国产焊接材料在SA387 Gr11 CL2钢上的焊接工艺研究

太原重工煤化工设备分公司 （山西 030024） 杨宝峰 李 佳

【摘要】通过国内焊接材料应用于SA387 Gr11 CL2钢，并对不同热处理工艺下的力学性能进行研究和分析，为今后国内焊接材料在SA387 Gr11 CL2钢上的应用提供了基础数据。

SA387 Gr11 CL2为美国SAME材料，属1.25Cr-0.5Mo系珠光体耐热钢，在小于500℃以下具有良好的高温强度、抗氧化性、抗硫化物腐蚀性，广泛应用于煤化工、石油化工行业高温高压容器装置中。本文就SA387 Gr11 CL2钢分别在焊后消应力热处理、正火处理两种热处理制度下，使用国产焊接材料进行焊接试验研究，并对其试验结果进行简单分析，为今后国内焊接材料在SA387 Gr11 CL2钢上的应用积累了宝贵的经验。

1. SA387 Gr11 CL2钢的焊接性分析

（1）材料化学成分、力学性能及供货状态 美国SAME材料标准对SA387 Gr11 CL2钢的化学成分、力学性能规定值及复验结果，如表1、表2所示，钢板以正火+回火状态供货。

表1 SA387 Gr11 CL2钢的化学成分（质量分数） (%)

化学成分	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
熔炼分析	0.05~0.17	0.45~0.65	≤0.035	≤0.035	0.50~0.80	1.00~1.50	0.45~0.65
成品分析	0.04~0.17	0.35~0.73	≤0.035	≤0.035	0.44~0.86	0.94~1.56	0.45~0.70
复验结果	0.15	0.59	0.008	0.001	0.53	1.36	0.60

表2 SA387 Gr11 CL2钢的力学性能

项目	室温拉伸试验			冲击试验（0℃）A_{KV2}/J		弯曲试验
	R_m/MPa	R_{eL}/MPa	A(%)	1/2处	1/4处	d=2a，180°
标准要求	515~690	≥310	22	54	48	无裂纹
复验结果	635	485	24.0	280，291，284	121，217，182	合格

（2）焊接性问题 根据国际焊接学会（IIW）提出的钢材的碳当量公式，计算SA387 Gr11 CL2钢的化学成分复验结果CE=0.64%＞0.45%，由此可见SA387 Gr11 CL2钢的焊接性较差，在焊接过程中容易产生淬硬组织，在焊接应力和氢的作用下，焊接接头极易产生氢致裂纹，所以焊接过程中要避免产生淬硬组织、减少焊接应力的产生和降低氢含量。

同时，SA387 Gr11 CL2钢还有再热裂纹倾向及回火脆化现象。通常PSR指数可以粗略地表征钢的再热裂纹敏感性。由表1中数据计算出其PSR =0.56＞0，有可能产生再热裂纹。Cr-Mo钢及其接头在370～565℃温度区间长期运行或加热过程中，P、As、Sn、Sb等杂质元素在奥氏体晶界偏析而引起晶界脆化，发生回火脆化。

2. SA387 Gr11 CL2钢缺陷预防措施

（1）冷裂纹的预防措施 ①清理坡口表面及坡口母材两侧30mm范围内的油污、氧化皮、铁锈等杂质。②选择低氢型碱性焊接材料。③按要求进行烘干焊条、焊剂，去除其水分。④焊前进行预热，降低焊接接头冷却速度，防止形成淬硬组织，减少焊接变形，降低焊接接头的

残余应力。⑤焊后立即后热处理，降低焊接接头的拘束度，同时加快焊缝及热影响区中氢的逸出。

（2）再热裂纹及回火脆化现象的预防措施 ①严格控制母材中的杂质元素含量。②选择与母材匹配的焊接材料，并控制焊接材料的杂质元素含量。③正确选择预热温度和道间温度。④焊接过程采用小的热输入，缩小焊接接头过热区的宽度，限制晶粒长大。⑤合理选择热处理工艺，尽量缩短在敏感温度区间的保温时间。

3. SA387 Gr11 CL2钢的焊接工艺

（1）焊后消应力热处理 珠光体耐热钢焊接材料的选配应该是焊缝金属的化学成分和力学性能与母材尽量相近，使焊接接头具有与母材相同的抗氧化性、热强性和抗硫化物腐蚀性。

第一，采用R307B、ϕ4.0mm焊条，H11CrMo45A（ϕ4.0mm）+SJ603R埋弧焊丝+焊剂，其化学成分如表3、表4所示。

表3 焊条R307B的化学成分（质量分数） (%)

化学成分	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
规定值	0.05~0.12	≤0.90	≤0.025	≤0.015	≤0.60	1.00~1.50	0.45~0.65
实际值	0.07	0.64	0.009	0.004	0.26	1.11	0.51

表4 焊丝H11CrMo45A的化学成分（质量分数） (%)

化学成分	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Cu
规定值	≤0.20	0.45~1.20	≤0.010	≤0.010	≤0.40	1.00~1.75	0.45~0.65	≤0.35
实际值	0.16	0.98	0.005	0.002	0.20	1.41	0.53	0.05

第二，焊前清理坡口，预热最低温度为150℃，预热是防止焊接接头冷裂纹的有效措施，焊接过程中控制最大道间温度为230℃。

第三，焊接参数如表5所示。

表5 焊接参数

层次	焊接方法	焊材牌号	焊材直径/mm	种类极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min^{-1}	热输入/kJ·cm^{-1}
打底	SMAW	R307B	4.0	直流反接	115~120	20~24	8~10	13~22
填充	SMAW	R307B	4.0	直流反接	150~160	22~26	16~24	8~16
填充盖面	SAW	H11CrMo45A	4.0	直流反接	510~530	30~33	45~50	18~24

第四，焊后立即进行后热消氢处理，温度为（250～300）℃×2h。

第五，焊后消除应力热处理，加热温度为（680±10）℃，保温600min。焊后消除应力热处理工艺曲线，如图1所示。

第六，力学性能如表6所示，满足SA387 Gr11 CL2钢材料标准要求，符合NB/T47014-2011《承压设备焊接工艺评定》。

（2）热处理工艺为正火处理 选用等强匹配的焊材焊接，经过正火处理后其抗拉强度不能满足要求，所以需要强除度级别才能满足要求。

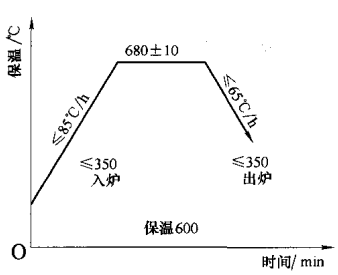

图1 焊后消应力热处理工艺曲线

表6 SA387 Gr11 CL2钢消除应力热处理的力学性能

项目	焊接方法	室温拉伸试验	冲击试验（0℃）A_{KV2}/J		弯曲试验
		R_m/MPa	焊缝1/4处	热影响区1/4处	d=4a，180°
实测值	焊条电弧焊	630，630	138，167，162	223，174，190	四件侧弯全部合格
	埋弧焊	605，595	134，148，120	178，168，171	

第一，采用R407B ϕ3.2mm、ϕ4.0mm焊条，H13Cr2.25Mo1A（ϕ4.0）+SJ603R埋弧焊丝+焊剂，其化学成分如表7、表8所示。

第二，焊前清理坡口，预热最低温度为150℃，焊接过程中控制最大道间温度为230℃。

第三，焊接参数如表9所示。

第四，力学性能如表10所示，满足SA387 Gr11 CL2钢材料标准要求，符合NB/T47014—2011《承压设备焊接工艺评定》。

第五，焊后立即进行后热消氢处理：（250～300）℃×2h。

第六，焊后模拟热成形+正火+回火+去应力热处理：模拟热成形加热温度（950±10）℃，保温150min；正火加热温度（920±10）℃，保温150 min；回火加热温度（700±10）℃，保温270 min；去应力热处理加热温度（680±10）℃，保温600 min，热处理工艺曲线如图2所示。

表7 焊条R407B的化学成分（质量分数） (%)

化学成分质	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
规定值	0.05~0.12	≤0.90	≤0.025	≤0.015	≤0.60	2.00~2.50	0.90~1.20
实际值	0.08	0.86	0.0043	0.0034	0.20	2.30	1.08

表8 焊丝H13Cr2.25Mo1A的化学成分（质量分数） (%)

化学成分	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Cu
规定值	0.05~0.12	≤1.20	≤0.012	≤0.012	≤0.80	2.00~2.50	0.90~1.20	≤0.35
实际值	0.087	0.83	0.007	0.005	0.24	2.39	1.05	0.08

表9 焊接参数

层次	焊接方法	焊材牌号	焊材直径/mm	种类极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/cm·min^{-1}	热输入/kJ·cm^{-1}
打底	SMAW	R407B	3.2	直流反接	80~100	18~22	6~10	8~22
填充	SMAW	R407B	4.0	直流反接	140~160	22~26	12~20	9~21
填充盖面	SAW	H13Cr2.25Mo1A	4.0	直流反接	500~550	30~33	45~55	16~25

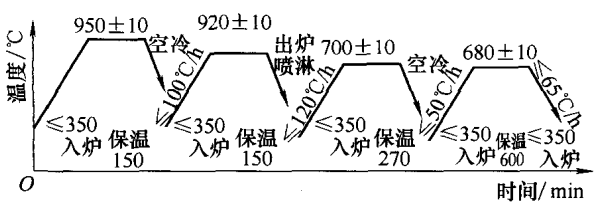

图2 热处理工艺曲线

表10 SA387 Gr11 CL2钢正火处理的力学性能

项目	焊接方法	室温拉伸试验	冲击试验（0℃）A_{KV2}/J		弯曲试验
		R_m/MPa	焊缝1/4处	热影响区1/4处	d=4a、180°
实测值	焊条电弧焊	560，530，555	160，182，152	136，160，158	四件侧弯全部合格
	埋弧焊	525，520，530	174，175，174	156，170，163	

4. 结语

（1）在采购SA387 Gr11CL2钢和焊材时，应严格控制其S、P、As、Sn和Sb等杂质元素含量。SA387 Gr11 CL2钢焊接性较差，焊接过程中容易产生淬硬组织及冷裂纹，焊接过程中应严格控制预热、道间温度，采用多层多道、小的热输入焊接，焊后应立即进行消氢处理。

（2）SA387 Gr11 CL2钢在正火处理下，选用等强匹配的焊材焊接，抗拉强度无法满足要求，需要提高焊材强度级别才能够满足要求。

（3）使用国产焊接材料对SA387 Gr11 CL2钢在两种热处理制度下进行了焊接工艺性试验，各项性能指标均满足SA387Gr11CL2钢材料标准要求。

MW（20120715）