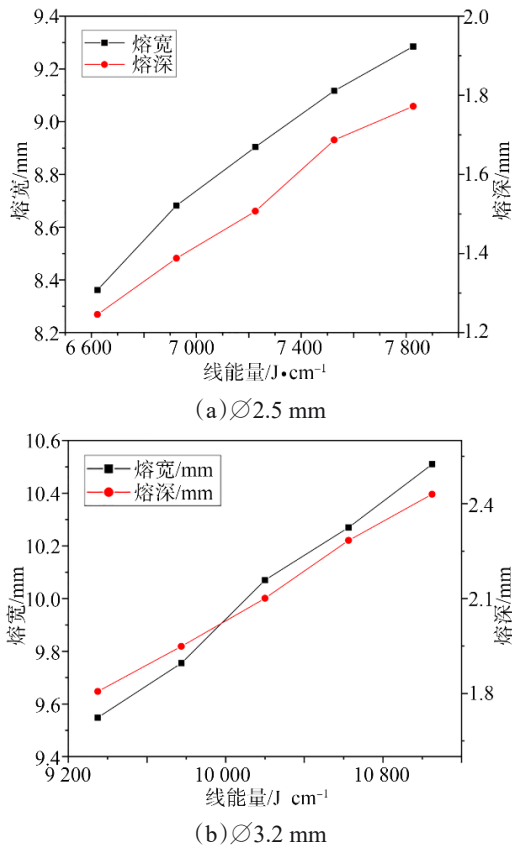
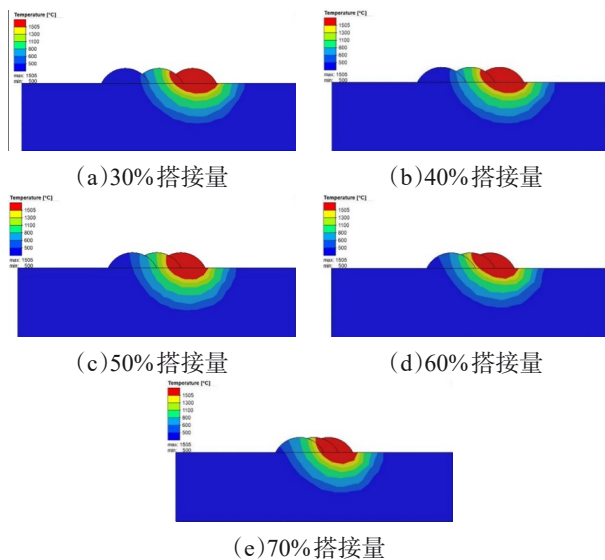


图3 不同规格焊条热输入量与熔深、熔宽趋势

Fig. 3 Trend of heat input versus penetration depth and bead width for different welding rod specifications

图4 $\varnothing 2.5$ mm 焊条不同搭接量下的温度场Fig. 4 Temperature field for different lap values with $\varnothing 2.5$ mm welding rod

盖前序焊道/层的粗晶区温度场,代表该粗晶区获得回火焊道的热处理效果。图5为原点位置坐标(0,

0)随时间变化的温度曲线,曲线中的三个峰值依次代表第1、第2、第3焊道焊接时焊接温度。通过计算研究, $\varnothing 2.5$ mm焊条在不同的搭接量下温度场及热循环曲线的分布规律,如图4、图5所示, $\varnothing 3.2$ mm焊条与 $\varnothing 2.5$ mm焊条模拟计算获得的温度场变化趋势相同,随着搭接量增加,后续焊道对固定位置的峰值温度影响逐渐增加,搭接量过高时,后续焊道将加剧熔化前续焊道的部分粗晶区,还易造成焊道层厚度增大等问题。

因此搭接量介于40%~60%时,后续焊道对前一焊道的粗晶区能起到良好的回火效果。观察温度场分布模拟图发现,随着搭接量增大,温度场范围位置向左平移,由此推断,搭接量不影响焊道的热量分布,只改变温度场范围位置。

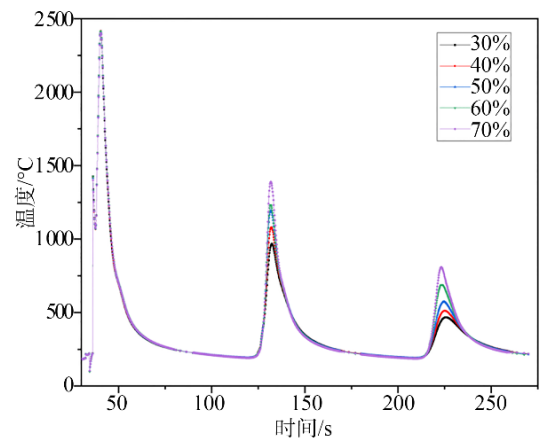
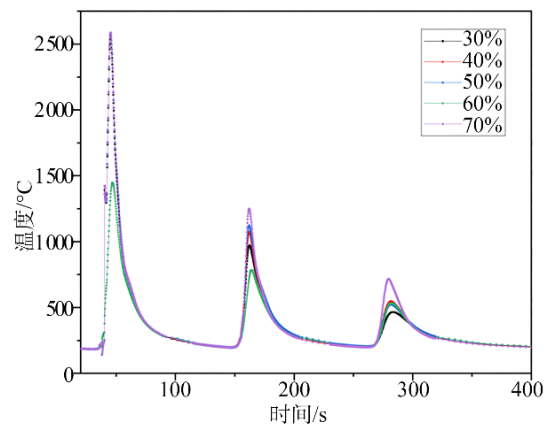
(a) $\varnothing 2.5$ mm 焊条(b) $\varnothing 3.2$ mm 焊条

图5 不同规格焊条不同搭接量下坐标(0,0)随时间变化的温度曲线

Fig. 5 Temperature curve over time at coordinate (0,0) for different lap values and welding rod specifications

1.2.3 打磨量对温度场的影响规律

后续焊层的回火区域能否完全覆盖前焊层的待回火区域主要取决于打磨量,图6为1/3、1/2打磨量下温度场分布的模拟图,发现温度场分布规律一致,打磨量不影响焊道的热量分布,由此可见,不同打磨量可视为温度场上下的平移。因此可以根据单层焊道温度场的分布,估计后续焊层热作用范围,从而判断回火效果。观察图6中的温度作用区域,打磨量介于1/2~1/3之间时,第二、三层焊道回火区域能覆盖第一层粗晶区,能够起到良好的回火效果。

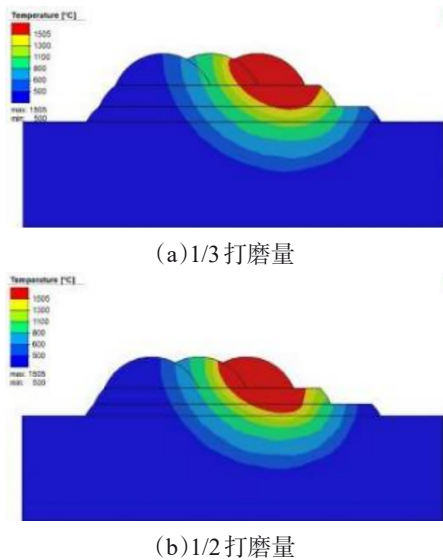


图6 不同打磨量下的温度场
Fig. 6 Temperature field for different grinding amounts

2 回火焊道焊接工艺评定试验

2.1 回火焊道焊接试件制造及性能测试试样制备

为了验证优化的回火焊道参数对低合金钢回火效果的影响,进行工艺评定试验。采用焊条电弧焊(SMAW)的焊接方法制造A217 WC6钢试样。工艺参数如表1所示,焊材R307成分如表3所示。

图7为A217 WC6钢回火焊道焊接试件,按图中先焊接接头的母材过渡层,焊接时采用平板5G

表3 R307焊条化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical Composition of R307 Welding Rod (wt. %)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.67	0.37	0.70	0.011	0.015	1.14	0.51

焊接位置,搭接量在40%~50%,先用 $\varnothing 2.5$ mm的R307焊条对坡口内壁进行第一层堆焊,首层焊接完成后打磨1/3层厚,再用 $\varnothing 3.2$ mm R307焊条进行第二层堆焊,母材过渡层焊接完成后,进行两块试板的对接焊制,直至焊接完成。A217 WC6焊接试板制造完成后,进行消氢处理,然后切割试样。

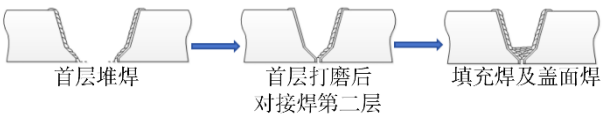


图7 回火焊道焊接评定试件焊示意
Fig. 7 Schematic diagram of the temper bead welding evaluation specimen

2.2 回火焊道焊接试样显微组织

焊接接头微观金相照片如图8所示,观察焊接接头焊缝、两侧热影响区和两侧母材的显微特征:焊缝组织主要为回火贝氏体组织,母材组织为贝氏体和铁素体,热影响区粗晶区组织由马氏体在回火焊道焊接过程中转变为回火索氏体组织,熔合线附近未发现裂纹、淬硬马氏体组织和过热组织存在。

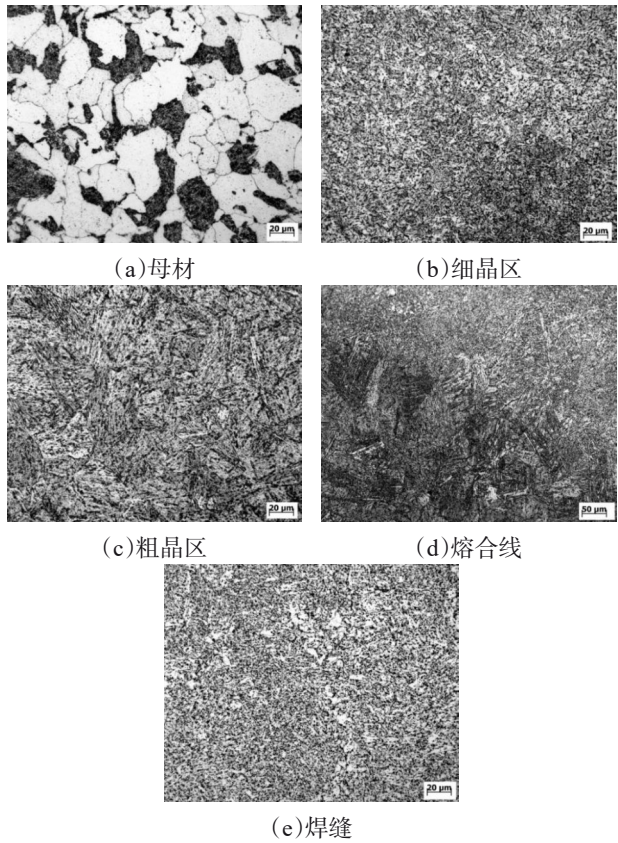


图8 A217 WC6钢焊接接头微观组织
Fig. 8 Microstructure of A217 WC6 steel welded joint

2.3 回火焊道焊接试样力学性能

2.3.1 硬度

图9为不同位置(焊接接头中间位置、距表面1.5 mm位置)、不同状态(有/无热处理状态)下的硬度测量值。如图9所示,未进行热处理时,距表面1.5 mm处热影响区硬度值最高达到365 HV1,中间位置热影响区硬度值最高为271 HV1,硬度的差异是由于内部区域受后续焊道热循环影响,起到了回火作用,热影响区硬度降低;焊接接头经过650 °C×1.5 h热处理后,硬度值与未经过热处理的接头中间位置硬度值无明显差异,说明使用优化参数后的回火焊道工艺,可以对焊接接头起到有效的回火作用,与焊后热处理效果类似。

2.3.2 拉伸及冲击性能

A217 WC6母材力学性能、焊接接头拉伸、冲击性能如表4所示。可以发现,回火焊焊接接头屈服强度均值为338.5 MPa、抗拉强度均值为536.5 MPa、焊缝和热影响区冲击功均值分别为93 J、94 J,均高于母材,且于母材位置断裂,符合DL/T 868—2014

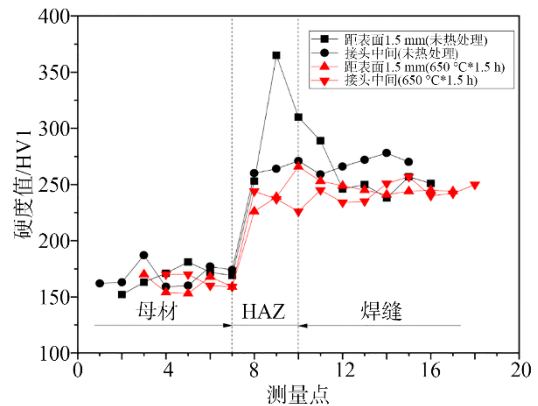


图9 不同位置、状态下的焊接接头硬度

Fig. 9 Hardness measurements of the welded joint at different positions and conditions

焊接工艺评定标准。

2.4 回火焊道技术工程应用

图10为某电站某阀体现场返修前、返修后的图片。该电站大修期间发现某阀体上游加强环与阀门连接处存在气孔、夹渣、裂纹等多种焊接缺陷。清除焊接缺陷后,采用优化后的回火焊道工艺参数成功修复阀体,并检测合格。

表4 A217 WC6钢焊接接头性能

Table 4 Properties of A217 WC6 steel welded joint

试样名称	室温拉伸(平均值)				室温冲击功(平均值)	
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%	收缩率/%	焊缝/J	热影响区/J
回火焊焊接接头	536.5	338.5	17	56.5	93	94
母材	519.5	321	23.5	52.5	70.3	



(a)返修前(已清除缺陷) (b)返修后焊缝

图10 现场阀体返修前、返修后图片

Fig. 10 Photos of the valve body before and after on-site repair

3 结论

本文利用有限元模型,研究了热输入量、不同搭接量、不同打磨量等参数对回火焊道焊接温度场的影响,并利用计算优化的参数进行了焊接工艺评定试验,得出了以下结论:

(1)不同规格的焊条在同一热输入量下,熔池面积基本相似, $W_1H_1 \approx W_2H_2$ 。不同的打磨量和搭接量可视温度场上下、左右方向的平移,不会影响焊道的热量分布。

(2)根据模拟计算结果, $\varnothing 2.5$ mm、 $\varnothing 3.2$ mm两种规格焊条焊接时,最佳搭接量为40%~60%、打磨量为1/3~1/2。使用该参数进行回火焊道焊接实验,发现可以有效降低焊接接头热影响区硬度值,达到焊后热处理效果。

(3)与母材相比,使用优化后的回火焊道工艺,焊接得到的焊接接头抗拉强度、屈服强度均有提升,塑性略有降低,接头力学性能与母材接近,符合DL/T868—2014焊接工艺评定标准。

参考文献:

[1] 蔡广闽,韦云部,闭万祝. 热电厂高压加热器的检验与

- 缺陷处理[J]. 机电信息, 2023(7):75-78.
- CAI G M, WEI Y B, BI W Z. Inspection and Defect Treatment of High-pressure Heaters in Thermal Power Plants[J]. Mechanical and Electrical Information, 2023(7): 75-78.
- [2] 张建林, 吴小锋, 朱平, 等. 铸造低合金钢回火焊道技术适用性判别分析[J]. 电焊机, 2024, 54(4):104-110.
- ZHANG J L, WU X F, ZHU P, et al. Discriminant Analysis on the Applicability of the Temper Bead Welding for Casting Low Alloy Steel[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4):104-110.
- [3] 沈阳晨, 魏建军. 铸钢件焊接及缺陷修复[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [4] 申伽奇. 用于核岛主设备回火焊道修复的关键技术研究[J]. 科技创新导报, 2022(10):13-15.
- SHEN J Q. Research on Key Technologies for Repair of Nuclear Island Main Equipment tempering Welds[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2022, (10):13-15.
- [5] 秦建. 核电用SA508-3钢回火焊道焊接技术的研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2014.
- QIN J. Investigation on Temper Bead Welding Technology of SA508-3 Steel for Nuclear Vessel[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2014.
- [6] 朱兵, 沈正军. 浅析回火焊道技术在氧气球罐裂纹返修中的作用[J]. 化工装备技术, 2020, 41(6):53-55.
- ZHU B, SHEN Z J. Analysis on the Role of Tempering Welding Bead Technology in Repairing Cracks of Oxygen Spherical Tank[J]. Chemical Equipment Technology, 2020, 41(6):53-55.
- [7] Zhang K, Enneking J A, Gri mmett B B, et al. Toward an improved understanding of effect of linear heat input on heat-affected zone tempering in temper bead welding [C]//ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, Vancouver, Canada, 2016.
- [8] 秦建, 李世乾, 张汇文, 等. SA508-3钢回火焊道技术焊道搭接量的分析[J]. 焊接, 2017(3):48-51+75.
- QIN J, LI S Q, ZHANG H W, et al. Analysis of amount of lap in temper bead welding of SA508-3 steel [J]. Welding & Joining, 2017(3):48-51+75.
- [9] Tomków J, Rogalski G, Fydrych D, et al. Improvement of S355G10+N Steel Weldability in Water Environment by Temper Bead Welding[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 262:372-381.
- [10] 秦建, 吕晓春, 杜兵, 等. 回火焊道焊接技术中焊接接头几何尺寸影响因素的分析[J]. 焊接学报, 2014, 35(6):17-20.
- QIN J, LV X C, DU B, et al. Factors affecting welded joints geometry in temper bead welding technology[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2014, 35(6):17-20.
- [11] 刘京, 李铸国, 姚成武. P20模具钢的双层回火激光熔覆修复技术[J]. 中国表面工程, 2013, 26(1):6-12.
- LIU J, LI Z G, YAO C W. Dual-layer Temper Technique for Laser Cladding Repair of P20 Mold Steel[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(1):6-12.
- [12] 秦建, 吕晓春, 杜兵, 等. SA508-3钢焊趾部位回火焊道技术研究[J]. 焊接, 2014(7):37-40+74.
- QIN J, LV X C, DU B, et al. Temper bead welding of SA508-3 steel weld toe [J]. Welding & Joining, 2014(7):37-40+74.
- [13] Asadi M, Christopher B, John G. Optimizing Temper Bead Welding by Computational Weld Mechanics and Design of Experiment Matrix [J]. Journal of pressure vessel technology, 2013, 135(3):031401.
- [14] Aloraier A S, Joshi S, Asadi M, et al. Microstructural and hardness modeling: Effect of multiple bead deposition in temper bead welding technique[J]. International Journal of Energy & Technology, 2010, 2(16):1-11.
- [15] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1984, 15(2):299-305.
- [16] Yu L, Nakabayashi Y, Sasa M, et al. Neural network prediction of hardness in HAZ of temper bead welding using the proposed thermal cycle tempering parameter (TCTP) [J]. ISIJ international, 2011, 51(9):1506-1515.