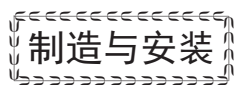


doi: 10.3969/j.issn.1001-4837.2025.07.009



余热锅炉厚壁炉管与薄管板自动GMAW焊接研究

高中华, 杨平平, 朱 宁

(中石化南京化工机械有限公司, 南京 210048)

摘 要:针对薄管板型余热锅炉管子/管板全焊透结构手工焊接存在的效率低、质量稳定性差难题,提出采用手工钨极氩弧焊(GTAW)封底与自动熔化极气体保护电弧焊(GMAW)填充、盖面的组合工艺方案。结果表明,该方案成功实现了高质量全焊透焊接,焊接效率达手工焊的3~6倍,并完成了产品制造与多年稳定运行。研究为自动GMAW技术在压力容器管子/管板焊接中的成熟应用提供了实践依据与参考。

关键词:管子/管板;全焊透;自动熔化极气体保护电弧焊;厚壁

中图分类号:TH162;TH131.2;TG444.7

文献标志码:B

Research on automatic GMAW welding of thick-wall furnace tubes and thin tubesheet in waste heat boilers

GAO Shenhua, YANG Pingping, ZHU Ning

(Sinopec Nanjing Chemical Machinery Co., Ltd., Nanjing 210048, China)

Abstract:To address the issues of low efficiency and poor quality stability in manual welding of fully penetrated tube-to-tubesheet joints in thin tubesheet waste heat boilers, a combined process scheme using manual gas tungsten arc welding (GTAW) for root pass and automatic gas metal arc welding (GMAW) for filling and capping passes is proposed. The results show that this scheme successfully achieves high-quality full penetration welding, with welding efficiency reaching 3~6 times that of manual welding, and has accomplished product manufacturing and years of stable operation. The study provides practical basis and reference for the mature application of automatic GMAW technology in pressure vessel tube-to-tubesheet welding.

Key words:tube-to-tubesheet; full penetration; automatic gas metal arc welding; thick wall

0 引言

某天然气净化工程硫磺回收装置中的CLAUSE(一段)余热锅炉,用于回收天然气脱硫后的余热,是装置的关键设备。其产生的蒸汽供整个装置使用,因此,该锅炉的可靠性对装置的成功开车与稳定运行至关重要^[1]。

某公司承接了工程硫磺回收装置共12套48台设备的制造任务,其中包括12台一段余热锅炉。该锅炉的主要设计参数如下:管程工作压力为0.4 MPa,壳程工作压力为4.2 MPa;管程工作温度为进口1 067 °C/出口517 °C,壳程工作温度为

进口167 °C/出口255 °C。其管板材质为Q345R,规格为 $\varnothing 3\ 200\ \text{mm} \times 28\ \text{mm}$;换热管材质为20钢,规格为 $\varnothing 89\ \text{mm} \times 7.5\ \text{mm}$,长度为6 000 mm。结构简图如图1所示。

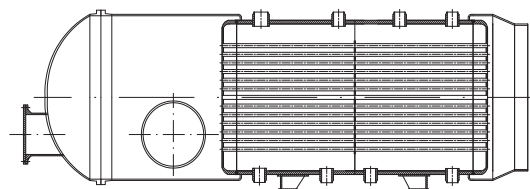


图1 一段余热锅炉简图

Fig.1 Schematic diagram of a waste heat boiler section

1 管子/管板焊接难点分析

1.1 材料方面

Q345R 与 20 钢材料具有良好的可焊性,对冷、热裂纹均不敏感。在室温下焊接,其热影响区一般不易形成淬硬组织;但在 0℃ 以下环境或厚板焊接时,则可能出现脆硬组织并引发裂纹^[2],因此需采取预热措施。此外,焊接时热影响区的过热区会因高温而晶粒粗大,导致韧性和塑性下降,故道间温度需控制在 300℃ 以下。若焊接保护不当或焊件表面存在油污、铁锈等杂质,则易产生气孔缺陷,影响焊缝的致密性与强度,因此焊前必须做好清理与防风措施^[3]。

1.2 坡口型式

一段余热锅炉的管板坡口原设计为 12 mm 深的强度焊形式。考虑到设备管程使用温度较高,为提升运行稳定性,现改为全焊透结构(见图 2)。坡口深度的增加直接导致了焊接难度的上升。此种深而窄的坡口易引发未熔合、夹渣及气孔等缺陷。此外,由于管板本身较薄(仅 28 mm)且管孔间距小,焊接变形问题更为突出,同时也显著增加了焊接工作量和操作难度^[4-5]。

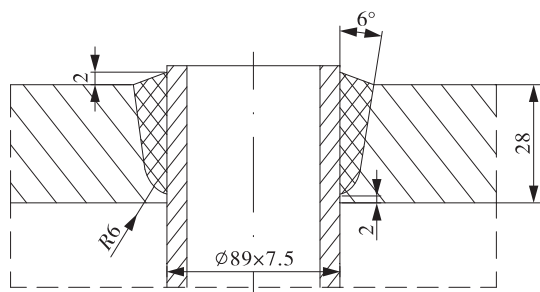


图2 焊接坡口

Fig.2 Weld groove

1.3 工艺因素

热输入控制存在矛盾,厚壁管需要较大热输入以保证熔透,而薄管板容易因过热造成烧穿或变形。此外,多层多道焊的施焊顺序会影响热积累与变形量^[6],需避免薄管板反复受热。该型式接头应力较为集中,壁厚差异导致焊接接头拘束度不均,易产生焊接残余应力及裂纹,因此应合理选择焊接顺序并控制热输入量。同时,深而窄的坡口会影响气体保护效果,而管板与炉管的角接接头空间位置复杂,易出现保护气体紊流,从而引发焊接缺陷。

2 焊接方法、设备和气体的选择

2.1 焊接方法的选择

换热器设备制造中常采用的焊接方法包括手工钨极氩弧焊、焊条电弧焊及熔化极气体保护焊。其中,非熔化极气体保护焊是管子管板焊接中最常用的方法,而焊条电弧焊则应用较少。

非熔化极气体保护焊仅适用于浅坡口的管板接头形式。当坡口深度较大时,氩气保护效果不佳,易产生气孔;同时,焊枪在深坡口内操作不稳定,可能导致钨极与工件接触,引发夹钨缺陷。此外,该方法的焊接效率也较低。

在深而窄的管板坡口内,焊条电弧焊存在起弧与运条困难、焊条易粘连工件、易出现偏弧及熔渣难以清理等问题,这些问题易导致气孔、未熔合和夹渣等缺陷。然而,该方法的焊接效率仍优于手工钨极氩弧焊^[7]。

熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)是一种以可熔化金属焊丝为电极、并辅以气体保护的电弧焊方法^[8-9]。这种连续送丝的工作方式,省去了更换焊条与清理焊渣的辅助时间,具有焊接速度快、变形小以及易于实现半自动与全自动焊接的优点。

针对一段锅炉管子管板深坡口(深度 28 mm)的全焊透结构,其焊接工作量大且管板易变形。为确保焊接质量与生产进度,在综合比较手工钨极氩弧焊、焊条电弧焊及熔化极气体保护焊的优缺点后,决定采用手工钨极氩弧焊(gas tungsten arc welding, GTAW)与熔化极气体保护焊的组合工艺。具体而言,先采用手工钨极氩弧焊进行封底焊,以保证根部熔透;再采用熔化极气体保护焊进行填充与盖面,此举旨在提高效率并控制变形。为进一步保证填充和盖面过程的质量稳定、减少人为干扰,最终选用自动熔化极气体保护焊完成该类焊缝的焊接。

2.2 焊接设备的选择

手工钨极氩弧焊可采用常规直流电源,但对于深而窄的坡口,需使用特制焊枪。常规喷嘴外径为 20 mm、长度为 15 mm;而特制的加长喷嘴长度在 50 mm 以上,外径仅为 10 mm,从而能够伸入坡口内部进行焊接。此设计确保了钨极可抵达根部以实现全焊透,并能有效保护焊接熔池,防止气孔等缺陷的产生。

管板坡口的填充与盖面焊接采用国内某公司生产的熔化极气体保护自动焊机。通过深度合作,依据管子管板的坡口型式与规格,专门设计了一套使焊枪沿管子周向旋转的特殊夹紧机构,并优化了焊枪枪头。这些改进提升了深坡口焊接的电弧稳定性与气体保护效果,完善了焊机功能,最终实现了焊接质量的稳定可靠与操作的自动化。

2.3 焊接气体的选择

熔化极气体保护焊常用的保护气体为纯CO₂或Ar+CO₂混合气。纯CO₂气体成本较低且保护效果尚可,但在焊接过程中会与金属发生化学反应,导致合金元素烧损,降低焊缝性能。同时,其焊接飞溅较大,不仅影响焊缝外观,也增加了后续清理工作的难度。

在Ar+CO₂混合保护气中,氩气的加入使电弧燃烧更稳定、集中,易于控制。同时,它能显著减少焊接飞溅,从而获得更光滑平整的焊缝表面,减少层间清理与打磨工作,提升效率。此外,惰性气

体Ar可减少合金烧损,改善焊缝工艺性能^[10-11]。

针对一段余热锅炉管子管板的熔化极焊接,保护气体选用混合气体。考虑到管板坡口深、焊丝干伸长等因素,采用以下3种比例的混合气体进行工艺评定试验,即:80%Ar+20%CO₂,70%Ar+30%CO₂,60%Ar+40%CO₂,并依据试验结果择优应用于实际生产。

3 焊接工艺评定和焊工培训考试

3.1 工艺评定项目和焊接参数

焊接工艺评定试验依据NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定 压力容器焊接规程 承压设备产品焊接试件的力学性能检验》进行^[12]。试验项目包括板对接焊与管板角接焊的熔化极气体保护焊工艺评定(见表1),其中管板角接评定试件的坡口形式与一段余热锅炉管板坡口保持一致。由于手工钨极氩弧焊在板对接和管板角接中已有成熟工艺,故未进行重新评定。

表1 余热锅炉管/板焊缝焊接组合工艺评定项目表

Tab.1 Evaluation item table for combined welding process of waste heat boiler tube-to-tubesheet welds

序号	评定项目	焊接方法	评定母材	规格/mm	焊材	保护气体
1	板对接焊	GMAW	Q345R	δ=14	ER50-6	80%Ar+20%CO ₂
2	板对接焊	GMAW	Q345R	δ=14	ER50-6	70%Ar+30%CO ₂
3	板对接焊	GMAW	Q345R	δ=14	ER50-6	60%Ar+40%CO ₂
4	管/板角接	GTAW+GMAW	20钢/Q345R	∅89×7.5/28	ER50-6(GTAW) ER-56(GMAW)	100%Ar(GTAW) 80%Ar+20%CO ₂ (GMAW)
5	管/板角接	GTAW+GMAW	20钢/Q345R	∅89×7.5/28	ER50-6(GTAW) ER-56(GMAW)	100%Ar(GTAW) 70%Ar+30%CO ₂ (GMAW)
6	管/板角接	GTAW+GMAW	20钢/Q345R	∅89×7.5/28	ER50-6(GTAW) ER-56(GMAW)	100%Ar(GTAW) 60%Ar+40%CO ₂ (GMAW)

板对接评定试验所用母材Q345R及焊材ER50-6的化学成分与力学性能分别如表2与表3所示。对接试板采用V形坡口,其焊接工艺参数见表4。焊缝焊后按NB/T 47013—2015《承压设

备无损检测》要求进行100%射线检测,质量等级不低于Ⅱ级AB。试样经力学性能试验与硬度测定,结果均符合评定要求。

表2 Q345R试板和ER50-6焊丝化学成分

Tab.2 Chemical composition of Q345R test plate and ER50-6 welding wire

项目	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	V
Q345R	0.150	0.400	1.450	0.010	0.005	0.006	0.010	0.001
ER50-6	0.068	0.850	1.460	0.012	0.010	0.007	0.013	0.004

表3 Q345试板和ER50-6焊丝的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of Q345 test plate and ER50-6 welding wire

项目	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{eL} /MPa	断后伸长率 $A/\%$	冲击吸收能量 A_{kv}/J
Q345R	540	385	29.5	148, 162, 132(0℃)
ER50-6	545	448	31.5	82, 86, 74(-30℃)

表4 对接评定试板焊接工艺参数

Tab.4 Welding process parameters for butt joint qualification test plate

焊道层次	焊接方法	焊材	焊材规格/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	电源极性	焊接速度/ (mm·s ⁻¹)	保护气流量/ (L·min ⁻¹)
1	GMAW	ER50-6	1.2	130	21	DCEP	2.5	12
2~3	GMAW	ER50-6	1.2	140~170	22~24	DCEP	3.0~4.0	12
4~5	GMAW	ER50-6	1.2	180	26	DCEP	3.0~4.0	12

管子/管板工艺评定试件的坡口形式与图2一致,采用手工钨极氩弧焊打底一层,再以熔化极气体保护焊完成填充及盖面焊,具体焊接工艺参数见表5。试件焊后按NB/T 47013—2015进行

100%射线探伤,结果符合Ⅱ级AB合格要求。随后对试样进行断面解剖检验,确认其断面无裂纹、未熔合等缺陷。

表5 管子/管板焊接工艺参数

Tab.5 Welding process parameters for tube-to-tubesheet joints

焊道层次	焊接方法	焊材	焊材规格/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	电源极性	焊接速度/ (mm·s ⁻¹)	保护气流量/ (L·min ⁻¹)
1	GTAW	ER50-6	2.5	160	14	DCEN	1.5	12
2~3	GMAW	ER50-6	1.0	175	25	DCEP	2.5~3.0	15
4~9	GMAW	ER50-6	1.0	190	26	DCEP	3.5~4.5	15
10	GMAW	ER50-6	1.0	160	24	DCEP	3.0	12

3.2 工艺评定结果

板对接与管子管板角接试件经外观检查,未发现裂纹等缺陷。依据NB/T 47013—2015进行100%射线检测,试板与管子管板焊缝射线检测结果均为Ⅰ级。对接试板根据NB/T 47014—2011

及产品技术条件要求进行了力学性能检验,其拉伸、弯曲及冲击试验结果如表6所示,所有结果均合格。管板角接试件按NB/T 47014—2011附录D进行宏观金相检查(见表6),显示无气孔、裂纹、夹渣、根部未焊透及未熔合等缺陷,检查合格。

表6 焊接工艺评定力学性能试验和宏观金相检查结果

Tab.6 Mechanical property test and macroscopic metallographic examination results of welding procedure qualification

序号	试验区	抗拉强度 R_m /MPa	侧弯程度 ($d=4A/180^\circ$)	-20℃焊缝 冲击试验/J	-20℃热影响区 冲击试验/J	宏观金相检查	结论
1	板对接	530/538	4件无缺陷	85,90,92	72,63,60	—	合格
2	板对接	526/526	4件无缺陷	88,92,83	76,65,69	—	合格
3	板对接	520/525	4件无缺陷	98,112,84	80,68,62	—	合格
4	管/板角接	—	—	—	—	无缺陷	合格
5	管/板角接	—	—	—	—	无缺陷	合格
6	管/板角接	—	—	—	—	无缺陷	合格

上述工艺评定试验的各项检测结果均符合相关标准及产品技术条件要求,可用于指导实际生产。在对接试板与管板角接试板的焊接过程中观察发现,采用混合气体能显著细化熔滴过渡尺寸,改善过渡特性,从而减少飞溅与气孔倾向,并优化焊缝成形^[13-14]。通过对比3种比例混合气体的工艺性能,发现存在一定差异:80%Ar+20%CO₂在管板角接试板的前三层焊接中,电弧挺度不足,易发生漂移;60%Ar+40%CO₂在板对接与管板角接试板焊接时飞溅较多,焊缝纹路较粗;而70%Ar+

30%CO₂的电弧挺度良好,无漂移现象,飞溅较少,焊缝纹路均匀细密。因此,实际产品焊接选用70%Ar+30%CO₂作为保护气体。

4 实际产品焊接过程控制

为保障余热锅炉管子/管板的焊接质量,形成优良焊缝,从以下5个方面进行质量控制。

(1)焊前应清理管板坡口与管子外表面的铁锈及氧化物,并在焊接区域周围采取防风措施(见图3),避免因风力影响而产生气孔。所使用的

CO₂气体需经预热处理,以去除水分,防止气孔形成。手工氩弧焊封底时应确保根部完全熔透,且无气孔与未熔合缺陷。打底层焊接完成后,须进行 0.2 MPa 气密性检测,合格后方可进行后续工序。



图3 实际产品焊接

Fig.3 Actual product welding

(2)在余热锅炉焊接过程中,采用将管束立置的方式,使管接头处于水平焊接位置。该方法有助于优化焊接操作姿态,便于焊接设备精准对位,同时可减少熔池流淌与焊接变形,从而提升焊缝成形质量与焊接效率,为管接头焊接质量的稳定控制提供可靠保障。

(3)进行熔化极气体保护焊前,应调整好焊接规范参数、保护气体流量及焊枪角度,并检查焊枪喷嘴是否堵塞、气路是否通畅。经试焊确认后,方可进行产品焊接。焊接过程中需密切观察熔池形态、电弧声音、焊缝表面颜色与成形状态,如有异常应立即停止,待查明原因并排除故障后

方可继续施焊。

(4)为控制焊接变形并保证焊接质量,在熔化极气体保护焊过程中,规定每道焊缝仅连续焊接单层,以利于控制变形及进行层间清理。同时采用跳焊方式(隔二焊一),避免因局部连续焊接导致热输入集中而引起变形,如图4所示。焊接过程中使用电动工具对焊缝进行抽检,检查是否存在气孔或未熔合等缺陷。若抽检发现缺陷,则应对该缺陷周边焊缝进行逐点检查,直至确认所有焊缝无缺陷为止。

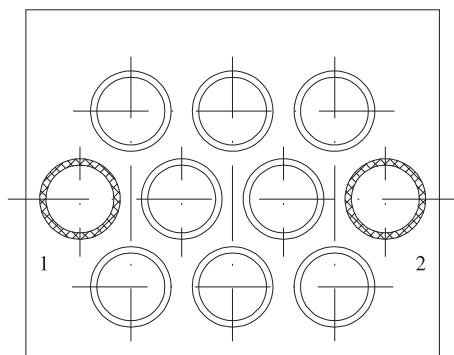


图4 焊接顺序

Fig.4 Welding sequence

(5)熔化极气体保护焊的常见缺陷为气孔与未熔合。为此,焊接过程中需将每层焊缝厚度控制在约 3 mm,并确保坡口两侧完全熔合,以防止未熔合等缺陷。管板焊缝焊接完成后,需对表面进行 100% 渗透检测。具体焊接工艺参数见表7。

表7 管子/管板焊接工艺规程

Tab.7 Welding procedure specification for tube-to-tubesheet

项目	焊接	焊材	焊材规格/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	电源极性	焊接速度/(mm·s ⁻¹)	保护气流量/(L·min ⁻¹)
打底	GTAW	ER50-6	2.5	140~160	12~14	DCEN	1.5~2.0	12~14
填充	GMAW	ER50-6	1.0	170~190	24~26	DCEP	2.5~3.0	15~20
盖面	GMAW	ER50-6	1.0	150~170	23~25	DCEP	3.0~4.0	12~15

5 结论

(1)通过对熔化极气体保护焊进行工艺优化与工装改进,实现了管子管板的自动化焊接。相关工艺措施与评定试验有效保障了一段余热锅炉管子管板的焊接质量,最终顺利完成该设备的制造任务。

(2)管子管板采用熔化极气体保护焊后,其焊接效率分别达到非熔化极气体保护焊的 5~6 倍、

焊条电弧焊的 3~4 倍。采用混合保护气体较纯 Ar 气体降低了生产成本,相较于焊条焊接更为经济。该工艺同时减轻了焊工劳动强度,显著提高了焊接生产效率。

熔化极气体保护焊在国内管子管板焊接中属首例应用,为压力容器制造提供了重要参考。随着该技术材料与设备的持续发展,其低成本、高效率的优势将推动在行业中的广泛应用,建议在压力容器领域推广熔化极气体保护自动焊。

参考文献:

- [1] 肖雯雯,严永博,杨建勃,等.换热器管束-管板焊缝失效及焊接工艺综述[J].材料保护,2020,53(3):135-140.
XIAO W W, YAN Y B, YANG J B, et al. Overview of failure and welding procedure of weld seams between tubes and tubesheet of heat exchangers [J]. Materials Protection, 2020, 53(3): 135-140.
- [2] 曾乐.现代焊接技术手册[M].上海:上海科学技术出版社,1993.
ZENG L. Handbook of modern welding technology [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1993.
- [3] 解玲丽,王飞,史红艳,等.不同金属材料的焊接工艺[J].山西冶金,2024,47(8):79-81.
JIE L L, WANG F, SHI H Y, et al. Welding processes for different metal materials [J]. Shanxi Metallurgy, 2024, 47(8): 79-81.
- [4] 胡国呈,董金善,丁毅.余热回收器换热管与管板连接处泄漏失效分析[J].压力容器,2019,36(9):53-62
HU G C, DONG J S, DING Y. Failure analysis of leakage at the connection of heat exchanger tube and tubesheet of waste heat recovery unit [J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(9): 53-62.
- [5] 徐世敏,王立华,陈太茂,等.堆垛机柱脚焊接接头疲劳寿命分析及优化[J].机电工程,2023,40(11):1794-1802.
XU S M, WANG L H, CHEN T M, et al. Fatigue life analysis and optimization of welded joints in stacker column-footing [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(11): 1794-1802.
- [6] 王正,郑静,茅庆飞,等.焦炭塔工作过程温度场仿真分析[J].压力容器,2011,28(4):28-34.
WANG Z, ZHENG J, MAO Q F, et al. Temperature field simulation of the working process of coke drum [J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(4): 28-34.
- [7] ZHAN X H, OU W M, WEI Y H, et al. The feasibility of an intelligent welding procedure qualification system for Q345R SMAW. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5-8): 765-777.
- [8] 罗杨.浅析熔化极气体保护焊发展中的问题及对策[J].科技展望,2016,26(15):72.
LUO Y. Analysis problems and solutions during developments of gas metal arc welding [J]. Science and Technology, 2016, 26(15): 72.
- [9] 郑明涛,王莉,周小龙,等.管板镍基合金双钨极自动TIG堆焊工艺研究及应用[J].压力容器,2024,41(9):16-22.
ZHENG M T, WANG L, ZHOU X L, et al. Research and application of double tungsten automatic TIG for tubesheet cladding nickel base alloy [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(9): 16-22.
- [10] 于永庆,刘焕利,张凯.CO₂气体保护焊在锅炉压力容器中的应用[J].金属加工(热加工),2010(6):58-61.
YU Y Q, LIU H L, ZHANG K. Application of CO₂ shielded welding in boilers and pressure vessel [J]. MW Metal Forming, 2010(6): 58-61.
- [11] 翟福生.CO₂气体保护焊在锅炉压力容器中的应用[J].金属加工(热加工),2011(6):62-63.
ZHAI F S. Application of CO₂ shielded welding in boilers and pressure vessel [J]. MW Metal Forming, 2011(6): 62-63.
- [12] 唐丽,李东,康文捷,等.国内外换热管与管板焊接工艺评定标准浅析[J].电焊机,2022,52(8):113-118.
TANG L, LI D, KANG W J, et al. Analysis on standards for welding procedure qualification of heat transfer tube and tube sheet at domestic and overseas [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(8): 113-118.
- [13] 陈祝年.焊接工程师手册[M].北京:机械工业出版社,2009.
CHEN Z N. Handbook of welding engineers [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [14] 葛佳棋,万升云,汤旭祥,等.GMAW自动焊工艺参数对焊缝成形影响研究[J].金属加工(热加工),2023,50(6):20-25.
GE J Q, WAN S Y, TANG X X, et al. Study on the influence of GMAW automatic welding process parameters on weld forming [J]. MW Metal Forming, 2023, 50(6): 20-25.

本文引用格式:

高申华,杨平平,朱宁.余热锅炉厚壁炉管与薄管板自动GMAW焊接研究[J].压力容器,2025,42(7):81-86.

GAO Shenhua, YANG Pingping, ZHU Ning. Research on automatic GMAW welding of thick-wall furnace tubes and thin tubesheet in waste heat boilers [J]. Pressure Vessel Technology, 2025, 42(7): 81-86.

作者简介:高申华(1967),男,焊接特级技师,首席技师,主要从事承压设备焊接工作,通信地址:210048江苏省南京市六合区大厂街道姜桥路1号,E-mail:gaoshenhua0519@163.com。