

核电站钢衬里埋弧焊焊材复验技术分析

曹杰, 邓克剑, 周玉东, 李敏

(中国核工业二四建设有限公司, 山东 烟台 265100)

摘要:核电焊材种类繁多,焊条、焊丝等验收要求各不相同,焊材验收由外部单位全程监管。焊材复验的焊接工艺复杂,检验要求高,极易造成检验过程不合格,影响核电建造工期。重点分析埋弧焊焊剂和焊丝(SJ14HR+H08MnHR)的进场验收事项,对取样数量与方法、外观和尺寸检验、拉伸性能、冲击性能、化学成分等进行试验研究,为压水堆核电站焊材复验提供相关经验。

关键词:焊材复验;外观检验;尺寸检验;性能检测

中图分类号:TG423

文献标识码:A

文章编号:1672-1152(2024)07-0049-03

0 引言

漳州核电华龙一号堆型采用“能动和非能动相结合”的安全设计理念,使用大容积双层安全壳,更好地实现了对放射性物质的密封。安全壳钢衬里是防止放射性物质向环境释放的最后一道屏障,是薄壁构件。安全壳钢衬里属于核安全 2 级设备,质保等级 QA1 级,抗震类别 I 类,钢板间的连接以焊接为主,对焊接质量要求高。为了保证生产节点,常采用 SAW 焊接方法进行底板、筒体等部位的拼板生产。

焊接材料对产品的焊接质量起着决定性作用,目前,对于埋弧焊焊材复验的研究文献比较少^[1-2]。加强焊材复验的过程管控,正确执行焊材的外观进场验收,执行正确的性能复验标准和检验方法,可保证焊材复验结果的正确性,从而确保实体焊接质量,打造精品华龙工程^[3-4]。

1 取样数量和方法

1.1 焊剂取样数量和方法

厂家按照采购技术规格书或甲方规定生产标准,在生产周期内,采用相同原材料(如熔盐、有机物、活性气体等物质)进行生产、供货的同一规格焊剂。

随机抽取不少于 6 袋的有质量证明书的合格产品。每袋中随机选取一定数量的焊剂,在容量不小于 10 kg 的仪器中混合均匀,采用四分法抽取不少于 5 kg 的焊剂,进行性能验证,剩下的焊剂用于外观和尺寸检测。

将取样后的焊剂放在废旧焊剂袋中保存,对于重新储存焊剂的袋子要重新进行重要信息标识(包括制造厂名称、焊剂牌号、焊剂型号、生产及验收执行标准、炉批号、生产日期、规格(mm)、焊剂净重量等信息)。

1.2 焊丝取样数量和方法

厂家按照采购技术规格书或甲方规定生产标准,

在生产周期内,采用同一炉批号材料,生产出同一批号的焊丝。

在供货的同一炉批号焊丝中抽取总数的 3%,且外包装不少于两盘或卷的产品,进行外观和尺寸、性能检测。

2 外观和尺寸检验

埋弧焊用碳钢焊剂 SJ14HR、碳钢焊丝 H08MnHR 经采购进场后,由质检员、技术员、仓库保管员三方共同进行相关项目的检查,包括质量证明书、焊材外包装、焊材外表面、几何尺寸和公差等信息。

2.1 焊材外包装

进场的焊材质量证明书各项信息均符合采购技术条件,焊材外包装检查情况如表 1 所示。

表 1 外观检验

项目	检查内容	检查结果
焊材外包装	是否完好	√
	包装是否完整	√
	包装是否干燥	√
	识别标识清晰、牢固	√
外包装信息和质量证明书是否相符	牌号	√
	批号	√
	数量	√
	规格	√

2.2 几何尺寸和公差

对于厂家生产、供货的埋弧焊用碳钢焊剂 SJ14HR、碳钢焊丝 H08MnHR,每批产品进场后需要进行外观目视检验,检查结果如表 2、表 3 所示,焊丝线径如表 4 所示。

3 性能检验

开启焊材复验质量计划后,进行取样见证,将供焊接的不少于 5 kg 焊剂从一级焊材库中领出,放入二级焊材库保存,直至焊接时才领出。埋弧焊焊丝和焊

收稿日期:2024-04-22

第一作者简介:曹杰(1994—),男,陕西西安人,毕业于西安石油大学,硕士研究生,工程师,研究方向为设备成套化与控制技术研究、智能控制与故障诊断、新工艺研究推广。

表 2 焊剂检测

检测项目	检测方法	检测结果
外观	直接目视检测	焊剂颗粒均匀,干燥、颜色纯正
颗粒度	过筛法	< 60 目,质量占比规范值≤5%,质量占比实测值 0.09%
		> 10 目,质量占比规范值≤2%,质量占比实测值 0.21%
机械夹杂物质量分数	目视法挑选机械夹杂物	规范值 < 0.30%,实测值 0.05%
含水质量分数 /%		规范值 < 0.10,实测值 < 0.015
碱度 R		规范值 ≥ 2,实测值 2.6

注:1.直接目视法:检验人员使用肉眼直接(或者借助 5 倍放大镜)检测,与被检测焊材之间保持不断光路。该法适用于检测埋弧焊焊剂 SJ14HR、埋弧焊焊丝 H08MnHR。
2.碱度检测公式 $R = [x(\text{CaO}) + x(\text{MgO}) + x(\text{BaO}) + x(\text{CaF}_2) + x(\text{Na}_2\text{O}) + x(\text{K}_2\text{O}) + 0.5x(\text{MnO} + \text{FeO})] / [x(\text{SiO}_2) + 0.5x(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)]$
3.是否进行含水量和碱度检测,可以根据实际要求确定。

表 3 焊丝检测

带盘质量 /kg	椭圆度 /mm	外观质量	包装标识	化学成分结果	综合评定结果
20.62	0.007	合格	合格	合格	合格
20.64	0.007	合格	合格	合格	合格
20.63	0.007	合格	合格	合格	合格
20.62	0.006	合格	合格	合格	合格
20.61	0.006	合格	合格	合格	合格
20.64	0.006	合格	合格	合格	合格
20.66	0.006	合格	合格	合格	合格
20.67	0.005	合格	合格	合格	合格
20.64	0.005	合格	合格	合格	合格
20.62	0.005	合格	合格	合格	合格

注:1.目视检测时,焊丝表面光滑、无锈蚀。发现微小缺陷,使用细砂纸或锉刀对表面缺陷进行修磨,直至直接目视合格。对于修磨区域需要进行二次测量,确定缺陷的深度。
2.修磨后的焊丝必须光滑、无毛刺,焊接过程中在送丝装置中均匀送丝,不发生卡顿现象,保证焊接质量不受影响。

表 4 焊丝线径

带盘质量 /kg	直径公差(±0.04 mm)		
	公差 1	公差 2	公差 3
20.62	合格	合格	合格
20.64	合格	合格	合格
20.63	合格	合格	合格
20.62	合格	合格	合格
20.61	合格	合格	合格
20.64	合格	合格	合格
20.66	合格	合格	合格
20.67	合格	合格	合格
20.64	合格	合格	合格
20.62	合格	合格	合格

注:线性测量方法:使用螺旋测微器等工具(准确度 0.01 mm),在焊丝任意横截面的两个垂直方向测量,测量位置不少于 3 处。

剂需要配套使用,对应炉批号与质量证明书相匹配,不得混用。

3.1 焊接接头确定

“+”号表示从右往左实施焊接;“-”号表示从左往右实施焊接。焊接过程中,每条焊道的焊接方向都需

要改变,如图 1 所示,其中道数及分布情况仅表示焊道为多道焊,道数根据实际情况而定^[5]。试板的焊接在平焊位置进行。

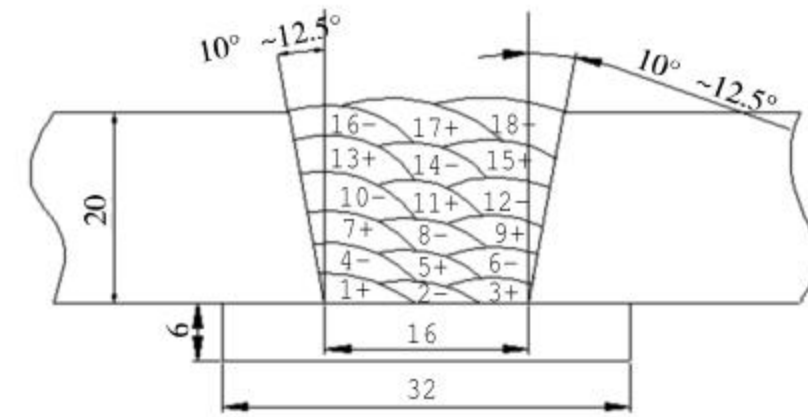


图 1 焊接接头示意图(未标单位:mm)

3.2 试件焊接

根据“华龙一号”钢衬里焊接规范要求,通过大量埋弧焊的工艺试验,研究埋弧焊工艺中电流、电压等焊接参数对产品质量的影响。借助工艺参数选择及匹配验证,在最佳的工艺参数范围内,进行焊材复验试件焊接。

在焊接过程中,清理完每一道焊缝的焊渣后,焊工、技术员需要进行目视自检。对于发现的夹渣、未熔合等缺陷,在完全清除后才能进行施焊。

具体焊接参数如表 5 所示。焊接试件示意图如图 2 所示。

表 5 焊接参数

层数	焊接方法	焊接材料	材料规格 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	电源极性
打底层	SAW	H08MnHR+ SJ14HR	Φ1.6+0.280-2.00	300~370	28~35	DC+
填充层	SAW	H08MnHR+ SJ14HR	Φ1.6+0.280-2.00	300~370	28~35	DC+
盖面层	SAW	H08MnHR+ SJ14HR	Φ1.6+0.280-2.00	300~370	28~35	DC+

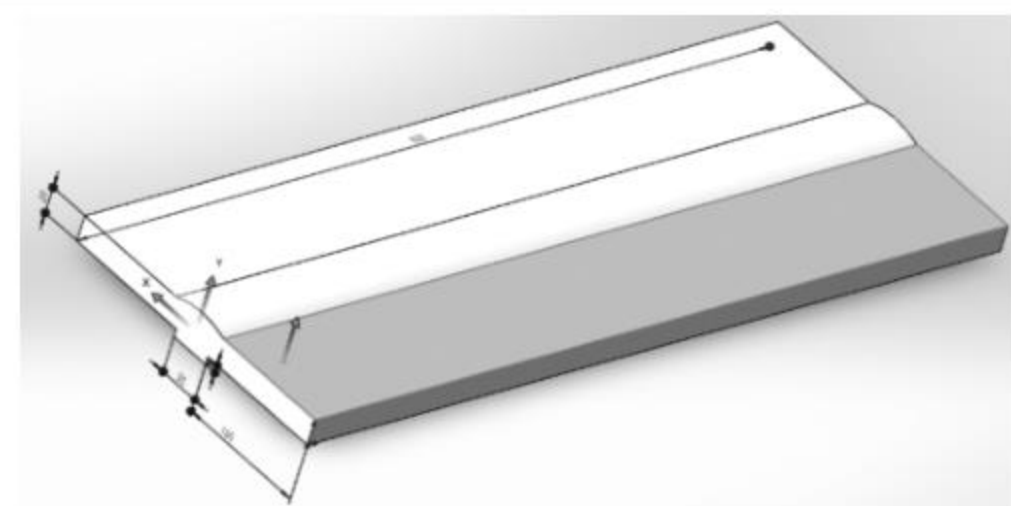


图 2 焊接试件

3.3 焊后无损检测

焊材复验试件焊接完成后,先进行目视检测,合格后通过机加工去除垫板,保证试板背面平整无凹坑等缺陷,然后进行射线检测,结果如表 6 所示。

表 6 无损检测结果

检测方式	检测项目	测试结果	评片标准	单项结果
VT	检测长度 /mm	600	1 级	√
	焊缝宽度 /mm	19~22		√
	焊缝余高 /mm	1.1~1.8		√
	错边量 /mm	0.5~1.3		√
	缺陷描述	未见不允许缺陷		√
RT	圆形缺陷 /mm	< 2.5	1 级	√
	条形缺陷 /mm	< 6.6		√

3.4 理化性能检测

3.4.1 拉伸试验

H08MnHR+SJ14HR 焊材用于钢衬里拼板工艺,需要进行熔敷金属室温+高温拉伸试验。室温试验温度范围一般为 10~35℃,高温试验温度为 350℃。

在熔敷金属试样的中心部位取纵向拉伸试件,如图 3 所示,进行机械加工,试样的平行段长度全部从焊缝金属区域下料获取。加工后,对拉伸试件接头横截面分别进行宏观金相侵蚀,观察组织,保证试件取样在焊缝位置。拉伸试验结果如表 7 所示。



图 3 拉伸试样加工图

表 7 拉伸试验

试验项目	检测值	单项判定
$R_{p0.2}/\text{MPa}$	407	合格
$R_{p0.2}(350\text{℃})/\text{MPa}$	183	合格
R_m/MPa	464	合格
A/%	29	合格
$R_m \times A$	13 456	合格

3.4.2 金属夏比(V型缺口)冲击试验

H08MnHR+SJ14HR 焊材用于钢衬里拼板工艺,应进行熔敷金属的冲击试验。

采用 10 mm × 10 mm × 55 mm 标准夏比(V型缺口)冲击试样,一次试验由 3 个试样组成,3 个试样并排截取。试样加工完成后,焊缝金属冲击试样焊缝轴线应位于试样平行段长度部分的中部;采用标定合格的工器具对加工缺口进行测量,以保证缺口根部处没有影响吸收能量的加工痕迹。冲击试样加工图如图 4 所示。



图 4 冲击试样加工图

采用标准冲击能量为 $300\text{ J} \pm 10\text{ J}$ 的试验机,冲击温度采用 0℃和 -30℃。

采用液体介质冷却试件,液体介质温度应在规定温度 $\pm 1\text{℃}$ 以内,达到冲击温度后,标准试件在该介质中至少存放 5 min。冷却装置如图 5 所示。

试验采用摆锤单次冲击的方式将标准试件断裂,标准试件从低温液体介质中转移至仪器冲击时间不应超过 5 s,冲击试验结果如表 8 所示。

3.4.3 化学分析

熔敷金属化学成分分析时间在平焊位置多层多



图 5 冷却装置

表 8 冲击试验

试验项目	冲击吸收功(kV2)检测结果 /J		单项判定
	检测值	平均值	
0℃熔敷金属冲击试验	194.0、202.0、208.0	201.5	合格
-30℃熔敷金属冲击试验	186.0、202.0、168.0	185.5	合格

道堆焊制成,堆焊的熔敷金属每层 3 道,共 4 层高,堆焊试件的熔敷金属长度必须大于 125 mm。堆焊的母材表面干净无油渍,打磨光滑。堆焊化学分析加工图如图 6 所示。熔敷金属部分化学成分如表 9 所示。

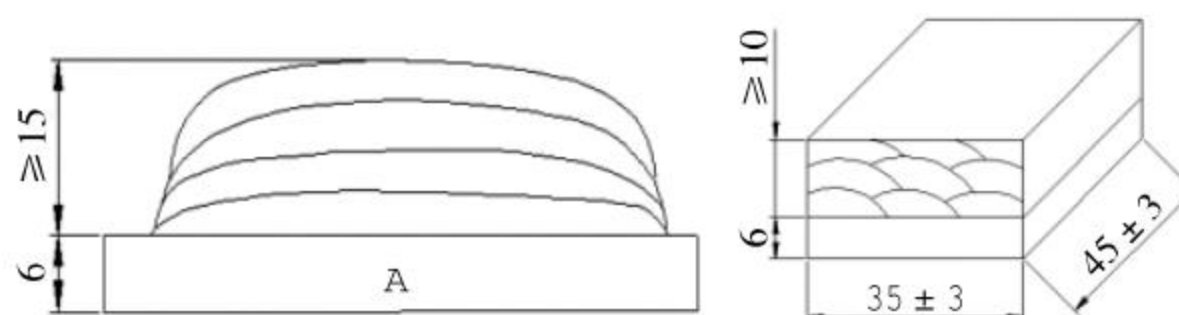


图 6 堆焊化学分析加工图(单位:mm)

表 9 部分化学成分结果

检测项目	检测值 /%	单项判定
w(P)	0.021	合格
w(S)	0.014	合格

4 结论

借助理弧焊焊丝、焊剂(H08MnHR+SJ14HR)复验过程,积累核电建造焊材复验经验,选用合格的焊接材料,可减少焊接缺陷问题。此经验有助于加快我国核电建造的步伐,可促进我国焊接产业快速向高效化的趋势发展。

参考文献

- [1] 能源行业核电标准委员会.压水堆核电厂核岛机械设备焊接规范第 2 部分:焊接填充材料验收:NB/T 20002.2—2013[S].2013.
- [2] 能源行业核电标准委员会.压水堆核电厂用焊接材料第 9 部分 1、2、3 级设备埋弧焊用碳钢焊丝和焊剂:NB/T 20009.9—2013[S].2013.
- [3] 李鹏明.高性能埋弧烧结焊剂研制与应用[D].沈阳:东北大学,2015.
- [4] 范阳阳,缪兴平,楚成刚.C 含量对 2.25Cr-1Mo-0.25V 埋弧焊焊缝金属性能的影响[J].焊接,2020(12):30-34.
- [5] 曹杰,邓克剑,李敏,等.核电站钢结构焊接仿真模拟进展分析[J].山西冶金,2023,46(4):76-78.

(编辑:武倩倩)

(下转第 54 页)

制。320 ~ 370 °C 回火温度正好处于碳钢第一类回火脆性范围内(低温回火脆性 250 ~ 400 °C)。

2)PC 钢棒表面的擦划伤也是本次导致延迟断裂的主要原因。现场发现,几乎所有的断口均呈现放射状,放射条纹收敛于表面裂纹源处,而表面裂纹源处均存在擦伤,折叠,凹坑等缺陷,这些缺陷均为下游企业生产过程中质量把控不严格所产生。

3)断裂部位存在 2.0 级硅酸盐夹杂物,该类夹杂物主要为保护渣成分,助推 PC 钢棒的延迟断裂。

4)组织中存在带状铁素体组织,带状铁素体的存在会使金属的力学性能呈各向异性,沿带状组织的方向明显优于其垂直方向,深加工时易于从交界处开裂。这种铁素体带产生的原因是感应加热时输入热能不足,导致钢棒心部区域处于 γ/α 两相区温度范围,在随后快速冷却时,奥氏体向马氏体转变,未奥氏体化的带状铁素体被保留下来,最终形成回火态的铁素体 + 回火屈氏体组织。

5 改进措施

1)PC 钢棒深加工过程中,在线回火温度严格按照 400 ~ 450 °C 控制,完全避开碳钢的第一类回火脆性温度范围。淬火工序必须保证组织完全奥氏体化,

加热温度以及加热时间严格按照工艺方案控制,杜绝产生带状铁素体组织。

2)注重盘条及 PC 钢棒运输过程中对表面的保护工作,避免盘条及钢棒表面不必要的刮、蹭伤等外伤。

3)根据钢中主要夹杂物来源情况,要减少钢中夹杂物、提高钢的纯净度。防止浇注过程钢包下渣,提高钢包的自开率,提高连铸中间包耐材,包括喷涂料、挡渣墙、塞棒和水口等质量。结晶器水口插入深度要合适,液面自动控制,浇注状态为稳液面、慢拉速、恒拉速浇注,防止液面翻滚厉害造成卷渣。

6 结语

经过一系列的检验分析,找出 PC 钢棒延迟断裂的原因,并对后续的母材生产及下游 PC 钢棒的深加工工艺提出改进措施,进一步消除 PC 钢棒延迟断裂现象,提高陕钢集团产品竞争力,更好地服务下游客户,为西北地区经济发展作出贡献。

参考文献

- [1] 朱伏先,李艳梅,吴颖.PC 钢棒的延迟断裂及其对策[J].金属制品,2003,29(1):6-9.
- [2] 黄悦,钟凡,孙建平.PC 钢棒的延迟断裂及其原因分析[J].南方金属,2006(153):35-38.

(编辑:郭萍茹)

Analysis of Causes of Delayed Fracture in 30MnSi Pre stressed PC Steel Bars and Improvement Measures

Fan Baohua, Huang Peng, Yu Boyang

(Shaanxi Iron and Steel Group Industrial Innovation Research Institute, Hanzhong Shaanxi 723000, China)

Abstract: In response to the problem of delayed fracture of prestressed PC steel bars produced by downstream customers using 30MnSi wire rods during storage, transportation, and other processes, the causes were analyzed. The delayed fracture of PC steel bars and 30MnSi wire rods were studied, and the chemical composition, metallographic structure, macroscopic morphology of fracture surface, and non-metallic inclusions of prestressed PC steel bars were detected using a direct reading spectrometer and optical microscope. The microscopic morphology of the delayed fracture surface was observed using a scanning electron microscope, and the energy spectrum analysis of steel inclusions was conducted. After in-depth research, it was found that the main reason for the delayed fracture of PC steel bars is the presence of large levels of C-type inclusions inside the steel, and the secondary reason is the presence of martensite in the microstructure. By analyzing the causes and optimizing the heat treatment processes for smelting, continuous casting, and downstream deep processing, the problem of delayed fracture of PC steel bars in downstream deep processing products has been effectively solved.

Key words: PC steel rod; delayed fracture; internal inclusions and abnormal tissues; heat treatment process

(上接第 51 页)

Analysis of Retesting Technology for Submerged Arc Welding Materials in Steel Lining of Nuclear Power Plants

Cao Jie, Deng Kejian, Zhou Yudong, Li Min

(China Nuclear Industry 24 Construction Co., Ltd., Yantai Shandong 265100, China)

Abstract: There are various types of nuclear power welding materials, and the acceptance requirements for welding rods, wires, etc. are different. The acceptance of welding materials is fully supervised by external units. The welding process for re-inspection of welding materials is complex and requires high inspection requirements, which can easily lead to unqualified inspection processes and affect the construction period of nuclear power. Focus on analyzing the entry acceptance issues of submerged arc welding flux and welding wire (SJ14HR+H08MnHR), conduct experimental research on sampling quantity and method, appearance and size inspection, tensile performance, impact performance, chemical composition, etc., and provide relevant experience for the re-inspection of welding materials in pressurized water reactor nuclear power plants.

Key words: welding material re-inspection; visual inspection; dimensional inspection; performance testing