

doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2021.03.002



神钢 309LCb 不锈钢药芯焊丝单层堆焊工艺试验

王天先,邱伏礼,张 凯,刘宝剑

(青岛兰石重型机械设备有限公司,山东青岛 266426)

摘要:采用日本神钢产 CO₂ 气体保护焊用 309LCb 不锈钢药芯焊丝,在不同焊道搭接量下进行单层堆焊焊接工艺试验。结果表明,焊道搭接量 2~3 mm 可使单层堆焊过程稳定,焊接工艺性良好,堆焊层距表面 3 mm 范围内化学成分和铁素体数、金相组织、硬度值、晶间腐蚀、氢剥离以及各项理化性能满足要求。

关键词:药芯焊丝;堆焊;焊道搭接量;晶间腐蚀;氢致剥离

中图分类号:TH49;TG42;TG17

文献标志码:A

Single-layer surfacing welding process test for KCO 309LCb stainless steel flux cored wire

WANG Tianxian, QIU Fuli, ZHANG Kai, LIU Baojian

(Qingdao LS Heavy Machinery Equipment Co., Ltd., Qingdao 266426, China)

Abstract: The single-layer surfacing welding process test was carried out with 309LCb stainless steel CO₂ gas shielded flux cored wire from Japan KCO under different weld pass overlap quantities. The results show that the 2~3 mm weld pass overlap quantity could make the single-layer surfacing welding process stable and the weldability is good, the chemical composition and ferrite number, metallographic structure, hardness value, intergranular corrosion, hydrogen disbonding and various physical and chemical properties of the surfacing layer within 3 mm from the surface meet the requirements.

Key words: flux-cored wire; surfacing; weld pass overlap; intergranular corrosion; hydrogen induced disbonding

0 引言

CO₂ 气体保护焊用药芯焊丝堆焊因具有生产效率高、焊缝成形美观、焊后熔渣薄且易去除,适应全位置焊接,可进行半自动和自动化的焊接等诸多优点,药芯焊丝电弧焊(FCAW)不锈钢双层堆焊技术已在加氢设备零部件内壁堆焊中应用。目前,单层宽带极堆焊技术已在国内外压力容器领域得到应用^[1],也是大型压力容器耐蚀层堆焊的发展方向,但 FCAW 单层堆焊技术在国内外鲜见使用。近几年,焊材厂商均在积极研发不锈钢 FCAW 单层堆焊焊材。本次试验采用日本神钢 CO₂ 气体保护 309LCb 不锈钢药芯焊丝,主要控制

堆焊焊道之间的搭接量,减少堆焊层由于稀释而造成的增碳、合金元素降低及焊后热处理所形成的增碳带,通过含 Cb 元素稳定化的超低碳型不锈钢焊材来降低碳含量,使堆焊层具有优良的抗 H₂S 等介质的应力腐蚀性能^[2]。本文按照《加氢高压设备用单层堆焊材料工程技术条件》的要求,对 FCAW 单层不锈钢堆焊进行焊接评定及试验。

1 评定试验及试验条件

(1) 试验采用 350 mm × 240 mm × 40 mm 的 12Cr2Mo1R 试板,其化学成分如表 1 所示;采用 Ø1.6 mm 日本神钢 309LCb 药芯焊丝熔敷金属,其化学成分见表 2。

表 1 12Cr2Mo1R 钢板化学成分

Tab. 1 Chemical composition of 12Cr2Mo1R steel plate

%

元素	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
数值	0.13	0.002	0.004	0.05	0.60	2.43	0.03	1.02	0.02

表 2 309LCb 焊丝熔敷金属化学成分

Tab. 2 Chemical composition of 309LCb wire deposited metal

%

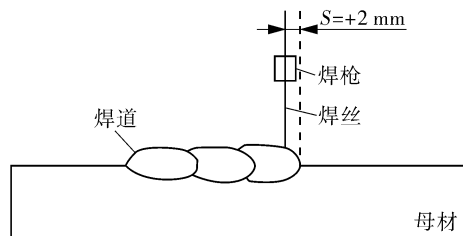
元素	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Nb
数值	0.032	0.002	0.016	0.41	0.99	23.8	12.35	0.04	0.04	0.018	0.82

(2) 试验采用 OTC 半自动 CO₂ 气体保护焊接设备,预先设置焊接工艺参数(见表 3),进行单层堆焊。试件 S1, S2 焊道搭接量分别为 2~3 mm, 0~-1 mm,其余参数均相同。堆焊前试件表面

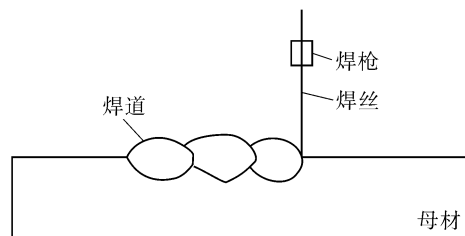
按 NB/T 47013.4—2015《承压设备无损检测 第 4 部分:磁粉检测》进行 100% 磁粉检测合格。堆焊层焊道搭接量用 S 表示,具体搭接量如图 1 所示。

表 3 CO₂ 气体保护药芯焊丝单层堆焊工艺参数Tab. 3 Single-layer surfacing process parameters of CO₂ gas shielded FCAW

试件	焊接电流/ A	电弧电压/ V	焊接速度/ (mm·min ⁻¹)	干伸长度/ mm	焊道搭接量/ mm	预热/层间 温度/℃	电源种类 及极性	热输入量/ (kJ·cm ⁻¹)	气体流量/ (L·min ⁻¹)
S1	220~230	28~30	230	20~30	2~3	120/250	直流反接	16.07~18.00	15~20
S2	220~230	28~30	230	20~30	0~-1	120/250	直流反接	16.07~18.00	15~20



(a) 试件 S1



(b) 试件 S2

图 1 焊道搭接量示意

Fig. 1 Schematic diagram of weld pass overlap

(3) 试件焊接后分别进行最小模拟焊后热处理 [Min. PWHT(690±14)℃×8 h] 和最大模拟焊后热处理 [Max. PWHT(690±14)℃×32 h], 装炉温度≤400℃,升、降温速度≤55℃/h,试件随炉冷至 400℃以下出炉空冷。

(4) 在堆焊层表面往下测定堆焊层的厚度、

熔深及稀释率。技术条件要求堆焊层厚度≥4.5 mm,有效厚度 3 mm;熔深≥0.8 mm;稀释率≥16%。

(5) 焊接状态下,从堆焊层表面开始每间隔 0.5 mm、直至距表面 3 mm 检测堆焊层的化学成分、铁素体数(FN),且化学成分及铁素体数应满足表 4 中要求。

表 4 距表面 3 mm 处堆焊层化学成分(%)及铁素体数 FN 要求

Tab. 4 Requirements for chemical composition (%) and ferrite number FN within 3 mm from the surface

项目	C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb	N	FN
数值	≤0.05	≤0.020	≤0.025	≤0.90	0.5~2.5	18.0~21.0	9.0~11.0	≤0.5	≤0.20	8×C%~1.0	≤0.05	3~10

(6) 试件经 Max. PWHT 后,进行堆焊层剪切强度、侧弯、硬度、晶间腐蚀试验及氢致剥离试验。

2 检测项目及结果分析

2.1 工艺性及外观成形

单层堆焊焊材焊接工艺性较好,送丝顺畅,电弧稳定性好,飞溅小,脱渣性好;堆焊层表面无粘渣、气孔等工艺缺陷;堆焊层焊道间的搭接量如欠佳,将对堆焊层的侧弯性能影响较大^[3]。试件 S1, S2 堆焊层焊道外观如图 2 所示。可以看出,试件 S1 堆焊层焊道之间搭接平整,表面成形美观,焊道宽度为 16 ~ 20 mm,表面不平度最大为 0.8 mm;试件 S2 堆焊层焊道之间搭接较平整,表面成形尚可,焊道宽度 18 ~ 22 mm,表面不平度最大为 1.1 mm。



图 2 试件堆焊层焊道外观

Fig. 2 Appearance of weld pass on specimen surfacing layer

2.2 无损检测

对焊态下和经 Max. PWHT 的试件,分别按 NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第 5 部分:渗透检测》、NB/T 47013.3—2015《承压设备无损检测 第 3 部分:超声检测》,对堆焊层表面进行 100% PT 检测、结合面进行 100% UT 检验,检测结果均合格。

表 5 焊态下堆焊层不同位置化学成分 (%) 及铁素体数 FN

Tab. 5 Chemical composition (%) and ferrite number FN of different positions of surfacing layer under as-welded condition

检测位置	试件	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	Cu	Ni	N	Nb	FN
表面	S1	0.023	0.84	0.28	0.003	0.015	20.27	0.12	0.010	10.86	0.050	0.53	9.2
表面	S2	0.024	0.84	0.28	0.003	0.014	20.25	0.11	0.010	10.75	0.051	0.52	9.2
距表面 0.5 mm	S1	0.024	0.85	0.28	0.002	0.014	20.22	0.12	0.010	10.67	0.050	0.53	9.7
距表面 0.5 mm	S2	0.025	0.85	0.29	0.003	0.014	20.15	0.12	0.010	10.57	0.050	0.52	9.6
距表面 1 mm	S1	0.026	0.84	0.29	0.002	0.015	20.02	0.11	0.003	10.48	0.048	0.55	9.7
距表面 1 mm	S2	0.027	0.84	0.28	0.003	0.015	19.82	0.12	0.010	10.39	0.048	0.55	9.0
距表面 1.5 mm	S1	0.031	0.79	0.29	0.002	0.014	20.07	0.14	0.006	10.44	0.048	0.49	9.0
距表面 1.5 mm	S2	0.032	0.80	0.30	0.003	0.015	19.61	0.16	0.005	10.28	0.047	0.50	8.7
距表面 2 mm	S1	0.028	0.84	0.29	0.002	0.014	19.82	0.14	0.003	10.42	0.046	0.52	8.9
距表面 2 mm	S2	0.035	0.82	0.29	0.003	0.014	19.43	0.18	0.003	10.12	0.046	0.53	8.1
距表面 2.5 mm	S1	0.028	0.82	0.29	0.003	0.016	19.51	0.13	0.010	10.20	0.044	0.50	8.7
距表面 2.5 mm	S2	0.039	0.88	0.31	0.003	0.016	19.10	0.18	0.006	9.83	0.043	0.51	7.5
距表面 3 mm	S1	0.040	0.91	0.33	0.002	0.014	19.11	0.19	0.010	9.95	0.042	0.55	7.1
距表面 3 mm	S2	0.043	0.97	0.36	0.003	0.016	18.73	0.20	0.008	9.35	0.043	0.50	6.9

2.3 堆焊层厚度及熔深检测

采用超声波测厚检测堆焊层厚度,试件 S1 为 4.6 ~ 4.9 mm,试件 S2 为 4.2 ~ 4.6 mm;采用宏观金相测量堆焊层厚度,试件 S1 为 4.6 ~ 5.0 mm,试件 S2 为 4.3 ~ 4.7 mm。堆焊层熔深平均值约为 0.83 mm,见图 3。

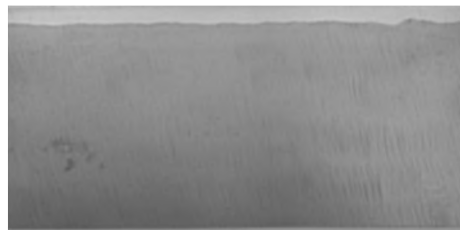


图 3 堆焊层熔深宏观检测

Fig. 3 Macroscopic examination of penetration depth of surfacing layer

2.4 堆焊层化学成分及铁素体数检测

焊态下试件 S1, S2 堆焊层距表面不同位置的化学成分结果见表 5,并根据“WRC—1992 (FN) 图”计算出堆焊层铁素体数 FN^[4];同时从堆焊层表面开始每隔 0.5 mm、直至距表面 3 mm 处,按 GB/T 1954—2008《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法》检测铁素体数,每个位置测 6 点,结果见表 6。

表6 焊态下堆焊层不同位置磁性法铁素体数 FN 测量结果Tab.6 Measurement results of ferrite number FN by magnetic method at different positions of surfacing layer under as-welded condition

测量位置	试件	磁性法 FN
表面	S1	5.0,6.7,7.4,7.2,7.5,7.0
表面	S2	6.1,6.6,7.3,7.5,6.9,7.5
距表面 0.5 mm	S1	6.2,6.4,8.0,8.8,8.6,8.6
距表面 0.5 mm	S2	6.3,6.8,6.1,6.8,7.1,7.7
距表面 1 mm	S1	6.7,6.8,6.6,6.1,6.6,7.6
距表面 1 mm	S2	7.3,6.8,6.7,6.1,6.2,7.2
距表面 1.5 mm	S1	6.7,6.2,6.8,7.0,6.5,6.2
距表面 1.5 mm	S2	5.9,6.4,6.5,6.1,5.9,6.1
距表面 2 mm	S1	6.4,6.2,6.9,6.5,6.2,5.4
距表面 2 mm	S2	5.8,6.3,5.4,5.7,5.5,5.2
距表面 2.5 mm	S1	5.6,5.9,5.7,5.6,5.9,5.4
距表面 2.5 mm	S2	5.0,5.5,5.2,4.9,5.2,4.9
距表面 3 mm	S1	4.8,5.1,4.6,4.7,4.9,5.2
距表面 3 mm	S2	4.1,4.8,4.0,4.2,3.9,4.3

由表 5,6 可以看出,试件 S1,S2 堆焊层化学成分均满足技术条件的要求;从堆焊层表面至距表面 3 mm 处,C 含量呈增加趋势,Cr,Ni 含量呈降低趋势,其他元素含量较稳定;但试件 S2 化学成分比试件 S1 变化幅度大,说明焊道搭接量少对堆焊层化学成分有一定的稀释。因此,在堆焊过程中焊道间的搭接量控制在 2~3 mm 为最佳,这样既能保证堆焊过程的稳定性,又能确保堆焊层各元素含量满足技术要求。

众所周知,堆焊层中各元素的含量因母材的稀释和焊接过程中电弧的氧化烧损而低于原焊材中的各元素含量,但 Ni 元素属于不锈钢焊缝金属中活性小的合金元素,在堆焊过程中基本不参与氧化反应,只有母材的稀释,因此,可通过 Ni 元素的含量的变化计算堆焊层的稀释率^[5]。

通过表 2 和表 5 中 Ni 元素含量,根据公式 $C_o = DC_b + (1 - D)C_d$ (式中, C_o 为元素在堆焊层中的实际质量百分含量; D 为稀释率; C_b 为元素在母材中的质量百分含量; C_d 为元素在非稀释堆焊层中的质量百分含量,此处的 C_d 即为原焊丝熔敷金属中 Ni 元素的质量百分含量)^[6],计算从堆焊层表面开始每隔 0.5 mm、直至距表面 3 mm 处,试件 S1 最大稀释率 D 约为 18.2%,试件 S2 最大稀释率 D 约为 22.3%,因此应控制焊道搭接量来降低堆焊层化学元素的稀释,保证堆焊层的化学成分。

奥氏体不锈钢的堆焊层如是单相奥氏体会产生热裂纹,因此需在奥氏体焊缝中有一定量的铁素体是非常必要的^[7]。从表 5,6 中可以看出,在焊态下的堆焊层从表面往下 3 mm 范围内,按“WRC-1992(FN)图法”计算的堆焊层铁素体数 FN 在 6.9~9.7 之间,磁性法检测的铁素体数 FN 在 7.3~8.6 之间,均满足技术要求,且两者的数据基本吻合;但从堆焊层表面往下直至距表面 3 mm 处,堆焊层铁素体数呈下降趋势,且试件 S2 下降趋势较大,表明焊道搭接量对堆焊层铁素体数也有一定的影响。

2.5 堆焊层弯曲性能检测

(1)试件 S1,S2 经 Max. PWHT 热处理后,按 NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》要求,分别制备弯曲试验各 8 件,其中每个试件大侧弯 4 件(2 件平行于堆焊方向,2 件垂直于堆焊方向, $a = 10 \text{ mm}$, $D = 4a$, $\alpha = 180^\circ$)、小侧弯 4 件(2 件平行于堆焊方向,2 件垂直于堆焊方向, $a = 3 \text{ mm}$, $D = 4a$, $\alpha = 180^\circ$),垂直和平行于焊道的试样均无超标缺陷。

(2)在试件经过最大热处理后,按照 GB/T 4340—2012《金属材料 维氏硬度试验》进行硬度检测,测量位置如图 4 所示,其堆焊层表面 5 点、堆焊层中间 5 点、熔合线 5 点、母材 3 点,每隔 2 mm 打 1 点,检测结果如表 7 所示。由表 7 中可以看出,堆焊层硬度值均满足技术条件要求值 $\leq 237 \text{ HV}_{10}$ 。

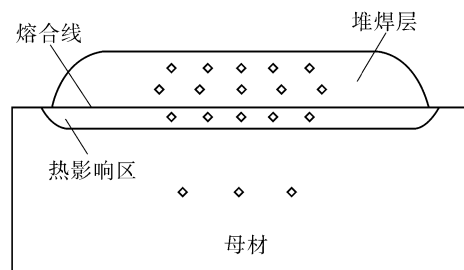


图4 堆焊层硬度检测示意

Fig.4 Hardness test diagram of surfacing layer

(3)试件经 Max. PWHT 后,按照 GB/T 6396—2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》加工剪切试样 2 件,检测堆焊层与母材结合面的剪切强度,其中试件 S1 为 430,435 MPa,试件 S2 为 450,465 MPa,均满足标准剪切强度不小于 210 MPa 的技术要求。

表 7 堆焊层硬度检测结果(硬度 HV10/15)

Tab. 7 Test results of hardness of surfacing layer (HV10/15)

试件	表面	堆焊层	熔合线	母材
S1	193,194,200,196,197	190,196,191,193,195	200,204,198,192,195	178,176,179
S2	196,192,205,198,193	195,198,197,192,199	212,209,211,208,199	173,178,181

2.6 金相检测及分析

试件 S1 经 Max. PWHT 后,按照 GB/T 226—2015《钢的低倍组织及缺陷酸蚀检验法》及 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》对试件横截面(包括堆焊层和母材)进行宏观金相及微观金相组织检测,横向受检面在 20 倍放大镜下观察,未发现裂纹、孔穴、夹杂、未熔合、未焊透

等焊接缺陷;堆焊层结合面熔合良好,母材和热影响区显微组织为贝氏体,堆焊层显微组织为奥氏体+少量铁素体,在熔合线母材侧有宽窄不一的脱碳层,而堆焊层侧有深度不一的增碳区和 Cr 的稀释层,在熔合区一般易出现低碳马氏体黑带^[8-10]。图 5 示出试件 S1 不同区域的显微金相组织。



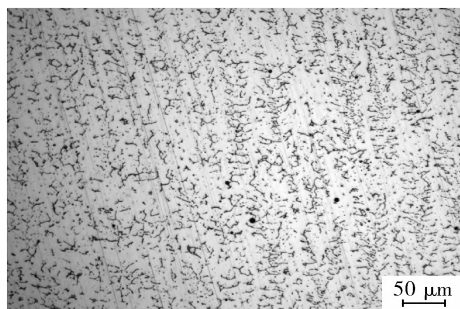
(a) 堆焊层及母材熔合线



(b) 母材



(c) 热影响区



(d) 堆焊层

图 5 不同区域显微金相组织

Fig. 5 Micrometallographic structure in different regions

2.7 晶间腐蚀试验

试件 S1, S2 经 Max. PWHT 后,按 GB/T 4334—2008《金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法》中的 E 法,制作 100 mm×20 mm×3 mm 的晶间腐蚀试样 2 件,经腐蚀后,采用直径为 5 mm 压头进行弯曲 180°,试件 S1 表面无晶间腐蚀产生的裂纹,试件 S2 有 1 件出现晶间腐蚀裂纹,表明焊道搭接量过少造成堆焊层厚度减薄,使堆焊层产生增碳、Cr 的稀释增加,堆焊层晶间腐蚀倾向加大。

2.8 氢剥离试验

加氢反应器处在高温、高压、临氢介质状态下,堆焊层和母材之间的界面在正常操作过程中积累了较多的氢,当停工快速降温时,基体内溶解的氢来不及逸出被困在界面上,沿堆焊层向外扩散^[11],由于堆焊层和母材金属的热膨胀系数不同,冷却时内壁比外壁降温快,产生大的切向应力,在比较薄弱的部位产生剥离,称氢剥离裂纹。两焊道的搭接部位最易产生氢剥离裂纹,剥离裂纹大多为片状,且基本平行于堆焊层的熔合面一

侧,且沿着熔合面上粗大奥氏体晶粒的晶界形成和扩展。试件 S1 在经 Max. PWHT 后,制作 $\varnothing 73 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$ 氢剥离试棒,试验按照 ASTM G146-01-2007 标准进行。

(1)第 1 次循环:充氢压力 18 MPa,升温速率 $50 \text{ }^\circ\text{C/h}$,保温温度为 $(475 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$,保温时间 48 h,降温速率为 $(150 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C/h}$,氢气纯度为 98.9%。

(2)第 2 次循环:充氢压力 18 MPa,升温速率 $50 \text{ }^\circ\text{C/h}$,保温温度为 $(475 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$,保温时间 48 h,降温速率为 $(260 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C/h}$,氢气纯度为 98.9%。

(3)试验结果:在试样充氢前、第 1 次循环结束、第 2 次循环结束后 48 h 和 7 天后,分别按照 ASTM G146-01-2007 对堆焊层结合面进行超声波检测,均未产生剥离现象。

3 结论

(1)采用日本神钢 CO_2 气体保护焊用 309LCb 不锈钢药芯焊丝进行单层堆焊,焊道搭接量在 2~3 mm 时,焊接工艺性良好,焊道表面成形美观,表面不平度最大 0.5 mm,单层堆焊厚度大于 4.5 mm,堆焊层及结合面无损检测未发现超标缺陷;焊道搭接量在 0~-1 mm 时,表面不平度最大 1 mm,单层堆焊最小厚度为 4.2 mm,会产生晶间腐蚀现象。

(2)焊道搭接量在 2~3 mm 时,堆焊层厚度大于 4.5 mm,从堆焊层表面往下直至距表面 3 mm 处,堆焊层化学成分、铁素体数 FN,堆焊层各项理化性能、硬度值、晶间腐蚀、显微金相组织等,均符合技术条件要求,且氢剥离试验合格。

(3)试验结果表明,日本神钢 CO_2 气体保护焊用 309LCb 不锈钢药芯焊丝采用单层堆焊工艺,控制合适的焊道搭接量,堆焊层各项性能均能满足《加氢高压设备用单层堆焊材料工程技术条件》的要求。

参考文献:

[1] 刘宝剑,孔凡红,王天先,等. 国产单层带极电渣堆焊焊材在加氢反应器的应用[J]. 压力容器,2019,36(9):70-77.
LIU Baojian, KONG Fanhong, WANG Tianxian, et al. Application of domestic monolayer strip electroslag surfacing in hydrogenation reactor [J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(9): 70-77.

[2] 张鹏林,赵文军,周涛,等. 不锈钢药芯焊丝堆焊技术在压力容器中的应用[J]. 电焊机,2006,36(12):60-62.
ZHANG Penglin, ZHAO Wenjun, ZHOU Tao, et al. Application of surfacing welding technique using stainless steel flux-cored wire in pressure vessel [J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(12): 60-62.

[3] 王天先. CO_2 气保药芯焊丝堆焊侧弯不合格原因分析[J]. 电焊机,2010,40(2):74-76.
WANG Tianxian. Analysis cladding welding with side-bend unqualified of FCAW with CO_2 gas-shielded [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(2): 74-76.

[4] 侯亚芳. 国产焊材 309LNb 单层堆焊技术研究[J]. 焊接技术,2015,44(7):64-66.
HOU Yafang. Study on monolayer surfacing technology of domestic 309LNB welding material [J]. Welding Technology, 2015, 44(7): 64-66.

[5] 陈志林,刘应虎. 90 mm 宽带极堆焊奥氏体不锈钢的化学成分及铁素体 FN 分析[J]. 压力容器,2011,28(11):41-46.
CHEN Zhilin, LIU Yinghu. Chemical elements and ferrite number analysis of austenitic stainless steel surfacing process with 90 mm strip electrode [J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(11): 41-46.

[6] 段莉蕾,谷文. 临氢设备耐蚀堆焊层合金元素设计含量的合理性分析[J]. 压力容器,2017,34(1):67-72.
DUAN Lilei, GU Wen. Rationality analysis on alloy element design content of corrosion resistant overlay welding of some hydrogen-contacting equipment [J]. Pressure Vessel Technology, 2017, 34(1): 67-72.

[7] 毛大兴,李平瑾. 加氢反应器监造过程中的质量控制(一)[J]. 压力容器,2005,22(3):22-25.
MAO Daxing, LI Pingjin. Quality control in supervising the manufacture of hydrogenated reactor (1) [J]. Pressure Vessel Technology, 2005, 22(3): 22-25.

[8] 王惠斌. 不锈钢堆焊层金相组织分析[J]. 石油化工设备,2003,32(5):45-46.
WANG Huibin. Analysis of typical micro-structure in cladding layer of stainless steel [J]. Petro-Chemical Equipment, 2003, 32(5): 45-46.

[9] 张学杰,张兴元,姚润钢,等. 焊接参数对自保护药芯焊丝熔敷金属组织及韧性的影响[J]. 焊接,2018(5):48-52.
ZHANG Xuejie, ZHANG Xingyuan, YAO Rungang, et al. Effect of welding parameters on microstructure and toughness of deposited metals by self-shielded flux cored wires [J]. Welding & Joining, 2018(5): 48-52.

GONG Weimin, WANG Chen, XIAO Ke. A preheating method of tube sheet for secondary side hydrostatic test of steam generator; CN11351021A[P]. 2020 - 06 - 30.

作者简介:吴雷(1984),男,高级工程师,主要从事核电厂机械设备维修和维修管理工作,通信地址:314300 浙江省海盐市 602 信箱, E-mail: wul@cnp. com. cn。

本文引用格式:

吴雷,李夏书,代巍巍,等. 蒸汽发生器二次侧水压试验管板加热研究及应用[J]. 压力容器,2021,38(3):73-79.

WU Lei, LI Xiashu, DAI Weiwei, et al. Research and application of tubesheet heating in secondary side hydrostatic test of steam generator[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(3):73-79.

(上接第 17 页)

[10] 王恒,吴瑶,季文,等. 焊接工艺参数对 E309L 药芯焊丝焊缝金属铁素体数的影响[J]. 焊接, 2020(6):28-32.

WANG Heng, WU Yao, JI Wen, et al. Effect of welding parameters on ferrite number of weld metal by E309L flux-cored wire [J]. Welding & Joining, 2020(6):28-32.

[11] 原荣婷,魏刚. 加氢设备用材的发展[J]. 压力容器,2003,20(12):39-42.

YUAN Rongting, WEI Gang. Development of material for hydrogenation equipment [J]. Pressure Vessel Technology, 2003, 20(12):39-42.

作者简介:王天先(1975),男,正高级工程师,主要从事压力容器的焊接工艺、焊接工艺评定、新材料的焊接及热处理试验研究工作,通信地址:266426 山东省青岛市黄岛区红石崖昆仑山北路 601 号青岛兰石重型机械设备有限公司, E-mail: wangtianxian@lshec. com。

本文引用格式:

王天先,邱伏礼,张凯,等. 神钢 309LCb 不锈钢药芯焊丝单层堆焊工艺试验[J]. 压力容器,2021,38(3):12-17.

WANG Tianxian, QIU Fuli, ZHANG Kai, et al. Single-layer surfacing welding process test for KCO 309LCb stainless steel flux cored wire[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(3):12-17.

(上接第 72 页)

[9] SUN Adan, FAN Deyuan. Prediction, monitoring, and control of ammonium chloride corrosion in refining processes[C]//Corrosion, 2010:10359(1-17).

[10] 偶国富,金浩哲,王艳萍,等. 基于流动分析的 REAC 管束冲蚀破坏预测方法[J]. 浙江理工大学学报,2009,26(5):700-704.

OU Guofu, JIN Haozhe, WANG Yanping, et al. Study on prediction method of REAC pipes' erosion failure based on liquid dynamical analysis [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition), 2009, 26(5):700-704.

[11] 金浩哲. 加氢空冷器系统动腐蚀理论及预测方法研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2012.

JIN Haozhe. Research on dynamic corrosion theory and prediction method of hydrogenation air cooler

system[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012.

[12] 陈炜,陈学东,顾望平,等. 石化装置设备操作完整性平台(IOW)技术及应用[J]. 压力容器,2010, 27(12):53-58.

CHEN Wei, CHEN Xuedong, GU Wangping, et al. Integrity operating window (IOW) technology and application of petrochemical plants equipment [J]. Pressure Vessel Technology, 2010, 27(12):53-58.

作者简介:陈炜(1980),男,教授级高级工程师,主要从事石化装置完整性管理技术研究工作,通信地址:230031 安徽省合肥市蜀山区长江西路 888 号合肥通用机械研究院有限公司, E-mail: 45894114@qq. com。

本文引用格式:

陈炜,余进,任日菊,等. 加氢装置热高分系统完整性操作技术研究[J]. 压力容器,2021,38(3):66-72.

CHEN Wei, YU Jin, REN Rijun, et al. Research on the integrity operation technology of top gas cooler system of the hot high pressure separator in the hydrogenation unit [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(3):66-72.