



全国高职高专教育“十一五”规划教材



环境工程原理

何红升 主 编
刘帅霞 周长丽 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

全国高职高专教育“十一五”规划教材

环境工程原理

何红升 主编



高等教育出版社

Higher Education Press

内容提要

本书是全国高职高专教育“十一五”规划教材。

本书主要内容有流体流动、流体输送机械、沉降与过滤、吸收、吸附、萃取等，分别讲述各单元操作的基本理论、典型设备、相关计算及其在环境工程中的应用。本书将学习环境工程原理所需要的基础课程“物理化学”中必需的知识点，整合到各章内容中，化解了学习难点，另外在结构上突出各单元操作在环境工程治理中的应用，充分体现高职高专教育以“必需、够用”为度的特色。

本书可作为应用性、技能型人才培养各类教育环境专业及相关专业教学用书，也可供从事环境保护、化学工程等相关科学研究、生产管理等工作的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程原理/何红升主编. —北京: 高等教育出版社, 2007.6

ISBN 978-7-04-021683-7

I. 环... II. 何... III. 环境工程学-高等学校: 技术学校-教材 IV. X5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 061356 号

策划编辑 张庆波 责任编辑 谭燕 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 王艳红 责任校对 王超 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京七色印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 20.25
字 数 490 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007 年 6 月第 1 版
印 次 2007 年 6 月第 1 次印刷
定 价 25.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 21683-00

高职高专教育环境保护类专业教材 指导委员会和编审委员会

指导委员会

教育部高等学校高职高专环保与气象类专业教学指导委员会

编审委员会

主任委员

林振山(环保与气象类专业教学指导委员会)

副主任委员

李元(环保与气象类专业教学指导委员会)

王国祥(环保与气象类专业教学指导委员会)

王立新(中国环境管理干部学院)

孙蕾(长沙环境保护职业技术学院)

委员

陈文	傅刚	高翔	关荐伊	倪才英	孙即霖	相会强
薛巧英	张宝军	陈喜红	高艳玲	耿世刚	郭正	何红升
金文	刘海春	石光辉	王晓燕	王怀宇	王金梅	姚运先
钟福生	周凤霞	朱雅兰				

前 言

环境工程原理课程侧重于环境工程治理、环境影响评价、环境管理等专业岗位人员治污能力的培养，为后续专业课程的学习打好基础，主要介绍各单元操作的基本原理、典型设备、相关计算及其在环境工程治理中的应用。

高职层次环境类专业使用的“环境工程原理”教材大多是由“化工原理”发展而来的。本书将学习“化工原理”所需要的前期课程“物理化学”中的必备知识点，结合到各个环境治理单元操作的理论分析中，优化教学体系，充分体现高职教育特色，注重理论分析的实用性。

环境治理单元操作理论分析部分摆脱长而深的分析模式，增加并充实应用实例的内容，加强实训，把学生应用能力的培养融汇于教材之中，并贯穿始终。

本书融入新工艺，培养学生毕业后从事生产第一线技术工作和管理工作的能力。

本书由邢台职业技术学院何红升担任主编，河南工程学院刘帅霞、河北工业职业技术学院周长丽担任副主编。绪论、第一章、附录由何红升编写；第二章、第三章由周长丽编写；第四章由河北工业职业技术学院王春玉编写；第五章、第六章由刘帅霞编写；第七章由邢台职业技术学院程永高、何红升共同编写。全书由何红升统稿。曹培峰进行了本书的审稿工作。

因编写人员水平所限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

2007年2月

目 录

绪论	1	三、局部阻力	42
一、环境工程的起源	1	四、系统总能量损失	43
二、环境治理过程与单元操作	2	第七节 流量的测量	50
三、“环境工程原理”课程的学习内容及任务	2	一、毕托管	50
四、物理量的单位与量纲	3	二、孔板流量计	52
五、单元操作中常用的基本概念	4	三、文丘里流量计	54
第一章 流体流动	6	四、转子流量计	55
第一节 流体基本物理量	6	第八节 管内流体流动阻力的测定	56
一、压力	7	一、实验目的	56
二、密度	8	二、基本原理	57
三、黏度	9	三、实验装置	57
第二节 流体静力学方程式	10	四、实验步骤	57
一、流体静力学基本方程	10	五、数据整理,完成实验报告	58
二、流体静力学基本方程式的应用	11	本章小结	59
第三节 管路组成	16	习题	59
一、管材	16	本章符号说明	63
二、管件与阀门	17	第二章 流体输送机械	65
三、管子的选用与连接	19	第一节 概述	65
四、管路的布置与类型	20	一、流体输送机械的作用	65
第四节 管道内流体的流动	21	二、对流体输送机械的基本要求	66
一、流量与流速	21	三、流体输送机械的分类	66
二、流动类型	23	第二节 离心泵	66
三、流动边界层	25	一、离心泵的工作原理与构造	66
第五节 流动系统的动力学方程	26	二、离心泵的性能参数与特性曲线	69
一、稳定流动与不稳定流动	26	三、离心泵的工作点与流量调节	73
二、连续性方程式(质量守恒定律)	27	四、离心泵的气蚀现象与安装高度	75
三、流动系统的能量	28	五、离心泵的组合	78
四、伯努利方程式	30	六、离心泵的类型与选用	80
第六节 流体在管路内流动时的能量损失	37	七、离心泵的安装与操作	83
一、流体在直管内的阻力损失	38	八、离心泵性能曲线测定实验	84
二、摩擦阻力及摩擦系数	38	第三节 其他类型泵	89
		一、往复泵	89



二、旋转泵	92	第一节 概述	154
三、旋涡泵	93	一、传热在工业生产中的应用	154
四、流体作用泵	93	二、传热的基本方式	155
第四节 气体输送机械	95	三、工业换热器的类型	155
一、离心式	95	四、稳态传热和非稳态传热	156
二、往复式	98	第二节 传热计算	156
三、旋转式	101	一、传热速率方程	156
四、流体作用式	101	二、热负荷和载热体用量的计算	156
本章小结	103	三、平均温差	157
习题	104	第三节 热传导	162
本章符号说明	105	一、傅立叶定律和导热系数	162
第三章 沉降与过滤	107	二、傅立叶定律的应用	163
第一节 概述	107	第四节 对流传热	165
一、非均相物系分离方法	107	一、对流传热分析	165
二、非均相物系分离在环境工程中的 应用	108	二、对流传热基本方程——牛顿冷却 定律	166
第二节 重力沉降	109	三、对流传热系数	166
一、重力沉降速度	109	四、对流传热系数经验关联式	167
二、重力沉降设备	113	第五节 传热系数	171
第三节 离心沉降	120	一、传热系数的计算	171
一、离心沉降速度和离心分离因数	120	二、污垢热阻	172
二、离心沉降设备	122	三、强化传热途径	173
第四节 过滤	126	第六节 换热器	174
一、过滤操作的基本概念	126	一、换热器的分类	174
二、过滤设备	129	二、间壁式换热器	174
三、过滤方程与过滤常数的测定	134	三、列管式换热器的选用与设计原则	179
第五节 其他气体净制方法	138	本章小结	182
一、气体的干法净制	138	习题	182
二、气体的湿法净制	139	本章符号说明	183
三、气体的电净制	140	第五章 相平衡与吸收	185
第六节 新兴过滤技术	141	第一节 吸收的基本概念	185
一、反渗透	142	一、概述	185
二、超滤与微滤	147	二、吸收剂的类型与吸收剂的选择	187
三、电渗析	149	三、吸收在环境治理中的应用	188
本章小结	151	四、吸收操作的经济性	189
习题	151	第二节 相平衡与吸收过程	189
本章符号说明	152	一、气液相平衡——亨利定律	189
第四章 传热	154	二、吸收传质过程的分析	192



三、化学吸收的气液平衡	193	四、解吸与吸附剂的再生	242
四、吸收传质机理	194	第三节 吸附在环境工程上的应用	244
第三节 吸收速率方程	195	一、吸附法用于气态污染物的净化	244
一、吸收速率方程	195	二、吸附法用于水处理	247
二、化学吸收速率方程	199	第四节 吸附速率控制与吸附操作方式	248
第四节 吸收过程的计算	200	一、吸附速率	248
一、吸收塔的物料衡算与操作线方程	200	二、吸附操作方式	249
二、吸收剂用量的确定	202	三、影响吸附的因素	256
三、吸收塔的操作与调节	205	四、吸附过程的强化措施	257
第五节 吸收塔的设计计算	206	本章小结	257
一、塔径的计算	206	习题	258
二、吸收塔高的计算	206	本章符号说明	258
三、吸收塔的设计型选择	211	第七章 萃取与其他分离技术	260
四、强化吸收过程的措施	211	第一节 概述	260
五、吸收工艺流程中的其他问题	212	一、萃取原理	260
第六节 解吸	213	二、萃取剂的选择	267
一、概述	213	三、萃取在环境保护技术中的应用	268
二、解吸方法	214	第二节 萃取计算	270
三、解吸过程的计算	214	一、萃取理论级的概念	270
第七节 吸收设备	216	二、单级萃取过程的计算	270
一、填料吸收塔	217	第三节 气浮分离	272
二、板式塔	221	一、气浮分离原理	273
三、填料塔与板式塔的比较	223	二、气浮处理工艺	273
四、吸收实验	224	三、气浮在环境工程治理中的应用	278
本章小结	228	第四节 离子交换	279
习题	228	一、离子交换树脂的选择性	279
本章符号说明	230	二、废水水质对离子交换树脂交换 能力的影响	280
第六章 表面现象与吸附	232	三、离子交换设备	281
第一节 表面现象与吸附	232	四、离子交换法在废水处理中的应用	281
一、表面现象	232	本章小结	282
二、吸附平衡与吸附等温线	235	习题	282
第二节 吸附剂及其再生	238	本章符号说明	283
一、吸附剂的基本特性	238	附录	284
二、常用的吸附剂	239	参考文献	313
三、吸附剂的选择	241		



绪 论

一、环境工程的起源

现代环境问题开始于工业革命，标志是大气中二氧化碳含量持续增加以及日益严重的环境污染。从那时至今，人类经历了煤污染、采矿与冶金污染、石油及石油化工污染、农药等有机化学品污染，以及其他各种各样混合的物理化学污染，20世纪40~60年代达到高峰，其标志是接二连三发生于各工业化国家的震惊世界的污染事件。尽管这些污染问题主要集中在城市和工业区，但愈演愈烈的环境污染还是导致了1970年4月13日美国2000万人上街大游行，并最终换来了标志着人类在环境问题上觉醒的1972年斯德哥尔摩人类环境会议，而这一切发轫于1962年美国海洋生态学家蕾切尔·卡逊的著作《寂静的春天》。

此后，人类开始了现代意义上的环境科学研究，污染治理，以及污染预防战略的思考，并在一些领域取得了很大的成功。人类先后解开了光化学烟雾之谜，水俣病、骨痛病之谜，有机氯农药沿生物食物链富集导致人类中毒之谜；而发现氟氯烃破坏臭氧层则代表了当时人类在环境科学研究方面的最高成就，三位科学家因此荣获了1995年度的诺贝尔化学奖。

伴随着对工业污染危害认识的提高，凭借着雄厚的经济实力，各工业化国家开始了大规模雄心勃勃的污染治理。无可否认，在大量投入资金、人力、物力之后，各工业化国家的环境都得到了不同程度的改善。但是，末端治理也使各治理国经济承受了巨大的压力，即使经济实力最为雄厚的美国也有治不胜治之慨。譬如，美国在20世纪70年代用于污染治理的资金约260亿美元，80年代为860亿，90年代达1250亿，分别占当时国民生产总值(GNP)的1.2%、2%、2.8%，这尚不包括随后发现的日益严重的资源破坏、生态破坏、全球共享资源破坏的恢复和改善费用。严酷的现实迫使各国不得不寻求更加合理的污染预防策略。于是，一种新的污染预防思想——清洁生产思想便应运而生。1989年10月，联合国环境规划署工业与环境计划活动中心(UNEP IE/PAC)在巴黎召开会议总结以往经验，提出了清洁生产思想。其核心内容是废物最小量化和废物再生资源化，其基本思想是把污染控制的重点由末端治理移向全过程控制，其基本方法是清洁生产审计，其基本要求是从原料、生产过程到产品全部是较清洁的和有利于可再生利用的。清洁生产是可持续发展思想的一部分，主要用于工业污染防治。随工业发展而不断增多的生活污染则通过城市基础设施的完善而加以解决。其后产生的ISO 14000国际环境管理体系也是清洁生产思想的延续和深化。

与此同时，环境管理思想也发生了深刻的变化。发生于20世纪70年代的能源危机引出了欧洲罗马俱乐部的《增长的极限》，首次对工业革命以来的生产、生活方式提出了质疑，对传统生产方式进行了批判，并提出许多污染根源于落后的观念和错误的决策。这本书的发表引起了政府对环境应负责任的重视，使环境保护开始纳入经济社会综合决策之中。从源头控制污染的思想必然引导人们走上依靠技术进步、借助新知识和高新技术的创新之路，通过不断的技术



进步,更为合理地利用资源和能源,从根本上减少和消除污染。环境工程应运而生。

二、环境治理过程与单元操作

环境工程治理是将人们生活生产中产生的各种污染物,经过化学和物理方法处理,降低污染物含量,分离可回收利用组分的行业。在废水、废气的处理过程中,往往需要不同的工艺过程。根据它们的操作原理,可以归纳为应用较广的数个基本操作过程,如流体输送、沉降、过滤、气浮、吸收、萃取、吸附等。例如,燃煤产生烟气的治理过程中,首先通过集尘装置收集。通过烟道输送到重力除尘室、静电除尘器、布袋除尘器、旋风分离除尘器等设备中去掉颗粒污染物,然后再通过吸收塔、吸附塔等设备降低气态污染物的含量,最终达标排放到大气中。总结一下燃煤烟气治理过程中包括:流体流动、沉降、过滤、吸收、吸附等处理单元。也就是说每一种污染物的治理过程都可以分解为不同的处理单元,每一个单元又应用于不同的污染物处理过程中。例如,重力沉降除了应用于处理烟气中颗粒污染物,还应用于污水中悬浮物的分离,常见的沉沙池就是利用重力沉降的工作原理除掉污水中的颗粒物,沉淀池和污泥浓缩池都是利用重力沉降达到泥水分离的目的。每一个单元操作对应于此书不同的章节。

三、“环境工程原理”课程的学习内容及任务

1. 本课程的主要内容

本课程主要分为三部分内容:

- (1) 流体流动,包括管路基础、流体输送机械。
- (2) 沉降、过滤。
- (3) 传质过程,包括吸收、萃取、吸附等。

流体流动时,其内部发生动量传递,故流体流动过程也称为动量传递过程。流体流动的基本原理,不仅是流体输送、搅拌、沉降及过滤的理论基础,也是传质过程中各单元操作的理论基础。因为这些单元操作中的流体都处于流动状态,因此,流体力学、传质的基本原理是各单元操作的理论基础。

沉降与过滤是对污水、废气去除颗粒污染物的主要方法。例如利用沉降与过滤就可以保证一般企业的烟囱不再浓烟滚滚。

吸收是去除废气中的气态污染物的主要措施,尤其是对于去除形成酸雨根本原因的烟气中硫的各种氧化物、形成光化学烟雾的氮的氧化物、形成臭氧空洞的含氟废气等都非常有效;吸附和吸收一样可以去除废气中的气态污染物,还可以分离液态污染物,并且在治污的同时还可以回收有用的组分,例如印染废水可以分离回收染料等;萃取一般应用于高浓度的有机废水和重金属废水的治理。

总的来讲,环境工程原理是一门技术基础课,以常见“三废”治理技术为主,结合物理化学知识,分析各种工艺的基本理论、典型设备及其在环境工程中的应用,为后续专业课环境污染治理的学习打下坚实的基础。

2. 本课程的学习任务

(1) 掌握环境工程“三废”治理各单元操作的基本原理,了解典型设备的构造、性能,并能根据治污需要选型。



(2) 掌握各单元操作的相关计算, 理解各单元操作、调节的原理。

四、物理量的单位与量纲

1. 国际单位制与法定计量单位

由于科学技术的迅速发展和国际学术交流的日益频繁, 国际计量会议制定了一种国际上统一的国际单位制, 其代号为 SI。国际单位制中的单位是由基本单位、辅助单位和具有专门名称的导出单位构成的, 分别列于表 0-1、表 0-2 及表 0-3 中; 国际单位制中用于构成十进倍数和分数单位的词头, 列于表 0-4 中。

表 0-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	热力学温度	开[尔文]	K
质量	千克	kg	物质的量	摩[尔]	mol
时间	秒	s	发光强度	坎[德拉]	cd
电流	安[培]	A			

表 0-2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
[平面]角	弧度	rad	立体角	球面度	sr

表 0-3 国际单位制中具有专门名称的部分导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示示例
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能[量], 功, 热量	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率	瓦[特]	W	J/s
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	

表 0-4 用于构成十进倍数和分数单位的部分词头

所表示的因数	词头名称	词头符号	所表示的因数	词头名称	词头符号
10^6	兆	M	10^{-1}	分	d
10^3	千	k	10^{-2}	厘	c
10^2	百	h	10^{-3}	毫	m
10^1	十	da	10^{-4}	微	μ



2. 单位换算

同一物理量若用不同单位度量时，其数值需相应地改变。这种换算称为单位换算。CGS 和工程单位制在一些资料中或设备上还在使用。其基本单位如表 0-5 所示。因此，必须掌握这些单位间的换算关系。单位换算时，要特别注意工程单位制中的“力”的单位 kgf 与国际单位制中“力”的单位 N 之间的换算关系。

表 0-5 CGS 制与工程制的基本单位

量的名称	CGS 制				工 程 制			
	长度	质量	时间	温度	长度	力	时间	温度
单位符号	cm	g	s	℃	m	kgf	s	℃

五、单元操作中常用的基本概念

在研究化工单元操作时，经常用到下列五个基本概念，即物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系、传递速率及经济核算等。这五个基本概念贯穿于本课程的始终，在这里仅作简要说明，详细内容见各章。

1. 物料衡算

依据质量守恒定律，进入(输入)与离开(输出)某一化工过程的物料质量之差，等于该过程中累积的物料质量，即

$$\text{输入量} - \text{输出量} = \text{累积量}$$

对于连续操作的过程，若各物理量不随时间改变，即为稳定操作状态时，过程中不应有物料的积累。则物料衡算关系为：

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

用物料衡算式可由过程的已知量求出未知量。物料衡算可按下列步骤进行：

(1) 首先根据题意画出各物流的流程示意图，物料的流向用箭头表示，并标上已知数据与待求量。

(2) 在写衡算式之前，要计算基准，一般选用单位进料量或排料量、时间及设备的单位体积等作为计算的基准。在较复杂的流程示意图上应圈出衡算的范围，列出衡算式，求解未知量。

例 0-1 用连续操作的蒸发器把含盐浓度为 w_F (质量分数) 的稀盐水溶液蒸发到浓度为 w_w (质量分数) 的浓盐水溶液，稀盐水溶液的进料量为 q_{mF} (kg/h)。试求：每小时所得浓盐水溶液量 q_{mW} 及水分蒸发量 q_{mV} 各为多少？

解：物料的流程如图 0-1 所示，计算基准取 1 h，由于是连续稳定操作，

$$q_{mF} = q_{mV} + q_{mW}$$

溶质衡算式为：

$$q_{mF} \cdot w_F = q_{mW} \cdot w_w$$

由此两式解得：

$$q_{mW} = \left(\frac{w_F}{w_w} \right) q_{mF},$$

$$q_{mV} = \left(1 - \frac{w_F}{w_w} \right) q_{mF}$$



2. 能量衡算

本书中所用到的能量主要是机械能。能量衡算的依据是能量守恒定律。机械能衡算将在第一章流体流动中说明。

3. 物系的平衡关系

平衡状态是自然界中广泛存在的现象。例如，在一定温度下，不饱和的食盐溶液与固体食盐接触时，食盐向溶液中溶解，直到溶液为食盐所饱和，食盐就停止溶解，此时固体食盐表面已与溶液成动平衡状态。反之，若溶液中食盐浓度大于饱和浓度，则溶液中的食盐会析出，使溶液中的固体食盐结晶长大，最终达到平衡状态。一定温度下食盐的饱和浓度，就是这个物系的平衡浓度。当溶液中食盐的浓度低于饱和浓度，则固体食盐将向溶液中溶解；当溶液中食盐的浓度大于饱和浓度，则溶液中溶解的食盐会析出，最终都会达到平衡状态。从这个例子可以看出，平衡关系可以用来判断过程能否进行，以及进行的方向和能达到的限度。

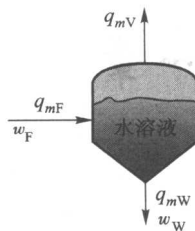


图 0-1 例 0-1 物料流程图

4. 传递速率

仍以食盐溶解为例说明：食盐溶液中食盐浓度低时，溶解速率(单位时间内溶解的食盐质量)大；食盐浓度高时，溶解速率小。当溶液达到饱和浓度(即平衡状态)时，不再溶解，即溶解速率为零。由此可知，溶液浓度越是远离平衡浓度，其溶解速率就越大；溶液浓度越是接近平衡浓度，其溶解速率就越小。溶液浓度与平衡浓度之差值，可以看作是溶解过程的推动力。另外，由实验得知，把一个大食盐块破碎成许多小块，溶液由不搅拌改为搅拌，都能使溶解速率加快。这是因为由大块改为许多小块，能使固体食盐与溶液的接触面积增大；由不搅拌改为搅拌，能使溶质对流。其结果能减小溶解过程的阻力。因此，过程的传递速率与推动力成正比，与阻力成反比，即

$$\text{传递速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

这个关系类似于电学中的欧姆定律。过程的传递速率是决定化工设备的重要因素之一，传递速率大时，设备尺寸可以较小。

5. 经济核算

为生产定量的某种产品所需要的设备，根据设备的形式和材料的不同，可以有若干设计方案。对同一台设备，所选用的操作参数不同，其设备费用与操作费用也不同。因此，要用经济核算确定最经济的设计方案。

第一章

流 体 流 动



知识目标:

- 了解层流内层与边界层;
- 了解流量计的工作原理;
- 熟悉流体的连续性和压缩性;
- 熟悉管内流体速度分布概念;
- 掌握压力的定义、表示方法及测定方法;
- 掌握流体静力学基本方程、连续性方程、伯努利方程的内容及应用;
- 掌握雷诺数的物理意义及计算,并据此判断流动类型;
- 掌握流动阻力产生的原因,流体在管内流动时流动阻力(直管阻力和局部阻力)的计算。



能力目标:

- 能判断流体流动类型;
- 能应用各种压差计、流量计;
- 能进行简单管路计算;
- 能解释流动阻力损失。

第一节 流体基本物理量

环境工程治理中处理的污水和废气都是流体,往往需要把各个污染源产生的污水和废气汇集起来集中治理,例如,城市地下水管网把污水汇集到污水处理厂,企业利用烟气管道汇集废气等。无论是要设计计算流体输送系统中的动力消耗还是设备的投资,都必须掌握流体流动基本规律。另外流体流动还是其他环境工程治理单元操作的基础。

本章着重讨论流体流动的基本原理及流体在管道内的流动规律,并应用这些原理与规律来分析和计算流体的输送问题。



在分析流体运动规律时，常用到以下基本物理量：

一、压力

在静止的流体内，流体内部任意质点都受到周围质点的作用力，单位面积上受的力称为流体的静压力，简称压力，习惯上也称为压强。静止流体内部任意质点的压力的大小在各个方向都相等。

在国际单位制中压力的单位是 Pa，称为帕斯卡。常用的压力单位还有千帕 (kPa) 等。此外，在实际工作中还会见到以前使用过的压力单位，如千克力每平方厘米 (kgf/cm^2)、毫米汞柱 (mmHg)、巴 (bar) 等，但这些均不是我国的法定计量单位。

流体的压力可以用不同的方法来表示。以绝对零压为起点的压力称为绝对压力，是流体的真实压力。流体的压力还可以用测压仪表来测量，仪表与大气相通。当设备内实际压力 (绝对压力) 等于外界大气压时，压力表读数为 0。当设备内绝对压力大于外界大气压时，压力表读数表明绝对压力与外界大气压之差。我们称之为表压。

$$\text{表压} = \text{绝对压力} - \text{大气压}$$

当设备内绝对压力小于外界大气压时，真空表读数表明外界大气压与绝对压力之差。我们称之为真空度。

$$\text{真空度} = \text{大气压} - \text{绝对压力}$$

绝对压力、表压、真空度三者之间的关系可用图 1-1 来表示。

真空度越大，绝对压力越小，真空度又称为负压。真空度和表压互为相反数。为了学习方便，我们规定表压都要标注，用 $p(\text{表})$ 表示，或用文字说明；绝对压力可以不标注。

必须指出，大气压的数值不是固定的，与大气的温度、湿度和当地海拔高度等因素有关。计算时应该以当地大气压为准。

例 1-1 某设备进口处真空表的读数为 50 mmHg^①，出口的压力表读数为 69.3 kPa，求该设备进出口的压差。

解：

$$p_i(\text{表}) = 50 \text{ mmHg} = \frac{50}{760} \times 101.3 \text{ kPa} = 6.66 \text{ kPa}$$

$$p_i = (101.3 - 6.66) \text{ kPa} = 94.64 \text{ kPa}$$

$$p_o(\text{表}) = 69.3 \text{ kPa}$$

$$p_o = (101.3 + 69.3) \text{ kPa} = 170.6 \text{ kPa}$$

$$\Delta p = p_o - p_i = (170.6 - 94.64) \text{ kPa} = 75.96 \text{ kPa}$$

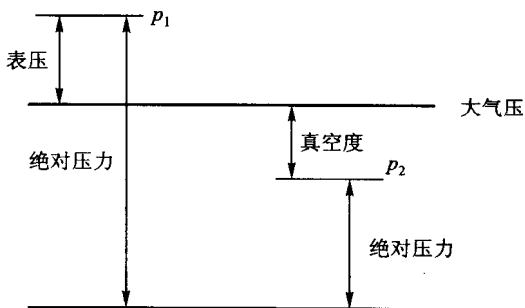


图 1-1 绝对压力、表压与真空度的关系

① 1 mmHg = 133.322 4 Pa。



二、密度

单位体积流体的质量，称为流体的密度，其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中： ρ ——流体的密度， kg/m^3 ；

m ——流体的质量， kg ；

V ——流体的体积， m^3 。

不同的流体密度是不同的，对一定的流体，密度是压力 p 和温度 T 的函数，可用下式表示：

$$\rho = f(p, T)$$

1. 液体的密度

液体的密度随压力的变化甚小（极高压力下除外），可忽略不计，故常称液体为不可压缩的流体，但液体的密度随温度稍有改变。常用液体的密度随温度的变化可查阅相关手册。

2. 气体的密度

气体的密度随压力和温度的变化较大，当压力不太高、温度不太低时，气体的密度可近似地按理想气体状态方程式计算，由：

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

得：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-1)$$

式中： p ——气体的压力， kN/m^2 或 kPa ；

T ——气体的热力学温度， K ；

M ——气体的摩尔质量， kg/kmol ；

R ——摩尔气体常数， $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

3. 液体混合物的密度

生产中遇到的流体常常不是单一组分，而是由若干组分所构成的混合物。液体混合时，体积往往有所改变，但改变量很小，可以忽略。假设混合前后体积不变，则 1 kg 混合液的体积等于各组分单独存在时的体积之和，则可由下式求出混合液体的密度 ρ_m 。

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \frac{w_3}{\rho_3} + \cdots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-2)$$

式中： w_1, w_2, \dots, w_n ——液体混合物中各组分的质量分数；

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各组分的密度， kg/m^3 ；

ρ_m ——液体混合物的平均密度， kg/m^3 。

例 1-2 已知乙醇水溶液中各组分的质量分数为：乙醇 0.6，水 0.4，求该溶液 298 K 时的密度。

解：已知 $w_1 = 0.6$ ， $w_2 = 0.4$

查表得 298 K 时，乙醇的密度 $\rho_1 = 789 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，水的密度 $\rho_2 = 998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，



$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} = \left(\frac{0.6}{789} + \frac{0.4}{998.2} \right) \text{m}^3/\text{kg} = 0.001161 \text{m}^3/\text{kg}$$

$$\rho_m = 861 \text{kg}/\text{m}^3$$

即该混合物的密度为 $861 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

4. 气体混合物的密度

当气体混合物的温度、压力接近于理想气体时，可按理想气体计算密度。但式中气体的摩尔质量 M ，应以混合气体的平均摩尔质量 M_m 代替，即

$$\rho = \frac{pM_m}{RT} \quad (1-3)$$

这就需要知道混合物的平均摩尔质量，因为气体混合前后质量守恒，则有：

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + \cdots + m_n$$

其中每个组分的质量都等于该组分的摩尔质量与物质的量的乘积，即：

$$m_1 = M_1 \times n_1$$

$$m_2 = M_2 \times n_2$$

$$\dots \dots \dots$$

$$m_n = M_n \times n_n$$

所以：

$$m = M_1 \times n_1 + M_2 \times n_2 + \cdots + M_n \times n_n$$

混合前后物质的量之和不变，

即：

$$n = n_1 + n_2 + \cdots + n_n$$

则有：

$$\frac{m}{n} = \frac{M_1 \times n_1}{n} + \frac{M_2 \times n_2}{n} + \cdots + \frac{M_n \times n_n}{n}$$

即：

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-4)$$

式中： M_1, M_2, \dots, M_n ——混合物中各组分的相对分子质量；

y_1, y_2, \dots, y_n ——混合物中各组分的摩尔分数。

气体混合物的组成通常以体积分数表示。对于理想气体，体积分数与摩尔分数、压力分数是相等的。式 1-4 既适用于气体也适用于液体。

例 1-3 已知某混合气体的组成(均为体积分数)： H_2 ：55%， N_2 ：18%， CO_2 ：27%，求该混合气体在 600 kPa 和 298 K 时的密度。

解：已知： H_2 ： $M_1 = 2 \text{kg}/\text{kmol}$ N_2 ： $M_2 = 28 \text{kg}/\text{kmol}$ CO_2 ： $M_3 = 44 \text{kg}/\text{kmol}$

$$y_1 = 0.55$$

$$y_2 = 0.18$$

$$y_3 = 0.27$$

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + M_3 y_3 = (2 \times 0.55 + 28 \times 0.18 + 44 \times 0.27) \text{kg}/\text{kmol} = 18.02 \text{kg}/\text{kmol}$$

$$\rho = \frac{pM_m}{RT} = \frac{600 \times 18.02}{8.314 \times 298} \text{kg}/\text{m}^3 = 4.36 \text{kg}/\text{m}^3$$

该混合气体的密度为 $4.36 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

三、黏度

黏度与流体的流动能力成负相关，黏度越大的流体流动速度越慢。

黏度与流体自身的特性有关。黏度反映流体内部摩擦力的大小，相同条件下，不同物质的

