

核电钢制安全壳埋弧横焊工艺研究

孙健¹, 邓刚², 王建明², 曾凡勇², 程茁³, 刘征²

1. 中核辽宁核电有限公司 辽宁葫芦岛 125199

2. 中国核工业第二二建设有限公司 湖北武汉 430050

3. 中国核电工程有限公司 北京 100840

摘要: 核电钢制安全壳筒体环缝焊接量较大, 采用埋弧横焊工艺可有效提升焊接效率、保证焊接质量。针对42mm厚度的SA-738Gr.B钢板材开展了埋弧横焊工艺研究。结果表明: 相比于K形坡口, 采用X形坡口进行打底焊接更容易避免气孔和夹渣缺陷, 分析认为采用气体保护焊打底+埋弧焊填充的焊接方式可有效保证打底焊接质量; 采用不同热输入大小的焊接参数进行了埋弧横焊工艺试验, 当热输入太小时, 焊缝成形不良且容易产生未熔合缺陷; 对不同热输入下的焊接接头进行了冲击初度试验和硬度检测, 结果均满足标准要求。通过本项研究, 证明了钢制安全壳埋弧焊焊接质量可靠, 焊接接头性能满足标准要求, 为核电现场新工艺的推广应用提供了一定的指导。

关键词: 钢制安全壳; 埋弧横焊; 焊接工艺; 接头性能

Submerged arc horizontal position welding technology for steel containment vessel of nuclear power plant

SUN Jian¹, DENG Gang², WANG Jianming², ZENG Fanyong², CHENG Zhuo³, LIU Zheng²

1.CNNP Liaoning Nuclear Power Co., Ltd., Huludao 125199, Liaoning, China

2.China Nuclear Industry 22ND Construction Co., Ltd., Wuhan 430050, Hubei, China

3.China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China

Abstract: It is a large amount of welding in the ring seam of nuclear steel containment cylinder, and the welding efficiency and welding quality can be effectively improved by using the submerged arc transverse welding process. In this paper, the submerged arc horizontal welding process of SA-738Gr. B plate with 42mm thickness was studied. The results show that compared with K-type groove, it was easier to avoid porosity and slag inclusion defects by using X-type groove for bottom welding. The submerged arc horizontal welding process was tested with different heat input parameters. When the heat input is too small, the weld was poorly formed and easy to produce unfused defects. The impact toughness test and hardness test of welded joints under different heat input were carried out, and the test results meet the standard requirements. Through this study, it was proved that the submerged arc welding of steel containment is reliable and the welding joint performance meets the standard requirements, which provides some guidance for the popularization and application of the new technology in nuclear power field.

Keywords: steel containment vessel; submerged arc horizontal position welding; welding process; property of welding joint

1 序言

国内核电钢制安全壳筒体环缝的焊接以焊条电弧焊、半自动气体保护焊及自动气体保护焊为主^[1, 2]，而技能较好的焊条电弧焊、半自动气体保护焊焊工市场又比较紧缺，且培训的成本较大；另外，在实际焊接中易因焊工身体状况、心理情绪等因素而导致焊接质量不稳定。

当前，我国处于核电建设发展的快速时期，如果采用埋弧焊进行焊接，焊工只需要按照自己设定的焊接参数进行焊接，对焊接过程进行监控和调整焊接小车行走路线即可，操作简单，劳动强度低。埋弧横焊工艺本质为埋弧焊工艺，其在碳素钢、低合金钢等的焊接中已非常成熟，埋弧横焊电弧熔深和焊丝的熔覆效率均较高，具有焊缝质量高、劳动条件好、生产效率高等优点。埋弧横焊工艺已广泛应用于大型储罐环缝焊接，焊接工艺成熟^[3]。由于钢制安全壳环缝坡口规则，板厚较大，因此非常适合采用埋弧横焊工艺。

埋弧焊焊接操作工的培训周期相比焊条电弧焊高技能焊工培训周期至少要缩短半年，培训费用将大大降低，节省用工成本。传统依靠人工进行焊接生产的模式已不能适应未来核电建设发展的需求，大力推行高效自动焊接工艺的研究与应用成为未来核电制造发展趋势。本文针对某核电的钢制安全壳开展焊接工艺研究，为该技术在核电的推广应用奠定基础。

2 试验材料、设备及方法

2.1 试验材料

试验过程中，母材材质为SA-738Gr.B钢，供货状态为调质处理，经验收合格。母材化学成分及力学性能分别见表1、表2。

表1 SA-738Gr.B钢化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo
≤0.20	0.84~1.62	0.13~0.60	≤0.008	≤0.018	≤0.63	≤0.33
Cu	Cr	V	Ti	Vb	V+Nb	—
≤0.38	≤0.34	≤0.08	≤0.04	≤0.05	≤0.10	—

表2 SA-738Gr.B钢力学性能（MPa）

抗拉强度		屈服强度	
室温	150℃	室温	150℃
585~705	≥540	≥540	≥360

焊接材料为上海大西洋公司产品CHW-S62HRF/CHF102HRF，焊丝型号为EG，直径为2.4mm，焊剂型号为F9A5-EG-F3，粒度为10~60目，采购执行标准为NB/T 20009.37—2019《压水堆核电厂用焊接材料 第37部分：钢制安全壳用埋弧焊焊丝和焊剂》。熔敷金属化学成分和力学性能分别见表3、表4。

表3 熔敷金属化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Cu	Cr	V
要求值	≤0.17	1.25~2.25	≤0.80	≤0.030	≤0.030	0.70~1.10	0.40~0.65	≤0.35	—	—
实测值	0.064	1.572	0.235	0.002	0.008	1.041	0.499	0.015	0.073	0.004

表4 熔敷金属力学性能

项目	抗拉强度 /MPa		屈服强度 /MPa		断后伸长率 (%)		冲击吸收能量 /J
	室温	150℃	室温	150℃	室温	150℃	-45℃
要求值	620~735	≥540	≥540	≥360	≥20	—	≥54
实测值	695	659	639	612	24	18	76、93、106

2.2 试验设备

试验设备采用专用埋弧横焊设备，型号为YS-AGW-I，如图1所示。该焊接设备主要由行走机架、焊接电源、操作箱及焊剂自动循环回收系统等组成。焊接电源型号为林肯DC600。



图1 埋弧横焊设备

3 试验结果及分析

3.1 坡口形式及打底焊接工艺确定

埋弧焊接适合用于中厚及以上钢板焊接，为了

保证熔透及焊接质量，一般采用对称坡口焊接（K形坡口和X形坡口）。

钢制安全壳实际工程产品的厚度主要为36.5mm，设计坡口形式为K形坡口，坡口角度为45°（上坡口）。考虑到板厚较大，为了保证焊接质量，首先开展了不同坡口形式对焊接质量的影响试验，打底焊接工艺采用埋弧横焊工艺。

试验用试件厚度为42mm，材质为SA-738Gr.B钢。试验结果表明，采用K形坡口时，对于厚板结构埋弧横焊而言，因为打底焊（反面清根后打底）时根部较深，在整条焊缝上非常容易产生气孔缺陷（见图2）。即便是第一道填充焊缝，气孔缺陷仍然存在。分析认为，这是焊接保护不良造成的，因为坡口深度较深，焊剂无法顺畅进入待焊部位，导致保护效果不佳。另外，还有一个问题是容易产生夹渣，试验发现打底焊接完成后焊渣紧紧“咬”在母材上（见图3），分析认为还是因为板厚较大，且坡口角度较小，打底焊接完成后焊渣紧紧“咬”在母材上，焊渣与母材形成锐角，无法很好地铺展和浮出焊缝，需要人工使用打磨机进行打磨清理，耗时耗力。



a) 打底焊缝



b) 第一道填充焊缝

图2 焊缝气孔缺陷（42mm，K形）



图3 打底焊接后焊渣（42mm，K形）

考虑到埋弧焊枪对坡口底部的可达性，以及尽量减少焊缝填充量，参考其他行业常用的埋弧横焊坡口设计，最终坡口形式选择为X形坡口，坡口角度为60°（上坡口45°，下坡口15°）。因为下坡口角度的存在，采用X形坡口进行打底焊接时，焊

剂更容易到达焊缝，打底焊缝气孔缺陷得到消除，如图4、图5所示。但是为了保证打底焊接质量，一般组对需设置为零间隙，因此在焊接背面焊缝前，需采用碳弧气刨的方式进行清根，清根深度较深，因此容易造成反面打底坡口深度较深，且打底焊容易产生气孔和夹渣缺陷，这与采用K形坡口打底焊接时的情况一致（见图6）。



图4 打底焊缝成形（42mm，X形）



图5 焊缝横截面宏观金相（42mm，X形）

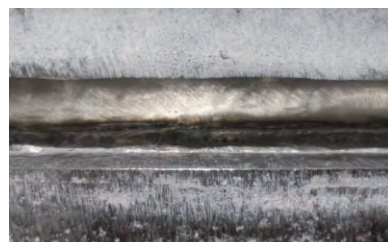


图6 反面清根后打底焊（42mm，X形）

通过以上分析，考虑到打底焊接的难易程度及打底焊接质量，优选X形坡口进行焊接。若采用X形坡口，需注意打底焊时控制组对间隙，当组对间隙较大时可采用在背面焊缝塞焊剂的方式进行处理，以防止气孔产生，且反面清根时尽量不要清理太深，否则容易造成反面打底焊缝质量不佳。

在实际工程焊接时，组对间隙总是难以保证完全均匀，且背面焊剂的铺置也会增加额外工作量和降低效率。为了降低因焊剂填充不均和焊后夹渣对打底焊接产生的不良影响，对比分析认为，可采用气体保护焊打底+埋弧焊填充的方式。气体保护焊是规格书允许采用的焊接方法，打底时采用与之匹配的ER90S-G焊丝进行焊接，打底焊焊缝可直接采用机械打磨清根，不仅可减少打磨工作量（无需考虑夹渣带来的影响），且避免了因碳弧气刨对母材造成增碳的影响。



图7 气体保护焊打底+填充第一道焊缝成形 (42mm, X形)

综上所述,为了保证打底焊缝质量和便于现场焊接,推荐采用X形(上45°,下15°)坡口,打底焊接采用气体保护焊打底+埋弧焊填充的方式进行焊接。

3.2 焊接工艺试验

采用厚度为42mm的SA738 Gr.B钢进行焊接工艺试验,焊接位置为横焊,坡口形式为X形(上坡口45°,下坡口15°)。

按照前期试验,当埋弧焊焊接电流<300A时,焊缝成形一般,焊缝容易出现未熔合缺陷;当埋弧焊焊接电流>450A时,焊缝金属容易下坠,外观成形较差。埋弧焊焊接参数见表5。

表5 埋弧焊焊接参数

序号	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 / (cm/min)	热输入 / (kJ/cm)	备注
1	300~320	26~28	45~50	10.40~10.75	小参数
2	360~380	28~30	55~60	11.00~11.40	适中
3	400~500	28~30	60~65	11.20~13.84	大参数

(1) 焊缝成形 在横焊过程中,焊缝成形是关键,尤其是盖面焊缝成形。影响焊缝成形的因素很多,主要包括焊接参数和焊工操作。焊接试验时选用具备丰富经验的焊接操作工进行焊接,因此主要考虑焊接参数对焊缝成形的影响。

采用小焊接参数焊接,当焊接电流太小时或与焊接速度不匹配时,焊道铺展不开,会造成局部余高较高或偏低,如图8所示。通过适当增加焊接电流,保证焊丝熔敷和铺展的一致性,可使焊缝更加平滑整齐。



图8 焊缝局部成形(电流较小,<300A)

盖面时,影响焊缝成形的不仅包括焊接参数,焊道与焊道之间的搭接也非常重要。通过优化焊接盖面参数(适当增加焊接速度或焊接电流,见图9),可获得较佳的焊缝成形,焊缝无明显较深凹

槽,焊缝余高可控制在0~3mm,焊缝平整,焊宽均匀,如图10所示。

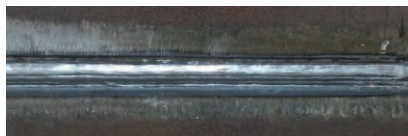
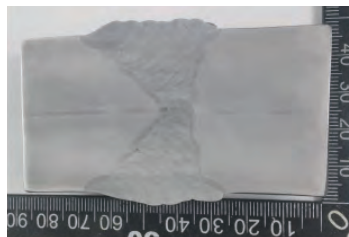


图9 焊缝局部成形(大电流,450A)

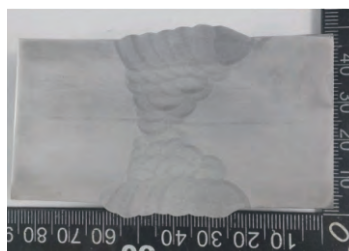


图10 焊缝成形较好

焊后采用超声波检测和宏观金相检测,当焊接电流较小时,焊缝容易出现未熔合缺陷,焊接接头横截面宏观金相如图11a所示,在焊缝根部和填充焊道间存在未熔合缺陷;而采用适中参数和大电流参数金相焊接,超声波检测和金相检测均合格,如图11b、c所示。其主要原因在于电流较小时熔透能力较差,对焊前焊缝的平整度要求较高,产生未熔合缺陷的概率更大。



a) 小电流



b) 大电流



c) 中间电流参数

图11 焊缝横截面金相

(2) 力学性能 考虑到不同热输入对焊缝及热影响区有一定影响,尤其是对热影响区有一定的组

织劣化作用，因此针对不同热输入条件下的接头进行了冲击和硬度试验，确保在最大热输入作用下接头的性能满足要求。

1) 冲击韧度。分别对小热输入、适中、大热输入3种条件下的接头进行了冲击试验，结果见表6。

表6 不同热输入下的接头冲击性能 (J)

项目	冲击吸收能量 (-18℃)			
	焊缝区	平均值	热影响区	平均值
大热输入	116、124、120	120	152、118、128	133
适中	220、158、200	193	134、144、134	137
小热输入	150、152、148	150	134、124、148	135

注：验收标准为冲击试验平均值 $\geq 54\text{J}$ ，只允许一个 $< 54\text{J}$ ，必须 $\geq 47\text{J}$ 。

由表6可看出，不同热输入时测试得到的焊缝区和热影响区冲击性能均满足标准要求，当热输入较低（小热输入和中间热输入）时，焊缝区的冲击吸收能量相对偏高，随着热输入的增加，接头冲击韧度并未发生很大的降低。

2) 硬度检测。分别对不同热输入下的接头开展了HV10硬度检测，硬度检测点位分布如图12所示。分别在距离焊缝表面2mm和清根焊缝处进行了硬度检测，检测点间距为1mm（焊缝区为2mm），测试标线横跨母材、热影响区和焊缝。

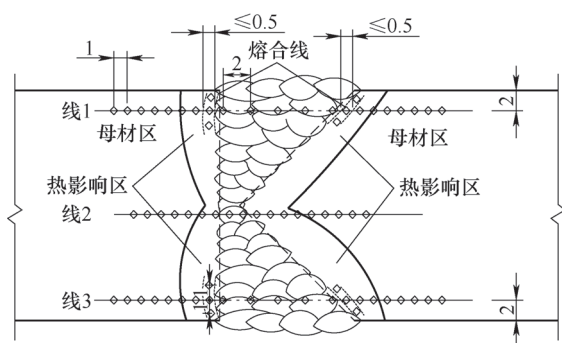
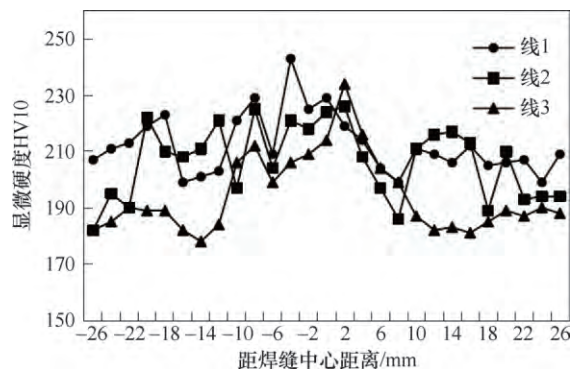


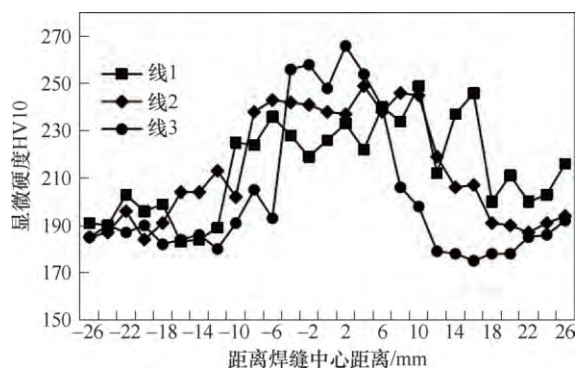
图12 硬度检测点位分布

检测得到的硬度如图13所示。由图13可看出，接头区域的硬度分布均呈现中间高、两边低的趋势，其中中间区域为焊缝区，往两边依次为热影响区和母材区。其中，母材区平均硬度为192HV10，不同热输入焊缝区最高硬度为266HV10，满足标准规定（ $< 380\text{HV10}$ ）。由此可证明，不同热输入条件下接头并未产生淬硬相，这与接头微观金相观察

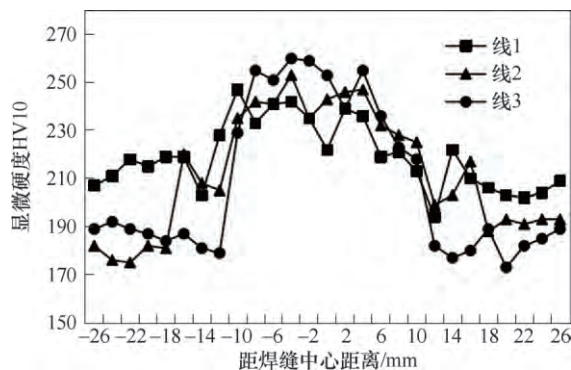
的结果一致。



a) 小热输入



b) 适中热输入



c) 大热输入

图13 不同热输入条件下接头硬度检测

3) 接头性能对比分析。为了对比不同焊接方法对接头性能的影响，针对不同焊接方法，分别对接头的抗拉强度、冲击性能进行了对比分析，具体见表7、表8。

由表7、表8可看出，采用埋弧焊、气体保护焊方法焊接的接头抗拉强度和冲击吸收能量均满足标准要求。采用埋弧焊时，接头焊缝区冲击吸收能量相比于气体保护焊的高，热影响区冲击性能则相反，埋弧焊接头的较低。分析认为，这是因为埋弧焊焊接时焊接电流较大，热影响范围较大。总体

上,采用埋弧焊接头的抗拉强度满足要求,接头热影响区冲击性能有所减小,但远高于标准要求。

表7 接头抗拉强度 (MPa)

序号	焊接方法	焊接位置	抗拉强度	验收标准
1	SAW	2G	室温: 669、666	≥585
			150℃: 563	≥540
2	GMAW	2G	室温: 684、685	≥585
			200℃: 546	≥540

表8 接头冲击性能 (J)

序号	焊接方法	焊接位置	冲击吸收能量 (−18℃)					
			母材		焊缝区		热影响区	
			实测值	平均值	实测值	平均值	实测值	平均值
1	SAW	2G	126	153	220	193	134	137
			194		158		144	
			140		200		134	
2	GMAW	2G	184	166	154	153	174	183
			162		150		176	
			152		154		198	

注:验收标准为冲击试验平均值≥54J,只允许一个<54J,但必须≥47J。

(上接第46页)

横梁的结构特点,分别对中箱体和边箱体进行结构分析,确定了合理的组装焊接顺序,保证了结构复杂的横梁块体成功制造。

2)钢横梁块体结构复杂,采用灵活方便的气体保护半自动焊方法焊接,通过焊接工艺评定试验确定了与母材匹配的焊接材料和焊接参数,保证了钢横梁的焊接质量。

3)通过对拼装胎架、锚箱精度控制、焊接变形控制等关键节点研究,应用钢锚头机械加工、小热输入焊接、火焰修整与焊接作业穿插进行等技术措施,确保钢横梁的外形尺寸符合标准和规范要求。

4)“先孔法”栓接技术的实施,大大提高了具有大量螺栓孔群的钢横梁块体间桥位拼装效率,保证了栓孔重合率。

参考文献:

[1] 李先友,石勇,王芳.四索一体式钢锚梁精确定位安装施工技术[J].中外公路,2021,41(S2):

4 结束语

本文针对核电钢制安全壳埋弧横焊的需求,开展了对应的焊接工艺研发,主要得出以下结论。

1)当板材厚度为42mm时,相比于K形坡口,采用X形坡口进行打底焊接更容易避免气孔和夹渣缺陷,建议可采用气体保护焊打底+埋弧焊填充的焊接方式。

2)不同热输入对焊缝成形及内部质量有重要影响,热输入较小时容易产生未熔合缺陷。不同热输入下接头的冲击吸收能量、硬度检测均满足标准要求。

参考文献:

[1] 王刚,胡广泽,曹中云,等.钢制安全壳熔化极气体保护自动焊接工艺研究[J].焊接,2018(5):31-35.
[2] 吕永飞,李广.自动焊技术在AP1000安全壳拼装过程中的应用研究[J].焊接技术,2017,46(8):55-58.
[3] 王毅敏.LNG储罐9Ni钢埋弧自动横焊焊接工艺研究[J].金属加工(热加工),2018(5):62-65.

MW 20240115

144-147.
[2] 宁朝新.沪通长江大桥主航道桥钢锚梁施工关键技术[J].铁道建筑,2019,59(11):22-25.
[3] 陈永华.斜拉桥集中式钢锚箱施工关键技术研究与应用[J].城市道桥与防洪,2018(8):23-24,211-214.
[4] 李峰,潘丽婷.港珠澳大桥青州航道桥钢锚箱外形尺寸控制[J].金属加工(热加工),2016(12):58-61.
[5] 全国钢标准化技术委员会.桥梁用结构钢:GB/T 714—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
[6] 中华人民共和国铁道部分.铁路钢桥制造规范:Q/CR 9211—2015[S].北京:中国铁道出版社,2015.
[7] 徐向军.桥梁钢结构焊接材料的应用与发展[J].金属加工(热加工),2016(8):23-24.
[8] 卢玉春,陆海.公路桥钢塔制造技术研究[J].公路,2015,60(3):75-78.

MW 20240112