



高等学校教材

过程装备基础

GUOCHENG
ZHUANGBEI
JICHU

第二版

朱孝钦 刘俊明 主编



化学工业出版社

高等学校教材

过程装备基础

(第二版)

朱孝钦 刘俊明 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

全书内容分为6篇：绪论简要地介绍过程装备的基本概念和范畴，是过程装备的共性基础知识；第1篇“过程装备力学基础”主要介绍过程装备技术中涉及的力学基础知识和基本工程计算；第2篇“工程材料”简明扼要地介绍常用材料的性能、牌号和用途以及钢的热处理等基础知识；第3篇“机械设计基础”主要从传递动力的角度介绍一些常见的机械传动（如带传动、链传动、齿轮传动和蜗杆传动等）的工作原理、标准规范、设计计算方法及其主要零部件的工作原理、组合设计和选用方法；第4篇“压力容器及压力管道”主要围绕压力容器及压力管道新的国家标准，重点讲述如何正确应用标准进行一般压力容器及压力管道的设计和零部件选用，并介绍一般压力容器及压力管道的制造、使用与管理；第5篇“过程设备概论”着重介绍工业生产中较为常见的过程设备的类型、结构、工作原理、机械特征和选用方法，使读者能进行合理选型或结构设计，并能进一步借助有关的技术资料进行一般工程计算，以培养解决工程实际问题的能力。各章后附有相关思考题和习题。

本书适合作为高等院校过程工艺类及相近的非机械专业“过程装备基础”类课程的教材或教学参考资料，也可供有关专业的读者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程装备基础/朱孝钦，刘俊明主编. —2版. —北京：化学工业出版社，2011.8

高等学校教材

ISBN 978-7-122-11556-0

I. 过… II. ①朱…②刘… III. 化工过程-化工设备-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第113924号

责任编辑：程树珍 金玉连

责任校对：边 涛

装帧设计：周遥

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张18½ 字数467千字 2011年8月北京第2版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：35.00元

版权所有 违者必究

主 编 朱孝钦 刘俊明

副主编 路智敏 谭志洪 林 整 王庆均 何 峥

姜国平 郭晓霞 宋鹏云

主 审 胡明辅

参 编 张 昱 刘 曦 戚冬红 蔡洪涛 张 宇

董永刚 杨双全 吕 硕 别 玉 常静华

第二版前言

本书自 2006 年 8 月出版以来,在国内多所高等工科院校得到使用,受到了使用院校师生的好评。然而,随着过程装备技术的发展,相应的技术标准近几年发生了比较大的改变,有必要对本书第一版进行修订。考虑到本书的使用范围较广,本次修订基本保持了第一版教材编排结构和体系。只是对教材内容及其安排进行了较大幅度的调整,强调教学内容的科学性、综合性和实用性,突出了各篇(章)内容的相对独立和完整,从而便于教师根据不同学科专业的教学要求、不同学时情况选择教学内容。

本书由朱孝钦和刘俊明主编,路智敏、谭志洪、林整、王庆均、何峥、姜国平、宋鹏云为副主编。具体编写分工如下:宋鹏云编写绪论、第 12 章和第 13 章,刘俊明、姜国平、吕硕编写第 1 章和第 5 章,郭晓霞编写第 2 章,何峥、董永刚、杨双全编写第 3 章和第 4 章,王庆均、蔡洪涛编写第 6 章和第 7 章,林整、刘曦编写第 8 章和第 17 章,张昱、路智敏编写第 9 章,路智敏编写第 10 章和第 11 章,朱孝钦编写第 14 章和第 19 章,朱孝钦、别玉、常静华编写第 15 章,谭志洪、张宇编写第 16 章,戚冬红、朱孝钦编写第 18 章,姜国平、吕硕编写附录。

全书由胡明辅教授主审。使用过本书第一版的教师提出了许多建设性的意见,对本书的修订和完善起到了积极的作用,谨此致谢。借此机会,还向参加过本书第一版编写工作的李鸣教授、李淑兰教授、白竞平副教授、高光藩副教授、杨培洵副教授和杨玉芬副教授等深表谢意。

限于编者水平,修改后的教材不妥甚至错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者
2011 年 4 月

第一版前言

本书根据过程工艺类专业对学习过程装备的基本要求,总结昆明理工大学、太原理工大学、内蒙古工业大学、南昌大学和江苏工业学院五所院校长期教学经验,在参考国内其他高校编写的同类教材的基础上,结合过程装备技术的最新发展,探索加强基础、联系实际和强化能力训练的教学模式,精心编写而成。

本书编写进行了一些尝试:一是注重理论与方法的有机结合,在不破坏基本理论的系统性、严肃性的前提下,着重其实用性;二是力求更全面地介绍过程装备的基础理论和工程应用知识,以拓宽学生的知识面;三是注重介绍有关的标准、规范,且以当前最新版的标准、规范为依据,以适应工程实际的需要;四是注意汲取国外同类教材的一些好的编写方法。此外,鉴于过程装备涉及面广,我们编写的原则是面广而精,努力做到集理论、设计、资料于一体,使读者通俗易学且便于实际应用。根据不同学科专业的教学要求,教师可以选择讲授其中部分内容。除作为教材外,本书还可供相关工程技术人员参考。

本书由朱孝钦主编,刘俊明、白竞平、李鸣、高光藩、宋鹏云为副主编。具体编写分工如下:宋鹏云编写绪论、第10章~第12章,刘俊明、高光藩编写第1章~第5章,杨玉芬编写第6章,张昱编写第7章,白竞平、路智敏编写第8章、第9章,朱孝钦编写第13章、第14章、第19章、附录,谭志洪、李鸣编写第15章、第16章,李淑兰、杨培洵编写第17章,戚冬红编写第18章。

全书由胡明辅教授主审。在编写过程中,杨明、邓荣群、刘辉等同志对本书例题、习题及插图做了大量工作,内蒙古工业大学张东利教授生前对本书提出了不少宝贵意见,特此一并致谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006年5月

目 录

0 绪 论	1
0.1 过程工业	1
0.2 过程装备	1
0.2.1 过程装备的基本概念	1
0.2.2 过程装备的基本要求	1
0.3 过程装备基础的主要内容	2

第 1 篇 过程装备力学基础

第 1 章 引论	3
1.1 构件	3
1.2 强度、刚度与稳定性	3
1.3 杆件变形的基本形式	4
思考题	5
第 2 章 构件受力分析与平衡理论	6
2.1 基本概念和基本原理	6
2.1.1 基本概念	6
2.1.2 基本原理	7
2.2 平面力系的简化与平衡	8
2.2.1 平面汇交力系的合成与平衡	8
2.2.2 平面平行力系的合成与平面力偶理论	9
2.2.3 平面力偶系的合成与平衡	10
2.2.4 平面一般力系的简化与平衡	11
2.3 约束和约束力	13
2.4 受力分析与约束力的求解	15
思考题	18
习题	19
第 3 章 杆件的内力分析	22
3.1 外力与内力的平衡 内力分量	22
3.2 内力分析与内力图	23
3.2.1 直杆受轴向拉伸或压缩时的内力图	24
3.2.2 圆轴受扭转时的内力图	25
3.2.3 平面弯曲梁的内力图	26
思考题	31
习题	32
第 4 章 应力与应变	34
4.1 正应力与切应力	34
4.2 一点处应力状态的概念	35
4.3 正应变与切应变	37
4.4 材料的力学性能及其测试	37
4.4.1 材料在拉伸时的力学性能	38
4.4.2 材料在压缩时的力学性能	41
4.5 线弹性材料的物性关系	42
思考题	43
第 5 章 杆件的强度与刚度计算	44
5.1 概述	44
5.1.1 强度条件	44
5.1.2 刚度条件	44
5.2 直杆轴向拉伸与压缩时的强度与变形计算	44
5.2.1 直杆轴向拉伸与压缩时的强度计算	44
5.2.2 直杆轴向拉伸与压缩时的变形计算	46
5.3 杆件剪切时的强度计算	48
5.3.1 剪切的概念与实例	48
5.3.2 剪切与挤压的实用计算	49
5.4 圆轴扭转时的强度与刚度计算	51
5.4.1 圆轴扭转时横截面上的切应力	51
5.4.2 圆轴扭转时的强度条件和刚度条件	53
5.5 平面弯曲梁的强度与刚度计算	56
5.5.1 平面弯曲梁横截面上的正应力分析与强度计算	56
5.5.2 平面弯曲梁的变形计算	62
5.6 直杆组合变形时的强度计算	67
5.6.1 弯曲与拉伸（压缩）的组合	67

5.6.2 弯曲与扭转的组合	68	5.7.3 超静定梁	71
5.7 超静定问题简介	69	思考题	72
5.7.1 超静定问题的概念	69	习题	73
5.7.2 热应力问题	70		
第6章 内压薄壁壳体的应力分析	79		
6.1 概述	79	6.4 特殊回转薄壳中的薄膜应力	83
6.2 回转薄壁壳体的几何特性	79	6.5 回转薄壁壳体中的边缘应力	86
6.3 回转薄壁壳体的无力矩理论	80	思考题	87
6.3.1 无力矩理论概述	80	习题	88
6.3.2 无力矩理论的基本方程式	81		
第7章 外压薄壁壳体与压杆的稳定性分析	89		
7.1 外压薄壁壳体的稳定性分析	89	7.2.1 压杆稳定性的概念	91
7.1.1 概述	89	7.2.2 提高压杆稳定性的措施	92
7.1.2 外压圆筒的稳定性计算	89	思考题	93
7.2 压杆稳定性简介	91	习题	93

第2篇 工程材料

第8章 过程装备材料	94		
8.1 过程装备用金属材料	94	8.2.1 高分子材料	106
8.1.1 金属材料的基础知识	94	8.2.2 陶瓷材料	106
8.1.2 过程装备常用钢材	98	8.2.3 石墨	107
8.1.3 铸铁	102	8.2.4 搪瓷材料	108
8.1.4 有色金属及其合金	103	8.3 复合材料简介	108
8.2 非金属材料	105	思考题	108

第3篇 机械设计基础

第9章 螺纹连接	110		
9.1 螺纹连接的基本类型和螺纹连接件	110	9.3.1 改善螺纹牙间的载荷分配不均的 现象	115
9.1.1 螺纹连接的基本类型	110	9.3.2 减小螺栓的应力幅	115
9.1.2 螺纹连接件	111	9.3.3 减小应力集中	116
9.1.3 螺纹连接件的常用材料和力学 性能等级	113	9.3.4 避免附加弯曲应力	116
9.2 螺纹连接的预紧和防松	113	9.3.5 采用合理的制造工艺	117
9.2.1 螺纹连接的预紧	113	思考题	117
9.2.2 螺纹连接的防松	113		
9.3 提高螺栓连接强度的措施	115		
第10章 带传动及链传动	118		
10.1 带传动概述	118	10.2.2 带的应力分析	119
10.1.1 带传动的工作原理	118	10.2.3 带传动的弹性滑动与失效形式	120
10.1.2 带传动的类型和特点	118	10.3 V带传动及其选用计算	121
10.1.3 带传动的应用	118	10.3.1 V带的结构	121
10.2 带传动工作情况分析	119	10.3.2 普通V带规格和基本尺寸	122
10.2.1 带传动的受力分析	119	10.3.3 普通V带带轮的结构	123

10.3.4 带传动的张紧装置	123	10.4.2 链传动的类型	131
10.3.5 V带传动设计计算	125	10.4.3 链传动的特点与应用	132
10.4 链传动简介	131	思考题	132
10.4.1 链传动的组成	131	习题	132
第11章 齿轮传动及蜗杆传动	133		
11.1 齿轮传动概述	133	特点	139
11.2 齿轮啮合的基本定律与渐开线齿廓	134	11.5.2 斜齿轮的几何尺寸计算	140
11.2.1 齿轮啮合的基本定律	134	11.6 齿轮传动的失效形式和齿轮材料	142
11.2.2 渐开线齿廓	134	11.6.1 齿轮传动的失效形式	142
11.3 渐开线标准直齿圆柱齿轮各部分名称及基本尺寸	136	11.6.2 齿轮材料	143
11.3.1 渐开线标准直齿圆柱齿轮各部分的名称	136	11.7 锥齿轮传动简介	144
11.3.2 渐开线标准直齿圆柱齿轮的基本参数和几何尺寸	136	11.8 蜗杆传动简介	145
11.4 渐开线齿轮的正确啮合条件和连续传动条件	138	11.8.1 蜗杆传动的特点和应用	145
11.4.1 渐开线齿轮的正确啮合条件	138	11.8.2 蜗杆传动的分类	145
11.4.2 渐开线齿轮连续传动条件	139	11.8.3 蜗杆传动的失效形式与材料选择	145
11.5 斜齿圆柱齿轮传动	139	11.9 齿轮、蜗杆和蜗轮的结构	146
11.5.1 斜齿圆柱齿轮的形成及其传动		11.9.1 齿轮结构	146
第12章 轴与轴承	149	11.9.2 蜗杆和蜗轮的结构	147
12.1 轴	149	思考题	148
12.1.1 轴的分类	149	习题	148
12.1.2 轴常用的材料	149		
12.1.3 轴径的初步计算	150	12.2.2 离合器	156
12.1.4 轴的结构设计	152	12.3 轴承	158
12.2 轴的连接	153	12.3.1 滑动轴承	158
12.2.1 联轴器	154	12.3.2 滚动轴承	163
第13章 轮系及减速器	170	思考题	168
13.1 轮系的分类及功用	170	习题	169
13.1.1 轮系的分类	170		
13.1.2 轮系的功用	170	13.3.1 减速器的主要型式及应用特点	173
13.2 定轴轮系的传动比	171	13.3.2 减速器的组成、结构和润滑	174
13.3 减速器	173	13.3.3 标准减速器	175
		思考题	176
		习题	176

第4篇 压力容器及压力管道

第14章 压力容器设计	178		
14.1 概述	178	14.1.5 压力容器的失效形式与设计准则	180
14.1.1 压力容器设计内容及有关规范	178	14.1.6 压力容器零部件标准的两个最基本参数——公称直径（尺寸）与公称压力	181
14.1.2 压力容器的总体结构及其设计特点	178	14.2 压力容器的设计计算	183
14.1.3 压力容器的分类	179		
14.1.4 压力容器的设计载荷条件	180		

14.2.1 压力容器的结构	183	14.4.2 立式容器支座	208
14.2.2 内压容器的设计计算	185	14.5 容器开孔补强	210
14.2.3 外压容器的设计计算	192	14.5.1 容器主要的开孔装置	210
14.3 法兰密封设计	198	14.5.2 开孔补强的结构与设计	210
14.3.1 螺栓法兰连接结构与密封原理	198	14.6 耐压试验与泄漏试验	214
14.3.2 法兰结构类型	199	14.6.1 耐压试验	214
14.3.3 法兰密封面和垫片的选择	200	14.6.2 泄漏试验	216
14.3.4 法兰标准	201	思考题	216
14.4 容器支座	206	习题	217
14.4.1 卧式容器支座	206		
第 15 章 压力容器的制造、使用与管理	219		
15.1 概述	219	15.2 压力容器的制造管理	223
15.1.1 国内压力容器管理方面的主要 法规和条例	219	15.3 压力容器的使用管理	224
15.1.2 压力容器的类别划分	220	15.3.1 使用单位的主要基础工作	224
15.1.3 在用压力容器安全状况等级的 划分	222	15.3.2 压力容器的定期检验	225
		思考题	226
第 16 章 压力管道	227		
16.1 概述	227	16.3.3 管道支吊架的选用	238
16.1.1 压力管道定义	227	16.4 压力管道设计概论	239
16.1.2 压力管道的分类	227	16.4.1 压力管道的设计程序和主要 内容	239
16.1.3 压力管道的类别和级别划分	227	16.4.2 压力管道设计的一般原则	239
16.1.4 压力管道的基本组成	228	16.4.3 压力管道的结构设计	240
16.2 管道元件及其选择	228	16.5 压力管道的制造、安装与使用管理 简介	241
16.2.1 管子及其选择	228	16.5.1 压力管道的制造管理	241
16.2.2 管件及其选择	231	16.5.2 压力管道的安装管理	241
16.2.3 阀门	233	16.5.3 压力管道的使用管理	241
16.3 管道支吊架及其选用	236	思考题	242
16.3.1 管道支吊架的分类	236		
16.3.2 常用管道支吊架的结构特征及其 应用	237		

第 5 篇 过程设备概论

第 17 章 传热与传质设备	244		
17.1 换热设备	244	17.2.2 塔设备的总体结构	254
17.1.1 概述	244	17.2.3 塔设备的主要机械特征	255
17.1.2 管壳式换热设备	246	17.2.4 塔设备设计简介	256
17.1.3 换热设备技术进展概述	252	17.2.5 塔设备的技术进展概述	257
17.2 塔设备	253	思考题	258
17.2.1 概述	253		
第 18 章 化学过程设备	259		
18.1 概述	259	18.2 釜式反应设备	260
18.1.1 化学过程设备的应用及其特性	259	18.2.1 釜式反应设备的总体结构与机 械特征	260
18.1.2 化学过程设备的类型	259		

18.2.2 釜式反应设备的设计简介	261	18.2.6 传动装置	264
18.2.3 釜体的结构与设计	261	18.2.7 密封装置	264
18.2.4 传热装置	262	思考题	265
18.2.5 搅拌装置	263		
第 19 章 机械过程设备	266		
19.1 物料输送设备	266	19.2.2 气固分离设备	272
19.1.1 液体输送设备	266	19.3 粉体加工设备	272
19.1.2 气体输送设备	267	19.3.1 粉体粉碎过程设备	272
19.1.3 固体物料输送设备	268	19.3.2 粉体分级设备	274
19.2 机械分离设备	269	思考题	277
19.2.1 固液分离设备	270		

附录

附录 1 型钢尺寸规格表	278	附录 3 钢管许用应力	282
附录 2 钢板许用应力	280		

参考文献	283
------------	-----

0 绪 论

0.1 过程工业

过程工业（也称流程工业）是涉及物质转化过程的工业部门总称。它是加工制造流程性物料（指以气体、液体和粉粒体等形态为主的材料）的产业，是现代制造业的重要组成部分。过程工业是一个非常巨大的产业，是国民经济发展中重要的基础性支柱产业。

过程工业包括化工、炼油、轻工、冶金、食品、制药、建材、采矿、环保、能源、动力、核能和生物技术等工业行业。这类工业的特点是：所使用的原料主要是自然资源，生产过程多半是连续的，物料中的物质在生产过程中经历了许多物理变化和化学变化，产量的增加主要依靠扩大工业生产规模和形成成套装置来实现，容易造成环境污染且治理比较困难，生态化和绿色化是其发展方向。过程工业的范围相当广泛，涉及能源转换、资源利用和环境保护，不仅包括国民经济的一些支柱产业，而且也是一些高新技术产业的基础，如：生物、医药、微电子和纳米材料等。因此，过程工业是一个国家发展生产和增强国防力量的基础，需要应用现代技术和大量投资，其发展水平体现了一个国家的综合国力，在某种程度上是一个国家工业发展水平的重要标志。

0.2 过程装备

0.2.1 过程装备的基本概念

工业和军事上把装置和设备的总体称为装备，尤其是指技术装备。过程装备主要是指过程工业生产工艺过程中所涉及的典型装置和设备，是实现过程工业生产的硬件设施。从生产工艺的整体性考虑，一般称为装置，如合成氨装置；从局部或具体的情况考虑时，一般称为设备，如塔设备。

工业设备种类繁多，设备的分类也有许多不同的方法。习惯上，设备常按构件运动情况分为动设备和静设备。动设备即设备的构件产生运动或相对运动的设备，也称为机器或机械，如离心机、泵和压缩机等；静设备是指构件不产生运动或相对运动的设备，如塔设备、换热设备和储罐等。

过程装备中，常见的设备有塔类（如精馏塔、吸收塔和萃取塔）、炉类（如锅炉、加热炉和裂解炉）、釜类（如反应釜和聚合釜）、机类（如压缩机、风机、离心机、过滤机和破碎机等）、泵类（如离心泵和往复泵等）、储罐类和各种换热设备（如管壳式换热设备、板式换热设备等）。过程装备还包括用于计量、化验、检测与控制的仪表和自动化辅助装置。

随着过程工业的发展，过程装备不断向装置大型化、结构复杂化、性能高级化和技术综合化的方向发展，对过程装备的要求日益提高。

0.2.2 过程装备的基本要求

过程装备是过程工业生产中实现特定工艺过程的典型装置和设备。为满足安全、高效和低成本的生产要求，对过程装备的基本要求有以下几点。

(1) 安全可靠

由于过程工业生产常常涉及高温、低温、高压、真空和强腐蚀介质等苛刻条件,为了保证过程装备安全运行,过程装备应具有足够的承受能力承受设计寿命内可能遇到的各种载荷和苛刻条件。影响过程装备安全可靠性的因素主要有:材料的强度、韧性及其与介质的相容性,设备的刚度、抗失稳能力和密封性能等。由于过程装备所处理的物料很多是易燃、易爆、有毒的气体 and 液体介质,因此,过程装备的密封性能是否达到要求是一个十分重要的问题。对于正压操作的设备,物料的对外泄漏将会造成损失和污染环境,甚至引起火灾、爆炸;对于负压操作的设备,如空气等环境介质的内漏将影响正常的生产过程,也可能引起爆炸事故。

(2) 满足生产过程的要求

过程装备都有一定的功能要求,以满足生产的需要,如流体输送、热量交换、物料储存、化学反应和物质分离等,若其功能要求得不到满足,必然会影响整个生产过程的生产效率。此外,过程装备还有使用寿命的要求,例如,在石油、化工等行业中,一般要求高压设备的使用寿命不少于 20 年;塔设备和反应设备的使用寿命不少于 15 年,其中腐蚀、疲劳、蠕变和磨损等是影响过程装备使用寿命的主要因素。过程装备的零件、配件使用寿命也有一定时限的要求,一般为一个大修周期,如 3 年。

(3) 综合经济性好

综合经济性是衡量过程装备优劣的重要指标。如果综合经济性差,过程装备就缺乏市场竞争力,最终被淘汰。综合经济性好主要表现在生产效率高、消耗低,结构合理、制造简便,易于运输和安装,操作简单,可维护性和可修理性好,便于控制。

(4) 优良的环境性能

有害物质的泄漏是过程装备污染环境的主要因素之一,例如,埋地储罐内有害物质的泄漏会污染地下水,化工厂地面设备的“跑、冒、滴、漏”会污染空气和水。泄漏检测是发现泄漏源、控制有害物质浓度和保护环境的有效措施,有的发达国家已制定出强制性的规范标准,要求一些过程装备必须设有在线检测装置。

上述要求很难全部满足,设计和应用时应针对具体情况具体分析。一般来说,满足生产过程的要求、安全可靠是最基本的要求,应该得到保证。

0.3 过程装备基础的主要内容

过程装备涉及的内容非常广泛,包括过程装备的机械基础、过程装备内进行的各种物理过程和化学过程、保证过程装备正常运行的各种测量控制自动化辅助装置,也包括过程装备的设计、制造、使用、管理与维护等。

本书主要介绍过程装备的机械基础,包括过程装备力学基础、工程材料、机械设计基础、压力容器及压力管道、过程设备概论等方面的基础知识。

第 1 篇 过程装备力学基础

过程装备中的具体设备，大都要在各种载荷下工作，为了使这些设备安全可靠地运行，无论是设计还是运行维护，常涉及对物体所受外力的分析和物体在外力作用下的内力、变形等力学问题。本篇提供了从事过程工业的工程技术人员应具备的工程力学基础知识。通过学习，建立起工程力学的许多重要概念，为实际的工程分析、计算和应用奠定必要的理论基础并提供研究问题的思路和方法。

第 1 章 引 论

1.1 构件

任何过程装备都是由零部件组成的。所谓**零件**，是指机械加工中的最小元件，如螺栓、螺母、法兰、压力容器的封头和换热设备的管板等。所谓**部件**，是指过程装备中某一相对独立的部分，它在制造过程中需要预先由多个零件组装而成的整体，如压力容器的支座、人孔等。有些部件也是过程装备在运行过程中完成某一重要工艺任务的独立部分，如填料塔中的液体分布器、釜式反应设备中的搅拌器等。

工程力学中将受力分析的对象统称为**构件**，它可以是组成过程装备的零件、部件或过程装备的整体。根据工程中构件的几何形状和几何尺寸，可将它们归属于杆、板、壳、体四大类。

① **杆**—构件若一个方向的尺寸远大于其他两个方向的尺寸时，称之为杆。轴线（横截面形心的连线）为直线的杆称为直杆，横截面大小、形状不变的直杆称为等直杆。例如研究塔设备受风载荷作用下的强度和刚度问题时，就可以将整个塔设备抽象为直杆。

② **板**—构件若一个方向的尺寸远小于其他两个方向的尺寸且各处曲率均为零时，称之为板。例如压力容器的平盖。

③ **壳**—构件若一个方向的尺寸远小于其他两个方向的尺寸且至少有一个方向的曲率不为零时，称之为壳。例如过程装备的各种壳体。

④ **体**—构件若三个方向的尺寸具有相同的数量级时，称之为体。例如水坝、房屋的基础等。

虽然构件有杆、板、壳、体四大类，但在工程力学的分析中主要涉及杆件。

1.2 强度、刚度与稳定性

为了使工程中的构件在外力作用下能够安全可靠地进行工作，需要满足如下力学条件。

① **强度条件** 强度是指构件在外力作用下抵抗破坏的能力。在一般情况下，绝不允许构件的强度不足。例如储罐或气瓶在规定的最大工作压力下不允许破裂、钢丝绳在起吊重物时不能被拉断等。保证构件正常工作具备足够强度的条件，称为强度条件。

② 刚度条件 刚度是指构件在外力作用下抵抗变形的能力。所谓刚度失效,是指构件在外力作用下发生的变形过大,超过了正常工作所允许的变形量,这时即使构件的强度足够,但也会影响构件的正常工作。例如过程工业中管道的变形超过一定限度时,虽然不至于被破坏,但在管道变弯的最低部位就会发生物料沉积或积有冷凝水,从而影响管道的正常工作。像这种构件除了应满足强度条件之外,还应具有一定的刚度,把变形控制在允许的范围内。保证构件正常工作具有足够刚度的条件称为刚度条件。

③ 稳定性条件 稳定性是指构件在外力作用下保持其原有平衡形态的能力。构件受到外界的某种干扰力作用,会偏离原有的平衡形态。当干扰力消失,构件又重新回复到原平衡形态,则称这种平衡是稳定的,否则就是丧失了稳定性,称为失稳。如细长受压直杆和受外压的薄壁圆筒,都有稳定性问题。保证构件正常工作具有足够稳定性的条件称为稳定性条件。

对构件进行受力分析,研究构件受力后的变形和破坏的规律,可为解决构件的强度、刚度和稳定性问题提供必要的理论基础和计算依据。

1.3 杆件变形的基本形式

工程中实际杆件的受力是多种多样的,相应的变形也是多种多样的,然而,杆件变形的基本形式可归纳为如下四种类型。

① 轴向拉伸或压缩 当杆件两端承受沿轴线方向的拉力或压力载荷作用时,杆件将产生伸长或压缩变形,如图 1-1(a)、(b) 所示。例如活塞式压缩机中的活塞杆、桁架中的杆件等均属于轴向拉伸或压缩变形。

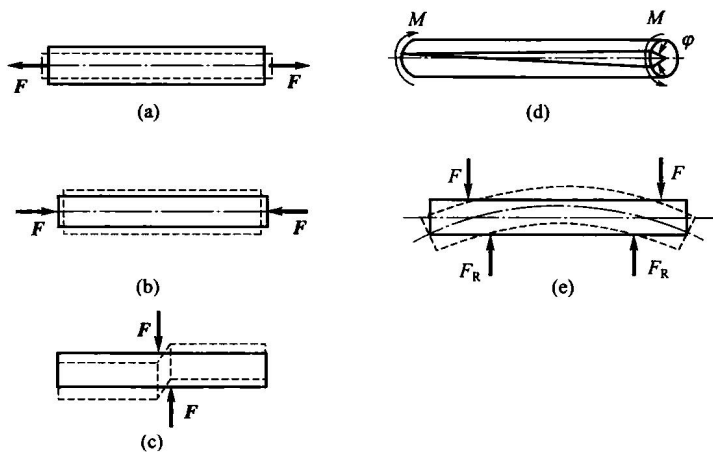


图 1-1 杆件变形的基本形式

② 剪切 在平行于杆件横截面两个相距很近的平面内,方向相反地作用两个横向力,当这两个力相互错动并保持它们之间的距离不变时,杆件将产生相对错动的剪切变形,如图 1-1(c) 所示。例如各种机械中许多的连接件如键、销钉和螺栓等均属于剪切变形。

③ 扭转 当作用在杆件上的力组成作用在垂直于杆轴线平面内的力偶时,杆件任意两横截面之间将产生绕轴线的相对转动,如图 1-1(d) 所示。例如机械中的各类传动轴均属于扭转变形。

④ 弯曲 当外力或外力偶与杆件的轴线垂直作用时杆件将发生弯曲变形,其轴线由直

线变成曲线，如图 1-1(e) 所示。例如支承楼板的混凝土梁、承受风载荷作用的塔设备等均属于弯曲变形。习惯上将在外力或外力偶作用下产生弯曲变形或以弯曲变形为主的杆件称为梁。

总之，杆件在外力作用下将产生相应的变形，多种可能的外力作用方式导致杆件产生多种不同的变形，但这些变形总可以归结为上述四种变形基本形式的组合，称为组合变形。

思考题

- 1-1 过程装备零部件的意义是什么？
- 1-2 什么叫构件？根据工程中构件的几何形状和几何尺寸，如何分类？
- 1-3 构件在外力作用下能够安全可靠地进行工作，需要满足哪些力学条件？
- 1-4 构件的强度和刚度有何区别与联系？能否说构件的刚度大其强度一定高？
- 1-5 杆件变形的基本形式有哪几种？
- 1-6 什么叫组合变形？何种杆件可称之为梁？

第2章 构件受力分析与平衡理论

2.1 基本概念和基本原理

2.1.1 基本概念

(1) 力

力是物体间的相互作用。物体受到外力作用时会产生两种效应：一种是使物体的运动状态发生改变，称之为力的**外效应**；另一种是使物体产生变形，称之为力的**内效应**。实践表明，力对物体的效应决定于三个要素，即力的大小、方向和作用点，力的单位为 N 或 kN。

按照力的作用方式，可将力分为体积力和表面力。体积力是物体间通过场（如重力场、电磁场）而间接作用的力（如重力、电磁力），这种力连续分布于物体各点。表面力是通过物体间的直接接触而作用的力，在接触表面上连续分布（如流体对物体的压力）。通常体积力或表面力在其作用范围内各点的作用强弱程度是不同的。表示力在其所作用范围内各点强弱程度的量称为力的**集度**。表面分布力的集度为每单位面积上的力，其单位为 Pa 或 MPa；体积力的集度为每单位体积内的力，其单位为 N/m^3 或 kN/m^3 。均匀分布的力就是力在各点的集度都是相同的。对于杆件而言，常用**线集度**表示力沿长度方向的分布情况，其单位为 N/m 或 kN/m 。线集度既可由表面力集度也可由体积力集度转化而来。如果表面力的作用面积相对较小时，可以将其看作是作用于一点处的**集中力**。因此，集中力是一种近似处理的结果。通常将物体所受重力看作是作用在其重心的集中力，这是将重力这种体积力进行合成后的结果，并不代表力的真实作用方式。

力是矢量，用有向线段（矢线）表示。力的作用点可以是矢线的始端 A 或末端 B，如

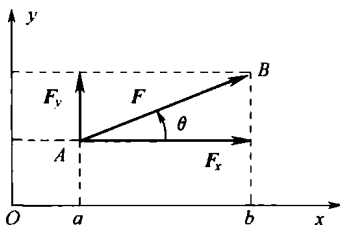


图 2-1 力的表示法

图 2-1 所示。设定在文字和运算中用粗体字母（如 $\mathbf{F}$ ）表示力矢量，非粗体字母（如 F ）表示力的大小，图中表示力矢有向线段旁的字母仅是对力进行标记，不进行粗体与非粗体的区分。

力在平面直角坐标系中，其矢量表达式为：

$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} \quad (2-1)$$

式中， $\mathbf{i}$ 和 $\mathbf{j}$ 分别为 x 和 y 坐标轴上的单位矢量， F_x 和 F_y 分别表示力 $\mathbf{F}$ 在 x 和 y 坐标轴上的投影，是代数量（标量），其绝对值等于矢线段 $\mathbf{AB}$ 在相应坐标轴上的投影长度，例如 F_x 的绝对值等于线段 ab 的长度（图 2-1）。

在图 2-1 中，设力 $\mathbf{F}$ 始端 A 的坐标为 (x_A, y_A) ，末端 B 的坐标为 (x_B, y_B) ，则力 $\mathbf{F}$ 在 x 和 y 坐标轴上的投影分别为：

$$F_x = x_B - x_A = F \cos \theta \quad (2-2a)$$

$$F_y = y_B - y_A = F \sin \theta \quad (2-2b)$$

式中， θ 为力 $\mathbf{F}$ 与 x 轴正向间的夹角，规定从 x 轴的正向逆时针旋转至力 $\mathbf{F}$ 时 θ 为正，反之 θ 为负。力的投影 F_x 和 F_y 也称力的坐标。