

热加工工艺对新型奥氏体不锈钢焊接接头晶间腐蚀的影响

张杰, 钟正彬

东方电气集团东方锅炉股份有限公司 四川自贡 643000

摘要: 针对电站锅炉中SA-213S30432接头热影响区产生的晶间腐蚀、开裂失效等问题, 分析了产生原因, 采用热丝TIG焊和GTAW焊接SA-213S30432、HR3C对接接头, 判定其接头在焊态、退火态的晶间腐蚀倾向, 研究分析焊接工艺、热处理工艺、材料及介质等因素对新型奥氏体不锈钢焊接接头晶间腐蚀的影响, 提出了预防焊接接头晶间腐蚀的措施。

关键词: 热加工; 焊接接头; 晶间腐蚀; 新型奥氏体不锈钢

1 序言

随着电站锅炉向高参数、大容量方向发展, 以SA-213S30432、HR3C为代表的新型奥氏体不锈钢材料在超临界、超(超)临界机组锅炉中得到了大量的工程应用, 且广泛应用于高温再热器、高温过热器、屏式过热器等高等级部件中, 因此小口径管对接接头大量出现, 焊接接头(焊缝和热影响区)晶间腐蚀问题也越来越引起关注。

2 试验背景

某1000MW超(超)临界机组锅炉水压试验时, 发现高温再热器管屏SA-213S30432、 $\phi 51\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 对接接头开裂失效, 在热丝TIG自动焊和手工钨极氩弧焊(GTAW)接头中均发现了晶间腐蚀现象, 缺陷位于接头热影响区熔合线附近, 呈沿晶开裂形貌, 局部可见晶粒脱落(见图1), 具有晶间腐蚀特征。晶间腐蚀分布在管子内壁, 从内壁起始, 向外壁扩展, 深度不等, 最深的接近管材壁厚, 开裂失效为晶间腐蚀所致。

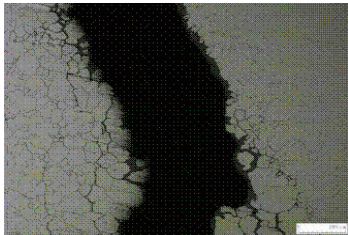


图1 接头热影响区沿晶开裂形貌

针对新型奥氏体不锈钢接头热影响区晶间腐蚀的问题, 为了查找产生的原因, 评估焊接接头晶间腐蚀倾向, 对锅炉使用的SA-213S30432、HR3C等材料开展了一系列工艺试验分析, 研究了焊接方法、焊接参数、焊后热处理等热加工工艺因素对接头晶间腐蚀的影响。

3 试验过程与结果

3.1 对接接头试样制备

选用焊丝THERMANIT 304HCu、 $\phi 1.0\text{mm}$, 在热丝TIG机上焊接SA-213S30432、 $\phi 45\text{mm} \times 7\text{mm}$ 管接头试样2组, 试样编号A1、A2; 选用焊丝THERMANIT 304HCu、 $\phi 2.4\text{mm}$, GTAW焊接SA-213S30432、 $\phi 45\text{mm} \times 7\text{mm}$ 管接头试样2组, 试样编号A3、A4。选用焊丝ERNiCrCoMo-1、 $\phi 1.0\text{mm}$, 在热丝TIG机上焊接HR3C、 $\phi 45\text{mm} \times 7\text{mm}$ 管接头试样2组, 试样编号B1、B2; 选用焊丝ERNiCrCoMo-1、 $\phi 2.4\text{mm}$, GTAW焊接HR3C、 $\phi 45\text{mm} \times 7\text{mm}$ 管接头试样2组, 试样编号B3、B4。焊接参数见表1, 其中试样A1、A3、B1、

表1 试样焊接参数

焊道	热丝TIG			GTAW	
	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹	焊接电流 /A	电弧电压 /V
第一层	160~165	9.5	145	95~105	16~18
第二层	170~180	9.7	155	110~120	17~19
第三层	170~180	10.2	160	95~100	16~18

B3焊后退火处理，按760℃×90min执行。

检测合格。经检验，试样接头（焊缝、热影响区）无缺陷。

3.2 检验结果

试样焊后、热处理后的焊缝经100%RT检测合格；PT范围为焊缝及两侧各100mm区域，100%PT

母材及焊缝化学成分见表2、表3，表中试样位置B代表母材，W代表焊缝。

表2 A组化学成分（质量分数） (%)

试样		元素											
编号	位置	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Nb	Cu	B	Al
A1	W	0.10	0.28	2.14	0.007	0.0002	18.37	13.98	0.10	0.45	2.86	0.001	0.011
	B	0.09	0.22	0.68	0.040	0.006	18.41	9.29	0.10	0.39	3.11	0.006	0.014
A2	W	0.10	0.26	2.08	0.013	0.0002	18.39	13.71	0.11	0.43	2.99	0.002	0.008
	B	0.09	0.24	0.69	0.040	0.007	18.41	9.27	0.09	0.39	3.14	0.007	0.016
A3	W	0.10	0.30	2.54	0.004	0.0002	18.26	15.11	0.12	0.49	2.93	0.001	0.003
	B	0.10	0.21	0.69	0.038	0.006	18.44	9.17	0.09	0.39	3.12	0.006	0.016
A4	W	0.10	0.29	2.49	0.005	0.0002	18.37	15.36	0.10	0.49	2.97	0.001	0.003
	B	0.09	0.26	0.68	0.040	0.008	18.37	9.27	0.10	0.41	3.05	0.007	0.024
THERMANIT 304HCu	φ 1.0mm	0.09	0.28	3.23	0.003	0.001	18.40	15.93	0.16	0.55	2.89	—	—
	φ 2.4mm	0.11	0.43	3.01	0.003	0.002	18.33	15.84	0.19	0.58	2.88	—	—

表3 B组化学成分（质量分数） (%)

试样		元素											
编号	位置	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Nb	Mo	Ti	Co
B1	W	0.07	0.16	0.37	0.007	0.005	22.07	45.82	0.06	0.11	—	—	—
	B	0.09	0.39	1.20	0.030	0.002	25.13	21.77	0.42	0.42	—	—	—
B2	W	0.07	0.15	0.38	0.006	0.003	21.99	45.63	0.05	0.11	—	—	—
	B	0.05	0.37	1.19	0.032	0.003	25.13	21.80	0.24	0.42	—	—	—
B3	W	0.07	0.13	0.29	0.006	0.003	21.97	48.16	0.04	0.09	—	—	—
	B	0.05	0.36	1.20	0.030	0.002	25.18	21.66	0.26	0.42	—	—	—
B4	W	0.06	0.13	0.30	0.006	0.003	22.08	47.10	0.04	0.10	—	—	—
	B	0.05	0.36	1.19	0.028	0.001	25.14	21.99	0.24	0.42	—	—	—
ERNiCrCoMo-1	φ 1.0mm	0.06	0.10	0.30	0.002	0.003	21.00	53.10	—	—	9.0	0.32	10.9
	φ 2.4mm	0.07	0.10	0.001	0.005	0.005	21.4	56.10	—	—	8.4	0.33	11.1

按GB/T 4334—2020中的方法E 铜-硫酸铜-16%硫酸腐蚀试验方法进行，将试样在加有铜屑的硫酸-硫酸铜溶液中煮沸，使其保持微沸状态，试验连续

20h，试验后取出试样，洗净、干燥、弯曲，采用弯曲法和金相法判定晶间腐蚀倾向。接头晶间腐蚀深度见表4，部分腐蚀试样如图2所示。

表4 接头晶间腐蚀深度

试样 编号	焊接 方法	试样 状态	晶间腐蚀深度/ μm	
			内壁	外壁
A1	热丝TIG	退火态	2100	707
A2	热丝TIG	焊态	252	无
A3	GTAW	退火态	878	无
A4	GTAW	焊态	无	无
B1	热丝TIG	退火态	1817	无
B2	热丝TIG	焊态	无	无
B3	GTAW	退火态	303	无
B4	GTAW	焊态	无	无

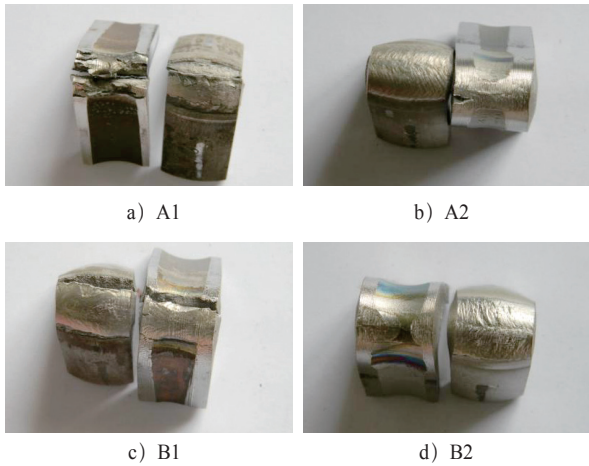


图2 腐蚀试样

SA-213S30432钢对接接头4种状态的接头抗晶间腐蚀能力除GTAW焊态合格外,其余3个试样均不合格,且存在明显差异,焊态接头抗晶间腐蚀能力优于退火态接头,GTAW接头抗晶间腐蚀能力优于热丝TIG焊接头。

HR3C钢对接接头4种状态的接头抗晶间腐蚀能力优于SA-213S30432钢,但也存在明显差异,焊态接头抗晶间腐蚀能力均合格,退火态接头抗晶间腐蚀能力均不合格。

4 试验分析

4.1 晶间腐蚀的成因

“贫铬理论”认为奥氏体不锈钢发生晶间腐蚀是由于加热到450~850℃温度区间会发生敏化,过饱和固溶的碳向晶粒边界扩散,与晶界附近的铬结合形成 $(\text{CrFe})_{23}\text{C}_6$ 并在晶界沉淀析出^[1];由于碳

的扩散速度快,铬来不及从晶内补充到晶界附近,出现晶界区贫铬,丧失了抗腐蚀性能,在腐蚀介质的作用下,形成晶间腐蚀。

4.2 焊接接头特性

焊接接头在锅炉产品制造中不可避免,焊接热影响区在焊接过程中必然存在,在焊接的快速连续加热过程中,铬碳化物形成过程必然会出现在热影响区,因此热影响区是整个焊接接头最薄弱的环节,也是抗晶间腐蚀能力最薄弱的区域。焊缝上的晶间腐蚀通常都是在多层多道焊中出现,前焊道的熔敷金属受到后面焊道的热影响,处于敏化温度的区间,出现晶间贫铬,导致耐蚀能力下降。

4.3 材料的影响

SA-213S30432钢焊接接头抗晶间腐蚀能力不及HR3C钢,这是由于母材及选用焊接材料的化学成分决定的,故两者存在较大的差异。

SA-213S30432钢管是在SA-213TP304H钢的基础上加入适量Cu、Nb、N等元素进一步提高蠕变强度,开发的奥氏体耐热不锈钢,其C含量较高, $w_{\text{C}}=0.07\%\sim 0.13\%$, $w_{\text{Cr}}=17\%\sim 19\%$ 。对接接头焊接选择与母材匹配的焊接材料THERMANIT 304HCu,其C含量较高, $w_{\text{C}}=0.09\%\sim 0.10\%$, $w_{\text{Cr}}=18.33\%\sim 18.40\%$,在敏化温度区间会发生敏化,晶间贫铬,使晶界附近抗腐蚀性能下降^[2]。

HR3C 钢管是在TP310 钢基础上通过复合添加Nb、N合金元素研制而成的一种新型奥氏体耐热钢,由于Cr、Ni 含量较高,所以有效增强了钢的抗高温腐蚀和高温蒸汽氧化能力,并稳定了奥氏体组织、抑制 σ 相的析出倾向。HR3C 钢具有优异的抗晶间腐蚀性能,晶间腐蚀敏感性低。对接接头焊接选择的焊接材料为ERNiCrCoMo-1,其C含量较低, $w_{\text{C}}=0.06\%\sim 0.07\%$, $w_{\text{Cr}}=21.0\%\sim 21.4\%$, $w_{\text{Mo}}=8.4\%\sim 9.0\%$, $w_{\text{Ti}}=0.32\%\sim 0.33\%$,在焊缝中增加了如Cr、Mo、Ti、Nb等铁素体形成元素,在奥氏体晶内以及晶粒之间有一定数量的铁素体,使奥氏体晶粒交界面上不会形成连续的网状铬的碳化物,提高焊缝抗晶间腐蚀的能力。

4.4 焊接工艺的影响

从A组热丝TIG焊试样看,无论焊态还是退火热处理态的接头均出现晶间腐蚀,焊态试样内壁、外壁均有开裂,腐蚀深度2100 μm 、707 μm ,而GTAW

接头焊态晶间腐蚀试验合格,因此焊接方法不同对接头抗晶间腐蚀能力产生影响存在差异。热丝TIG焊与GTAW焊接过程存在明显差异,热丝TIG焊是一种连续焊接的高效焊接方法,多层多道焊时,连续焊接,层温较高,可达500~600℃,焊缝在高温停留时间较长,焊接电流也比GTAW大。GTAW焊接参数较小,层温较低,控制方便,由于焊缝在高温停留时间较短,故GTAW接头抗晶间腐蚀的能力优于热丝TIG焊接头。

4.5 焊后热处理工艺的影响

从上述试验结果看,无论是SA-213S30432钢、还是HR3C钢,焊接接头退火前后抗晶间腐蚀能力存在明显差异,焊态接头抗晶间腐蚀能力明显优于退火态接头。焊后退火处理的温度为750~770℃,正处于奥氏体不锈钢的敏化温度区(450~825℃),经过退火处理抗晶间腐蚀性能降低。

经历了不同的焊后热处理方式的焊接接头,会呈现出不同的晶间腐蚀倾向,如果通过固溶处理或稳定化处理,则可以提高抗晶间腐蚀的能力。

4.6 介质的影响

焊接接头经历敏化并不意味着晶间腐蚀必然发生,晶间腐蚀的发生必须有腐蚀介质,如Cl⁻离子。因此,设备制造标准、设备运行标准对水质提出了限制要求,特别是Cl⁻离子的控制,以避免晶间腐蚀的发生。

由于超(超)临界机组锅炉过热器和再热器的工作温度一般为600~610℃,正处于奥氏体不锈钢的敏化温度区,如果使用环境中存在腐蚀性离子,如Cl⁻、O²⁻、S²⁻等离子,在腐蚀介质的长期作用下容易产生晶间腐蚀。晶间腐蚀使奥氏体晶界结合强度显著降低,其强度、塑性等力学性能大幅度降低甚至丧失,在外力的作用下容易诱发微裂纹,进而发展成宏观裂纹,造成接头开裂失效。

5 预防焊接接头晶间腐蚀的措施

预防焊接接头晶间腐蚀的措施如下:

1) 尽量选用低碳型焊接材料,严格控制碳含量^[3]。焊缝金属尽量减少碳含量,避免形成铬的碳化物,减少或避免晶间腐蚀的倾向,超低碳奥氏体不锈钢基本上可以避免晶间腐蚀。

2) 焊接工艺设计应尽量选用热输入较小的焊接方法,焊接接头尽可能缩短在敏化温度区停留的时间,减少敏化温度对其的影响。在保证焊接质量的前提下,尽量采用小焊接电流、快速焊,窄焊缝;尽量采用多层多道焊,层温冷却后再焊接下一道,管子内通氩气保护,既保护焊接熔池不易氧化,有利于背面焊缝成形,又加快了接头的冷却。

3) 焊后局部退火处理。由于高温再热器、高温过热器、屏式过热器等部件出口、入口端为T91钢、T92钢等材料,存在大量的T91/T92钢+奥氏体不锈钢的异种钢接头,所以需要进行焊后退火处理,一般采用整体进炉热处理,加热温度740~760℃,保温90~120min。虽然高温停留时间较短,但对奥氏体不锈钢接头抗晶间腐蚀能力不利。为此,可改变热处理方式,将整体退火热处理调整为局部退火热处理,仅对异种钢接头做退火处理,不锈钢接头不再进行退火处理,避免接头和母材敏化,降低晶间腐蚀敏感性。

4) 稳定化处理或固溶处理是预防晶间腐蚀的有效方式,将整个焊件进行整体稳定化处理或固溶处理,可以降低晶间腐蚀敏感性,减少或避免晶间腐蚀倾向。但在实际生产中,锅炉受热面高等级部件受到产品结构、变形控制等诸多因素的影响,整体稳定化处理或固溶处理则难以实施。

6 结束语

1) SA-213S30432钢、HR3C钢焊接接头焊态抗晶间腐蚀能力优于焊后退火态接头,奥氏体不锈钢退火热处理不利于接头抗晶间腐蚀。

2) GTAW接头抗晶间腐蚀能力优于热丝TIG焊接头,选择适当的焊接工艺有利于改善接头抗晶间腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 张其枢,堵耀庭.不锈钢焊接[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 郑建军,张涛,谭晓蒙,等.屏式再热器弯管开裂泄漏失效原因分析[J].金属加工(热加工),2019(10):38-40.
- [3] 于启湛,丁成钢,史春元.不锈钢的焊接[M].北京:机械工业出版社,2009.

MW 20211024