

吴祖乾、虞茂林、顾溥锦 编著

低合金钢厚壁 压力容器焊接

上海科学技术文献出版社

57.11

目 录

第一章 概述	1
一、厚壁压力容器的技术进展	1
(一)压力容器向大型化过渡	1
1. 石油化工容器	1
2. 核反应堆压力容器	2
3. 电站锅炉	3
(二)低合金高强度钢的广泛应用	3
(三)焊接新工艺、新技术的推广和使用	4
二、对焊接接头的基本要求和存在问题	5
(一)对焊接接头的基本要求	5
(二)厚壁压力容器焊接中存在的问题	5
第二章 低合金高强度钢在焊接时的转变特性	8
一、压力容器用低合金高强度钢简介	8
(一)低合金高强度钢的特点	8
(二)低合金高强度钢的分类	9
(三)低合金高强度钢的组织 and 性能	12
二、低合金高强度钢焊接热影响区的特点	13
(一)热影响区的焊接热过程	13
(二)焊接热影响区组织和性能的变化	16
三、低合金高强度钢在焊接加热和冷却时的转变	19
(一)钢在焊接加热时的转变	19
(二)钢在焊接冷却时的转变	20
1. 连续冷却转变图(CCT图)的建立	20
2. 低合金高强度钢的连续冷却转变特点	22
3. 连续冷却转变图的应用	24
第三章 低合金高强度钢厚壁压力容器的焊接工艺	27
一、厚壁压力容器的制造工艺	27
(一)厚壁压力容器制造工艺过程	27
1. 超高压锅炉汽包	27
2. 原子能电站稳压器	27
3. 铀-钍加氢反应器	33



A942765

4. 尿素合成塔	33
5. 氨合成塔	33
(二) 筒身制造	33
1. 单层容器	33
2. 多层容器	34
(三) 封头制造	35
1. 冲压成形	35
2. 旋压成形	36
3. 铸造封头	36
(四) 焊接坡口准备和容器组装	36
1. 焊接坡口准备	36
2. 焊缝组装	37
(五) 预热和热处理	38
1. 预热	38
2. 中间热处理和去氢处理	41
3. 调质(或正火加回火)处理	41
4. 焊后热处理	41
二、筒身纵缝焊接	46
(一) 电渣焊	46
(二) 埋弧自动焊	47
1. 单层容器	47
2. 多层容器	48
三、容器环缝焊接	49
(一) 单层容器	49
(二) 多层容器	50
(三) 深坡口焊接技术	52
1. 导电嘴和焊丝对中	52
2. 引弧技术	55
3. 根部焊接技术	56
四、大接管焊接	58
(一) 接管与筒体的焊接	58
(二) 接管端的过渡段焊接	61
五、补焊	64
(一) 补焊工作的特点	64
(二) 补焊的原则及注意事项	65
1. 补焊方案的确定	65
2. 压力容器补焊中的注意事项	68
(三) 压力容器的补焊举例	69
1. 电站锅炉汽包大型不全焊透、插入式双面焊大接管根部裂缝的现场补焊	69
2. 电站锅炉汽包内伸式下降管焊接接头中再热裂缝的补焊	70
3. 压力容器大口径厚壁接管焊接接头层状撕裂的补焊	71

4. 化肥设备多层容器环焊缝锻件封头处裂缝的补焊	72
5. 汽包筒体裂缝挖除后的镶块补焊	74
六、耐蚀层堆焊	75
(一) 不锈钢带极堆焊的几个问题	76
1. 稀释和过渡层的堆焊	76
2. 熔合区的塑性	77
3. 碳的迁移及其对接头性能的影响	77
(二) 堆焊工艺参数的选择	77
1. 电源	77
2. 堆焊电流	78
3. 电弧电压	78
4. 焊接速度	78
(三) 堆焊材料的选择	79
(四) 堆焊层的性能	80
1. 堆焊层的脆性	80
2. 耐晶间腐蚀能力	82
3. 耐均匀腐蚀和应力腐蚀的能力	83
4. 压力容器部件堆焊技术	83
七、耐蚀密封面堆焊	85
(一) 熔化极脉冲堆焊	85
1. 熔化极脉冲堆焊的特点	85
2. 堆焊规范参数	86
3. 堆焊层性能	87
(二) 带极埋弧堆焊	89
八、不锈复合材料的焊接	90
(一) 不锈复合板的焊接特点	90
(二) 不锈复合容器的焊接	90
1. 手工电弧焊	90
2. 双丝埋弧焊	91
3. 窄带极焊	93
第四章 低合金高强度钢的焊接裂缝	95
一、热影响区冷裂缝	95
(一) 热影响区冷裂缝的特点	95
(二) 形成热影响区冷裂缝的主要因素	96
1. 敏感的显微组织	96
2. 足够高的氢浓度	98
3. 拘束度与残余应力	101
(三) 防止热影响区冷裂缝的措施	102
1. 焊接材料的控制	102
2. 冷却速度的控制	103

3. 后热的应用	104
4. 结构拘束度和残余应力的控制	105
(四) 焊接根部焊缝预热温度的确定	106
1. 最高硬度试验	106
2. 自拘束裂纹试验	107
3. 开裂参数的研究	108
4. 临界断裂应力 σ_{cr} 的研究	109
(五) 多层焊预热、层间和后热温度的确定	111
1. 多层焊的特点	111
2. 预热和层间温度的确定	112
3. 后热温度和时间的确定	114
二、焊缝金属冷裂纹	115
(一) 焊缝金属冷裂纹的特点	115
(二) 形成焊缝金属冷裂纹的主要因素	116
(三) 防止焊缝金属冷裂纹的措施	117
三、焊缝金属热裂纹	118
(一) 焊缝金属热裂纹的特点	118
(二) 形成焊缝金属热裂纹的主要因素	121
1. 焊缝金属的化学成分	121
2. 焊缝金属的一次组织	122
3. 熔池形状和焊缝成形	122
4. 母材强度	122
5. 焊接接头刚性拘束条件	124
(三) 防止焊缝金属热裂纹的措施	124
1. 焊缝金属化学成分的控制	124
2. 焊接应力和应变的控制	125
3. 焊接规范的控制	125
四、热影响区液化裂纹	126
(一) 热影响区液化裂纹的特点	126
(二) 形成热影响区液化裂纹的主要因素	128
1. 母材的化学成分	128
2. 焊缝形状	128
3. 焊接热输入量	129
(三) 防止热影响区液化裂纹的措施	129
五、再热裂纹	129
(一) 再热裂纹的特点	129
(二) 再热裂纹的研究概况及其机理	133
(三) 形成再热裂纹的主要因素	138
1. 合金元素的影响	138
2. 焊接残余应力的影响	139
3. 热处理温度和保温时间的影响	140

4. 焊接规范参数的影响	141
(四) 防止再热裂纹的措施	141
1. 材料的选择	141
2. 焊缝金属的选择	142
3. 结构刚性及焊接残余应力的控制	143
4. 采用合适的焊接工艺	143
5. 热处理制度的选择	144
6. 重视焊接质量的检验	144
六、层状撕裂	145
(一) 层状撕裂的特点	145
(二) 形成层状撕裂的主要因素	146
1. 钢材性能	146
2. 结构形式	147
3. 焊接工艺	147
(三) 钢板层状撕裂敏感性的评定方法	147
1. 专门设计的层状撕裂敏感性试验	147
2. 厚度方向拉伸试验	148
(四) 防止层状撕裂的措施	149
1. 冶金方面的措施	149
2. 结构上的措施	149
3. 工艺上的措施	150
第五章 低合金高强度钢焊接接头的机械性能	153
一、影响焊缝金属和焊接接头机械性能的主要因素	153
(一) 焊缝金属化学成分	153
(二) 焊接热输入量	155
(三) 焊后热处理规范	158
二、18MnMoNb 钢焊接接头的机械性能	160
(一) 18MnMoNb 钢的焊接要点	162
(二) 18MnMoNb 钢手工电弧焊接头的机械性能	162
(三) 18MnMoNb 钢电渣焊接头的机械性能	165
(四) 18MnMoNb 钢埋弧自动焊接头的机械性能	167
三、13MnNiMo54(BHW-35) 钢焊接接头的机械性能	170
四、20MnNiMoNb 钢焊接接头的机械性能	171
第六章 厚壁压力容器的窄间隙焊接	177
一、窄间隙焊接的概况	177
二、窄间隙焊接的特点	178
三、粗丝窄间隙气电焊的工艺规范	181
四、焊接材料	184

五、窄间隙焊接接头的性能	186
六、窄间隙气电焊在压力容器制造中的应用	189
第七章 断裂力学在压力容器焊接中的应用	197
一、低应力脆性破坏和断裂质量控制	197
(一)低应力脆性破坏	197
(二)断裂质量控制	198
二、派林尼断裂分析图的应用	200
(一)派林尼断裂分析图的意义	200
(二)派林尼断裂分析图应用举例	201
三、压力容器焊接缺陷的断裂力学分析	202
(一)线弹性断裂力学	203
(二)弹塑性断裂力学	208
(三)焊接缺陷的评定	212
(四)疲劳裂缝扩展速率	215
1. 疲劳裂缝扩展特性	215
2. 压力容器疲劳寿命的估算	216
(五)断裂安全分析应用举例	217

第一章 概 述

一、厚壁压力容器的技术进展

六十年代以来,随着石油化工、电站锅炉和原子能工业的迅猛发展,厚壁压力容器技术也有了很大的进展。它主要表现在以下三个方面:第一,压力容器向大型化过渡,容器直径和壁厚成倍增长;第二,低合金高强度钢的广泛应用,大部分压力容器均采用了各种级别的低合金高强度钢;第三,焊接新工艺、新技术的推广和使用,焊接质量进一步提高,从而提高了这些大型产品的可靠性。

(一) 压力容器向大型化过渡

1. 石油化工容器

合成氨、尿素、乙烯和加氢反应器等装置是石油化学工业的关键设备。目前国外合成氨和尿素装置已基本稳定在年产30~45万吨的水平上,个别高达60万吨/年;乙烯装置基本稳定在年产30~50万吨的水平,个别高达68~75万吨/年。表1-1列出我国进口的氨合成塔的主要情况。

表1-1 进口氨合成塔主要情况

生产国	设计压力 (公斤/厘米 ²)	设计温度 (°C)	高压筒体			封头	
			型 式	内 径 (毫米)	壁 厚 (毫米)	型 式	厚 度 (毫米)
美国	153.6	204~315	多层包扎	φ3187	165	单层	118
日本	255	205~371	多层包扎	φ2870	196	单层	142
日本	255	205~371	多层卷绕包扎	φ2870	220	单层	195
法国	295	260~360	四层热套	φ2035	153	单层	106

表1-2 我国化肥压力容器的发展概况

名 称	生产能力 (万吨/年)	设计压力 (公斤/厘米 ²)	结构型式	筒体尺寸(毫米)		材 料
				内 径	壁 厚	
氨合成塔	2.5	320	多层包扎	φ800	151	20g
氨合成塔	8	320	多层包扎	φ1010	85	14MnMoVB
尿素合成塔	11	220	单 层	φ1400	100	BHW-35
尿素合成塔	24	160	单 层	φ2100	95	14MnMoVg
氨合成塔	30	155	三层热套	φ3200	3×50	18MnMoNb

设备大型化的主要优点是可以降低基建投资,便于实现自动化和降低生产成本,但这种大型化同时却意味着容器直径、壁厚和重量的增加。譬如,当前国际上石油化工行业单台容器的最大重量可达 1200 吨,壁厚达 300 毫米。

在各方面的努力下,我国石油化学工业也有了高速进展。我国已顺利地试制成功年产 30 万吨的合成氨设备和年产 24 万吨的尿素装置。表 1-2 列出我国化肥设备的发展概况。

化肥设备除了向大型化过渡外,还出现了各种不同的筒体结构型式,如单层锻焊、单层卷板、多层包扎、多层卷绕包扎、多层绕带包扎和热套等结构。我国用得较多的为单层卷板、多层包扎和热套。

2. 核反应堆压力容器

到 1979 年底,世界上 22 个国家和地区,共有 228 座核电站在运行,总装机容量为 1.3 亿千瓦。加上正在建造、订货和计划中的,总共将有 664 座核电站,总装机容量可达 5.6 亿千瓦。从第一座核电站开始兴建,迄今已有 20 余年历史,在这期间,核电站的单机容量也在不断提高,经历了它自己由小到大的发展过程。譬如,以使用数量最多的轻水型反应堆为例,最初生产的反应堆的容量为 20~30 万千瓦级,到六十年代后期,则出现了一批电功率为 50~90 万千瓦级的核电站反应堆,而目前基本上已定型为 120~130 万千瓦级的标准堆。

核反应堆压力容器是核电站的关键设备之一,由于核电设备单机容量的不断提高,反应堆压力容器的尺寸也愈来愈大。表 1-3 列出有代表性的轻水型反应堆压力容器的工作条件和主要尺寸。

表 1-3 轻水型反应堆的主要参数

堆 名	堆 型	电 功 率 (万千瓦)	设计压力 (公斤/厘米 ²)	设计温度 (°C)	压力壳尺寸(毫米)		
					内 径	壁 厚	高 度
希 平 港	压水堆	15	176	316	2800	213	9600
德累斯顿 1	沸水堆	20	88	343	3700	152	12500
派立沙达斯	压水堆	71	176	343	3550	216	12200
德累斯顿 2	沸水堆	71.5	88	303	6380	155	20700

从表 1-3 中可看出,70 万千瓦级反应堆压力壳的直径比相同类型的 20 万千瓦级反应堆增加很多,而壁厚则基本上保持不变,主要原因在于前者采用了强度级别较高的 A533B 钢板和 A-508-II 锻件,而后者则采用了强度级别较低的 A302 钢。

表 1-4 列出各国主要核设备制造厂生产的 120~130 万千瓦级反应堆压力容器的尺寸范围。

表 1-4 120~130 万千瓦级反应堆压力壳的尺寸范围

堆 型	内 径 (毫米)	壁 厚 (毫米)	高 度 (毫米)
压 水 堆	4500~5000	220~250	12000~14000
沸 水 堆	6400~6700	150~170	21000~23000

从以上两表还可以看出,压水堆压力壳的壁比较厚,而沸水堆压力壳的直径则比较大,而且比较高。

8. 电站锅炉

我国电站锅炉在向大容量发展方面取得了较大的成绩。六十年代以来,我国已成功地生产了上百台高压和超高压锅炉。表 1-5 列出我国电站锅炉汽包的工作条件和主要尺寸。

我国自行设计的 30 万千瓦电站锅炉为直流式锅炉。目前正拟发展汽包式 30 万千瓦和 60 万千瓦的电站锅炉,预计上述锅炉汽包的壁厚将至少在 130 毫米以上。

表 1-5 我国电站锅炉汽包的主要参数

容 量 (万千瓦)	设计压力 (公斤/厘米 ²)	设计温度 (°C)	蒸 发 量 (吨/英寸)	内 径 (毫米)	壁 厚 (毫米)	材 料
5	100	320	220	1600	92	19Mn5
10	114	320	410	1800	65	BHW-35
12.5	155	350	400	1600	80	BHW-35
20	155	350	670	1800	84	18MnMoNb (14MnMoV)

上述情况表明,厚壁压力容器在国民经济中已占有相当重要的地位,我国目前已基本掌握了壁厚为 150~200 毫米大型容器的制造和焊接技术。随着我国石油化工、原子能和其它能源工业的进一步发展,壁厚在 200 毫米以上的重型压力容器的焊接制造将很快会成为现实。

(二) 低合金高强度钢的广泛应用

压力容器向大型化过渡的结果,为了充分发挥制造厂现有生产设备的卷板和冲压能力,以及现有的起吊和运输能力,要求压力容器的壁厚尽可能的薄,同时也要求容器的重量限止在一定的范围之内。这样,就促使低合金高强度钢在厚壁压力容器上获得了日益广泛的应用。

压力容器用低合金高强度钢无论在室温或在 350°C 中温下,都具有较高的强度,而且低温冲击韧性和可焊性也比较好。国外使用低合金高强度钢也只有二、三十年的历史,早期大量使用抗拉强度为 50 公斤/毫米²级的碳-锰钢来制造压力容器,如美国的 A212B 和日本的 Welten50 等。在压力容器向大型化过渡后,壁厚的增加使强度感到不足,因此,在碳-锰钢的基础上,又加入了铬、钼、镍、钒等合金元素,发展了一批抗拉强度为 60 公斤/毫米²级(相当于我国屈服强度为 50 公斤/毫米²级)的钢种,如美国的 A533B, A508-III, 英国的 Duool W-80, 西德的 BHW-35, 法国的 AMMO-45, 日本的 Welten 60 等,这些钢种后来成为制造锅炉汽包、大型化肥装置和原子能反应堆压力容器的主要材料。强度级别更高的钢种一般用于有特殊用途的压力容器,如美国的 HY-80 钢材等。

我国早在六十年代初期就开始使用屈服强度为 35~40 公斤/毫米²级的 16Mn 和 15MnV 等低合金钢,接着又研制了屈服强度为 50 公斤/毫米²级的 18MnMoNb 和 14MnMoV 等压力容器用钢,近年来,又试制成功了强度级别更高的 14MnMoNbB 等钢种。其中,18MnMoNb 和 14MnMoV 钢在单层厚壁压力容器上使用最广,如年产 30 万吨的氨合成塔,年产 24 万吨的尿素合成塔和 20 万千瓦发电机组锅炉汽包等,兰州石油化工机器厂

采用 18MnMoNb 钢已先后制造了一百多台厚壁压力容器。除一般压力容器用钢外,我国还研制成了核容器用 20MnNiMoNb 钢和 14Cr2Ni4MoV 钢,它们不仅具有良好的缺口冲击韧性,同时还能满足辐照等特殊条件下的性能要求。为了满足对低合金高强度钢厚板日益增长的需要,我国还从西德进口了较多数量的 BHW-35 钢板(早期为 BHW-38 钢板)来制造锅炉汽包和各种大型化肥设备。

低合金高强度钢之所以能广泛应用于厚壁压力容器,除了具有较高的强度性能,足够的韧性及某些特殊性能外,还具有良好的可焊性。通过长时期的试验研究工作和生产经验积累,目前国内各主要容器制造厂基本上都已掌握了各种低合金高强度钢的焊接技术。在科学的技术管理和严格遵守工艺规程的前提下,是有把握制成各种优质厚壁压力容器的。

(三) 焊接新工艺、新技术的推广和使用

虽然大量应用了低合金高强度钢,但厚壁压力容器的焊接还仍然以手工电弧焊、埋弧自动焊和电渣焊为主。同时必须注意到,这些传统的方法本身却日益不断地完善和成熟,焊接质量也在日趋稳定和提高。目前,在各制造厂,压力容器环缝一般采用埋弧自动焊,纵缝采用电渣焊,而各种接管与筒体的焊接基本上还是采用手工电弧焊。

埋弧自动焊的进展主要反映在深坡口焊接和封底焊技术方面。当前,我国环焊缝的最大厚度已达 200 毫米,继续增加壁厚看来也完全可以掌握。封底焊接除用手弧焊或埋弧自动焊外,正在进行脉冲钨极氩气保护单面焊双面成形试验。国外在埋弧焊方面已推广串连双丝焊,在压力容器上亦有所应用,它的优点是生产效率高,操作简便,但我国尚未正式使用。

电渣焊在压力容器环缝上由于工艺复杂,操作困难及热处理、校圆设备的限制等因素,已不再使用。纵缝焊接仍采用电渣焊,基本上保持原来工艺。为了避免缺陷,对焊接规范必须严格控制,在小规范焊接的情况下,质量是比较稳定的。在电渣焊工艺上,国外倾向于采用熔化嘴电渣焊。熔化嘴电渣焊不需要专用设备,且容易掌握,但我国使用尚少。此外,西德还曾用板极电渣焊方法焊制了一台 130 万千瓦级核电站压水堆压力壳,受到了各方面的重视。

大接管与容器壳体的焊接,目前一般采用手工电弧焊,国外亦有用专用焊机对插入式接管进行埋弧自动焊的,接管自动焊质量容易保证,而且操作条件也比较好。目前,我国也研制成功了插入式接管马鞍形自动焊机,正在上海锅炉厂试用,效果良好。

窄间隙焊接是近几年发展起来的一项焊接新工艺。由于窄间隙焊接生产效率高,热影响区小,接头性能比较好,焊接材料消耗少,所以自研制成功以来,获得了很快的发展,并受到了各方面的重视。窄间隙焊分粗丝和细丝两种,上海锅炉厂采用粗丝(3 毫米)窄间隙焊生产了三台 220 吨/时锅炉汽包,焊接质量全部符合要求,并拟进一步推广和使用。最近日本用窄间隙焊在实验室焊出了 300 毫米厚的试件,焊缝成型良好。此外,窄间隙焊的工艺本身也有了很快的发展,如日本正在研究用双丝或焊丝摆动等新工艺来扩大窄间隙焊的使用范围和提高窄间隙焊的质量。

由于核容器和石油化工容器有耐腐蚀要求,因此,近年来,内壁大面积堆焊技术有了很大的进展。除手工堆焊外,我国也发展了不锈钢带极堆焊,焊带宽 60 毫米,厚 0.5~0.6 毫

米。国外个别工厂有时还采用 120 或 180 毫米宽的带极。带极堆焊效率高，为手工堆焊的 5~6 倍，熔深小，一般仅 1~2 毫米，是一种较为理想的堆焊工艺。熔化极脉冲摆动堆焊也是最近几年才发展起来的一种堆焊新工艺，它允许在较小的面积上进行自动堆焊，因此，也有充分的发展前途。等离子熔化极脉冲堆焊发展较晚，正在试验阶段，还有待于在生产实践中考核。

电子束焊接压力容器在国外有过很多报道，但尚未正式使用，看来一时还不易突破。

二、对焊接接头的基本要求和存在问题

(一) 对焊接接头的基本要求

厚壁压力容器多数在高温高压下运行，但在水压试验时，它们也可能在较低温度下承受负荷，因此，在焊接新技术、新工艺发展的同时，对厚壁压力容器焊接接头也提出了更高的要求。总的说来，这些要求主要反映在两个方面：一是焊缝金属和热影响区除应有一定强度外，还要求有足够高的冲击韧性；二是要求焊接接头无裂缝等缺陷。

为了考核材料的冲击韧性，我国大多数产品采用 U-型缺口冲击韧性(梅氏)试验，但 U-型缺口冲击韧性试验对缺口不敏感，目前正在逐步向 V-型缺口冲击韧性(却贝)试验过渡。除冲击韧性外，焊接接头的性能一般还包括焊缝金属和焊接接头的室温和高温抗拉、接头弯曲、由落锤试验确定的无延性转变温度 (NDT)，以及为满足容器工况条件而提出的一些特殊要求，诸如断裂韧性、疲劳、辐照脆化和耐腐蚀(堆焊层)等性能。

关于焊接接头的合格标准，一般根据母材的性能确定，也有参照具体产品技术要求来确定的。但对厚壁压力容器来说，通常以产品技术条件中的要求作为焊接接头必须满足的性能指标。

一般说来，焊缝金属和热影响区的性能与焊接规范——热输入量有关，也与焊后热处理制度有关。同时，焊缝金属的性能还与焊接材料有关。因此，在焊接前，必须认真选择焊接材料，并充分研究焊接热输入量和焊后热处理制度对焊接接头性能的影响。

除性能要求外，焊接接头还必须保证无明显缺陷，特别不允许裂缝的存在，因为裂缝会给产品带来致命的危害。在厚壁压力容器焊接中，最常见的为焊缝金属热裂缝和焊缝金属及焊接热影响区冷裂缝，其次是层状撕裂和再热裂缝，而热影响区液化裂缝则比较少见。虽然断裂力学认为，如果材料具有足够的断裂韧性，根据容器的应力水平，允许存在一定尺寸的焊接裂缝。但是对现行的各种规范以及产品要求来说，在焊接接头中还是不允许存在任何裂缝的。

(二) 厚壁压力容器焊接中存在的问题

虽然厚壁压力容器的制造在低合金高强度钢的推广和焊接新工艺、新技术的应用方面取得了很大成绩，各容器制造厂已生产了数百台各种类型的高压设备，并积累了丰富的实践经验。但严格说来，还存在着不少问题。譬如，有不少产品要经过多次返修才能合格出厂；有的则在运行过程中不断暴露出质量问题而停产检修。焊接质量问题同样也可以归纳为二

个主要方面:一是焊缝金属和焊接接头的机械性能不符合产品要求;二是在焊接区存在着裂纹等缺陷。

机械性能中的薄弱环节是焊接热影响区的冲击韧性和焊接接头在高温下的抗拉强度。造成机械性能不合格的因素很多,母材原始性能偏低或勉强合格往往是导致接头机械性能,特别是接头抗拉强度出格的重要因素。因为,在大多数情况下,设计部门往往对母材按材料标准作进厂验收,并对产品的最终性能提出同一指标,而实践证明,经过焊接热循环和焊后最终消除应力处理,母材和接头的性能都会有一定幅度的下降,造成了接头性能达不到设计要求的局面。因此,对重要产品(如核容器)来说,应该要求原材料在模拟中间和最终热处理的条件下,达到产品的最终性能指标。其次,焊接规范或焊后热处理制度(包括电渣焊后的正火)选择不当也是造成接头性能下降的另一个重要因素。这后一个因素对冲击韧性的影响更大。作为常规,在低的焊接热输入下,冲击韧性比较高;提高热输入量,会使冲击韧性下降。焊后消除应力温度通常应比母材回火温度低 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$,保温时间最好通过试验作出选择。

焊缝金属和焊接接头中的裂纹是影响压力容器运行的最大危害,也是厚壁压力容器焊接所面临的最主要的技术问题。造成裂纹的原因很多,归纳起来,不外乎焊接材料和焊接工艺两个方面。但在某些情况下,因管理不善也可能成为出现问题的重要因素。

再热裂纹、层状撕裂和液化裂纹等缺陷主要与母材有关。再热裂纹与母材的化学成分关系较为密切,据资料介绍,国外曾多次出现过再热裂纹事例,而且因再热裂纹也发生过数起压力容器爆炸事故。因再热裂纹在最终热处理时产生,根据以往的实践,产品经热处理后一般不再探伤复查,故危害极大。我国也曾因再热裂纹而发生了一起 BHW-38 钢电站锅炉汽包在水压试验时的爆炸事故。后来改用了再热裂纹不敏感的 BHW-35 钢之后,就再也没有发生类似事故。我国用自己生产的低合金高强度钢制造压力容器时,尚未发现有再热裂纹倾向,不过在生产实践中,还是要对此给予足够的重视。

层状撕裂与母材的冶炼和轧制过程有关,我国在焊接压力容器时,也曾发现过多次层状撕裂事例。一般说来,通过板厚方向的拉伸试验,可以确定钢材有否层状撕裂倾向。但问题在于我国还未将板厚方向的拉伸试验列入钢板验收标准,因此有的压力容器不免还会出现上述缺陷。

热影响区液化裂纹亦与母材的化学成分有关,但到目前为止,无论在国内或在国外,还只有少数几个钢种发现有液化裂纹倾向。通过必要的成分调整和冶炼工艺的改进,可以指望此种缺陷不会产生。

焊缝金属热裂纹又称凝固裂纹或结晶裂纹,主要与焊接材料有关,但焊接工艺规范对形成热裂纹亦有很大作用。热裂纹在焊接技术发展的最初阶段,曾是焊接质量方面的主要矛盾,但通过长期来的科学试验和生产实践,已对热裂纹的形成机理有了比较清楚的了解,焊接材料的质量也有了很大的改进。所以上述缺陷目前在生产中已比较少见。

冷裂纹又称延迟裂纹或氢致裂纹,是在焊接过程中出现机率最高的一种缺陷。虽然冷裂敏感性与材料的碳当量有关,但是影响裂纹产生的直接原因,则在于焊接工艺问题上,或因焊接工艺制订不当,或因没有严格执行焊接工艺所致。一般说来,防止冷裂纹的措施还是简单可行的,如预热、后热和采用低氢焊接材料等,在现有的焊接条件下完全可以办到。因此,为了防止冷裂纹的产生,除必须严格执行工艺外,还应加强在焊接生产中的管理工作。

断裂力学是对已经产生裂缝的压力容器进行断裂安全分析的一门新兴学科。利用断裂力学,我国有关单位已成功地对一些存在着裂缝的压力容器进行运转安全性和使用寿命的定量计算和分析,涉及的产品有化肥容器和锅炉汽包等。在实际应用上,断裂力学可以为们提供二方面的数据:一是可以根据焊缝金属和焊接热影响区的断裂韧性,对焊接材料和焊接工艺规范进行评定;二是可以根据裂缝的部位和尺寸,对带裂缝容器的运行可靠性进行预测,防止发生脆性断裂。

但是,断裂力学的研究工作在我国还刚开始,必须进一步加强断裂力学在压力容器焊接领域中应用的研究,为压力容器的安全运行作出贡献。

第二章 低合金高强度钢在 焊接时的转变特性

一、压力容器用低合金高强度钢简介

(一) 低合金高强度钢的特点

我国低合金高强度钢系列在五十年代后期开始建立,在六十年代得到飞速发展。到目前为止,列入国家标准或冶金部标准的已不下数十个钢种。低合金高强度钢与低碳钢相比,由于含有少量的合金元素(一般不超过5%),因而具有较高的屈服强度和抗拉强度,同时也具有良好的塑性和韧性,在合金元素的适当配比下,还可以获得如低温、中温、耐腐蚀和耐辐照等特殊需要的性能。

低合金高强度钢自问世以来,在各个领域中取得了广泛的应用。它最早用于各种钢结构和中低压容器,如桥梁、建筑、船舶、中低压锅炉、化工容器和其它重要的结构件。采用的钢种有屈服强度为35和40公斤/毫米²级的16Mn钢和15MnV钢,钢板厚度一般小于40毫米。随着生产的发展和使用经验的不断提高,以后又陆续出现了一批强度级别更高的钢种,如 $\sigma_s \geq 50$ 公斤/毫米²的18MnMoNb钢和14MnMoV钢,以及 $\sigma_s \geq 70$ 公斤/毫米²的14MnMoNbB钢等。在钢种发展的同时,钢板的厚度也在不断增加,最大厚度可达115毫米,主要用于锅炉和化工中温高压容器。

低合金高强度钢得到广泛应用的原因主要在于:

(1) 低合金高强度钢有较高的强度和良好的塑性,能在很大程度上减薄容器的壁厚。这样,一方面可以节约大量钢材,解决大型容器在吊装和运输上的困难;另一方面还可以使现有的生产设备得到充分利用。譬如,上海锅炉厂生产的400吨/时锅炉汽包采用从西德进口的BHW-35低合金高强度钢,壁厚80毫米,可以在现有的8米卷板机上热卷成形。如果采用低碳钢或碳-锰钢,则壁厚需增加到130毫米左右,就会给卷板造成很大困难。

(2) 低合金高强度钢的生产工艺与低碳钢相比并不十分复杂,一般钢厂都能掌握,冶炼和轧制工艺并无特殊要求。但对于强度级别较高的钢种则需要进行正火加回火或调质处理(上述处理通常在容器制造厂进行)。

(3) 低合金高强度钢的使用温度范围比较宽,最低为 -110°C ,最高可达 560°C 或更高。在低温下使用的低合金高强度钢又称低温钢。高于 400°C 以上使用的为热强钢。常用的压力容器用低合金高强度钢适合于在 $-10 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用,这类钢种的焊接也就是本书所要讨论的内容。

(4) 低合金高强度钢具有良好的可焊性。在推广使用低合金高强度钢的最初阶段,由于对它们的各项性能还不够了解,曾经发生过一系列问题。比较突出的是在焊接热影响区和焊缝金属中经常出现各种焊接裂缝。通过一个时期以来的试验研究和生产实践,这些问

题大多已得到解决。因此,如果焊接材料、焊接规范和焊接工艺,包括预热、后热和焊后热处理规范等选择得当,一般是不会出现什么问题的。

(二) 低合金高强度钢的分类

低合金高强度钢的屈服强度比较高,屈强比一般超过 0.65,随着强度级别的提高,屈强比更有所上升。我国低合金高强度钢是以屈服强度来划分强度级别的。根据现有钢种的情况,大致可以分为以下三类:

(1) 屈服强度在 40 公斤/毫米²左右的,一般在热轧或正火状态下使用,基体组织为铁素体+珠光体,如 16Mn 和 15MnV 等。

这类钢有比较成熟的使用经验,用途最广。但是,它们的强度级别比较低,尤其是中温性能比较差,所以是制造中低压容器和一般钢结构的主要材料。在国外,这类钢又称为碳-锰钢和微合金钢,如美国的 A515 和 A516 等,由于它们的可焊性非常好,所以有些国家也用来制造厚壁压力容器。

(2) 屈服强度在 50 公斤/毫米²左右的,在正火加回火或调质状态下使用,基体组织为索氏体+少量铁素体或贝氏体,如 18MnMoNb 和 14MnMoV 等。

这类钢的综合性能比较好,多数含有 Mo,具有较高的中温机械性能,是制造厚壁压力容器最常用的钢种。国外属于这类钢种的有西德的 BHW-35,英国的 Ducol W30,苏联的 16MnNiMo,和美国的 A533B 等。

(3) 屈服强度大于 60 公斤/毫米²的,通常在调质状态下使用,基体组织为低碳回火马氏体或贝氏体,如 14MnMoNbB 等。

这类钢与第二类钢相似,但强度级别比第二类更高。这类钢的使用经验还比较少,有待进一步发展和研究。国外应用较多的有美国的 HY80 和 HY100 等。

国内常用的压力容器用的低合金高强度钢板列于表 2-1。

表 2-1 国产压力容器用低合金高强度钢板

钢 号	厚 度 (毫米)	强度级别 σ_s (公斤/毫米 ²)	热 处 理 状 态	标 准	适 用 范 围
16Mn	38~60	35	热 轧	YB536-69	中 低 压 容 器
15MnV	38~60	40	热轧, 940~980°C 正火	YB536-69	中 低 压 容 器
18MnMoNb	100~115	45	950~980°C 正火+600~650°C	YB536-69	高 压 厚 壁 容 器
	40~95	50	回火或调质		
14MnMoV	30~115	50	960~980°C 正火+610~630°C 回火	GB713-72	高 压 厚 壁 容 器
14MnMoVB	6	55	热 轧	厂 标	高 压 厚 壁 多 层 容 器
14MnMoNbB	≤50	70	920~930°C 淬火+600~650°C 回火	未定标	高 压 厚 壁 容 器

16Mn 和 15MnV 钢板适用于中低压压力容器, 18MnMoNb 和 14MnMoV 适用于厚壁单层或热套高压容器, 而 14MnMoVB 则适用于厚壁多层高压容器。上述钢种的化学成分及机械性能列于表 2-2 和表 2-3。

表 2-2 国产低合金高强度钢化学成分 (%)

钢 号	C	Mn	Si	S	P	Mo	V	Nb	B
16Mn	0.12~0.20	1.20~1.60	0.20~0.60	≤0.045	≤0.04				
15MnV	0.12~0.18	1.20~1.60	0.20~0.60	≤0.045	≤0.04		0.04~0.12		
18MnMoNb	0.17~0.23	1.35~1.65	0.17~0.37	≤0.045	≤0.04	0.45~0.65		0.025~0.050	
14MnMoV	0.10~0.18	1.20~1.60	0.20~0.50	≤0.045	≤0.04	0.45~0.65	0.05~0.15		
14MnMoVB	0.09~0.15	1.0~1.30	0.17~0.37	≤0.035	≤0.035	0.30~0.60	0.04~0.10		0.002~0.006
14MnMoNbB	0.12~0.18	1.30~1.80	0.15~0.35	≤0.03	≤0.03	0.45~0.70			0.0005~0.003

表 2-3 国产低合金高强度钢机械性能

钢 号	厚 度 (毫米)	热处理状态	σ_s (公斤/毫米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ_5 (%)	a_{k5}^{20} (公斤·米/厘米 ²)	冷 弯 (180°)
16Mn	38~60	热 轧	≥29	≥48	≥19	≥6	$d=3a$
15MnV	38~60	热 轧	≥34	≥50	≥17	≥6	$d=3a$
		正 火	≥40	≥54	≥17	≥6	$d=3a$
18MnMoNb	40~95	正火+回火	≥50	≥65	≥16	≥7	$d=3a$
	100~115		≥45	≥60	≥16	≥7	$d=3a$
	40~115	调 质	≥55	≥70	≥15		
14MnMoV	30~115	正火+回火	≥50	≥65	≥16	≥7	$d=3a$
14MnMoVB	6~10	热 轧	≥55	≥65	≥16	≥6	$d=2a$
14MnMoNbB	≤50	调 质	≥70	≥77	≥14	≥6	

注：正火+回火或调质处理后系指试样板性能

表 2-4 锻件用低合金高强度钢化学成分 (%)

钢 号	C	Mn	Si	S	P	Mo	Nb	Ni	其 它
20MnMo	0.17~0.23	1.10~1.40	0.17~0.37	≤0.04	≤0.04	0.20~0.35			
20MnMoNb	0.17~0.23	1.30~1.60	0.17~0.37	≤0.04	≤0.04	0.40~0.65	0.025~0.050		
20MnNiMoNb	0.17~0.23	1.20~1.50	0.15~0.30	≤0.05	≤0.012	0.45~0.65	0.03~0.06	0.60~0.90	
14Cr2Ni4MoV	0.10~0.15	0.60~0.90	0.15~0.35	≤0.020	≤0.020	0.40~0.50	0.02~0.06	4.0~4.5	V0.07~0.15 Cr1.20~1.50