



SA387Gr11CL2材料焊接工艺

赵瑞辉

【摘要】二烯反应器主体材质为SA387Gr11CL2，属于1.25Cr-0.5Mo低合金耐热钢，具有冷裂纹、再热裂纹和回火脆性等焊接特性，以产品中主要用到的焊条电弧焊和埋弧焊两种方法，制定焊接工艺，进行焊接工艺评定试验。结果表明，焊接接头的各项力学性能均满足标准规范和设计技术条件要求，该工艺应用于产品焊接生产，保证了焊接接头的质量。

关键词：SA387Gr11CL2；焊接性；焊接工艺；工艺评定试验

我公司制造的一台二烯反应器，结构如图1所示，设计温度316℃（内压），设计压力8.83MPa（内压），最低设计金属温度-10℃，介质为碳氢化合物、氢气和水等，筒体规格为φ1 520mm×60mm。主体材质为SA387Gr11CL2，该材料主要用于要求高温强度、抗氧化性、抗氢性条件下的高温高压化工容器。因产品制造需满足ASME第Ⅷ—1卷、API RP934—C标准规范及设计技术条件要求，所以对产品焊接提出较高要求，为此以产品制造过程中主要用到的焊条电弧焊和埋弧焊两种焊接方法进行工艺评定试验，制定焊接工艺，以保证产品焊接质量满足标准规范要求。

1. 焊接性分析

SA387Gr11CL2材料的化学成分及力学性能如表1、表2所示，供货状态为正火加回火，属

于1.25Cr-0.5Mo低合金耐热钢，具有以下焊接特性。

第一，低合金耐热钢由于碳当量较高，且铬钼合金元素能提高钢的淬硬性，延迟钢在冷却过程中的转变，提高过冷奥氏体的稳定性，故当以较快速度冷却

时，会产生淬硬的马氏体组织，在氢和拘束应力作用下产生冷裂纹。因此焊接时应采取焊前预热，焊后保温缓冷，或进行焊后消氢处理，以减少焊缝中的氢含量，降低焊接接头拘束应力。

第二，低合金耐热钢中含有

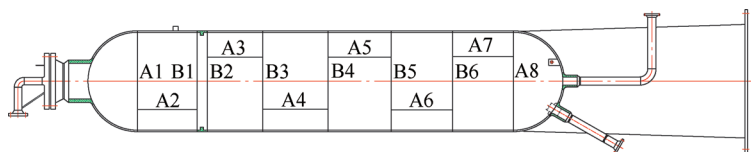


图1 产品结构

表1 化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sb	Sn	As	X指数	Y指数
0.14	0.57	0.54	0.006	0.001	1.42	0.19	0.63	0.01	0.001	0.001	0.0045	7ppm	82ppm

注：1ppm=10⁻⁶

表2 力学性能

力学性能	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后伸长率 （%）	冲击试验（-18℃） /J				高温拉伸	
				1	2	3	平均	温度 /℃	屈服强度 /MPa
最大模拟热处理	463	598	29.5	236	273	230	246	435	380
最小模拟热处理	478	616	29.5	203	238	239	227	435	405

注：最大模拟热处理：（690±14）℃/24h；最小模拟热处理：（690±14）℃/6h。

Cr、Mo、V、Nb和Ti等强碳化物形成元素，使接头的过热区（粗晶区）具有不同程度的再热裂纹敏感性，在高拘束应力下会产生裂纹缺陷。因此应严格控制母材和焊材中的再热裂纹合金成分，选用高温塑性优于母材的焊接填充材料，适当提高预热温度和层间温度，采用低热输入焊接工艺，尽量缩短焊接接头过热区的宽度，限制晶粒长大，热处理时缩短接头在敏感温度区间的保温时间，降低焊接接头拘束度。

第三，低合金耐热钢在370~565℃温度区间长时间加热时，由于钢中微量元素P、As、Sb和Sn沿晶界的扩散偏析会出现渐进的脆变现象。因此焊缝金属中应严格限制这些元素的含量。通常采用脆性指数 X 、 J 来进行计算， $X \leq 20\text{ppm}$ ， $J \leq 150\text{ppm}$ （ $1\text{ppm}=10^{-6}$ ），同时也应限制焊接接头在此温度区间长时间加热。

2. 焊接工艺制定

(1) 焊接方法 产品中壳体纵环缝采用埋弧焊里外坡口焊接，管口接管与壳体采用焊条电弧焊里外坡口焊接，接管与接管、法兰的焊接为氩弧焊打底，焊条电弧焊填充盖面，以焊条电弧焊焊接为主，附件与壳体连接采用焊条电弧焊进行焊接，因此本文主要对产品用到的焊条电弧焊和埋弧焊进行了焊接工艺评定试验研究。

(2) 焊接材料 选用某厂家生产的国产焊材，焊条为R307G、 $\phi 4.0\text{mm}$ ，埋弧焊焊丝、焊剂为H08CrMoG（ $\phi 4.0\text{mm}$ ）/SJ110，熔敷金属化

学成分如表3、表4所示。其熔敷金属化学成分与母材相匹配， X 指数小于API RP934—C标准规定的最大值15ppm。

(3) 坡口形式 工艺评定试验选用40mm厚板材，坡口形式如图2所示。产品壳体壁厚为60mm，为提高生产效率，根据公司加工能力，主筒体A类焊缝（含筒体与球形封头A类焊缝）坡口形式和工艺评定试验相同，B类焊缝坡口形式为UV形。

(4) 焊前坡口清理 低合金耐热钢焊接前应仔细清理坡口表面，对于热切割形成的坡口表面，焊前必须清理干净切割熔渣和氧化皮，机械加工表面应去除油污等杂质，采用砂轮打磨出金属光泽，并进行表面无损检测确认无缺陷，防止成为焊接接头裂纹的开裂源。

(5) 预热和道间温度 预热是防止低合金耐热钢焊接接头冷裂纹和再热裂纹的有效措施之

一，根据产品材料焊接特性，规定预热温度 $\geq 150^\circ\text{C}$ ，焊接过程中道间温度控制在150~250℃之间，预热温度应在焊缝两侧至少一个板厚的范围内保持上述温度，且预热区内外表面均应达到上述温度。当需要在产品制造过程中进行开孔切割，焊缝背面碳弧气刨清根时，也应按此温度在操作之前进行预热。

(6) 焊后消氢处理 焊后消氢处理可以避免延迟裂纹的产生，降低焊接接头中氢的含量，代替产品焊接中间消应力热处理，规定焊后进行300~350℃消氢处理，保温2h，消氢处理应在焊接结束或中断操作时立即进行。

(7) 焊后热处理 对于低合金耐热钢来说，焊后热处理的目的不仅是消除焊接残余应力，更重要的是改善金属组织，提高接头的综合力学性能，包括降低焊缝及热影响区的硬度，

表3 焊条R307G熔敷金属化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	As	Sb	X 指数
0.07	0.18	0.73	0.003	0.009	1.20	0.15	0.54	0.02	0.003	0.002	0.001	10.9ppm
0.06	0.19	0.65	0.003	0.007	1.20	0.12	0.53	0.02	0.003	0.002	0.001	8.9ppm

注：1ppm=10⁻⁶

表4 焊丝焊剂H08CrMoG/SJ110熔敷金属化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	As	Sb	X 指数
0.06	0.22	0.78	0.005	0.009	1.15	0.10	0.48	0.03	0.001	0.003	0.001	10.2ppm

注：1ppm=10⁻⁶

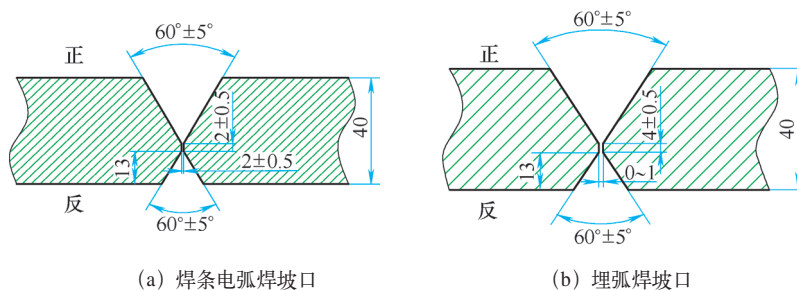


图2 坡口形式

提高接头的高温蠕变强度和组织稳定性等。产品消除应力热处理为690℃±14℃/3h，根据设计技术条件要求，考虑到设备出现多次返修后重新进行热处理的情况，工艺评定试验分别进行690℃±14℃/3h热处理和690℃±14℃/12h热处理。

(8) 焊接参数 低合金耐热钢在焊接过程中，热输入过小时，热影响区温度梯度增大，冷却速度快，淬硬倾向大，从而冷裂纹倾向增大；热输入过大时，使热影响区组织粗化，导致热影响区脆化现象的发生，降低接头的强度和韧性，所以应选择合适焊接参数，制定的焊接参数如表5、表6所示。

3. 焊接工艺评定

按照ASME第IX卷、API RP934—C标准规范及设计技术条件要求，根据以上制定的焊接工艺，选用厚度为40mm的SA387Gr11CL2板材进行焊接工艺评定试验。一组采用焊条电弧焊，评定编号为PQR1504A（690℃±14℃/3h热处理）和PQR1512A（690℃±14℃/12h热处理）；一组采用埋弧焊，评定编号为PQR1505A（690℃±14℃/3h热处理）和PQR1513A（690℃±14℃/12h热处理）。

试件焊接完24h经100%RT+100%MT检测无缺陷后，取样进行常温拉伸、高温拉伸、弯曲、冲击及硬度等试验项目，试验结果如表7~表11所示。

从试验结果可以看到，评定试验常温抗拉强度均高于母材SA387Gr11CL2标准规定最小抗

表5 焊条电弧焊焊接参数

层数	焊接材料	规格 φ/mm	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
正1~2	R307G	4.0	DCEP	140~170	23~26	16~18	≤16.6
正3~n	R307G	5.0	DCEP	180~200	24~28	18~20	≤18.66
反1~2	R307G	4.0	DCEP	140~170	23~26	16~18	≤16.6
反3~n	R307G	5.0	DCEP	180~200	24~28	18~20	≤18.66

表6 埋弧焊焊接参数

层数	焊接材料	规格 φ/mm	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
正1	H08CrMoG+SJ110	4.0	DCEP	500~550	28~30	45~50	≤22
正2~n	H08CrMoG+SJ110	4.0	DCEP	550~600	32~36	40~46	≤32.4
反1~n	H08CrMoG+SJ110	4.0	DCEP	550~600	32~36	40~46	≤32.4

表7 常温拉伸试验结果

评定编号	试样编号	抗拉强度/MPa	断裂部位和特性
PQR1504A	848-1	624	塑断于焊缝
	848-2	623	塑断于焊缝
PQR1512A	845-1	552	塑断于焊缝
	845-2	554	塑断于焊缝
PQR1505A	870-1	604	塑断于焊缝
	870-2	620	塑断于焊缝
PQR1513A	856-1	588	塑断于焊缝
	856-2	580	塑断于焊缝

表8 高温拉伸试验结果

评定编号	试样编号	试验温度/℃	屈服强度/MPa	断裂特性
PQR1504A	1504A-1	316	287	韧性断裂
PQR1512A	1512A-1	316	295	韧性断裂
PQR1505A	1505A-1	316	295	韧性断裂
PQR1513A	1513A-1	316	301	韧性断裂

表9 弯曲试验结果

评定编号	试样编号	试样类型	压头直径/mm	弯曲角度(°)	试验结果
PQR1504A	848	侧弯	40	180	合格(4件)
PQR1512A	845	侧弯	40	180	合格(4件)
PQR1505A	870	侧弯	40	180	合格(4件)
PQR1513A	856	侧弯	40	180	合格(4件)

表10 冲击试验结果

评定编号	试样编号	缺口部位	试验温度/℃	试验尺寸/mm×mm×mm	冲击吸收能量/J	平均值/J
PQR1504A	1504A-1, 2, 3	焊缝	-20	55×10×10	173, 173, 133	160
	1504A-4, 5, 6	热影响区	-20	55×10×10	196, 134, 195	175
PQR1512A	1512A-1, 2, 3	焊缝	-20	55×10×10	80, 79, 112	90
	1512A-4, 5, 6	热影响区	-20	55×10×10	220, 236, 217	224
PQR1505A	1505A-1, 2, 3	焊缝	-20	55×10×10	151, 181, 191	174
	1505A-4, 5, 6	热影响区	-20	55×10×10	221, 203, 205	210
PQR1513A	1513A-1, 2, 3	焊缝	-20	55×10×10	269, 60, 155	161
	1513A-4, 5, 6	热影响区	-20	55×10×10	49, 249, 154	151

表11 硬度检测结果

评定编号	试样编号	测试形式	硬度值HV		
			母材	热影响区	焊缝
PQR1504A	848	HV10	160~165	159~164	156~165
PQR1512A	845	HV10	160~165	161~166	155~159
PQR1505A	870	HV10	160~162	157~162	153~157
PQR1513A	856	HV10	158~162	159~162	158~160

拉强度值515MPa，高温屈服强度满足设计技术条件规定的“高温拉伸试验温度316℃，屈服强度合格值不低于246MPa”的要求，弯曲试验试样受拉表面无缺陷，横向冲击试验试样冲击吸收能量值满足API RP934—C标准规定的“-18℃下三个试样平均最小值54J，单个最小值为27J”的要求，硬度检测结果HV值均小于API RP934—C标准规定的最大值HV235，试验结果符合ASME第IX卷、API RP934—C标

准规范及设计技术条件要求，证明以上制定的焊接工艺可以保证产品焊接接头质量要求。

4. 结语

以公司产品二烯反应器所用到的SA387Gr11CL2材料，进行焊接性分析，制定焊接工艺，进行了焊条电弧焊和埋弧焊两种焊接方法的工艺评定试验。试验结果满足ASME第IX卷、API RP934—C标准规范及设计技术条件要求，该工艺应用于产品焊接，焊接质量得以保证。

参考文献：

- [1] 赵瑞辉, 张连伟.SA387Gr12CL2材料焊接工艺[J]. 金属加工(热加工), 2014, 8: 52-54.
- [2] 邓万华, 李发林SA387Gr11CL2新材料焊接工艺评定[J]. 金属加工(热加工), 2008, 8: 50-52.
- [3] 赵卫君, 李春光, 李宜男. 气化炉用SA387Gr11CL2钢国产焊材试验研究[J]. 电焊机, 2012, 2: 149-151.
- [4] 杨宝峰, 李佳. 国产焊接材料在SA387Gr11CL2钢上的焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2012, 20: 60-62.

作者简介：赵瑞辉，中船圣汇装备有限公司。

MW 20160522

(上接第52页)

6. 焊接检测标准

焊接工艺标准依照：EN ISO 15609—1制定；焊接检测依照EN287—1 焊工技能评定及熔焊焊接及大赛专用外观评分表；探伤标准依照欧洲标准EN ISO 5817：2003。

对焊件进行了外部、内部质量及力学性能进行检查测定，结果如下：

(1) 外观检查 焊缝正反表面无气孔、冷缩孔、裂纹、夹渣、未熔合及未焊透等缺陷；焊缝厚度、焊缝宽度、焊缝外观成形、咬边或不正确的焊脚（焊道）等符合EN287—1焊工技能评定-熔焊焊接及大赛专用外观

评分表B级焊缝检测标准。

(2) 内部检查 焊缝进行了X射线探伤检测。经检测，内部无裂纹、未熔合、夹渣及气孔等超标缺陷，符合欧洲标准EN ISO 5817：2003B级检测标准要求。

(3) 力学性能检测 拉伸试样满足标准要求，弯曲试验无裂纹。

7. 结语

在培训过程中教师与选手不断摸索总结经验，结合内部及外部质量检测结果，随时调整相应参数，制定出合格的操作流程。培训时严格按照上述工艺进行培训，把焊接时易出现的缺陷逐一克服，为J421的焊接操作做好了

技术储备。在德国埃森举办的国际焊工大赛中，参加培训的选手取得了手工焊组比赛的第二名，同时验证了制定的操作流程及工艺的正确性。

参考文献：

- [1] 刘家发. 焊工手册(手工焊接与切割)[M]. 第3版. 北京：机械工业出版社, 2001.

作者简介：刘永庆、张先龙、刘春，大庆油田工程建设公司培训中心；王召军，大庆油田工程建设公司安装公司；徐庆海，大庆油田装备制造集团。

MW 20160522