

石油化工中等专业学校统编教材

化工设备

田颐慧 主编



中国石化出版社

石油化工中等专业学校统编教材

化 工 设 备

田颐慧 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书主要介绍压力容器及化工设备(塔器、换热器、反应器、管式加热炉等)的结构、原理、性能以及它们的机械设计计算方法。全书包括绪论、压力容器用钢、压力容器计算的理论基础、内压薄壁容器计算、外压薄壁容器计算、压力容器零部件设计、卧式容器、塔式设备、球形容器简介、压力容器的应力分类设计法、管壳式换热器、塔器、管式加热炉、反应器等。本书突出实用性,在编写过程中注意理论联系实际,重视有关规范、标准的使用。各章附有例题和习题。

本书可作为石油化工中等专业学校化工机械与设备专业教材,也可供从事石油化工机械工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工设备/田颐慧 主编. -北京:中国石化出版社, 1999

石油化工中等专业学校统编教材

ISBN 7-80043-770-1

I. 化… II. 田… III. 化工设备-专业学校-教材 N. TQ05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 02973 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)64241850

北京金剑照排厂排版

北京京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 25.5 印张 650 千字印 1—3000

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月第 1 次印刷

定价:32.00 元

前 言

本书根据 1988 年中国石油化工总公司普通中等专业学校化机指导组会议拟订的课程编写提纲分工组织编写，可作为中等专业学校化工机械与设备专业教材。

本书主要介绍压力容器及化工设备(塔器、换热器、反应器、管式加热炉等)的结构、原理、性能以及它们的机械设计计算方法。全书包括绪论、压力容器用钢、压力容器计算的理论基础、内压薄壁容器计算、外压薄壁容器计算、压力容器零部件设计、卧式容器、塔式设备、球形容器简介、压力容器的应力分类设计法、管壳式换热器、塔器、管式加热炉、反应器等内容。本书突出实用性，对较为复杂的设计公式未作推导。在编写过程中注意理论联系实际，重视有关规范、标准的使用。各章附有例题和习题。

本书由田颐慧主编，参加编写工作的有兰州石油学校龙运玉同志、兰州化工学校何德超同志、上海石油化工总厂中等专业学校施海奎同志和广东石油学校田颐慧同志。全书由兰州石油学校闻立言同志审定。

由于编者水平有限，书中存在问题难免，欢迎读者提出批评意见。

编者

目 录

绪论	1
第一章 压力容器用钢	7
第一节 压力容器用钢基本要求	7
第二节 压力容器用钢	24
第三节 压力容器材料的选择	30
第二章 压力容器计算的理论基础	32
第一节 旋转薄壳理论	32
第二节 薄板理论	48
第三节 单层厚壁圆筒应力分析	55
习题	62
第三章 内压薄壁容器计算	66
第一节 内压圆筒和球形容器的计算	66
第二节 内压封头计算	84
第三节 压力试验	101
第四节 容器的致密性试验	104
习题	105
第四章 外压薄壁容器计算	107
第一节 外压薄壁容器的稳定性	107
第二节 外压薄壁圆筒的稳定计算	110
第三节 加强圈	124
第四节 外压封头计算	132
习题	136
第五章 压力容器零部件设计	138
第一节 法兰连接的设计	138
第二节 高压密封设计	167
第三节 容器的开孔与补强	180
习题	191
第六章 卧式容器	193
第一节 鞍式支座的设置及选择	193
第二节 载荷分析	195
第三节 轴向应力校核	197
第四节 切向剪应力校核	201
第五节 鞍座处筒体的周向应力校核	204
第六节 鞍座承受水平推力的校核	209
习题	213

第七章 塔式设备	215
第一节 直立设备支座	215
第二节 塔式设备计算	222
习题	247
第八章 球形容器简介	248
第一节 球壳	249
第二节 球形容器支座	251
第九章 压力容器的应力分类设计法	254
第一节 压力容器中的应力分类	254
第二节 极限分析和安定性分析	256
第三节 压力容器设计中各类应力的限制	261
第十章 管壳式换热器	263
第一节 概述	263
第二节 钢制管壳式换热器结构	272
第三节 管壳式换热器的强度	297
思考题	307
第十一章 塔器	308
第一节 概述	308
第二节 板式塔	311
第三节 填料塔	334
思考题	343
第十二章 管式加热炉	345
第一节 概述	345
第二节 管式炉常用炉型特点及运用	347
第三节 管式炉的结构	352
思考题	371
第十三章 反应器	372
第一节 概述	372
第二节 釜式反应器	374
第三节 塔式反应器	383
思考题	400
参考文献	401

绪 论

一、导 言

石油加工、化学工业是以自然界的多种物质为原料,对其进行化学、物理处理而制成各种产品的工业,主要包括化肥、医药、农药、炼油、无机化工和有机合成等。而石油化工则是以石油为原料生产各种化工产品的工业。它与人民生活、工业、农业、交通运输以及国防工业有着密切关系。当前,衡量一个国家石油化工的发达程度,多以该国的乙烯产量为标准,而生产乙烯的原料主要来自炼油厂,从而使炼油和乙烯生产自然地发生了有机联系,出现了炼油厂中有乙烯装置或乙烯厂中设有原油蒸馏装置。自 60 年代开始,国内外的炼油装置均朝着石油与化工相结合的方向发展,一个以石脑油为原料的 30 万吨/年乙烯装置通常需要一个 500~600 万吨/年的原油蒸馏装置相匹配。我国自 1968 年以来,先后建立了一批大、中型石油化工企业。如大庆、燕山、齐鲁、辽阳、金山、扬子石化企业等。它为发展我国石油化工奠定了坚实的基础。

从炼油厂、石油化工厂单元装置的规模来看,是朝着大型化方向发展。装置的大型化,对设备的设计、材料、制造、运输、安装等方面提出了新的问题和更高的要求。

目前含硫原油已占世界原油总产量的 75% 左右,为了提高含硫原油产品的质量,并把原油的 80% 变成化工产品,近几年来在各种二次加工工艺中,加氢裂解及精制始终居首位,它是从重组分油中得到优质轻馏分的一个十分重要的加工工艺过程,因此,加氢工艺进一步促进了炼油装置朝着大型化、深度加工及石油、化工相结合的方向发展,而石油化工的发展除和工艺过程有关外,在很大程度上还取决于石油化工机械的发展。

石油化工机械可分为机器及设备两大部分,本课程讨论的是容器及设备部分。石油化工厂中的装备有 80% 左右属于容器及设备。它广泛用于石油化工生产中的传热、传质、化学反应、物料贮存等各个方面,常见的有精馏塔、反应器、加热炉、换热器、贮罐等设备,这些设备虽然服务对象不同,操作条件各异,结构型式不一,但就其外壳来讲,从设计计算角度分析都属于容器范畴。容器的设计计算有其共同的特点,都可以将它分解为筒体、封头、法兰、开孔及接管、支座等几种元件,各种元件可根据其使用特点来进行设计计算。为了深入掌握石油化工容器及设备的设计计算理论,本课程介绍了石油化工容器用钢、容器设计计算的理论基础、内压薄壁容器计算、外压容器计算和容器受压元件的计算等各项内容。换热器、塔器、反应器这些设备除容器壳体外,还有内部构件的选择和计算问题,以及管式加热炉均设专章介绍。由于近年来某些新兴学科的引入,国内外对压力容器的失效分析日益深入,设计水平也不断提高,故本课程对应力分析设计计算也作了扼要的介绍。

压力容器及设备设计计算的各种尺寸除了按理论计算外,还必须符合规范。本课程所推荐的压力容器设计计算公式与参数,应符合全国压力容器标准化技术委员会 1989 年制订的 GB150—89《钢制压力容器》标准,换热器设计应符合 GB151—89《钢制管壳式换热器》标准以及其他的相关标准。为了加强压力容器的安全技术监督管理工作,并接受国家劳动部 1990 年颁发的《压力容器安全技术监督规程》的监督。所用材料应符合上述设计计算规定的要求以及

相应的国家标准和部颁标准的规定；压力容器的制造和检验应遵守有关技术条件。详见GB150—89《钢制压力容器相关标准》。

二、压力容器的特点

（一）操作条件复杂

由于石油化工生产的产品品种多，因此要求加工过程的操作条件便是多种多样，其容器有真空下操作的减压蒸馏，有工作压力高达 345MPa 的高压聚乙烯，有 -210°C 的深度冷冻； $650^{\circ}\text{C}\sim 750^{\circ}\text{C}$ 的高温裂解，并且加工的介质又是易燃、易爆、有毒、有腐蚀性，在这样苛刻的条件下，还要保证其严密性、抗蚀性及长期安全运行。

（二）设备尺寸大而笨重

石油化工厂的工艺设备外廓尺寸大。有的塔高 100 多米，直径 10 多米，质量达 600~1000 吨，大型球罐的容积达 $50000\sim 100000\text{m}^3$ 。近年来随着石油化工生产向高效、低耗及单体设备处理能力大型化发展，压力容器的尺寸愈来愈大，操作条件日趋苛刻。

（三）容器母材多样化

压力容器由于应用范围广泛，工作条件多种多样，因此对钢材的性能要求也不一样，要满足容器的使用要求，必须采用多种类型的材料，如铸铁、碳钢、合金钢、有色金属及各种非金属材料均有应用。如年产 30 万吨合成氨及配套的尿素装置，所使用的材料有制造高压氨合成塔的低合金高强度钢，高压氨分离用的低温钢，耐强腐蚀介质作用的不锈钢耐酸钢以及中温变换用的抗氢钢等。

（四）容器应用的环境条件

大多数压力容器都是在露天下操作，受着风、雪载荷的作用，大气的腐蚀。

（五）容器的整体性

现代化的石油化工厂都是连续性生产，压力容器之间不是孤立的，而是彼此相关的，一旦某个容器、机器或它们的零部件发生故障，将会影响整个装置的生产。

三、对压力容器的基本要求

对石油化工压力容器的要求大体上可分为技术经济指标和结构要求两个方面。

（一）压力容器的技术经济指标

1. 生产能力。以单位时间内能完成的生产任务来表示。单位生产能力是设备每单位容积、单位质量或单位面积在单位时间所完成的生产任务。单位生产能力愈高，设备愈完善。同时在整个生产系统内，各种容器及设备的生产能力应力求相适应，否则有的容器设备生产能力有余，有的容器及设备生产能力不足是不合理的。

2. 消耗系数。指生产单位质量(或单位体积)产品所消耗的原材料及能量，包括原料、燃料、蒸汽、水、压缩空气、电等。消耗系数不仅与所采取的工艺流程有关，与容器的结构也有关，容器的效率愈高，则消耗系数愈低。

3. 价格。容器的价格影响到工厂的投资，采用结构简单、价廉的容器是必要的，但通过经济核算后也可采用满足工艺要求结构复杂、自动化程度高、价格高而且生产能力大、寿命长的容器。

4. 操作费用。操作费用低，产品成本亦低，但操作费用不是一个孤立的因素，它包括劳动力支出，自动化程度高低，维护和检修费用等。若容器的自动化程度高，操作费用就低，但

投资大大增加。

5. 产品成本。产品成本是整个生产中一切经济效果的综合反映，机器及容器结构是否完善、先进，选材是否恰当，最终要以产品成本来衡量，产品成本还决定于工艺流程是否合理、非生产费用的大小、原材料的价格等。

（二）对容器在结构上的要求

1. 满足工艺生产的要求。压力容器是实现石油化工生产过程的重要工具，产品的质量、产量和成本，直接与容器的质量优劣、效率高低、结构的先进性相联系。所谓满足工艺生产的要求，一般指所设计的压力容器，能承担工艺生产所要求的压力、温度及具备工艺生产所要求的规格尺寸（直径、高度、容积）和结构（开孔、接管、内构件等）。例如化肥装置的氨合成塔，氨的合成率与氨合成塔的合成压力有关，若由于设计、制造或材料方面的原因使合成塔承受不了原设计压力，只能降压使用，这必然导致氨的合成率下降，不仅影响了产量，而且造成了成本的大幅度提高。

2. 容器运转要安全可靠。石油化工厂所使用的压力容器，其介质一般都是易燃、易爆、有毒、有腐蚀性，并且在一定温度，压力下操作，压力容器工作时，内部储存着一定的能量，因压力容器内的工作介质有液体（常温下的液体，温度高于其标准沸点的饱和液体及液化气体）、气体（压缩气体、水蒸气），这些介质的能量是在开工过程中逐步积累起来的，一旦容器破裂，容器内部储存的能量将在极短的瞬间放出。若容器内为常温下的液体，由于液体几乎没有压缩性，其容器爆破时的膨胀做功小，即爆破释放的能量少，其破坏性也小。若容器内介质为温度高于其标准沸点的饱和液体（如废热锅炉中的高温饱和水）和液化气体，这些介质在容器中由于压力较高，因而一部分呈液态，但一旦容器破裂，容器内压力骤然下降，这些饱和液体立即蒸发，体积急剧膨胀发生蒸气爆炸，其释放的能量很大。若容器内的介质为气体，因气体有很大的压缩性，一旦容器破裂，气体瞬时膨胀所释放的能量更大。同样压力和容积的压力容器，工作介质为气体的要比液体的爆破能量大数百倍至上万倍。同样压力、容积的容器盛装高温饱和液体的爆破能量比盛装饱和蒸汽时大得多。更何况容器内的介质大多是易燃、易爆、有毒的物质，一旦容器发生事故，它们还会在大气中扩散，引起化学爆炸、着火燃烧或恶性中毒等连锁反应，造成更严重的破坏。因此，对压力容器不仅要求密封可靠、受压元件有足够的强度、刚度及稳定性，而且还要在按规定条件制造、运输、安装和使用安全可靠，以保证人身安全和容器的正常生产。

3. 容器应有一定的耐久性。压力容器的耐久性是指它的使用年限。对大多数容器，使用年限是由腐蚀、金属疲劳或磨损所决定。影响使用年限的主要因素是介质对容器结构材料的腐蚀，因为腐蚀能使容器的壁厚减薄，甚至烂穿，故容器设计时，必须附加腐蚀余量来满足使用年限的要求，对某些强腐蚀性介质还要采取一定的防腐措施或采用耐腐蚀的金属或非金属材料。石油化工压力容器的使用年限一般是10~15年（但实际使用年限往往超过这个数字）。高压容器是20~25年。因此，在容器设计时，要合理选择容器结构、材料、制造工艺和安全系数，以确保容器长久使用和安全运转。

4. 容器结构简单、制造安装、操作维修方便。压力容器的结构设计，其受压元件要尽量采用标准及系列产品，这样既简化了设计、制造和检验，又方便了元件的更换和维修。容器的自动化程度要高、自控仪表要集中于适当位置，以方便工人的操作、管理、维修和安装。对于有清洗、维修内件要求的容器，一定要设置人孔或手孔。

5. 容器具有一定的经济性。石油化工厂使用的压力容器数量多，故要求容器的效率要高，

结构要合理,以减少加工量,并便于制造且能保证制造质量。如选择焊接结构,要考虑避免焊接缺陷及减少焊接热应力。容器的尺寸、形状、重量等应考虑到水、陆路运输的方便及可能性,对于大型的容器要分段制造、分段运输、现场组装。容器的金属用量要小,尤其是貴重金属要尽量少用,力求做到容器的重量轻,体积小,价格低,能耗低,加工量小又能满足容器的制造工艺要求。

上述这些基本要求既互相联系又互相矛盾,因此衡量石油化工压力容器的技术经济指标和结构是否符合要求,必须综合进行分析,根据生产的需要和可能,全面考虑,以使压力容器的结构设计更加合理。

四、压力容器的分类

压力容器的使用十分广泛,型式也很多,为了便于对同类型容器的研究和计算,常将容器(含化工设备)按不同的要求进行分类,分类方法有如下几种。

(一) 按工艺用途分类

根据容器(含化工设备)在生产工艺过程中所起的作用分。

1. 换热设备。即主要用于实现介质的热量交换的设备,如热交换器、冷却器、蒸发器和管式加热炉等。

2. 反应设备。即主要用来完成介质化学反应的设备,如反应器、变换器、聚合釜和合成塔等。

3. 分离设备。即主要用于对混合物料进行分离的设备,如分馏塔、吸收塔、稳定塔和分离器等。

4. 贮运设备。即盛装物料的容器,常用的有卧式圆筒容器、球形贮罐和槽车等。

(二) 按容器的壁厚分类

中、低压容器通常为薄壁容器,高压与超高压容器则一般称之为厚壁容器。区分厚壁与薄壁的指标是径比,即 $K = D_o/D_i$ (它实质上相当于器壁厚度对直径的比值), D_o 和 D_i 分别表示容器的外直径和内直径。当 $K > 1.2$ 时为厚壁容器, $K \leq 1.2$ 时为薄壁容器。对于承受内压的薄壁容器,可只考虑其径向应力和周向应力,而忽略较小的径向应力,故可近似地认定为二向应力状态。厚壁容器的径向应力不能忽略,故为三向应力状态。另外,厚壁容器为高压设备,在设计和制造上也都有较高的要求。

(三) 按容器壳体承受压力的方式及大小分类

一个密闭的压力容器,按照壳体承受压力的方式不同分为内压容器和外压容器。密闭容器内部介质的压力大于壳体外部压力时,称为内压容器。密闭容器内部介质的压力小于壳体外部的压力,即壳体外部承受压力的容器称为外压容器,如蒸馏装置中的减压塔、真空罐以及夹套容器中的内筒,当夹套内的压力高于内筒中介质的压力时,即构成一外压容器。

内压容器根据所受压力大小又分为常压容器和压力容器。按 GB150—89《钢制压力容器标准释义》规定,凡是设计压力 $p \geq 0.1 \text{ MPa}$ 的容器为压力容器;凡是设计压力 $p < 0.1 \text{ MPa}$ 的容器为常压容器。

在压力容器中,按《压力容器安全技术监察规程》,根据承受压力的不同,将压力容器分为四个压力等级。具体的划分标准是

低压容器: $0.1 \text{ MPa} < p \leq 1.6 \text{ MPa}$

中压容器: $1.6 \text{ MPa} < p \leq 10 \text{ MPa}$

高压容器： $10\text{MPa} < p \leq 100\text{MPa}$

超高压容器： $p \geq 100\text{MPa}$

根据容器压力的高低，容器的大小，介质的危害程度以及在生产过程中的重要作用，实行容器分级管理及监督检查，根据《压力容器安全技术监察规程》的管理分类法，将压力容器（不包括辐射作用的核能容器、船舶上的专用容器和直接受火焰加热的容器）及锅炉分为三个类别，类别越高，安全管理越严格。一类容器为危险性较小的低压容器，二类为中压容器或有一定危险性的低压容器。三类容器为高压、超高压容器或危险性较大的中压容器。各类容器在设计、选材、制造、检验及使用管理上均提出了不同的要求。这三类容器的具体划分标准如下：

1. 低压容器（第2、3条规定的除外），为第一类压力容器。

2. 下列情况之一为第二类压力容器。

（1）中压容器（第3条规定的除外）；

（2）易燃介质或毒性程度（见注）为中度危害介质的低压容器和储存容器；

（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 $p \cdot V \geq 0.2\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的低压容器；

（2）易燃或毒性程度为中度危害介质且 $p \cdot V \geq 0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压反应容器和 $p \cdot V \geq 10\text{MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压储存容器；

（3）高压、中压管壳式余热锅炉；

（4）高压容器。

注：

1. 易燃介质是指与空气混合的爆炸下限小于10%，或爆炸上限和下限之差值大于等于20%的气体，如：一甲胺、乙烷、乙烯、氯甲烷、环氧乙烷、环丙烷、氯、丁烷、三甲烷、丁二烯、丁烯、丙烷、丙烯、甲烷等。

2. 介质的毒性程度参照GB5044《职业性接触毒物危害程度分级》的规定，分为四级，其最高容许浓度分别为：

（1）极度危害（Ⅰ级） $< 0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ；

（2）高度危害（Ⅱ级） $0.1 \sim < 1.0\text{mg}/\text{m}^3$ ；

（3）中度危害（Ⅲ级） $1.0 \sim < 10\text{mg}/\text{m}^3$ ；

（4）轻度危害（Ⅳ级） $\geq 10\text{mg}/\text{m}^3$ 。

举例：

Ⅰ、Ⅱ级——氟、氢氰酸、光气、氟化氢、碳酰氟、氯等；

Ⅲ级——二氧化硫、氨、一氧化碳、氯乙烯、甲醇、氧化乙烯、硫化乙烯、二硫化碳、乙炔、硫化氢等；

Ⅳ级——氢氧化钠、四氟乙烯、丙酮等。

3. 压力容器中的介质为混合物时，应以介质的组成并按毒性程度或易燃介质的划分原则，由设计单位的工艺设计或使用单位的生产技术部门，决定介质毒性程度或是否属于易燃介质。

从上述分类方法可以看出。我国一、二、三类压力容器的划分中，剧毒、有毒、易燃及易爆介质的反应容器和储存容器均要升一类以加强其安全管理。其原因是有易燃、易爆介质的容器，由于容器破裂时，不仅造成容器爆炸的危害，而且可能发展为二次空间爆炸(伴随化学反应的爆炸)和火灾。所以对易燃易爆介质的容器要管理得严格。对盛装有毒介质的容器一旦容器破裂，还会造成人员中毒，也应该较无毒容器管理得严格。尤其是对盛装易燃、易爆或有毒介质的反应容器，由于反应时压力、温度可能急剧上升。以及对盛装易燃、易爆或有毒介质的贮装容器，其容量较大，容器发生破裂后的危害程度较换热器、分离容器严重，这就是易燃、易爆或有毒介质的反应容器及储存容器，必须升一类管理的道理所在。

第一章 压力容器用钢

合理选择压力容器用钢，是本课程主要任务之一，而了解材料的基本知识是掌握压力容器设计计算的一个前提。

石油化工厂生产的特点是腐蚀性很大，有些工艺过程又向高压、高温或超低温方向发展。例如，石油化工厂中的高温裂解炉和以天然气为原料制造合成氨的甲烷转化炉都要在 800°C 以上才能进行反应并且炉管直接承受火焰加热；高压聚乙烯装置的压力达到 15MPa 以上和石油气的低温分离必须在 -200°C 左右进行；中压法氨的合成是在 500°C 高温及工作压力为 32MPa 的高压下进行；还要防止高温高压下氮、氢气体对设备的腐蚀。这种多样性的操作条件，给石油化工压力容器材料的选用带来了复杂性。即在选用材料时既要考虑耐压、耐高温或低温、耐介质腐蚀、有足够的强度，又要考虑便于制造加工，焊接性能好，经济合理等设计、制造及使用上的问题。故要满足上述这些条件，对材料就有不同的要求。下面将从压力容器的设计、制造和安全的角度出发，来阐述压力容器用钢的性能、类型、特点和基本要求。

第一节 压力容器用钢基本要求

一、化 学 成 分

首先，只有含碳量低的钢方能作为压力容器用钢，一般要控制含碳量 $\leq 0.24\%$ 。对于压力容器用钢来说，除了要求强度指标外，更为重要的是要保证塑性、韧性指标。而提高含碳量将使钢材的强度、硬度提高，塑性、韧性降低，因而要限制含碳量。另外，为了改善焊接性也要控制含碳量。其次，除了含碳量以外，允许的硫、磷含量也要控制在较低的范围以减少钢材的热脆和冷脆现象。

二、机 械 性 能

（一）常温机械性能

1. 强度指标。强度是材料在外力作用下，抵抗产生塑性变形和断裂的能力。材料的强度指标是屈服强度 σ_s 和强度极限 σ_b 。它们是用标准试件，按照规定的试验方法进行试验测得的。它们是压力容器机械设计和计算的依据。

（1）屈服强度 σ_s 。屈服强度是重要的强度指标，它代表试件开始产生明显塑性变形的应力值，对于低碳钢当温度 $t \geq 300^{\circ}\text{C}$ 时和调质处理的合金钢等无明显屈服点的材料，则取试件产生残余变形为 0.2% 时的应力值，即用条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 来代替 σ_s ，如图 1-1 所示。如果压力容器受压元件的应力达到或超过 σ_s ，则将产生明显的塑性变形。另外材料因冷作产生硬化现象也使强度提高，塑性、韧性、抗腐蚀性能下降。而压力容器受压元件是不允许出现这种情况的。所以屈服强度就

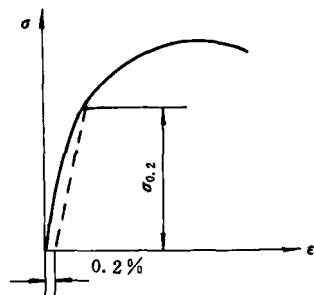


图 1-1 条件屈服限

成为压力容器受压元件设计计算的首要依据。

(2) 强度极限 σ_b 。强度极限是试件在拉断前所承受的最大应力值，是材料承载能力的极限。早期的强度设计都是以它作为设计的依据。由于历史原因，目前对于塑性材料制造的压力容器受压元件仍常以 σ_b 作为强度设计的依据之一。

在工程上不仅希望材料具有较高的屈服强度，而且具有一定的屈强比、屈服强度与强度极限的比值称为屈强比 (σ_s/σ_b)，屈强比常作为衡量压力容器用钢的安全可靠性的参考指标。对按弹性准则设计的压力容器受压元件、该指标则表示材料承载能力的裕度。屈强比小，受压元件可靠性高，如有超载也能由于产生塑性变形使材料的强度提高而不致断裂，但屈强比也不能太低，太低材料的有效利用率低；屈强比太高，极端情况 $\sigma_s/\sigma_b=1$ ，则任何微小的超载都会导致受压元件的断裂，不能作为压力容器用材。常用的碳素钢屈强比为 0.6 左右。低合金高强度钢一般为 0.65~0.75。由于它们制造的压力容器超载能力较大。安全可靠性较高。

2. 塑性指标。塑性是材料在外力作用下，发生断裂之前产生塑性变形的能力，常用拉伸试验中材料的延伸率 δ_5 (下标 5 表示试件标准长度和直径之比为 5) 和断面收缩率 ψ 以试件断裂后的伸长变形和截面积变形大小来表示，数值愈大，塑性愈好。当试件有足够长度时， δ 基本上反映材料均匀延伸的特性，而 ψ 则反映产生断裂所需的应变，与 δ 相比 ψ 是对金相组织变化更为敏感的塑性指标。从安全角度来考虑，良好的塑性对压力容器用材来说显得特别重要。首先，塑性变形有缓和应力集中，削弱应力峰值的作用，这对防止受压元件产生不能预料的早期破坏是有利的；其次，多数钢材都有应变硬化的倾向，这在一定程度上提高了材料的强度；再次，在面临过载或意外冲击时，材料产生塑性流动而不会突然断裂 (如一旦断裂，在断裂前也会吸收相当多的能量)。这些对避免灾难性事故发生至关重要。材料的塑性也表明它经受延展等成形加工而不断裂的能力，因此，良好的塑性也是冷冲压成形工艺所要求的。此外，塑性指标还能反映材料的冶金质量、杂质水平、加工情况和热处理质量等。一般压力容器用钢要求 $\delta \geq 15\% \sim 20\%$ 。

3. 韧性指标。韧性是表示材料弹塑性变形和断裂全过程中吸收能量的能力，是强度和塑性的综合表现。材料的韧性因重点不同而采用不同的试验方法用相应的韧性指标衡量。目前材料标准的冲击韧性值是通过不同的形状的试件进行冲击试验测得的。常见的有 U 形缺口夏

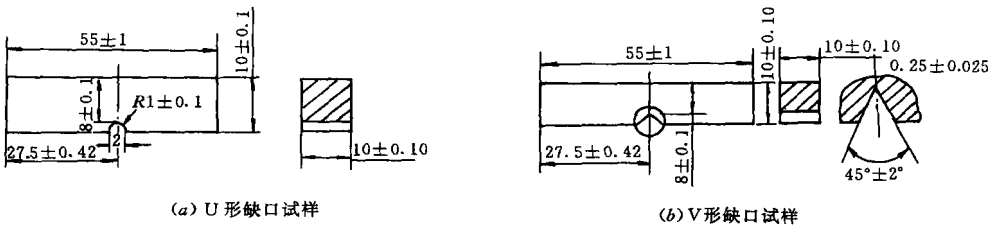


图 1-2 冲击试件

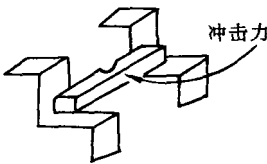


图 1-3 冲击试验示意图

比冲击韧性值 α_{ku} (即等于冲击吸收功除以试件缺口底部处横截面积所得的商) 或冲击吸收功值 A_{ku} 和 V 形缺口夏比冲击韧性值 α_{kv} 或冲击吸收功值 A_{kv} 。

夏比 U 形缺口和 V 形缺口试件尺寸及缺口，形状见图 1-2。冲击试验示意图见图 1-3。

冲击韧性值除与试件的尺寸、缺口形状有关外还与试验温度

有关,有些材料在 20℃左右试验时冲击值虽低但并不显示脆性,而在低温下就可能发生脆断。因在低温下,一般钢材的塑性降低而脆性增加,材料愈脆,冲击值愈低,因此国家劳动部门和《钢制压力容器》国家标准中均作出规定,对于容器工作温度小于或等于-20℃时,定为低温容器,其材料必须作低温冲击试验。当工作温度低于 0℃时的容器壳体钢板,对不同板厚的不同钢材,也应按批抽取两张作低温冲击试验。

冲击韧性和强度、塑性虽然不是同一指标,但它们之间有一定的关系。强度高、塑性好的材料,其冲击韧性值也高;脆性大的材料韧性值就低。所以对于脆性材料的容器在使用时必须注意,绝不能任意敲打或突然升压或降压。

石油化工容器在开停车、安装检修时都会受到冲击力的作用,因此对它们的冲击值就有一定的要求,对于压力容器用钢板,常温下 $A_{kv} \geq 18 \sim 27J$ 。

4. 硬度指标。硬度是材料抵抗硬物在表面局部压入的能力。硬度由于测量的方法不同和所使用的仪器不同,故所得的硬度指标也不相同。常见的硬度指标有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HRC)、维氏硬度(HV)和肖氏硬度(HS),而最常用的是布氏硬度和洛氏硬度。布氏硬度不能用于测定硬度超过 HB450 的材料,否则钢球会变形,测得的结果不准确。布氏硬度也不能用于测定厚度小于 1~2mm 的薄钢材,否则钢球会压穿试件,当材料硬度超过 HB450 时,用洛氏硬度来测定。

硬度是指金属材料的软硬程度,因之金属材料变形难易,能否经得起划磨,对切削的抵抗力和抗冲蚀的能力等都与硬度有关。一般硬度高的材料耐磨性较好,工具越硬越锋利。但硬度太高也不易切削,要退火后再进行加工。当两种材料互相压紧时,如螺栓与螺母,法兰与垫片,管板孔与胀管端等,都必须注意两者硬度应不同,以免互相损坏而破坏联接的紧密性,造成介质泄漏,所以硬度也是材料的重要性能指标之一。

材料的硬度与强度之间也有一定的关系,因为硬度是反映局部塑性变形的抗力,根据经验,硬度与抗拉强度有如下近似关系:

低碳钢	$\sigma_b = 0.36HB$
中碳钢	$\sigma_b = 0.35HB$
高碳钢	$\sigma_b = 0.34HB$
调质合金钢	$\sigma_b = 0.325HB$

因此在容器制造或在役检查中,可用测硬度的方法来检查容器的焊接热影响区是否变硬、变脆以及元件材质是否因介质作用而硬化。

(二) 温度对钢材性能的影响

1. 温度升高对机械性能的影响。随着温度的升高,钢材的机械性能将发生变化。根据低碳钢的试验(如图 1-4 所示), σ_b 在 250~300℃前逐渐升高,以后逐渐下降, σ_s 逐渐下降; δ_5 在 300℃前略有下降,以后很快提高。这一现象说明了机械性能变化的总趋势是强度下降、塑性提高。设计时要按照设计温度下的强度进行,即取该设计温度下的强度极限 σ_b 和屈服强度 σ_s 。

由于碳钢在 250~300℃左右时,强度上升,塑性反而下降,这就是钢的“蓝脆性”,这个温度范围称为蓝脆温度区。在蓝脆温度下,钢材不得弯卷,否则冷却至室

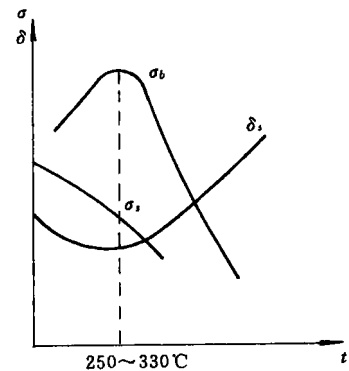


图 1-4 低碳钢在不同温度下的短时机械性能

温时会出现脆性。

上述钢的机械性能是在不同温度下短时的机械性能。对于碳素结构钢温度不超过 350℃，合金钢不超过 400℃是适用的。若温度进入高温，反映在高温下的机械性能不仅要考虑温度的影响也要考虑时间的影响，即在外力作用下持续时间对机械性能的影响也是很大的。此时，主要用蠕变极限、持久强度和松弛稳定性衡量材料的机械性能。现分述如下：

(1) 蠕变和蠕变极限。

① 蠕变的实质。在常温下，金属材料在外力作用下，若应力小于弹性极限，则材料仅产生弹性变形；若应力达到屈服强度，除产生弹性变形外，还产生一定的塑性变形。上述变形值只要受力不变就一直保持下去，不随时间的推移而有所改变。但在高温下，受不变外力作用后所产生的变形，会随时间的增长，塑性变形量会不断增加。这种金属在不变的高温 and 应力作用下，产生连续的、缓慢的塑性变形的现象称为蠕变。

② 蠕变的条件。在什么情况下金属才会产生蠕变，一般认为对大多数金属必须是在高温下，超过金属材料的再结晶温度，蠕变现象才明显。如碳钢，超过 400℃，合金钢超过 400~500℃，轻金属铝超过 50~150℃，就会产生蠕变，有些金属的再结晶温度很低，如铅(Pb)在室温下就能发生蠕变现象。所加的应力超过金属在该温度下的弹性极限，就能发生蠕变现象。温度愈高，应力愈大，蠕变的速度(即单位时间的变形量)愈快。所以影响蠕变变形大小的因素主要是温度、应力和时间，它们之间的关系可以通过蠕变过程来说明。

金属的蠕变过程可以用蠕变曲线来描述，如图 1-5 的曲线是钢长期在某一不变的温度和不变的应力下，金属材料试件的蠕变变形(以应变 ϵ 表示)的发展与加载荷时间 τ 之间的典型关系曲线，常称之为蠕变曲线，其蠕变变形的增长与时间的关系可分为三个阶段。

载荷刚加上时的弹性变形量，如图中 OA 段，与蠕变无关系。

蠕变的第一阶段—减速阶段：如图中 AB 段，变形速度渐小；

蠕变的第二阶段—稳定阶段：如图中 BC 段，变形速度保持恒值不变，而且绝对变形速度在整个蠕变过程中为最小，这段时间最长，可达十多年甚至几十年，是主要变形阶段。

蠕变的第三阶段—加速阶段：如图中 CD 段，变形速度随时间愈来愈快，最后达 D 点由于变形过大而断裂。这是危险阶段，一般不许可材料在此阶段内工作。

图 1-6 给出了在温度不变时，不同应力下，一组金属材料的蠕变曲线。由图知，应力值愈大，稳定阶段愈短，蠕变速度愈快，在短时间内即达到很大变形而破坏。

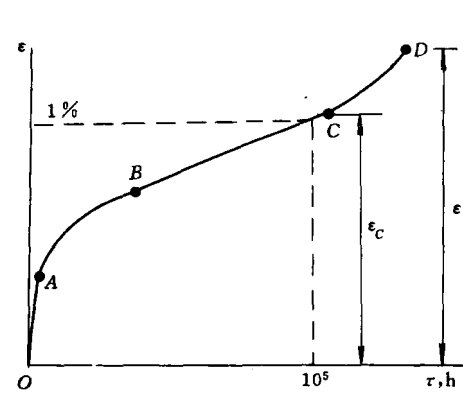


图 1-5 蠕变变形与时间的关系曲线

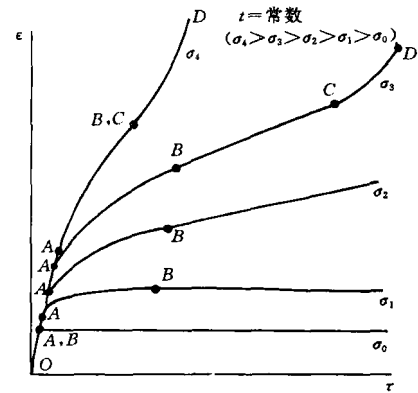


图 1-6 温度不变时的蠕变曲线

如果应力维持不变,则在不同温度下金属材料的蠕变曲线也不同。如图 1-7 所示,温度愈高,则蠕变速度愈大。

③ 蠕变极限 通过上面实验证明材料的蠕变速度与所受到的温度和应力有关。对于一定的材料,在恒定的实验温度下,和控制蠕变速度不超过规定值时相应的应力称为蠕变极限,用 σ_n 表示。

在高温下,进行压力容器受压元件设计时,当然可以选择不引起蠕变的应力,但是允许的应力值很低,设备的强度尺寸要很大,不经济。

一般压力容器允许的总蠕变变形量大约在 1% 左右,容器的寿命通常为 10~15 年,相应的时间约为 10^5h ;对于次要的或可更换的零件如加热炉炉管等可取 1~1.5 年,相应的时间约为 10^4h 。这样允许的蠕变速度分别为:

$$V_n = \frac{1\%}{10^5} = 10^{-7} \text{mm/mm} \cdot \text{h}$$

$$V_n = \frac{1\%}{10^4} = 10^{-6} \text{mm/mm} \cdot \text{h}$$

选择这些条件下的蠕变极限作为高温下强度设计的基础。

对于同一材料在相同温度下,其蠕变速度不同,蠕变极限值也不同。蠕变速度为 $10^{-7} \text{mm/mm} \cdot \text{h}$ 时的蠕变极限值就比蠕变速度为 $10^{-6} \text{mm/mm} \cdot \text{h}$ 时的蠕变极限值小得多。例如 20 号钢在 400°C 时,当寿命为 10^5h ,蠕变速度为 $10^{-7} \text{mm/mm} \cdot \text{h}$ 时的蠕变极限为 96N/mm^2 ;当寿命为 10^4h ,蠕变速度为 $10^{-6} \text{mm/mm} \cdot \text{h}$ 时的蠕变极限则为 127.5N/mm^2 。在查找手册中有关数据时必须注意到这一点。

由于在高温下碳钢的蠕变极限值很低,使用这种材料就会使受压元件的结构尺寸很大,不够经济,因此,高温下必须选用耐热钢。

④ 产生蠕变的后果及防止金属蠕变的办法。高温高压下工作的管线、加热炉炉管,由于蠕变而造成的管线直径和长度增大,塑性降低,最后使管子破坏。由于金属的蠕变,还会破坏容器各部分受压元件的联接紧密性,使容器的正常工作受到影响,因此应设法减低或防止金属的蠕变。

蠕变的机理:如前所述,产生蠕变所必要的条件是温度与应力同时存在。应力的存在是使材料的晶格产生一定的滑移变形,滑移变形后即有加工硬化现象而阻止进一步的变形。温度的存在却使晶粒内原子运动加剧,并产生再结晶现象而消除加工硬化,这样促使晶格又进一步滑移变形。于是应力与温度同时存在,就会使材料发生连续不断的塑性变形,结果就是蠕变。为此,要提高材料抗蠕变能力的途径是如何有效地阻止它产生晶格滑移变形,具体的办法有:

增强晶界面,使之不易滑移。加入某些能与碳形成稳定化合物的合金元素,使之生成细小而稳定的(不会随时间而聚集长大)碳化物分布在晶界面上,增加晶界的滑移阻力。按碳化物的稳定性高低次序排列,下列合金元素的加入是有效的:钛、铌、钒、钼、钨、铬、锰等。

提高再结晶温度。加入高熔点合金元素如钨、钼等。

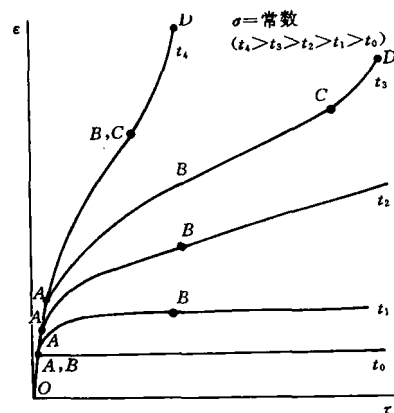


图 1-7 应力不变时的蠕变曲线