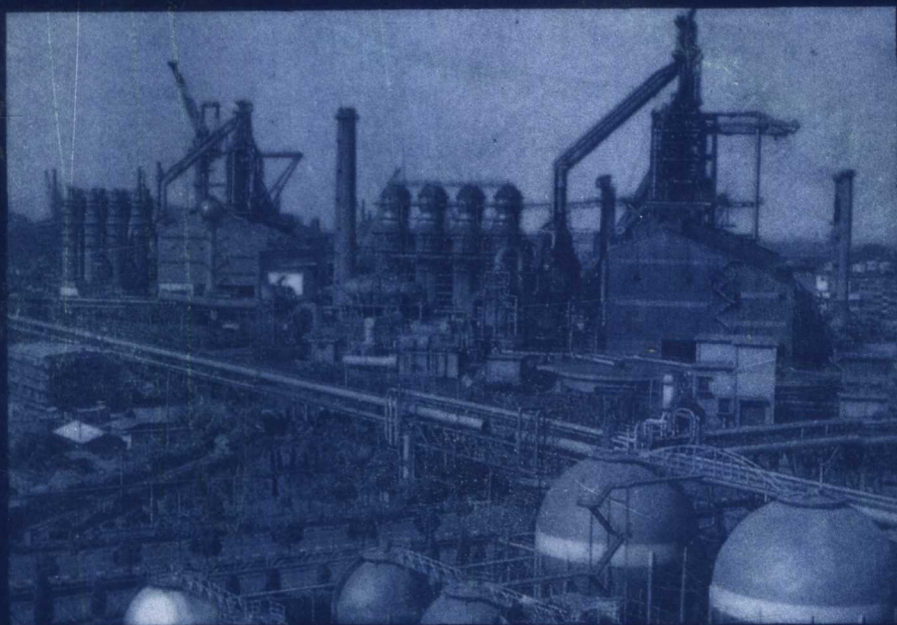


浙江大学出版社



化工容器及设备设计

丁富果 主编
吴泽炜 审定

化工容器及设备设计

丁窘果 主编

吴泽炜 审定

责任编辑 王 宇

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州玉古路 20 号 邮政编号 310027)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

德清第二印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787×1092 16 开 27 印张 684.8 千字

1996 年 7 月第 1 版 1996 年 7 月第 1 次印刷

印数:0001—1500

ISBN 7-308-01695-1/TQ·016 定价:30.00 元

前 言

本书是根据全国高校化工设备与机械专业教学指导委员会审定的“化工容器设计”及“化工设备设计”课程教学基本要求(试行)编写的。考虑到化工设备本身也是压力容器,以及专业课程门数和学时的限制,所以将化工容器和化工设备两部分合于此书,并定名为《化工容器及设备设计》。

本书内容有总论、第一篇《化工容器设计》和第二篇《化工设备设计》。总论主要讲述化工容器及设备的分类、用材、焊接结构及标准规范等内容。化工容器设计部分,重点讲述化工容器的常规设计,并适当介绍了压力容器最近设计技术进展,如分析设计、疲劳设计、防脆断设计、高温容器设计、优化设计、可靠性设计及计算机辅助设计等,以拓宽学生的知识面,教学中可视具体情况酌情处理。化工设备部分,重点介绍了塔设备、管壳式换热器及搅拌设备三种典型的化工设备设计的基本原则和方法。全书均采用GB150-95《钢制压力容器》及GB151-89《钢制管壳式换热器》所规定的设计计算方法,并简单介绍了JB4732-95《钢制压力容器——分析设计标准》。

本书编写的着眼点在于使学生掌握化工容器及化工设备的工程设计方法,并以此来阐述有关容器及设备的应力分析理论。为便于学生掌握和自学,各章均有算例。

本书适用于化工设备与机械专业本科教学。删除部分章节的部分内容,也可应用于该专业专科教学。

本书的总论、第一章、第三章、第六章、第七章由丁寔果编写,第二章、第五章由郑津洋编写,第四章由李一华编写,第八章由沈祖凤编写,全书由丁寔果主编。

华东理工大学吴泽炜教授仔细审阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见,在本书编写过程中得到浙江大学薛继良教授、朱国辉教授的支持和关心,作者在此谨表深切谢意。

由于我们水平有限,欠妥、错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1994年12月24日

目 录

总论	1
第一节 绪言	1
一、导言	1
二、分类	1
第二节 化工容器及设备设计的基本要求	2
一、基本要求	2
二、具体要求	3
第三节 化工容器及设备常用材料及焊接结构	3
一、容器设备用钢的基本要求	4
二、容器设备用钢的主要类型	4
三、容器设备的焊接结构	6
第四节 化工容器及设备规范标准和安全监察机构简介	11
一、压力容器及设备标准规范简介	11
二、压力容器及设备安全监察机构简介	15

第一篇 化工容器设计



第一章 中低压容器设计	19
第一节 薄壁回转壳体的应力分析	19
一、概述	19
二、无力矩理论的两个基本方程	19
三、无力矩理论的具体应用	23
四、内压引起的径向变形	27
五、内压引起的壳体弯曲应力	28
六、有力矩理论与边缘问题	29
七、有力矩理论的具体应用	35
第二节 圆形薄板的应力分析	38
一、概述	38
二、圆板轴对称弯曲微分方程	39
三、受均布载荷的圆板	41
四、受轴对称载荷的环板	45
第三节 内压薄壁容器的常规设计	49
一、薄壁圆筒和球壳的设计	50
二、设计参数的确定	51

三、封头设计	54
四、压力试验	66
第二章 高压容器设计	68
第一节 概述	68
一、高压容器的应用	68
二、高压容器的基本特点	68
三、高压容器的材料	69
第二节 高压筒体结构与强度设计	70
一、高压筒体结构形式	70
二、单层厚壁圆筒应力分析	74
三、单层厚壁圆筒爆破压力	82
四、组合厚壁圆筒受力特点	83
五、高压筒体的失效准则与工程设计	84
第三节 高压密封的结构和设计	89
一、高压密封的特点和分类	89
二、高压密封的结构形式	91
三、提高密封性能的技术措施	97
四、平垫与双锥密封的设计计算	99
第四节 高压容器的主要零部件设计	105
一、高压封头	105
二、高压筒体端部	106
三、高压容器的开孔补强	110
第五节 高压容器衬里设计	114
一、高压容器的衬里方法	115
二、高压容器的衬里结构形式	115
三、高压容器的检漏系统	117
第三章 化工容器及设备零部件设计	119
第一节 法兰设计	119
一、垫片设计	119
二、螺栓设计	125
三、法兰设计	127
第二节 开孔与补强设计	140
一、开孔应力集中	140
二、开孔补强设计	145
三、等面积补强计算	148
第三节 支座设计	150
一、直立设备支座	151
二、卧式设备支座	152
三、球形贮罐支座	164
第四章 外压薄壁容器设计	166
第一节 概述	166

第二节 外压圆筒的稳定性计算	167
一、受均布横向外压时长圆筒的临界压力	167
二、受均布横向外压时短圆筒的临界压力	171
三、圆筒的临界长度	173
四、受横向及轴向均布外压时圆筒的临界压力	173
五、受轴向压缩载荷时圆筒的稳定性计算	174
第三节 外压圆筒的设计计算	174
一、解析法	174
二、图算法	177
第四节 外压封头设计	183
一、外压球形容器及封头设计	183
二、外压凸形封头	184
三、外压锥形封头	184
第五节 加强圈的设计计算	185
一、加强圈的作用及结构	185
二、加强圈的计算	186
第五章 近代压力容器设计技术进展	192
第一节 概述	192
一、压力容器的失效方式和设计准则	192
二、压力容器设计规范的主要进展	193
三、计算机在压力容器设计中的应用	195
第二节 压力容器的分析设计	196
一、分析设计概述	196
二、应力分类	198
三、各类应力强度的限制	202
四、分析设计的应用	207
第三节 压力容器的疲劳设计	208
一、疲劳机理简述	208
二、压力容器的低循环疲劳	209
三、低循环设计疲劳曲线	211
四、影响低循环疲劳寿命的主要因素	212
五、疲劳设计规范	216
六、疲劳设计的其它问题	219
第四节 压力容器的防脆断设计和缺陷评估	220
一、压力容器的低应力脆断	220
二、断裂力学的基本理论简介	220
三、压力容器防脆断方法	224
四、压力容器缺陷的疲劳寿命计算	226
五、在用压力容器缺陷的评估	227
六、缺陷评定规范的发展	231
第五节 高温压力容器设计	232

一、金属高温蠕变	232
二、高温压力容器设计	233
三、高温压力容器的剩余寿命	235
第六节 压力容器的优化设计	237
一、优化问题的数学模型建立	237
二、最优化方法	238
三、优化设计实例	241
第七节 压力容器的可靠性设计	243
一、可靠性工程学简述	243
二、可靠性设计	248
三、压力容器可靠性工程进展	250
第八节 压力容器的计算机辅助设计	250
一、计算机辅助设计概述	250
二、压力容器 CAD 软件	253
三、智能 CAD	259

第二篇 化工设备设计

第六章 塔设备设计	263
第一节 概述	263
第二节 板式塔结构设计	263
一、塔盘结构	265
二、裙座结构	270
三、附件结构	273
第三节 填料塔结构设计	273
一、填料及填料支承装置	275
二、喷淋装置	276
三、液体再分布装置	278
第四节 塔设备的强度设计	280
一、塔体和裙座的受力分析	280
二、塔设备的振动简介	281
三、塔体和裙座的载荷计算	285
四、塔体的强度设计	289
五、裙座的强度设计	291
第七章 管壳式换热器设计	302
第一节 概述	302
第二节 管壳式换热器的主要类型和结构设计	303
一、管壳式换热器的主要类型	303
二、管壳式换热器的结构设计	304

第三节 “U”型膨胀节的计算	317
一、是否要设置膨胀节的判定	317
二、“U”形膨胀节的计算	319
第四节 管板的强度计算	324
一、概述	324
二、国标 GB151《钢制管壳式换热器》管板计算方法	325
第五节 管束振动及其他类型换热器简介	352
一、管束振动简介	352
二、其他类型换热器简介	353
第八章 搅拌设备设计	358
第一节 概述	358
一、搅拌设备的工业应用	358
二、搅拌设备的典型结构	359
三、搅拌设备的设计步骤	359
第二节 搅拌设备的容器部分设计	359
一、筒体尺寸的确定	360
二、传热部件的结构及传热计算	361
三、接管的结构	369
第三节 搅拌装置设计	370
一、搅拌器与流动状态	371
二、典型搅拌器及其选用	373
三、搅拌器的功率	379
第四节 传动装置及搅拌轴	391
一、传动装置	391
二、搅拌轴	396
第五节 轴封装置	402
一、填料密封	402
二、机械密封	406
第六节 搅拌设备的技术要求	410
一、搅拌设备装配图	410
二、搅拌轴	412
三、搅拌器	412
四、填料箱	414
五、联轴节	414
六、机械密封装配图等	414
附录	415
一、钢管及锻件许用应力	415
二、钢材弹性模量及平均线膨胀系数	419
主要参考文献	420

总 论

第一节 绪 言

一、导言

化工容器设计及化工设备设计均为化工设备与机械专业的主干专业课程。其任务是综合运用基础课与技术基础课中的基本理论,培养学生具有进行化工容器及化工设备工程设计的初步能力。本书即是根据上述任务和课程教学基本要求而编写的。

众所周知,化学工业的发展除和化工工艺的创新紧密联系外,在很大程度上取决于化工机械的进展。例如,由于超高压容器的研制和开发,使高压聚乙烯、人造金钢石等制造工艺成为现实;在合成氨工业中,由于高压透平压缩机的应用,使数十台大型活塞式压缩机缩并为体积很小的一台机组。

压力容器和化工设备正在向大型化、高参数、严工况的方向发展,其关键环节之一就是现代设计方法的应用。由于化工容器和设备设计作为一种具有潜在爆炸危险的受控设备设计,它与其他机械产品设计不同,必须严格遵循有关标准、规范和技术监察规程等法规,以确保其安全可靠。因此,它的发展和提高又紧密地依附标准化技术的进展。为此,本课程除介绍化工容器和化工设备的一般或称常规设计方法外,还对分析设计、优化设计及计算机辅助设计等作了简介;同时将最新的国家标准和规程作了介绍。设计是一种富有创造性的劳动。学习本课程重在掌握基本原理和设计思路,包括标准选用等。设计过程中的创造性部分就是对设计任务满足目标要求的前提下提出可行的设计方案,以便进行分析、评价和选择,从而得到所谓“最佳”设计。不难看出,一个好的工程设计,要求设计者既要通晓有关法规,又要具有丰富的设计、制造、使用和维护的工程实践经验。

二、分类

化工机械可分为机器及设备两大部分,本课程讨论的是化工机械中的容器及设备部分。它广泛应用于化工生产中的传热、传质、化学反应、物料贮存等各个方面,约占工厂装备的百分之八十左右。常见的形式有换热器、塔器、反应器、贮槽等,虽然这些设备的服务对象、操作条件和结构形式均不相同,但从设备角度分析,其外壳都属于容器范畴。所以,换热器也可称换热压力容器;塔器称分离压力容器;反应器称反应压力容器;贮槽称贮存压力容器。这就是化工容器与化工设备的区别与联系。因此,对换热器、塔器及反应器这些典型化工设备,除容器壳体外还有内件的设计问题。

化工容器还可按以下方法分类:

(一) 按压力容器的设计压力 p 分为低压、中压、高压、超高压四个压力等级,具体划分如

下:

1. 低压(代号 L) 容器 $0.1\text{MPa} \leq p < 1.6\text{MPa}$
2. 中压(代号 M) 容器 $1.6\text{MPa} \leq p < 10\text{MPa}$
3. 高压(代号 H) 容器 $10\text{MPa} \leq p < 100\text{MPa}$
4. 超高压(代号 U) 容器 $p \geq 100\text{MPa}$

(二) 按容器压力、介质危害程度以及在生产过程中的重要性,将容器划分为三类:

1. 低压容器(以下第 2 条的第(3)款规定的除外)为一类容器。
2. 下列情况之一为二类容器:
 - (1) 中压容器(以下第 3 条所列的除外);
 - (2) 易燃介质或毒性程度为中度危害介质的低压反应容器和贮存容器;
 - (3) 毒性程度为极度和高度危害介质的低压容器;
 - (4) 低压管壳式余热锅炉;
 - (5) 搪玻璃压力容器。
3. 下列情况之一为三类容器:
 - (1) 毒性程度为极度和高度危害介质的中压容器和 $p \cdot V$ 大于等于 $0.2\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的低压容器;
 - (2) 易燃或毒性程度为中度危害介质且 $p \cdot V$ 大于等于 $0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压反应容器和 $p \cdot V$ 大于等于 $10\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压贮存容器;
 - (3) 高压、中压管壳式余热锅炉;
 - (4) 高压容器。

以上分类是为了有利于安全技术监督和管理,例如一台装有剧毒介质的中压容器,其危险程度和管理的要求并不比高压容器为低。

第二节 化工容器及设备设计的基本要求

化工容器及设备的设计就是根据给定的工艺尺寸和生产工况(温度、压力、物态等),正确选材,全面进行应力分析,选择合理结构形式,确定合适的强度尺寸。

一、基本要求

化工容器及设备设计的基本要求是安全性和经济性的统一。安全是前提,经济是目标。

化工容器及设备通常都是在苛刻的操作条件下长期连续工作的,如果发生事故,则事故的破坏性往往很严重。因此,保证压力容器及化工设备的长期安全运行对化工生产有着非常重要的意义。

压力容器及化工设备如果发生爆炸事故,不但使整个设备遭到毁坏,而且常常要破坏周围设备及建筑物,并造成人身伤亡。因容器或设备内的介质都是有压力的气体或饱和液体,容器爆破时,内部介质即卸压膨胀,瞬时释放出较大能量,它除可将整个容器或其碎块以很高的速度飞散外,还会产生冲击波在大气中传播,从而造成更大的破坏。

容器及设备安全性的好坏可用失效率来衡量。发生爆炸事故称灾难性失效,设备存在严重缺陷称潜在性失效。

我国现有固定式压力容器 100 多万台,各类压力气瓶近 3000 万只,其安全状况的总体水

平不断得到提高。但由于在设计、制造、材料、探伤及管理水平等方面与发达国家相比还有一定差距,所以失效率也较高。以 70 年代中期至 80 年代中期近 10 年的统计,我国万台锅炉压力容器年均爆炸事故率是世界发达国家的 10 倍左右,重大事故是世界发达国家的 100 倍左右。

同其他一般设备相比,压力容器的失效率虽然较高,但并不是说压力容器发生事故是不可避免的。压力容器的安全运行也有它的客观规律,有些容器之所以发生事故,就是由于不认识或不重视因而违反它的客观规律造成的。

为了保证压力容器的安全运行,研究可能造成各种形式失效的不安全因素,以及防止产生这些不安全因素的具体措施和检验方法,世界许多国家都先后成立了各种研究机构,从事压力容器的科学研究工作并制定有关技术法规。如美国机械工程师协会(American Society of Mechanical Engineers,简称 ASME)制定的《锅炉压力容器规范》等。我国制定了国家标准 GB150-95《钢制压力容器》,同时,劳动部又颁发了《压力容器安全技术监察规程》,对压力容器的设计、制造和检验,提出了严格的要求。

二、具体要求

为保证容器设备的安全,具体应满足以下四方面的要求:

(1) **强度** 化工容器及设备的所有零部件都要有足够的强度,否则就不能保证设备的正常运转和人身的安。但把安全系数提得太高则会造成材料的浪费,为了节约材料,最好将设备零部件做成等强度。

(2) **刚度** 刚度是构件在外力作用下保持原来形状的能力。受外压的容器或设备,若刚度不够,将会失稳而失效,而强度往往是足够的。

(3) **密封性** 密封性是化工容器及设备的一个非常重要的性能,因为它们所盛装的很多是易燃、易爆、有毒及强腐蚀介质,若设备密封性差而导致介质泄漏,不但对生产造成损失,而且对环境造成污染,危害工人健康,甚至引起爆炸。因此,无论是高压设备,还是中低压设备或真空设备,都应具备好的密封性能。

(4) **耐久性** 一般机械的耐久性,主要决定于金属磨损,而化工设备的耐久性主要取决于介质的腐蚀或设备的疲劳、断裂及蠕变等,其长短根据所要求的使用年限而定。化工设备的使用年限一般定为 10 ~ 12 年,而高压设备使用年限则定为 20 ~ 25 年,因为高压设备的外壳成本高,通常只更换内件,现在有些氨合成塔的筒体实际使用年限甚至已超过 30 年。

所谓经济性,包括容器设备制造过程直至安装维修要尽量做到经济,设备运行后要有高的技术经济指标。前者包括设备在结构上应有良好的工艺性以便于制造,且应尽量采用标准设计和标准零部件,以降低低成本;设备结构、尺寸和外形还应考虑到操作、安装、维修和运输等方面,以利节约支出。后者包括四项技术经济指标,要求有高的单位生产能力(单位时间内设备每单位体积或单位面积、单位质量所能完成的生产任务)、低的消耗系数(生产每单位体积或单位质量所消耗的原材料)、低的管理费用和低的产品成本。

第三节 化工容器及设备常用材料及焊接结构

用于制造化工容器及设备的材料种类很多,总的可分为金属材料和非金属材料两大类。金属材料又可分为黑色金属和有色金属,非金属材料又可分为无机非金属材料 and 有机非金属材料。

在石油、化学工业中,金属材料得到广泛应用,大多数容器设备由钢材制成。钢材与其他材料相比,它的强度高、韧性好、耐冲击、可焊性与切削加工等性能也较好,而且采用不同的热处理方法还可获得我们所需要的各种性能。

应当指出,目前非金属材料在化工容器及设备制造中得到日益广泛的应用。非金属材料具有优良的耐腐蚀性能,甚至某些特性不是金属所能代替的。非金属材料的应用,不仅可节约黑色金属,且可部分代替不锈钢及有色金属,意义十分重大。限于篇幅,对非金属材料不作具体介绍。除极少数铸造及锻造容器外,容器设备的制造均需要焊接,因此本节将焊接结构与材料一起介绍。

一、容器设备用钢的基本要求

1. 机械强度

机械强度是材料抵抗外力作用避免引起破坏的能力,因此容器用材必须具备足够的强度。通常用抗拉强度 σ_b 和屈服强度 σ_s (或 $\sigma_{0.2}$)表示,高温时还要考虑持久强度 σ'_b 及蠕变极限 σ'_c 。屈服强度与抗拉强度之比称屈服比,屈服比愈低表示材料屈服后仍有较大的强度裕量。

2. 塑性

由于容器制造时采用冷卷或热冲压成型工艺,所以要求钢材必须具备充分的塑性。衡量钢材塑性的指标有延伸率 δ 及断面收缩率 ψ 等,化工容器用钢要求 δ_5 达15~20%以上。

3. 冷弯性能

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,必须在冷弯180°之后不裂才可用于化工容器的制造。它是材料抵抗弯曲时断裂能力的标志,间接反映了材料的塑性。

4. 韧性

韧性是材料在塑性变形中吸收能量的能力,是衡量材料的塑性和强度两者的综合指标,它反映了材料对缺口或裂纹的敏感程度。塑性好的材料一般韧性也好,但两者并不等同。

(1) **冲击韧性** 它是衡量材料韧性的指标之一。当温度低于0℃时,必须采用夏比(V型缺口)低温冲击试验的冲击功指标 A_{KV} 。例如,20R钢板的 A_{KV} 值应不小于18J,16MnR和15MnVR的 A_{KV} 值应不小于20J。

(2) **断裂韧性** 它是衡量材料韧性的另一指标,反映材料对裂纹扩展的抵抗能力。许多压力容器的脆断事故是在其材料的塑性和冲击功足够的情况下发生的,原因就在于材料断裂韧性不足。对于中低强度的压力容器用钢和低温用钢,目前较普遍采用临界裂纹张开位移(COD)值 δ_c 来评定。若构件的 δ 值超过 δ_c ,则认为裂纹将会扩展。

以上所述实际上均是有关对材料机械性能方面的要求。除此以外,选材时还需考虑材料的耐腐蚀性、物理性能、制造工艺性以及热处理性能等。选材时还应注意,既不要材料强度过低使容器壁厚太大,又不要片面追求采用高强度材料,要做到强度与塑性、韧性及强度与可焊性的综合考虑。

二、容器设备用钢的主要类型

我国压力容器及化工设备用钢主要有三大类,即碳素钢、低合金钢和不锈钢(高合金钢)。

1. 碳素钢

碳素钢简称碳钢,有普通碳钢与优质碳钢之分。后者较前者含硫、磷量较少,且强度较高。普通碳钢按供货时保证的指标不同,又可分为甲类、乙类和特类三种。甲类钢在供应时只保证

机械性能,乙类钢只保证化学成分,而特类钢则既保证机械性能又保证化学成分。

碳钢虽然强度较低,但可焊性和延展性很好,因此在化工容器及设备制造中得到广泛应用。我国在压力容器受压元件可供选用的碳素结构钢板中已形成了 Q235-A·F(A3F、AY3F)—Q235-A(A3、AY3)—Q235-B—Q235-C—20R 一个质量档次完整的用材体系。牌号中 Q 代表屈服强度,235 为屈服强度值,A、B、C 分别为质量等级,F 代表沸腾钢,20R 为 20 号优质碳钢基础上发展所得的容器用钢。其中 Q235-C 钢板的适用范围将覆盖大量中低压容器的使用条件,并可在很大范围内代替 20R 钢板。GB150-89 中的 20HP 钢板(20 号焊接气瓶用钢板),系由于有些小直径的压力容器,其设计压力大于 1.0MPa,而壳体厚度又小于 6mm,原 A3、AY3 及 20R 钢板均无法选用而列入,现由于 Q235-B 及 Q235-C 钢板已列入,故在 GB150-95 中取消了 20HP 钢板。

2. 低合金钢

低合金钢通常是指钢中合金元素总含量在 5% 以下的钢种。它与碳钢相比,由于少量合金元素(如 Si、Mn、Mo、V、Nb、Re 等)的加入,大大提高了钢材的机械强度,而且钢材的耐热性、耐腐蚀性、耐磨性、低温韧性和高温强度也明显提高。因此,低合金钢在化工容器和设备中得到广泛应用,尤其是高压容器及设备几乎全部采用低合金钢制造。但是,随着低合金钢强度的提高,它的塑性和可焊性都有所下降,缺口敏感性有所提高,焊接时容易产生冷裂纹,应特别加以注意。

我国研制与应用低合金钢已有 30 多年的历史,在品种、质量和数量方面均取得长足的进步,为实现压力容器产品国产化创造了条件。其中以增加强度为主要目的的钢种有 16MnR、15MnVR、18MnMoNbR 及 13MnNiMoNbR 等。16MnR 是我国压力容器低合金钢中使用量最大的一个钢种,年产量近 30 万吨,13MnNiMoNbR 钢板是目前我国单层卷焊厚壁容器一个较理想的钢号。以中温(上限可达 500 ~ 600℃)应用为主要目的的抗氢钢板,目前我国还未制定标准,钢号为 15CrMoR(1.0Cr-0.5Mo)、12Cr2Mo1R($2\frac{1}{4}$ Cr1Mo)。长期以来,1.0Cr-0.5Mo 钢板依靠进口的状况已经得到改变。以低温应用为目的的钢种是低合金钢的又一系列。

化工压力容器的破坏通常都是由于内压产生的机械应力达到容器材料的强度极限而发生的。但是,当温度降低到某一范围后,容器壁内的应力在没有达到屈服应力甚至低于许用应力的情况下就会发生破坏,称为低应力脆性破坏。容器产生低应力脆性破坏的重要原因之一是钢材在低温下的冲击韧性明显下降。在不同温度下测出一系列冲击韧性值,可以发现每一种材料都有一个无塑性转变温度(NDT),高于这个温度时断裂是塑性的,而低于这个温度时断裂则完全是脆性的。由材料的无塑性转变温度可确定材料的最低使用温度和容器水压试验时的水温。我国规定当钢材的使用温度低于或等于 -20℃ 时为低温用钢,并按“低温压力容器”的规定进行夏比(V 型缺口)低温冲击试验。但奥氏体高合金钢使用温度高于或等于 -196℃ 时,可免作冲击试验。常用的低温用钢按温度范围不同使用不同的钢号,当温度不低于 -40℃ 时推荐使用 16MnDR;不低于 -70℃ 可用 09Mn2VDR;不低于 -90℃ 可用 06MnNbDR;当温度更低时,则应使用高铬镍奥氏体不锈钢,如 -196℃ 时可用 0Cr19Ni9 等。此外,我国还研制成功适用于大型化、高参数球形容器用钢 07MnCrMoVR(CF-62)钢板,并用于制造公称容积达 1500m³ 的乙烯低温球罐。该钢通过采用低碳多元微合金以严格控制碳当量($C_{eq} \leq 0.42\%$)和焊接裂纹敏

感性组成($P_{\text{m}} \leq 0.20\%$)的途径^①,并通过合理的调质热处理,从根本上保证了焊接性能和低温韧性;同时还研制出适用于制造 $-60 \sim -70^\circ\text{C}$ 低温压力容器的09MnNiDR(0.5Ni)钢板,可在乙烯、大化肥和煤化工等重大技术装备中部分代替3.5Ni低温钢,具有较高的经济效益。

3. 不锈钢(高合金钢)

钢中合金元素总量超过10%,并具有抵抗大气腐蚀能力的钢称为不锈钢。我们所讨论的是合金元素含量较高并在酸和其他强腐蚀性介质中能抵抗腐蚀的不锈钢,又称耐酸钢。

不锈钢按化学成分可分为铬钢及铬镍钢两大类,如1Cr13及1Cr18Ni9(18-8型)等。化学工业中使用最多的18-8型铬镍不锈钢,经高温淬火处理后得到稳定的奥氏体组织,故为奥氏体不锈钢。这类钢不仅对很多介质有优良的耐蚀性能,而且焊接性能和冷热加工性能也很好;在高温($< 870^\circ\text{C}$)下有良好的抗氧化性和耐热强度。铬钢和铬镍钢的耐蚀性能是因为铬和镍加入铁中形成固溶体,当铬镍含量超过一定值时,在氧化性介质中使钢的表面形成保护膜,从而防止腐蚀。但是,不锈钢也不是万能的。它在一些还原性介质,例如盐酸、氯化物溶液及稀硫酸中均不耐蚀。

此外,不锈钢复合钢板的生产在我国已有很大进展。它是由复层(不锈钢)和基层(碳钢或低合金钢)组成。一般复层厚度仅为基层厚度的 $1/3 \sim 1/10$,这样就可大量节约不锈钢,从而使设备的制造成本相应降低。而且,不锈钢复合钢板还具有优良的综合性能。复层有优良的耐蚀性,基层又具有较高的强度,且它的导热系数为单体不锈钢的 $1.5 \sim 2$ 倍。因此,它特别适用于制造既要耐蚀又要传热效率高的设备。我国对压力容器用爆炸不锈钢复合钢板规定,复合钢板结合面的结合剪切强度应不小于200MPa;复材为0Cr13、0Cr18Ni9、0Cr18Ni10Ti、00Cr19Ni10、0Cr17Ni12Mo2、00Cr17Ni14Mo2及00Cr18Ni5Mo3Si2等;基材为Q235-A、20R、16MnR等。

常用钢材的机械性能和适用工况见表总-1。

三、容器设备的焊接结构

容器设备的结构形式是多种多样的,但其基本构成是由壳体、封头、法兰、接管、支座和密封元件等部分组成,这些部件的组合是一种典型的焊接结构。

对焊接结构总的设计要求是结构整体在使用过程中不应产生破坏,包括弹性、塑性失效及断裂,并达到所要求的使用性能。焊接接头是焊接结构的关键部分,其性能好坏直接影响到整个结构的质量。焊接接头即焊缝应包括焊肉及其基本金属靠近焊肉而组织和性能发生变化的区域,它包括焊肉、熔合线及热影响区。焊缝的接头形式及其坡口形式直接影响到焊接质量的高低,故应在容器设备的总图或部件图中用节点图表示。

(一) 容器设备焊缝的分类

为了有利于对焊缝质量的管理,根据容器设备不同部件及不同部位间的连接焊缝,按其受力情况和所处位置的不同,将它分为A、B、C、D四类,见图总-1。

容器设备壳体上的纵向焊缝(多层包扎压力容器层板层纵向焊缝除外)、各种凸形封头的

① 注: $C_{\text{eq}} = C + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{V}}{14} (\%)$

$P_{\text{cm}} = C + \frac{\text{Si}}{30} + \frac{\text{Mn}}{20} + \frac{\text{Cu}}{20} + \frac{\text{Cr}}{20} + \frac{\text{Ni}}{60} + \frac{\text{Mo}}{15} + \frac{\text{V}}{10} + 5\text{B} (\%)$

表总-1 常用钢材的机械性能和适用工况

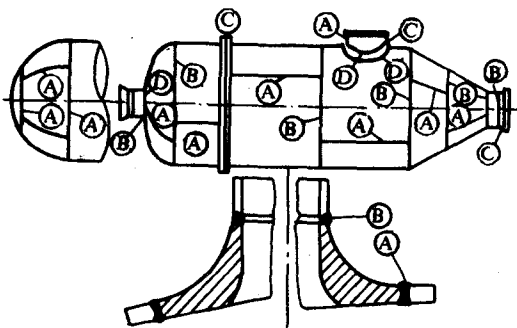
类 别	钢 号	使用状态	板厚 mm	常温强度指标 MPa		适用设计温度 $t^{\circ}\text{C}$	适用设计压力 $p\text{ MPa}$	说 明
				σ_s	σ_b			
普通碳素 钢板	Q235-A·F	热 轧	3~4, 4.5~16	375	235	0~250	≤ 0.6	不得用于易燃、毒性为中、高、极度危害介质的压力容器。
	Q235-A	热 轧	3~4, 4.5~16	375	235	0~350	≤ 1.0	不得用于盛装液化石油气、毒性为高度或极度危害介质的压力容器。
	Q235-B	热 轧	3~4, 4.5~16	375	235	0~350	≤ 1.6	不得用于毒性为高度或极度危害介质的压力容器。
	Q235-C	热 轧	3~4, 4.5~16	375	235	0~350	≤ 2.5	
优质碳素 钢板	20HP	热 轧	3~5.5	390	245	-20~400	不限	
	20R	热轧或正火	6~16 17~25	400 400	245 235	-20~475	不限	
低合金 钢板	16MnR	热轧或正火	6~16 17~25	510 490	345 325	-20~475	不限	$t < 0^{\circ}\text{C}$ 时需进行夏比(V型缺口)低温冲击试验
	15MnVR	热轧或正火	6~16 17~25	530 510	390 375	-20~400	不限	
	18MnMnNbR	正火加回火	30~60 >60~100	590 570	440 410	-20~475	不限	
	16MnDR	正 火	6~20 21~38	490 470	315 295	-40~100	不限	
低合金低 温用钢板	09Mn2VDR	正 火	6~20 21~32	460 440	325 305	-70~100	不限	
	06MnNbDR	正火或调质	6~16	390	295	-90~100	不限	
	07MnCrMoVR	调 质	16~50	610	≥ 490	-40~100	不限	
	15CrMoR (CF-62)	正火加回火	6~60 >60~100	450	295 275	-20~550	不限	
低合金中 温钢板	12Cr1Mo1R	正火加回火	6~150	515	310	-20~575	不限	
马氏体不 锈钢钢板	0Cr13	退 火	2~60		206	-20~400	不限	
奥氏体不 锈钢钢板	0Cr19Ni9	固 溶	2~60		206	-195~700	不限	含碳量 $\leq 0.08\%$
	0Cr17Ni12Mo2	固 溶	2~60		206	-195~700	不限	
	0Cr19Ni13Mo3	固 溶	2~60		206	-195~700	不限	
	00Cr19Ni11	固 溶	2~60		177	-195~425	不限	含碳量 $\leq 0.04\%$
铁素体不 锈钢钢板	00Cr17Ni14Mo2	固 溶	2~60		177	-195~450	不限	

所有拼接焊缝及嵌入式接管与圆筒或封头的对接焊缝均为 A 类焊缝。

容器设备壳体上的环向焊缝(球形封头与圆筒连接的环向焊缝除外,为 A 类焊缝)及锥形封头小端与接管的连接焊缝均为 B 类焊缝。

法兰、平封头及管板等厚截面部件与壳体、接管连接的焊缝,以及多层包扎压力容器层板层纵向焊缝均属 C 类焊缝。

接管、人孔、凸缘及补强圈等与壳体或封头连接的焊缝属 D 类焊缝。



图总-1 焊缝分类

A 类及 B 类焊缝均应为对接焊缝,而 C 类及 D 类焊缝一般为填角焊缝。

A 类焊缝在容器设备中所受工作应力最大,因此要求采用双面焊或保证全焊透的单面焊缝。B 类焊缝的工作应力为 A 类焊缝的一半,除可采用双面焊外,也可采用带衬垫的单面焊缝。C 类焊缝受力较小,但对高压或盛剧毒介质的容器和低温容器,应采用全焊透填角焊缝。D 类焊缝是接管、人孔等与壳体或封头的连接焊缝,受力条件较差,且存在较高的应力集中,故也应采用全焊透结构。

(二) 容器设备常用焊接接头及坡口形式

1. 焊接接头

从焊缝的分类中可以看出,从焊缝的整体强度和安全考虑,容器设备中对接焊缝和角焊缝用得较多,其中尤以对接焊缝应用最多。对接焊缝受力好、强度高、易焊透、易作无损探伤,且可避免焊接时产生过热现象和残余应力,可得到最好的焊接质量。所以,为了保证化工压力容器和设备的安全运行,容器设备壳体上的所有纵向焊缝和环向焊缝,以及凸形封头上的拼缝,都必须采用对接接头。

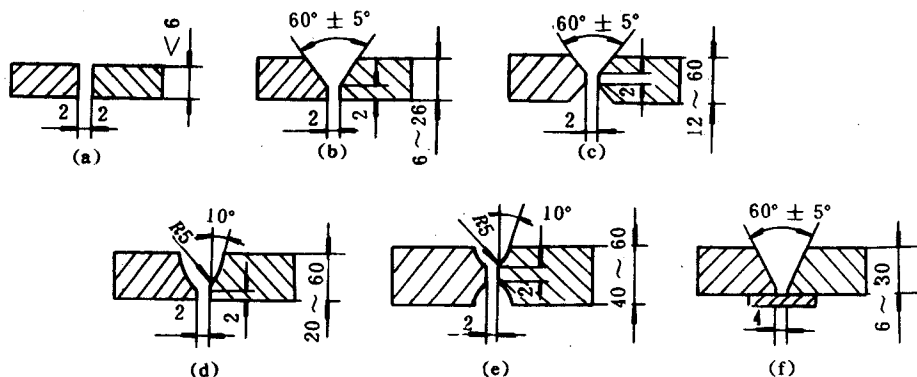
2. 坡口形式

焊缝坡口形式的选择,主要根据被焊容器的厚度、焊后应力应变的大小、坡口加工的难易程度、焊条的消耗量以及焊接工艺等各方面的因素来考虑。合适的坡口,可让焊丝或焊条伸入坡口根部,以保证焊透。坡口的基本尺寸为坡口角度 α 、根高 P 和根距 b 。容器设备的设计图上对重要的焊接接头必须用局部节点放大图表明坡口这三个尺寸的具体数值。常用的对接坡口形式有不开坡口、V 型、U 型、X 型及带垫板 V 型等。

对厚度在 6mm 以下手工电弧焊焊件和自动焊接 14mm 以下焊件时,可以不开坡口。超过以上厚度的对接焊件,为了防止未焊透现象的产生,就要根据焊件的厚度不同,开不同形式的坡口。不论什么形式的坡口,对接焊时必须保证有合适的焊根,以造成一个熔池,根高 P 过低易熔穿,过高又会使清根工作量增大,因清根不彻底会造成未焊透。根距 b 过大易使易熔化金属流失,过小如清根不彻底也易造成未焊透。

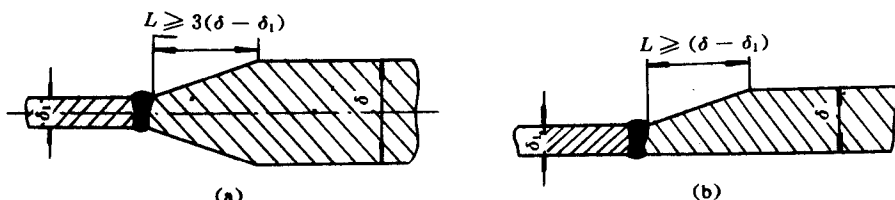
当容器设备内侧无法进行焊接时,采用单面坡口。当板厚小于 26mm 时,采用 V 型坡口;板厚为 20~60mm 时可采用 U 型坡口;板厚更厚,且双面均可进行焊接时,为保证焊缝质量,应采用双面坡口,板厚在 12~60mm 时,采用 X 型,板厚在 40~60mm 时,则采用对称 U 型;当容器内侧无法进行焊接而采用单面坡口焊接时,为保证焊根部分焊透,常采用带垫板的 V 型对接焊缝,以提高焊缝质量。垫板材料可用钢或紫铜。

容器设备常用对接接头坡口的的基本形式和尺寸见图总-2。



图总-2 对接接头坡口

对接接头应尽量采用等厚度焊接。在不同厚度钢板对接时,由于接头处断面有突变,会造成应力集中,如焊缝两边钢板中心线不一致,受力时将产生附加弯矩,这些都将影响接头强度。当较薄钢板厚度小于或等于 12mm,两板厚度差超过 3mm,或当较薄钢板厚度大于 12mm,两板厚度差超过 4mm 时,则对较厚板应作单面或双面削薄处理,其削薄部分长度至少应是两板厚度差的 3 倍,即 $l \geq 3(\delta - \delta_1)$,也就是过渡部分的斜度应不小于 1:3。这种结构在容器设备与封头连接时用得较多。见图总-3。



图总-3 不同板厚的对接

(三) 容器设备几种常用焊接结构

1. 接管与壳体的焊接结构

为了容器设备的正常操作、测试和检修,往往需要在容器设备壳体上开孔并连接接管。接管焊缝大部分为角焊缝。若带补强圈则还有搭焊缝。

图总-4(a)为单面角焊缝不开坡口,是低压小口径管的常用结构;(b)为单面坡口焊缝,适用于直径 $\leq 500\text{mm}$ 或不能进入内部焊接的容器,壁厚在 6~20mm 之间,操作压力在 1.6MPa 以下;(c)为开坡口双面焊接,容器直径必须大于 500mm,适用压力和温度较高,以及低温或剧毒介质的容器。

图总-5为带补强圈的接管焊接结构。其中(a)为带外侧补强圈单面焊平齐式接管结构;(b)双面焊内伸式接管结构,由于补强圈搭焊结构会引起较大局部应力,故不适用于局部应力大或易产生裂纹的钢种;(c)为内侧补强的接管焊接结构,它能有效降低应力集中程度,但焊接较麻烦。