

GUOCHENG YUANLI YU ZHUANGBEI

过程原理与装备

潘家祯 主编

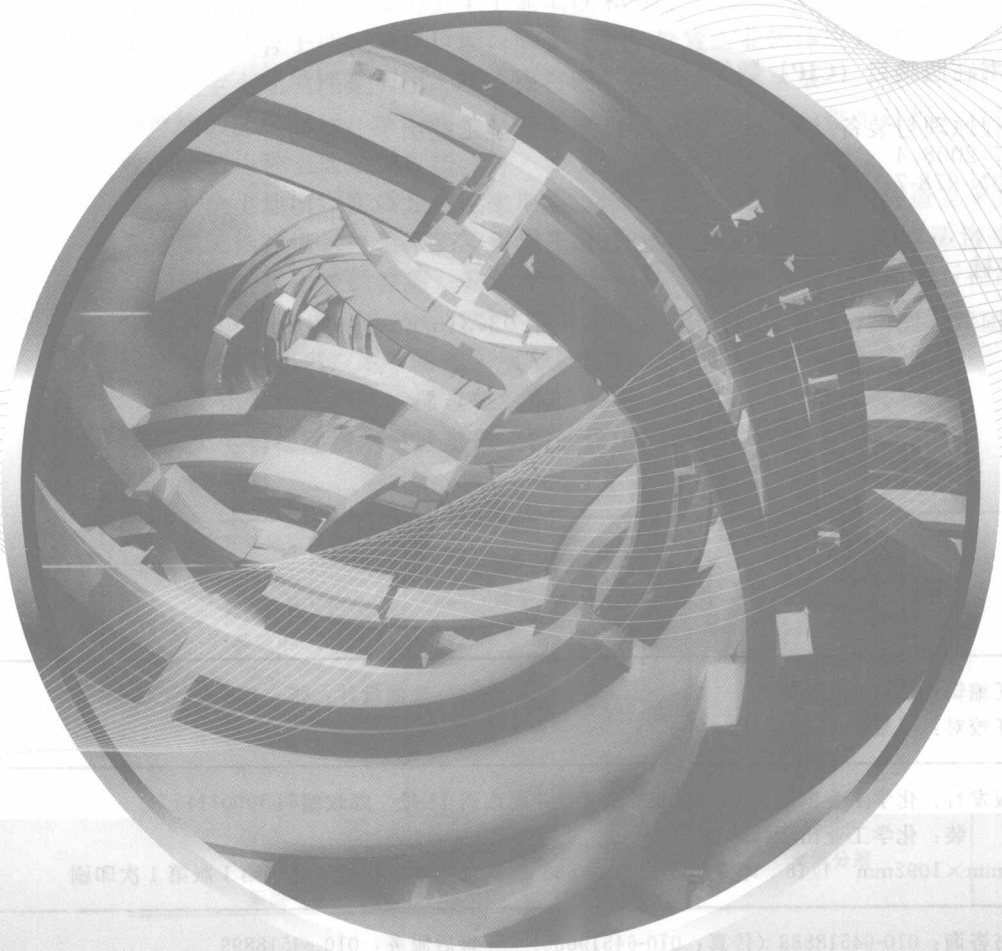


化学工业出版社

GUOCHENG YUANLI YU ZHUANGBEI

过程原理与装备

潘家祯 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书分为6篇,共30章。第1篇为流体动力过程及装备,介绍了流体静力学过程,流体动力学过程;液体输送过程;气体压缩与输送过程;搅拌与混合过程。第2篇为热量传递过程及装备,介绍了热量传递过程;热量交换过程;有相变的热量交换过程;蒸发过程。第3篇为质量传递过程及装备,介绍了干燥过程,蒸馏过程,吸收与吸附过程;萃取过程;膜分离过程;离子交换过程;结晶过程。第4篇为机械操作过程及装备,介绍了固体粉碎过程;机械分离过程;粉体分级过程;粉体混合过程;粉体造粒过程;第5篇为热力学过程及装备,介绍了热力学基本过程;气体动力循环过程;蒸汽动力循环过程;制冷循环过程;气体低温液化及分离过程。第6篇为化学反应过程及装备,介绍了化工反应过程;生物反应过程;核反应过程;环境治理过程。

本书可作为高等院校过程装备与控制工程专业的相应教材,还可用于石油化工、轻工、化工工艺等相关专业的教材,亦可作为企业、设计单位技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

过程原理与装备/潘家祯主编. —北京:化学工业出版社, 2008.4

ISBN 978-7-122-02041-3

I. 过… II. 潘… III. 化工过程-化工设备-高等学校-教材 IV. TQ051

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 037316 号

责任编辑:程树珍 金玉连
责任校对:王素芹

装帧设计:张 辉

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:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张26 1/4 字数683千字 2008年8月北京第1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:49.00 元

版权所有 违者必究

前言

过程装备与控制工程专业的前身是化工机械专业。长期以来,化工机械专业在以化工为主体的过程工业中培养了大量的人才,做出了杰出的贡献。

但是随着知识经济的飞速发展,社会对人才的要求也在日益改变。社会已不再那么强调专业对口了。社会需要宽口径、厚基础的人才。各种单一的专业不利于就业,不利于人才市场上的竞争。在专业的归并和削减中,化工机械专业得到了保留,但是更名为“过程装备与控制工程”专业。专业的更名为这一古老而又传统的专业开辟了新的方向,扩大了专业的领域,使得该专业培养的人才能够适应流程工业的需求。

但是很多人并不清楚,什么叫过程装备,这个专业究竟涉及哪些过程。我们应该与时俱进,用全面的科学发展观来了解时代、社会和形势对我们专业的要求,对专业培养人才的要求,对专业知识结构的要求。

从总体上看,过程装备应该包括如下的一些过程和装备:

(1) 流体动力过程与装备 它包括涉及流体动力过程的泵、压缩机、风机、管道、阀门等流体输送、混合等过程和装备。

(2) 热量传递过程与装备 它包括涉及热量传递、热量交换所需的过程和装备。

(3) 质量传递过程与装备 它包括干燥、蒸馏、吸收、吸附、萃取、结晶、离子交换等涉及质量传递的过程与装备。

(4) 机械操作过程与装备 它包括固体粉碎,超细粉碎,固液体系、液液体系、气液体系和固、液、气三相体系的机械混合和分离,粉体的分级、混合、造粒等过程与装备。

(5) 热力学过程与装备 它包括燃气动力循环、蒸汽动力循环、制冷循环、气体低温液化及分离等过程与装备。

(6) 化学反应过程与装备 它包括化工反应、生物反应、核反应、环境治理(包括废水处理、废气处理、固体废弃物处理及处置过程与装备)。

上述的过程与装备组成了各种流程工业。它们涉及上述的一种或者几种过程。在每一过程中,都需要相应的装备来实现这一过程。流程工业涉及化工、石油化工、煤化工、造纸、纺织、食品、冶金、医药、生物工程、材料、核电、能源等众多的工业,也涉及机械、制造、检测、管理、信息等相关领域。

过程装备是一个交叉型的学科。它交叉与融合了机械工程、化学工程、信息工程等学科。内容不仅涉及化学工程的三传一反,即热量传递、质量传递、能量传递、反应工程;也涉及机械工程的三力一机,即固体力学、流体力学、工程热力学和机械原理;现在更涉及了先进的设计理念,信息技术、并行工程、精密生产、敏捷制造、虚拟制造等先进技术更促进了过程装备的发展。

过程装备是一个综合型的学科。它综合了研究与开发、放大与设计、施工与生产的各个环节。它综合了材料选用、先进材料制备、先进制造技术、无损检测、安全评定、寿命预测、绿色制造等各个领域的技术。

过程装备有着巨大的社会需求:过程工艺的发展不断要求新型的装备;流程工业的大型化,不断需要大型的装备;生态环境保护不断呼唤新型的装备;节能降耗推动开发高效的装备;长周期安全生产需要新的装备技术;高新技术的发展促进过程装备的发展。

过程装备的综合性还体现在:

(1) 领域的拓展 体现了不同学科的交叉与相互渗透;

(2) 尺度的延伸 大的尺度往大型、超大型反应器、超大型油罐群等方向发展, 小的尺度往小型、微型设备发展;

(3) 方法的提升 各种高新技术的采用, 包括了现代数学、光电核测量技术、多尺度模型的放大与优化;

(4) 过程的强化 采用各种先进技术, 促使过程装备的高性能化。

过程装备的发展, 迫切需要培养更多了解各种工业过程、了解各种过程装备的专业人才。按照上述思路, 我们组织编写了《过程原理与装备》, 旨在更好地落实科学发展观, 开展适应全球竞争的素质教育, 在教育中培养具有丰富专业知识的创新型人才。

本教材分为6篇30章。包括了以下内容。

流体动力过程及装备 流体静力学过程; 流体动力学过程; 液体输送过程; 气体压缩与输送过程; 搅拌与混合过程。

热量传递过程及装备 热量传递过程; 热量交换过程; 有相变的热量交换过程; 蒸发过程。

质量传递过程及装备 干燥过程; 蒸馏过程; 吸收与吸附过程; 萃取过程; 膜分离过程; 离子交换过程; 结晶过程。

机械操作过程及装备 固体粉碎过程; 机械分离过程; 粉体分级过程; 粉体混合过程; 粉体造粒过程。

热力学过程及装备 热力学基本过程; 气体动力循环过程; 蒸汽动力循环过程; 制冷循环过程; 气体低温液化及分离过程。

化学反应过程及装备 化工反应过程; 生物反应过程; 核反应过程; 环境治理过程。

从上述内容上看, 每一个过程都是一个学科, 都有相应的课程和教材。如何区别于现有的课程与教材? 过程装备与控制工程专业的学生应该有什么样的知识结构。他们究竟应该学得深一点好, 还是面宽一点好。

目前教育的趋势, 是要实现从以教师为中心到以学生为中心的转变。真正转变到以学生为中心, 就会带来一个问题, 学生的知识, 如何来保证系统、完整和全面。学生的学习将会是跳跃式的学习。要帮助学生适应这种跳跃式的学习, 要帮助学生适应在知识急剧膨胀的新形势下, 通过自学来积累知识。课堂教学、教师的讲解, 只能起到辅助作用, 就是帮助学生学会学习, 那么对教材就要有相应的要求。教材需要有完整性、系统性、全面性。体系应该完整, 教材所需要的主要基础知识应该完整。

现在的教育已经从单一的高等教育, 扩大到本科教育、研究生教育、在职教育、继续教育、终身教育。教育的目的, 在于培养学生自学的能力, 培养接受新知识的能力, 培养创造知识的能力。

目前设有“过程装备与控制工程”专业的各校的专业方向和专业背景各不相同, 有的侧重于压力容器, 有的侧重于泵和压缩机, 有的侧重于热能工程, 也有的侧重于化学工程。过程装备, 这个专业领域十分宽广, 它包括了流程工业的各个方面。我们并不要求学生面面俱到, 也不可能做到样样精通。各校可以充分发挥本校的专业特长。由各校组成的这个专业的整体, 体现了过程装备的各个领域。教材的完整性和系统性, 可以反映这个领域所需的知识, 可以便于学生选择性地学习。

由于学生将来就业的不确定性, 对于某一方面的知识, 是否有必要学得这么深? 例如他将来不一定会从事合成氨的工作, 那么对于合成氨的工艺和设备, 他为什么要学得这么深

呢？相反，正因为将来就业，从事工作的不确定性，就决定了学生在校学习的知识面要尽可能宽一些。他有了深厚的基础知识，将来企业按照自己的工艺流程给他们进行相应的培训，他就可以很快地熟悉和胜任自己的工作。

通过这门课程的学习，要使学生知道各种过程的基本原理，以及根据这样的原理开发出来的各种设备，来满足特定过程的需要。鉴于每一个过程都是一个学科，都有相应的教材。所以，本书的重点是把分散在各个教科书中间的过程原理汇总起来。不是去详细地推导这些原理，而是让读者复习一下这些原理。更重要的是要去理解，根据这些原理，已经开发出什么设备，以及将来还可以开发出什么样的设备。通过这些具体的实例，使读者理解怎样把基本的过程原理应用到实际的装备中去。使得我们的读者见多识广，将来能够举一反三，通过踏实的基础知识，培养开发创新的能力。

这本教材的编写历时数年，由过程装备与控制工程专业教学指导分委员会组织相关的教师经过多次研讨、修改、拟定了编写体系。周先桃承担了第1~5、14章的编写；王学生承担了第6~9章的编写；潘家祯承担了第10~13、15、16、28、30章的编写；石岩承担了第17~21章的编写；戚学贵承担了第22~26章的编写；惠虎承担了第27、29章的编写。在编写过程中，还有一些教师和研究生参与了初稿的资料收集、整理等前期工作。全书由潘家祯担任主编，并汇总、统稿。

由于这是第一次尝试，对内容的取舍、编排的体例、乃至全书的体系，都存在很多问题，我们衷心欢迎广大读者对本书提出宝贵的意见和建议，帮助我们不断改进、完善，为培养过程工业的人才，为过程工业的发展，做出一点贡献。

编者

2008年1月

于华东理工大学

目 录

第 1 篇 流体动力过程及装备

1 流体静力学过程	1	3.1.4 液体输送过程的基本原理 ..	23
1.1 流体静力学基本原理	1	3.2 液体输送过程的基本设备	24
1.1.1 流体的基本概念	1	3.2.1 液体输送过程的动力设备 ..	24
1.1.2 流体静力学基本方程	2	3.2.2 液体输送过程的管路及附件	42
1.2 流体静力学原理的设备	4	参考文献	44
1.2.1 静压压强测定	4	4 气体压缩与输送过程	46
1.2.2 压强传递设备	5	4.1 气体压缩与输送基本原理	46
1.2.3 液体密封装置	6	4.1.1 气体压缩与输送过程的构成	46
1.2.4 动压压强测定	6	4.1.2 气体输送动力源的特点	46
参考文献	7	4.1.3 气体压缩与输送过程的基本原理	47
2 流体动力学过程	8	4.2 气体输送过程的基本设备	48
2.1 流体动力学基本原理	8	4.2.1 气体压缩与输送动力设备 ..	48
2.1.1 基本概念	8	4.2.2 气体输送过程的管路及附件	59
2.1.2 流体动力学基本方程	9	参考文献	62
2.1.3 湍流流动模式方程	11	5 搅拌与混合过程	63
2.1.4 流动相似原理及模型实验 ..	12	5.1 搅拌与混合的基本原理	63
2.2 应用流体动力学的设备	14	5.1.1 搅拌混合的目的	63
2.2.1 流体速度场的测量装备	14	5.1.2 搅拌槽内液体的流动特性 ..	63
2.2.2 流体速度场的显示装备	16	5.1.3 搅拌效果及影响因素	65
2.2.3 流体流量的测量装备	16	5.2 搅拌与混合过程的基本装备	66
参考文献	18	5.2.1 搅拌装置	66
3 液体输送过程	19	5.2.2 静态混合器	72
3.1 液体输送过程的基本原理	19	参考文献	76
3.1.1 液体输送过程的构成	19		
3.1.2 液体输送动力源的特点及主要性能指标	19		
3.1.3 液体输送过程的流型及阻力	21		

第 2 篇 热量传递过程及装备

6 热量传递过程	77	6.2.4 圆筒壁的一维稳态导热	81
6.1 传热过程的基本概念	77	6.2.5 通过球壳的导热	82
6.2 热传导过程的基本原理	78	6.3 对流传热过程的基本原理	83
6.2.1 傅立叶定律	78	6.3.1 对流传热过程机理	83
6.2.2 热导率	78	6.3.2 牛顿冷却定律	83
6.2.3 平壁的一维稳态导热	79	6.3.3 影响对流传热的因素	84

6.3.4	流体无相变时对流传热系数 关联式	85
6.3.5	自然对流传热	89
6.4	辐射传热过程的基本原理	89
6.4.1	物体的辐射能力与斯蒂芬- 玻耳兹曼定律	89
6.4.2	物体表面间的辐射传热	90
	参考文献	91
7	热量交换过程	92
7.1	热量交换过程的基本原理	92
7.1.1	基本传热方程式	92
7.1.2	热平衡方程式	92
7.1.3	传热平均温差	93
7.1.4	传热系数 K	94
7.1.5	壁温的估算	96
7.1.6	传热效率与传热单元数	96
7.1.7	流体流动选择	98
7.2	热量交换过程的基本设备	99
7.2.1	换热器的分类	99
7.2.2	间壁式换热器	100
7.3	管壳式换热器的传热过程的 强化	107
7.3.1	强化传热管的结构及 特点	107
7.3.2	管内插入物的结构及 特点	110
7.3.3	壳程管束支承结构 改进	111
	参考文献	115
8	有相变的热量交换过程	116
8.1	相变热量交换过程的基本	

原理	116
8.1.1 蒸汽冷凝换热过程	116
8.1.2 沸腾换热	118
8.2 相变的热量交换过程的基本设备	120
8.2.1 冷凝器	120
8.2.2 再沸器	122
8.2.3 热管换热器	123
8.2.4 废热锅炉	124
参考文献	126
蒸发过程	127
9.1 蒸发过程的基本原理	127
9.2 单效蒸发过程	128
9.2.1 物料与热量衡算方程	128
9.2.2 传热速率方程	129
9.2.3 蒸发器的生产能力与生产强度	131
9.3 多效蒸发过程	132
9.3.1 多效蒸发流程	132
9.3.2 多效蒸发设计计算	133
9.3.3 多效蒸发的计算	134
9.3.4 多效蒸发的经济性及效数限制	136
9.3.5 蒸发过程强化	137
9.4 蒸发过程设备	138
9.4.1 蒸发器类型与选型	138
9.4.2 蒸发的辅助设备	142
9.4.3 蒸发器的选型	142
9.4.4 蒸发器改进与发展	144
参考文献	144

第3篇 质量传递过程及装备

10	干燥过程	145
10.1	干燥过程的基本原理	145
10.1.1	干燥的目的	145
10.1.2	干燥过程采用的方法	145
10.1.3	物料内所含水分的种类	146
10.1.4	湿空气的性质	148
10.1.5	湿物料的性质	149
10.2	干燥过程的基本设备	150
10.2.1	干燥器的分类	150
10.2.2	固定床干燥器	150
10.2.3	移动床干燥器	150

10.2.4	自由降落床干燥器	151
10.2.5	流化床干燥器	151
10.2.6	流动气流干燥器	151
	参考文献	153
11	蒸馏过程	154
11.1	蒸馏过程的基本原理	154
11.1.1	蒸馏的目的	154
11.1.2	蒸馏的分类	154
11.2	板式塔	160
11.2.1	板式塔的总体结构	160
11.2.2	塔板	160

11.3 填料塔	165	13.2.3 往复搅拌的萃取塔	201
11.3.1 概述	165	13.2.4 旋转搅拌的萃取塔	203
11.3.2 填料	165	13.2.5 离心萃取机	205
11.3.3 散堆填料	166	13.2.6 其他萃取设备	209
11.3.4 环形填料	166	参考文献	209
11.3.5 鞍形填料	167	14 膜分离过程	210
11.3.6 规整填料	168	14.1 膜分离过程基本原理	210
11.4 塔设备的选型原则	169	14.1.1 分离用膜	210
11.4.1 板式塔的选型原则	169	14.1.2 膜分离过程	210
11.4.2 填料塔的选型原则	169	14.1.3 膜分离的工艺流程	211
参考文献	170	14.1.4 膜分离过程的强化方法	211
12 吸收与吸附过程	171	14.2 膜分离过程的基本装备	213
12.1 吸收过程的基本原理	171	14.2.1 反渗透膜分离过程	213
12.1.1 吸收的目的	171	14.2.2 渗析膜分离过程	214
12.1.2 物理吸收与化学吸收	171	14.2.3 电渗析膜分离过程	215
12.1.3 吸收剂的选择	171	14.2.4 液膜分离过程	217
12.1.4 吸收过程中的相平衡 关系	172	14.2.5 气体渗透分离过程	219
12.1.5 不同类型的扩散与吸收	173	14.2.6 过滤膜分离过程	220
12.1.6 吸收速率	178	参考文献	224
12.1.7 小结	179	15 离子交换过程	225
12.2 吸收过程的基本装置	180	15.1 离子过程的基本原理	225
12.3 吸附过程的基本原理	180	15.1.1 离子交换的目的	225
12.3.1 概述	180	15.1.2 离子交换过程的基本 原理	225
12.3.2 吸附理论	181	15.1.3 离子交换过程的基本 操作	226
12.4 吸附过程的基本设备	184	15.1.4 离子交换剂的种类	227
12.4.1 概述	184	15.1.5 离子交换剂的选用	229
12.4.2 接触式吸附器	184	15.2 工业离子交换过程和设备	230
12.4.3 固定填充床吸附器	184	15.2.1 间歇槽式	230
12.4.4 流动填充床吸附器	186	15.2.2 固定床式	230
12.5 气体的增湿与减湿	186	15.3 离子交换膜	233
12.5.1 概述	186	15.3.1 离子交换膜的性能及其 制备	233
12.5.2 增湿与减湿的理论	186	15.3.2 离子交换膜分离过程和 应用	234
12.5.3 增湿器与减湿器	188	15.4 离子交换过程在工业上的 应用	235
参考文献	189	15.4.1 水处理	235
13 萃取过程	190	15.4.2 食品工业	236
13.1 萃取过程的基本原理	190	15.4.3 湿法冶金	237
13.1.1 萃取的目的	190	参考文献	237
13.1.2 萃取操作原理	190	16 结晶过程	238
13.1.3 萃取剂的选择	193		
13.2 萃取过程的基本设备	195		
13.2.1 混合沉降器	195		
13.2.2 无搅拌的萃取塔	199		

16.1	结晶过程的基本原理	238	16.1.6	结晶操作的一些特点	242
16.1.1	结晶的目的	238	16.2	结晶过程的主要设备	243
16.1.2	晶体的性质	238	16.2.1	溶液结晶设备	243
16.1.3	晶核的生成和晶体的 成长	239	16.2.2	熔融结晶设备	251
16.1.4	溶解度与溶解度曲线	240	16.3	结晶设备小结	254
16.1.5	溶液的过饱和度	241	参考文献		254

第4篇 机械操作过程及装备

17	固体粉碎过程	255	19.2.2	气流分级设备	282
17.1	粉碎机理	255	19.2.3	水力分级设备	284
17.1.1	物料性质	255	参考文献		286
17.1.2	破碎方式	256	20	粉体混合过程	287
17.1.3	破碎的功耗学说	257	20.1	粉体混合机理	287
17.2	粉碎设备	258	20.1.1	粉体混合机理	287
17.2.1	颚式破碎机	258	20.1.2	混合质量表示方法	287
17.2.2	圆锥破碎机	260	20.2	粉体混合器的类型	289
17.2.3	锤式破碎机	260	20.2.1	双锥形混合器	290
17.2.4	球磨机	261	20.2.2	V形混合器	291
17.2.5	盘磨机	262	20.2.3	螺旋式锥形混合机	291
17.2.6	气流粉碎机	264	20.2.4	无重力粒子混合机	292
参考文献		265	20.2.5	三维运动混合机	293
18	机械分离过程	266	20.2.6	空气混合机	294
18.1	机械分离过程的基本原理	266	20.2.7	连续混合机	294
18.1.1	沉降基本原理	267	20.2.8	捏合机	294
18.1.2	过滤基本原理	268	参考文献		296
18.2	机械分离设备	270	21	粉体造粒过程	297
18.2.1	重力沉降分离设备	270	21.1	颗粒性质	297
18.2.2	过滤设备	272	21.1.1	粒度和粒度分布	297
18.2.3	离心分离设备	274	21.1.2	颗粒密度表示法	298
参考文献		276	21.1.3	颗粒的摩擦性能	298
19	粉体分级过程	277	21.1.4	造粒方法的分类及原理	299
19.1	分级机理	277	21.1.5	造粒方法的选用	300
19.1.1	分级原理	277	21.2	造粒设备	301
19.1.2	筛分性能参数	278	21.2.1	压块过程及设备	301
19.1.3	流体分级性能参数	278	21.2.2	造球过程及设备	303
19.2	分级设备	279	参考文献		307
19.2.1	筛分设备	279			

第5篇 热力学过程及装备

22	热力学基本过程	308	22.2	理想气体的基本热力过程	310
22.1	热力学基本概念和基本定律	308	22.3	蒸汽的热力过程	311
22.1.1	基本概念	308	22.3.1	蒸汽热力性质表述	311
22.1.2	热力学基本定律	309	22.3.2	蒸汽的基本热力过程	313

参考文献	313	24.2.2 锅炉	328
23 气体动力循环过程	314	24.2.3 汽轮机	329
23.1 燃气轮机装置循环的基本原理	314	24.2.4 凝汽设备	330
23.1.1 前言	314	参考文献	330
23.1.2 燃气轮机装置的应用及其基本工作过程	314	25 制冷循环过程	331
23.1.3 燃气轮机装置定压加热理想循环的性能	315	25.1 制冷过程的热力学原理	331
23.1.4 具有回热的燃气轮机装置	316	25.1.1 概述	331
23.2 燃气轮机装置及主要设备	317	25.1.2 制冷的基本热力学原理及性能指标	331
23.2.1 燃气轮机装置结构形式	317	25.2 常见制冷循环系统装置及主要设备	333
23.2.2 压气机	318	25.2.1 蒸气压缩式制冷	333
23.2.3 燃烧室	318	25.2.2 蒸汽吸收式制冷	340
23.2.4 透平	318	25.2.3 蒸汽喷射式制冷	342
23.3 内燃机循环的基本原理	319	25.2.4 吸附式制冷	343
23.3.1 内燃机的工作过程	319	25.3 热泵的基本热力学原理及性能指标	343
23.3.2 内燃机理想循环及其性能	320	25.4 热泵装置系统	344
23.4 内燃机的基本构造	321	参考文献	344
参考文献	323	26 气体低温液化及分离过程	346
24 蒸汽动力循环过程	324	26.1 气体低温液化原理与系统	346
24.1 蒸汽动力循环装置工作过程与原理	324	26.1.1 概述	346
24.1.1 卡诺循环	324	26.1.2 气体液化的理论循环	346
24.1.2 朗肯循环装置工作过程及性能	325	26.1.3 气体液化循环的性能指标	347
24.1.3 朗肯循环的改进	325	26.1.4 节流液化循环	348
24.1.4 工业企业蒸汽动力系统	327	26.1.5 带膨胀机的液化循环	351
24.2 蒸汽动力循环系统装置与主要设备	328	26.2 气体分离的原理与系统	353
24.2.1 常规电站热力系统装置	328	26.2.1 气体分离方法概述	353
		26.2.2 空气分离原理与系统	354
		26.3 气体液化及分离装置的基本设备	356
		参考文献	357

第6篇 化学反应过程及装备

27 化工反应过程	358	参考文献	370
27.1 化工反应过程基本原理	358	28 生物反应过程	371
27.1.1 概述	358	28.1 生物反应过程的基本原理	371
27.1.2 化学反应过程动力学	359	28.1.1 概述	371
27.2 化工反应过程基本设备	362	28.1.2 生物反应过程的特点	371
27.2.1 概述	362	28.1.3 生物反应过程及生物反应器的分类	372
27.2.2 固定床反应器	362	28.2 酶反应器	374
27.2.3 流化床反应器	363	28.2.1 搅拌釜反应器	374
27.2.4 搅拌反应器	363		

第 1 篇 流体动力过程及装备

1 流体静力学过程

1.1 流体静力学基本原理

1.1.1 流体的基本概念

(1) 流体与连续介质假定

从狭义上讲,流体是气体和液体的总称,但广义上的流体可以包括一切具有流动性的物质对象,如超临界流体、等离子体等特殊流体。流体是由离散的大量运动分子组成,在分子之间有一定的间隙;流体力学中不去研究单个分子或原子的运动状态,而是从宏观角度研究分子团的运动。这种分子团称作流体质点或微团;并且认为流体是由质点之间无任何间隙的连续介质,从宏观角度探讨质点的平衡、运动及与边界之间的互相作用。在连续介质假定下可以把流体无限分割成数学上的点,而每个点仍然保留流体所具有的物理性质。当流体质点是连续布满其所在的空间时,在研究静止和运动规律过程中,就可以来用连续函数这一数学工具,以便用数学式描绘出流体的各种状态,如介质的重度、密度、应力、温度等各种物理量都可以连续函数来表示。

(2) 流体的密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,常以符号 ρ 表示,单位为 kg/m^3 ,用数学表达式定义为:

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (1.1)$$

对于均质流体来说,密度是一个常数,但对于非均质流体来说,密度是空间位置的函数。当压强不太高、温度不太低时,气体的密度可以根据理想气体状态方程来近似:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1.2)$$

对液体混合物来说,它的平均密度 ρ_m 可以由下式来计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{X_{WA}}{\rho_A} + \frac{X_{WB}}{\rho_B} + \dots + \frac{X_{Wn}}{\rho_n} \quad (1.3)$$

式中 $\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各组分的密度, kg/m^3 ;

$X_{WA}, X_{WB}, \dots, X_{Wn}$ ——液体混合物中各组分的重量分数。

对于气体混合物,它的平均密度一般由下式求得:

$$\rho_m = \rho_A X_{WA} + \rho_B X_{WB} + \dots + \rho_n X_{Wn} \quad (1.4)$$

式中 ρ_A, ρ_B, ρ_n ——在气体混合物的压力下各组分的密度, kg/m^3 ;

$X_{WA}, X_{WB}, \dots, X_{Wn}$ ——气体混合物中各组分的体积分数。

(3) 流体的压缩性

当温度不变时,流体的体积随压力增大而缩小的性质称为流体的压缩性。压缩性的大小用体积压缩系数 β_p 来度量,它表示增加一个单位压力时所引起的体积相对缩小量,即

$$\beta_p = -\frac{\frac{dV}{V}}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1.5)$$

式中 β_p ——流体体积压缩系数, m^2/N ;

V ——流体原有体积, m^3 ;

dV ——流体体积的变化量, m^3 ;

dp ——压力的增量, N/m^2 。

由于压力增加,流体的体积缩小; dp 与 dV 异号。故式(1.5)中加一负号,以使 β_p 为正值。

流体体积压缩系数的倒数称为流体的体积弹性系数或体积弹性模量,用 E 表示。

$$E = \frac{1}{\beta_p} = -V \frac{dp}{dV} \quad (1.6)$$

由式(1.6)可见, E 值大的流体压缩性小, E 值小的流体压缩性大。 E 的单位为 N/m^2 。

(4) 流体的膨胀性

当压力不变时,流体的体积随温度升高而增大的性质称为流体的膨胀性。膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_T 来度量,它表示增加一个单位温度时所引起的体积相对增量,即

$$\beta_T = \frac{\frac{dV}{V}}{dT} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1.7)$$

式中 β_T ——流体体积膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$

dT ——流体温度的增量, $^\circ\text{C}$ 。

(5) 理想流体和实际流体

自然界中的各种流体统称为实际流体或黏性流体。研究表明,液体密度的变化量很小,过程处理中可以看作是常数而简化为不可压缩性流体。但气体的密度随温度和压力有很大的变化,所以大多数情况下都必须考虑气体的压缩性。另外,流体的黏性在实际流体运动时要呈现重要的影响,从而使研究问题复杂化,以至于流体的许多运动规律到现在还不能用理论分析法完善地加以解决。为了简化流体运动的研究过程,在流体力学中引用了理想流体这一概念,实际流体与理想流体的差别,就在于对后者的一些物理性质做了简化。具体地说,理想流体应具有:

i 液体具有绝对不可压缩性,气体严格遵守气体状态方程;

ii 对于分割力绝对无抵抗性;

iii 完全无黏性,即具有绝对的流动性。

虽然理想流体的定义使研究对象发生了一定的偏离,但是却使所研究的问题得到很大的简化,使许多复杂的问题能够取得较明确的解答。为了能使从理想流体得到的结论应用于实际流体,一定要借助于实验法或统计经验法做修正,以便使计算式能实际应用于求解实际流体的力学问题。

1.1.2 流体静力学基本方程

由于流体静力学主要研究流体在外力作用下静止的规律,其基本规律就是这些力的平衡

规律。

作用在流体上的力大致可分为两类，一类为表面力，即指作用在所研究的流体体积表面上的力。它是由与流体相接触的其他物体（可以是流体，也可以是固体）的作用产生的。表面力不外乎有两种：一种是与流体表面相切的切向力，但对于静止流体或没有黏性的理想流体而言，切向表面力是不存在的；另一种是与流体表面相垂直的法向力；由于流体不能承受拉力，故静力学中流体所受的表面力主要是压力。单位面积上流体所受到的压力称为流体受到的压强。在静止流体内部任意点处的流体静压力在各个方向都是相等的，但流体中各不同点处的静压力是不相同的，是位置的函数。不论器壁的方向和形状如何，流体的静压力总是垂直于器壁。

另一类为质量力或体积力，即指作用在流体内部每一个质点上的力，它的大小与流体的质量成正比。一般也有两种：一种为重力；另一种为流体做直线加速运动或曲线运动所引起的惯性力；通常用单位质量流体承受的质量力来衡量质量力的大小。如作用在体积为 V 、质量为 m 的流体上的质量力为 F ，则 F_x 、 F_y 、 F_z ，分别表示质量力在 x 、 y 、 z 三个坐标方向的分力。

在只有重力场的情况下，体积力就是分析流体自身的重力。若用 x 、 y 、 z 分别表示单位质量力在三个坐标方向的分力，并结合牛顿第二定律，可以得到单位质量力就是体积力场所施加的加速度，重力场的加速度为 g ，可以表示为：

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{F_x}{\rho V} = \frac{F_x}{m} = a_x \\ Y &= \frac{F_y}{\rho V} = \frac{F_y}{m} = a_y \\ Z &= \frac{F_z}{\rho V} = \frac{F_z}{m} = a_z \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

通过微元体平衡的方法，可以得到流体静力学的基本方程（即欧拉平衡方程），以表示流体在质量力和表面力作用下平衡条件：

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

欧拉平衡方程说明，只要知道了流体的密度分布和单位体积质量力的分布，就可以确定静压力的分布规律。在重力作用下，如图 1.1 所示，单位体积液体的质量力就是重力加速度 g ，在大气压力为 p_0 的条件下，距液面深度为 h 的液体内的静压强，基本方程可简化为：

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1.10)$$

式(1.9)、式(1.10)说明如下。

i 重力作用下液体内部的压力随深度按线性变化。

ii 在重力作用下的液体中，深度相同的各点静压力相同，并形成一各等压水平面；在静止液体内同一水平面上的各点，因它深度相同，它的压强亦相等。

iii 若将大气液面视为零等势面，则在深度为 h 处单位液体的势能为 $-\rho gh$ ，因而有下式成立，

$$\frac{p}{\rho g} - h = C$$

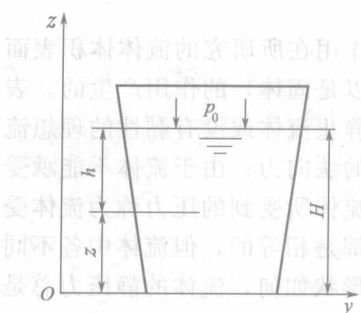


图 1.1 流体静压强与深度的关系

这说明静置液体中任何一点的压力能与位能之和是一个常数，即压力能与位能可以相互转化，但其总和始终保持不变。这是能量守恒定律在流体静力学中的体现。

iv 阿基米德定律：浸没在液体中的物体，浮力等于其排开液体的重力。

v 帕斯卡原理（静压传递原理）：根据静压力基本方程（ $p = p_0 + \rho gh$ ），盛放在密闭容器内的液体，其外加压力 p_0 发生变化时，只要液体仍保持其原来的静止状态不变，液体中任一点的压力均将发生同样大小的变化。

虽然上述讨论的是液体的情况，而气体密度则随压力而改变。但考虑到气体密度随容器高低变化甚微，一般也可视为常数，故静力学基本方程亦适用于气体。

1.2 流体静力学原理的设备

1.2.1 静压压强测定

用以测定流体压强的仪表统称为压强计。测量时，流体的真实压力称为绝对压力；绝对压力与当地大气压力之差称为相对压力或表压；当绝对压力低于当地大气压力时的相对压力称为真空度。静态稳定压力的测定仪器有如下几类。

(1) 液柱式压力计

液柱式压力计是以流体静力学原理为基础，充于玻璃或金属管内的工作液体有水银、水及其他液体，或者不相混溶的两种液体。常用的有以下三种。

① U形管压强计 如图 1.2 所示，U形管测压计的一端与大气相通，另一端连接到所要测量压力点，根据 U 形管液柱的高度差来计算出压力点的压力。在测气体压力时，U 形管中装水或酒精，在测液体压力时，U 形管中就装水银或其他重液。根据压力平衡原理，可以得到所测点的压力： $p_A = p_0 + \rho_2 gh_2 - \rho_1 gh_1$ 。当测量气体的压力时，因气体的密度差很大可略去最后一项。

② 单管压力计 如图 1.3 所示，单管测压计是最简单的测压计。通常用一根内径大于 5mm 的直玻璃管，一端和盛有液体的压力容器所要测量处的小孔相连接，另一端和大气相通。如图 1.3 所示，对于密度为 ρ 的液体，得到容器中的压力为： $p_A = p_0 + \rho gh$ 。

③ 斜管微压计 如图 1.4 所示，当所测量的压差很微小时，为了提高测量精度常常把压差计的玻璃管倾斜放置，借以达到放大压差读数提高测量精度，故称为斜管微压计。因为

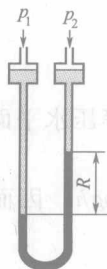


图 1.2 U 形管压强计

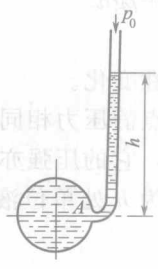


图 1.3 单管压力计

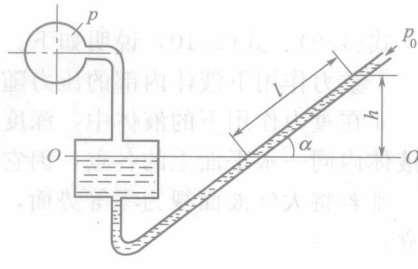


图 1.4 斜管微压计

气体的重度比液体的重度小得多,可以忽略,则 $p = p_0 + \rho gh = p_0 + \rho gl \sin \alpha$ 。

(2) 机械式压力计

机械式压力计是根据弹性元件受力变形原理来测定压力的,感受压力的弹性元件可以有弹簧管、波纹管、膜片或压敏元件,从而形成相应的压力计。

① 弹簧管式压力表 其原理为仪表的测量系统由接头与弹簧管组成,由于被测压力的变化使弹簧管自由端产生位移,借连杆带动扇形传动齿轮端部的指针旋转,在刻度盘指示相应压力数值。为了消除扇形齿轮间的间隙活动,在转轴齿轮上装置了盘形游丝。如图 1.5 所示。普通压力表适用于测量对铜、铜合金无腐蚀、无爆炸,且不结晶、不沉淀的液体、气体和蒸汽等介质的压力及真空。氨用压力表主要用于化肥生产过程或大型制冷设备中检测含有氨介质压力,接头采用钢质材料,机芯、弹簧管及内部零件均采用不锈钢(1Cr18Ni9Ti)制成,没有铜质零件,故专门用于测量氨的液体、气体及混合物的压力和真空。也可测量对碳钢和不锈钢无腐蚀作用的介质的压力和真空。氧气压力表主要用于制氧设备及制氧工艺流程中检测无爆炸性的氧气气体压力,严禁接触一切含油成分的液体和气体。

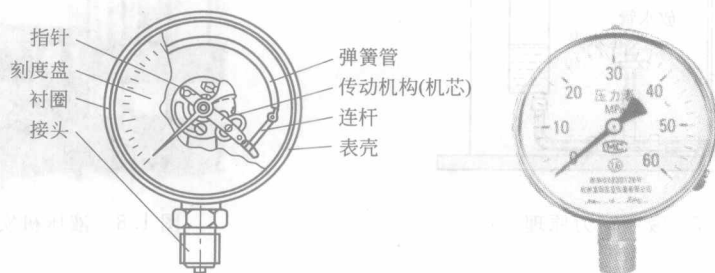


图 1.5 弹簧管式压力表

② 隔膜压力表 其原理为当被测介质的压力作用于隔离膜片上时,膜片产生弹性变形,压缩充填工作液,借助工作液的传递,使压力表的弹簧管产生位移,从而在指针上指示出压力值,如图 1.6 所示。

它可以避免被测介质直接进入测压仪表,以防止沉淀物积聚而便于清洗。隔膜压力表系列,适用于石油、化工、食品、制糖、医药、冶金、造纸、喷漆等行业生产过程中测量具有腐蚀性、高黏度、易结晶、易沉淀、有颗粒、有杂质或湿度较高的液体介质的压力。隔膜压力表系列由通用型压力仪表、中间连接件、隔膜体(包

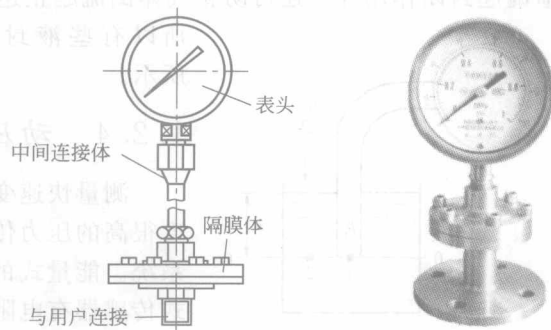


图 1.6 隔膜压力表

括隔膜片)等部分组成。其隔膜压力表的精度等级取决于通用型压力仪表的精度等级。根据配套的压力仪表的种类,构成不同种类的隔膜压力表,如配备一般压力表,构成一般隔膜压力表,配备耐震压力表,构成耐震隔膜压力表,配备远传压力表,构成远传隔膜压力表。

1.2.2 压强传递设备

在一个密闭容器中,如图 1.7 所示,按帕斯卡原理,在忽略介质自身液位差的前提下,液压缸内压强到处相等,于是 $F_2 = F_1 A_2 / A_1$,如果垂直液压缸的活塞上没有负载,则当略去活塞重量及其他阻力时,不论怎样推动水平液压缸的活塞,也不能在液体中形成压力,这