

化工设备机械基础

(第四版)

高等学校理工科规划教材

化工设备机械基础

(第四版)

HUAGONG SHEBEI

JIXIEJICHU

刁玉玮 王立业 编著

050.1
:4

版
社



DUTP 大连理工大学出版社 Dalian University of Technology Press

高等学校理工科规划教材

化工设备机械基础

(第四版)

刁玉玮 编著
王立业

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工设备机械基础/刁玉玮,王立业编著. —4版. —大连:大连理工大学出版社,2000.6

ISBN 7-5611-0715-3

I. 化… I. ①刁…②王… II. ①化工设备-教材 ②化工机械-教材 IV. TQ05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 30828 号

大连理工大学出版社出版发行

大连市凌水河 邮政编码 116024

电话:0411-4708842 传真:0411-4708898

E-mail:dutp@. mail. dlptt. ln. cn

URL: <http://www.dutp.com.cn>

大连业发印刷有限公司印刷

开本:787×1092毫米 1/16 字数:583千字 印张:23.75

印数:51001—57000册

1988年8月第1版

2000年6月第4版

2000年6月第1次印刷

责任编辑:王佳玉 张婵云

责任校对:单 雨

封面设计:孙宝福

定价:24.00元

前言

本书可作为高等学校化工工艺类专业学生学习化工容器与设备机械设计基础知识的教材。

本教材在基本理论和基本概念方面较以往同类教材有所加强,同时注重了规范设计与实用方面的要求,采用最新标准。考虑到少学时和多种专业的需要这一特点,有些内容叙述较为详尽,适于自学。本书各章配有适量的例题和内容丰富的复习思考题与习题,并将计算与设计所需的必要数据、标准纳入附录。本书可供有关工程技术人员参考。

本书采用国际单位制。但考虑到读者由工程单位制向国际单位制过渡的过程,在某些地方仍同时附有工程单位制的数据。

本书第一章至第六章及附录由刁玉玮副教授编写,李荣华绘图;第七章至第九章由王立业副教授编写,李铭绘图。全书由刁玉玮副教授统稿并审核。

由于编者水平有限,加之时间仓促,难免有不妥之处,诚请广大读者批评指正。

编 者 1987 年 10 月

第四版说明

本教材 1996 年 11 月第三版之后,又使用了三年,已印刷了八次。在此期间 1998 年 10 月又颁布了新的国家标准 GB150—1998《钢制压力容器》,该标准与原标准 GB150—89《钢制压力容器》有较大改动,同时近年来又有其他一些相关标准出台。对于化工设备机械基础这类工程性和应用性很强的教材与其他基础理论性教材不同,它必须反映出最新工程应用标准。因此,应大连理工大学出版社之邀,对本教材再进行全面修改后作为第四版发行。

本次再版工作第一至第五章及附录由刁玉玮教授修改;第六章由侯明博士修改;第七至第九章由王立业副教授修改;全书由刁玉玮教授统稿审核。

编 者 2000 年 4 月

目 录

第一篇 化工设备材料

第一章 化工设备材料及其选择	1
第一节 概 述	1
第二节 材料的性能	2
一、机械性能	2
二、物理性能	8
三、化学性能	8
四、工艺性能	9
第三节 金属材料的分类及牌号	9
一、分 类	9
二、钢铁牌号及表示方法	11
第四节 碳钢与铸铁	15
一、铁碳合金的组织结构	15
二、铁碳合金状态图	18
三、碳 钢	20
四、钢的热处理	22
五、铸 铁	24
第五节 低合金钢及化工设备用的特种钢	26
一、合金元素对钢的影响	26
二、低合金钢	27
三、锅炉钢	27
四、容器钢	28
五、不锈钢耐酸钢	28
六、耐热钢	29
七、低温用钢	30
八、钢材的品种和规格	31
第六节 有色金属材料	32
一、铝及其合金	32
二、铜及其合金	33
三、铅及其合金	34
四、钛及其合金	34
第七节 非金属材料	34
一、无机非金属材料	34
二、有机非金属材料	35

第八节 化工设备的腐蚀及防腐措施	37
一、金属的腐蚀	37
二、晶间腐蚀和应力腐蚀	42
三、金属腐蚀破坏的形式	44
四、金属设备的防腐措施	44
第九节 化工设备材料的选择	45
一、选用材料的一般原则	45
二、其他方面选材原则	47
习 题	48
参考文献	51

第二篇 化工容器设计

第二章 概 论	52
一、容器的分类与结构	52
二、容器机械设计的基本要求	56
三、容器零部件的标准化	58
习 题	60
第三章 内压薄壁容器的应力分析	61
第一节 回转壳体的应力分析——薄膜应力理论	61
一、薄壁容器及其应力特点	61
二、基本概念与基本假设	62
三、经向应力计算公式——区域平衡方程式	64
四、环向应力计算公式——微体平衡方程式	65
五、轴对称回转壳体薄膜理论的应用范围	67
第二节 薄膜理论的应用	68
一、受气体内压的圆筒形壳体	68
二、受气体内压的球形壳体	69
三、受气体内压的椭球壳(椭圆形封头)	70
四、受气体内压的锥形壳体	73
五、受气体内压的碟形封头	73
六、承受液体静压作用的圆筒壳	76
七、例 题	77
第三节 内压圆筒边缘应力的概念	80
一、边缘应力的概念	80
二、边缘应力的特点	81
三、对边缘应力的处理	82
习 题	83
第四章 内压薄壁圆筒与封头的强度设计	87

第一节 强度设计的基本知识	87
一、关于弹性失效的设计准则	87
二、强度理论及其相应的强度条件	87
第二节 内压薄壁圆筒壳与球壳的强度设计	89
一、强度计算公式	89
二、设计参数的确定	91
三、容器的壁厚和最小壁厚	96
四、压力试验及其强度校核	97
五、例题	99
第三节 内压圆筒封头的设计	101
一、半球形封头	101
二、椭圆形封头	102
三、碟形封头	103
四、球冠形封头	104
五、锥形封头	105
六、平板封头	111
七、例题	115
八、封头的选择	117
习 题	120
第五章 外压圆筒与封头的设计	123
第一节 概 述	123
一、外压容器的失稳	123
二、容器失稳型式的分类	123
第二节 临界压力	124
一、临界压力	124
二、影响临界压力的因素	125
三、长圆筒、短圆筒和刚性圆筒	127
四、临界压力的理论计算公式	128
五、临界长度	129
第三节 外压圆筒的工程设计	129
一、设计准则	129
二、外压圆筒壁厚设计的图算法	130
三、外压容器的试压	138
四、例题	138
第四节 外压球壳与凸形封头的设计	140
一、外压球壳和球形封头的设计	140
二、凸面受压封头的设计	140
三、例题	140
第五节 外压圆筒加强圈的设计	142

一、加强圈的作用与结构	142
二、加强圈的间距	142
三、加强圈尺寸设计	143
四、加强圈与圆筒间的连接	143
五、例题	145
习 题	146
第六章 容器零部件	149
第一节 法兰联接	149
一、法兰联接结构与密封原理	149
二、法兰的结构与分类	150
三、影响法兰密封的因素	152
四、法兰标准及选用	156
五、例题	167
第二节 容器支座	167
一、卧式容器支座	168
二、立式容器支座	175
第三节 容器的开孔补强	177
一、开孔应力集中现象及其原因	177
二、开孔补强设计的原则与补强结构	179
三、等面积补强的设计方法	182
四、例题	185
第四节 容器附件	186
一、接口管	186
二、凸 缘	187
三、手孔与人孔	187
四、视 镜	188
第五节 容器设计举例	188
一、罐体壁厚设计	189
二、封头壁厚设计	189
三、鞍 座	190
四、人 孔	191
五、人孔补强	192
六、接口管	192
七、设备总装配图	193
习 题	196
参考文献	198

第三篇 典型化工设备的机械设计

第七章 管壳式换热器的机械设计	200
第一节 概 论	200
一、管壳式换热器的结构及主要零部件	200
二、管壳式换热器的分类	201
三、管壳式换热器机械设计内容	202
第二节 管子的选用及其与管板的连接	202
一、管子的选用	202
二、管子与管板的连接	204
第三节 管板结构	206
一、换热管排列形式	206
二、管间距	207
三、管板受力及其设计方法简介	208
四、管程的分程及管板与隔板的连接	208
五、管板与壳体的连接结构	210
第四节 折流板、支承板、旁路挡板及拦液板的作用与结构	211
一、折流板及支承板	211
二、旁路挡板	214
三、拦液板	214
第五节 温差应力	215
一、管壁与壳壁温度差引起的温差应力	215
二、管子拉脱力的计算	216
三、温差应力的补偿	218
四、膨胀节的结构及设置	221
第六节 管箱与壳程接管	222
一、管 箱.....	222
二、壳程接管	223
第七节 管壳式换热器的机械设计举例	224
习 题.....	232
第八章 塔设备的机械设计	234
第一节 塔体与裙座的机械设计	235
一、塔体壁厚的计算	235
二、裙座设计	244
第二节 塔体与裙座的机械设计举例	251
一、设计条件	251
二、按计算压力计算筒体和封头壁厚	253
三、塔设备质量载荷计算	253

四、风载荷和风弯矩计算	255
五、地震弯矩计算	257
六、偏心弯矩计算	258
七、各种载荷引起的轴向应力	258
八、塔体和裙座危险截面的强度与稳定校核	259
九、塔体水压试验和吊装时的应力校核	261
十、基础环设计	262
十一、地脚螺栓设计	263
第三节 板式塔结构.....	263
一、总体结构	263
二、塔盘结构	264
三、塔盘的支承	268
第四节 填料塔结构.....	270
一、喷淋装置	270
二、液体再分布器	273
三、支承结构	274
习 题.....	276
第九章 搅拌器的机械设计.....	280
第一节 概 述.....	280
第二节 搅拌器的型式及选型.....	282
第三节 搅拌器的功率.....	283
一、搅拌器功率和搅拌器作业功率	283
二、影响搅拌器功率的因素	284
三、从搅拌作业功率的观点决定搅拌过程的功率	284
第四节 搅拌罐结构设计.....	285
一、罐体的尺寸确定	285
二、顶盖的结构	287
第五节 传动装置及搅拌轴.....	289
一、传动装置	289
二、轴的计算	291
第六节 轴 封.....	292
一、填料密封	292
二、机械密封	293
参考文献.....	294
附 录.....	295
一、常用金属材料的物理性能	295
二、优质碳素结构钢的钢号和化学成分	297
三、锅炉钢板的机械性能	298
四、容器钢的化学成分和机械性能	299

五、常用不锈钢的机械性能及用途	302
六、钢板、钢管、锻件和螺栓的高温机械性能	303
七、无缝钢管的尺寸范围及常用系列	309
八、螺栓螺母材料组合及适用温度范围	310
九、钢板、钢管、锻件和螺栓的许用应力	311
十、热轧钢板的尺寸规格(GB709—88)	323
十一、图 5-5 和图 5-7~图 5-14 的数据表	325
十二、长颈法兰的最大允许工作压力(JB4700—92)	332
十三、甲型、乙型平焊法兰和长颈法兰螺栓材料的选用	333
十四、甲型平焊法兰、乙型平焊法兰尺寸系列	336
十五、管法兰标准选择	341
十六、双鞍式支座标准(JB/T4712—92)	348
十七、耳式支座标准(JB/T4725—92)	358
十八、裙座上开设人孔处的断面模数及面积	360
十九、裙座标准系列尺寸	361

第一篇

化工设备材料

第一章 化工设备材料及其选择

第一节 概 述

化学工业是多品种的基础工业,为了适应化工生产的多种需要,化工设备的种类很多,设备的操作条件也比较复杂。按操作压力来说,有真空、常压、低压、中压以至高压和超高压;按操作温度来说,有低温、常温、中温和高温;处理的介质大多数又有腐蚀性,或为易燃、易爆、有毒、剧毒等。有时对于某种具体设备来说,既有温度、压力要求,又有耐腐蚀要求,而且这些要求有时还是互相矛盾的,有时某些条件又经常变化。

这种多样性的操作特点,给化工设备选用材料造成了复杂性,因此合理选用化工设备材料是设计化工设备的重要环节,在选择材料时,必须根据材料的各种性能及其应用范围综合考虑具体的操作条件,抓住主要矛盾,遵循适用、安全和经济的原则。

选用材料的一般要求是:

- (1)材料品种应符合我国资源和供应情况;
- (2)材质可靠,能保证使用寿命;
- (3)要有足够的强度,良好的塑性和韧性,对腐蚀性介质能耐腐蚀;
- (4)便于制造加工,焊接性能良好;
- (5)经济上合算。

例如,对于压力容器用钢材来说,对中、低压和高压容器,经常处于有腐蚀性介质的条件下工作,除了承受较高的介质内压力(或外压)以外有时还会受到冲击和疲劳载荷的作用;在制造过程中,还要经过各种冷、热加工(如下料、卷板、焊接、热处理等)使之成型;因此,对压

力容器用钢板有较高的要求:除随介质的不同要有耐腐蚀的要求以外,应有较高的强度,良好的塑性、韧性和冷弯性能,缺口敏感性要低,加工和焊接性能良好。对低合金钢板材要注意是否有分层、夹渣、白点和裂纹等缺陷,对后二者是不允许的。对中、高温容器,由于钢材在中、高温的长期作用下,金相组织和机械性能等将发生明显的变化,又由于化工用的中、高温设备往往都要承受一定的介质压力,因此,选择中、高温设备用钢时,还必须考虑到材料的组织稳定性和中、高温的机械性能。对于低温设备用钢,还要着重考虑设备在低温下的脆性破裂问题。

第二节 材料的性能

材料的性能包括机械性能、物理性能、化学性能和工艺性能等。

一、机械性能

构件在使用过程中受力(载荷)超过某一限度时,就会发生变形,甚至断裂失效。我们把材料抵抗外力而不产生超过允许的变形或不被破坏的能力,叫做材料的机械性能。通常用材料在外力作用下表现出来的弹性、塑性、强度、硬度和韧性等特征指标来衡量材料的机械性能。

金属材料在外力作用下所引起的变形和破坏过程,大致可分为三个阶段:(1)弹性变形阶段;(2)弹-塑性变形阶段;(3)断裂。一般的断裂有两种形式:断裂之前没有明显塑性变形阶段的,称为脆性断裂;经过大量塑性变形之后才发生断裂的,称之为韧性断裂。

1. 强 度

强度是固体材料在外力作用下抵抗产生塑性变形和断裂的特性。常用的强度指标有屈服点和抗拉强度等。

(1) 屈服点(σ_s)

金属材料承受载荷作用,当载荷不再增加或缓慢增加时,仍继续发生明显的塑性变形,这种现象,习惯上称为“屈服”。发生屈服现象时的应力,即开始出现塑性变形时的应力,称为“屈服点”,用 σ_s (MPa)表示。它即代表材料抵抗产生塑性变形的能力。

$$\sigma_s = \frac{p_s}{F_0} \quad (1-1)$$

式中 p_s 是负荷不增加,甚至有所降低时,试件还继续伸长的最小负荷(N)。 F_0 是试件的横截面积(m^2)。

除退火的或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有明显的屈服点外,大多数金属合金没有明显的屈服点。因此,规定发生0.2%残余伸长时的应力,作为“条件屈服点”,以 $\sigma_{0.2}$ (MPa)表示。

$$\sigma_{0.2} = \frac{p_{0.2}}{F_0} \quad (1-2)$$

式中 $p_{0.2}$ 为产生 0.2% 残余伸长的负荷(N)。

工程技术上,绝大部分构件和零件,都是在弹性状态下工作,不允许发生塑性变形,常因过量的塑性变形而失效。因此,常以开始塑性变形的强度作为主要依据。实际上因不同零件允许塑性变形的程度有不同要求,通常分别选用比例极限、弹性极限或屈服点作为设计的依据。

因为弹性极限和屈服点都可以代表材料的开始塑性变形的抗力,从实用意义上来看,它们之间没有原则差别,都是材料的微量塑性变形的抗力,只是规定的残余变形量不同。若要区别,弹性极限可以叫做开始塑性变形抗力的强度指标;屈服点可以叫做明显塑性变形抗力的强度指标。由于大部分构件和零件在工作条件下允许产生塑性变形量并不十分严格,而且设计时还要有安全系数,所以最常用的是材料的屈服点。屈服点是金属材料最重要的机械性能指标之一,它是设计和选材的主要依据。

(2) 抗拉强度(σ_b)

金属材料在受力过程中,从开始加载到发生断裂所能达到的最大应力值,叫做抗拉强度。由于外力形式的不同,有抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。抗拉强度是压力容器设计常用的性能指标,它是试件拉断前最大负荷下的应力,以 σ_b (MPa) 表示。

$$\sigma_b = \frac{p_b}{F_0} \quad (1-3)$$

式中 p_b 为拉断前试件所承受的最大负荷(N)。

抗弯强度是铸铁等低塑性和脆性材料的强度指标之一,以 σ_{bb} (MPa) 表示。

$$\sigma_{bb} = \frac{M}{W} \quad (1-4)$$

式中 M ——弯矩, N·m;

W ——标准试件的抗弯断面模数, m^3 。

工程上所用金属材料,不仅希望具有高的 σ_s 值,而且还希望具有一定的屈强比(σ_s/σ_b)。屈强比愈小,就具有较大的塑性储备,愈不容易发生危险的脆性破坏,但是,屈强比太低,材料的强度水平就不能充分发挥。反之,屈强比愈大,材料的强度水平能得到充分发挥,但塑性储备较小。实际上,一般还是希望屈强比高一些。

(3) 蠕变强度(σ_n)

高温下材料的屈服点、抗拉强度、塑性及弹性模数等性能均发生显著的变化。通常是,随着温度的升高,金属的强度降低,塑性提高。除此而外,金属材料在高温下还有一个重要特性,即“蠕变”。所谓蠕变,是指在高温时,在一定的应力下,应变随时间而增加的现象,或者金属在高温和应力作用下逐渐产生塑性变形的现象。

对某些金属如铅、锡等,在室温下也有蠕变现象。钢铁和许多有色金属,只有当温度超过一定值以后才会出现蠕变。例如,碳素钢在温度超过 420℃ 时,合金钢在温度超过 450℃ 时,轻合金在温度超过 50℃~150℃ 时,才发生蠕变。

在生产实际中,由于金属材料的蠕变而造成的破坏事例并不少见,例如:高温高压的蒸汽管道,由于存在蠕变,它的管径随时间的延长不断增大,壁厚减薄,最后可能导致破裂。

材料在高温条件下,抵抗发生缓慢塑性变形的能力,用蠕变强度 σ_n (MPa) 表示。常用的蠕变强度有两种。一种是在工作温度下引起规定变形速度(如 $V=1 \times 10^{-5}/h$ 或 $V=1 \times$

$10^{-4}/h$)的应力值;另一种是在一定工作温度下,在规定的使用时间内,使试件发生一定量的总变形的应力值。如在某一温度下,在一万小时或十万小时内产生的总变形量为1%时的最大应力。

材料的蠕变强度与温度、蠕变速度有关。表1-1给出了不耐耐酸钢(1Cr18Ni9Ti)在各种温度及不同蠕变速度下的蠕变强度值。

表 1-1 1Cr18Ni9Ti 的蠕变强度 (MPa)

蠕变速率 [mm/(mm·h)]	温 度 (°C)			
	425	475	520	560
10^{-6}	176	91	33	6
10^{-7}	—	88	19	—

(4)持久强度(σ_D)

在给定温度下,促使试样或工件经过一定时间发生断裂的应力叫做持久强度,以 σ_D (MPa)表示。在化工容器用钢中,设备的设计寿命一般为十万小时,以 $\sigma_{10^5}(\sigma_D)$ 表示试件经十万小时断裂的应力。

持久强度是一定温度和一定应力下材料抵抗断裂的能力。在相同的条件下,能支持的时间越久,则该材料抵抗断裂的能力越大。

(5)疲劳强度(σ_{-1})

很多构件与零件,经常受到大小及方向变化的交变载荷,这种交变载荷,使金属材料在应力远低于屈服点时就发生断裂,这种现象称为“疲劳”。金属在无数次交变载荷作用下,而不致引起断裂的最大应力,称为“疲劳极限”。

实际上不可能进行无数次的试验,而把经 10^6 次~ 10^8 次循环试验作为疲劳强度。如钢在纯弯曲交变载荷下循环 5×10^6 次时,所测得不发生断裂的最大应力,即算作它的弯曲疲劳强度,用 σ_{-1} (MPa)表示。一般钢铁的弯曲疲劳强度值,只是抗拉强度的一半,甚至还低一些。

金属的疲劳强度与很多因素有关,如合金成分、表面状态、组织结构、夹杂物的多少与分布状况以及应力集中情况等。

2. 塑 性

金属的塑性,是指金属在外力作用下产生塑性变形而不被破坏的能力。常用的塑性指标是延伸率和断面收缩率。

(1)延伸率(δ)

试件受拉力拉断后,总伸长的长度与原始长度之比的百分率,称为延伸率,以 $\delta(\%)$ 表示。

$$\delta = \frac{\Delta l_k}{l_0} \times 100\% = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 l_k ——试件断裂后的标距长度,mm;

l_0 ——试件的原始标距长度,mm;

Δl_k ——断裂后试件的绝对伸长,mm。即它是在试件整个拉伸至断裂时所产生的塑

性变形量。

$$\Delta L_K = \Delta L_B + \Delta L_u$$

其中 ΔL_B 为均匀伸长; ΔL_u 为缩颈处的集中伸长变形。

由于试件的总伸长为均匀伸长与产生局部缩颈后伸长之和,故 δ 值的大小与试件尺寸有关。为了便于比较,试件必须标准化。常用的试件计算长度规定为其直径的 5 倍或 10 倍,其延伸率分别用 δ_5 或 δ_{10} 表示。

(2) 断面收缩率(ψ)

试件拉力拉断后,断面缩小的面积同原始截面面积比值的百分率,叫做断面收缩率,以 $\psi(\%)$ 表示。

$$\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 F_K ——断裂后试件的最小截面积, mm^2 ;

F_0 ——试件的原始截面积, mm^2 。

断面收缩率 ψ 与试件尺寸无关,它能更可靠、更灵敏地反映材料塑性的变化。

延伸率和断面收缩率,都是用来度量金属材料塑性大小的,延伸率和断面收缩率愈大,表示金属材料的塑性愈好。如纯铁的延伸率几乎为 50%,而普通铸铁的延伸率还不到 1%,因此,纯铁的塑性远比铸铁好。

(3) 冷弯(角)

冷弯角也是衡量金属材料和焊缝塑性的指标之一,它是由冷弯试验测定的。金属材料和焊接接头在室温下以一定的内半径进行弯曲,在试样被弯曲受拉面出现第一条裂纹前的变形越大,材料的塑性就越好。焊接接头的冷弯试验常是以一定的弯曲角度下($\alpha = 120^\circ$ 或 180°)是否出现裂纹为评定标准。

冷弯试验不但是对压力容器用材的一项验收指标,而且在容器制造过程中,对焊接工艺试板和产品试板均需做冷弯试验。(对不锈钢冲击试验可以不做,但冷弯试验必须做。)

上述塑性指标在工程技术中具有重要的实际意义。首先,良好的塑性可顺利地进行某些成型工艺,如弯卷、锻压、冷冲、焊接等。其次,良好的塑性使零件在使用中能由于塑性变形而避免突然断裂,故在静载荷下使用的容器和零件,都需要具有一定的塑性。当然,塑性过高,材料的强度必然低下,这是不利的。

3. 硬 度

硬度是指金属材料表面上不大的体积内抵抗其他更硬物体压入表面发生变形或破裂的能力。硬度不是一个单纯的物理量,而是反映材料弹性、强度、塑性和韧性等的综合性能指标。

常用的硬度测量方法都是用一定的载荷(压力)把一定的压头压入金属表面,然后测定压痕的面积或深度。当压头和压力一定时,压痕面积愈大或愈深,硬度就愈低。根据压头和压力的不同,常用的硬度指标可分为布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)、维氏硬度(HV)等。

布氏硬度是以直径为 $D(10, 5 \text{ 或 } 2.5\text{mm})$ 的钢球,在压力 $p(\text{N})$ 下压入金属表面而测得,如图 1-1 所示。

p 与 D 成一定比例,对于钢铁而言: