

预加氢反应器的焊接技术

合肥通用机械研究院

(安徽 230031)

杨吉梅 陶昌勤

中国石油天然气第一建设公司石化设备厂

(河南洛阳 471000)

肖向利

【摘要】 通过对预加氢反应器的主体材料 15CrMoR (H) + SUS321 锈复合钢板的焊接性分析, 制定出合理的焊接工艺, 并指出该种材料的焊接特点、施焊要求及焊接注意事项。

一、概述

预加氢反应器通常在高温、临氢等苛刻条件下工作, 并在含有氢及硫化氢的介质中运行, 对安全性的要求特别高。该设备的主体材质为 15CrMoR (H) + SUS321, 复合材料的焊接是该设备制造中的重要环节, 也是确保其设备整体质量的关键。

二、设备的主要技术参数

该设备主要技术参数: ①规格: $\phi 1600\text{mm} \times 8296\text{mm} \times (22+3)\text{mm}$ 。②主体材质: 15CrMoR (H) + SUS321。③设计温度: 370°C 。④设计压力: 2.9MPa 。⑤操作介质: 油气 + 氢气及微量 H_2S 。

三、设备的使用特点

该设备工作条件的苛刻, 决定了它在使用过程中将会出现氢腐蚀、氢脆以及硫化物应力腐蚀等问题, 在考虑强度、刚度和抗腐蚀的情况下, 选择复合材料 15CrMoR (H) + SUS321。复层材料在焊接热过程中, 奥氏体不锈钢能吸收大量的氢, 当冷却速度较快时, 残留的氢不能逸出, 将会引起氢腐蚀、氢脆, 在焊接残余应力和腐蚀介质的共同作用下, 将会引起硫化物应力腐蚀。因此, 需要采用一定焊接工艺来保证焊接质量和以后的使用质量。

四、锈复合钢板焊接性分析

15CrMoR (H) + SUS321 锈复合钢板是由化学成分不同、物理性能相异的两种钢板爆炸复合而成, 由洛阳 725 所按照 GB/T8165—1997《锈复合钢板和钢带》中 B1 级生产制造, 其化学成分见表 1。

表 1 母材化学成分 (质量分数) (%)

化学成分		C	Si	Mn	S	P
材料						
基层 15CrMoR (H) (正火 + 回火)	供应值	0.15	0.24	0.64	0.005	0.012
	复验值	0.16	0.27	0.56	0.004	0.011
复层 SUS321 (固溶)	供应值	0.04	0.51	1.44	0.001	0.022
	复验值	0.07	0.40	1.32	0.011	0.018

化学成分		Cr	Mo	Cu	Ni	Ti
材料						
基层 15CrMoR (H) (正火 + 回火)	供应值	1.03	0.53	0.13	0.01	—
	复验值	1.02	0.52	0.16	0.091	—
复层 SUS321 (固溶)	供应值	17.2	9.1	0.16	10.02	0.46
	复验值	18.09	10.10	0.16	10.30	0.46

该复合板中基材 15CrMoR (H) 满足设备的强度和刚度要求, 复材 SUS321 满足设备的耐蚀等要求。为了保证焊后复合板不失去原有的综合性能, 对基层和复层必须分别进行焊接, 其焊接性及焊接工艺等应分别由各自的特点来决定。但是, 二者交界处属于异种钢的焊接, 因此 15CrMoR (H) + SUS321 复合材料焊接成功的关键在于对基层和堆焊复层选择合理的焊接工艺。

1. 基层 15CrMoR (H) 焊接性分析

基层 15CrMoR (H) 是舞阳钢铁公司按 GB6654—1996 标准在 15CrMoR 钢板基础上研制开发的临氢设备用珠光体耐热钢。因为预加氢反应器的特殊性, 在 15CrMoR 钢板基础上, 增加了若干个附加条件: 化学成分中对 S、P、Ni、Cu 含量要求更低; 力学性能增加了高温屈服强度; 对冲击初度提出了明确要求, 冷弯条件更苛刻; 热处理要求为正火 + 回火状态供货。尽管在冶

炼过程中通过控制化学成分含量使该钢的纯洁性、均质性和综合力学性能得到了改善和提高,但是该材料焊接冷裂纹敏感性较高,焊接过程中易产生冷裂纹,因此,基层焊前要预热,且控制层间温度。

在焊接热过程中,在冷却速度较大的条件下,容易形成淬硬倾向,热影响区是焊接接头的薄弱环节,焊接时由于强烈的不均匀加热,使得热影响区处于不断改变温度、应力和应变的状态下。焊接热过程中使热影响区的晶粒变粗,组织呈现不均匀性,使其性能降低,是产生各种焊接裂纹的最敏感的区域。因此,除了选用适当的焊材及焊接参数外,焊接热过程中进行恰当的热处理同样十分重要。

2. 15CrMoR (H) + SUS321 复合板的焊接特点

基层和复层交界处的焊接属于异种钢的焊接,故其存在如下特点。

(1) 焊缝金属的稀释 因基层和复层钢的化学成分存在很大差异,焊接时,基层金属的熔化会对焊缝金属产生稀释作用,使焊缝中的奥氏体元素(如 Cr、Ni)含量减少,从而降低接头的耐腐蚀性能和抗热裂性能。

(2) 熔合区易形成淬硬组织 由于填充金属与母材化学成分的差异,在熔池靠近焊缝边界附近存在一个不完全混合区,形成一个由 A + M 和 M 组织组成的高硬度低塑性的熔合区,该区在焊接和使用中易出现裂纹。

(3) 碳的扩散迁移 异种钢焊接时,由于二者的含碳量及合金元素含量存在浓度差,在熔合区会出现明显的碳迁移。珠光体侧出现贫碳区,由原来的 P + F 组织转变成以 F 为主的组织,并沿熔合线形成粗晶粒层;奥氏体侧出现富碳区,并以 Cr 的碳化物形态析出而硬化,该区称为贫铬区。大量的资料表明,由于碳扩散对持久强度的影响,断裂部位大多发生在熔合区的贫铬区,在熔合区发生脆性断裂的倾向随碳扩散的发展而增大。在焊接时,温度超过 1200℃ 的过热区, TiC 溶解度增加,而随后的冷却时,由于高温活泼的碳原子将趋向奥氏体晶粒边界扩散移动, Cr 比 Ti (稳定化元素) 扩散速度快,也聚集在晶界附近形成碳铬化合物 $Cr_{23}C_6$ 而沉淀,焊接接头则出现贫铬区容易产生晶间腐蚀。

(4) 焊接接头存在较大的残余应力 复层钢和基层钢的物理性能也有很大差异。不锈钢的热导率约为碳钢的 1/3;电阻为碳钢的 4 倍之多;不锈钢线膨胀系数比碳钢大 40%,随着温度的升高,线膨胀系数的差值也相

应增加。因此,在焊后冷却、热处理及高温工作条件下,温差会引起较大的焊接应力而无法消除,焊接接头在 H_2S 腐蚀介质和残余应力共同作用下,易产生脆性开裂现象,严重影响接头的强度和耐热疲劳性。

五、复合板的焊接工艺

1. 焊接方法

焊接方法通常根据待焊件的材质、接头厚度、坡口尺寸以及施焊条件来确定。根据前文对 15CrMoR (H) + SUS321 复合板的焊接特点的分析,为解决焊接中存在的问题,拟采用埋弧焊 + 焊条电弧焊。

2. 坡口形式

根据设计要求,坡口采用剥离复层的 X 形坡口,坡口的形状、尺寸见图 1。

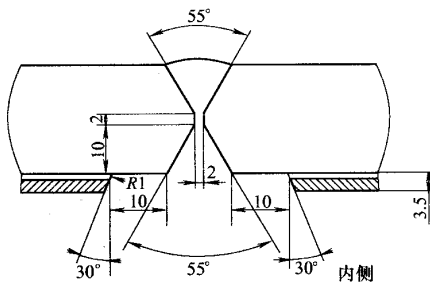


图 1

选用这种坡口形式的优点在于:采用双面焊接,先焊内侧基层,而后焊外侧基层,最后焊复层。以免复层重复受热,而导致产生疲劳裂纹的倾向增大;又减少了复层侧的焊接量。同时,复层剥离又能最大限度地降低基材对复材的稀释程度。

3. 焊接顺序

焊接质量与施焊顺序密切相关,根据坡口形式,确定合理的焊接顺序。该种钢在焊缝返修时会因重复受热而易产生裂纹。因此,应提高一次合格率,避免或减少返修次数。

焊接顺序为:焊条电弧焊焊基层内侧 1→外侧清根→埋弧焊焊基层外侧 2→焊条电弧焊焊过渡层→焊条电弧焊堆焊复层(见图 2)。

4. 焊材的选择

该复合板的焊接接头由基层焊缝、过渡层焊缝和复层焊缝 3 部分组成。各自应根据其特点及要求选用与之匹配的填充金属。

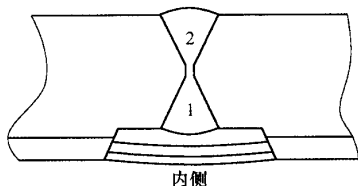


图2 焊接顺序

基层的焊材依据等强原则选用与之匹配的填充金属，尽量保证焊缝金属的化学成分与 15CrMoR (H) 相近，力学性能略高于 15CrMoR (H)。因此，焊条电弧焊选用 R307 焊条，埋弧焊选用 H13CrMoA + HJ250G (焊丝 + 焊剂)。

复层的焊材依据 SUS321 的合金成分和耐蚀性要求选用，以保证接头的抗腐蚀和抗热裂性能。同时满足设计要求的堆焊层的 F 含量在 3% ~ 10%。因此，选用 E347 (A132) 焊条，这种焊条有良好的耐热、耐蚀和抗热裂性能，并且交、直流两用，有良好的操作工艺性能。

过渡层的焊接是整个焊接接头的关键，施焊时要同时熔化基层和复层，施焊的原则是降低基层对复层的稀释程度，提高接头的抗裂性能和抗剥离能力。根据舍夫勒图判断焊缝金属的显微组织，理想的焊缝组织为 A + 少量 F 的双相组织，因为少量 F 的存在打乱了单一 A 柱状晶的方向性，从而使焊接接头具有良好的抗裂性和耐腐蚀性。所以选用线膨胀系数介于基层和复层之间，Cr、

Ni 含量高的 E309L (A062) 焊条。

根据设备特点，对焊材分别提出了相应的附加要求。所选用的焊接材料的化学成分见表 2。

表 2 焊接材料的化学成分 (质量分数) (%)

化学成分		C	Si	Mn	P
焊材直径/mm					
R307	3.2	0.052	0.22	0.66	0.012
	4.0	0.058	0.34	0.70	0.011
H13CrMoA	4.0	0.15	0.32	0.53	0.012
A062	4.0	0.02	0.71	0.74	0.022
A132	4.0	0.056	0.90	0.98	0.029

化学成分		S	Cr	Mo	Cu	Ni
焊材直径/mm						
R307	3.2	0.008	1.21	0.525	0.16	0.22
	4.0	0.009	1.18	0.55	0.18	0.20
H13CrMoA	4.0	0.010	0.99	0.51	0.23	0.11
A062	4.0	0.009	23.95	0.28	0.15	12.77
A132	4.0	0.012	19.84	0.151	0.14	9.61

5. 焊接参数的选择

选择焊接参数遵循的原则是在保证焊透的情况下，尽量采用较小的焊接热输入量，以减少焊件过热，避免形成粗大的柱状晶组织，并防止合金元素不必要的烧损。焊接参数见表 3。

表 3 焊接参数

焊道焊层	焊接方法	填充材料		焊接电流		电弧电压 /V	焊接速度 /cm·min ⁻¹	热输入量 /kJ·cm ⁻¹
		牌号	直径/mm	极性	电流/A			
1	电弧焊	R307	3.2	直、反	80 ~ 110	20 ~ 25	8 ~ 12	≤ 22.5
2	电弧焊	R307	4.0	直、反	150 ~ 180	20 ~ 28	10 ~ 14	≤ 30
3	埋弧焊	H13CrMoA + HJ250G	4.0	直、反	500 ~ 650	30 ~ 34	40 ~ 45	≤ 30.6
4	埋弧焊	H13CrMoA + HJ250G	4.0	直、反	500 ~ 650	30 ~ 34	40 ~ 45	≤ 30.6
5	电弧焊	A062	4.0	直、反	140 ~ 160	20 ~ 25	10 ~ 14	≤ 27
6	电弧焊	A132	4.0	直、反	140 ~ 160	20 ~ 25	10 ~ 14	≤ 27

6. 焊前预热及焊后热处理

焊前预热及焊后热处理是防止 15CrMoR (H) 产生焊接冷裂纹的重要工艺措施。焊缝在较大冷却速度条件下，易出现淬硬倾向而产生冷裂纹。故采取焊前预热温度和保持一定层间温度的方法，减缓冷却速度。但预热温度过高，会导致焊接热影响区晶粒组织粗大，造成热影响区的脆化，并且应控制焊接层间温度不低于预热温

度。预热温度不可过大或过小，过小起不到应有的作用，过大会使 HAZ 晶粒粗大，使其脆化。经过计算和试验确定工件预热温度 ≥ 150℃，控制层间温度介于 150℃ 和 400℃ 之间。

因为材料的焊接性能较差，为使焊缝中的扩散氢充分逸出，防止产生氢脆；防止产生延迟裂纹及焊接变形，减少过渡层焊接时熔合区及 HAZ 的淬硬程度，基

层焊后或暂停施焊后、过渡层焊后应立即用电加热带对焊缝进行 350~400℃ 两小时的消氢处理,保温缓冷。以使扩散氢尽快逸出,避免氢聚集,同时消除焊缝残余应力,防止冷裂纹的产生。

7. 最终焊后热处理

最终焊后热处理是设备整个制造过程中重要的工序之一。其目的不仅为了消除整体焊接应力、结构应力,更为重要的则在于通过焊后热处理,提高焊接接头的综合力学性能、高温蠕变强度和组织稳定性,降低焊缝和 HAZ 的硬度。

实际热处理温度控制公差越小越好,这样更能保证焊缝的性能趋于一致。该产品制造完工后,在大型自动

温控加热炉内进行了整体消除焊接应力的热处理,其热处理工艺参数为:热处理温度为 $(675 \pm 14)^\circ\text{C}$,保温 1.2h 以上;400℃ 至 $(675 \pm 14)^\circ\text{C}$ 之间,升温速度 $\leq 200^\circ\text{C}/\text{h}$,降温速度 $\leq 260^\circ\text{C}/\text{h}$;400℃ 以下降温速度不限,400℃ 以下炉冷。

六、焊接工艺评定

设备正式施焊前,应按 JB4708—2000《钢制压力容器焊接工艺评定》和设计提出的《预加氢反应器说明书》的有关要求进行焊接工艺评定。焊接工艺评定试板按照前文的焊接工艺进行施焊,焊缝经 100% RT、UT、PT、MT 检测合格,并进行焊后热处理,焊接工艺评定力学性能结果见表 4。

表 4 焊接工艺评定结果

抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 $R_{370^\circ\text{C}}/\text{MPa}$	弯曲试验 $D = 40\text{mm}$ $\alpha = 180^\circ$	冲击试验 (V 形缺口) 冲击功/J						评定 结果
			室温			- 10℃			
			焊道	HAZ	母材	焊道	HAZ	母材	
529	270	侧弯 4 件	86	256	270	45	202	252	合格
555	275	合格	74	242	268	46	228	243	
			87	246	260	61	214	249	

硬度检查:基层焊缝金属和 HAZ 的硬度均 $\leq 225\text{HBS}$;基层焊缝金属的化学成分检查: $w_{\text{Cr}} = 0.74\% \sim 1.21\%$, $w_{\text{Mo}} = 0.40\% \sim 0.65\%$, $w_{\text{Mn}} = 0.50\% \sim 0.90\%$, $w_{\text{Ni}} \leq 0.25\%$, $w_{\text{Cu}} \leq 0.25\%$, $w_{\text{P}} \leq 0.015\%$, $w_{\text{S}} \leq 0.012\%$ (与钢板相近)。堆焊层的 F 用 F—1 型 F 测量仪测量,其值为 3.0%~4.0%;金相检验结果表明无晶间腐蚀裂纹产生,说明晶间腐蚀合格。

以上工艺评定结果表明,选用前文所述焊接工艺施焊的焊接接头的各项指标符合设计及使用要求,同时也说明将其运用于实际设备的焊接中是可行的。

七、产品施焊要求及注意事项

(1) 焊接接头组对应以复层为基准,简节下料周长应根据成形后的封头实际周长而定,严格控制纵、环缝的错边量 $\leq 1\text{mm}$ 。

(2) 焊前清除焊接坡口表面及其母材两侧各 20mm 范围内的锈蚀、水分、油污和其他有损焊接质量的杂质;并且对 Cr-Mo 钢坡口表面进行 100% MT I 级合格;复层面焊缝两侧 250mm 范围内涂防飞溅涂料。

(3) 组对用附件及定位焊选用 R307 焊条焊在基层面上,严禁焊在复层面上;不允许用于基层的焊条在复

层上进行定位焊,也不允许用于复层的焊条在基层上定位焊。定位焊的长度应控制在 50mm 左右,施焊时严格按焊接工艺执行。

(4) 先焊内侧基层,第一道打底焊焊接,焊条选用 R307 $\phi 3.2\text{mm}$,第二道用 R307 $\phi 4\text{mm}$ 焊条焊至离复层与基层交界面 1~1.5mm 的距离后停止施焊。从外侧采用碳弧气刨清根,用角向磨光机打磨去掉渗碳层后,经 100% MT 检测合格,然后用埋弧焊 ($\phi 4\text{mm}$ 的 H13CrMoA 焊丝及 HJ250G) 对外侧基层进行盖面。

(5) 基层焊接完毕后,用角向磨光机打磨基层内侧焊缝余高,修磨为零后方可继续施焊。

(6) 过渡层焊接时应先焊复层根部处焊道,然后再焊其他焊道,焊道搭接量为 35%~45%,厚度应严格控制在 2.0~2.5mm;应同时熔合基材焊缝、基层和复层母材,确保盖满基层焊缝和基层母材,盖过复合界面 0.5~1.5mm。

(7) 最后采用 E347 (A132) $\phi 4.0\text{mm}$ 焊条堆焊复层焊缝,复层焊接应严格控制层间温度,防止过热,焊完后进行缓冷。

(8) 过渡层和复层的焊接,在保证熔合良好的前提下,尽量采用低输入量施焊,即降低熔合比。采用小直

径焊条、小电流、窄焊道、快速焊、多道排焊，焊条不允许作较大幅度的横向摆动，避免基层金属对过渡层的稀释，同时也避免造成 HAZ 组织粗大，减少 M 组织，减小热应力腐蚀裂纹敏感性。

• (9) 堆焊层两相邻焊道之间的凹下量不得 > 1mm。

(10) 层间清理要彻底，以免造成夹渣、气孔、裂纹等缺陷；对过渡层、复层的打磨应使用不锈钢专用砂轮片，清渣小锤应为不锈钢制成，以避免碳化物污染。

(11) 提高施工人员的责任心，严防用（发）错焊条。

(12) 焊接电缆卡头在工件上要卡紧，以免发生打弧或过烧现象。

(13) 复层表面进行酸洗钝化后，表面应呈均匀的银白色。

(14) 产品焊接应严格执行焊接工艺，做好各项检测，严禁漏项。

八、产品检测结果

(1) 基层 A、B 类焊缝焊接完毕后经 100% RT + 100% UT，复层 100% PT 检测，均符合设计技术条件要

求。RT 检测一次合格率达 97.45%。设备最终热处理后对焊接接头做 100% UT，基层焊缝做 100% MT，合格率达 100%。

(2) 15CrMoR（H）焊缝的硬度符合要求，均 ≤ 225HBS。

(3) 纵缝和环缝的产品焊接试板的铁素体含量为 5%，其化学成分、力学性能均符合有关标准及图样要求，具体试验结果见表 5、表 6。

表 5 产品焊接试板的化学成分（质量分数）（%）

化学成分 焊道	C		Si		Mn		P			
	0.046		0.40		1.37		0.015			
纵缝	0.046		0.40		1.37		0.015			
环缝	0.044		0.41		1.41		0.017			
化学成分 焊道	S		Cr		Ni		Cu		Mo	
	0.013		19.05		10.48		0.12		0.22	
纵缝	0.013		19.05		10.48		0.12		0.22	
环缝	0.015		18.96		10.49		0.10		0.22	

表 6 产品焊接试板力学性能试验结果

力学性能					弯曲试验			
抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 (370℃) $R_{p0.2}$ /MPa	拉伸试样 断裂位置	冲击试验（V 形缺口）			面弯 $a = 4s$	背弯 $a = 4s$	弯曲 结论
			温度/℃	位置	冲击功/J 10 × 10 × 55			
520（纵缝） 582（环缝）	290（纵缝） 285（环缝）	母材	常温	焊缝	115, 98, 83（纵缝） 56, 62, 73（环缝）	180° 合格	180° 合格	100 合格
				热影响区	228, 264, 232（纵缝） 186, 227, 216（环缝）			
			- 10	焊缝	50, 48, 63（纵缝） 38, 48, 45（环缝）			
				热影响区	183, 201, 164（纵缝） 158, 201, 164（环缝）			

九、结语

(1) 15CrMoR（H）+ SUS321 复合板焊接时，坡口形式尽量选用剥离复层的方式，并且一定要将复层剥离干净。

(2) 过渡层和复层焊接时，在保证熔合良好的情况下，尽可能降低熔合比。采用小直径焊条、小电流、窄焊道、快速多道排焊，避免焊条做较大幅度的横向摆动。

(3) 通过制定合理的焊接工艺，并且在施焊中严格

执行，最终获得的焊接接头的力学性能和耐蚀性能等各项指标均能满足设计及使用要求。

(4) 该设备焊接一次合格率达 97.45%，产品焊接质量优良，目前设备运行情况良好。

(5) 该设备的成功焊接，为加氢设备积累了大量的技术数据和宝贵的制造、焊接经验。

(20070730)