



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.15

铸造低合金钢回火焊道技术适用性判别分析

张建林¹, 吴小锋², 朱 平¹, 陈英杰², 尹少华¹, 王淦刚¹

1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004
2. 中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518038

摘 要: 回火焊道技术是通过第二层焊道的热循环来改善第一层焊道的组织和性能的焊接技术,但目前尚无明确标准规定其适用范围。以 A217 WC6 和 A217 WC9 钢为对象,采用 Gleeble 热模拟试验判断二次回火对两种铸造低合金钢性能的影响规律,进而用回火焊道技术制造焊接试样,进行焊态、热处理态下的组织和性能对比试验。试验结果表明, A217 WC6 钢在一次高温热循环后,冲击功从 70 J 提升至 126 J,硬度值从 154 HV10 增至 375 HV10。二次热循环后, A217 WC6 钢的硬度整体降低,回火峰值温度对其性能有显著影响。相比之下, A217 WC9 钢的冲击功从 77 J 降至 52 J,硬度值从 182 HV10 增至 364 HV10,二次热循环对其性能影响不显著。焊接试样的性能和硬度变化趋势与 Gleeble 热模拟试验一致。由此得出结论: Gleeble 热模拟试验可以判断钢种是否适用于回火焊道技术; A217 WC6 钢较 A217 WC9 钢更适合采用回火焊道技术进行修复。

关键词: 铸造低合金钢; 回火焊道技术; Gleeble 热模拟; 修复

中图分类号: TG455; TG163 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2024)04-0104-07

Discriminant Analysis on the Applicability of the Temper Bead Welding for Casting Low Alloy Steel

ZHANG Jianlin¹, WU Xiaofeng², ZHU Ping¹, CHEN Yingjie², YIN Shaohua¹, WANG Gangang¹

1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China
2. China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen 518038, China

Abstract: To investigate the applicability of temper bead welding technology in the repair of cast low-alloy steels, Gleeble thermal simulation tests were employed to assess the influence of secondary tempering on the performance of A217 WC6 and A217 WC9, two types of cast low-alloy steels. Subsequently, welding samples were fabricated using temper bead welding technology, and the microstructure and performance under as-welded and heat-treated conditions were compared. The results indicated that after a single high-temperature thermal cycle, the impact energy of A217 WC6 steel increased from 70 J to 126 J, and the hardness value rose from 154 HV10 to 375 HV10. Following the second thermal cycle, the hardness of A217 WC6 steel decreased overall, with the tempering peak temperature significantly affecting its performance. In contrast, the impact energy of A217 WC9 steel dropped from 77 J to 52 J, and the hardness value decreased from 182 HV10 to 364 HV10, with the second thermal cycle having an insignificant effect on its performance. The trends in performance and hardness changes of the welding samples were consistent with those of the Gleeble thermal simulation tests. It is concluded that Gleeble thermal simulation tests can determine the suitability of steel for temper bead welding; A217 WC6 steel is suitable

收稿日期: 2023-05-30 修回日期: 2023-12-12

作者简介: 张建林(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事电站焊接技术开发及性能评价研究。E-mail: zhjianlin2008@163.com。

for repair using temper bead welding technology, while A217 WC9 steel is not as suitable.

Keywords: casting low alloy steel; temper bead welding; gleeble thermal simulation; repair

引用格式: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.

Citation:ZHANG Jianlin, WU Xiaofeng, ZHU Ping, 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.

0 前言

阀门、泵、高中压外缸等重要设备材料有诸多采用铸造低合金钢,此类材料组织粗大、脆性大,并伴有缩孔和夹杂等,焊接或者修复此类钢种时,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。通常对此类铸造焊接接头或是焊接修复均要求进行焊后热处理^[1]。

ASME第IX卷给出回火焊道(TBW)的定义,可以理解为熔覆焊道于特定位置,使得热影响区及焊缝金属的组织 and 力学性能进行改善^[2],ASME标准规定回火焊道技术限于P-1、3、12A、12B、12C等碳钢、低合金钢^[3]。国内外关于不同钢种回火焊道工艺进行了诸多研究:文献[4–7]对焊缝几何尺寸研究,获得搭接量介于40%~60%范围时有利于回火焊道工艺的实施;文献[8–9]对焊趾距离对回火焊道回火效果进行了研究及论述,推荐为1/8~3/16英寸;文献[2,10–11]研究了后层焊道热输入要足够大才能使得母材粗晶区的马氏体组织回火更充分,建议第二层熔覆层的热输入大于首层熔覆层的30%~70%;文献[12–14]研究了回火焊道技术在不同失效部件上的应用;另有诸多研究^[15–20]通过热模

拟试验、有限元模拟计算、神经网络分析预测回火焊道工艺及热循环对组织与性能的影响规律。但是,已有的研究成果中还没有一种简单可行的方法对回火焊道技术适用性进行评判,并且针对于铸造低合金钢回火焊道技术的研究也没有报道。

本文选取具有代表性的铸造低合金钢A217 WC6和A217 WC9作为研究对象,通过Gleeble热模拟试验探讨二次回火对这两种铸造低合金钢性能的影响规律,并进一步通过制造回火焊道焊接试样,对比焊态和热处理态下的组织和性能,以判断回火焊道技术在铸造低合金钢修复中的适用性。本研究的成果能为铸造低合金钢的焊接修复提供理论依据和技术支持,对于提高焊接质量和材料性能具有一定的意义。

1 试验用材料及方法

1.1 试验材料

A217 WC6、A217 WC9试板及对应的R307、R407焊材化学成分如表1所示,力学性能如表2所示,两种低合金钢的金相组织如图1所示。根据NB/T 47013—2015标准进行渗透检测、超声检测,确认试板表面、内部无超标缺陷。

表1 低合金钢母材与焊材化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of low alloy steel base material and welding material (wt. %)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	W	Fe
A217 WC6	0.15	0.40	0.64	0.019	0.008	1.19	0.07	0.48	0.02	0.01	Bal.
A217 WC9	0.10	0.42	0.58	0.024	0.019	2.21	0.04	0.94	0.03	0.02	Bal.
R307	0.067	0.37	0.70	0.011	0.015	1.14	—	0.51	—	—	—
R407	0.067	0.38	0.65	0.012	0.016	2.23	—	1.02	—	—	—

1.2 Gleeble热模拟试验方法

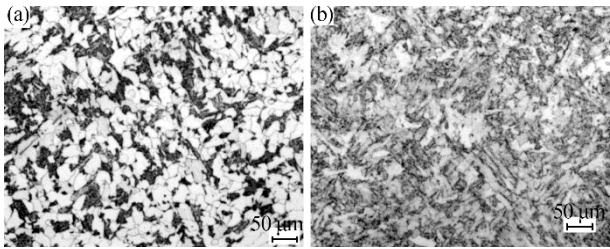
回火焊道焊接技术相比一般的焊后消应力热处理,由于焊接热循环的回火时间短,对不同钢种的回火效果影响不同。为了验证回火焊道技术是否适用于A217 WC6、A217 WC9低合金钢,根据焊

条电弧焊回火焊道焊接工艺参数,制定HAZ热循环曲线,分为单道焊模拟试验、双道焊模拟试验,预热温度200℃,升温速率200℃/s,第一道次的峰值温度为1300℃×1s、降温速率 $t_{8/5}$ 为7s,第二道次的峰值温度为(550~800)℃×1s、降温速率 $t_{8/5}$ 为10s,第

表2 A217 WC6、A217 WC9钢母材性能

Table 2 Performance of A217 WC6 steel and A217 WC9 steel

材料	冲击功KV2/J		硬度值/HV10	
	测量值	平均值	测量值	平均值
A217 WC6	73.5, 72.5, 65.0	70	153.7, 153.4	154
A217 WC9	81.5, 80.0, 69.5	77	182.7, 180.4	182



(a)A217 WC6钢 (b)A217 WC9钢

图1 铸造低合金钢金相组织

Fig. 1 Metallurgical structure of casting low alloy steel

一、二道次的线能量比值为1:1.4,试样规格11 mm×11 mm×80 mm,Gleeble热循环工艺曲线如图2所示。

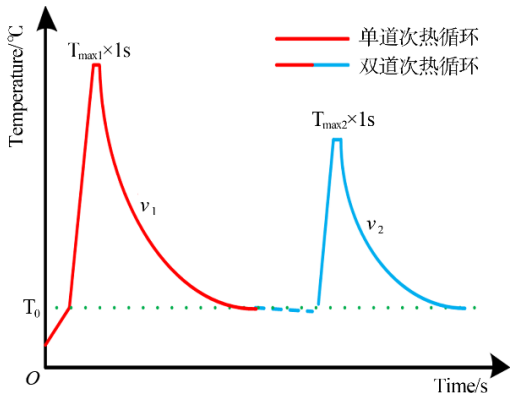


图2 Gleeble热循环工艺曲线

Fig. 2 Gleeble thermal cycle curves

1.3 回火焊道试验方法

回火焊道是利用第二层焊道的热循环对第一层焊道在母材上形成的粗晶区进行回火,从而避免使用焊后热处理。为验证回火焊道对A217 WC6、A217 WC9低合金钢的效果,分别用焊条电弧焊接单层、双层焊缝,不同焊道层的回火焊道焊接工艺参数见表3。A217 WC6钢、A217 WC9钢均进行焊态、热处理态(A217 WC6钢:650 °C×1.5 h,A217 WC9钢:700 °C×1.5 h)试验。

焊接过程中需注意:①严格控制焊道宽度不大于3倍的焊条直径,高度不高于1倍的焊条直径;②为了减少HAZ的冷裂纹敏感组织,试样焊前预热200 °C,控制道间温度介于200 °C~250 °C;③焊道

表3 焊接工艺参数

Table 3 Welding process parameters

堆焊工艺方案	层数	预热温度/°C	焊接电流/A	焊接电压/V
单层回火焊道	1	200	85	16~18
双层回火焊道	1	200	85	16~18
	2	200	110	18~20

堆焊工艺方案	层数	焊接速率/(cm·min ⁻¹)	道间温度/°C	热处理
单层回火焊道	1	20~25	200~250	有/无
双层回火焊道	1	20~25	200~250	有/无
	2	20~25	200~250	有/无

之间的搭接量控制在40%~60%范围;④第一层焊接完成后打磨至均匀,至平整后进行第二层的焊接;⑤第二层的热输入量为第一层的约1.4倍;⑥第二层焊趾处尺寸不得过大过小,3~4 mm为适中。回火焊道模拟试样如图3所示,焊接完成的试样分别在焊态、热处理态下解剖,对焊缝及热影响区进行金相和硬度测试。

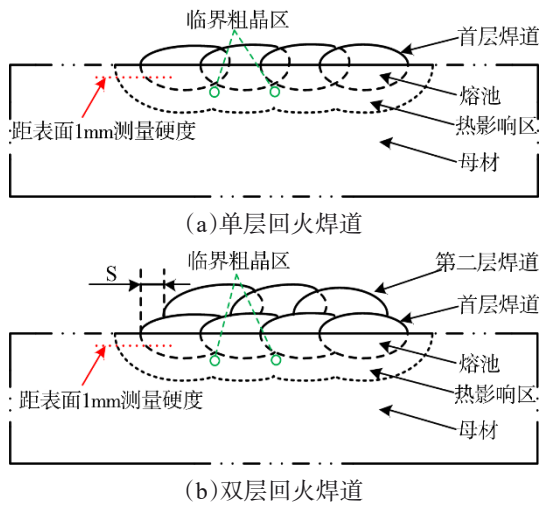


图3 回火焊道模拟试样

Fig. 3 Schematic diagram of the temper bead welding simulation sample

2 试验结果及分析

2.1 Gleeble热模拟试验及结果分析

Gleeble热模拟试验完成后,分别截取试样进行硬度、室温冲击检测,结果如图4、图5所示。A217 WC6、A217 WC9低合金钢母材首先通过一次高温热循环,组织经历完全奥氏体化后转变为回火马氏体组织,随后通过相变温度之下的二次热循环,组织性能进一步发生改变:A217 WC6钢母材冲击功

(70 J)、硬度值(154 HV10)经过一次热循环模拟增加为126 J、375 HV10,经过二次热循环模拟回火组织冲击功变化不明显、硬度整体降低并随着峰值温度升高而降低,峰值温度对A217 WC6材料的影响显著,初步判断回火温度容易改善A217 WC6钢接头粗晶区性能;A217 WC9钢母材冲击功(77 J)、硬度值(182 HV10)在经过一次热循环后变为52 J、364 HV10,经过二次热循环后冲击功、硬度变化不明显,温度对A217 WC9材料的影响不显著,初步判断回火温度较难优化A217 WC9钢接头粗晶区性能。

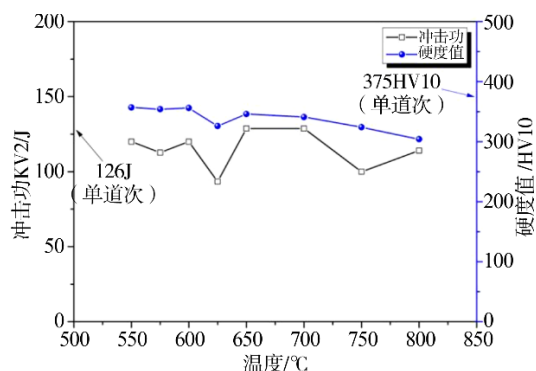


图4 A217 WC6钢双道次热模拟试验结果

Fig. 4 Second thermal cycle test results of A217 WC6 steel

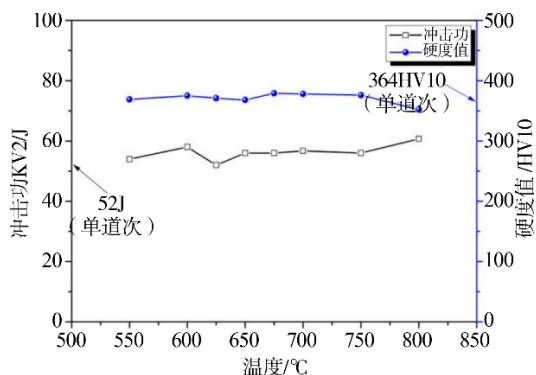


图5 A217 WC9钢双道次热模拟试验结果

Fig. 5 Second thermal cycle test results of A217 WC9 steel

对比两种钢的模拟试验结果发现,回火峰值温度对A217 WC6钢影响显著、对A217 WC9钢的影响不显著,这是因为碳化物合金元素(如Cr、Mo、V、Ti、Nb等)只有充分溶解在奥氏体的内部,才能增加奥氏体的稳定性,即增加淬硬倾向^[21]。A217 WC6钢相比A217 WC9钢,Cr、Mo等合金元素含量少,碳当量低,焊接热影响区产生淬硬马氏体组织的倾向更不明显,易受后续焊道热循环的影响而体现明显的回火效果,也可以认为回火焊道技术容易在

A217 WC6钢上实现、不易在A217 WC9钢上实现。

通过Gleeble热模拟试验获得的结果,可以用来判断钢种是否适用于回火焊道技术:若二次热循环回火峰值温度下获得的性能优于单道次粗晶区回火状态的性能,则该钢种适用于回火焊道技术实现回火焊道优化粗晶组织的效果,否则不适用。

2.2 回火焊道焊接试验及结果分析

2.2.1 金相组织

A217 WC6、A217 WC9低合金钢回火焊道模拟件取样进行金相检测,其宏观形貌及显微组织如图6、图7所示,熔覆金属与母材成形良好,焊缝及热影响区均未发现裂纹、未熔合、缺欠等缺陷,铸钢母材存在少量的疏松、气孔等缺陷。

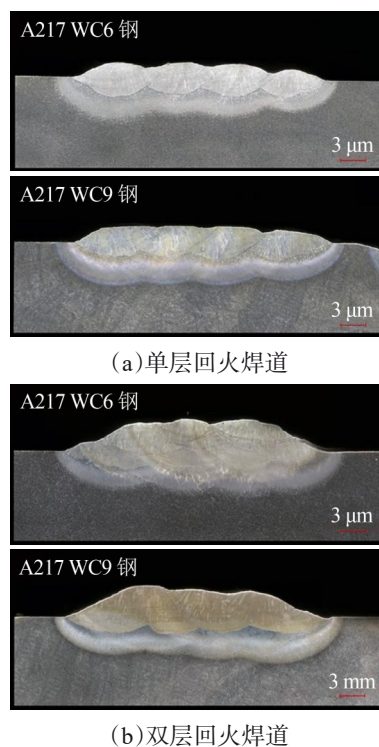


图6 铸造低合金钢回火焊道宏观形貌

Fig. 6 Macroscopic morphology of cast low-alloy steel temper bead welding

堆焊层主要由焊缝区、热影响区及母材组成,各区之间的组织形貌、晶粒尺寸差异明显。取代表性的焊态、热处理态下的临界粗晶区组织对比分析:A217 WC6钢双道次间的临界粗晶区,在经历单层回火焊道两次焊接热循环的影响后组织粗大,为马氏体、贝氏体的混合组织,距离熔合线越近晶粒越粗大;经过第二层回火焊道的作用,形成韧性较

好的回火马氏体+贝氏体的混合组织,与热处理态的组织一致;临界粗晶区单层回火焊道下的硬度为 334 HV5,经双层回火焊道的影响硬度降为 253 HV5,接近于热处理态的硬度 245 HV5。A217 WC9 钢双道次间的临界粗晶区,在经受单层回火焊道两次焊

接热循环的影响后组织粗大,为马氏体+贝氏体的混合组织,距离熔合线越近晶粒越粗大;经过第二层回火焊道的作用,组织形态并未得到改善;临界粗晶区单层回火焊道硬度 373 HV5、双层回火焊道硬度 358 HV5,均远高于热处理态的硬度 271 HV5。

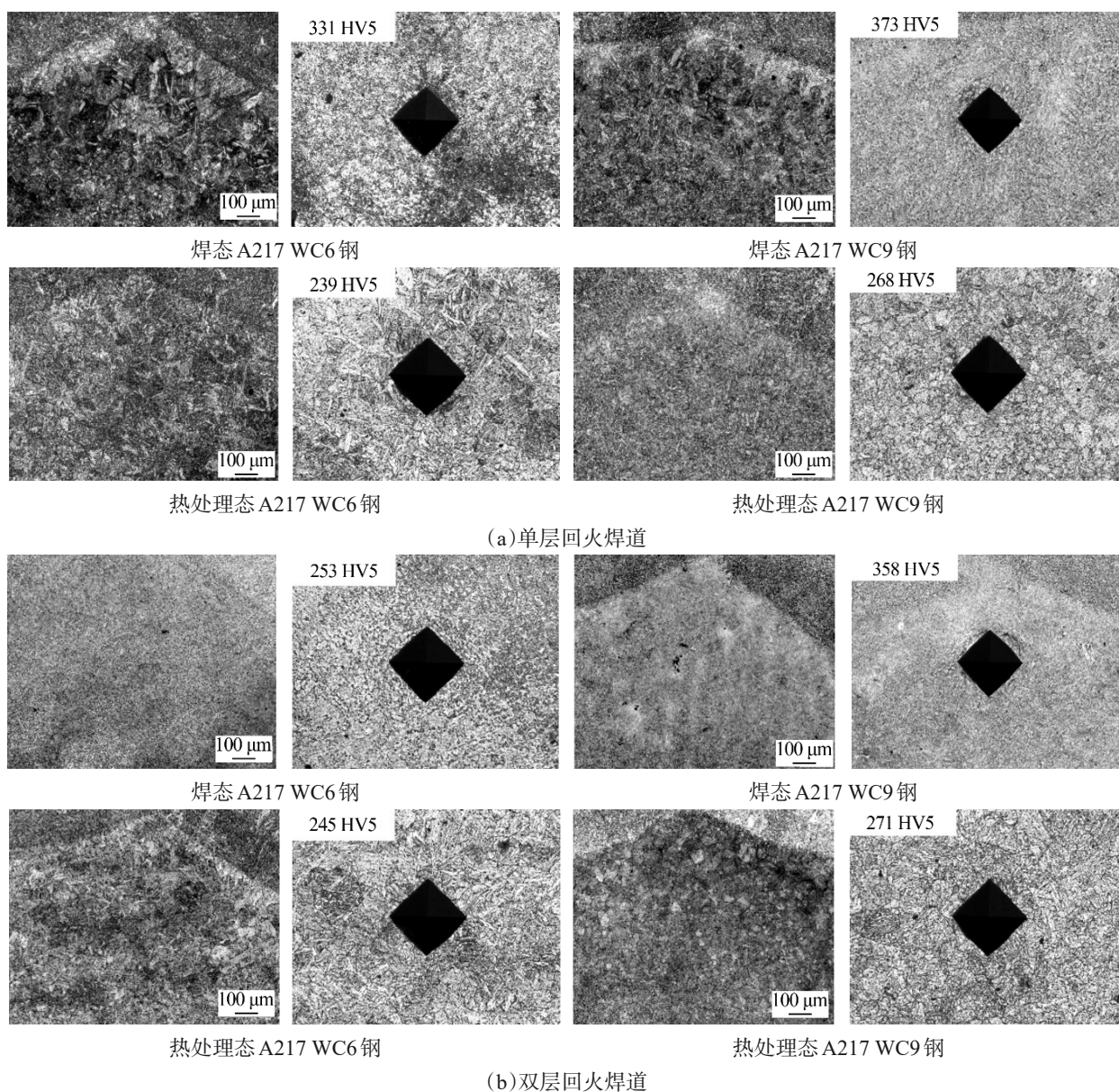


图7 铸造低合金钢回火焊道临界粗晶区组织及硬度

Fig. 7 Organization and hardness of critical coarse grain zone of cast low alloy steel temper bead welding

2.2.2 硬度

对焊态、热处理态下的试样进行维氏硬度测试,硬度测试线位于图3母材表面以下 1 mm 位置。A217 WC6、A217 WC9 低合金钢测试结果分别如图 8、图 9 所示,对比分析发现:A217 WC6 钢第二层回

火焊道对首层焊道的粗晶区起到明显的回火效果,经过回火焊道处理后热影响区及焊缝金属组织的性能得以改善,硬度值接近于热处理态下的硬度,回火焊道技术能改善 A217 WC6 钢接头的组织及性能;A217 WC9 钢经过回火焊道处理后热影响区及

焊缝金属的组织 and 性能未获得改善,焊态下的硬度值远高于热处理态下的硬度,回火焊道技术不能改善 A217 WC9 钢接头的组织及性能。与 Gleeble 热模拟得到的结论类似,A217 WC6 钢、A217 WC9 钢因合金含量的不同导致焊接热循环表现出不同的淬硬倾向,进而表现出不同的回火效果。

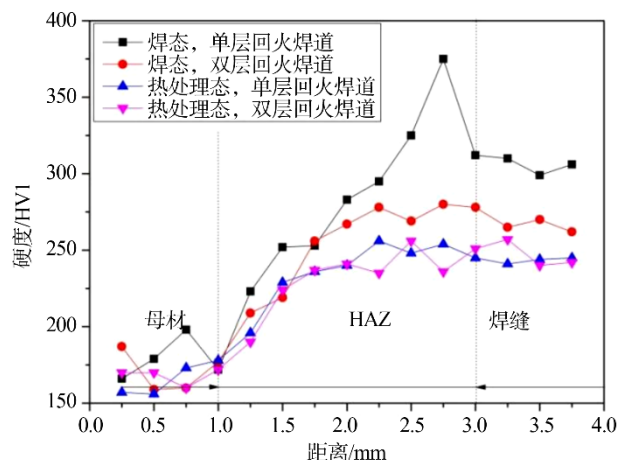


图8 A217 WC6钢接头热影响区测量硬度对比

Fig. 8 Measurement hardness comparison in the HAZ of A217 WC6 steel joint

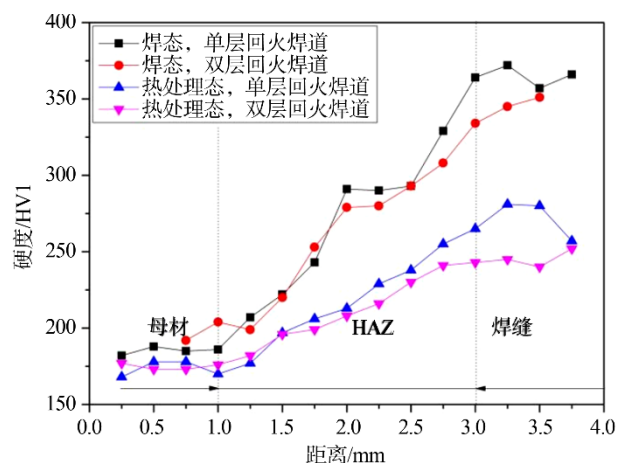


图9 A217 WC9钢接头热影响区测量硬度对比

Fig. 9 Measurement hardness comparison in the HAZ of A217 WC9 steel joint

3 结论

本文首先通过 Gleeble 热模拟试验方法判断二次回火对铸钢性能的影响规律,随后对比焊态、热处理态下的回火焊道焊接试样,获得如下结论:

(1) A217 WC6 钢二次热循环回火峰值温度下

获得的性能优于单道次粗晶区回火状态的性能,而 A217 WC9 钢则组织性能变化不明显,通过 Gleeble 热模拟试验方法可以判定钢种是否适用于回火焊道技术。

(2) 回火焊道技术能改善 A217 WC6 钢接头热影响区及焊缝的组织 and 性能,效果等同于回火热处理,而 A217 WC9 钢则不明显。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Sperko W J. Exploring temper bead welding[J]. Welding Journal, 2005, 84(7): 37-40.
- [3] ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE: IX Welding and Brazing Qualifications [S]. American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 刘京. P20 模具钢的双层回火激光熔覆修复技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
- [11] LIU J. Study on Dual-Layer Temper Technique for Laser Cladding Repair of P20 Mold Steel[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2013.
- [12] Meszaros K, Vrolyk C, Pepin J, et al. The effects of temper bead welding technique on weld integrity for in-service welding of carbon steels[C]//International Pipeline Conference, Calgary, Canada, 2012.
- [13] 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(6): 43-47.
- [14] QIN J, LI S Q, ZHANG H W, et al. Study on the tem-

- per bead welding technology of SA508-3 steel toe[J]. Welding & Joining, 2014(6):43-47.
- [10] 朱平,赵建仓,王淦刚,等. 回火焊道对核电低合金钢表面镍基堆焊层热影响区性能的影响[J]. 中国表面工程, 2014,27(1):87-92.
- ZHU P, ZHAO J C, WANG G G, et al. Influence of Tempering Bead on Performance of Heat Affected Zone of Nickel-based Alloy Surfacing Layer for Nuclear Power Low Alloy Steel[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(1): 87-92.
- [11] Ling K H, Fuh Y K, Kuo T C, et al. Effect of welding sequence of a multi-pass temper bead in gas-shielded flux-cored arc welding process: hardness, microstructure, and impact toughness analysis [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5-8): 1033-1046.
- [12] 叶义海,罗绪珍,王建,等. 低合金钢自动回火焊接过程中热影响区组织转变[J]. 电焊机, 2018, 48(1): 57-62.
- YE Y H, LUO X Z, WANG J, et al. Microstructure transformation of heat affected zone during automatic temper welding of low alloy steel[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(1): 57-62.
- [13] 杨程坤,孙吉栋. 重型燃气轮机铸件点状缺陷的修补[J]. 铸造工程, 2019(5): 62-64.
- YANG C K, SUN J D. Welding Repair Process for Spot Defects on Heavy Duty Gas Turbine after Final Machining[J]. Foundry Engineering, 2019(5): 62-64.
- [14] 金亮,匡艳军,邱振生,等. 核电厂在制蒸汽发生器管板损伤缺陷修复方案研究[J]. 电焊机, 2019, 49(9): 42-48.
- JIN L, KUANG Y J, QIU Z S, et al. Research on the repair schemes of the damaged tube-sheet on a fabricating steam generator of a nuclear power plant[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(9): 42-48.
- [15] IKEUCHI K, LIAO J S, TABABE H, et al. Effect of Temper-bead Thermal Cycle on Toughness of Weld ICCGHAZ of Low Alloy Steel SQV-2A[J]. ISI International, 1995, 35(10): 1203-1212.
- [16] 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.
- [17] YU L N, SAIDA K, MOCHIZUKI M, et al. A Novel Simulation Method of Thermal Cycle in Multi-pass Welding Process by Temper Bead Technique [J]. E-Journal of Advanced Maintenance, 2021, 13(1): 12-20.
- [18] Yu L, SaSa M, Ohnishi K, et al. Neural network based toughness prediction in HAZ of low alloy steel produced by temper bead welding repair technology [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(2): 120-134.
- [19] YU L N, SAIDA K, MOCHIZUKI M, et al. Hardness Prediction of HAZ in Temper Bead Welding by Non-Consistent Layer Technique[J]. E-Journal of Advanced Maintenance, 2014, 6: 34-47.
- [20] Zhang K W. Experimental and Computational Investigation of Temper Bead Welding and Dissimilar Metal Welding for Nuclear Structures Repair[D]. Columbus: The Ohio State University, 2016.
- [21] 张文钺. 焊接冶金学基本原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.