

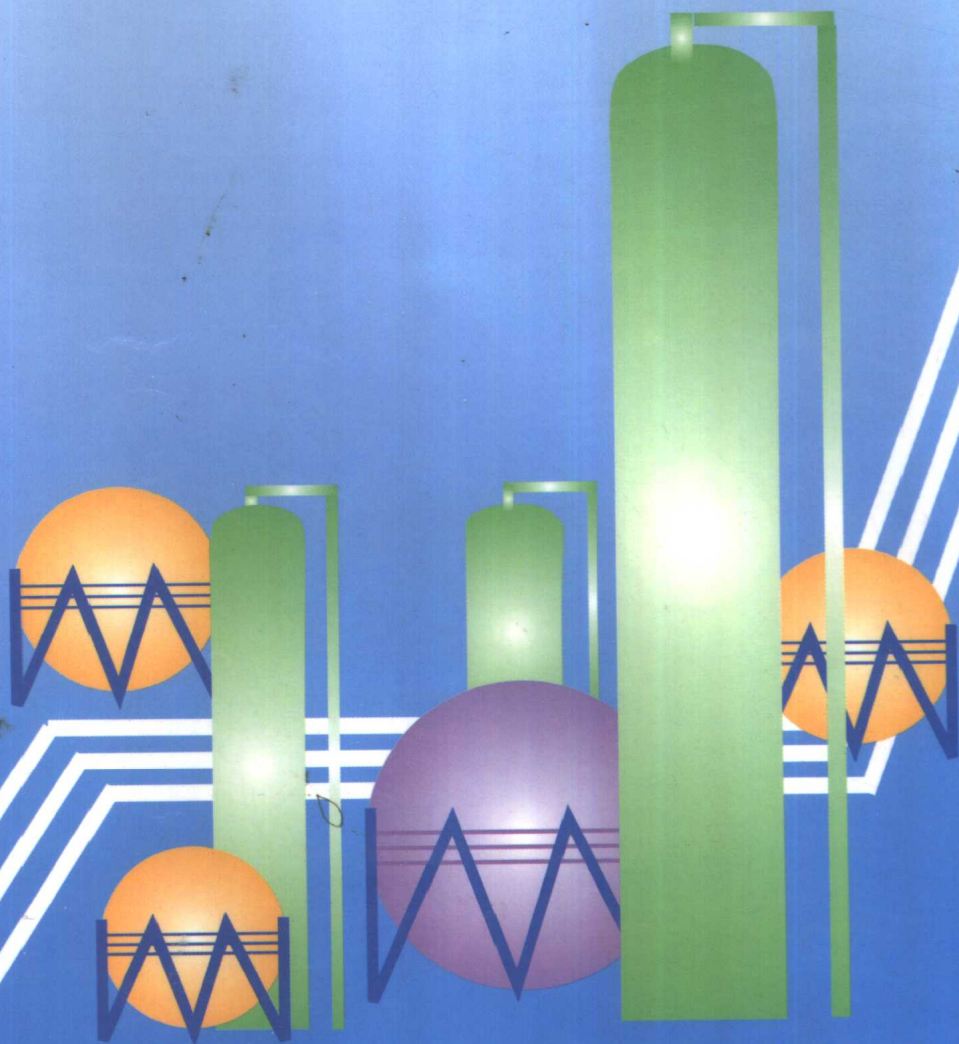
高等学校教材



化工容器设计

(第二版)

上海市教育委员会组织编写 王志文 主编 贺匡国 审定



B.2

化学工业出版社

高等学校教材

化工容器设计

(第二版)

上海市教育委员会组织编写

王志文 主编 贺匡国 审定

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

化工容器设计/王志文主编. —2版. —北京: 化学工业出版社, 1998.5 (1999.2 重印)
高等学校教材
ISBN 7-5025-2033-3

I. 化… II. 王… III. 化工设备-容器-设计 IV.
TQ053.202

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 06993 号

高等学校教材
化工容器设计
(第二版)

上海市教育委员会组织编写
王志文 主编 贺匡国 审定
责任编辑: 孙世斌
责任校对: 洪雅姝 麻雪丽
封面设计: 季玉芳

*
化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
新华书店北京发行所经销
化学工业出版社印刷厂印刷
三河市东柳装订厂装订

*
开本 787×1092 毫米 1/16 印张 17 1/2 插页 1 字数 434 千字
1998 年 5 月第 2 版 1999 年 2 月北京第 2 次印刷
印数: 3001—8000

ISBN 7-5025-2033-3/G · 595
定 价: 19.50 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

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向的进展。

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

内 容 提 要

本书是在原化工部全国高等学校化工设备及机械教学指导委员会审定的编写大纲而编的教材——化工容器设计的第一版（1996年化工部优秀教材）基础上，依据近年来压力容器技术的新进展、新的标准规范制订及该教材在教学上使用的经验，进行修编而成为化工容器设计（第二版），供全国高校有关专业本科生教学使用。

本书的主要内容介绍的是化工容器工程设计原理与方法，包括化工容器设计的概论、中低压容器和外压容器设计的基本理论与工程设计方法、容器设计的总体考虑，另外还有高压容器设计和近年来国内外容器设计理论与技术的进展。本书可作为设备或机械（化工类）专业本科学生的专业教材。

本书第一章及第六章第五节及第六节由吴东棣教授编写；第二章、第三章第三、四节及第四章由蔡仁良教授编写；第三章第一、二、五节，第五章，第六章第一、二、三、四节由王志文教授编写；第六章第七节由经树栋副教授编写，全书由王志文教授主编。由贺匡国教授审定。

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 压力容器的质量保证.....	2
一、设计.....	3
二、材料.....	3
三、制造与制造过程中的检验.....	8
四、在役检验与监控	10
第三节 压力容器规范介绍	10
一、国外压力容器规范简介	10
二、我国压力容器规范介绍	11
第二章 中低压容器设计	16
第一节 容器壳体的应力分析	16
一、概述	16
二、回转壳体的无力矩理论	16
三、圆柱壳轴对称问题的有力矩理论	27
四、压力容器的不连续分析	32
第二节 圆平板中的应力	40
一、概述	40
二、圆板轴对称弯曲的基本方程	41
三、均布载荷下的圆板中的应力	43
四、轴对称载荷下环形板中的应力	47
五、带平封头圆筒的不连续分析	52
第三节 内压薄壁容器的设计计算	55
一、引言	55
二、圆筒和球壳的设计计算	56
三、设计参数的规定	58
四、压力试验	60
五、封头的设计计算	61
第四节 法兰	69
一、引言	69
二、法兰垫片密封及密封设计	70
三、法兰的设计	76
第三章 压力容器的总体设计问题	90
第一节 容器设计中的总体设计问题概述	90
一、容器的总体结构分析及局部应力问题	90
二、容器设计中的结构设计问题	92

第二节 开孔及补强设计	92
一、开孔应力集中及应力集中系数	92
二、开孔补强设计的要求	97
三、等面积补强计算	100
第三节 卧式容器支座设计	101
一、鞍座结构及载荷分析	101
二、筒体的应力计算与校核	106
第四节 局部应力计算	114
一、引言	114
二、球壳和圆柱壳局部应力的计算	115
第五节 容器设计中的结构设计问题	126
一、容器的结构设计问题分析	126
二、容器的焊接结构设计	129
第四章 外压容器设计	137
第一节 概述	137
一、外压容器的稳定性	137
二、临界压力的概念	137
第二节 外压薄壁圆筒的稳定性计算	139
一、受均布侧向外压的长圆筒的临界压力	139
二、受均布侧向外压短圆筒的临界压力	143
三、轴向受压圆筒的临界应力	146
四、非弹性失稳的工程计算	147
第三节 外压圆筒的设计计算	147
一、图算法的原理	147
二、图算法的计算步骤	150
三、有关设计参数的规定	153
四、加强圈的设计计算	154
第四节 外压封头和法兰计算	155
一、外压凸形封头	156
二、外压锥形封头	157
三、外压法兰的计算	160
第五章 高压容器设计	161
第一节 概述	161
一、高压容器的应用	161
二、高压容器的结构特点	161
三、高压容器的材料	162
第二节 高压容器筒体的结构与强度设计	164
一、高压筒体的结构型式及设计选型	164
二、厚壁圆筒的弹性应力分析	168
三、厚壁筒的弹塑性应力分析	175

四、自增强原理.....	177
五、高压筒体的失效及强度计算.....	179
第三节 高压容器的密封结构与设计计算.....	184
一、高压密封的结构形式.....	184
二、主要密封结构的设计计算.....	190
第四节 高压容器的主要零部件设计.....	193
一、高压螺栓设计.....	193
二、高压平盖的设计计算.....	194
三、高压简体端部的设计.....	195
四、高压容器的开孔补强.....	197
第六章 化工容器设计技术进展.....	200
第一节 近代化工容器设计技术进展概述.....	200
一、容器的失效模式.....	200
二、化工容器的设计准则发展.....	203
三、容器设计规范的主要进展.....	204
四、近代设计方法的应用.....	205
第二节 化工容器的应力分析设计.....	206
一、分析设计法概述.....	206
二、容器的应力分类.....	209
三、分析设计法对各类应力强度的限制.....	213
四、应力分析设计的程序及应用.....	218
第三节 容器的疲劳设计.....	221
一、容器的低循环疲劳破坏.....	221
二、低循环设计疲劳曲线的确定方法.....	222
三、疲劳设计曲线的平均应力影响修正.....	223
四、容器疲劳设计中的应力分析.....	228
五、疲劳强度减弱系数.....	230
六、变幅载荷与疲劳积累损伤.....	231
七、对疲劳设计有关规程的说明.....	231
第四节 容器的防脆断设计及缺陷评定.....	233
一、容器的低应力脆断问题.....	233
二、断裂力学的基本理论.....	234
三、压力容器的防脆断设计方法.....	240
四、在役容器的缺陷评定.....	241
第五节 化工容器的高温蠕变.....	247
一、金属材料的高温蠕变.....	247
二、化工容器的高温设计.....	249
三、高温压力容器的残余寿命.....	250
第六节 化工低温压力容器.....	252
一、低温容器的材料选用.....	252

二、低温容器设计、制造中需注意的问题.....	254
第七节 化工容器的计算机辅助设计.....	255
一、概述.....	255
二、化工容器 CAD 系统的基本功能与结构	256
三、CAD 专家系统	259
参考文献	261
附录	263
一、钢制化工容器材料的许用应力 (GB 150—89)	263
二、常用单位的换算.....	270

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。

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，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（开孔）、

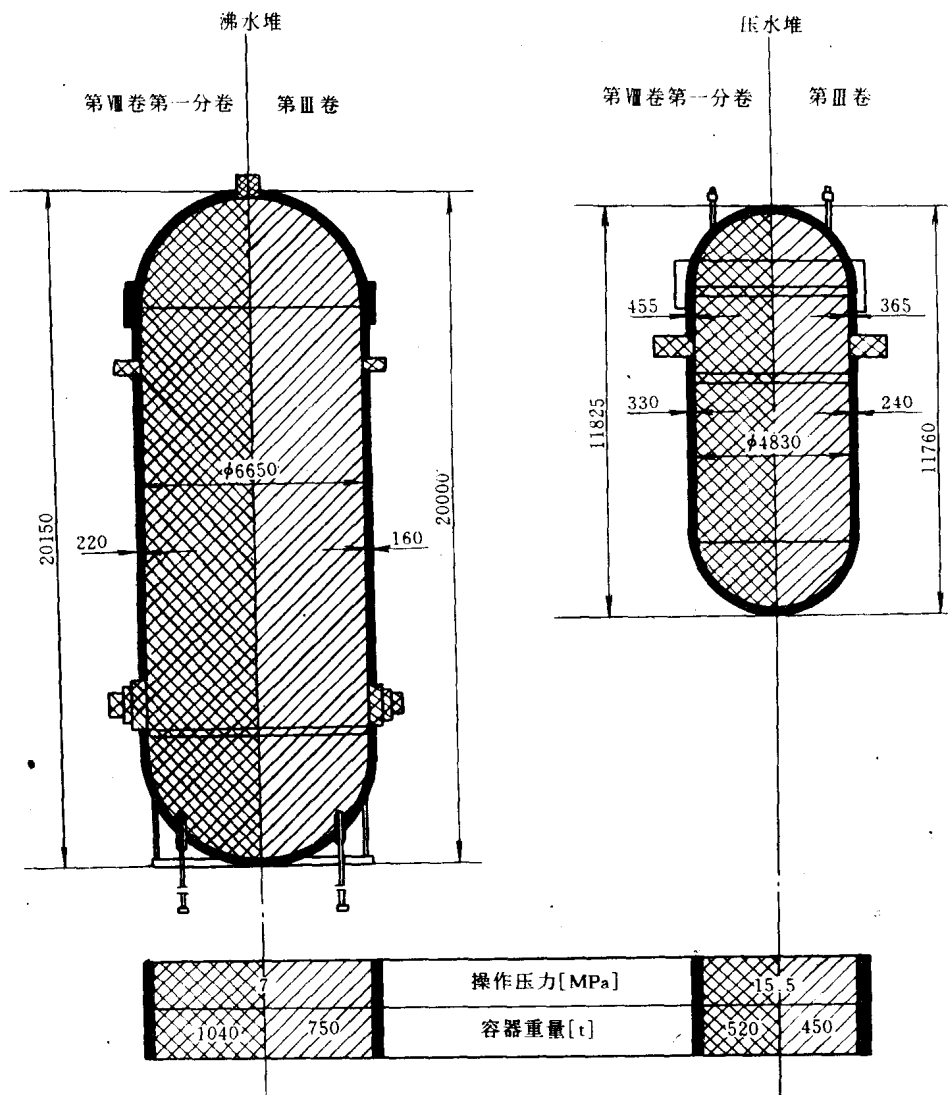


图 1-1 按不同的 ASME 规范设计的核容器比较

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,在最近半个世纪中有了长足的进展,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两个重要的促进因素。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,必需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 压力容器的质量保证

一台容器从设计、制造、投入运行到退役是一个漫长的过程。工业生产要求容器在整个

服役过程内能满意地运行，不出意外事故。为达到这一目标所采用的有计划的、系统的措施统称为“质量保证”。质量保证是一种系统工程。在实践中各国都逐步形成了质量保证体系，我国也不例外。美国机械工程师协会（ASME）的卷页浩繁的《锅炉与压力容器规范》就是按质量保证系统全面地编写的。英国于1982年在英国机械工程师学会中设立了“压力容器质量保证管理委员会”，并发布了有关文件，其后英国政府发布了质量保证法案，虽然都不是强制性的法规，但明确地强调了质量保证的概念。质量保证可以理解为广义的更严格的安全性。通常认为只要不发生灾难性爆炸则容器就是安全的；例如容器由于裂纹穿透壁厚而泄漏（漏而未爆），通常不作为安全事故，但这种情况不符合质量保证的要求，因为停产检修会造成经济损失，有些介质泄漏后遇明火会引起燃烧和爆炸。质量保证与“质量监督”也是不同的概念，后者只是达到质量保证的具体手段。

压力容器的质量保证大体上包括以下四个方面：设计、材料、制造与制造过程中的检验、在役检验与监控。下面分别就这四个方面作扼要的说明^[1]。

一、设计

设计是一台压力容器诞生的第一步，也是质量保证的第一个环节。因此，在设计时应当周密地考虑到以后各环节中可能产生的问题和为保证质量所应采取的措施。

在设计时，首先应当仔细分析用户提出的设计要求和所提供的有关技术资料。据此，设计者要全面确定压力容器所承受的各种载荷和工作条件。载荷可能是以静载荷为主，也可能是交变载荷（例如几小时一个开停工操作循环的反应器）。工作温度可能是恒定的，也可能是变动的，而这种变动可能在容器部件中引起变动的温度应力。介质可能对钢材有腐蚀性，也可能没有腐蚀性。介质还可能有毒易燃易爆的，也可能没有这些危险。还要明确地定出容器的正常工况与非正常工况，从而确定容器设计时应符合的最苛刻的条件。

根据以上对压力容器基本特征的了解，设计者要决定根据何种设计规范进行设计，大多数容器的设计是按常规设计，但对要求作疲劳分析的容器就要按另一规程即应力分析设计规程作设计。少数极重要的压力容器还要求在设计阶段就要按断裂力学理论进行断裂分析。

根据规范的要求，设计者对容器的各部位进行应力分析。应力分析和材料选择实际上应是同时进行的。应力分析的结果应当使材料的性能得到充分的发挥，并且尽可能使容器的各部分做到等强度。用足材料的许用应力既符合安全性也符合经济性。压力容器中的局部应力可以达到较高的数值，在设计规范中都有相应的规定。

材料选择是重要的设计环节，它既与容器抵抗失效的能力有关，又与制造工艺密切相关。设计者必须对所选择的材料有全面的了解，才能作出合理的选择，才能画出合理的结构设计图纸。一般说，一台压力容器的设计文件包括设计计算书、施工图、技术要求等三个部分，这些部分都与材料选用、制造、检验等质量保证的各环节成为统一整体。

根据我国有关规定，设计者应持有压力容器设计单位的批准书，方具有资格。

二、材料

制造压力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等，但到目前为止，使用得最多的还是钢材。相应地，制造方法的基本环节是压力加工和焊接。此处重点讨论钢材的选用。

钢材的形式有板材、管材、锻件和铸件。板材有冷轧薄板与热轧厚板，多数场合下用热

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,机械工业部与冶金工业部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,并不是任何钢材都可以用来制造压力容器的。为此我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。我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,以及在力学性能检验中增加了冲击值的要求等。

(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、更苛刻的要求,包括对成分控制和冶炼方法的改进,重点不在追求增加新的品种。

我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,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,我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。

(1) 碳素钢 碳素钢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。Q235类钢可用于容器的有Q235-AF和Q235-A。这几种牌号的钢实际上不是压力容器用钢(不属于GB 6654中的钢号),但因使用历史较长,价格低廉,来源广泛,至今仍有应用。这几种牌号的钢,冶炼厂和轧钢厂均只保证力学性能而不保证化学成分。20R是在优质碳素钢20钢的基础上发展出来的容器用钢,既保证力学性能又保证化学成分。

(2) 低合金钢 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。我国从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有16MnR、15MnVR、15MnVNR及18MnMoNbR等。以低温应用为主要目标的有09Mn2VDR及06MnNbDR等。以中高温应用为主要目标的有16MnR、15CrMoR等。1Cr5Mo在我国石油工业中已有很长的应用历史,它有较高的高温强度和良好的抗氢性能。近年来加氢工艺的发展要求有高温抗氢钢,我国已开始冶炼和使用 $2\frac{1}{4}$ Cr1Mo钢,我国的牌号为12Cr2Mo1R。

(3) 合金钢 化工容器采用合金钢的目的主要是抗腐蚀、抗高温氧化或耐特别高的温度。我国采用的合金钢主要是0Cr19Ni9和0Cr19Ni13Mo3等牌号,后者主要用于尿素生产。实际上高铬镍钢不仅防腐蚀性能和抗高温氧化性能优良而且低温下韧性也很好。铬镍不锈钢抗大气腐蚀和硝酸腐蚀的性能优良,但也不是能耐所有酸碱的腐蚀。对于700℃以上的工作温度,

采用 Cr25Ni20 合金钢较为合适, 目前我国已能生产离心铸造的 4Cr25Ni20 (亦称 HK40) 炉管, 用于石油化工生产中。

表 1-1 选录了几种压力容器用钢的强度指标和使用温度范围。表中对同一牌号的钢板有的列出了二种不同厚度 (并未包括所有能供应的厚度), 当板厚增加时, 常温强度指标下降。所以, 随意增加容器壳体的厚度是没有好处的。

表 1-1 压力容器用钢性能示例

牌 号	钢板使用状态	板厚, mm	常温强度指标		使 用 范 围
			σ_b , MPa	σ_y , MPa	
Q235-A (A3, AY3)	热轧	4.5~16	375	235	0~350 C
20R	热轧或正火	6~16	400	245	-20~475 C
		17~25	400	235	
16MnR	热轧或正火	6~16	510	345	-20~475 C
		17~25	490	325	
15MnVR	热轧或正火	6~16	530	390	-40~400 C
		17~25	510	375	
18MnMoNbR	正火加回火	30~60	590	440	0~475 C
		>60~100	570	410	
09Mn2VDR	正火	6~20	460	325	-70~100 C
0Cr19Ni9	奥氏体化	2~60	>520	>206	-196~700 C

(二) 对压力容器用钢的基本要求

材料是压力容器质量保证体系中的一个重要环节, 并不仅仅是设计者选定一下材料就万事大吉了, 这里还涉及到对材料的冶炼与轧制、供货状态、采购定货、检验验收、力学性能与成分的查对或取样复测、材料在使用过程中的退化与损伤积累等方面的全面了解。事实上设计者选材时, 就应对这些因素有充分的了解并予以足够的考虑。

为此, 首先分析容器制造与使用条件的特殊性。

容器承受压力或其他载荷, 因此容器的材料应具有足够的强度。材料强度过低, 势必使容器过厚, 但强度过高又将影响材料的其他力学性能。

容器制造时多数须用冷卷及热冲压成形工艺, 为此材料应具有良好的塑性, 使冷卷及热冲压时不裂不断。

容器在结构上不可能做到没有任何小圆角或缺口, 也不可能在焊缝中无任何缺陷, 如气孔、夹渣、未焊透、未熔合、甚至还有裂纹, 这些都形成应力集中。这就要求材料具有良好的韧性, 将不致因载荷突然波动、冲击、过载或低温而造成断裂; 此外, 有时还要求在交变载荷作用时材料具有抗疲劳破坏的能力, 使容器有足够的安全使用寿命。

除极少数的铸造及锻造容器外, 容器的制造均需要焊接, 因此材料必须有良好的可焊性。增加含碳量和某些合金元素可提高强度, 但又使可焊性变差。然而, 也不能因此而不发展高强度的低合金钢而始终沿用低强度的低碳钢。

综上所述, 提高强度又要有良好的塑性、韧性和可焊性, 以至低温韧性, 这是对压力容器用钢的基本要求。它主要通过钢材化学成分的设计来解决, 还可借助热处理方法使材料性能变得更为理想。另外, 为解决防腐问题也可采用合金钢或其他防腐措施。下面将对压力容器用钢的基本要求作进一步分析。

(1) 化学成分 除了容许用于制造压力容器的非压力容器用钢(如 Q235-A)以外,凡压力容器用钢(标以 R 或 DR 的),对化学成分的控制都比较严格。这是因为化学成分的变化不仅对钢材的基本力学性能如强度、塑性、韧性等有很大影响,也决定了热处理的效果。

钢材的化学成分大体上可以分为合金元素和杂质元素两大类。

合金元素中,碳含量偏高虽可增加强度,但会导致可焊性变差,焊接时易在热影响区出现裂纹。钼元素能提高钢材的高温强度,但含量超过 0.5% 时会影响可焊性。其他合金元素都是按照力学性能要求配比的,都有一定的控制范围,在有关标准中有明确的规定。

杂质元素一般都有危害作用,但是在冶炼中难以完全去除。磷、砷、锑、锡等元素含量虽微,但必须严格控制,否则会加剧回火脆性,即在回火温度区间长时间工作后,钢材的常温韧性显著下降,导致发生裂纹和引起脆断破坏的可能性。这对于长期工作在 400~500℃ 左右的 Cr-Mo 钢(如热壁加氢反应器等设备常用的 $2\frac{1}{4}$ Cr1Mo 或 3Cr1Mo 钢)尤为重要,这类钢对以上有害的杂质元素有严格要求。另外,硫含量过多会降低断裂韧性,也易出现裂纹。在核装置的研究中已经明确指出铜是造成辐射脆化的主要因素,应在冶炼时严格按制。

由此可见,压力容器用钢在冶炼时就必须将各种成分严格控制在允许范围之内。作为容器用钢,许多元素成分的允许范围要比同钢号的非容器用钢严格。以 16MnR 为例,其磷、硫含量均要求低于 0.035%,而同类的非容器用的结构钢 16Mn 则仅要求分别低于 0.045% 和 0.050%。研究表明进一步严格控制有害元素磷与硫的含量将可大大改善压力容器用钢的韧性与焊接性能。近年来国际上已有许多高要求的压力容器用钢将磷与硫的含量再降低了一个数量级。

(2) 力学性能 材料的力学性能主要是指强度、塑性与韧性。这些性能指标常常被误解为材料的一种属性,类似于物理常数,这是很错误的。材料的力学性能固然取决于化学成分,但还取决于材料热处理后的组织状态,往往有一定的分散性。并且,在非单轴拉伸的复杂受力状态或载荷循环下有特定的表现。对于循环载荷情况,通常将材料性能的特定表现称为材料在一定条件下的“力学行为”。

下面将对压力容器用钢常用的力学性能指标进行分析,其中有些属于一般钢材普遍要求的,而有的则属于压力容器用钢所必须具备的。

① 拉伸强度 强度是衡量材料抵抗外载荷能力大小的力学指标。通常用拉伸试样测得抗拉强度 σ_b 和屈服点 σ_y (或 $\sigma_{0.2}$)。这两个指标可表征材料的强度,也是容器设计计算中用以确定许用应力的主要依据。屈服点 σ_y 与抗拉强度 σ_b 之比称为屈强比,屈强比可反映材料屈服后强化能力的高低。高强钢的屈强比数值较高,可达 0.8 以上,而低强钢的屈强比可低到 0.6 以下。屈强比愈低表示屈服后仍有较大的强度裕量。

要注意 σ_b 和 σ_y 是用光滑试样(通常是圆棒)在单向应力条件下测得的数据,工程设计上可以把双向或三向应力问题用强度理论换算成为相当应力,再与单向拉伸测得的强度指标来比较。

设计在中、高温条件下工作的容器时,应当测定在工作温度下的 σ_b 和 σ_y 。

在一般设计中,这些数据可以从手册中查到,但应注意这些数据仅为规定必须保证的下限值。制造容器时,有时还有必要抽样检查实际使用的材料是否符合要求,而不仅仅查看钢材的质保书即可。如果设计中要作详细的应力分析,单有这些指标的数据有时还不够,而需要完整的应力-应变曲线,而这曲线必须用真实的材料来测试。

②塑性 由于容器制造中采用冷作弯卷成型工艺,要求材料必须具备充分的塑性。通常用以衡量材料塑性的指标是断后伸长率(或称延伸率) δ_5 及断面收缩率 ψ ,它们都可在拉伸试验中同时测得。化工容器应选用 $\delta_5=15\%\sim 20\%$ 以上的材料来制造。更能直接反映钢板冷弯性能的则是冷弯试验,即对某一厚度的钢板采用某一直径的弯芯作常温下的弯曲试验,规定在冷弯 180° 之后不裂,方可用于制造容器。

③韧性 韧性是材料对缺口或裂纹敏感程度的反映。韧性好的材料即使存在宏观缺口或裂纹而造成应力集中时也具有相当好的防止发生脆性断裂和裂纹快速失稳扩展的能力。韧性对压力容器材料是十分重要的,是压力容器用钢的必检项目。塑性好的材料一般韧性也好,但塑性并不等于韧性。

冲击韧性 这是衡量材料韧性的指标之一,可用带缺口的冲击试样在冲击试验中所吸收的冲击功数值作为冲击韧性值。我国以往沿用梅氏U型缺口试样常温下的 $\alpha_K \geq 4\sim 6$ ($\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$)之值是否可作为压力容器用钢的指标。实践证明U型缺口试样并不能很好反映材料在缺口冲击试验中的敏感性,近年来趋向采用国外已使用多年的夏比V型缺口冲击试验的冲击功指标 A_{KV} ,它能更好地反映材料的韧性,而且对温度变化也很敏感。目前我国在容器标准中已明确提出在常温下必须采用夏比(V型缺口)试验来得出冲击功值 A_{KV} 。例如20R、16MnR及15MnVR钢板的 A_{KV} 不得小于31J。15MnVNR和18MnMoNbR钢板不得小于34J。低温用钢更应注意对 A_{KV} 值的要求,例如16MnDR(16锰低容)钢板 -40°C 时的 A_{KV} 不得低于24J,15MnNiDR(15锰镍低容)钢板的 -45°C A_{KV} 值不得低于34J。

脆性转变温度 在不同温度下测定出一系列的冲击韧性值,可以发现材料在某一温度区间随温度降低而韧性值突然明显下降,从而可得出该材料的脆性转变温度,以便确定材料的最低使用温度。实际还有许多测定脆性转变温度的其他方法。

断裂韧性 材料的冲击韧性可指导选材工作,但冲击功不能直接用于设计计算,而且许多压力容器的脆性断裂事故也可以在塑性与冲击值足够的情况下发生。为了能更科学地判断容器万一存在较大宏观缺陷特别是裂纹性缺陷时是否会发生低应力脆断,近年来已引入断裂力学中的断裂韧性指标用于压力容器的防脆断设计或安全评定。目前用得较多的是应力强度因子临界值 K_{IC} 和裂纹尖端张开位移(COD)临界值 δ_c 。这些断裂韧性值可用来衡量材料的韧性情况,即可看出存在裂纹时材料所具有的防脆断能力,但目前尚未列入容器标准之中,因为还未有公认的应满足的断裂韧性指标值。另一方面,若有 K_{IC} 或 δ_c 的可靠数据,便可对缺陷作出定量的安全分析。断裂韧性实验测定时要注意试件的拘束条件,这与冲击韧性测试的要求有所不同。所以,材料的断裂韧性是有条件的,也属于“力学行为”的范畴。

④疲劳特性 材料的疲劳特性明显地是一种“力学行为”。材料的疲劳寿命,即在达到断裂时所能承受的应力循环数主要与外加交变应力的应力幅有关,同时平均应力也有重要影响,并且数据的分散性很大。由光滑圆棒单向拉压所得到的疲劳数据当用于分析压力容器中承受三向应力的部位时,很明显试件与实际结构的受力条件并不一致,因而不得不作一些实用性的假设。

其他如材料在高温蠕变、腐蚀-应力共同作用、疲劳-蠕变交互作用以及腐蚀-疲劳交互作用下的特定力学行为,则情况更为复杂,设计者遇到这些情况时必须收集和研究有关的资料,判断压力容器的使用寿命。由于以上这些情况都属于与时间有关的材料退化和损伤积累问题,也属于材料的力学行为范畴。

(3) 热处理 一般说,钢材总是在一定的热处理状态下使用的。有些钢材直接热轧后可

使用,但热轧后的组织实际上也是一种经过热处理的组织。不少钢种要经过热处理才能充分发挥其优点,例如多数普通低合金钢的钢板要求在正火、正火+回火或调质状态下使用。16MnR及15MnVR在25mm以下时可用热轧板,25~30mm以上时需经正火处理。经正火处理之后细化了晶粒,强度既可保证,更改善了韧性。18MnMoNbR应在正火加回火或在调质状态下使用,因为只有作如此热处理才可改善这种材料的韧性与塑性,但可能使强度有所下降,不过从总体看如此热处理状态下的综合力学行为大为改善。另外,高负荷工作的低合金钢螺栓,一般都经调质处理。有些重要的部件为了提高高温强度而要求具有贝氏体组织,这就需要更加严格的热处理。尤其对于厚截面的钢板或锻造件,要使整个截面上的性能尽可能达到均匀是很不容易的,此时热处理的程序必须精心设计并严格执行。

综上所述,对压力容器用钢要求较严,作为钢厂出厂的必检项目是:化学成分、抗拉强度 σ_b 、屈服点 σ_s 、断后伸长率 δ_5 、180°冷弯、冲击功 A_{KV} 。制造厂接受钢材来货时必须检查钢厂的质保书,对制造重要容器的钢材甚至还要进行抽样复验,以至逐张进行超声波100%面积检测以确定其轧制质量。

作为设计者选用钢材时应该注意,不应片面追求采用高强度材料,要做到强度与塑性、韧性的综合考虑及强度与可焊性的综合考虑。还应注意厚度与性能的关系,厚度愈厚,各项指标值均有所下降。至于介质的腐蚀性也切不可忽视,需要通过资料查阅、走访调查、以至试验研究才能做到选材合理。

三、制造与制造过程中的检验

制造可使压力容器由图纸转化为实物,因此可以说是质量保证中最重要的环节。制造厂要严格验收材料,要保证成形加工严格按照有关的技术条件进行,尤其要把好焊接这一关。下面以焊接为重点说明有关的问题。

(1) 焊接方法 焊接方法通常由用户、设计师与制造厂协商确定。实际上设计时,在结构设计中必须考虑焊接方法,否则定不出焊接接头处的细节。焊接方法包括焊接接头的结构设计,焊接材料即焊条或焊丝焊剂的选用,焊机的选用等等。焊接方法中通常要考虑的关键问题是焊透性、材料的焊接特性以及焊接过程的经济性。焊接方法确定以后,焊接的工艺流程(如是否预热、预热的温度、电流、速度等)则由制造厂根据经验或试验确定。对于重要容器或焊接经验不多的材料,则必须由焊接工艺试验来确定最合适的焊接工艺流程。

(2) 焊后热处理 是否需要焊后热处理,一般是根据板厚和焊接部位的约束程度来确定的。焊后热处理的作用有二方面,一是消除或部分消除焊接残余应力,这一般采用整体退火或焊接区局部退火;二是消除焊接区的脆化(恢复延性)。实际上第二方面的作用比第一方面的作用更重要,尤其对一些强度较高可焊性较差的低合金钢,对此可以进行焊后再结晶退火,既细化晶粒提高了强度,同时也提高了韧性和较完全地消除了残余应力。热处理的温度选择要恰当,偏低时会微量元素在晶界结聚而降低韧性甚至出现再热裂纹,偏高时会促使晶粒粗大也会降低韧性。

(3) 焊接区的力学性能 应当力求使焊肉、热影响区和母材的力学性能相等。一般除做焊接工艺评定时需要试板测试之外还要求在筒体纵焊缝的末端附装试板,与主焊缝同时焊完取下,供以后作检验之用。对环焊缝以及其他难以附装试板的部位,亦要求按同样的焊接工艺在工作的同时制作试板。用留下的试板制作各种力学性能测试的试件以测定各项力学性能指标。对于重要的容器甚至还需要保留一部分试板,以备若干年后需要时再作金相、化学成分及力学性能检验。