

试 验 研 究

不同焊接工艺对双相钢 (SAF2205) 金相组织的影响

李 健¹, 王玉山²

(1. 齐鲁石化胜利炼油设计院, 山东 淄博 255434; 2. 齐鲁石化建设公司, 山东 淄博 255400)

摘 要: 为了确定合理的焊接工艺, 使双相不锈钢 (SAF2205) 的焊接接头具有预期的金相组织和相比例, 以保证该双相钢的焊接接头具有较强的抗腐蚀能力, 本文分析研究了该材料在不同焊接工艺下产生的金相组织和相比例, 对实际生产中双相不锈钢的焊接具有较好地指导作用。

关键词: 双相不锈钢; 金相组织; 焊接; 相比例

中图分类号: G113.12; TG44 文献标识码: A 文章编号: 1001-4837(2004)02-0007-05

Effect on Metallographic Structure of Duplex Stainless Steel (SAF2205) by Different Welding Procedure

LI Jian¹, WANG Yu-Shan²

(1. Shengli Refinery Design Institute of Qilu Petrochemical Company, Zibo 255434, China;

2. Qilu Petrochemical Construction Company, Zibo 255400, China)

Abstract: In order to decide the reasonable welding procedure and make the weld joint for duplex stainless steel (SAF2205) have the intended metallographic structure and the ratio of phase as well as good corrosion resistant ability, the author researched the metallographic structure and the ratio of phase of different joint welded by different procedure. It can be as a guide to the welding for duplex stainless steel.

Key words: duplex stainless steel; metallographic structure; weld; ratio of phase

1 前言

氯化反应器是氯乙烯装置的核心设备, 其反应热靠内部的冷却管束带走。该管束原采用 SUS304L 材料制造, 因其工作环境恶劣, 所以数次发生腐蚀泄漏。后经分析研究决定: 该管束采用耐氯化物应力腐蚀性能优异的双相钢无缝钢管制造 (钢管牌号: SAF2205; 规格: $\Phi 89.1 \times 5.5$; Sandvik 生产)。其化学成分见表 1。对该管束而言, 其焊接要点就是要保证焊接接头具有同母材一样的优异抗腐蚀能力, 而决定该指标的主要因素就是金相组织。

众所周知, 双相钢是指金属金相组织中铁素体 F 与奥氏体 A 各占约 50 % 的不锈钢。在其固溶组织

中一般较少相的含量也要达到 30 %, 其焊接性能与奥氏体不锈钢相比, 焊缝的热裂倾向低, 与铁素体不锈钢相比, 焊接接头焊后状态脆化程度低, 而且 HAZ 中单相铁素体相的粗化程度也较低。正因为双相钢具有两相组织的特点, 所以, 它兼备奥氏体不锈钢的优良韧性和良好的焊接性与铁素体不锈钢较高的强度和耐氯化物腐蚀的性能。因而, F-A 双相不锈钢在石油化工、海水与废水处理、输油输气管道等领域获得越来越广泛的应用。

2 焊丝与焊接工艺

共选择了三种焊丝, 分别为 A207 焊丝、化学成分同母材一样的焊丝 (以下简称母材焊丝) 和

22.9.3.LT焊丝(Sandvik 生产),来分析研究焊接接头的金相组织。它们的化学成分见表2。

表1 SAF2205 双相不锈钢的化学成分(抽样实测值) (Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.01~0.02	0.46~0.52	0.82~0.94	0.001~0.024	0.001~0.002	21.38~22.07	5.11~5.56	2.79~3.24	0.16

表2 三种焊丝的化学成分

焊丝	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
A207	0.08	—	—	—	—	17.0~20.0	11.0~14.0	2.0~2.5	—
母材焊丝	0.01~0.02	0.46~0.52	0.82~0.94	0.001~0.024	0.001~0.002	21.38~22.07	5.11~5.56	2.79~3.24	0.16
22.9.3.LT	0.017	0.72	1.52	0.021	0.002	22.53	9	3.49	0.18

由于本管束所涉及到的材料厚度及接头型式较单一,所以焊接均采用氩弧焊,保护气体采用Ar+2%N₂^[1,2],流量约12 L/min;线能量控制在0.5~1.5 kJ/mm内;多层焊的层间温度须<150^[1~3];坡口示意图见图1,焊接工艺其它参数见表3;焊缝的化学成分见表4。

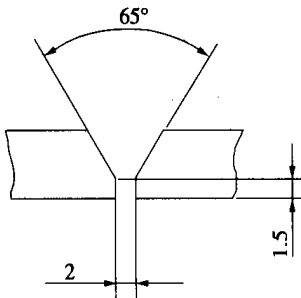


图1 焊接接头示意图

表3 焊接工艺参数

试样编号	填充金属	焊接工艺	焊丝直径(mm)	电弧电压(V)	焊接电流(A)	焊速(cm/min)
1	A207	一次焊接	2.4	11~13	80~130	8~9
2	母材焊丝	一次焊接	2.4	11~13	80~130	8~9
3	22.9.3.LT	一次焊接	2.4	11~13	80~130	8~9
4		分三层焊	2.4	11~13	110~140	7~10

表4 焊缝的化学成分(实测值) (%)

试样	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
1 [#]	0.023	0.40	0.82	0.015	0.003	20.90	8.22	2.70	0.44
2 [#]	0.024	0.38	0.81	0.014	0.002	20.84	5.48	2.58	0.41
3 [#]	0.023	0.42	1.07	0.013	0.003	21.00	6.62	2.92	0.57
4 [#]	0.021	0.28	0.89	0.013	0.003	21.61	6.19	3.04	0.54

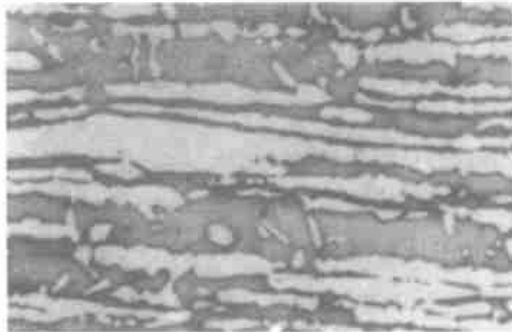
3 金相组织的观察与分析

将焊好的试样沿与焊缝垂直的方向切开并切割成小块,用金相砂纸磨制成金相试样。然后,腐蚀并使铁素体着色,在Nikon金相显微镜上观察金相组

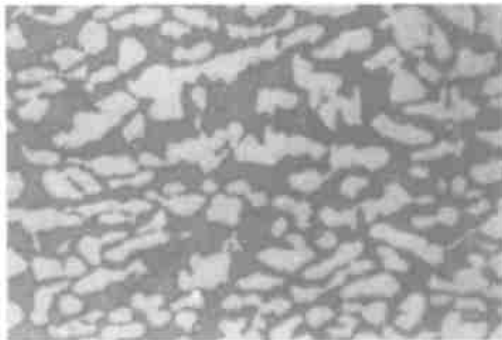
织。

3.1 基体的金相组织

为了便于对比,将母材制成试样,观察基体的金相组织。图2(a)为钢管的纵断面金相组织。由该图可以看出:组织存在明显的方向性,呈明显的带状组织,在铁素体的基体上分布着长条状奥氏体。该组织形态是在无缝钢管的生产过程中,金属受到轧压和拔拉而形成的。图2(b)为横断面的金相组织。由图可以发现:横断面为在铁素体基体上分布着块状的奥氏体,并且两相的比例接近相等。



(a) 纵断面



(b) 横断面

图2 基体的金相组织 400 ×

3.2 1[#]试样的金相组织

1[#]试样采用A207焊丝焊接。A207焊丝正常的组织应为单相奥氏体,但由于焊后的冷却速度较快,部分高温铁素体会残留下来,而使焊缝组织中有少量铁素体存在(见图3),但铁素体的量远远低于双

相不锈钢的要求。HAZ 的组织(见图 4)也发生了变化:奥氏体相的含量大大降低,A 分布在粗大的块状 F 边界上,而且有些 A 呈针状存在。这种组织对钢的性能将产生不利影响。

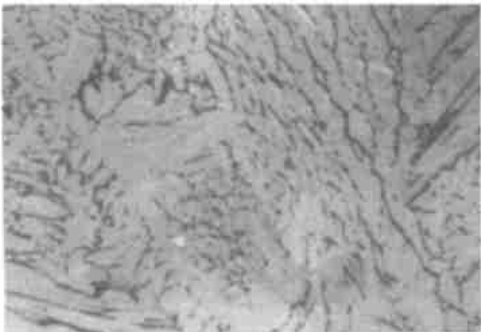


图 3 1[#] 试样的焊缝组织 400 ×

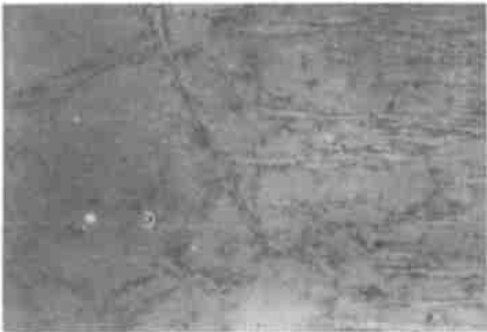


图 4 1[#] 试样的 HAZ 组织 100 ×

3.3 2[#] 试样的金相组织

2[#] 试样用母材焊丝作为填充材料焊接,焊缝组织是以 F 为基体的组织,在 F 的边界和内部分布着 A,焊缝组织较粗大。焊接 HAZ 的组织与焊缝基本相同,但奥氏体相的含量比基体略低(见图 5)。此种组织是由于在冷却过程中,F 向 A 转变不完全造成的。由于 F 的固 N 能力差,这种 F 含量过高的金相组织,容易析出 C - N 化合物而严重影响焊缝的冲击值,再加上 F 晶粒粗大,则必然导致接头的力学性能和防腐性能大大降低。

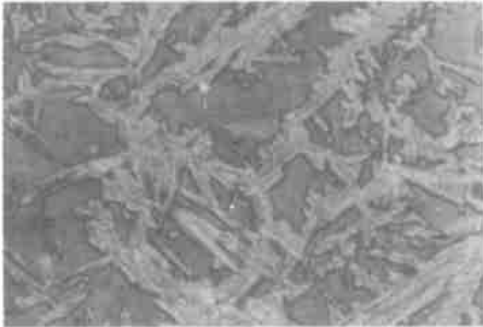
3.4 3[#] 试样的金相组织

3[#] 试样采用 22. 9. 3.LT 焊丝,一次焊接完成。焊缝组织为在 F 基体上分布着块状和针状奥氏体,焊接 HAZ 中的 A 含量明显下降,且组织也变粗大,见图 6。

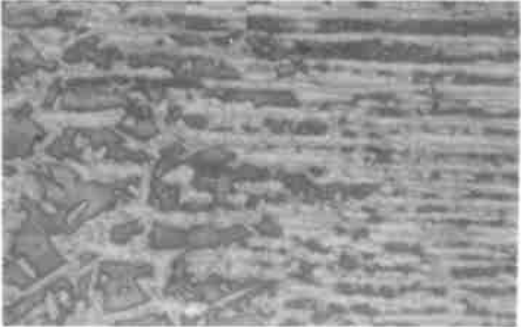
3.5 4[#] 试样的金相组织

4[#] 试样也采用 22. 9. 3LT 焊丝,但焊缝分 3 层焊接完成。焊缝三层组织中,各层的相比比例是不同的(参见表 5)。焊缝第一层(即管的内侧)A 含量为 40 %,其形态为小块状和部分针状(见图 7(a))。焊缝第二层 A 的含量有所提高,达到 43 %,其形态为

小块状和针条状,整体组织较第一层细密一些(见图 7(b))。焊缝第三层(即最外层)A 的含量减少,分布在铁素体的晶界和晶内(见图 7(c))。焊接 HAZ 中的 A 含量同样减少,A 分布在 F 的晶界和晶内,整个焊接 HAZ 比较窄。这说明焊缝分三层焊接,每一次焊接热输入较少,对基体的影响也相对较小。

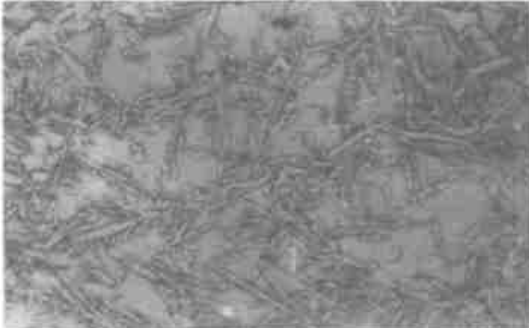


(a) 焊缝的金相组织



(b) HAZ 的金相组织

图 5 2[#] 试样的金相组织 100 ×



(a) 焊缝的金相组织



(b) HAZ 的金相组织

图 6 3[#] 试样的金相组织 100 ×

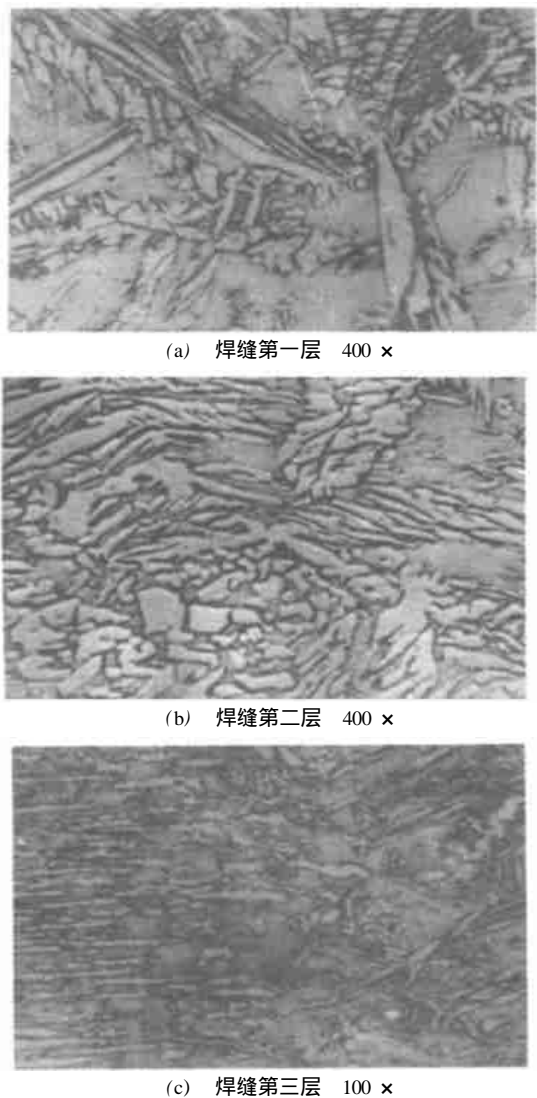


图 7 4# 试样焊缝的金相组织

4 焊接接头各区域的 F、A 相比例

表 5 焊接接头各区域中 A 所占的比例

试样 编号	1	2	3	4		
				第一层	第二层	第三层
基体	45 %	45 %	45 %	45 %		
焊缝	82 %	34 %	33 %	40 %	43 %	38 %
HAZ	17 %	32 %	25 %	21 %	22 %	22 %

双相不锈钢突出的耐应力腐蚀性能与其相比例有密切的关系,也就是说,要保证双相不锈钢的焊接接头具有同母材一样的各项优异性能,特别是优良的抗腐蚀性能,就必须使焊接接头中保持有适量的 F 和 A 组织。为了检查焊接接头中各区域的铁素体相和奥氏体相的多少,将试样放在德国产的 VIDAS 图象分析系统上进行两相组织比例鉴定,结果见表 5。从表 5 可以看出,采用 22.9.3.LT 焊丝作为填充

金属,由于焊丝中的 Ni 含量较高,而 Ni 作为 A 化成元素能促进 F 向 A 转变,所以,焊接接头可以达到满意的 A 含量。特别是采用三层焊接,在内层和中间层均得到了较满意的相比比例。

5 力学性能试验

根据使用经验,本管束除对材料的抗腐蚀性能要求异常苛刻之外,对材料力学性能的要求一般。所以本文着重介绍了材料和焊接接头的抗腐蚀性能,而对力学性能只测了下列指标(按相应标准加工试样,且置焊缝于试样中间),见表 6。在拉伸试验机上测试抗拉强度时发现,断裂均发生于基体部位。由表 6 可见,各试样的抗拉强度基本相同,这与断裂均发生于基体部位而不是焊缝和 HAZ 这一现象是吻合的。同时还可以发现 4# 试样的延伸率最大,这与上述分析的其组织中 A 含量较高是一致的。

表 6

试样	抗拉强度 (MPa)	延伸率 (%)	面弯 (弯曲 90°)	背弯 (弯曲 90°)
1#	691.8	2.4	合格	合格
2#	700.8	15.2	合格	合格
4#	709.8	20.2	合格	合格

注:3# 试样与 4# 试样基本相同,未测。

6 耐腐蚀状况

将上述四种试样和基体共五种试样加工成 15 mm ×8.0 mm ×5.0 mm 的小试块各 3 块,用砂纸磨光后用酒精洗净、吹干。用 1/100000 g 精度的电子分析天平称量试块的重量后,浸于 3 %的 HCl 溶液中(pH=1,温度 80)24 h,取出洗净吹干,通过称重,计算出单位时间内单位面积上的平均腐蚀率(g/h·m²,即每小时每平方米被腐蚀的克数),结果见表 7。然后对试块进行宏观观察及在 Nikon 金相显微镜下观察显微金相组织,并利用扫描电镜观察表面的腐蚀情况。

表 7 各试样的腐蚀率(g/h·m²)

1#	2#	3#	4#	基体试样
140.5	218.2	170.4	177.6	121.5

由表 7 可见,在 3 %浓度的盐酸中,其腐蚀速率是很大的。由于试样被严重腐蚀,致使焊缝内未熔化的基体材料都被腐蚀而暴露出来。图 8 是 1# 试样腐蚀情况的金相照片。HAZ 腐蚀比较严重,这是由于 HAZ 的组织比较粗大,铁素体含量多,在腐蚀

过程中铁素体优先被腐蚀。图 9、10 分别是基体和 3[#] 试样被腐蚀后的腐蚀边缘情况。铁素体先被腐蚀,许多奥氏体的条片还依然残留,HAZ 的大块铁素体被腐蚀,所以造成局部的快速腐蚀。图 11 是 2[#] 试样在扫描电镜下的形貌,可以看出其表面被腐蚀得很粗糙。然而 2[#] 试样却没有明显的过渡层组织,因此无局部的严重腐蚀,但整个焊缝组织粗大,整体焊缝腐蚀严重,从腐蚀速率来看也是最大的(见表 7)。



图 8 1[#] 腐蚀试样的金相照片 100 ×



图 9 基体腐蚀后的边缘 400 ×

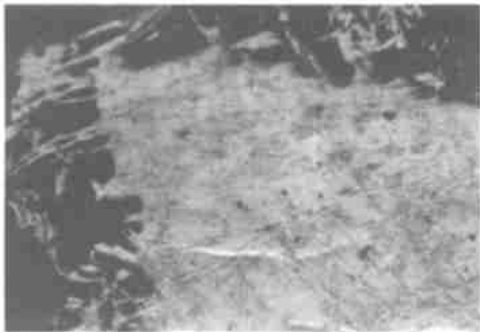


图 10 3[#] 试样腐蚀后的边缘 400 ×

按上所述,4[#] 试样焊缝的组织细小并且内层及中部焊缝的 F、A 两相的比例比较合理,所以其力学性能和耐腐蚀性能均较好。图 12、13 分别是 4[#] 试样的内侧焊缝和外侧焊缝边缘的腐蚀情况。外层被腐蚀的起伏比较大,内层腐蚀边缘比较平直,这是因为内、外层焊缝组织结构不同的原因。在扫描电镜下观察 4[#] 试样的腐蚀表面显示:内侧焊缝组织细小,两相分布合理,因而其耐蚀性能也好。其原因

是:铁素体的腐蚀被奥氏体有效的分割,使腐蚀减轻,这与基体的腐蚀情况相类似。同时发现 HAZ 受到的腐蚀比周围严重,但与其它试样相比,HAZ 很窄并且其组织也比较细小。

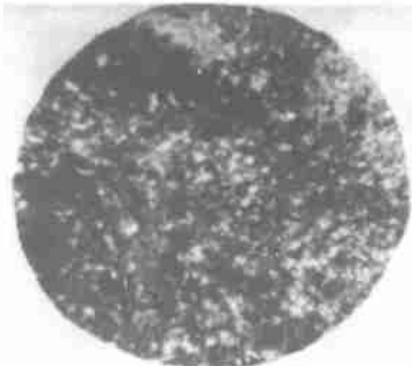


图 11 2[#] 腐蚀试样的扫描电镜像

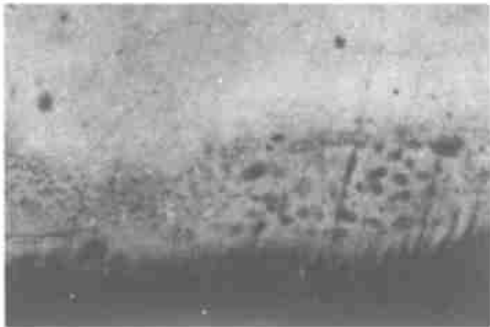


图 12 4[#] 试样内层焊缝的腐蚀边缘 50 ×

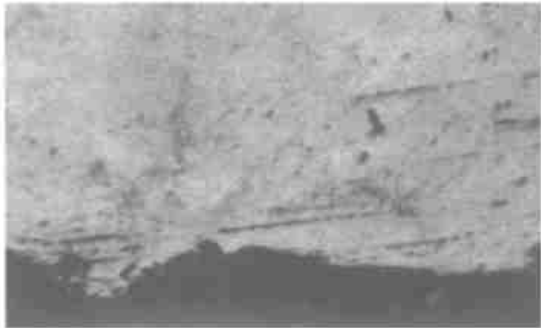


图 13 4[#] 试样外层焊缝的腐蚀边缘 50 ×

7 结语

- (1) 通过上述比较分析,4[#] 试样的焊缝组织比较好,两相的比例接近 1:1,奥氏体形态以块状为主,部分呈针状,且组织比较细小均匀。这样的组织和两相比例对确保焊接接头具有同母材一样的各项优异性能,特别是较好的抗腐蚀能力是至关重要的。
- (2) 对双相不锈钢的焊接,除应正确选择焊材、焊接方法、坡口等参数外,在兼顾焊接效率的情况下,应适当采用多道焊,低的熔敷率。这是因为采用多道焊时,后续焊道能促进前层 (下转第 31 页)

由表 10~13 可知,焊态堆焊层铁素体含量保持在 4.5%~8.2%之间,铁素体含量分布均匀。热处理后堆焊层铁素体含量保持在 4.4%~6.5%之间,铁素体含量分布均匀。

(3)手工堆焊的工艺评定结果(见表 14),堆焊层的化学成分及力学性能均满足技术条件要求。

表 10 过渡堆焊层热处理前铁素体含量 (%)

测量位置 焊道位置	—	二	三	四
第四条焊道	6.5	4.5	5.5	8.0
第五条焊道	5.0	5.0	6.5	6.6
第六条焊道	6.5	7.1	7.0	8.2
第七条焊道	6.2	7.2	6.0	6.8

表 11 过渡堆焊层热处理后铁素体含量 (%)

测量位置 焊道位置	—	二	三	四
第四条焊道	6.5	4.0	5.0	5.2
第五条焊道	5.0	6.5	5.5	7.0
第六条焊道	6.0	6.6	7.0	6.0
第七条焊道	4.5	5.2	4.0	7.2

在采取相应措施后,通过工艺评定验证了单层带极堆焊及手工堆焊的工艺规范。结果表明单层带极堆焊和手工堆焊堆焊层的各项技术性能指标均满

表 14 手工堆焊焊接工艺评定结果

横向大侧弯 4a 180°	纵向大侧弯 4a 180°	横向小侧弯 4a 180°	纵向小侧弯 4a 180°	堆焊层硬度 (共测 4 点)	晶间腐蚀 GB4334.5
完好	完好	完好	完好	RC<22	弯曲 180° 未发现裂纹

化学成分(距表面 0.5~1.5 mm 范围内取样)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb
0.03	0.70	1.90	0.008	0.018	20.0	9.65	0.158	0.20	0.20

Cr-Mo 钢配置的,故用 16MnR(HIC)堆焊时,焊接工艺规范应做适当调整,特别是焊条倾角及焊道之间的搭接量。

(上接第 11 页)焊道金属中的 F 进一步转变成 A,最终的焊缝成为以 A 占优势的两相组织。同时,焊接 HAZ 中的奥氏体相也增多,从而显著改善整个焊接接头的组织和性能。

参考文献:

[1] 匡异雄,陈建俊. 超级双相不锈钢设备的制造[J]. 压力容器,1999,6(4):40-48.

足要求。

表 12 耐蚀堆焊层热处理前铁素体含量 (%)

测量位置 焊道位置	—	二	三	四
第四条焊道	5.5	5.6	6.5	7.0
第五条焊道	6.0	6.5	6.5	6.8
第六条焊道	6.2	6.5	6.0	5.5
第七条焊道	6.0	5.5	4.5	6.0

表 13 耐蚀堆焊层热处理后铁素体含量 (%)

测量位置 焊道位置	—	二	三	四
第四条焊道	5.2	5.5	6.2	5.8
第五条焊道	6.1	6.0	6.3	6.5
第六条焊道	6.0	6.2	6.1	5.2
第七条焊道	6.2	5.8	4.4	6.1

3 结论

(1)采用国产单层堆焊焊带进行单层带极堆焊和国产手工堆焊焊条进行堆焊,各项技术指标完全达到加氢设备技术条件中堆焊的要求。

(2)采用手工堆焊,堆焊层铁素体含量与基体材料的种类有很大关系。因手工堆焊焊条一般都是按

收稿日期:2003-08-18 修稿日期:2003-11-11
作者简介:刘玉华(1962-),女,工程师,主要从事焊接工艺与压力容器焊接生产等方面工作,通讯地址:北京房山区燕山岗北路 26 号北京燕化建筑安装工程公司设备制造公司生产工艺科。

[2] 李卫东,顾永干. 双相不锈钢换热器设计制造技术[J]. 压力容器,2002,19(8):27-30.
[3] 吴玖,等. 双相不锈钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.

收稿日期:2003-12-09 修稿日期:2003-12-24
作者简介:李健(1968-),毕业于山东工业大学材料工程系焊接工艺及设备专业,工学学士,通讯地址:山东省淄博市齐鲁石化公司胜利炼油设计院。