

doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2022.04.004



全位置不锈钢内壁堆焊技术研究

刘万存,袁亮文,赵佳

(一重集团大连核电石化有限公司,辽宁大连 116113)

摘要:针对某反应堆压力容器接管内壁全位置堆焊的技术难点,开发了全位置不锈钢堆焊技术。通过焊接试验,分析并讨论堆焊层的显微组织及力学性能。结果表明,堆焊层平整度较好,未观察到金相组织粗大晶粒,堆焊层 PT, UT 检测全部合格,堆焊层力学性能及硬度均符合相关要求,抗晶间腐蚀及点蚀能力好,符合技术条件要求。

关键词:全位置;堆焊;显微组织;力学性能

中图分类号:TH49;TG455;TL351

文献标志码:A

Study on surfacing technology of all-position stainless steel inner wall

LIU Wangcun, YUAN Liangwen, ZHAO Jia

(CFHI Dalian Nuclear Power and Petrochemical Equipment Co., Ltd., Dalian 116113, China)

Abstract: The all-position surfacing welding technology of stainless steel was developed in view of the technical difficulties of the all-position surfacing welding of the inner wall reactor pressure vessel. Through the welding test, the microstructure and mechanical properties of the surfacing layer were analyzed and discussed. The results show that the flatness of the surfacing layer is good, and no coarse grains are observed in the metallographic structure. PT and UT test of the surfacing layer are all qualified. Both the mechanical properties and hardness of the surfacing layer meet the relevant requirements, and the intergranular corrosion and pitting corrosion resistance are good, and meet the technical requirements.

Key words: all-position; surfacing; microstructure; mechanical property

0 引言

模块式小型反应堆作为一种安全、经济的核电新堆型,是国际原子能机构(IAEA)鼓励发展和利用的一个核能开发新方向。在这种堆型的制造过程中,面临众多技术问题,尤其是接管内壁全位置堆焊装备与工艺决定着整台套产品能否顺利制造,这对堆型的自主制造起着关键性作用^[1-5]。

全位置不锈钢堆焊技术基于某反应堆压力容器实际工程需求而开发,主要目的是减少大型焊接工装,减少平位置(PA)、横位置(PC)堆焊变位工装。优化生产工艺流程,不局限于组件阶段堆焊,可灵活选择堆焊阶段,提高生产制造效率。拓宽堆焊材料,开发镍基隔离层堆焊、低合金钢等材

料全位置堆焊技术,推广应用于 ACP100 同类型小型堆的关键部位堆焊或焊接^[6-9]。

1 内壁堆焊技术开发

1.1 试验设备

试验设备采用 TP060 管板焊接机头经过升级改造,再将其焊接机头与小型操作机相连接,如图 1 所示。通过升级改造,该设备峰值电流、基值电流、脉冲频率、焊接速度、电弧电压、脉动送丝速度均可设定,满足全位置 TIG 工艺开发要求。

1.2 焊接工艺

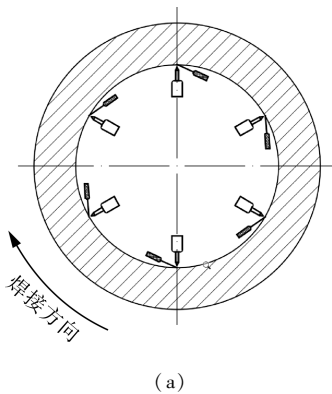
全位置内壁堆焊需要保证每层焊道的厚度、宽度相同,进而保证整个堆焊层表面平整、厚度均匀一致。全位置堆焊过程中焊接位置连续变化,

焊接熔池受重力、电弧力不同导致焊道成形不同,因此为获得良好焊道成形,需要在不同的焊接位置控制峰值电流、基值电流、脉冲频率、焊接速度、电弧电压、脉动送丝速度(必要时)等焊接参数。全位置焊接过程焊枪及送丝位置如图2所示。



图1 试验件焊接设备组成示意

Fig.1 Schematic diagram of welding equipment for test parts



(a)



(b)

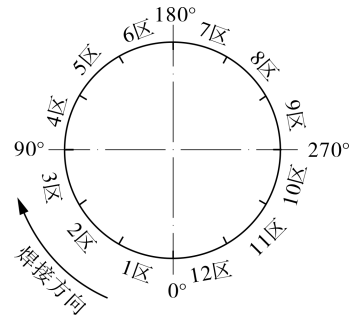
图2 焊枪及送丝位置

Fig.2 Welding gun position

1.2.1 分区设定

由于焊缝不同空间位置选用相同的焊接参数,采用自动焊会显著影响焊缝成形和质量,不能保证焊缝成形一致。为了充分发挥全位置自动TIG焊接的优点,将每层焊道平均划分12个区间进行焊接,从最低端(6点钟方向)定义为0°,顺时针每30°划分为一个焊接区,共计12区,如图3

所示。起弧位置为时钟6:00位置,在最后分区(第12分区)设置收弧搭接量3°~5°,保证收弧位置焊缝饱满。



(a)



(b)

图3 12个分区设定

Fig.3 Settings of 12 zones

1.2.2 焊接规范

根据前期大量的试验,选取焊缝成形较好的焊接工艺参数作为全位置内壁堆焊时的焊接规范,在1~12分区中,以下焊接参数保持相同,分别为送丝速度2200/1800 mm/min,焊接速度140 mm/min,纯氩气流量21 L/min,占空比50%,拐道距离5 mm。在1~12分区中,峰/基值电流、电弧电压参数时刻发生变化,如表1所示。其中,采用99.99%的纯氩气作为保护气;拐道距离是指完成一圈完整焊道后,需要偏移钨极位置,保证下一道与当前道融合良好所产生的距离。拐道距离 S 与焊缝宽度 L 的关系为:

$$S = L/2 + k$$

其中,系数 k 一般取0.4~0.6之间,此全位置内壁堆焊工艺开发过程中取 $k = 0.5$ 。利用此拐道距离可以获得较好的搭接量,保证每个焊道成形平滑,减少打磨量,如图4所示。

1.2.3 弧压检测与控制

采用自行设计制造的弧压采集模块,正常焊接过程中,弧压参数设定如表2所示。

表1 全位置内壁堆焊各分区变化工艺参数

Tab.1 All-position inner wall surfacing process parameters for different welding zones

分区号	峰值电流/A	基值电流/A	电弧电压/V
1	265	175	11.9
2	255	165	11.9
3	255	165	11.9
4	255	165	11.9
5	255	165	11.0
6	255	165	11.1
7	265	175	11.1
8	275	185	11.1
9	275	185	11.1
10	275	185	11.1
11	270	180	11.2
12	260	175	11.3

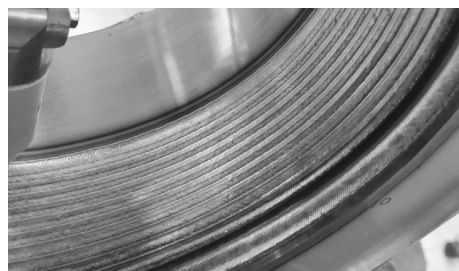


图4 首层焊缝成形情况

Fig.4 First layer weld forming

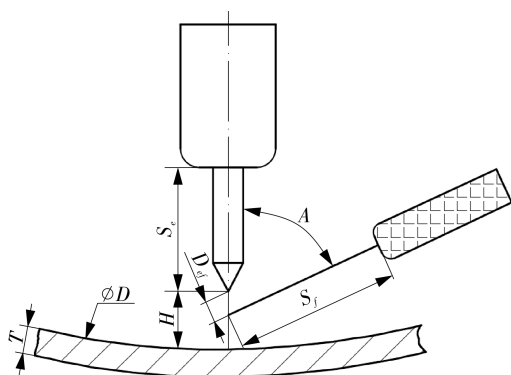
在焊接过程中对其原始电压信号进行滤波处理,电弧电压、峰基值时间进行采集与记录,峰值弧压与基值弧压在 500 mv 范围内波动,峰基值周期 250 ms,占空比 50%。

表2 弧压设定参数

Tab.2 Arc voltage setting parameters

项目	电弧电压/V	灵敏度	精度/V	采集方式	基值弧压周期/ms	峰值弧压周期/ms
参数	10.8	4	0.1	峰值采集	250	250

1.2.4 送丝位置设定



钨极伸长长度 $S_e = 6.5$ mm;钨极尖端距焊丝的距离 $D_{ef} = 2.5$ mm;焊丝伸出长度 $S_f = 8.5$ mm;钨极至焊缝的距离 $H = 2.5$ mm;送丝管与焊枪的夹角 $A = 70^\circ$

图5 送丝位置参数示意

Fig.5 Schematic diagram of wire feeding position parameters

经过多次焊接工艺试验后,推荐最合适的全

表3 ER308L 焊丝及母材化学成分

Tab.3 Chemical composition of ER308L wire and base metal

材料	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
E308L	0.03	21.5	10.8	0.75	2.0	0.45	0.03	0.03	0.75
母材	0.47	0.04	—	—	0.57	0.28	0.013	0.003	≤ 0.01

3 试验结果与分析

3.1 堆焊层宏观形貌

位置内壁堆焊时,钨极与焊丝相对参数及相对位置如图5所示,其中内径 D 为具体产品固定值,内径 D 变化时,参数 S_e, D_{ef}, S_f, H, A 需前后保持一致性。

2 试验材料

试验件为 45# 钢管,外径为 275 mm,内径为 195 mm,长度 160 mm,采用 $\varnothing 0.9$ mm 的 ER308L 焊丝,一共堆焊 4 层,堆焊后,内径 $\varnothing 179.5$ mm,厚度 7.75 mm,每层平均堆焊厚度 1.9 mm。将堆焊试件加工至内径 180.5 mm 后,进行 PT,UT 无损检测。从堆焊层、焊接热影响区分别截取力学试样、金相试样、化学试样、晶间腐蚀试样等,其中金相组织、晶间腐蚀等试样件经打磨、抛光、腐蚀后,采用光学显微镜观察微观组织。母材与焊接材料化学成分如表3所示。

图6为全位置内壁不锈钢堆焊后的焊缝宏观形貌,焊接表面鱼鳞纹平整、均匀,成形良好。经堆焊、内壁加工、打磨工序后,按照 NB/T 20003—

2010《核电厂核岛机械设备无损检测》,100%内 壁堆焊层进行 PT,UT 检测,检测结果全部合格。

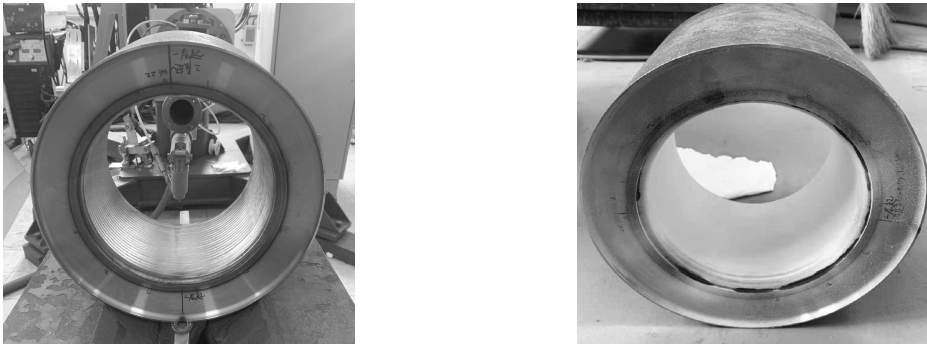


图6 焊缝表面形貌

Fig.6 Weld surface morphology

3.2 焊缝余高与宽度

10组典型焊接工艺参数如表4所示,其中 P_1 为峰值/基值电流, P_2 为电弧电压,其余焊接参数在10组焊接参数中保持不变,故在表4中未列出。根据表4典型工艺参数,进行对比分析,从图7中对比可以得出12分区内焊缝余高偏差在

0.3 mm之内,焊缝宽度偏差在0.9 mm之内。初步得到在3,4,5分区的焊缝余高较其他位置偏高0.2 mm,其余位置都基本保持余高一致,维持在1.5 mm左右;3,4,5分区的焊缝宽度较其他焊缝宽度偏大0.5 mm,其余位置都基本保持焊缝宽度一致,维持在9.1 mm左右。

表4 10组典型焊接工艺参数

Tab.4 Ten groups of typical welding process parameters

参数	1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区	9区	10区	11区	12区
P_1/A	265/175	255/165	255/165	255/165	255/165	255/165	265/185	265/185	275/175	275/175	270/180	260/175
P_2/V	11.9	11.9	11.9	11.9	11.0	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.2	11.3
P_1/A	265/175	255/165	255/165	255/165	255/165	255/165	265/185	265/185	275/175	275/175	270/180	260/175
P_2/V	11.8	11.8	11.8	11.8	10.9	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.1	11.2
P_1/A	265/175	255/165	255/165	255/165	255/165	255/165	265/185	265/185	275/175	275/175	270/180	260/175
P_2/V	11.7	11.7	11.7	11.7	10.8	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	11.0	11.1
P_1/A	265/175	255/165	255/165	255/165	255/165	255/165	265/185	265/185	275/175	275/175	270/180	260/175
P_2/V	11.6	11.6	11.6	11.6	10.7	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.9	11.0
P_1/A	265/175	255/165	255/165	255/165	255/165	255/165	265/185	265/185	275/175	275/175	270/180	260/175
P_2/V	11.5	11.5	11.5	11.5	10.6	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.8	10.9
P_1/A	260/170	250/160	250/160	250/160	250/160	250/160	260/180	260/180	270/170	270/170	265/175	255/170
P_2/V	11.9	11.9	11.9	11.9	11.0	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.2	11.3
P_1/A	255/165	245/155	245/155	245/155	245/155	245/155	255/175	255/175	265/165	265/165	260/170	250/165
P_2/V	11.9	11.9	11.9	11.9	11.0	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.2	11.3
P_1/A	270/180	260/170	260/170	260/170	260/170	260/170	270/190	270/190	280/180	280/180	275/185	265/185
P_2/V	11.9	11.9	11.9	11.9	11.0	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.2	11.3
P_1/A	275/185	265/175	265/175	265/175	265/175	265/175	275/195	275/195	265/185	265/185	280/190	270/185
P_2/V	11.9	11.9	11.9	11.9	11.0	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.2	11.3
P_1/A	265/185	255/175	255/175	255/175	255/175	255/175	265/195	265/195	275/185	275/185	270/190	260/185
P_2/V	11.9	11.9	11.9	11.9	11.0	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.2	11.3

从图7可以看出,3~4分区的堆焊层厚度较其他分区的堆焊层厚度厚,分析原因是在上坡焊

接过程中,熔池内的金属受到表面张力的作用强于其他位置,熔池不容易铺展开,使上坡时的3,

4,5 分区焊缝窄而高所致。

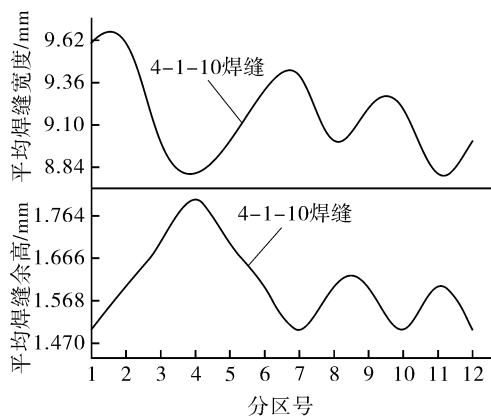
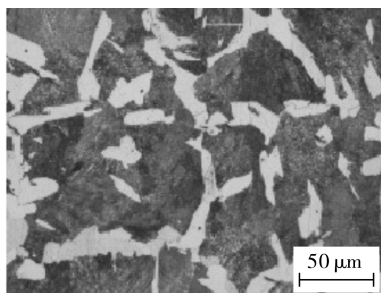


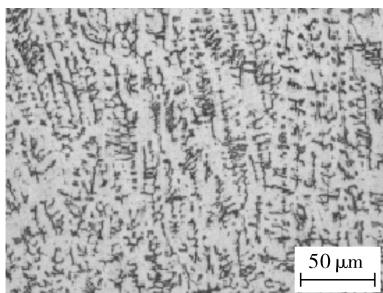
图7 各分区的焊缝余高与焊缝宽度

Fig.7 Weld reinforcement and width in each zone

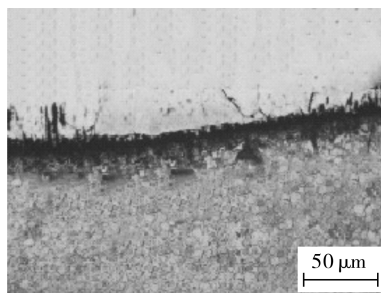
为了使各分区的堆焊层厚度与宽度基本趋于一致,合理选择每层堆焊起弧位置,每焊接完一



(a)母材



(b)堆焊层



(c)热影响区

图8 母材、堆焊层、热影响区微观组织形貌

Fig.8 Microstructure morphology of base metal, surfacing layer and HAZ

3.3.2 宏观金相

采用体式显微镜,按照 GB/T 226—2015《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》,对垂直于堆焊层、热影响区以及母材横向进行检测(PWHT 状态),PWHT 指焊后热处理工艺,具体为:

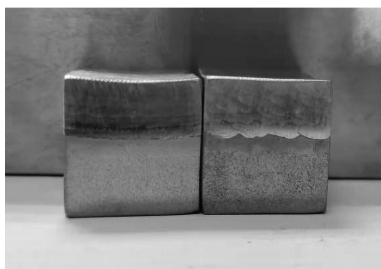
层,适当改变起弧位置,避免多层焊接时接头应力集中;保证 12 分区每道焊缝都基本保持堆焊层厚度、宽度一致,焊缝成形美观。ER308L 堆焊完成后,厚度达到 7.75 mm。

3.3 堆焊层组织

3.3.1 金相检测

采用倒置式金相显微镜,按照 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》,对其垂直于或平行于堆焊层融合线区域(包括母材、堆焊层、热影响区以及融合线横向/纵向区域)的金相组织进行检测,如图 8 所示。金相组织结果显示:母材为 45# 钢,组织为铁素体 + 珠光体组织(见图 8(a));堆焊层为奥氏体 + 铁素体组织(见图 8(b));热影响区为贝氏体组织(见图 8(c))。试样均未有显微裂纹和影响接头性能的沉淀物,满足技术条件要求。

(615 ± 15) $^{\circ}\text{C} \times 29^{\text{h}}$, 300°C 出炉,升、降温速度 $\leq 55^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。宏观金相组织(如图 9 所示)结果显示:经 10 倍放大观察,无可见的裂纹和未焊透,不存在母材和熔敷金属之间的焊道之间结合不良、未熔合及气孔或夹渣等情况。



(a)



(b)



(c)

图9 宏观金相照片

Fig.9 Macroscopic metallograph

3.4 力学性能试验

3.4.1 冲击性能

该试验测定金属材料抗缺口敏感性(韧性)。按照 GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》加工 10 mm × 10 mm × 55 mm 的试验件。根据 JFS-420300-JT39 反应堆压力容器不锈钢内壁堆焊工艺技术要求,采用落锤式冲击试验机与夏比冲击试验降温仪进行 0 °C 与 20 °C 径向焊接热影响区距熔合线 1, 4 mm 处的夏比冲击试验^[10-12]。不同位置冲击试验结果见表 5。可以看出,热区距熔合线 1 mm 处冲击性能满足要求,但热区距熔合线 4 mm 处冲击性能不满足要求。

表 5 冲击性能试验结果

Tab. 5 Impact performance test results

试验温度/°C	取样深度/mm	冲击吸收能量/J	剪切断面率(%)	侧膨胀值/mm
0	热区距熔合线 1 mm 处	47.2	15	0.75
	热区距熔合线 4 mm 处	7.81	0	0
20	热区距熔合线 1 mm 处	92.1	33	1.26
	热区距熔合线 4 mm 处	7.11	0	0

对其堆焊层热区距熔合线 4 mm 处冲击吸收能量低于正常值的情况进行了深入分析,可能有以下原因。

(1) 母材的含碳量偏高,特别是距离熔合线 1 mm 处含碳量将高于母材含碳量;

(2) 未堆焊过渡层 ER309L,直接在 45# 钢上进行 ER308L 堆焊,没有起到基材与奥氏体面层的过渡,导致在结合面上存在微裂纹或未超标缺陷。

3.4.2 弯曲性能



图 10 弯曲试件

Fig. 10 Bending specimen

弯曲试验主要用来检测焊缝材料在经受弯曲负载作用时的性能,评价焊缝金属材料的弯曲强度和塑性变形的大小。按照 GB/T 2653—2008

《焊接接头弯曲试验方法》,试样加工尺寸为 10 mm × 47.5 mm × 160 mm,数量为 2 个,弯曲夹具 $D = 4a$, $\alpha = 180^\circ$,试样弯曲 180° 后,拉伸面上不允许出现任何明显开裂,单个裂纹、气孔、夹渣的长度均不大于 1.5 mm。试验结果表明:在堆焊层侧弯未出现裂纹缝隙,如图 10 所示。该项材料理化性能指标满足技术要求。

3.5 晶间腐蚀试验

按照 GB/T 4334—2008《金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法》,试样加工尺寸为 3 mm × 10 mm × 50 mm。采用电子万能试验机,弯曲试样 180°,弯曲直径等于试样厚度,弯曲后在 10 倍放大镜下观察,不允许有晶间腐蚀引起的裂纹或者开裂倾向。观察结果表明,对纵向堆焊层试样的三种状态(PWHT、PWHT + 敏化态(700 ± 10 °C × 0.5 h)、焊态)进行晶间腐蚀试验,均没有发现晶间腐蚀裂纹及倾向,满足技术条件要求。

3.6 宏观硬度测定

按照 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》,取 10 mm × 30 mm × 100 mm 试样(PHWT),在堆焊层厚度方向上进行硬度分布曲线测定,此厚度方向上包括堆焊层、焊接热影响区、母材 3 个区。每区测 5 点,焊接热影响区测量点之间距离 0.5 mm,堆焊层与母材区测量点之间距离 1 mm,载荷 98 N,按照要求焊接热影响区硬度 $HV \leq 320$ 。

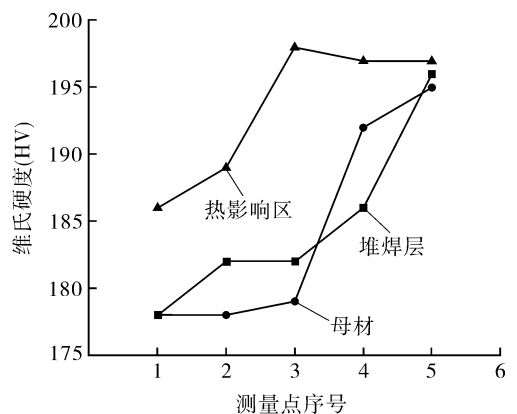


图 11 堆焊层、母材、焊接热影响区硬度分布

Fig. 11 Hardness distribution of hardfacing layer, base metal and HAZ

堆焊层、母材、焊接热影响区硬度分布测试结果如图 11 所示。可以看到,热影响区硬度最高,是由于热影响区渗碳体析出较多造成的;堆焊层

和母材硬度基本相同。由于热影响区在每一次焊接过程中都相当于进行了一次热处理,晶粒长大,导致热影响区硬度高于焊缝。堆焊层、母材、热区硬度都满足技术要求。

3.7 化学分析

采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)、氧氮氢分析仪以及碳硫分析仪,根据GB/T 20123—2006《钢铁总碳硫含量的测定 高频

感应炉燃烧后红外吸收法》、GB/T 20124—2006《钢铁 氮含量的测定 惰性气体熔融热导法》、GB/T 20125—2006《低合金钢 多元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》、GB/T 223.81—2007《钢铁及合金 总铝和总硼含量的测定 微波消解-电感耦合等离子体质谱法》,对堆焊完工的焊态表面磨去0.5 mm后的2 mm深度范围内取得屑状成分进行化学检测,检测的化学元素含量见表6。

表6 堆焊层金属化学成分

Tab.6 Chemical composition of surfacing layer metal

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co	V	Cu	N
含量	0.02	0.09	1.72	0.011	0.010	21.14	10.33	—	—	0.03	0.029 5

从表6可以看出,焊缝中Cr,Ni主要元素的含量分别为21.14%,10.33%,基本与填充金属一致,堆焊层稀释率低;而且焊缝金属中C元素含量0.02%,远远低于母材金属C元素的含量,在保证堆焊层强度的同时,韧性增强,有效控制了焊缝金属中C元素的含量。

4 结语

(1)合理设置最后分区参数值,在最后分区(第12分区)设置收弧搭接量 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$,保证收弧位置焊缝饱满;分区设定不同的焊接工艺参数,可以保证12分区每道焊缝都基本保持焊缝余高、宽度一致,焊缝成形美观。

(2)全位置不锈钢堆焊技术的开发,可减少大型焊接工装,减少平位置(PA)、横位置(PC)堆焊变位工装。优化生产工艺流程,不局限于组件阶段堆焊,可灵活选择堆焊阶段,提高生产制造效率。

(3)拓宽堆焊材料,为后续开发镍基隔离层堆焊、低合金钢等材料全位置堆焊技术提供前期工艺技术储备。

参考文献:

[1] 张俊宝,姚俊俊,林绍萱.反应堆压力容器用SA-508 Gr.3Cl.1 钨钨极惰性气体保护焊工艺研究[J].压力容器,2020,37(7):9-13.
ZHANG Junbao, YAO Junjun, LIN Shaoxuan. Development of GTAW welding process for SA-508 Gr.3 Cl.1 of reactor pressure vessel[J]. Pressure Vessel Technology, 2020,37(7):9-13.

[2] 周彦彬,史维琴.双电弧高效焊接技术研究与发展现状[J].电焊机,2019,49(12):44-51.
ZHOU Yanbing, SHI Weiqin. Development of double

arc high efficiency welding technology [J]. Electric Welding Machine, 2019(12):44-51.

[3] 张伟,朵元才,张建晓,等.热丝TIG堆焊Alloy 59镍基合金工艺及其堆焊层性能研究[J].压力容器,2020,37(5):13-17.

ZHANG Wei, DUO Yuancai, ZHANG Jianxiao, et al. Research on hot-wire TIG surfacing nickel-based Alloy 59 process and its surfacing properties [J]. Pressure Vessel Technology, 2020,37(5):13-17.

[4] 翟伟国,邓光平,侯发臣.压力容器用Monel-400/16MnIII复合板制造过程中的焊接试验研究[J].焊接,2019(7):60-64.

ZHAI Weiguo, DENG Guangping, HOU Fachen. Welding test research on manufacturing process of Monel-400/16MnIII clad plate for pressure vessels [J]. Welding & Joining, 2019(7):60-64.

[5] 陈凤官,王渭,明友,等.煤化工装置用黑水角阀失效分析及改进技术进展[J].流体机械,2020,48(1):53-56.

CHEN Fengguan, WANG Wei, MING You, et al. Research progress on failure analysis and improvement of black water angle valves for coal chemical plants [J]. Fluid Machinery, 2020,48(1):53-56.

[6] 柳猛,刘飞,刘子寅,等.核电站关键设备异种钢焊接接头16MND5/309L熔合线组织性能研究[J].电焊机,2019,49(7):7-12.

LIU Meng, LIU Fei, LIU Ziyin, et al. Research on microstructure and properties of 16MND5/309L bond line of dissimilar steel welded joints in key equipment of nuclear power plant [J]. Electric Welding Machine, 2019,49(7):7-12.

[7] 陈建华,杨金荣,张衍坤,等.06Cr19Ni9NbN高强奥氏体不锈钢焊接工艺评定[J].压力容器,2020,37(8):19-23.

- CHEN Jianhua, YANG Jinrong, ZHANG Yankun, et al. Welding procedure qualification of 06Cr19Ni9NbN austenitic stainless steel[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(8): 19–23.
- [8] 王晓军, 杨健, 周栋, 等. Q345/316L 异种钢 K-TIG 焊接接头的组织及性能[J]. 电焊机, 2021, 51(1): 66–72.
- WANG Xiaojun, YANG Jian, ZHOU Dong, et al. Microstructure and properties of K-TIG welded joint of Q345/316L dissimilar steel[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(1): 66–72.
- [9] 徐祥久, 张宇, 黄超, 等. SA-335 P91 钢全位置窄间隙热丝 TIG 焊接工艺及接头性能研究[J]. 压力容器, 2019, 36(8): 12–15.
- XU Xiangjiu, ZHANG Yu, HUANG Chao, et al. Study on welding procedure and joint properties of SA-335 P91 steel with all-position narrow gap hot wire TIG[J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(8): 12–15.
- [10] 闵晓峰, 王元兴, 吴梦先, 等. SUS304L 用高韧性不锈钢焊材选择与性能研究[J]. 压力容器, 2021, 38(6): 22–27.
- MIN Xiaofeng, WANG Yuanxing, WU Mengxian, et al. Research on the selection and performance of high toughness stainless steel welding material for SUS304L[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(6): 22–27.
- [11] 吕旭伟, 谭文良, 朱德才, 等. 核电厂管道卡钳式全位置自动焊工艺[J]. 电焊机, 2021, 51(2): 55–59.
- LV Xuwei, TAN Wenliang, ZHU Decai, et al. Study on caliper type all-position automatic welding technology of pipeline in nuclear power plant[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(2): 55–59.
- [12] 刘坤. 管道全位置熔化极氩弧自动焊施工技术探索[J]. 焊接技术, 2020, 49(5): 57–58.
- LIU Kun. Discussion on the construction technology of all position GMAW of pipeline[J]. Welding Technology, 2020(5): 57–58.

作者简介: 刘万存(1985), 男, 高级工程师, 主要从事自动化焊接装备与工艺方面的研究, 通信地址: 116113 辽宁省大连市甘井子区大连湾棉花岛一重集团大连核电石化有限公司, E-mail: willian_85@163.com。

本文引用格式:

刘万存, 袁亮文, 赵佳. 全位置不锈钢内壁堆焊技术研究[J]. 压力容器, 2022, 39(4): 25–32.

LIU Wangcun, YUAN Liangwen, ZHAO Jia. Study on surfacing technology of all-position stainless steel inner wall[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(4): 25–32.

(上接第 8 页)

[19] WEN J, YANG H Z, WANG S M, et al. Numerical investigation on baffle configuration improvement of the heat exchanger with helical baffles[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 438–448.

[20] WEN J, YANG H Z, WANG S M, et al. PIV experimental investigation on shell-side flow patterns of shell and tube heat exchanger with different helical baffles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104: 247–259.

[21] YANG S F, CHEN Y P, WU J F, et al. Influence of baffle configurations on flow and heat transfer characteristics of unilateral type helical baffle heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 133: 739–748.

[22] YANG S F, CHEN Y P, WU J F, et al. Investigation

on shell side performance in half-cylindrical desuperheating zone of ladder type helical baffle heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 175(1–2): 115334.

[23] BERGMAN T L, LAVINE A S, INCROPERA F P, et al. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2011: 995–1005.

作者简介: 苏金栋(1997), 男, 研究方向为强化传热技术, 通信地址: 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号东南大学能源与环境学院, E-mail: 1372934898@qq.com。

通信作者: 陈亚平(1956), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为强化传热技术, 通信地址: 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼 2 号东南大学能源与环境学院, E-mail: ypgchen@sina.com。

本文引用格式:

苏金栋, 陈亚平, 吴嘉峰, 等. 半圆柱空间梯式螺旋折流板换热器传热性能试验研究[J]. 压力容器, 2022, 39(4): 1–8.

SU Jindong, CHEN Yaping, WU Jiafeng, et al. Experimental study on heat transfer performances of ladder type helical baffle heat exchangers in half-cylindrical space[J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(4): 1–8.