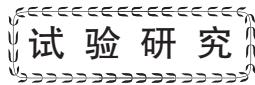


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2024.09.003



管板镍基合金双钨极自动 TIG 堆焊工艺研究及应用

郑明涛¹, 王莉¹, 周小龙¹, 隋娜¹, 刘恺²

(1. 哈电集团(秦皇岛)重型装备有限公司, 河北秦皇岛 066200;

2. 国能联合动力技术(赤峰)有限公司, 内蒙古赤峰 024000)

摘要:针对双钨极单热丝自动 TIG 工艺原理和技术优越性进行探索, 采用双钨极单热丝自动 TIG 工艺在 SA-508 Grade 3 Class 1 锻件管板上进行镍基合金堆焊, 并对堆焊层的各项性能进行试验研究, 验证该方法在管板堆焊技术中应用的可行性。通过对焊接工艺参数的优化, 该工艺方法在核电产品及管壳式换热器类设备制造中进行推广应用, 熔敷效率可达到 2.5~6 kg/h, 工艺熔敷效率约为普通单热丝自动 TIG 的 3 倍, 可在有效保证核电产品管板镍基堆焊层质量的前提下, 缩短核电产品的制造周期。

关键词:核蒸汽发生器; 管板; 镍基合金; 堆焊; 钨极气体保护焊

中图分类号: TH49; TG455; TG441.8

文献标志码: B

Research and application of double tungsten automatic TIG for tubesheet cladding nickel base alloy

ZHENG Mingtao¹, WANG Li¹, ZHOU Xiaolong¹, SUI Na¹, LIU Kai²

(1. Harbin Electric Corporation (QHD) Heavy Equipment Co., Ltd., Qinhuangdao 066200, China;

2. Guodian United Power Technology (Chifeng) Co., Ltd., Chifeng 024000, China)

Abstract: In order to explore the principle and technical advantages of double tungsten automatic - TIG welding technology process, cladding nickel base alloy on SA-508 Grade 3 Class 1 forging tubesheet using double tungsten automatic - TIG welding process, and the properties of nickel base alloy cladding were tested and studied, which verified the feasibility of the application of this method in tubesheet cladding technology. Through the optimization of welding process parameters, this process method has been promoted and applied in the manufacturing of nuclear power steam generators and shell-and-tube heat exchangers. The deposition efficiency of double tungsten automatic - TIG welding can reach 2.5~6 kg/h, which is about three times that of ordinary single hot wire automatic TIG. Under the premise of effectively ensuring the cladding quality of nickel base cladding of tubesheet, the manufacturing cycle of nuclear power products can be shortened.

Key words: nuclear steam generator; tubesheet; nickel base alloy; overlaying welding; gas tungsten arc welding

0 引言

在核电蒸汽发生器(Steam generator)及汽水分离再热器(MSR)等管壳式换热器类设备中,长期接触带有放射性和腐蚀性的载热剂介质的低合金钢或碳钢材料管板一回路表面,需要进行大面积镍基合金堆焊。管板镍基合金堆焊是核电蒸汽发生器和管壳式换热器类设备制造过程中要求最高、难度最大的关键工序之一。该工序的堆焊质

量将影响管板一次侧的耐腐蚀性能及管子与管板间焊缝的综合性能。堆焊工艺的选择一方面需要考虑管板堆焊的生产效率及堆焊层质量;另一方面需要考虑堆焊层稀释率和纯净度,以便于后面工序中减少堆焊层及换热管管子与管板焊缝的返修率^[1-2]。核电蒸汽发生器及管壳式换热器类设备的管板堆焊多采用 Inconel 690, Inconel 600 或 Inconel 625 等镍基合金^[3-6]。目前,常见的管板镍基合金大面积堆焊多采用电渣带极自动堆

焊 (ESW)、埋弧带极自动堆焊 (SAW)、焊条电弧焊 (SMAW) 和传统的单热丝惰性气体钨极保护焊 (TIG) 等堆焊工艺^[7-13]。

随着 TIG 工艺技术的发展,在传统单热丝自动 TIG 焊接工艺基础上研发了先进、高效、节能的双钨极单热丝自动 TIG 堆焊工艺技术,并已经在核电反应堆压力容器等产品零部件的大面积不锈钢堆焊领域开始推广应用。双钨极自动热丝 TIG 堆焊工艺具有电弧电压低、焊接熔深浅、母材稀释率低、焊接效率高等特点,在保留传统氩弧焊的良好焊接质量和坡口适应性的同时,显著提高了生产效率、降低制造成本^[14-15]。目前,对于低合金钢管板镍基合金的双钨极单丝自动 TIG 堆焊技术的研究较少,还没有较为成熟的应用经验。

1 双钨极单热丝自动 TIG 工艺

双钨极 TIG 焊是在传统 TIG 焊接技术基础上发展而来,其特点是由设置在同一个焊枪中的两个相互绝缘的钨极产生耦合电弧。双钨极机头如图 1 所示,由安装在同一个焊炬喷嘴的两根钨极(主钨极和从钨极)组成,钨极端部加工成尖角,钨极之间相互绝缘,并各自连接独立的电路。

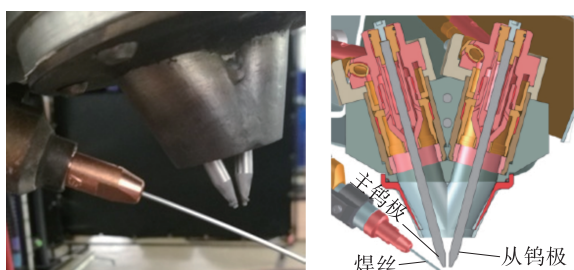


图 1 双钨极机头

Fig.1 Double-tungsten electrode machine head

图 2 示出 2 个钨极分别是单电弧,电弧吹力直接垂直于工件表面,双钨极 TIG 将 2 个钨极整合在同一个喷嘴里相互呈一定角度,2 个电弧各自产生磁感线后,分别会受到磁场的作用,导致 2 个电弧之间的中间区域形成复合电弧。形成复合电弧前的 2 个电弧的电弧吹力会和工件表面形成一定夹角,且 2 个电弧的电弧吹力在平行于待焊工件的表面的分力方向相反,这样会降低垂直于工件方向的电弧吹力,减小熔深,降低堆焊层的稀释率。在相同的总电流下,双钨极耦合电弧电流密度的峰值小于单钨极氩弧焊,电弧压力显著下降。在相同的电弧压力下,用双钨极焊接时可以选择

更大的电流,从而增加了焊接热输入,提高焊丝的熔敷效率。与传统的 TIG 堆焊成型对比,2 个电极的叠加能量,其中主钨极的能量主要用于熔化母材形成熔深,从钨极的能量用于熔化高速送入的焊丝,双钨极单丝堆焊工艺对母材的熔透要小于单熔池时的状态,而多出来的能量将由增加的焊丝来吸收,从而达到降低稀释率、增加熔敷效率的目的^[15-16]。

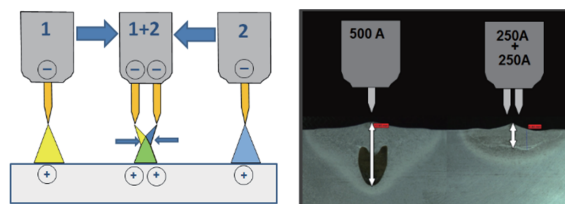


图 2 复合电弧原理

Fig.2 Principle of composite arc

2 试验材料与焊接工艺试验

2.1 试验材料

试验选用厚度为 40 mm 的 SA - 508 Grade 3 Class 1 锻件。堆焊用镍基合金焊接材料选用 Inconel Filler Metal 52M (ERNiCrFe - 7A) 盘装焊丝 ($\phi 1.0$ mm)。锻件及焊丝的化学成分如表 1、表 2 所示。

表 1 SA - 508 Grade 3 Class 1 锻件化学成分 (典型值)

Tab.1 Chemical composition of SA - 508 Grade 3 Class 1 forgings (Typical value) %

元素	C	Si	Mn	P	S
含量	0.19	0.19	1.48	0.009	0.005
要求值	≤ 0.25	0.15~0.30	1.20~1.50	≤ 0.012	≤ 0.008
元素	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
含量	0.12	0.74	0.50	0.02	0.025
要求值	≤ 0.25	0.57~0.93	0.40~0.60	≤ 0.10	≤ 0.035
元素	V	Co	Sn	As	Sb
含量	0.003	0.005	0.004	0.004	0.003
要求值	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.004

2.2 焊接工艺研究

采用由某自动双钨极单丝自动 TIG 焊接设备及专用的双钨极单丝 TIG 焊接机头,堆焊用焊丝为 $\phi 1.0$ mm 的 ERNiCrFe - 7A 镍基合金焊丝,焊接保护气体为两回路高纯氩气。

堆焊时的焊接热输入是影响镍基合金堆焊层各项性能指标的关键参数,其受到焊接电流、焊接

电压和焊接速度的影响,计算公式如下:

$$Q = 60 UI/v$$

式中, Q 为焊接热输入量, J/mm ; U 为电弧电压, V ;
 I 为焊接电流, A ; v 为焊接速度, mm/min 。

表2 ERNiCrFe-7A 焊丝化学成分(典型值)

Tab.2 Chemical composition of ERNiCrFe-7A welding wire (Typical value)

元素	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Fe	Mo	Cu
含量	0.02	0.75	0.14	0.000 9	0.005	29.93	59.22	8.66	0.02	0.03
要求值	≤ 0.04	≤ 1.00	≤ 0.50	≤ 0.008	≤ 0.015	28.0~31.5	余量	7.00~11.00	≤ 0.50	≤ 0.30
元素	Al	Ti	Co	Al+Ti	Nb+Ta	B	Zr	其他	N	
含量	0.15	0.21	0.008	0.36	0.91	< 0.001	< 0.01	< 0.05	0.013	
要求值	≤ 1.10	≤ 1.0	≤ 0.05	≤ 1.50	0.5~1.0	≤ 0.005	≤ 0.02	≤ 0.50	≤ 0.030	

在焊接过程中,基值焊接电流和基值时间的合理匹配起到了维持电弧稳定燃烧的作用,与脉冲焊接电流相配合,有效地控制焊缝的成型,确保熔池缓慢冷却从而易于熔池中的气体溢出;双钨极单丝自动 TIG 堆焊设备由 2 个电源系统对焊接电流及电压参数进行控制,主要用于熔化母材和

形成熔池的钨极为主钨极;主要用于熔化焊丝增加熔敷效率的钨极为从钨极。借助增加热丝电流的功效,有效提升堆焊时高速送进熔池焊丝的熔化和熔敷效率。优选的焊接工艺参数^[17]如表 3 所示,堆焊试件如图 3 所示。

表3 双钨极自动 TIG 堆焊试件主要工艺参数(参考值)

Tab.3 Main process parameters for cladding of nickel base alloy with double tungsten automatic TIG (Reference Value)

项目	主钨极电流 /A		从钨极电流 /A		脉冲时间 /ms		电压 /V	热丝电流 /A	送丝速度 / (mm·min ⁻¹)	焊接速度 / (mm·min ⁻¹)
	峰值	基值	峰值	基值	峰值	基值				
数值	170~300	160~300	170~300	160~300	100~200	100~200	9~14	40~120	4 500~7 500	450~600

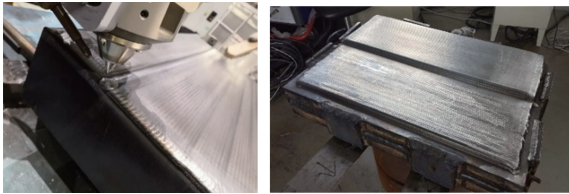


图3 SA-508 Grade 3 Class 1 堆焊试件

Fig.3 SA-508 Grade 3 Class 1 clad sample

2.3 焊接试件的热处理

SA-508 Grade 3 Class 1 锻件为低合金 Mn-Ni-Mo 型,焊缝及热影响区内易产生淬硬组织,焊缝易产生冷裂纹等焊接缺陷。为了保证堆焊焊缝的质量,堆焊过程中需要对母材的预热温度、道间温度和焊后热处理等进行严格控制。

经过焊接验证,预热温度控制在 120~200 °C,道间温度控制在 150~350 °C,焊接中断或焊接结束不能立即进行焊后热处理时,需要采用后热处理,后热温度为 250~300 °C,保温时间不小于 2 h。

按照 ASME IX *Welding and Brazing Qualification* 的相关材料分类标准,SA-508 Grade 3 Class 1 锻件属于 P-No.3 类材料。按照 ASME BPVC-III *Rules for Construction of Nuclear Facility Components*

第一册 NB 分卷相关要求,堆焊焊缝焊接结束后需要进行消应力热处理,焊后消除应力热处理曲线如图 4 所示,其中最短保温时间根据产品组件所受到的热循环确定,保温时间为 24~24.5 h。

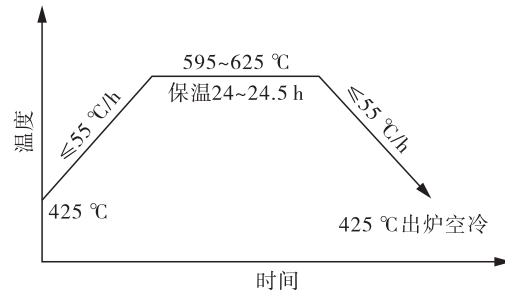


图4 SA-508 Grade 3 Class 1 堆焊试件焊后热处理曲线

Fig.4 PWHT curve of SA-508 Grade 3 Class 1 forging clad sample

3 结果分析

3.1 堆焊层的无损检验

堆焊结束及焊后热处理后,对堆焊层进行目视检测、液体渗透检测和超声检验。

目视检测结果,焊缝及焊道两侧成型均匀良好,颜色呈银白或金黄色;焊缝及热影响区域无咬边、未熔合、气孔、飞溅物等缺陷。液体渗透检测结

果,符合 ASME V 卷第 6 章和 ASME IX 卷 QW - 195.2 中的相关合格标准。超声检测结果,符合 ASME V 卷第 5 章的相关要求,堆焊层及热影响区无裂纹、未熔合等缺陷。

3.2 堆焊层的力学性能及理化试验

对无损检验合格的热处理态堆焊试件解剖,切取理化试样进行性能测试检验。通过对堆焊层弯曲试验、宏微观试验、指定堆焊层厚度的化学分析和晶间腐蚀试验、焊缝及热影响区的硬度检测等,考核焊后热处理态堆焊层质量。

按照 ASME IX 卷 QW - 453 的要求对热处理态堆焊层进行侧弯试验和面弯试验。弯曲试验采用电液伺服万能试验机进行,在侧弯试样和面弯试样的拉伸面上无明显的开裂、气孔和夹杂物。

达到弯曲角度后,试样拉伸面上不允许出现任何明显的开裂,单个裂纹、气孔和夹渣的长度不得大于 1.50 mm。

根据产品堆焊层最小厚度和耐蚀层的最小厚度的要求,对距离熔合线约 3 和 5 mm 位置的堆焊层进行化学成分分析,对距离熔合线约 3 mm 位置的堆焊层进行晶间腐蚀试验。堆焊层化学分析试验按照 ASTM A751 进行,采用 SPECTRO MAXx 固定式金属分析光谱仪,通过直读法测出化学元素,化学分析试验测定结果如表 4 所示。按照 ASTM A262 中的 E 法,对距离熔合线约 3 mm 位置的堆焊层金属进行晶间腐蚀试验,包括热处理态试样和热处理态 + 敏化态试样,试验结果均无晶间腐蚀倾向。

表 4 堆焊层(距熔合线 3 mm 和 5 mm)表面化学分析
Tab.4 Chemical composition of cladding metal (3 mm and 5 mm from fusion line) %

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe	Mo
3 mm 堆焊层	0.029	0.13	0.85	0.005	0.005	27.36	53.68	16.57	0.07
5 mm 堆焊层	0.018	0.15	0.81	0.005	0.004	29.80	59.53	8.26	0.04
要求值	≤ 0.045	≤ 0.65	≤ 5.00	≤ 0.020	≤ 0.010	28.00~31.50	其余	8.00~12.00	≤ 0.50
元素	Cu	Al	Ti	Co	Al+Ti	Nb+Ta	B	Zr	其他
3 mm 堆焊层	0.08	0.10	0.20	0.02	0.30	0.92	0.001	0.003	0.04
5 mm 堆焊层	0.06	0.11	0.22	0.01	0.33	0.98	0.001	0.004	0.04
要求值	≤ 0.50	—	≤ 0.50	≤ 0.10	—	—	—	—	—

垂直堆焊方向制备宏观试样和微观试样,并对试样堆焊层及热影响进行酸蚀后,利用体式显微镜放大 5~10 倍观察。如图 5 所示,堆焊层内无裂纹、未焊透、熔敷金属等缺陷,堆焊层与母材之间无未熔合、焊道间无未结合、未熔合,以及超过 1.5 mm 的气孔及夹渣等缺陷。双钨极单热丝自动 TIG 堆焊的熔深约为 1.3 mm。微观试样采用金相显微镜,如图 6 所示。



图 5 堆焊层截面的宏观金相

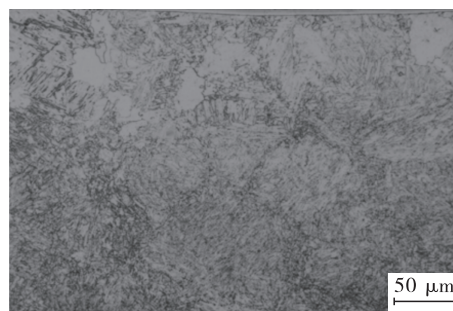
Fig.5 Macroscopic metallography of cladding cross section

在 200 倍放大率的显微镜下观察,堆焊层组织为奥氏体及少量碳化物,未见影响焊接接头性能的显微裂纹和沉淀物;堆焊基材的低合金钢及

碳钢热影响区组织为贝氏体及少量铁素体,未见显微裂纹。



(a) 堆焊层

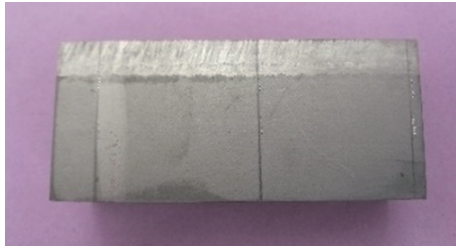


(b) 热影响区

图 6 堆焊层截面的微观金相组织

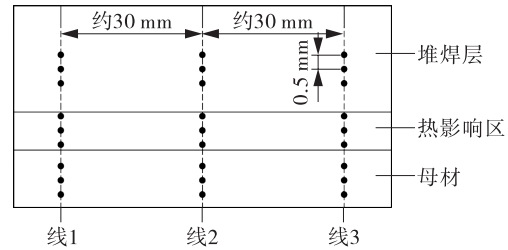
Fig.6 Microstructure of cross section of the cladding

选用 SA - 508 Grade 3 Class 1 堆焊试件进行低合金钢基材热影响区硬度值测量。试验利用数显维氏硬度计,在垂直于堆焊层表面,分别测量 3 条硬度线,相邻 2 条硬度线间距约 30 mm,每条硬度线上分别在堆焊金属区、热影响区、母材区测



(a) 试样

定 3 组硬度值,相邻 2 个测点间距约为 0.5 mm,施加载荷为 98 N。硬度测量如图 7 所示。经过数据测量(如表 5 所示),堆焊层、母材及热影响区的 HV10 硬度值均 ≤ 320 ,满足压水堆蒸汽发生器管板堆焊的硬度值要求。



(b) 测量位置

图 7 硬度检验试样及其测量位置示意

Fig.7 Hardness test sample and measuring position diagram of the sample

表 5 堆焊层截面 HV10 硬度实测值

Tab.5 Measured HV10 hardness value of cladding cross section

测量线	测量区域及硬度 (HV10) 实测值		
	堆焊层	热影响区 HAZ	母材
线 1	202, 178, 182, 208, 201, 196	228, 218, 202, 208, 207, 216	209, 207, 215, 210, 209, 211
线 2	221, 197, 212, 203, 214, 200	216, 213, 208, 210, 211, 214	213, 210, 221, 212, 205, 202
线 3	206, 194, 214, 200, 203, 203	206, 205, 203, 200, 203, 200	204, 206, 215, 201, 205, 202

4 产品应用

管板镍基合金双钨极单丝自动 TIG 堆焊的焊缝质量除了受焊接工艺自身的影响以外,还受到其他因素的影响,如主钨极与从钨极之间的相对位置(包括钨极尖之间的距离、钨极尖连线与焊接方向的相对夹角、钨极与待焊面的夹角等)、钨极尖与焊丝之间的距离、钨极尖相对于压道位置的相对位置、焊接区域的清洁度控制等因素。

通过在一定范围内调节主钨极与从钨极尖之间的间距能够控制堆焊层的熔深。其电弧间距越大,2 个电弧的电弧吹力在平行于待焊工件的表面方向的分力越大,垂直方向的分力越小,熔池的熔深越小。

主钨极尖与从钨极尖的连接线与焊接方向的夹角影响堆焊焊道的宽度和焊道边缘熔合质量。当钨极连线平行于焊接方向时,焊缝宽度较大,且焊缝的焊接质量良好,未出现咬边等情况,焊缝边缘圆滑,焊缝润湿角较小;若采用钨极连线垂直于焊接方向的方式进行焊接,则焊道较窄,焊道成型质量较差,出现咬边,焊缝润湿角较大,焊接质量差。主钨极与从钨极连线与焊接方向的夹角约

为 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 时,焊缝成型最优,双钨极单热丝自动 TIG 堆焊工艺单道堆焊层厚度约为 2.5~3.5 mm,焊道宽度约为 10~12 mm。

目前,管板镍基合金双钨极单丝自动热丝 TIG 工艺已经成功应用于多个项目的蒸汽发生器管板镍基合金堆焊,同时推广应用于部分 AP1000 系列汽水分离再热器(MSR)一二级再热器管板的镍基合金堆焊。管板堆焊质量优良,无损检测一次 100% 合格。

5 结论

(1) 在合适的焊接工艺参数下,双钨极单丝自动 TIG 堆焊工艺可以实现核电压水堆蒸汽发生器及管壳式换热器管板的镍基合金堆焊。

(2) 双钨极自动 TIG 镍基合金堆焊工艺在具有传统自动 TIG 优良技术的基础上,焊接速度可达 700~900 mm/min,熔敷效率可达到 2.5~6 kg/h,约为普通单热丝自动 TIG 工艺熔敷效率的 3 倍。

(3) 双钨极自动 TIG 镍基堆焊的熔深约为 1.3 mm,经焊接工艺试验验证,堆焊层质量可靠,能够满足核电压水堆蒸汽及管壳式换热器管板镍基合金堆焊的质量要求。

(4) 采用双钨极单热丝自动 TIG 工艺堆焊管板镍基堆焊层,堆焊总周期与带极堆焊配合手工电弧焊堆焊管板总周期相当,在保证产品堆焊质量的前提下,能够满足产品的制造周期要求。

参考文献:

- [1] 刘鸣宇,徐文镜,张茂龙,等.核电蒸汽发生器管板镍基合金自动堆焊技术[J].焊接,2011(1):28-33.
LIU M Y, XU W J, ZHANG M L, et al. Automatic surfacing technology of nickel base alloy for tube plate of nuclear power steam generator[J]. Welding & Joining, 2011(1):28-33.
- [2] 李双燕.核电设备蒸汽发生器四种管板镍基合金自动堆焊技术比较[J].金属加工(热加工),2017(23/24):8-12.
LI X Y. Comparison of automatic surfacing technology of four kinds of tube plate nickel base alloy for steam generator of nuclear power equipment[J]. MW Metal Forming, 2017(23/24):8-12.
- [3] 王琇峰,唐国运,杨鸿均,等.气柱共振导致的核电站蒸汽管道振动分析与机理研究[J].流体机械,2022,50(1):85-91.
WANG X F, TANG G Y, YANG H J, et al. Analysis and mechanism study of nuclear power plant steam pipe vibration caused by gas column resonance[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(1):85-91.
- [4] 吴海滨,田玮,陈璐,等.乳品超高温杀菌换热器环境影响不确定性研究[J].包装与食品机械,2022,40(1):1-7.
WU H B, TIAN W, CHEN L, et al. Uncertainty analysis of environmental influence of heat exchangers for ultra-high temperature sterilization of dairy products[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(1):1-7.
- [5] 朱珊云,戴源德,曹杰,等.小管径开缝翅片管式换热器空气侧传热综合性能研究[J].流体机械,2022,50(5):68-75.
ZHU S Y, DAI Y D, CAO J, et al. Analysis of comprehensive heat transfer performance at air-side of slotted fin-and-tube heat exchangers with small diameter[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(5):68-75.
- [6] 张晓慧,花亦怀,苏清博,等.大型绕管式换热器气液均布器流体分配特性试验研究[J].流体机械,2023,51(8):1-6.
ZHANG X H, HUA Y H, SU Q B, et al. Experimental study on fluid distribution characteristics of gas-liquid distributor in large wound tube heat exchanger[J]. Fluid Machinery, 2023, 51(8):1-6.
- [7] 罗成.核电蒸汽发生器管板镍基合金双热丝钨极氩弧焊堆焊技术[J].压力容器,2012,29(7):61-65.
LUO C. Nickel base alloy cladding by double hot wire TIG welding procedure on tubesheet of steam generator[J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(7):61-65.
- [8] 顾永康,张仁刚.核电蒸汽发生器管板大面积镍基合金电渣堆焊研究[C]//第五届全国压力容器学术会议论文集,2001:361-366.
GU Y K, ZHANG R G. Research on electroslag strip cladding on large area using nickel-base alloy[C]// Proceedings of the 5th National Conference on Pressure vessel, 2001:361-366.
- [9] 魏占超,于均刚,王楠. AP1000核电站汽水分离再热器制造技术[J].压力容器,2017,34(2):74-79.
WEI Z C, YU J G, WANG N. Manufacturing technology on moisture separator reheater of AP1000 nuclear power plant[J]. Pressure Vessel Technology, 2017, 34(2):74-79.
- [10] 李志杰,朱宏光,于江涛,等. MSR 管板的镍基合金堆焊[J].焊接,2000(6):36-37.
LI Z J, ZHU H G, YU J T, et al. Nickel-base alloy cladding for MSR tubesheet[J]. Welding & Joining, 2000(6):36-37.
- [11] 冯劭,杨云丽. AP1000汽水分离再热器中一、二级再热器管板的镍基合金堆焊[J].金属加工(热加工),2020(1):34-36.
FENG M, YANG Y L. Nickel-base alloy cladding for AP1000 moisture separator reheater primary and secondary reheater tubesheet[J]. MW Metal Forming, 2020(1):34-36.
- [12] 刘鸿彦,孙修圣,杜永勤,等.分离器筒体镍基 C276 带极埋弧堆焊工艺研究及应用[J].压力容器,2022,39(11):22-28.
LIU H Y, SUN X S, DU Y Q, et al. Study and application of nickel-base C276 SAW strip surfacing technology for separator cylinder[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(11):22-28.
- [13] 武靖伟,李义民,王志刚,等. N06200 镍基合金 TIG 焊接接头微观组织及力学性能研究[J].压力容器,2023,40(2):11-17.
WU J W, LI Y M, WANG Z G, et al. Microstructure and mechanical properties of TIG welded joint of N06200 nickel base alloy[J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(2):11-17.
- [14] 马驰原,谷文,朱兴华.双钨极 TIG 堆焊技术在压力容器制造中的应用[J].一重技术,2016(1):58-63.
MA C Y, GU W, ZHU X H. Application of twin-electrode TIG cladding technique in manufacture of pressure vessels[J]. CFHI Technology, 2016(1):58-63.
- [15] 邹国伟,马培锋,王伟波,等.双钨极堆焊技术在核

- 反应堆压力容器制造中的应用与研究[J].电焊机, 2019,49(4):168-172.
- ZOU G W, MA P F, WANG W B, et al. Application and research of twin-electrode TIG cladding process on reactor pressure vessels manufacturing [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(4): 168-172.
- [16] 郑建能, 刘玉平, 李厚彬, 等. 全自动双钨极氩弧焊在反应堆压力容器冷却剂泵泵壳内壁堆焊中的应用[J]. 大型铸锻件, 2021, 9(5): 1-5.
- ZHENG J N, LIU Y P, LI H B, et al. Application of fully automatic double tungsten argon arc welding in the build-up welding of the inner wall of the coolant pump shell of the reactor pressure vessel [J]. Heavy Casting and Forging, 2021, 9(5): 1-5.
- [17] 王莉, 郑明涛, 刘恺, 等. 一种管板镍基合金双钨极单热丝自动钨极氩弧焊堆焊工艺: ZL202110077800.3 [P]. 2022-11-08.
- WANG L, ZHENG M T, LIU K, et al. The utility model relates to an automatic tungsten argon arc surfacing welding process for nickel based tube plate alloy with double tungsten electrode and single hot wire: ZL202110077800.3 [P]. 2022-11-08.

作者简介:郑明涛(1982),男,高级工程师,主要从事核电及压力容器制造焊接工艺方面的工作,通信地址:066200河北省秦皇岛经济技术开发区(东区)动力路5号哈电集团(秦皇岛)重型装备有限公司技术部, E-mail: zhengmingtao_hit@126.com。

本文引用格式:

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.

(上接第15页)

- [9] LIU S S, XU J D, GONG J H, et al. Experimental study of methane explosion containing coal dust in flame instability and pressure variation process [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 178: 675-684.
- [10] 喻健良, 亢首力, 闫兴清, 等. 承压容器内甲烷爆炸及泄爆特性研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1355-1361.
- YU J L, KANG S L, YAN X Q, et al. Study on methane explosion and release characteristics in pressure vessels [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(4): 1355-1361.
- [11] 吴全龙, 徐锋, 后文杰. 基于 ASME XIII—2021 的压力泄放装置应用综述 [J]. 压力容器, 2023, 40(2): 64-70.
- WU Q L, XU F, HOU W J. Review of application of pressure relief devices based on ASME XIII—2021 [J]. Pressure Vessel Technology, 2023, 40(2): 64-70.
- [12] 徐锋, 刘应华, 杨超. 升压速率对正拱形爆破片爆破压力影响的试验研究 [J]. 压力容器, 2021, 38(1): 9-14.
- XU F, LIU Y H, YANG C. Experiment study on effect of pressure rise rate on bursting pressure of domed bursting disc device [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(1): 9-14.
- [13] 喻健良, 曾方驰, 闫兴清, 等. 动态超压工况下正拱开缝型爆破片的爆破性能研究 [J]. 压力容器, 2020, 37(6): 9-14.
- YU J L, ZENG F C, YAN X Q, et al. Study on bursting performance of positive-arch slotted rupture disc under dynamic overpressure conditions [J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(6): 9-14.

作者简介:刘镇溪(1997),男,主要从事 CO₂管道运输及压力容器安全相关研究工作,通信地址:116024 辽宁省大连市甘井子区凌工路2号大连理工大学化工学院, E-mail: liuzhenxi2333@163.com。

通信作者:王海涛(1982),男,正高级工程师,主要从事压力管道失效分析和服役性能相关技术研究工作,通信地址:100029 北京市朝阳区和平街西苑2号楼 B620 室中国特种设备检测研究院, E-mail: wanghaitao2009@aliyun.com。

本文引用格式:

刘镇溪,王海涛,陈磊,等.压力容器内甲烷爆炸及爆破片动态泄放试验研究[J].压力容器,2024,41(9):9-15.

LIU Z X, WANG H T, CHEN L, et al. Study on methane explosion and dynamic discharge testing of rupture discs inside pressure vessels [J]. Pressure Vessel Technology, 2024, 41(9): 9-15.