

高等学校教材

化工容器设计

第三版

王志文 蔡仁良 编著

2
03



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

化工容器设计

第三版

王志文 蔡仁良 编著



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工容器设计/王志文, 蔡仁良编著. —3 版. —北京:
化学工业出版社, 2005. 5
高等学校教材
ISBN 7-5025-7168-X

I. 化… II. ①王… ②蔡… III. 化工设备-容器-
设计-高等学校-教材 IV. TQ053. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 054063 号

高等学校教材
化工容器设计
第三版

王志文 蔡仁良 编著
责任编辑: 程树珍
责任校对: 顾淑云 李 军
封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京红光印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 459 千字

2005 年 8 月第 3 版 2005 年 8 月北京第 9 次印刷

ISBN 7-5025-7168-X

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

能否独立自主地设计、制造和安全运用压力容器，反映了一个国家的综合经济与技术的实力。

1949 年以前，我国重要的压力容器都是从西方国家进口的。在 20 世纪 50 年代初期，压力容器的需求量大增，但重要的压力容器要依靠从前苏联和东欧国家进口。1956 年，我国试制成功了第一台多层卷板式高压容器——永利宁厂（今南京化肥厂前身）三号合成塔，这是一个里程碑，是我国自力更生设计与制造重要压力容器的起点。20 世纪 70 年代我国制造了大直径三层热套式的吴泾化工厂 30 万吨氨合成塔，90 年代制成了单层锻焊的热壁加氢反应器，300MW 核反应容器等。在设计规范方面，我国从 1959 年和 1960 年的几个部颁标准到 1967 年提出《钢制石油化工压力容器设计规定（征求意见稿）》，并在 1977 年、1979 年、1982 年、1985 年进行了补充修订，实现了压力容器设计的规范化。后来于 1989 年形成了国家标准《GB 150——钢制压力容器》，1998 年又推出了新版（同时也出版了这一标准的英文版以推向国际）。1984 年在旧金山举行的第 5 届国际压力容器技术会议上，我国的压力容器设计规范第一次在国际学术会议上公开介绍，得到了好评。1988 年，第六届国际压力容器技术会议在北京举行。现在，我国不仅有了自己的压力容器设计国家标准，还建立了一系列的相关的法规和技术标准，形成了一个完整的压力容器质量保证体系。总之，在压力容器技术领域内，我国已经与国际接轨了。

在压力容器技术领域中取得的成就，依靠了几代人的努力，而且还要继续努力下去。人才培养靠实践也靠教育，而教材是教育中的一个重要工具。1952 年，当初我国创建化工机械专业的时候，我们从西方找不到合适的教材，转而将目光转向前苏联，从 Конторовъил Домашнев 到 Вихман，从中选用了不少有用的材料。1960 年开始，我国高等学校着手编写适合我国国情的教材。几十年过去了，在此期间，国际上压力容器技术有了长足的进展，我国的教材也一直在努力反映新的技术进展，与时俱进。

华东理工大学（原华东化工学院）是全国第一批创建化工机械专业的高校之一。这本教材是华东理工大学教师在多年教学经验的基础上，吸收了兄弟院校教学中的长处而编写的。本书的两位主要作者不仅教课多年，而且有丰富的工程实践经验，所以在教材的架构、内容的选择及文辞方面能恰到好处，形成了鲜明的特色。本书的第一版与第二版已被全国化工机械专业作为通用教材用了十余年。

从事压力容器工作的，远不止化工机械专业（今过程装备与控制工程专业）毕业生，还有冶金、机械制造、电力与核能工程等各方面的人士。然而在高等学校课程设置中列入压力容器设计内容的，还是以化工机械专业为多数。这本书为其他专业毕业而现今从事与压力容器有关的工作与项目的工程技术人员，也提供了一个入门与钻研的工具。

吴承棟

2005 年 3 月

第三版前言

我国自 20 世纪 50 年代初设立化工机械专业以来已有 50 多年的发展历史,为适应社会发展的需要,已于 90 年代将专业名称改为过程装备与控制工程。专业服务面扩大到所有的流程工业,亦称过程工业,包括化工、石化、电力、冶金、轻工等方面。流程工业中所应用到的各种过程装备(process equipment)的外壳几乎都是承受压力的容器。因此“化工容器设计”这门课程历来是该专业学生最重要的必修课之一。本教材是在当时所属高等学校专业教学指导委员会的组织领导下,以招投标方式获得了编写权,其第一版于 1989 年问世,第二版于 1998 年出版,均成为当时全国过程装备与控制工程专业的通用教材,深受各高校师生欢迎。第一版于 1996 年获得全国普通高校优秀教材化工部一等奖。第二版编写时被列为上海市“九五”期间面向 21 世纪教材建设项目,并于 2001 年获得上海市优秀教材二等奖。近年来由于国内外压力容器规范与相关技术的发展,特别是欧盟标准的问世出现了许多新的情况,并同时也收集了各方面提出的宝贵意见,在化学工业出版社的大力支持下,对本教材再次进行了修订,形成了现在的第三版。

第三版的编写仍保持前两版在结构上的特点,即以化工容器的工程设计方法为主线,以此阐述有关的压力容器应力分析理论与设计计算方法;不仅论述受压零部件个体的设计计算方法,还强调各受压零部件组装为压力容器整体后出现的各种问题,如边缘应力问题、局部应力问题等。这一做法回归了压力容器工程设计的本来面貌。本教材的重点放在中低压及外压容器的规则设计方法,高压容器则以厚壁筒体结构和密封结构阐述为主,也介绍应力分析和设计计算方法,这不仅符合学生毕业后的工作实际,也是为学生打好基础。同时,为学生今后能力的发展,能适应 21 世纪的技术进步,适当介绍了诸如压力容器的应力分类与分析设计、疲劳设计、防脆断设计与缺陷评定、高温与低温容器设计等压力容器的设计新理论新方法等技术进展。第三版中增加了超高压容器的介绍,也强调对焊缝安全性的综合分析。

欧洲标准化组织于 2002 年正式颁布了非直接火压力容器标准(EN 13445),其中有不少新的设计思想。本教材在相关章节也简单作了些介绍。

本教材的第一版与第二版成稿之后均由大连理工大学贺匡国教授审定,为本教材质量的提高起到了重要作用。本教材的第一章、第六章第五、六节由吴东棣教授编写。第二章,第三章中的第三、四节,以及第四章由蔡仁良教授编写。第三章的第一、二、五节,第五章及第六章的第一、二、三、四节由王志文教授编写。各章中关于欧盟标准相关内容的介绍由王正东教授编写。这一版中还适当列入了一些习题。全书由王志文教授统编。

本教材在修订过程中得到了戴树和教授、吴东棣教授、贺匡国教授、李培宁教授、柳曾典教授、丁信伟教授、潘家桢教授、经树栋教授、郑津洋教授、安源胜副教授和惠虎副教授

的热情帮助，感谢他们对大纲的修订、内容的修改提出了许多宝贵的意见，并提供了许多有用的资料。由于作者的知识具有局限性，错误与不当之处难免，恳切希望同行专家、学者及读者对本书提出宝贵意见。

编著者
2005年4月

第二版前言

我国自 20 世纪 50 年代初设立化工设备与机械专业，已有四十多年的历史。在我国化学工业及相关工业的建设中起了重要作用。然而，多年来这个专业一直存在着教学负担过重的问题，而且随着近代技术的发展，新增的内容越来越多，反而影响了学生能力的培养，这就需要我们按照正确的教育思想，改革教学内容与教学方法，以面向企业为主，着重培养学生理论联系实际，解决工程实际问题的能力。教材建设是其中一个重要环节。

化工容器设计一直是化工设备与机械类专业人才的一项基本功。压力容器技术是一门综合性的技术科学，它涉及到力学、材料学、制造工艺学等许多方面，包括这些学科的基础理论问题。我们认为，在讲授化工容器设计这门课时，应当着重在“综合”方面，利用学生已有的基础知识和技术基础知识，引导学生学会如何全面考虑、分析和解决工程实际问题。

本教材以介绍化工容器的工程设计方法为主要内容。化工容器设计应以安全为前提，综合考虑质量保证的各个方面，并尽可能做到经济合理。我们的目标是使学生在学完本课程以后能初步建立起完整的容器设计思想。

本教材的编写以化工容器的工程设计方法为主线，结合这条主线来阐述有关的容器应力分析理论。本教材的重点放在按规范设计与中低压容器设计，这不仅是为了更好地符合学生毕业后的工作实际，也是为了打好基础。同时，为了学生今后能力的发展，并能适应 21 世纪初的技术发展，也适当介绍高压容器以及诸如分析设计、疲劳设计、防脆断设计等压力容器设计新理论新方法等新技术进展以及计算机辅助设计方面的进展。

本教材的另一个特点是加强了压力容器总体设计的概念。在阐述了容器的主要零部件之后，从如何组成一个完整的容器的角度，引入了局部应力、支座、开孔以及结构设计等问题的处理。这是一个新的尝试。

本教材的第一版于 1989 年完稿，经各校多年使用，对本教材给予了热情肯定，并于 1996 年获化工部优秀教材一等奖。这期间各方面也提出了宝贵意见，同时一些规范也发生了变化。在此基础上又于 1997 年初完成了修订，形成了第二版。本书得到上海市教育委员会的资助。按上海市教委高教办公室“关于上海普通高校‘九五’重点教材编写出版的若干具体规定”的要求，在本书封、扉、版权页上均署“上海市教育委员会组织编写”。

我们仍然恳切希望国内同行专家对本教材提出宝贵的批评和意见。

编 者
1997 年

第一版前言

我国自五十年代初设立化工设备与机械专业，已有三十多年的历史。实践证明，这个专业的适应性强，知识面广，在我国化学工业及相关工业的建设中起了重要作用。然而，多年来这个专业一直存在着教学负担过重的问题，而且随着近代技术的发展，新增的内容越来越多，反而影响了学生能力的培养，这就需要我们按照正确的教育思想，改革教学内容与教学方法，以面向企业为主，着重培养学生理论联系实际，解决工程实际问题的能力。教材建设是其中一个重要环节。

化工容器设计一直是化工设备与机械专业人才的一项基本功。压力容器技术是一门综合性的技术科学，它涉及到力学、材料学、制造工艺学等许多方面，包括这些学科的基础理论问题。我们认为，在讲授化工容器设计这门课时，应当着重在“综合”方面，利用学生已有的基础知识和技术基础知识，引导学生学会如何全面考虑、分析和解决工程实际问题。

本教材以介绍化工容器的工程设计方法为主要内容。化工容器设计应以安全为前提，综合考虑质量保证的各个方面，并尽可能做到经济合理。我们的目标是使学生在学完本课程以后能初步建立起完整的容器设计思想。

本教材的编写以化工容器的工程设计方法为主线，结合这条主线来阐述有关的容器应力分析理论。本教材的重点放在按规范设计与中低压容器设计，这不仅是为了更好地符合学生毕业后的工作实际，也是为了打好基础。同时，为了学生今后能力的发展，也要适当介绍高压容器和诸如分析设计等的压力容器技术新进展。

本教材的另一个特点是加强了压力容器总体设计的概念。在阐述了容器的主要零部件之后，从如何组成一个完整的容器的角度，引入了局部应力、支座、开孔以及结构设计等问题的处理。这是一个新的尝试。

我们恳切希望国内同行专家对本教材提出宝贵的批评和意见。

编 者
1989年8月

内 容 提 要

化工容器（几乎包括所有压力容器）在国民经济的各个部门被广泛采用，受到国家有关法规的严格管理。本书主要阐述化工压力容器的设计原理和方法。面向化工容器工程设计的需要，编写了如下各章。第一章概论介绍了化工容器设计的基本概念，包括设计的基本要求、材料特点、失效与安全、有关规程与法规。第二章中低压容器设计，中低压薄壁壳体承压后的无力矩理论（薄膜理论）、有力矩理论与边缘应力、圆平板理论、中低压容器的工程设计计算方法、法兰密封与法兰计算。第三章容器整体问题，阐述各部件组接成容器整体后出现的各种局部应力问题，如开孔与补强、卧式容器支座处的应力计算与支座设计、壳体上的局部应力、容器的结构设计原则等。第四章外压容器，阐述外压壳体的稳定性问题、外压薄壁筒体、外压凸形封头、外压法兰的设计计算。第五章高压及超高压容器设计，阐述厚壁筒的应力分析与强度设计、高压密封结构、高压与超高压容器选材的特殊性、超高压容器的自增强处理。第六章化工容器设计技术进展，主要介绍了近代压力容器设计技术的进展，包括应力分析设计方法的基本理论、容器的疲劳设计方法、以断裂力学理论为基础的防脆断设计与缺陷评定、化工高温容器与低温容器的设计。本书曾作为全国化工机械（现称过程装备与控制工程）专业的通用教材应用了十余年，也可作为从事压力容器设计、安全管理技术人员的主要参考书，还可供相关专业研究生作参考。

目 录

第一章 化工容器设计概论	1
第一节 绪言	1
一、化工容器的应用及地位	1
二、化工容器设计的基本要求	1
第二节 化工容器的材料	2
一、压力容器用钢的基本类型	3
二、对压力容器用钢的基本要求	7
第三节 压力容器的质量保证	10
一、设计	11
二、材料	11
三、制造与制造过程中的检验	12
四、在役检验与监控	13
第四节 压力容器的失效、设计准则及主要规范	14
一、压力容器的失效与设计准则	14
二、压力容器规范介绍	15
第二章 中低压容器的规则设计	22
第一节 容器壳体的应力分析	22
一、概述	22
二、回转壳体的无力矩理论	23
三、圆柱壳轴对称问题的有力矩理论	34
四、压力容器的不连续分析	39
第二节 圆平板中的应力	47
一、概述	47
二、圆板轴对称弯曲的基本方程	47
三、均布载荷下的圆板中的应力	51
四、轴对称载荷下环形板中的应力	54
五、带平封头圆筒的不连续分析	59
第三节 内压薄壁容器的设计计算	62
一、引言	62
二、圆筒和球壳的设计计算	63
三、设计参数的规定	64
四、压力试验	67
五、封头的设计计算	68
第四节 法兰	76
一、引言	76

二、公称通径、公称压力、法兰标准及其应用	77
三、法兰的结构类型与应用场合	79
四、垫片结构类型和应用场合	80
五、螺栓及其选用	82
六、法兰设计	83
七、国外法兰设计方法的新动态	96
习题	97
第三章 压力容器的整体设计问题	99
第一节 容器设计中的整体设计问题概述	99
一、容器的整体结构分析及局部应力问题	99
二、容器设计中的结构设计问题	101
第二节 开孔及补强设计	101
一、开孔应力集中及应力集中系数	101
二、开孔补强设计的要求	106
三、等面积补强计算	109
第三节 卧式容器支座设计	110
一、鞍座结构及载荷分析	110
二、筒体的应力计算与校核	116
第四节 局部应力计算	124
一、引言	124
二、球壳和圆柱壳局部应力的计算	124
第五节 容器设计中的结构设计问题	135
一、容器的结构设计问题分析	135
二、容器的焊接结构设计	138
三、对焊缝安全性的综合分析	145
习题	147
第四章 外压容器设计	148
第一节 概述	148
一、外压容器的稳定性	148
二、稳定性问题的基本概念	148
第二节 外压薄壁圆筒的稳定性计算	151
一、受侧向均布外压力的长圆筒的临界压力	151
二、受均布侧向外压短圆筒的临界压力	153
三、轴向受压圆筒的临界应力	155
四、非弹性失稳的工程计算	156
第三节 外压圆筒的设计计算	156
一、图算法的原理	156
二、图算法的计算步骤	160
三、有关设计参数的规定	162
四、加强圈的设计计算	163

第四节 外压封头和法兰计算	164
一、外压凸形封头	165
二、外压锥形封头	166
三、外压法兰的计算	169
习题	170
第五章 高压及超高压容器设计	171
第一节 概述	171
一、高压容器的应用	171
二、高压容器的结构特点	171
三、高压容器的材料	172
第二节 高压容器筒体的结构与强度设计	174
一、高压筒体的结构型式及设计选型	174
二、厚壁圆筒的弹性应力分析	178
三、高压筒体的失效及强度计算	185
第三节 高压容器的密封结构与设计计算	190
一、高压密封的结构形式	190
二、主要密封结构的设计计算	196
第四节 高压容器的主要零部件设计	199
一、高压螺栓设计	199
二、高压平盖的设计计算	200
三、高压筒体端部的设计	202
四、高压容器的开孔补强	204
第五节 超高压容器	205
一、厚壁筒的弹塑性应力分析	206
二、超高压容器的自增强处理	209
三、超高压容器的材料	212
习题	215
第六章 化工容器设计技术进展	216
第一节 近代化工容器设计技术进展概述	216
一、容器的失效模式	216
二、化工容器的设计准则发展	219
三、容器设计规范的主要进展	221
四、近代设计方法的应用	222
第二节 化工容器的应力分析设计	223
一、分析设计法概述	223
二、容器的应力分类	225
三、分析设计法对各类应力强度的限制	229
四、应力分析设计的程序及应用	235
第三节 容器的疲劳设计	238
一、容器的低循环疲劳破坏	238

二、低循环设计疲劳曲线的确定方法·····	239
三、疲劳设计曲线的平均应力影响修正·····	240
四、容器疲劳设计中的应力分析·····	245
五、疲劳强度减弱系数·····	247
六、变幅载荷与疲劳积累损伤·····	248
七、对疲劳设计有关规程的说明·····	248
第四节 容器的防脆断设计及缺陷评定·····	250
一、容器的低应力脆断问题·····	250
二、断裂力学的基本理论·····	251
三、压力容器的防脆断设计方法·····	257
四、在役容器的缺陷评定·····	258
第五节 化工容器的高温蠕变·····	264
一、金属材料的高温蠕变·····	264
二、化工容器的高温设计·····	266
三、高温压力容器的残余寿命·····	267
第六节 化工低温压力容器·····	269
一、低温容器的材料选用·····	269
二、低温容器设计、制造中需注意的问题·····	271
附录 ·····	273
一、钢制压力容器材料的许用应力 (GB 150—1998) ·····	273
二、常用单位的换算·····	283
参考文献 ·····	284

第一章 化工容器设计概论

第一节 绪 言

一、化工容器的应用及地位

化学工业和其他流程工业的生产离不开容器，所有化工设备的壳体都是一种容器，某些化工机器的部件，如压缩机的气缸，也是一种容器。容器的应用遍及各行各业，诸如航空、航海、机械制造、轻工、动力等行业。然而化工容器又有其本身的特点，它们不仅要适应化学工艺过程所要求的压力和温度条件，还要承受化学介质的作用，要能长期的安全工作，且要保证密封。

容器承受的载荷最主要的是压力载荷。大多数容器承受的压力是内压，这类容器称为内压容器。除内压容器外，还有承受外压载荷的容器。内压容器若按压力的大小可以分为中低压容器、高压容器、超高压容器。受内压的容器其主要失效形式属于弹塑性失效，而外压容器的失效形式则主要是整体失稳。泄漏也是容器失效的一种形式，因为对化工容器来说，由于介质往往有腐蚀性、毒性或易燃易爆，密封则是安全操作的必要条件。容器抵抗化学介质作用的能力主要是通过选择合适的材料（包括保护层）来解决，辅以其他的防腐蚀措施。

出于对安全的考虑，压力容器必须纳入国家质量技术监督机构的安全监察范畴。

尽管化工容器有其自身的特点，但它与一般压力容器的共性大于它的个性。本课程的中心是阐述压力容器的一般设计方法，重在掌握基本原理与设计的思路。具体的设计方法，包括材料选择、结构设计与计算方法是层出不穷的，而且同一设计任务可以有不同的设计方案，好的设计方案总是建立在丰富的实践经验基础上的。

二、化工容器设计的基本要求

化工容器的基本要求是安全性与经济性，安全是核心问题，在充分保证安全的前提下尽可能做到经济。经济性包括材料的节约，经济的制造过程，经济的安装维修，而容器的长期安全运行本身就是最大的经济。对化工厂来说，停工一天所造成的经济损失就可能大大超过单台设备的成本。当然，一台压力容器是否能做到始终安全运行，决定因素还很多，例如操作人员能否严格执行制度，流程中是否有足够的安全措施等，但要讨论的重点是压力容器本身是否安全可靠。应当指出，充分保证安全并不等于保守。例如，不必要地采用过厚的壁厚，不仅浪费材料，而且厚板的材质与焊接质量可能比薄板差。又如近代的特别重要的压力容器（如核容器）由于采用了“按分析设计”的方法，不仅提高了安全可靠性的，也节约了材料并降低了制造成本，见图 1-1。

图 1-1 所示的两台压力容器，左面一半是按照美国机械工程师学会（ASME）锅炉与压力容器规范第Ⅷ卷第一分卷（规则设计）设计的压力容器（核用），右面一半是按照该规范第Ⅲ卷（按分析设计）设计的压力容器（核用）。由该图可以看出，“按分析设计”不仅降低了重量，并且使壁厚大大减薄，有利于提高制造质量。

图 1-1 同时也是一个压力容器的典型例子。压力容器通常总是由壳体、封头、接管（开

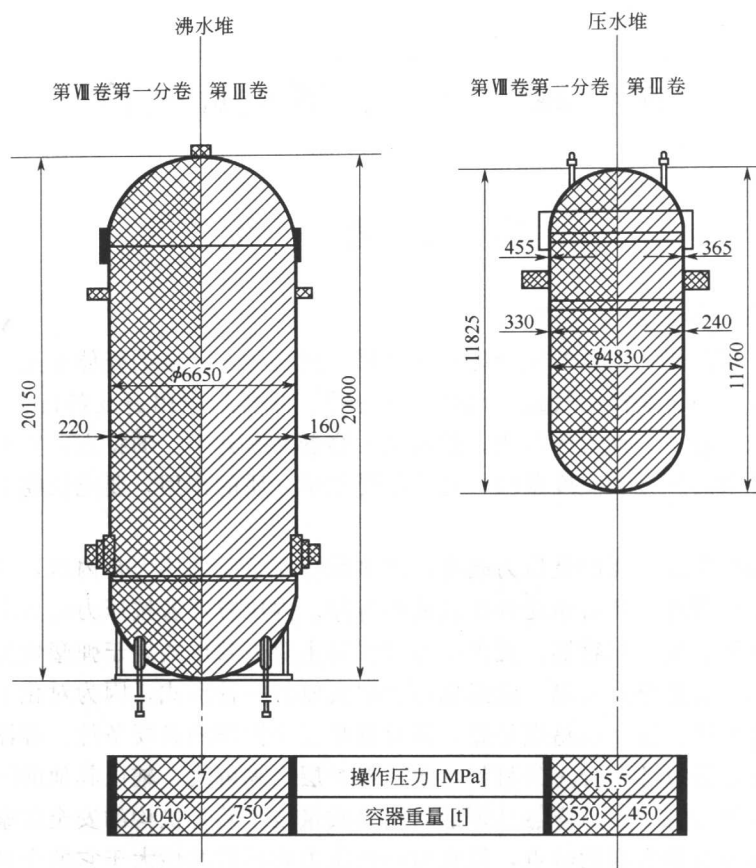


图 1-1 按不同的 ASME 规范设计的核容器比较

孔)、密封件、支座等各种部件组成。在外载荷(如内压等)作用下,在各部件中产生不同的应力,设计者的任务就是要做到各部件中应力的合理分布,并综合考虑材料行为、制造过程、检验方法、运行与维修等各方面的因素,确定合理的结构,提交出施工图纸和必要的设计文件。

压力容器技术是一门综合性的技术科学,在 20 世纪中期有了长足的进展,这是由于工业的广泛需要和工业生产向高技术发展的推动。化工生产的大型化和核电站的商业化是二个重要的促进因素。压力容器技术综合了应用力学、材料科学、冶金工艺、机械制造工艺以至技术物理学等各方面的成就,同时,由于压力容器技术发展的需要也推动了这些学科的发展。设计中计算总是占有重要位置的,但计算不等于全部设计。要成为一个好的压力容器设计师,必须具备有关学科的扎实而广泛的基础,并且努力吸收和积累工程实践经验。

第二节 化工容器的材料

化工容器和各种流程工业所用容器都承受介质的压力作用,同时又会遇到各种各样介质的腐蚀。制造化工容器用的材料多种多样,有黑色金属、有色金属、非金属材料以及复合材料,但使用得最多的还是钢材。通常大型容器遇有较严重的腐蚀介质时可用耐腐蚀材料做衬里(或内壁堆焊,或用复合板材)来解决,而容器的外壳做成为可以承受压力的主体,所以化工容器材料问题便转化为压力容器的材料问题。本节主要从压力容器的角度讨论钢材的

选用。

钢材的形式有板材、管材、锻件和铸件，都可以做成为压力容器的受压元件，其中最重要、最主要的是钢板。板材有冷轧薄板与热轧厚板，多数用热轧厚板（4~60mm）。管材亦有冷拔与热拔之分。近代大型压力容器常采用整体锻造筒节与封头、接管。铸件用得较少，主要是用于形状复杂的阀体等部件；离心铸造的合金钢管质地致密，在高温炉管方面获得了良好的应用。对各种形式的钢材，机械工业部门与冶金工业部门都颁布了有关的技术标准，有些重要的方面还有相应的国家标准。在选用材料时，设计者在设计图纸上必须指明该材料所应符合的标准。

由于压力容器制造中大多数均采用冷加工弯卷和焊接工艺，因此容器钢板必须具有良好的塑性和可焊性。可以见得，并不是任何钢材都可以用来制造压力容器的。为此中国也和许多工业国家一样制订了许多容器用钢的标准，其中最常用的有 GB 6654《压力容器用碳素钢和低合金钢厚钢板》等。中国容器用钢在钢号的末尾加上字母 R（容字拼音的第一字母），以表示是容器用钢，如 16MnR、20R 等。

简要地说，压力容器用钢板比一般钢板的要求更严，主要体现在：对化学成分的控制较严，抽样检验率较高，在力学性能检验中增加了冲击吸收功值的韧性要求等。

一、压力容器用钢的基本类型

工业发达国家对压力容器用钢的生产寄以特别的重视，由于工程师与冶金学家的紧密结合，对各种压力容器用钢开展了大规模的协作研究，目前已积累了大量的数据，筛选出了多种成熟的钢种，当前主要趋势是对一些较好的钢种进行改进，以适应新的、更苛刻要求，包括对成分控制和冶炼方法的改进以及选用合适的热处理方法，重点不在追求增加新的钢种。

中国压力容器用钢的生产已有多年的历史，虽然品种还不够多，质量不够稳定，基础数据也积累得不够，但基本上能满足大多数压力容器制造的要求。借鉴国外的多年经验，根据国内资源情况，中国压力容器用钢已形成三大基本类型，即碳素钢、低合金钢和合金钢三大系列，下面分别加以介绍。

（一）碳素钢

碳素钢中的低碳钢可以制作压力容器，其强度较低而延性与可焊性良好，能适应压力容器制造工艺的各种需要。主要品种是 Q235 类钢和 20R 钢。

Q235 类钢是屈服强度为 235MPa 的碳素结构钢，强度不高。通常不作为压力容器用钢标准（GB 6654）中的容器专用钢，但 Q235-B 和 Q235-C 两种钢号被 GB 150（钢制压力容器）标准容许用于制造低参数的压力容器。这主要因为这类钢种的使用历史较长，价格低廉，来源广泛，所以至今仍有应用。Q235-B 是厚度小于 4mm 的薄钢板，而 Q235-C 是厚度为 4mm 以上的厚钢板。两者都要求保证化学成分和力学性能，但 B 类钢不要求验收冲击韧性，而 C 类钢要保证冲击韧性。另外，从冶炼要求来说两者都应当是镇静钢，不能是沸腾钢，它们可以热轧状态供货。

20R 是 GB 6654 标准中所列的强度最低（ $\sigma_s=235\sim245\text{MPa}$ ）的压力容器专用钢，是在优质碳素钢 20 钢的基础上发展出来的，要求既保证化学成分，又保证力学性能。可以热轧状态供货，又可专门要求正火状态供货。

（二）低合金压力容器用钢

在低碳钢中加入少量合金元素，如 Mn、V、Mo、Nb 等可以显著地提高钢的强度而成本增加不多。同时，低合金钢的低温韧性和高温强度亦明显优于碳素钢，从而扩大了使用温

度范围。中国从 20 世纪 60 年代开始致力于普通低合金钢的研制与生产,至今已筛选出不少成熟的品种,以增加强度为主要目标的不同强度等级的低合金压力容器用钢有 16MnR、15MnNbR、15MnVR、18MnMoNbR、13MnNiMoNbR 等钢号,它们都被编入 GB 6654 标准中。前两种钢可以热轧状态供货,要求较严时也可以回火状态供货,而后两种钢均必须采用正火加回火状态。强度要求更高时可以采用调质(淬火加回火)型的压力容器用钢 07MnCrMoVR ($\sigma_b \geq 610\text{MPa}$ 和 $\sigma_s \geq 490\text{MPa}$),但这一钢号尚未被 GB 6654 编入,只在 GB 150《钢制压力容器》的附录 A 中被编入,在实际生产中也有不少应用,主要用于设计制造 2000m³ 以上更大的球形储罐。

-20℃ 及以下的容器中国标准定义为低温容器,此种情况下钢材不以提高强度为主要目的,而是以提高钢材的低温韧性为主要目的。在低温容器用钢的标准 GB 3531 中主要列入了一 30~40℃ 级的 16MnDR、-45℃ 级的 15MnNiDR 和 -70℃ 级的 09MnNiDR 三个低温钢号。在 -20℃ 下可以允许采用 16MnR 或强度高的 07MnCrMoVR 调质钢。GB 150 附录 A 推荐在 -40℃ 下也可采用调质的 07MnNiCrMoVDR 钢。

中高温条件下的容器用钢以提高钢材的高温强度为主,同时也应提高抗氧化的能力。20R 和 16MnR 钢的最高使用温度为 475℃,算不上中高温压力容器用钢。550℃ 以下的中高温容器用钢主要有 15CrMoR,被列入 GB 6654 标准中。这种钢都应该是正火加回火的热处理状态。除这种中高温使用的铬-钼钢之外,近年来石油加工工业中已大量使用 1Cr5Mo(属珠光体耐热钢)和 2¼Cr1Mo 或 2¼Cr1MoV 钢。2¼Cr1Mo 钢的中国牌号为 12Cr2Mo1R。1Cr5Mo 钢主要用于中高温压力管道或炉管,抗氢腐蚀性能很好。2¼Cr1Mo 或 2¼Cr1MoV 钢则主要用于制造中高温的厚壁加氢反应器,其抗高温氢腐蚀的性能优良,中国已能冶炼、锻造和焊接。

(三) 高合金钢

化工容器采用高合金钢的目的主要是抗腐蚀、抗氧化或耐特别高的温度。此外很多高合金钢在低温下有良好的韧性,可用于低温。中国常用的可制造压力容器的合金钢主要有以下 3 个类型。

(1) 铁素体类不锈钢 最常用的是 0Cr13 或 0Cr13Al,其钢板应在退火状态下使用。退火态的 0Cr13 板材可以进行冷加工,焊接性能也较好。

(2) 奥氏体类不锈钢 通常是指 Cr-Ni 奥氏体钢,即添加 8% 以上的合金镍元素。轧制成材后必须经固溶处理以完成奥氏体化,只允许存在很少的铁素体相。最常用的奥氏体不锈钢有 0Cr18Ni9(相当于 SUS304 牌号)、0Cr18Ni10Ti(相当 SUS321)。遇有醋酸介质时常用含钼不锈钢 0Cr17Ni12Mo2(SUS316)及 0Cr18Ni12Mo2Ti(SUS317)。尿素母液有强烈的腐蚀性,可用超低碳的含钼不锈钢或再含钛的 00Cr17Ni14Mo2(SUS316L)、00Cr19Ni13Mo3(SUS317L),除被用于尿素设备外也常用于其他强腐蚀介质。

奥氏体类不锈钢的耐腐蚀主要靠合金元素 Cr 的作用,形成的氧化膜非常致密,起到了对金属的保护作用。而 Ni 是奥氏体形成元素,不锈钢被奥氏体化之后就主要被初化,具有很好的塑性与韧性,有很好的冷加工变形能力。同时焊接性能也非常好,高温强度与抗氧化性均很好,也不存在低温脆转变问题。

(3) 双相不锈钢 由于奥氏体不锈钢最致命的弱点是在许多介质(如含 Cl⁻ 的溶液、湿 H₂S 等)中,并在应力作用下出现应力腐蚀开裂(简称 SCC)。针对这一问题国外率先使用了双相不锈钢。原则上只要在奥氏体不锈钢的基础上适当降低含 Ni 量,使不锈钢中的奥氏