

压力容器

国外技术进展

(中 册)

通用机械研究所

国外化工与炼油设备发展概况之四

压 力 容 器

——国外技术发展

(中 册)

全国化工与炼油机械行业技术情报网

上海化工学院

内蒙古工学院

天津大学

浙江大学

广东化工学院

华东石油学院

成都工学院

哈尔滨锅炉厂

河北工学院

甘肃工业大学

上海化工设计院

通用机械研究所

联 合 编 写

内 容 简 介

“压力容器——国外技术进展”共计十章，原计划分上、下两册出版。第一至第五章为上册，内容介绍：国外压力容器规范的概况；压力容器的疲劳设计；压力容器的蠕变问题；压力容器的脆裂问题；高压及超高压容器的设计。

第六至第十章原计划为下册，现改分为中、下两册出版，中册介绍：压力容器用钢；压力容器制造工艺；下册介绍：压力容器焊接技术；压力容器的无损探伤；压力容器的事故分析。

本资料可供从事化工机械及有关专业人员参考。

压力容器国外技术进展

(中 册)

“压力容器国外技术进展”编写组
通用机械研究所编辑、出版、发行
北 京 印 刷 二 厂 印 刷

* * *

开本787×1092 1/16 印张

印数 7000 1975年5月印刷

定价：2.40元

出 版 说 明

遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，在批林整风运动的推动下，为了了解国外压力容器近年来技术发展概况，我们根据全国化工与炼油机械行业技术情报网会议的决定，由东方锅炉厂，上海锅炉厂、武汉锅炉厂、北京化工学院、太原工学院、南京化工机械厂、浙江化工学院、天津轻工业学院、南京化工学院、上海化工机修总厂、山东化工学院、贵阳化工机械厂、自贡高压容器厂等22个单位，于1975年初共同翻译了约一百篇文章。在此基础上，由上海化工学院、内蒙古工学院、天津大学、浙江大学、广东化工学院、华东石油学院、成都工学院、哈尔滨锅炉厂、河北工学院、甘肃工业大学、上海化工设计院及通用机械研究所，于1973年5月至9月组织编写了这份“压力容器——国外技术进展”，内容涉及压力容器的选材、设计计算、制造、检验及事故分析等方面，共分十章。最后由哈尔滨锅炉厂及通用机械研究所加以整理。

应该指出：资本主义国家出版的一些技术资料，由其社会制度所决定，必然会反映资本主义社会的腐朽与黑暗。例如，资本主义国家的规范，其繁琐的条文成为对工人实行管、卡、压的阶级压迫的工具，这是由于它是为资本家榨取利润服务的本质所决定的。因此，我们必须遵循伟大领袖毛主席关于“批判地吸收外国文化”的有关教导，坚持“自力更生”、“艰苦奋斗”的方针，走自己工业发展道路。

由于我们学习马列主义和毛主席著作不够，水平有限，资料搜集不全，时间较短，未能进行深入分析批判，会有错误和不妥之处，希读者批评指正。

编 者

1974.1.

目 录

第六章 压力容器用钢	(267)
6.1 压力容器用低合金高强度钢	(267)
6.1.1 强度限 50kg/mm ² 级高强度钢	(270)
6.1.2 强度限 60kg/mm ² 级高强度钢	(270)
6.1.3 强度限 70kg/mm ² 以上的高强度钢	(277)
6.1.4 超高压容器用钢	(280)
6.1.5 高强度钢使用中的问题	(283)
6.1.6 高强度钢的可焊性	(283)
6.2 加氢用钢	(286)
6.2.1 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 钢 的 规 范	(287)
6.2.2 热处理对 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 钢性能的影响	(290)
6.2.3 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 钢的高温性能	(298)
6.2.4 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 钢的焊接	(300)
6.2.5 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 钢加氢容器制造实例	(303)
6.3 反应堆压力容器用钢	(306)
6.3.1 动力反应堆发展概况	(306)
6.3.2 反应堆压力容器的选材	(306)
6.3.3 中子照射机理	(314)
6.3.4 中子照射后钢材机械性能的变化	(315)
6.3.5 钢的中子照射脆化	(317)
6.3.6 影响照射脆化的环境因素	(319)
6.3.7 影响照射脆化的材料因素	(320)
6.3.8 反应堆压力容器的挂片监视试验	(325)
参考文献	(327)
第七章 大型压力容器的制造	(330)
7.1 大型压力容器的制造工艺设备	(330)
7.1.1 引 言	(330)
7.1.2 划线、边缘准备、机械加工	(358)
7.1.3 筒节成形	(372)
7.1.4 封头成形	(380)
7.1.5 筒节组装	(383)
7.1.6 主焊缝焊接	(387)

7.1.7 大接管焊接.....	(407)
7.1.8 热处理.....	(411)
7.1.9 焊接衬里.....	(423)
7.1.10 其 它.....	(430)
7.2 大型压力容器的制造工艺.....	(447)
7.2.1 单层卷焊式压力容器.....	(447)
7.2.2 多层热套式高压容器.....	(476)
7.2.3 多层包扎式高压容器.....	(489)
7.2.4 多层绕板式高压容器.....	(506)
7.2.5 铸-锻-焊式高压容器.....	(534)
7.3 大型压力容器的现场组装.....	(544)
参考文献.....	(557)

第六章 压力容器用钢

近年来, 由于化工、炼油及原子能压力容器向大型化发展, 在压力容器用钢方面, 相应地出现了一些新的特点, 归纳起来, 大致有以下几方面^[1]:

1. 低合金高强度钢得到了广泛应用;
2. 厚钢板及超厚板的生产增长很快;
3. 各种专用钢材 (如高温高压抗氢钢, 低温钢, 原子能压力容器用钢等) 的冶炼、轧制和焊接工艺有了进一步改善, 并深入掌握了其性能。

低合金高强度钢在炼油化工设备上的应用日益增多, 其主要原因是:

1. 与碳钢相比, 具有较高的屈服限与强度限 (一般可提高50%以上), 良好的塑性与冲击韧性, 较低的应变时效敏感性, 良好的焊接和抗腐蚀性能。

2. 生产工艺与碳钢相比并不太复杂, 生产成本提高并不太多; 可在平炉、电炉以至转炉中冶炼。

3. 从使用角度看, 低合金高强度钢不仅能减轻设备自重, 节约大量钢材, 解决大型容器吊装和运输上的困难, 并能承受较高的载荷, 延长设备使用寿命, 减少维修费用。

表 6.1 为采用不同强度级的钢材制造球形储罐的技术经济比较。由表 6.1 可见, 使用 80 kg/mm² 级的高强度钢 Welten80 作为材料, 其钢材消耗较一般锅炉钢板 SB-42B (强度限 42 kg/mm²) 节省 69%, 占地面积减少 75%, 附属设备数量减少 95%。因此, 低合金高强度钢的推广应用, 具有很大的技术经济意义。

表 6.1 各种强度级钢材制造球罐的比较^[2]

钢 材		Welten 80 强度限 σ_b 80 kg/mm ²	Welten 60 强度限 σ_b 60 kg/mm ²	SB-42B 强度限 σ_b 42 kg/mm ²
所需罐数		1	2	20
操作压力, $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$		10	10	10
球罐的 尺 寸	直径, m	38.6	30.6	14.2
	容积, m ³	30,000	15,000	1,500
	厚度, mm	35	37	35
钢材总重量, t		1,400	1,900	4,500
占地面积, m ²		3,600	4,500	14,500
钢材重量比,		1	1.35	3.2
占地面积比,		1	1.25	4.0
附属设备比,		1	2	20

6.1 压力容器用低合金高强度钢

据统计, 到目前为止, 全世界供焊接用的高强度钢约有 450 种以上, 其中适合压力容器使用的约有数十种^[3]。

压力容器所用高强度钢，屈服限 σ_s 在 30kg/mm^2 以上，而强度限 σ_b 在 45kg/mm^2 以上，屈服比一般超过 0.65（美国的低合金高强度钢其屈服比稍低一些）。高强度钢可在轧制状态、正火、消除应力退火、正火加回火和淬火加回火等热处理状态下使用。

在高强度钢中，有以强度限为主的高强度限钢及以屈服限为主的高屈服限钢。以屈服限作为设计应力基准时，采用高屈服限钢比较有利。图 6.1 为强度限 80kg/mm^2 级的 T-1 钢与 ASTM-A285 普通碳钢在拉伸试验中的应力—应变曲线的比较。图 6.1 表明，T-1 钢到断裂为止，它所吸收的能量较碳钢约低 20%；但在弹性极限以内，其吸收的能量则为碳钢的 10 倍。同时，屈服限与强度限的比值也较大，故以屈服限作为设计应力的基础，较之以强度限为基础可显著提高设计应力。

高强度钢的机械性能视所添加的合金元素，加工及热处理方法而变化。高强度钢化学成分的设计原则是：在保证塑性的基础上提高强度，同时不使冲击韧性降低，并要提高抗腐蚀性能。为避免降低塑性及使焊接性能恶化，高强度钢的含碳量一般应控制在 0.20% 以下。

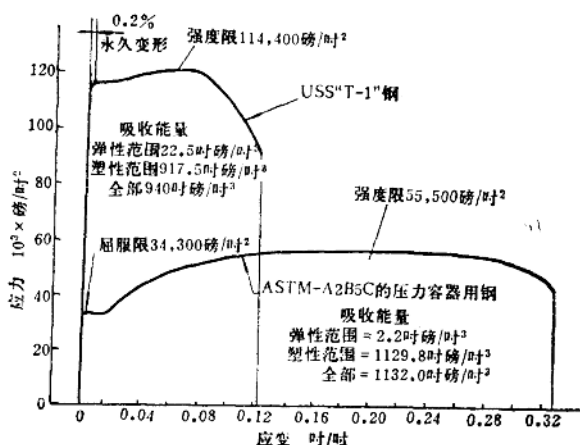


图 6.1 T-1 钢与低碳钢 A285C 的应力-应变曲线

强度限在 $40\text{—}70\text{kg/mm}^2$ 范围内的正火或轧态的高强度钢，化学成分对机械性能的影响可以用下列碳当量的公式表示，

$$C_s = C + \frac{1}{5}Mn + \frac{1}{7}Si + \frac{1}{7}Cu + \frac{1}{20}Ni + \frac{1}{2}Mo + 1.1V \quad \left. \vphantom{C_s} \right\}$$

$$\sigma_s = (37.5 \times C_s + 16.8) \pm 4.0\text{kg/mm}^2$$

$$C_b = C + \frac{1}{5}Mn + \frac{1}{7}Si + \frac{1}{7}Cu + \frac{1}{20}Ni + \frac{1}{9}Cr + \frac{1}{2}Mo + \frac{1}{2}V \quad \left. \vphantom{C_b} \right\}$$

$$\sigma_b = (61.0 \times C_b + 24.3) \pm 3.5\text{kg/mm}^2$$

$$C_e = C + \frac{1}{9}Mn + \frac{1}{12}Si + \frac{1}{10}Cu + \frac{1}{20}Ni + \frac{1}{4}Cr + \frac{2}{5}Mo + \frac{4}{5}V \quad \left. \vphantom{C_e} \right\}$$

$$\text{延伸率} = (55.9 - 51.2C_e) \pm 4.5\%$$

其中碳当量和强度限的关系可如图 6.2 所示，当碳当量超过 0.7 时，两者将不再呈线性关系。

合金元素加入后，它们对高强度钢强化的机理见表 6.2。

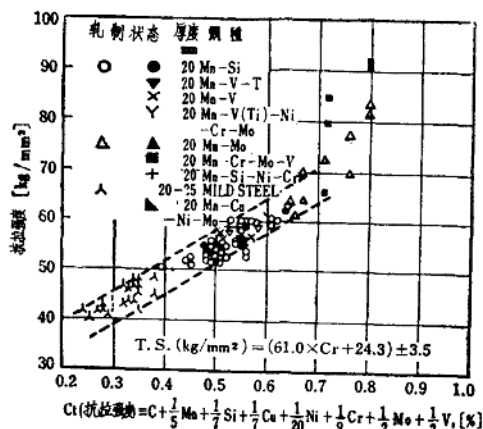


图6.2 碳当量与高强度钢强度限的关系

表6.2

合金元素的强化机理^[4]

	一次效果	二次效果	仅有小的效果
1. 由于固溶强化 强 ↑ (1) P (2) Si (3) Mn (4) Ni (5) Cr (形成碳化物所需的量以上) (6) Mo (形成碳化物所需的量以上) (7) V (形成碳化物所需的量以上) (8) W (形成碳化物所需的量以上) 弱 ↓ (9) Cu	0 0 0 0	0	0 0 0 0
2. 由于晶粒细化 强 ↑ (1) V (2) Mo 弱 ↓ (3) Nb			
3. 由于形成碳化物 强 ↑ (1) V (2) Cr (3) Mo (4) Mn 弱 ↓ (5) W		0 0 0 0	0
4. 由于马氏体变态硬化 强 ↑ (1) C (2) Mn (3) Cr (4) Mo (5) V (6) W 弱 ↓ (7) Ni (8) Si	0 0 0 0 0 0	0 0	
5. 析出硬化 (1) Cu	0		

6.1.1 强度限 50kg/mm² 级高强度钢

这是现在压力容器中使用最多的一类低合金高强度钢。因锰是最便宜的合金元素，且能显著提高强度，故此类高强度钢几乎均用此元素来达到所要求的强度，其基本成分为 $C \leq 0.20\%$ ， $Si \leq 0.55\%$ ， $Mn \leq 1.50\%$ ，碳当量较低，为 $C_{eq} \leq 0.45\%$ 。这类钢通常为细晶粒铁素体加珠光体组织的铝镇静钢，一般在轧制状态使用，如要求提高冲击韧性及对厚板，则在正火状态使用。西欧普遍使用的 St.52，美国的 A299 等属于此类钢。这些钢的特点是生产费用较其它强度级的高强度钢为低，因热加工及焊接加热影响所引起的材质变化较小，加工容易。与普通的锅炉钢板 HII（西德）比较，St.52 的成本约提高 5%，但钢材的屈服限则提高近 50%，故能大大降低容器的造价。

除了以上 Si-Mn 系 50kg/mm² 级高强度钢以外，还有一类以添加铌、钒合金元素的高强度钢，它利用铌、钒的碳化物与氮化物的析出以提高强度。在正火状态下，这些析出物使晶粒细化、冲击韧性提高，但不会像铝那样严重影响到钢在高温下的屈服限与蠕变极限^[5]。属于这类的锰铌钢有英国的 B.S. 1501-213 和 223，和瑞典的 OX 520D 等。锰钒钢有西德的 BH39，美国的 A225，法国的 USITEN. I. E40V 等。

1968 年以前，美国 ASME 规范因采用强度限为基准决定许用应力，与西欧不同，对提高钢的屈服限兴趣并不大，故美国的 50kg/mm² 级 A212B 钢的屈服限较低（ $\sigma_s \geq 27\text{kg/mm}^2$ ），屈服比仅为 0.55。A212B 钢的强度限是通过提高含碳量来获得的。该钢在美国早期的原子能反应堆压力容器中使用较多^[6]，它也是美国单层式氨合成塔的典型钢材^[7]。美国 A. O. 史密斯厂曾用此钢制造过内径 1500mm，壁厚 127mm，操作压力 176 kg/cm²，操作温度 343°C 的多层式反应堆压力容器^[6]。1966 年以后，按用途该钢分别被 A515-70 及 A516-70 所代替。

日本的 50kg/mm² 级高强度钢，其基本化学成分与 St.52 类似，也是属于 Si-Mn 系，在早期的多层式容器中，曾采用过 SHIS 54 作为层板材料^[8]。

一些国家典型的 50kg/mm² 级压力容器用钢汇列于表 6.3。

6.1.2 强度限 60kg/mm² 级高强度钢

压力容器大型化以后，在高压容器设计及制造中，使用 50kg/mm² 级高强度钢已不能满足要求，而必须采用强度更高的 60kg/mm² 级高强度钢，否则筒体壁厚不能减薄，运输及吊装十分困难。

此类钢的屈服限一般在 45 kg/mm² 以上，而强度限则在 60 kg/mm² 以上。若采用和 50 kg/mm² 级相同的 Si-Mn 系的钢进行调质热处理，也可得到上述强度值，但当钢板厚度较大时，则不容易得到保证，故必须用添加合金元素的办法来进行强化。经常采用的合金元素为铬、镍、钼、钒，但通常将这类元素的二种至三种加以组合，其强度虽高，但碳当量较低，焊接性能仍较好。

60 kg/mm² 级低合金高强度钢有调质与非调质两类。非调质主要以正火或正火加回火状态使用，由于正火时冷却速度较慢，需加入较多的合金元素以提高钢的强度。调质的钢材，由于经过淬火及回火热处理，不仅得到用较少的合金元素所造成的中间转变组织——回火马氏体或贝氏体，使强度值 σ_s 、 σ_b 提高，冲击韧性好，且焊接时硬化小，对裂纹的敏感性低。其缺点是：加热卷板会使钢板软化，因其焊后热处理温度与普通回火温度相差仅 50°C 以内，故要求严格控制温度，且不宜长时间加热；采用自动焊等高输入热量施焊时，热影响区有软

表6.3

压力容器 50 kg/mm² 级 高强度钢

国别	钢号	钢种	化 学 组 成 %						机 械 性 能			热 处 理	用 途			
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	其 它	强度限 kg/mm ²			屈服限 kg/mm ²	延伸率 %	冲击韧性 kg·m/cm ² (纵向试样)
美 国	A181-I		≤0.35	≤0.35	≤0.90						≥49	≥25	≥18	未 规 定	锻焊式复合成塔	
	A182-F11	Cr-Mo-Si钢	0.1—1.2	0.5—1.0	0.3—0.8	1.0—1.5		0.44—0.65			≥49	≥28	≥20	未 规 定	锻焊式复合成塔, 炼油反应器	
	A212B	C-Si钢	0.31—0.35	0.15—0.30	≤0.90					49—60	≥27	≥21	未 规 定	原子能用厚壁容器, 多层容器层板		
	A225B	Mn-V钢	≤0.20	0.15—0.30	≤1.45				0.09—0.14	53—63	≥30	≥22	未 规 定	高压容器		
	A299	Mn-Si钢	0.28—0.31	0.15—0.30	0.9—1.4					53—63	≥30	≥20	未 规 定	高压容器		
	A336 F22	Cr-Mo钢	≤0.15	≤0.50	0.30—0.60	2.0—2.5		0.90—1.10		≥49	≥28	≥18	未 规 定	炼油用高压反应器		
	A515-70	C-Mn钢	≤0.35	0.15—0.30	≤0.90					49—60	≥27	≥22	正 火	锻焊式复合成塔		
A516-70	C-Mn钢	≤0.31	0.15—0.30	0.85—1.20					49—60	≥27	≥22	正 火	锻焊式复合成塔			
英 国	BS1501-213 32级	Nb处理半镇静钢	0.22	≤0.10	0.9—1.6	≤0.25	≤0.3	≤0.10		Nb 0.01—0.10, Cu ≤0.20	≥50	≥33	≥18	却贝V形缺口试样, 0°C, ≥7.0	正火	一般压力容器
	BS3604-63	Cr-Mo钢	0.08—0.15	≤0.50	0.4—0.7	2.0—2.5		0.9—1.2			≥55	≥30	≥17		正火, 回火	一般压力容器
	BS1501-224 32级	Mn-Cr-Ni-Mo-Cu钢	0.22	0.10—0.55	0.9—1.6	≤0.25	≤0.30	≤0.10		Cu ≤0.20	≥50	≥30	≥18	却贝V形缺口试样, -15°C, ≥6.8	正火	一般压力容器
	Ducol W24	Mn-Cr-Ni-Mo钢	0.2	≤0.30	≤1.3	≤0.25	≤0.5	0.15			55—65	≥38			正火	一般压力容器
	Ducol W27	Mn-Cr-Ni-Mo钢	0.18	≤0.30	≤1.5	≤0.25	≤0.5	0.30			55—65	≥43			正火	一般压力容器
	CREUSEISO-38	C-Mn钢	0.20	0.40	1.20						53—65	38	24	却贝V形缺口试样, -20°C, ≥6.0	正火	一般压力容器
法 国	GAPAVE121 A52	C-Mn钢	≤0.22	≤0.55	≤1.50						≥52	≥34	≥21	却贝V形缺口试样, 0°C, ≥3.5	正火	一般压力容器

续表6.3

国别	钢号	钢种	化学组成 %						机械性能			热处理	用途		
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	其它	强度限 kg/mm ²			屈服限 kg/mm ²	延伸率 %
西德	DIN17100 St52.3 BH36	C-Mn 钢	≤0.22	≤0.55	≤1.50						≥52	≥34	≥22	DVM 试样, 0°C, ≥7.0	一般压力容器
		C-Mn 钢	0.20	0.50	0.90— 1.50						52—62	≥36	≥22	DVM 试样, -20°C, ≥5.0	多层容器层板
意大利	ASERA52	Mn-V 钢	≤0.18	≤0.35	1.30				0.20		52—60	≥36	≥24	梅氏试样, 纵向, +20°C, ≥8.0	一般压力容器
	UNI9865 20M5	C-Mn 钢	≤0.22	≤0.35	≤1.50						≥50	≥34	≥19	梅氏试样, 纵向, +20°C, ≥8.0	一般压力容器
奥地利	ALOUR50	C-Mn 钢	≤0.20	≤0.40	≤1.30						50—60	≥34	≥25	DVM 试样, -20°C, ≥5.0	一般压力容器
	FERALSIM52	C-Mn 钢	≤0.20	0.5	1.30						52—62	≥36	≥24	ISO V 形试样, -20°C, ≥6.0	一般压力容器
瑞典	SIS2103	C-Mn 钢	≤0.16	0.15— 0.5	≤1.6	≤0.25				Cu≤0.40 N≤0.009	≥50	≥32	≥21	却贝 V 形缺口试样, -20°C, ≥2.8	一般压力容器
	OX520D	Nb 处理的 Mn 钢	0.20	0.15— 0.5	≤1.4					Nb0.02— 0.04	52—62	≥32	≥22	却贝 V 形缺口试样, -20°C, ≥3.5	一般压力容器
日本	日立开发 I	Cr-Mn-Mo 钢	0.13—0.15 0.18	0.15— 0.30	1.15— 1.50	0.8— 1.2		0.2— 0.4			≥55	≥38	≥20	却贝 V 形缺口试样, -20°C, ≥4.0	厚板焊接氮分离 器
	日立开发 I	Cr-Mn-Mo 钢	≤0.20	0.15— 0.30	1.15— 1.50	0.5— 1.0	0.45— 0.70	0.45— 0.60			≥55	≥40	≥20	却贝 V 形缺口试样, 0°C, ≥3.0	厚板焊接尿素合 成塔
	WELTEN50	C-Mn 钢	≤0.18	0.25— 0.45	1.10— 1.50						50—58	≥33	≥20	却贝 V 形缺口试样, 0°C, ≥6.0	多层容器层板
	SB-49B	Si-Mn 钢	≤0.30	0.15— 0.30	≤1.0						49—58	强度限 2			高压锅炉汽包, 大型容器
	SHIS54	C-Mn 钢	0.09— 0.22	0.3— 0.6	0.7— 1.2						54—62	≥35	≥20	却贝 V 形缺口试样, 20°C, ≥13.6	多层容器层板
	SPV36	C-Mn 钢	≤0.20	0.15— 0.55	≤1.6						53—65	≥34	14—21		一般压力容器

表 6.4 压力容器用 60 kg/mm² 级高强度钢

国别	钢号	钢种	化 学 组 成 %						机 械 性 能				热 处 理	用 途	
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	其 它	强度限 kg/mm ²	屈服限 kg/mm ²			延伸率 %
美 国	A302 B	Mn-Mo钢	≤0.25	0.15—1.10— 0.30	1.10—1.50			0.45— 0.60			53—67	≥35	≥17	却贝V形缺口试样, -12℃, ≥5.3	高压容器
	A533 B 1 级	Mn-Mo钢	≤0.25	0.15—1.15— 0.30	1.15—1.50			0.45— 0.60			56—70	≥35	≥20	淬火, 回火	动力反应堆的 高压容器
	A533 B 2 级	Mn-Mo-Ni钢	≤0.25	0.15—1.15— 0.30	1.15—1.50		0.4—0.45— 0.7	0.45— 0.60			64—80	≥50	≥20	淬火, 回火	高压容器
英 国	Fortiweild	Mo-B钢	≤0.15	≤0.40	≤0.60	≤0.40		0.4— 0.55		B 0.0015—0.0035	≥58	≥46	≥20	轧制状态或 正火、回火	一般压力容器
法 国	Ducoil-W30	Cr-Mo-V钢	≤0.17	≤0.3	≤1.5	≤0.7	≤0.3	≤0.28	≤0.10	Cu≤0.20	60—70	≥47	≥16	却贝V形缺口试样, -20℃, ≥5.0	铜焊式及厚板 焊接式高压容 器
法 国	AMMO65	Ni-Mo-V钢	≤0.15	≤0.55	≤1.55	≤0.25		0.6—0.45— 1.0	≤0.10	Cu≤0.20	64—76	≥47	≥16	却贝V形缺口试样, -20℃, ≥5.2	高压容器
西 德	BHW38	Ni-Mo-V钢	≤0.20	≤0.40	1.00— 1.65			0.4—0.20—0.10— 0.8	0.60— 0.22		60—75	≥43	≥16	DVM试样, ≥5.0	多层容器层板
西 德	WSB62	Cu-Ni-Mo钢	≤0.17	0.25—0.80— 0.50	1.20			1.0—0.25— 1.3	0.40	Nb0.02 Cu0.5—0.8	62—70	≥44	1200 强度限	DVM试样, ≥7.0	高压容器
德 国	BH43W	Ni-V钢	≤0.14	≤0.30	≤1.3			≤0.55	≤0.14		60—75	≥46	≤22	正火	高压容器
意 大 利	ASERA60N	Cr-Ni-Mo-V 钢	≤0.20	≤0.45	≤1.50	≤0.60	≤0.60	≤0.25	≤0.20		60—75	≥47	≥16	却贝V形缺口试样, -20℃, ≥3.5	高压容器

续表 6.4

国别	钢号	钢种	化 学 组 成 %							机 械 性 能			热 处 理	用 途			
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	其 它	强度限 kg/mm ²	屈服限 kg/mm ²			延伸率 %	冲击韧性 kg·m/cm ² (纵向试样)	
瑞 典	MoB45	Mo-B钢	≤0.16	≤0.4	≤0.7				≤0.6		B≤0.005	≥58	≥46	≥16		轧制状态或 正火、回火	高压容器
奥 地 利	Aldur58	Mn-Si-Cu钢	≤0.23	≤0.5	≤1.6						Cu≤0.35	58—68	≥41	≥22	DVM试样, -20℃, ≥5.0	正 火	铜焊式高压容 器
日 本	Welten60	Cr-Ni-V钢	≤0.16	≤0.55	≤1.30	≤0.40	≤0.60			≤0.15		60—70	≥46	≥16	ISO V形缺口试样, 0℃, ≥6.0	淬火、回火	多层容器层板
	Welcon2H	Mn-Si钢	≤0.18	≤0.55	≤1.35							60—70	≥50	≥25	ISO V形缺口试样, 0℃, ≥8.0	淬火、回火	多层容器层板
	Welcon2H-Cr	Mn-Si-Cr-Mo 钢	≤0.14	≤0.50	≤1.10	≤0.50		≤0.40				62—75	≥50	≥25			
	FTW60	Mn-Si钢	≤0.17	≤0.55	≤1.55							60—70	≥50	≥17	ISO V形缺口试样, 0℃, ≥8.0	淬火、回火	多层容器层板
	SHIS60	Mn-Si钢	0.15—0.4— 0.24 0.8	0.7— 1.2								60—70	≥38	≥17	知贝V形缺口试样, 20℃, ≥9.1		多层容器层板
	Ni-Cr钢		0.28—0.2— 0.32 0.3	0.3— 0.5	0.5— 0.9	1.5— 2.0						≥60	≥40			整体锻造高压 容器	
	Ni-Mo-Ti钢		≤0.15	0.2— 0.3 0.5	0.3— 0.5	2.5— 3.0	0.2— 0.4				Ti<0.3	≥60	≥40			整体锻造高压 容器	
本	SPV46		≤0.18	0.15— 0.75	≤1.6							58—71	≥44	≥19	知贝V形缺口试样, -10℃, ≥4.8	淬火、回火	高压容器
	SPV50		≤0.20	0.15— 0.75	≤1.6							62—75	≥50	≥18	知贝V形缺口试样, -10℃, ≥4.8	淬火、回火	多层容器层板
	MY46		≤0.23	≤0.15	≤1.40					(Nb+V)0.15		≥60	≥46	≥18			绕板式容器层板

化, 接头强度可能降低。但是, 由于调质钢的生产成本较非调质钢为低, 故目前 60 kg/mm^2 级高强度钢大都采用调质处理以提高强度。

压力容器常用的 60 kg/mm^2 级高强度钢见表 6.4。

在表 6.4 中, A302B (后改称 A533B-1 级) 为 Mn-Mo 钢, 此钢从 1956 年起就被用作原子能反应堆的压力容器^[9]。在 Mn-Mo 钢基础上, 加入 0.4—0.7% Ni, 以改进厚钢板的低温冲击韧性, 得到 A533B-2 级, 此钢曾称为 A302B 改良, A302B 及 A533B-2 级钢目前为全世界轻水型反应堆压力容器最典型的钢材, 我们将在第 6.3 节内详加介绍。在美国 A302B 与 50 kg/mm^2 级的 A212B 或 A516-70 等类似, 均为氨合成塔所常用的钢材^[7]。A302B 在日本曾被用作热套式高压容器的内外筒材料。

A533B-2 级钢其抗氢腐蚀性能较 A302B 及英国的 Ducol-W30 钢均好 (图 6.3)。

在西欧有许多专有的 60 kg/mm^2 级经正火及回火处理的高强度钢, 最初用于锅炉汽包,

现在也用于高压容器及加氢反应器。其中大多数为 Mn-Mo 钢, 添加少量铬或镍, 再加钒或钛。钒防止焊接裂纹, 提高钢的屈服限, 效果较显著, 特别有利于提高高温强度。钒及钛则是作为碳化物的稳定剂以及晶粒细化剂而加入的, 同时可改进高温强度与冲击韧性。属于这类钢的有表 6.4 上的 BHW38, BH43W (西德), AMMO-65 (法国) 及 ASERA-60N (意大利) 等。英国的 Ducol-W30 也是这一类钢, 为铁素体-珠光体组织。Ducol-W30 和 WSB-62 钢均为西欧的氨合成塔所用典型钢材^[7]。

英国约翰·汤普森 (John Thompson) 厂采用

Ducol-W30 钢制造的一台内径 1700mm, 壁厚 150mm 的厚板卷焊氨合成塔曾发生脆性断裂事故^[10]。据分析, 脆裂是由于焊后热处理炉温控制不均匀, 偏差达 100°C , 造成环缝金属冲击值太低 ($+50^\circ\text{C}$ 时, 却贝冲击值仅 $2 \text{ kg}\cdot\text{m}$), 使锻件焊缝热影响区裂纹向环缝扩展而引起。故此钢的焊缝金属对焊后热处理温度相当敏感, 须严格控制方能避免脆裂。

WSB-62 为含铌的 Cu-Ni-Mo 钢, 其含铜量为 0.5—0.8%, 加入 0.6% 左右的铜, 利用消除应力退火 ($600\text{—}650^\circ\text{C}$) 时, 铜的沉淀硬化作用, 可以提高钢的屈服限, 焊接性能不会受到太大影响。奥地利的 Aldur58 亦为含铜钢, 耐蚀性较好。

英国的 Fortiweld 及瑞典的 MnBo45 均为用硼处理的 0.5Mo 钢, 为上述钢中最经济的一种。这两个钢种为贝茵体组织。过去很少将贝茵体作为低碳钢的一种组织而加以利用, 这主要是除了在有限的断面尺寸外, 很难得到贝茵体组织。以后, 当硼在低碳钼钢中的作用弄清楚后, 才出现生产贝茵体高强度钢的方法。硼的主要作用是在奥氏体晶粒边界处阻止铁素体的生核, 从而阻止多边形铁素体的形成。在冷却较快情况下, 硼也能防止钢的组织转变为马氏体, 避免混合组织的出现。硼对 0.5%Mo 钢的影响见图 6.4^[11]。Fortiweld 钢的晶粒度较碳钢小 10 倍, 细小的贝茵-铁素体可以大大提高钢的强度。由于贝茵体高强度钢具有良好的综合性能和强度, 并可在退火与轧制状态下使用, 生产工艺比马氏体型调质钢更简易, 故受到钢厂的重视。MoBo45 在瑞典已应用到高压容器上, Fortiweld 在英国标准 B. S. 1501 中列为

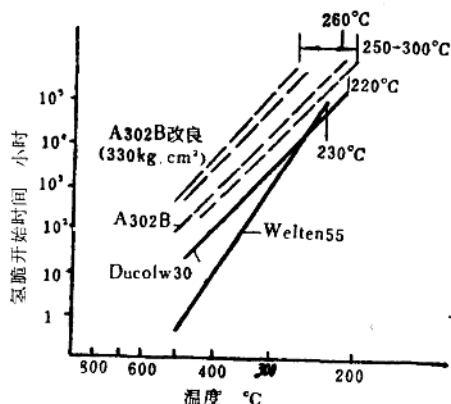


图 6.3 在 200 kg/cm^2 氢压下加热时, A302B 改良钢与其它高强度钢抗氢脆能力的比较

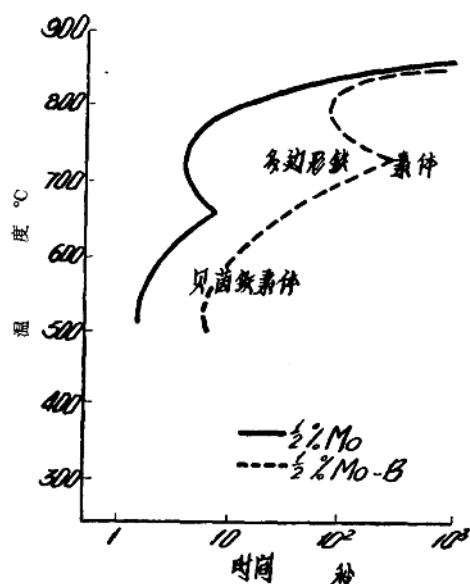


图6.4 0.5% Mo-B 钢的等温转变图

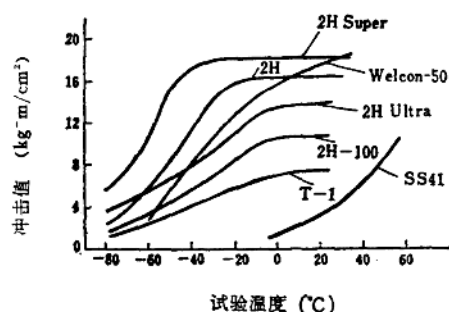


图6.5 Welcon 2H 钢的冲击韧性

Welcon 2H 钢的冲击韧性还超过 50 kg/mm² 钢 Welcon50, 较 T-1 钢也高。2H 钢的应变时效敏感性小, 经标准的应变时效处理后, 钢材的冲击值均在 4.0 kg·m/cm² 以上。此外, 此钢对焊接裂纹的敏感性也较小, 钢板采用单层焊后, 焊接热影响区的最高硬度为 300Hv, 按国际焊接学会(IIW)的规定, 热影响区硬度低于 350Hv, 则该钢焊接时一般不易出现裂纹^[13], 和一般 60 kg/mm² 级钢相比, 2H 钢的热影响区硬度也小。该钢尚可以进行气切加工, 切边硬化小。Welcon 2H 钢为日本多层式容器典型的层板材料。

在 Welcon 2H 钢基础上, 添加铬钼合金元素, 则得到 Welcon 2HCr 钢, 此钢高温强度较好, 350°C 时, 强度限 $\sigma_b > 60$ kg/mm², 屈服限 $\sigma_s > 45$ kg/mm², 由于含有 0.5% Cr 及 0.4% Mo, 故抗氢能力也较好^[14]。

对 Welcon 2H 钢适当降低含碳量, 增加含锰量, 可以获得另一种调质型的 60 kg/mm² 级高强度钢 FTW-60, 此钢的性能与 2H 钢类似, 在日本也用作多层式容器的层板, 曾制作

261 型钢, 因其较 Mn-Ni-Cr-Mo 型的 Ducol-W30 的冲击韧性为低, 目前只应用在一般压力容器上。

若工艺措施正确, 则上述 60 kg/mm² 级高强度钢的焊接性能都是良好的。但近年来发现一些钢在消除应力热处理中筒体与接管处会产生裂纹, 此裂纹一般出现在插入式或贯通式接管连接处, 且修补比较困难。这种裂纹在以硼处理的钼钢 (Fortiweld), 或以钒处理的 Ni-Mo-V 钢 (BHW38)、Cr-Mo-V 钢 (Ducol W30) 及 Cr-Ni-Mo-V 钢 (ASERA 60N) 中均有发现。试验表明, 钼、钒及硼会促使消除应力热处理裂纹的产生, 而钒、硼较钼的影响更大。要避免这种裂纹的出现, 可从结构设计上着手, 在高强度钢上最好不用插入式接管, 改用鞍座式接管, 后者的挠性比前者好, 在接缝处不易开裂。

日本的 60 kg/mm² 级高强度钢中, Welcon 2H 为其代表性钢种。此钢在 1956 年仿照西德利用轧后余热直接淬火而研制成功, 为调质型高强度 Si-Mn 钢^[12]。早期采用 30000HP 的大型轧机轧制, 再于 2000 × 3000 × 6000 mm、容积为 36 m³ 的水池中淬火, 最后进行 500—650°C 空冷回火。以后改在德雷巴型压力淬火机上水淬。Welcon 2H 钢的特点是: 强度高, 屈服限 $\sigma_s > 50$ kg/mm², 强度限 $\sigma_b 60—70$ kg/mm²; 母材的冲击韧性好, 在 -60°C 时, 其冲击韧性值超过 4.8 kg·m/cm², 满足 ASME 规范第三篇对高强度钢冲击韧性的要求; 由图 6.5 可见,

操作温度 -10°C , 操作压力 $200\text{kg}/\text{cm}^2$ 的高压空气蓄压器^[15]。

6.1.3 强度限 $70\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上的高强度钢

压力容器所使用的 $70\text{kg}/\text{mm}^2$ 以上的高强度钢几乎全部采用调质处理, 以得到较高的强度。和 $60\text{kg}/\text{mm}^2$ 级高强度钢相似, 添加的合金元素以锰、硅、铬、镍、钒、钼、铜、硼等为主, 组织是回火马氏体。目前生产的低碳马氏体调质钢有以下一些合金组合: Si-Mn, Si-Mn-Ni-Cr-V, Mn-Ni-Cr-Mo, Mn-Ni-Cr-Cu-Mo-V-B 等, 见表 6.5。这类调质钢的强度与铁素体/珠光体型不同, 它主要不直接取决于合金元素的含量, 而取决于含碳量, 钢的抗回火性与热处理的回火温度仅在较小程度上受合金元素的固溶强化的影响。合金元素加入的主要作用是保证淬透性, 其加入量视淬透性的要求而定。此外, 合金元素可提高钢的抗回火性, 使得在较高回火温度下, 不致降低钢的强度, 以利于消除残留应力, 改善钢的韧性与塑性。

表 6.5 所列的 $70\text{kg}/\text{mm}^2$ 级高强度钢大都专供高压及超高压容器使用。

在表 6.5 中, A 542 钢为美国的加氢裂化及加氢脱硫反应器的典型钢材, 属于调质型的 $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 钢。我们将在第 6.2 节中, 对此钢详加介绍。此外, A542 钢也是动力反应堆压力容器很有发展前途的一种材料。

在多层式容器上, A. O. Smith 1146 钢为美国及日本的典型层板材料, 从五十年代中期就在美国推广应用, 此钢在日本称为 AY-75。它是在 C-Mn 钢的基础上, 加入镍及钒而成为 Mn-Ni-V 钢。镍和钒的加入, 提高了钢的屈服限, 改善了冲击韧性与降低脆性转变温度。在正火状态下, 1146 钢的屈服限为 $49\text{kg}/\text{mm}^2$, 强度限大于 $74\text{kg}/\text{mm}^2$ 。此钢以不同厚度的钢板进行焊接试验时, 焊缝热影响区的硬度见图 6.6^[16]。由图 6.6 可见, 当采用 6mm 1146 钢为层板时, 热影响区的硬度为 280HV 以下(预热 120°C), 不预热时, 其硬度略高, 约 300 HV, 一般都不易引起焊接裂纹。但因大型氨合成塔(内径 2000mm 以上)系采用 12mm 钢板为层板, 此时, 无论预热或不预热, 热影响区的硬度均超过 350 HV, 由前所述, 即使为多层容器的纵焊缝, 也有可能出现焊接裂纹。事实上, 在日本制造的 1360 吨/日氨合成塔所用多层容器, 环焊缝上就曾经出现裂纹。故使用厚度超过 6mm 的 1146 钢板为层板并不合适。

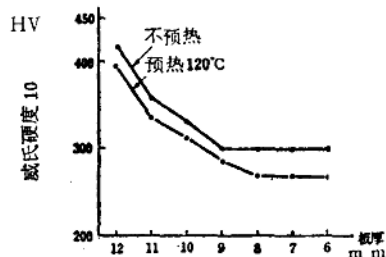


图 6.6 A. O. Smith 1146 钢不同板厚焊缝热影响区的硬度

$24\text{CrMo}10$ 钢含有 2.30—2.60% Cr, 故能抗氢腐蚀, 此钢在西德本用于锻造式加氢裂化反应器上^{[7], [17]}, 但近年也开始用于 300,000 吨/年氨合成塔上。由于含碳量较高(0.28%), 在空气中易淬硬, 焊接时往往出现裂纹。在焊接容器调质处理中, 温度与冷却速度的控制是否得当极其重要, 一般要求具有一定经验才能达到预期的机械性能。

当壁厚较大(150—200mm), 为了能在整个厚度上进行调质, 得到所需的强度与冲击韧性, 视板厚的增加, 须适当增加镍及钼含量。若不需抗氢腐蚀, 可采用化学成分类似, 但不含铬的调质钢(含 Mn1.4%、Ni1.5%、V0.15%), 该钢机械性能与 $24\text{CrMo}10$ 相近。

在 $80\text{kg}/\text{mm}^2$ 级高强度钢中, T-1 钢为其代表, 早在五十年代初就冶炼成功。此钢含碳量较低, 钢中的锰、镍、铬、钼、钒、铜及硼等合金元素的含量均经谨慎确定, 以得到高的屈服限、高的韧性及良好的可焊性等综合性能。加入硼是为了节约贵重金属合金元素如镍、钼的