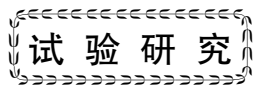


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2019.08.003



SA-335 P91 钢全位置窄间隙热丝 TIG 焊接工艺及接头性能研究

徐祥久, 张 宇, 黄 超, 柳云天

(哈尔滨锅炉厂有限责任公司 高效清洁燃煤电站锅炉国家重点实验室, 哈尔滨 150046)

摘 要:针对 SA-335 P91 钢大口径管环缝, 采用轨道式全位置热丝 TIG 焊机进行了窄间隙焊接。将整条环缝均分为 16 个区域, 根据不同位置熔池受力状态对各区的焊接工艺参数进行修正设置, 并对所获焊接接头的组织和性能进行了研究。所获焊缝和热影响区的组织均为回火马氏体, 焊接接头的拉伸、弯曲、冲击等力学性能均满足要求。结果表明, 窄间隙热丝 TIG 焊接工艺参数合理, 分区修正设置恰当, 能够满足 SA-335 P91 钢大口径管全位置焊接要求。

关键词: SA-335 P91 钢; 全位置; 窄间隙; 热丝 TIG; 焊接

中图分类号: TH142; TG444.74

文献标志码: A

Study on Welding Procedure and Joint Properties of SA-335 P91 Steel with All-position Narrow Gap Hot Wire TIG

Xu Xiangjiu, Zhang Yu, Huang Chao, Liu Yuntian

(Harbin Boiler Company Limited State Key Laboratory of Efficient & Clean Coal-fired Utility Boilers, Harbin 150046, China)

Abstract: For the circumferential seam of SA-335 P91 steel pipe with large diameter, narrow-gap welding was performed with the orbital type all-position hot wire TIG welding machine. The whole circumferential seam was divided into 16 zones. According to the stress condition of the molten pool at different locations, the welding parameters of each zone were revised. The microstructure and properties of the obtained welded joints were studied. The microstructures of the weld and heat affected zone were all tempered martensite, and the mechanical properties of the welded joint, such as tensile, bending and impact properties, meet the requirements. The results show that the process parameters of narrow-gap hot wire TIG welding were reasonable and the zoning correction settings were appropriate, which can meet the requirements of all-position welding of SA-335 P91 steel pipe with large diameter.

Key words: SA-335 P91 steel; all-position; narrow gap; hot wire TIG; welding

0 引言

由于 SA-335 P91 钢具有优良的高温蠕变性能和抗高温腐蚀性能, 被广泛应用于火力发电机组的集箱和管道中, 表现出优异的综合性能^[1-4]。经过不断的研究与探索, 目前人们已对 SA-335 P91 钢焊接性、焊接工艺以及焊接接头的性能有了比较全面和深入的认识。然

而, 关于 SA-335 P91 钢窄间隙全位置焊接的研究却十分罕见。在电站锅炉制造或锅炉部件现场安装过程中, 不可避免地存在一些需要进行全位置焊接的环缝, 目前此类焊缝大多采用焊条电弧焊的方法进行焊接^[5-8]。因此, 针对这种需全位置焊接的 SA-335 P91 钢厚壁大口径管, 采用全位置窄间隙热丝 TIG 焊接技术进行焊接工艺技术开发及接头性能研究具有重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验采用的 SA-335 P91 钢大口径管直径

356 mm,壁厚 55 mm,其化学成分与力学性能均满足 ASME 第Ⅱ卷 A 篇 SA-335 P91 的要求。焊接材料为 ER90S-B9 焊丝(符合 ASME 第Ⅱ卷 C 篇 SFA-5.28 要求),焊丝直径 $\varnothing 1.2\text{ mm}$,其具体化学成分见表 1。焊接保护气体为纯氩。

表 1 试验用 ER90S-B9 焊丝化学成分

元素	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu	Nb	N
数值	0.11	0.52	0.20	0.008	0.004	0.44	8.19	0.89	0.19	0.032	0.03	0.04	0.038

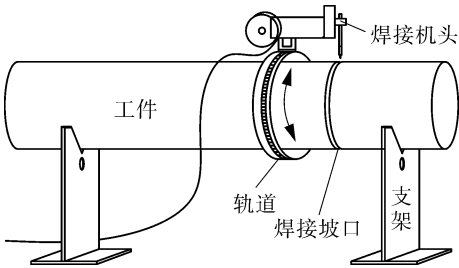
1.2 方法与设备

采用全位置窄间隙热丝 TIG 焊接方法,将 SA-335 P91 钢大口径管进行水平固定装配,焊接过程中工件不转动,采用专用全位置窄间隙热丝 TIG 焊机,利用焊接机头沿固定轨道进行 $\pm 360^\circ$ 的往复运动,实现整条环缝的多层单道全位置窄间隙焊接(见图 1(a))。图 1(b)为试验焊接接头所采用的窄间隙焊接坡口形式,为保证根部焊缝质量,装配时应严格控制错边量和装配间隙均不超过 0.5 mm。

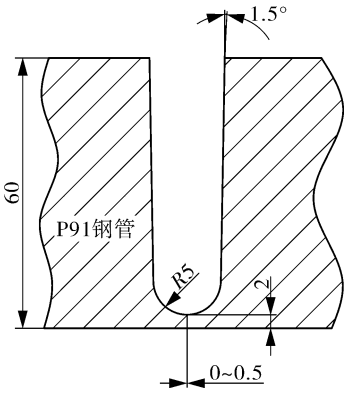
焊接过程时,每层只焊接 1 道,通过钨极的摆动保证坡口侧壁熔合。采用脉冲焊接技术,控制焊接热输入在较低的范围。前两层焊接时,需在大口径管内部进行充氩气保护,防止焊接接头背面的焊缝金属氧化。另外,首层焊接时需实现单面焊双面成形;面层焊接时需增加焊枪摆动功能,保证最终焊缝成形满足要求。通过分区段工艺参数设定与修正,克服重力对焊接过程的不利影响,保证在整个圆周方向不同位置焊接时,均能获得理想的熔池状态和焊缝成形。具体焊接工艺参数见表 2。

由于重力的作用,全位置焊接时,在 SA-335 P91 钢管圆周方向不同位置,焊接熔池的受力状态是不断变化的^[9-10]。为了保证每一个位置均可获得优良的焊缝,将全位置环缝等分为 16 个区域,图 2

中仅示出顺时针方向,逆时针方向与其原理相同。根据不同位置的熔池受力状态和工艺焊接性,对焊接工艺参数进行适当修正,表 3 列出焊接时不同位置峰值电流、电弧电压和送丝速度的修正值。



(a) 工件装配及焊接机头安装示意



(b) 焊接坡口形式

图 1 工件装配及焊接坡口

表 2 焊接工艺参数

焊层	峰值电流 I_p/A	峰值时间 t_p/s	基值电流 I_b/A	基值时间 t_b/s	电弧电压 U/V	送丝速度 $v_w/(mm \cdot min^{-1})$	热丝电流 I_w/A	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	摇动角度 $\alpha/(^\circ)$
1	130 ~ 150	0.1	100 ~ 120	0.2	8.0 ~ 9.5	40 ~ 60	0	80 ~ 90	0
2	180 ~ 200	0.1	140 ~ 160	0.2	8.5 ~ 10.0	900 ~ 1 000	40 ~ 60	65 ~ 70	25 ~ 30
其他	250 ~ 270	0.1	220 ~ 240	0.2	9.0 ~ 11.0	1 200 ~ 1 300	40 ~ 60	60 ~ 70	30 ~ 40
面层	240 ~ 260	0.1	220 ~ 240	0.2	9.5 ~ 11.5	1 100 ~ 1 200	40 ~ 60	60 ~ 65	40 ~ 45

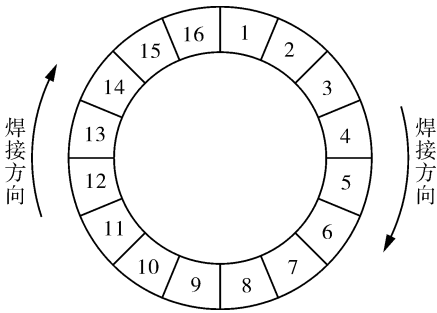


图2 焊接分区示意

表3 焊接工艺参数修正值

焊接分区	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
峰值电流 I/A	+5	+5	0	0	-5	-5	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-5	0
电弧电压 U/V	+0.1	+0.1	0	0	0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0	0	+0.1
送丝速度 $v_w/(mm \cdot min^{-1})$	+10	+10	+5	+5	0	0	-10	-15	-15	-15	-10	-10	-10	-5	0	+5

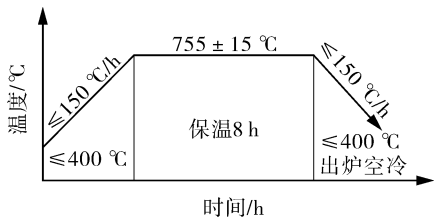


图3 焊后消应力热处理工艺曲线

热处理后,按照 NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》将焊件取样进行破坏性试验。采用 WAW - 1000D 微机控制电液伺服万能试验机,进行拉伸和弯曲试验;采用 NI300 仪器化冲击试验机进行室温冲击试验,分别在距焊缝表面 1 mm 和 15 mm 位置各取一组焊缝和 HAZ 冲击试样;采用 Axiovert 200 MAT 蔡司金相显微镜对焊接接头进行微观组织分析。

2 结果与讨论

2.1 组织结构分析

图4 为 SA - 335 P91 钢全位置窄间隙热丝 TIG 焊接接头的断面照片,该接头共焊接 34 层,

采用焊条电弧焊、埋弧焊等方法焊接 SA - 335 P91 钢时,一般焊前预热温度需 $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$,而热丝 TIG 焊为低氢焊接方法,可适当降低焊前预热温度,试验中采用的最小预热温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,且焊后未进行后热直接将工件缓慢冷却至室温。为保证焊接接头获得最佳的综合性能,满足产品使用要求,焊后采用箱式电阻炉对焊件进行整体消应力热处理,热处理工艺曲线见图3。

在焊接完成 24 h 后和消应力热处理后,分别对焊接接头进行磁粉检测 (MT)、超声波检测 (UT) 和射线检测 (RT),均未发现缺陷显示。

每层焊缝厚度约为 1.6 mm,HAZ 宽度为 1.0 ~ 1.5 mm。可以看出,每层一道均匀分布的窄间隙焊缝轮廓,焊缝与两侧母材均熔合良好。焊接过程中钨极左右摇动,使焊接电弧可在坡口内移动并在两侧适当停顿,有效保证了坡口两侧的熔合。焊接完成后坡口最外侧间隙减少了 2.8 mm,这是由于在钨极摇动过程中,电弧直接作用于坡口侧壁而导致坡口收缩量的增加。

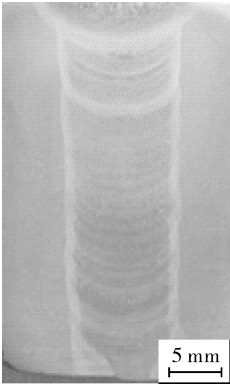
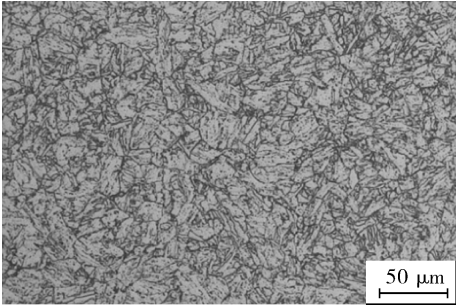


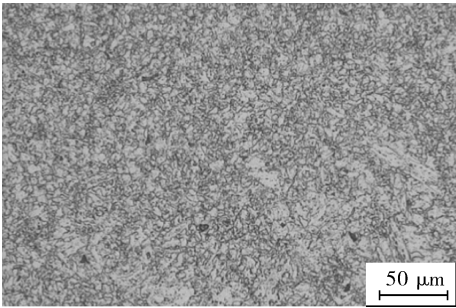
图4 焊接接头断面宏观形貌

图5 示出 SA - 335 P91 钢全位置窄间隙热丝 TIG 焊接接头的显微组织。SA - 335 P91 钢母材、HAZ 和焊缝的金相组织均为回火马氏体组织。各

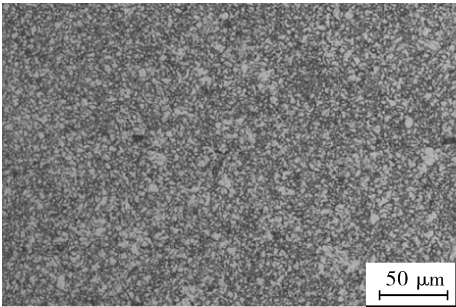
区组织均匀连续,马氏体形态细小,未发现明显的过热粗大组织。这与窄间隙热丝 TIG 焊接热输入小、熔池体积小、焊道金属厚度小、冷却速度快有利于获得细小的晶粒和组织有关。这种均匀细小的组织决定了焊接接头具有优良的综合力学性能。



(a) 母材



(b) 焊缝



(c) HAZ

图5 焊接接头的显微组织

2.2 力学性能分析

焊接接头的 2 个拉伸试验的抗拉强度分别为 672 MPa 和 685 MPa,均高于 SA-335 P91 钢标准

抗拉强度下限 585 MPa,且拉伸试样的断裂均发生在母材部分,说明焊接接头的强度满足要求。弯曲试验的 4 个侧弯试样,在经历 180°弯曲后,其受拉面上的焊缝、HAZ,以及试样棱角上任何方向均未产生开裂。

表 4 列出焊接接头的室温冲击试验结果,各个位置焊缝和 HAZ 的冲击吸收能量均高于 NB/T 47014—2011 标准规定的下限值 34 J,焊接接头表现出优良的冲击韧性。在全位置窄间隙焊接时,每层只焊 1 道,在相对较短的时间内,后焊层对先焊层便有一次热作用,这种热作用起到了焊后消氢和改善组织的作用,虽然焊前适当降低了预热温度,焊接接头同样获得了优良的冲击性能^[11]。另外,焊后消应力热处理时,足够的保温时间也有利于 SA-335 P91 钢焊接接头获得优良的冲击性能^[12]。

表 4 冲击试验结果

缺口位置	KV ₂ /J
焊缝(距焊缝表面 1 mm)	229,189,172
HAZ(距焊缝表面 1 mm)	196,194,195
焊缝(距焊缝表面 15 mm)	146,191,217
HAZ(距焊缝表面 15 mm)	216,215,226

焊接接头硬度检测结果表明,母材、HAZ 和焊缝区的硬度均在合理范围内,母材区的硬度相对较低,焊缝区的硬度相对较高,但各区域之间硬度差异并不大,测得接头范围内的最大硬度差为 43(HV10),焊接接头各区域性能呈现出较好一致性(见表 5)。

表 5 硬度检测结果(HV10)

位置	母材	HAZ	焊缝
硬度	231,231,235	258,246,246	273,274,267

3 结论

(1)全位置窄间隙热丝 TIG 工艺可用于 SA-335 P91 钢大口径管的环缝焊接,实现非平焊位置环缝的机械化焊接,获得无缺陷的焊接接头;
(下转第 32 页)

- [4] 周利剑,范远刚,高斌,等. 储液罐子结构振动台试验仿真分析[J]. 压力容器,2013,30(7):18-23.
- [5] 周利剑,王雪,孙铭阳,等. 支架式球形储罐层间隔震分析[J]. 压力容器,2016,33(9):18-27.
- [6] 孙建刚,吕远,崔利富,等. 高举架立式圆筒型储液容器附加粘滞阻尼器减震研究[J]. 压力容器,2017,34(7):19-28.
- [7] 周利剑,郭俊男,王雪,等. 15 km³ 天然气球罐设计研究及优化[J]. 世界地震工程,2018,34(2):190-199.
- [8] Housner G W. Dynamic pressures on accelerated fluid containers [J]. Bulletin of Seismological Society of America,1957,47(1):15-35.
- [9] Haroun M A, Housner G W. Dynamic interaction of liquid storage tanks and foundation soil [C]. Atlanta, Georgia,1981.
- [10] 李慧. 中、美、欧、日建筑抗震规范地震作用对比研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [11] 范力,赵斌,吕西林. 欧洲规范 8 与中国抗震设计规范关于抗震设防目标和地震作用的比较[J]. 结构工程师,2006,22(6):59-63.
- [12] 蒋志楠. 我国建筑抗震规范中部分条款的演变及与欧美规范的对比探讨[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2010.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范:GB 50341—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 石油化工钢制设备抗震设计规范:GB 50761—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2018.
- [15] American Petroleum Institute. Welded Tanks for Oil Storage:API 650—2013[S]. Washington D C: A P Institute,2013.
- [16] Structural Seismic Design-silos, Tanks and Pipes: Eurocode 8-4[S]. Bruxelles:European Committee for standardization,2006.
- [17] 钢制焊接油罐结构:JIS B 8501—1995[S]. Tokyo: JISC,1997.

作者简介:周利剑(1974),男,副教授,主要从事防灾减灾及防护工程研究工作,通信地址:163000 黑龙江省大庆市东北石油大学土木建筑工程学院,E-mail:35326918@qq.com;

通信作者:吴育建(1989),男,主要从事防灾减灾及防护工程研究工作,通信地址:163000 黑龙江省大庆市东北石油大学土木建筑工程学院,E-mail:wuyujianmail@163.com。

(上接第 15 页)

(2) 采用全位置窄间隙热丝 TIG 工艺焊接 SA-335 P91 钢大口环缝,焊接接头的回火马氏体组织均匀细小,综合力学性能优良;

(3) 采用全位置窄间隙热丝 TIG 工艺焊接 SA-335 P91 钢大口径管,分区域进行参数修正设置,可保证焊缝质量和性能。

参考文献:

- [1] Parker J. In-service behaviour of creep strength enhanced ferritic steels Grade 91 and Grade 92—Part 2 weld issues[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2014,114-115:76-87.
- [2] 杨勇,李晓红,端震,等. 火电站 P91 钢焊接接头超声检测方法的研究[J]. 压力容器,2008,25(2):5-8.
- [3] 郑楷,赵大军,张雪莲. 超(超)临界火电机组 SA335P91 钢与 12Cr1MoV 钢焊接性能[J]. 焊接学报,2012,33(8):77-80.
- [4] 纪冬梅,轩福贞,涂善东,等. P91 钢的蠕变-疲劳交互作用研究现状[J]. 压力容器,2011,28(6):37-43.
- [5] 任岚明,姜德盛. T/P91 钢焊接问题探讨[J]. 吉林电力,2010,38(3):12-13.
- [6] 张国栋,薛吉林,周昌玉. 基于正交试验设计的高温管道焊接工艺优化[J]. 焊接学报,2008,29(11):53-56.
- [7] 孙志远,张茂龙,胡欢. 1000 MW 核电蒸汽发生器管子管板焊接[J]. 压力容器,2016,33(1):67-73.
- [8] 董家利. CHW-62QR 实芯焊丝全位置自动焊工艺试验研究[J]. 压力容器,2017,34(4):6-11.
- [9] 徐祥久,张宇,黄超,等. 大口径厚壁钢管全位置窄间隙热丝 TIG 焊技术[J]. 机械制造文摘-焊接分册,2016(4):24-27.
- [10] 郭春富,孙伟强,刘帛炎,等. 管道全位置自动焊的研究现状及展望[J]. 电焊机,2017,47(11):77-81.
- [11] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京:机械工业出版社,2004:251-264.
- [12] 孙咸,王红鸿. 新型耐热钢 P91 焊缝金属中的马氏体[J]. 焊接,2010(4):7-11.

作者简介:徐祥久(1982),男,高级工程师,主要从事锅炉、压力容器、核电等产品的焊接和热处理技术工作,通信地址:150046 黑龙江省哈尔滨市香坊区三大动力路 309 号哈尔滨锅炉厂有限责任公司,E-mail:xuxj@hbc.com.cn。