

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.12

铬钼钢焊接材料焊接工艺及性能研究

蒋宇晨, 李 恩*, 何 冰, 赵 鑫, 毕明鑫

东方电气(广州)重型机器有限公司, 广东 广州 511455

摘 要: 针对第四代核电堆型蒸汽发生器用SA-336 F22 CL3及SA-213M T22铬钼钢的焊接制造需求,系统研究了E9018-B3焊条、ER90S-B3焊丝及F9P2-EB3-B3/FLUX埋弧焊材三种匹配焊接材料的焊接工艺及接头性能。通过优化焊接操作技巧与工艺参数,并制定严格的预热(200~250℃)、后热(250~400℃保温2h)及消应力热处理制度(690℃±15℃保温24~24.5h),制备了焊接接头。测试结果表明,接头短时力学性能优异:熔敷金属在530℃高温抗拉强度保持良好,-20℃下ER90S-B3熔敷金属冲击功≥200J,热处理后焊缝区硬度显著下降且分布均匀。530℃高温持久试验表明,焊接接头断裂寿命超过10 000h,其应力-断裂时间关系曲线显著高于ASME标准曲线。研究证实,采用优化的焊接及热处理工艺,可获得成形良好、兼具优异短时力学性能与长期高温持久性能的铬钼钢焊接接头。该成果已成功应用于某四代核电蒸汽发生器制造,累计完成主要焊缝1 120条,无损检测一次合格率100%,为同类设备焊接制造提供了关键技术与实践依据。

关键词: 铬钼钢焊材;焊接工艺;消应力热处理;力学性能;高温持久性能

中图分类号: TG422 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)12-0085-06

Research on Welding Technology Development and Application of Chrome-Molybdenum Steel Welding Material

JIANG Yuchen, LI En*, HE Bing, ZHAO Xin, BI Mingxin

DongFang (GuangZhou) Heavy Machinery Co., Ltd., Guangzhou 511455, China

Abstract: To meet the welding manufacturing requirements of SA-336 F22 CL3 and SA-213M T22 chrome-molybdenum steels for the fourth-generation nuclear reactor steam generators, a systematic study was conducted on the welding technology and joint performance of three matching welding materials: E9018-B3 electrode, ER90S-B3 wire, and F9P2-EB3-B3/FLUX submerged arc welding material. By optimizing welding operation techniques and process parameters and implementing strict preheating (200-250℃), post-heating (250-400℃ for 2 h), and stress relief heat treatment (690℃±15℃ for 24~24.5 h), welded joints were prepared. Test results show excellent short-term mechanical properties: the deposited metal maintains good high-temperature tensile strength at 530℃, the impact energy of ER90S-B3 deposited metal at -20℃ is ≥200 J, and the hardness in the weld zone decreases significantly and distributes uniformly after heat treatment. High-temperature durability tests at 530℃ indicate that the fracture life of the welded joints exceeds 10,000 h, and their stress-time-to-fracture curves are significantly higher than the ASME standard curve. The research confirms that using optimized welding and heat treatment processes can achieve chrome-molybdenum steel welded joints with good formation, excellent short-term mechanical properties, and long-term high-temperature durability. This achievement has been successfully applied to the manufacture of a fourth-generation nuclear steam generator, with a total of 1,120 main welds completed and a 100% first-pass nondestructive testing qualification rate, providing key technical and practical basis for the welding manufacturing of similar equipment.

Keywords: chrome-molybdenum steel welding material; welding technology; post-weld heat treatment; mechanical properties; high-temperature durability

收稿日期: 2025-01-16 修回日期: 2025-02-21

作者简介: 蒋宇晨(1991—), 硕士, 高级工程师, 主要从事核电设备焊接及热处理相关研究。E-mail: 491406887@qq.com。

通讯作者: 李 恩(1984—), 硕士, 高级工程师, 主要从事核能相关主设备的焊接及热处理工艺开发。E-mail: hfutlien@163.com。

引用格式:蒋宇晨,李恩,何冰,等. 铬钼钢焊接材料焊接工艺及性能研究[J]. 电焊机,2025,55(12):85-90.

Citation:JIANG Yuchen, LI En, HE Bing, et al. Research on Welding Technology Development and Application of Chrome-Molybdenum Steel Welding Material[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 85-90.

0 引言

铬钼钢是铬(Cr)、钼(Mo)及铁(Fe)、碳(C)的合金,常具有耐热性好、抗氢腐蚀好等特殊优质性能被用于制造一些耐高温、耐高压的阀门和压力容器^[1]。低合金铬钼钢焊接材料由于其较大的碳当量而很强的冷裂纹倾向,具有脆硬倾向大、易产生延迟裂纹的特点^[2],焊接工艺要求严格、焊接难度大。

第四代核电堆型蒸汽发生器包括蒸发器和过热器两大产品,其结构形式为细长型直流式直管双管板换热器,主体为SA-336 F22 CL3 铬钼钢,换热管为SA-213M T22 铬钼钢,管程侧设计温度为510℃,壳程侧设计温度515℃^[3],焊接选用匹配的低合金B3类铬钼钢焊接材料。为了保证焊缝在设备高温高压运行过程中保持设计要求的接头机械

性能,良好高温持久性能和蠕变极限,从焊材工艺性能评价、焊接工艺参数开发、消应力热处理制度选择等方面,对三类铬钼钢焊材(E9018-B3 焊条、ER90S-B3 焊丝、F9P2-EB3-B3/FLUX 埋弧焊焊丝焊剂)开展了焊接及热处理工艺的开发工作,通过试验制定合理的焊接及热处理参数,研究焊接接头力学性能及操作控制要点,为产品的制造提供质量保证。

1 材料选择

1.1 材料化学成分分析

本研究采用的焊接材料为E9018-B3 焊条、ER90S-B3 焊丝、F9P2-EB3-B3/FLUX 埋弧焊焊丝焊剂,其主要化学成分如表1所示。

表1 三种铬钼钢焊材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition (wt. %) of three kinds of chrome-molybdenum steel welding materials

化学成分	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu
ER90S-B3	0.10	0.004	0.003	0.55	0.63	0.01	2.65	0.97	0.05
E9018-B3	0.11	0.003	0.004	0.25	0.64	0.14	2.43	1.08	0.01
F9P2-EB3-B3/FLUX	0.09	0.004	0.008	0.21	0.70	0.12	2.33	0.94	0.02

C元素的加入可以提升材料的硬度和强度,这是因为碳原子可以与铁原子形成间隙固溶体,从而增加钢的强度^[4];Ni元素能够显著提高铬钼钢的强度和韧性,使其具有更好的综合力学性能;Mo元素的加入可以提高铬钼钢的热强性,即提高材料在高温下的蠕变强度。这有助于铬钼钢在高温环境下保持稳定的性能,防止因蠕变而导致的材料失效;Cr的添加还可以提高钢的硬度和强度,使得铬钼钢在承受外力作用时具有更高的抵抗力。但铬元素也可能导致回火脆性,特别是在某些温度范围内(如370~595℃)长期操作时^[5]。因此,在实际使用中也需要控制铬的含量,以避免回火脆性的发生。

1.2 焊接性评价

1.2.1 焊接工艺性

采用手工氩弧焊、焊条电弧焊、丝极埋弧焊三种焊接方法分别对ER90S-B3、E9018-B3、F9P2-

EB3-B3/FLUX三种型号的焊材进行了全面且深入的焊接性能评价。ER90S-B3 焊丝在手工氩弧焊过程中有良好的熔滴过渡稳定性和电弧穿透力,确保了焊缝的高质量成形;E9018-B3 焊条在焊条电弧焊时,电弧燃烧稳定,焊接过程中产生的飞溅小,有效控制了焊接缺陷的产生,确保了焊接接头的整体质量^[6];F9P2-EB3-B3/FLUX 埋弧焊焊丝焊剂组合在丝极埋弧焊应用中,焊渣能够自动且轻松地翘起,展现出良好的脱渣性能,减少了焊接后的清理工作。相关的焊缝外观及脱渣情况,如图1所示。

焊后对熔敷金属试板开展了系统的无损检测,包括液体渗透和射线检验,以评估焊材的熔敷金属焊缝质量。焊缝的液体渗透检验按照ASME NB-5100进行,PT检测结果显示,焊缝表面及热影响区未发现任何线性缺陷或圆形缺陷显示,满足标准要求;焊缝的射线检验按照ASTM E1032的要求进行,

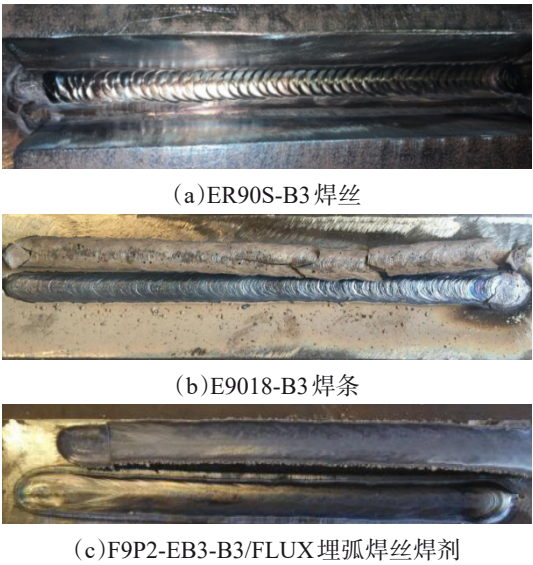


图 1 三种铬钼钢焊材工艺性能情况

Fig. 1 Process performance of three kinds of chrome-molybdenum steel welding materials

RT检测结果显示,焊缝内部未发现裂纹、未熔合、条形气孔等缺陷,满足标准要求。

1.2.2 角焊缝试验

对于铬钼钢焊条,按照 ASME-2015 版 SFA-5.5/SFA-5.5M 进行了立焊和仰焊位置的角焊缝试验,宏观金相结果如图 2 所示,可以看出,角焊缝的熔合情况和焊缝成形良好,未发现明显的焊接缺陷,如气孔、夹渣或未熔合等。

对立焊和仰焊位置的角焊缝尺寸进行测量,测量数据见表 2,测量结果满足 ASME 标准要求,表明焊接工艺参数设置合理,焊缝成形控制良好;经过折断试验后,断裂面经目视检查未发现裂纹和根部未熔合,进一步证明焊接接头质量稳定可靠。

2 焊接工艺参数

由于产品结构复杂,涵盖了众多的纵/环缝、角焊缝以及其他多类型坡口结构,这些结构特征对制造工艺提出了高要求。因此,在制造过程中,需灵活采用手工氩弧焊、焊条电弧焊、丝极埋弧焊这三种焊接方法,以应对不同坡口结构的焊接需求。

针对这三种焊接方法及所使用的焊接材料,进行了系统的焊接工艺试验。试验过程中,严格调控了焊接电流、电弧电压、焊接热输入量、焊接速度等

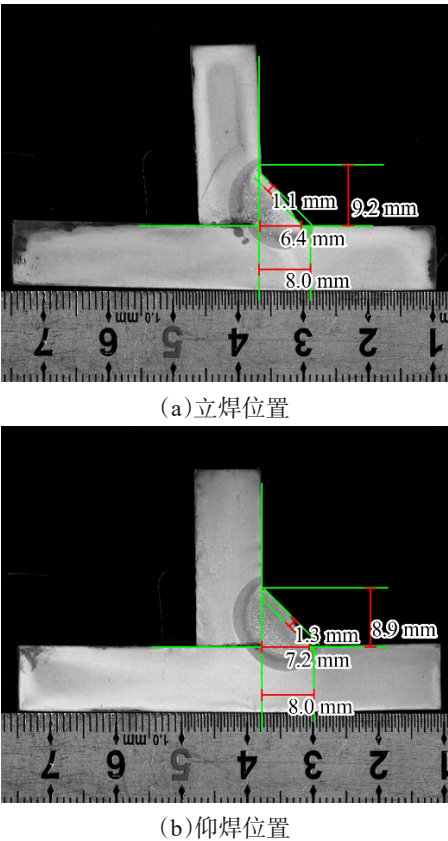


图 2 E9018-B3($\phi 4.0$)焊条角焊缝试验宏观金相

Fig. 2 Test of macroscopic metallography of E9018-B3($\phi 4.0$) fillet weld

表 2 E9018-B3($\phi 4.0$)焊条角焊缝测量数据

Table 2 Measurement data of fillet weld E9018-B3($\phi 4.0$) fillet weld					
试样编号	焊脚尺寸 1/ mm	焊脚尺寸 2 /mm	焊脚差 /mm	角焊缝规格 /mm	凸度 /mm
立焊位置	9.2	8.0	1.2	6.4	1.2
仰焊位置	8.9	8.0	0.9	7.2	1.2

关键工艺参数,以优化焊接质量和效率。同时,考虑了母材的化学成分、物理性能、热导率等特性,以及焊接位置(如平焊、立焊、横焊、仰焊等)对焊接过程的影响,综合这些因素制定了科学合理的焊接参数,用于后续的焊接评定。详细的焊接工艺参数如表 3 所示。

3 加热要求

3.1 预热

针对铬钼钢施焊,预热温度应控制在 200~250 $^{\circ}\text{C}$,道间温度应控制在 200~300 $^{\circ}\text{C}$ 。预热温度应保持至焊缝焊接完毕,且所有焊道均应达到相应

表3 焊接工艺参数表

Table 3 Welding process parameters

焊接材料	规格/mm	电流/A	电压/V	焊接速度/(cm·min ⁻¹)	热输入/(kJ·cm ⁻¹)	保护气体流量/(L·min ⁻¹)	层间温度/℃
ER90S-B3	∅1.6	180~200	10~18	10~12	≤15	7~20	200~300
E9018-B3	∅4.0	160~180	22~30	15~20	≤30	—	
F9P2-EB3-B3	∅4.0	500~650	28~34	35~42	≤35	—	

预热温度要求。在预热中断前和在焊件冷却至最低预热温度前,必须进行后热或中间热处理。预热的加热范围应以焊缝为中心基准,具体的加热宽度根据接头厚度确定。

3.2 后热

焊接后对焊件的全部(或局部)进行加热或保温,使其缓冷的工艺措施为后热处理。对于铬钼钢材料,后热温度需要加热到250~400℃,并保温至少2 h以去除氢^[7]。整个后热过程不能中断,且不得损害母材及焊缝金属的性能和影响焊缝质量,并根据焊接工艺要求在整个保温时间内每1小时进行测温一次,对整个后热过程进行温度监控。

3.3 消应力热处理

铬钼钢焊后容易产生淬硬组织且接头热影响区易形成裂纹倾向高的马氏体组织^[8],通过消应力热处理,可改善焊缝及热影响区的组织,降低焊接残余应力,减少裂纹产生的可能性,获得性能优异的接头焊缝。因此铬钼钢焊材焊后需及时进行消应力热处理,热处理保温温度范围为690℃±15℃。

4 结果与讨论

采用固化的焊接参数对三种焊材开展力学性能试验,分别采用V型对接坡口进行焊接,焊后进行24~24.5 h,690℃±15℃的消应力热处理,随后开展相关的短时和长时力学性能试验。

4.1 拉伸试验

拉伸试验用设备为微机控制电液伺服液压万能试验机(WAW-1000),开展室温、350℃、450℃、515℃、530℃不同温度下的熔敷金属拉伸试验,其对比结果如图3所示。通过分析可以看出,相同试验温度下,三种焊材熔敷金属的抗拉强度差异不大,随着试验温度增高,三种焊材的抗拉强度均呈下降趋势,这是由于在高温下,铬钼钢材料内的碳

元素容易析出形成脆性相,使得材料的拉伸性能下降。同时,随着温度升高,位错运动变得更加活跃,金属的变形抗力下降,强度随之降低^[9]。

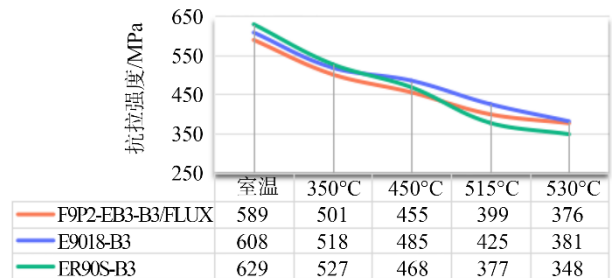


图3 不同温度下熔敷金属拉伸性能对比结果

Fig. 3 Comparison of tensile properties of deposited metals at different temperatures

4.2 冲击试验

冲击试验采用金属摆锤式样冲击试验机(ZBC-300A),按照AWS B4.0M进行试验。针对三种焊材的熔敷金属开展了-20℃和13℃下的冲击试验,试验结果见图4。结果表明,三种焊材熔敷金属的冲击功均随着试验温度的增高而增高,这是因为在较高的温度下,材料的塑性变形能力增强,韧性提高,高温下材料内部的应力更容易通过塑性变形来释放,而不是形成裂纹。其中针对ER90S-B3焊材,其熔敷金属冲击功在-20℃下≥200 J,较其他两种焊

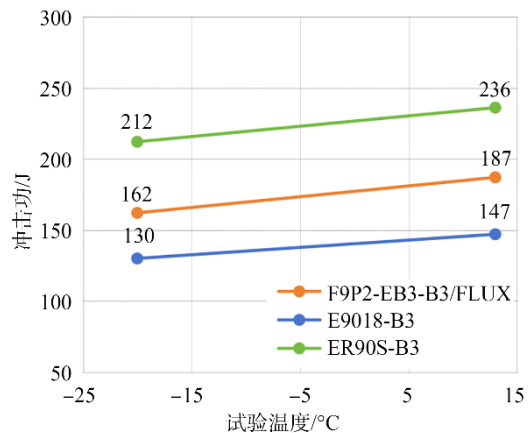


图4 焊材熔敷金属冲击性能结果

Fig. 4 Impact performance results of deposited metal

材更为优异。

4.3 夏比转变曲线

夏比转变曲线按 AWS B4.0M 进行试验, 选取至少 6 个温度点, 对三种焊材分别进行试验, 转变曲线包括吸收能量和侧向膨胀量两条曲线。吸收能量曲线结果见图 5, 侧向膨胀量曲线结果如图 6 所示。三种焊材的上平台冲击均 $>89 \text{ J}$, 侧向膨胀量 $>0.89 \text{ mm}$, 说明熔敷金属的抗断裂能力良好, 在冲击载荷下的塑性变形能力优异^[10]。

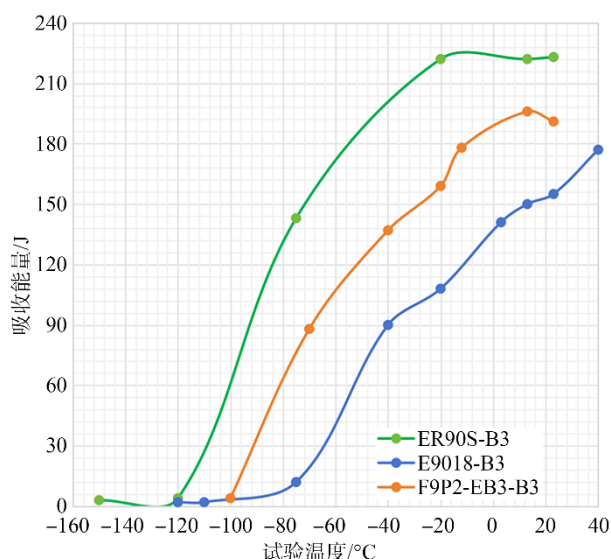


图5 吸收能量转变曲线

Fig. 5 Absorption energy transformation curve

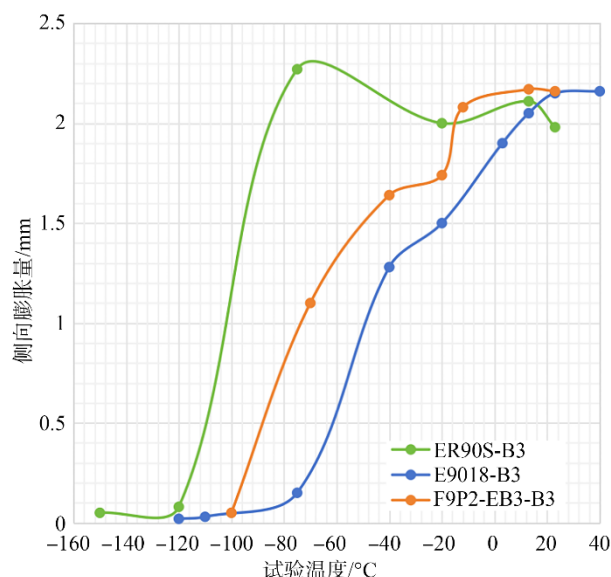


图6 侧向膨胀量转变曲线

Fig. 6 Lateral expansion volume transformation curve

4.4 硬度试验

按 ASTM E384 对接三种焊接接头进行维氏硬度试验, 试样状态为焊态和热处理态。硬度测定的部位为试板 T/2 处, 包括两侧母材、热影响区和熔敷金属。试验结果如图 7 所示, 可以看出, 经过 24~24.5 h 的消应力热处理, 三种焊材的焊缝熔敷金属、热影响区处的硬度有明显下降, 并且相对稳定, 波动值不大, 说明通过合适的热处理制度, 可将铬钼钢焊材内部的应力得到释放, 改变组织结构, 使得硬度下降。

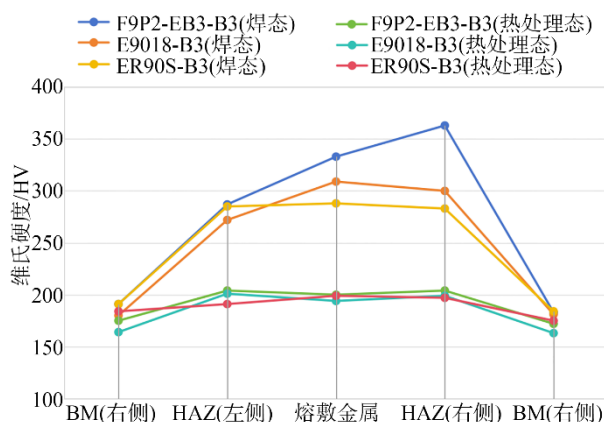


图7 焊缝接头硬度试验结果

Fig. 7 Hardness test results of weld joint

4.5 高温持久试验

针对三种焊材, 分别采用铬钼钢 2.25Cr-1Mo 作为试板母材, 采用三种焊接工艺方法进行对接焊, 按照 ASEM E139 标准, 焊接接头在 530 °C 下的开展持久性能试验, 124 MPa 应力下的试样最长时间超过 10 000 h。与 ASME 规范第 5 分册给出的 2.25Cr1Mo 材料在 550 °C 下的最小断裂曲线相比, 在相同断裂时间下, 试验断裂应力远高于 ASME 规范给出的断裂应力, 说明采用本焊接工艺制造的接头具有较好的持久性能。图 8 给出了三种焊材接头的断裂应力和断裂时间的拟合曲线, 拟合公式的相关系数 R^2 均 >0.98 , 拟合效果良好。

5 结论

通过系统开展 E9018-B3、ER90S-B3 及 F9P2-EB3-B3/FLUX 三种新型焊材的力学性能研究, 结合其在第四代核电蒸汽发生器制造中的工程实践

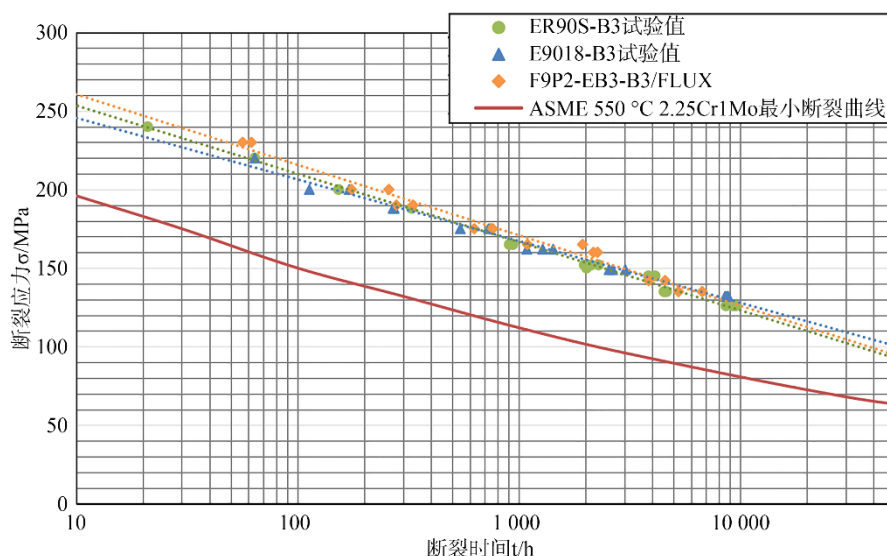


图8 三种焊材接头高温持久断裂应力与断裂时间的关系

Fig. 8 Relationship between high temperature sustained fracture stress and fracture time of three kinds of welded joints

验证,可得出以下结论:

(1)焊接工艺性能方面,三种焊材在电弧稳定性、熔池形态控制及冶金反应等关键工艺参数上表现优异焊缝表面连续均匀且内部无气孔、夹渣等缺陷。通过无损检测及焊接工艺性试验验证,表明其具有优异的焊接可靠性和工艺适用性,能够满足核电设备对焊接质量的严格要求。

(2)三种焊材熔敷金属和焊接接头的短时性能结果优异,其中室温/高温抗拉强度、冲击性能和硬度等关键力学性能指标均满足设计要求,并有一定强度裕量,表明焊接接头在承受短期高负荷或者冲击载荷时有优异的力学性能,能够满足核电设备在极端工况下的使用需求。

(3)三种焊材的高温持久断裂应力-时间曲线高于 ASME 标准曲线,表明焊接接头在高温环境下具有长期稳定性和可靠性,能够确保核电设备在高温高压工况下的安全可靠运行。

(4)工程应用实践表明,采用该系列焊材制造的第四代核电蒸汽发生器关键焊缝已通过 ASME III 卷 NCA 分卷认证,累计完成主要纵/环缝焊接约 1120 条,最终无损检测一次合格率达 100%。设备已投入服役并稳定运行,焊缝区域未出现任何应力腐蚀或蠕变损伤迹象,充分验证了焊接接头的长期服役可靠性。

本研究为第四代核电站关键设备焊接材料的

选择提供了重要技术依据,这三种焊材可推广应用于同类材质产品的焊接制造,为核电装备的国产化提供了重要的技术支撑。

参考文献:

- [1] 张建晓,雷万庆,牛庆伟,等.窄间隙埋弧焊在厚壁加氢反应器中的应用[J].电焊机,2006,36(10):63-66.
ZHANG J X, LEI W Q, NIU Q W, et al. Application of narrow gap welding technique in thick-wall hydrogenation reactor [J]. Electric Welding Machine, 2006, 36 (10):63-66.
- [2] 张志强,高凤琴,张海增,等.钢结构焊接裂纹的产生机理及防治措施[J].焊接技术,2024,53(09):15-18.
ZHANG Z Q, GAO F Q, ZHANG H Z, et al. Mechanism and prevention measures of welding cracks in steel structures [J]. Welding Technology, 2024, 53(09): 15-18.
- [3] 但军,李恩,蒋宇晨,等.CFR600型示范快堆蒸汽发生器关键焊接技术[J].东方电气评论,2023,37(02):27-30.
DAN J, LI E, JIANG Y C, et al. Key Welding Technology of CFR600 Demonstration Fast Breeder Reactor Steam Generator [J]. Dongfang Electric Review, 2023, 37(02):27-30.
- [4] 唐杨兵,李可心,王刚,等.铬钼钢压力容器设计制造问题分析[J].现代制造技术与装备,2024,60(07):94-96.
TANG Y B, LI K X, WANG G, et al. Analysis of Problems in Design and Manufacture of Chrome Molybde