

YI ZHONG NANHAN CAILIAO DE HANJIE
XINGONGYIXINJISHU SHIYONG SHOUC

异种难焊材料的焊接 新工艺新技术实用手册



安徽文化音像出版社

第四章 铜钢复合钢板的焊接 新工艺新技术

第一节 铜 - 钢复合钢板的焊接特点

钢 - 钢复合钢板常用脱氧铜或无氧铜作复层。钢和铜在高温时的晶格类型、晶格常数和原子半径等都很接近,这对焊接是有利的。但是熔点、热导率、线膨胀系数等物理性能差异较大,给焊接造成一定的困难。

钢与铜的线膨胀系数相差较远,而且铜 - 铁二元合金的结晶温度区间很大,故在焊接时容易产生热裂纹。铜对铁的表面活性高,液态铜或铜合金有可能向其所接触近缝区的钢表面内部渗透,使钢的近缝区形成渗透裂纹。实践证明,含 Ni、Al、Si 铜合金的焊缝金属对钢的渗透较少,而含 Sn 的青铜则渗透严重。此外,钢的组织状态也对渗透裂纹有重要影响。液态铜能浸润奥氏体而不能浸润铁素体,所以单相奥氏体钢比奥氏体 - 铁素体双相钢更易发生渗透裂纹。

第二节 铜 - 钢复合钢板焊接工艺

铜和铜镍合金复层的最好焊接方法是气体保护焊。铜复层厚度大于 3.2mm 时,推荐预热温度不小于 150℃,用直径小于 1.6mm 的铜焊条焊接。复层较薄时,若采用预热,则先去除一部分过渡层后再焊复层,以控制复层焊缝因稀释带

人的铁量,保证耐蚀性。复层厚度小于 2.3mm 时,应在钢上小心地熔敷一层铜,再用后倾焊法的半自动MIG焊,电弧直接作用在熔池上,而不作用在钢上,使第一层焊道的含铁量小于 5%,以防止热裂纹和渗透裂纹。

铜-钢复合板过渡层的焊接材料可按表 4-4-1 选取。铜-钢复合钢板对接时的坡口形式及尺寸见表 4-4-2。表中后两种是先焊复层后焊基层的坡口形式。

表 4-4-1 铜-钢复合板过渡层的焊接材料

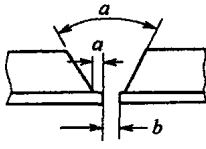
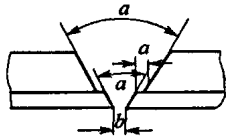
基层材料	复层材料				
	铜	铝青铜	磷青铜	硅青铜	白铜
低碳钢	ENiCu-7	TcuAl(T237) HSCuAl(HS213)	TcuSnB(T227) HSCuSn(HS212)	TcuAl(T237) HSCuAl(HS213)	ENiCu-7 或 TCuAl HSCuAl(HS213)
低合金钢	ENiCu-7	TcuAl(T237) HSCuAl(HS213)	TcuSnB(T227) HSCuSn(HS212)	TcuAl(T237) HSCuSn(HS212)	ENiCu-7 或 TCuAl HSCuAl(HS213)

注:括号内为焊条牌号或焊丝代号。

表 4-4-2 铜-钢复合钢板对接时的坡口形式及尺寸

接头形式	坡口尺寸				
	a/mm	b/mm	p/mm	H/mm	$\alpha/(\circ)$
	2~4	2~3	1~3	—	60
	—	2~3	1~3	1~3	60

续表

接头形式	坡口尺寸				
	a/mm	b/mm	p/mm	H/mm	$\alpha/(^\circ)$
	2~4	1~3	—	—	60
	2~4	1~3	—	—	60

第五章 复合渗铝钢的焊接 新工艺新技术

渗铝钢管具有优异的抗高温氧化性和耐蚀性,可代替价格昂贵的不锈钢和耐热钢,大大提高石化设备的使用寿命,具有十分显著的经济效益。在美、日、英、德等工业发达国家渗铝钢被广泛应用于石油、化工和电力等工业部门中。但是,渗铝钢管的焊接问题多年来一直阻碍着渗铝钢的推广应用。渗铝钢管的焊接有其复杂性,不同的渗铝工艺(如热浸铝法、固体粉末法、喷渗法等),渗铝钢管的焊接性能差异极大。生产中应根据不同渗铝钢的性能特点制定相应的焊接工艺。

第一节 渗铝钢的特性

渗铝钢是碳钢和低合金钢经过渗铝处理,在钢材表面渗入铝元素,形成0.2~0.5mm铁铝合金层的新型复合钢铁材料。渗铝钢具有优异的抗高温氧化性和耐蚀性,具有十分显著的经济效益。与原来未渗铝的钢材相比,渗铝钢可明显地提高抗氧化性的临界温度约200℃以上,在高温 H_2S 介质中的耐蚀性可提高数十倍以上。

近年来,渗铝钢也开始在我国一些产业部门(如电力、石油化工、汽车工业等领域)得到应用,并已显示出优越性。我国对渗铝钢焊接的研究大多是针对热浸渗铝钢的焊接,热浸渗铝工艺生产的渗铝钢渗层中Al、Fe含量,显微硬度及主和要本组成见表4-5-1,渗层深度变化对渗铝层中的Al含量及显微硬度的影响如图4-5-1所示。

表 4-5-1 热浸渗铝钢渗层中 Al、Fe 含量,显微硬度及主要相组成

距表层的距离/ μm	区域	Al 含量/%	Fe 含量/%	显微硬度/MH	主要相组成
0	表层	36.6	64.0	180	Al_2O_3
12	渗铝层外层	34.0	66.0	240	$\text{FeAl} + \text{Fe}_3\text{Al}$
18		32.7	68.1	490	
24		—	—	630	
32	渗铝层中层	29.2	70.4	820	$\text{Fe}_2\text{Al}_3 + \text{FeAl} + \text{Fe}_3\text{Al}$
55		26.5	73.2	740	
68		—	—	690	$\text{FeAl} + \text{Fe}_3\text{Al}$
80		—	—	614	
110		18.8	80.6	588	
130	渗铝层	10.8	89.2	423	$\text{Fe}_3\text{Al} + \alpha\text{-Fe(Al)固溶体}$
160		8.1	91.0	392	
180	渗铝层	1.4	97.8	290	$\alpha\text{-Fe(Al)固溶体} + \text{铁素体}$
190	与母材交界	0.3	99.2	270	

热浸渗铝钢在工件表面存在脆性外表层,该脆性层主要是含 Al 较高的 Fe-Al 化合物脆性相,如 $\text{Fe}_2\text{-Al}_3$ 相(54.71% Al)等。由于脆性外表层的存在,使渗铝钢的焊接性变差,在焊接过程中极易产生裂纹。对热浸渗铝钢及时进行退火处理对减少脆性外表层有利,但完全消除脆性外表层需要进行长时间的退火处理,这对钢材基体的组织性能可能产生不利的影晌。

我国针对电感应料浆工艺生产的渗铝钢进行过焊接性的深入研究。电感应料浆法渗铝工艺包括工件表面预处理、渗铝料浆配制、化学渗剂和保护剂的涂刷与干燥、电感应热扩散处理以及表面清理等工序。在渗铝过程中采用电感应加热,可使扩散渗铝时间从十几小时缩短到十几分钟内完成。而且可以通过改变工艺参数控制渗层厚度和渗层中的铝浓度,保证渗铝层质量,改善焊接性能。

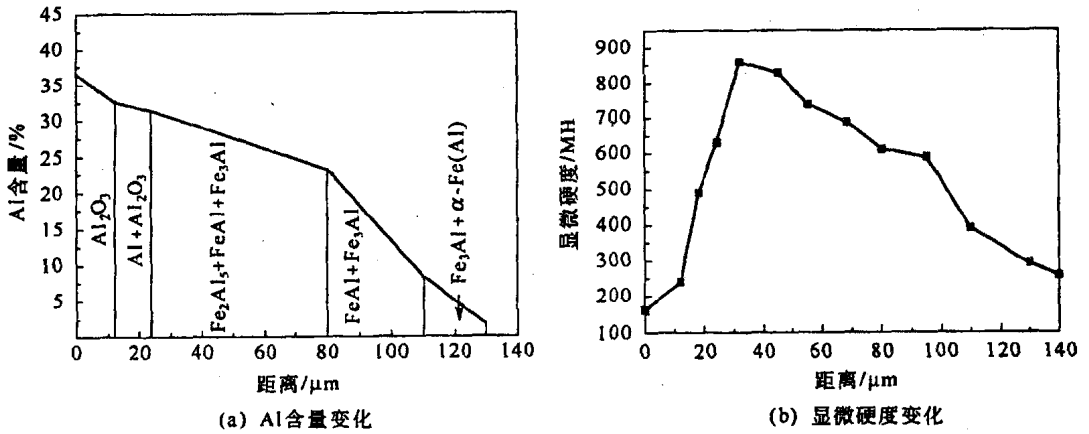


图 4-5-1 渗层深度渗铝层中 Al 含量及显微硬度的变化

第二节 渗铝钢焊接问题及解决措施

一、渗铝钢焊接中存在的问题

1. 焊接裂纹倾向

焊缝金属或熔合区产生裂纹是渗铝钢焊接中的主要问题之一。铝是铁素体化元素,焊接时渗层中铝元素的熔入易使焊缝和熔合区韧性下降。所以研制的专用焊条必须含有一定的合金含量(如 Cr、Mo、Mn 等),具有高的抗裂性,焊后不产生裂纹。

2. 熔合区耐蚀性下降

焊接区熔合不良或熔合区附近渗层中铝元素的降低,易导致渗铝钢焊接熔合区附近区域耐蚀性的下降,影响渗铝钢焊接结构的使用寿命。焊接中应采用尽可能小的焊接线能量或采取必要的工艺措施,减少熔合区附近铝元素的降低。

二、解决渗铝钢焊接问题的途径

国内外在生产中解决渗铝钢焊接问题主要有以下两个途径,并已取得良好的效果。

1. 将接头处的渗铝层去掉,用普通焊条焊接,焊后在焊接区域再喷涂一层铝。
2. 采用不锈钢焊条或渗铝钢专用焊条进行焊接。

第三节 渗铝钢的焊接新工艺新技术

渗铝钢管渗铝后一般不降低原有的强度性能或差异不大(见表4-5-2),从焊接角度看焊缝金属的强度性能是容易满足的。

表4-5-2 两种渗铝钢管渗铝前后的拉伸性能

母材	状态	抗拉强度 σ_b / MPa	屈服强度 σ_s / MPa	伸长率 δ / %	断面收缩率 ψ / %
20 碳素钢管 ($\phi 6 \times 114\text{mm}^2$)	渗铝前	400	250	20	36
	渗铝后	435,444,431(436.7)	230,244,233(237)	20,19,20(20.2)	38,39,47(41)
Cr5Mo 钢管 ($\phi 10 \times 114\text{mm}^2$)	渗铝前	550	—	17	40
	渗铝后	535,560,570(555)	—	19,20,22(20.3)	55,54,50(53)

注:括号中的数据为试验平均值。

复合渗铝钢管的焊接工艺步骤如下。

① 渗铝钢焊接接头区域钢管内壁焊后无法再用喷涂或其他方法处理,除了选用使焊缝金属本身耐热抗蚀的焊条以外,还必须从焊接工艺操作上保证单面焊双面成形。

② 施焊前在渗铝钢管对接接头内壁两侧涂敷焊接涂层,该涂层在焊接过程

中对熔池有托敷作用,防止焊穿和确保焊缝背面熔合区熔合良好;在焊接条件下使涂层中的化学渗剂迅速分解,产生活性铝原子并使之向焊接熔合区渗入,以补偿焊接接头背面熔合区渗层中铝的烧损,达到提高焊接熔合区抗高温氧化性和耐蚀性的目的。焊接涂层由化学渗剂层和保护剂层构成。化学渗剂层的作用是向焊接熔合区渗层提供补偿渗铝所必需的活性铝原子源和产生较高的铝势。保护剂层的作用是阻止焊接区域氧化性气氛对化学渗剂析出的活性铝原子氧化,保证补偿渗铝过程的进行。

③在渗铝钢管焊接区域外侧涂敷白垩粉以防止焊接飞溅,确保渗铝层质量。

④用坡口机在渗铝钢管对接接头处开单面 V 形坡口,坡口角度 $60^{\circ} \sim 65^{\circ}$,钝边 1mm 以下,接头间隙 3mm 左右。焊接装配时应严格保证钢管接口处内壁平齐,错边量应小于壁厚的 10%,最大不得超过 1mm。点固焊点应尽可能小,点固后不得随意敲击。

⑤打底层是渗铝钢管单面焊双面成形的关键,施焊时必须密切注视熔池动向,严格控制熔孔尺寸,使焊接电弧始终对准坡口内角并与工件两侧夹角成 90° 。更换焊条要迅速,应在焊缝热态下完成焊条更换,以防止焊条接头处出现背面熔合不良的现象。封闭环缝时应稍将焊条向下压,以保证根部熔合。打底层焊接要求接头背面焊缝金属与两侧渗层充分熔合;盖面层焊接要求焊道表面平滑美观,两侧不出现咬边。

⑥在整个焊接过程中不能随意在渗铝钢管表面引弧,以免烧损渗铝层。焊后应立即将焊接区域缠上石棉,以防止冷却过快产生淬硬而导致微裂纹,特别是铬钼渗铝钢焊接更应注意焊后缓冷。

采用专用焊条或 Cr25 - Ni13 奥氏体焊条,严格按单面焊双面成形工艺进行焊接,推荐的工艺参数见表 4-5-3。

表 4-5-3 渗铝钢管手工电弧焊的工艺参数

母材	焊条	焊接次序	焊接电流/A	焊接电压/V	电源极性
碳素渗铝钢管 ($\phi 6 \times 114\text{mm}^2$)	E1-23-13-16 ($\phi 3.2\text{mm}$)	打底层	85~95	25~28	交流
		盖面层	90~105	26~30	交流

续表

母材	焊条	焊接次序	焊接电流/A	焊接电压/V	电源极性
Cr5Mo 渗铝钢管 ($\phi 10 \times 114\text{mm}^2$)	E1-23-13-16 ($\phi 3.2\text{mm}$)	打底层	85~95	26~30	交流
		盖面层	90~110	26~32	交流

应确保渗铝钢焊缝金属与渗层熔合良好,焊接接头背面渗铝层从热影响区连续过渡到焊缝,基体金属不外露,保证渗铝钢管焊接区域具有良好的抗腐蚀性能。这种焊接工艺简便实用,为推动渗铝钢管在我国石化设备中的广泛应用提供了有利条件。

第四节 渗铝钢的焊接接头性能

一、渗层厚度及显微硬度

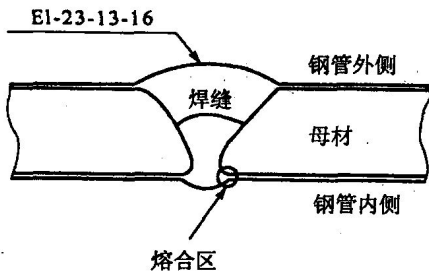
金相观察表明,渗铝钢管渗层厚度均匀,无裂纹、夹杂和渗漏现象。用 3% HNO₃ 酒精溶液侵蚀渗铝钢管试样断面,可使渗铝层与基体组织显露出来。碳素渗铝钢管与 Cr5Mo 渗铝钢管内壁渗层厚度分别为 0.17~0.23mm 和 0.12~0.16mm,外壁渗层厚度分别为 0.15~0.20mm、0.10~0.14mm。

渗铝层显微硬度是在 50g 载荷下加载 12s 后测定的,显微硬度从渗层表面到基体是逐渐降低的,渗铝层平均显微硬度值在 500~310MH 的范围。显微硬度值较低表明渗铝层具有一定的抗变形能力,塑韧性较好,明显改善了焊接性能。

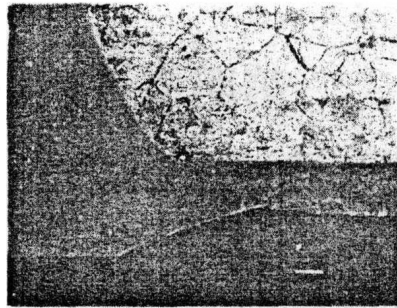
渗铝钢管焊缝的成分和组织性能取决于填充金属的成分和熔合比。用 Cr18Ni9 和 Cr18Ni12Mn2 焊条焊接渗铝钢管,焊缝金属易形成马氏体(M) + 奥氏体(A)。增大焊缝脆性,促成焊接冷裂纹产生。采用 Cr25Ni13 系焊条时,焊缝成

分离(M+A)区较远,不易产生马氏体组织,焊缝金属为奥氏体+ δ 铁素体的双相组织。而Cr25-Ni20系焊条的焊缝组织为单相奥氏体,抗热裂性和抗晶间腐蚀性都较双相组织差。

采用Cr25-Ni13奥氏体不锈钢焊条,在渗铝钢管接头处内壁涂敷焊接工艺涂层,严格按单面焊双面成形工艺焊接渗铝钢管,可确保渗铝钢管焊接接头焊缝金属与渗层熔合良好。焊接接头背面的渗铝层从热影响区连续过渡到焊缝(见图4-5-2),基体金属不外露,保证了渗铝钢管焊接区域良好的使用性能。实际焊接施工时只要保证渗铝钢管焊接接头处焊缝金属与渗铝层熔合良好,无咬边现象,就可使焊接接头区域具有良好的耐蚀性和抗高温氧化性能。



(a) 焊接接头示意



(b) 金相组织特征 (100 \times)

图4-5-2 渗铝钢管焊缝金属与渗铝层熔合良好

二、渗层中的铝含量及相结构

渗铝层中的铝含量是评定渗层耐热抗蚀性能的重要参数。利用扫描电镜和JCA-733电子探针X射线微区分析仪(EPMA)自渗层表面沿深度方向做点成分分析,各测点的间距为0.046mm。

通过电感应料浆工艺制备的碳素渗铝钢渗层中的Al含量、Fe含量,显微硬度及主要相组成见表4-5-3。渗铝层中的Al含量分布及相组成如图4-5-3示。铬钼渗铝钢渗层中Al、Fe、Cr含量分布见表4-5-5。

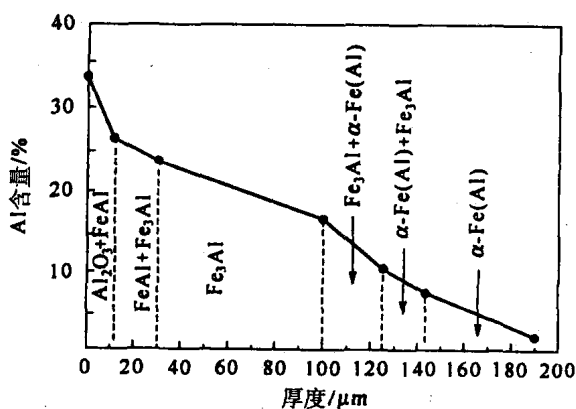


图 4-5-3 渗铝层中的 Al 含量分布及相组成

表 4-5-4 碳素渗铝钢渗层中 Al、Fe 含量,显微硬度及主要相组成

距表层的距离 / μm	区域	Al 含量/%	Fe 含量/%	显微硬度/MH	主要相组成
0	渗铝层外层	28.0	72.0	—	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeAl}$
8		26.5	73.1	—	
15		—	—	600	
30		23.2	76.4	490	
45		—	—	475	
52		21.6	77.8	471	
75		—	—	415	
97		16.7	82.6	398	
125	渗铝层	9.8	89.5	393	$\text{Fe}_3\text{Al} + \alpha\text{-Fe(Al)}$ 固溶体
144		6.8	92.6	364	
180	渗铝层	—	—	350	$\alpha\text{-Fe(Al)}$ 固溶体
190	与母材交界	1.3	97.5	320	

表 4-5-5 铬钼渗铝钢渗层中 Al、Fe、Cr 含量分布

测定点	渗层深度/mm	Al/%	Fe/%	Cr%	测定点	渗层深度/mm	Al/%	Fe/%	Cr%
1	0.006	34.19	62.68	3.21	4	0.125	8.55	—	—
2	0.052	29.24	66.95	3.315	5	0.144	3.89	88.74	5.45
3	0.098	12.49	82.05	5.03	6	0.190	0.04	92.13	5.56

分析结果表明,渗铝层由不同比例的 $\alpha - \text{Fe}(\text{Al})$ 固溶体、 Fe_3Al (13.87% Al)、 FeAl (32.57% Al) 和表面层少量 Al_2O_3 构成,不存在含铝更高的脆性相,如 FeAl_2 (49.13% Al)、 Fe_2Al_5 (54.71% Al) 和 FeAl_3 (59.18% Al) 等,消除了由这些脆性相导致渗铝层性能脆化的问题。随着渗铝层深度的增加, $\alpha - \text{Fe}(\text{Al})$ 固溶体所占的比例越来越多, Fe_3Al 和 FeAl 两相所占的比例越来越少。电子探针(EPMA)分析结果表明,渗铝层中的铝含量随着渗层深度的增加而降低,当渗层深度不超过 0.125mm 时,铝浓度在 8% 以上。该渗铝层的有效厚度能够满足渗铝钢抗高温氧化和耐蚀性方面的使用要求。

三、渗层的抗变形能力

为进一步考察渗铝层的抗弯曲变形能力,对焊接接头试样作了冷弯曲试验。渗铝钢管内外壁保留了原始渗层,弯曲角分别为 90° 、 50° 、 30° 、 20° 、 10° ,然后将冷弯后的试样用 30% 的 HNO_3 水溶液擦蚀,在 5~10 倍放大镜下观察:碳素渗铝钢管渗层弯曲 10° 不发生任何裂纹;铬钼渗铝钢管渗层弯曲 30° 不发生任何裂纹。

此外,在铬钼渗铝钢管上截取变形试样,在平均应力为 470MPa、伸长量为 7% 的情况下,用 30% 的 HNO_3 水溶液在 200mm 长度内擦蚀渗层后用 5~10 倍放大镜观测,也未发现任何裂纹。所以渗铝层有一定的抗变形能力,塑韧性较好,对焊接性是有利的。

四、焊接接头的抗氧化性和耐蚀性

通过外表观测、比较法和现场挂片试验评定渗铝钢管焊接接头区的抗高温

氧化性和抗 H₂S 腐蚀性能。渗铝钢管焊接接头不同部位渗铝层的抗高温氧化性不适于用失重法进行评定,可采用外表观测法对试样不同部位做相对比较。根据氧化程度进行分级。

I 级 基本不氧化,试样表面平整,无凹无痕,外观基本无变化。

II 级 少量氧化,试样表面尚平,但外观有所变化,有少量氧化皮、微痕或微凹。

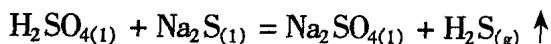
III 级 不具备抗高温氧化性,试样表面氧化皮层层脱落。

在 600℃ 的试验温度下,氧化时间累计计算的试验结果见表 4-5-6。

表 4-5-6 渗铝钢焊接接头高温抗氧化试验结果

试样及观测部位			碳素渗铝钢(600℃)/h						Cr5Mo 渗铝钢(600℃)/h								
			100	200	400	600	800	1000	1200	200	400	600	800	1000	1200	1400	1800
Cr25 - Ni13 焊缝			I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
接头背面渗铝层	熔合区	无涂层	I	I	I	I	I	II	II	I	I	I	I	I	I	II	II
		不涂层	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	热影响区		I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	母材		I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
母材			II	II	III	严重氧化			I	I	I	II	II	II	II	II	

腐蚀介质中的 H₂S 是促进渗铝钢管焊接区腐蚀的主要因素。常温试验中采用硫酸(H₂SO₄)稀溶液和硫化钠(Na₂S)饱和溶液相作用反应生成 H₂S 气体。



将生成的 H₂S 饱和溶解于装有渗铝钢管焊接接头试样的 NaCl 封闭液(中性)容器中。大量研究工作表明,单一的水溶液对材料的腐蚀并不严重,但若加入一些盐、酸之类的添加剂,可使腐蚀速度提高几十倍。试验过程中不断保持 NaCl 溶液中的 H₂S 饱和状态,试验装置密封性要求较高。剩余的 H₂S 名气体采用 10%NaOH 溶液进行吸收。试验溶液的组成成分及 pH 值见表 4-5-7,渗铝钢管焊接接头常温 H₂S 腐蚀试验结果见表 4-5-8。H₂S 腐蚀试验结果表明,渗铝钢管内壁焊接熔合区渗层的抗 H₂S 腐蚀性与母材渗层差不多,表面平整、无凹

坑,具有良好的耐蚀性。

表 4-5-7 试验溶液的组成成分及 pH 值

溶液名称	组成成分	pH 值	溶液名称	组成成分	pH 值
饱和硫化钠溶液	9% Na ₂ S + H ₂ O	8.7	氯化钠溶液	3.5% NaCl + 0.5% HCl + H ₂ O	7
稀硫酸	20% H ₂ SO ₄ + H ₂ O	2.5	氢氧化钠溶液	10% NaOH + H ₂ O	10.5

表 4-5-8 修铝钢管焊接接头常温 H₂S 腐蚀试验结果

渗铝钢	焊接工艺	腐蚀时间/h	抗 H ₂ S 腐蚀性				母材腐蚀 深度/mm
			焊缝	渗铝钢管内壁渗层			
				熔合区	热影响区	母材	
碳素渗铝钢	无涂层	720	+	+	-	+	0.2~0.4
	不涂层	720	+	+	+	+	
Cr5Mo 渗铝钢	无涂层	960	+	-	+	+	0.1~0.2
	有涂层	960	+	+	+	+	

注:表中“+”表示渗层完好;“-”表示渗层开始腐蚀。

对采用电感应料浆法生产的渗铝钢管焊接接头试样在某炼油厂进行现场挂片和生产运行试验。在该炼油厂常减压塔某副线中经过 2640h 挂片试验显示:管状焊接接头试样表面光洁,内壁完好无损,端面焊缝、熔合区、热影响区及母材渗铝层连为一体形成“墙壁”,焊缝金属与渗铝层“墙壁”之间(熔合区渗层处)无腐蚀破断现象,耐蚀性良好。现场挂片试验表明该渗铝钢管焊接接头能够满足在化工设备中的使用要求。

