



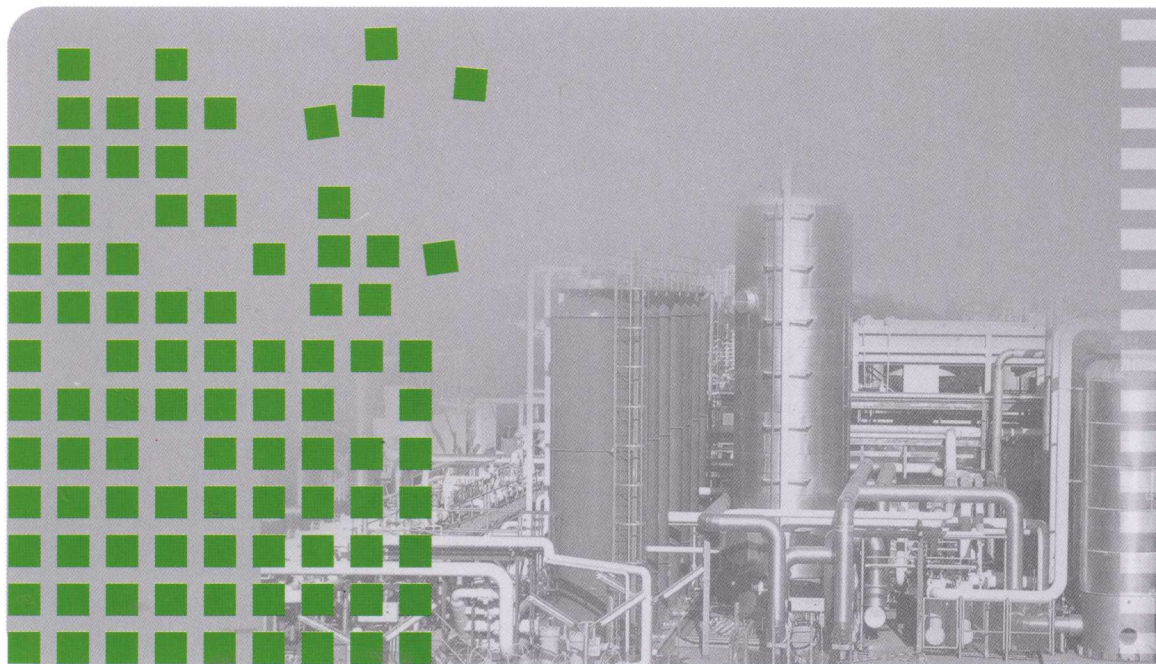
高职高专“十一五”规划教材

HUAGONG DANYUAN
CAOZUO JISHU

化工

单元操作技术

黄徽 周杰 刘瑞霞 ◎ 主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

化工单元操作技术

黄 徽 周 杰 刘瑞霞 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要包括流体流动与输送、机械分离、传热、蒸发、气体吸收、蒸馏、干燥等单元操作过程。尤其注重强化学生实际应用能力的培养,在每个单元操作中增设“设备的操作与维护”内容,使得理论与实践结合更为紧密。教材的编排便于组织实施项目化教学。

本教材可作为高职高专化工类及相关专业(生物工程、石油化工、化工机械、化工仪表自动化、制药、材料、环保、食品等专业)的选用教材,亦可作为成人高校及相关企业职工培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

化工单元操作技术/黄徽,周杰,刘瑞霞主编.北京:
化学工业出版社,2010.8

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-09112-3

I. 化… II. ①黄…②周…③刘… III. 化工单元
操作-高等学校:技术学院-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 132284 号

责任编辑: 窦 臻

文字编辑: 陈 雨

责任校对: 陶燕华

装帧设计: 关 飞

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: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15 字数 393 千字 2010 年 9 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: 28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

化工单元操作技术课程是化工类专业研究化工生产过程和共同性操作规律的一门重要的核心专业基础课程,该课程所涵盖的内容是化工从业人员必备的工程基础知识和技能。

本书介绍了流体输送、机械分离、传热、蒸发、气体吸收、蒸馏、干燥等单元操作的基本原理、计算方法、典型设备及其基本操作。在编写过程中注重了以下几点。

1. 依据项目化教学原理和规律,在体系上以精选的化工单元操作和过程为基础安排教学内容和程序,重点介绍各单元操作的物理概念、简单原理、使用设备,配以能力目标要求等,使项目化教学具有可操作性。

2. 强化实际应用能力培养,在每个单元操作中增加了“设备的操作与维护”内容。传统教材对各个单元操作所用设备只是进行简单结构和工作原理的介绍,对企业所需的设备的管理与操作涉及很少。本教材增加了企业需要的设备操作,如开停车、正常运行维护、实际生产中不正常情况判断与处理等内容,增强对学生实际操作技能培养,使得理论与实践结合得更为紧密。

3. 内容的实效性。对传统内容进行了梳理,一是增加了现代化工新技术、新工艺,以适应日新月异的化工科技发展;二是贯彻少而精的原则,在加强基本概念、理论、计算等内容基础上,删繁就简,深度适宜,以适应高职高专学生的认识能力和理解能力。

4. 教材立体化教学资源配套全面。为方便学生的理解和个性化教学,本教材配以相关内容的动画、图片、电子课件等;同时还配有课后习题参考答案。使用本教材的学校可以与化学工业出版社联系(cipedu@163.com),免费索取。

在教材使用中应注意:

① 书中采用的单位是国际单位制(SI),考虑到目前我国实际使用情况,简单介绍了其他单位制以及换算关系。

② 本教材按120课时编写,各专业具体使用时可根据本校情况选取内容,加以调整。

本书适用于高职高专化工类及相关专业(生物工程、石油化工、化工机械、化工仪表自动化、制药、材料、环保、食品等专业)的教材,亦可作为成人教育及相关企业职工培训教材。

本书的绪论、第一章、第二章由黄徽编写;第三章由艾亚菲编写;第四章、第八章由周杰编写;第五章、第六章由刘瑞霞编写;第七章由闫生荣编写。全书由黄徽统稿。

本书的编写得到了全国化工高等职业教育教学指导委员会有关领导和化学工业出版社的支持和帮助。本教材是在编者学校教学改革中逐步产生的,经过编者学校的试用,受到了学生尤其是企业的欢迎。但由于时间仓促和编者水平有限,疏漏之处在所难免,敬请读者予以批评指正。

编 者
2010年6月

目 录

绪论	1	一、其他类型的泵	49
一、化工生产过程和单元操作	1	二、气体输送机械	51
二、本课程的任务、性质与内容	2	第三节 化工泵的正常操作及注意事项	54
三、单元操作中常用的一些基本概念	2	一、离心泵的操作及注意事项	54
四、物理量的单位	3	二、往复泵的操作及注意事项	56
第一章 流体输送	5	三、齿轮泵的操作及注意事项	56
学习目标	5	四、隔膜泵的操作及注意事项	57
第一节 流体静力学	5	五、屏蔽泵的操作及注意事项	57
一、流体的主要物理量	5	六、磁力泵的操作及注意事项	58
二、流体静力学方程	7	思考题	58
三、流体静力学方程的应用	8	习题	58
第二节 流体动力学	10	第三章 非均相物系分离	60
一、流量与流速	10	学习目标	60
二、定态流动与非定态流动	12	第一节 颗粒沉降	60
三、连续性方程式	12	一、重力沉降	61
四、柏努利方程式	13	二、离心沉降	64
第三节 流动阻力	19	第二节 过滤	67
一、流体阻力产生的原因	19	一、悬浮液的过滤	67
二、流体的流动类型与雷诺数	21	二、过滤速率基本方程式	68
三、流体在圆管中的速度分布	22	三、过滤常数 K 、 q_e 测定	69
四、流体阻力的计算	23	四、过滤设备简介	69
第四节 流体流量的测量	30	第三节 过滤设备的操作与维护	70
一、测速管	31	一、板框压滤机的操作与维护	70
二、孔板流量计	31	二、转筒真空过滤机的操作与维护	71
三、文丘里流量计	32	三、三足式离心机的操作与维护	71
四、转子流量计	32	思考题	72
第五节 化工管路的布置与安装原则	33	习题	72
一、化工管路布置原则	33	第四章 传热	74
二、化工管路安装原则	34	学习目标	74
思考题	34	第一节 概述	74
习题	35	一、传热及其在化工生产中的应用	74
第二章 流体输送机械	39	二、传热基本方式	74
学习目标	39	三、工业生产中的换热方式	75
第一节 离心泵	39	四、定态传热与非定态传热	76
一、离心泵的工作原理	39	第二节 热传导	77
二、离心泵的结构	40	一、傅里叶定律和热导率	77
三、离心泵的主要性能参数和特性曲线	41	二、平壁的热传导	78
四、离心泵的工作点与流量调节	44	第三节 对流传热	83
五、离心泵的汽蚀现象与安装高度	47	一、对流传热分析	84
六、离心泵的类型和选用	48	二、对流传热基本方程和对流传热系数	84
第二节 其他常用流体输送设备	49	三、对流传热中量纲分析法的应用	85

四、流体无相变时的对流传热系数的经验 关联式	86	一、工业吸收过程	124
五、流体有相变时的对流传热	88	二、气体吸收过程的应用	125
第四节 辐射传热	90	三、吸收过程的分类	125
一、热辐射的基本概念	90	四、吸收剂的选用	125
二、黑体、镜体、透热体和灰体	90	第二节 气液相平衡关系	126
第五节 传热计算	90	一、相组成表示方法	126
一、热负荷计算	91	二、气体在液体中的溶解度	128
二、总传热速率方程	91	第三节 吸收传质过程和吸收传质速率 方程	131
三、传热平均温度差	91	一、吸收机理	131
四、总传热系数	96	二、单相对流传质速率方程	133
五、传热计算举例	99	三、相际对流传质速率方程	134
第六节 换热器	101	第四节 吸收塔的计算	135
一、换热器的分类	102	一、物料衡算和操作线方程	136
二、间壁式换热器	102	二、吸收剂用量与最小液气比	137
三、列管式换热器的设计和选用	106	三、吸收塔填料层高度的计算	139
第七节 换热器的使用与维护	108	四、吸收塔塔径的计算	142
一、列管换热器的使用与维护	109	五、解吸及其计算	143
二、板式换热器的使用与维护	109	第五节 填料塔	144
思考题	110	一、填料塔与填料	144
习题	110	二、填料塔的附件	146
第五章 蒸发	112	三、填料塔的流体力学性能	148
学习目标	112	第六节 吸收操作	149
第一节 概述	112	一、吸收操作的开停车	149
一、蒸发操作及其在工业中的应用	112	二、解吸塔操作	152
二、蒸发操作的分类	113	思考题	152
三、蒸发操作的特点	113	习题	153
第二节 单效蒸发	113	第七章 蒸馏	155
一、蒸发器的物料衡算	113	学习目标	155
二、蒸发器的热量衡算	114	第一节 概述	155
三、蒸发器的传热面积	114	一、蒸馏及其在化工生产中的应用	155
第三节 多效蒸发	116	二、蒸馏过程的分类	155
一、多效蒸发概述	116	第二节 双组分物系的气液相平衡	156
二、多效蒸发流程	116	第三节 简单蒸馏和精馏	159
三、多效蒸发的效数	117	一、简单蒸馏	159
第四节 蒸发器	118	二、精馏	159
一、蒸发器的结构和特点	118	第四节 双组分连续精馏的计算	161
二、蒸发器的附属机构	120	一、理论板的概念与恒摩尔流的假设	161
第五节 蒸发器的操作和维护	121	二、全塔物料衡算	162
一、蒸发器的操作	121	三、操作线方程	163
二、蒸发系统常见操作事故与防止	122	四、进料热状况影响及 q 线方程	164
思考题	123	五、理论塔板数的求法	166
习题	123	六、回流比的影响与选择	168
第六章 气体吸收	124	七、全塔效率与单板效率	170
学习目标	124	八、塔高及塔径的计算	171
第一节 概述	124	九、精馏装置的热量衡算	171

第五节 间歇精馏和特殊精馏	172
一、间歇精馏	172
二、特殊精馏	173
第六节 板式塔	175
一、板式塔的结构	175
二、板式塔的流体力学性能	177
第七节 精馏塔的操作	181
一、精馏塔的开工准备	181
二、精馏塔的开停车	184
思考题	185
习题	186
第八章 干燥	188
学习目标	188
第一节 概述	188
一、干燥过程的分类	188
二、对流干燥的特点	189
第二节 湿空气的性质	189
第三节 湿空气的湿度-焓 ($H-I$) 图及其 应用	194
一、 $H-I$ 图的绘制	194
二、 $H-I$ 图的应用	196

第四节 干燥过程的物料衡算和热量 衡算	197
一、湿物料中含水量的表示方法	197
二、干燥过程的物料衡算	198
三、干燥过程的热量衡算	199
四、空气通过干燥器的状态变化	200
五、干燥系统的热效率	201
第五节 干燥速率和干燥时间	202
一、物料中的水分	202
二、干燥时间的计算	203
第六节 干燥器	205
一、干燥器的主要类型	205
二、干燥器的选型和设计	213
第七节 干燥器的使用与维护	215
一、喷雾干燥设备的使用与维护	215
二、滚筒干燥器的使用与维护	215
思考题	216
习题	216
附录	218
参考文献	234

绪 论

一、化工生产过程和单元操作

(一) 化工生产过程

将原料进行化学加工得到有用产品的工业称为化学工业。化工生产过程是指化学工业的生产过程，它的特点之一是操作步骤多，原料在各步骤中依次通过若干个或若干组设备，经历各种方式的处理之后才能成为产品。例如无机肥料工业中的合成氨生产过程，制药工业中的葡萄糖生产过程。这些以化学变化为主要特点的化学工业，原料广泛，产品种类繁多，生产过程复杂多样且差别很大。

但是，无论化学工业过程千差万别，生产规模大小，其核心皆为化学反应过程及其设备——反应器。为了使化学反应过程得以有效地进行，反应器内必须保持某些优惠条件，如适宜的温度、压力和物料的组成等。为此，原料必须经过一系列预处理以提纯并达到必要的温度和压力等，这类过程称为前处理。反应产物也同样需要经过各种处理过程来分离精制等，以获得最终成品或中间产品，这类过程称为后处理。上述化学反应过程前、后处理中所进行的各个过程，多数是纯物理过程，但却是化工生产中所不可或缺的。从另一个角度看，尽管反应过程是生产过程的核心，但它在工厂的设备投资和操作费用中通常所占比例并不高，实际上起决定作用的往往是众多的物理过程，它们决定了整个生产的经济效益，这一类重要的物理过程就是单元操作。由此可见单元操作在化学工业生产过程中的重要地位。

(二) 单元操作

将化工过程中的预处理、后处理等物理加工过程按其操作原理和特点归纳为若干个单元操作过程，即为单元操作。常用的单元操作如表 0-1 所列的几种。此外尚有搅拌、结晶、萃取、冷冻、膜分离等。

表 0-1 常用单元操作

传递基础	单元操作	目 的	物 态	原 理
动量传递	流体输送	以一定流量将流体从一处送到另一处	液或气	输入机械能
	沉降	非均相混合物的分离	液-固 气-固	密度引起的沉降运动
	过滤	非均相混合物的分离	液-固 气-固	利用过滤介质使固体颗粒与流体分离
热量传递	换热	使物料升温、降温或改变相态	气或液	利用温度差引入或导出热量
	蒸发	溶剂与不挥发性溶质的分离	液体	供热以气化溶剂
质量传递	气体吸收	均相混合物的分离	气体	各组分在溶剂中溶解度的不同
	液体蒸馏	均相混合物的分离	液体	各组分间的相对挥发度差异
	干燥	去湿	固体	供热气化

单元操作具有以下特点。①它们都是物理过程，这些操作只改变物料的状态或其物料性质，并不改变物料的化学性质。②它们都是化学工业生产过程中共有的操作。例如，制糖工业中稀糖液的浓缩与制碱工业中苛性钠稀溶液的浓缩，都是通过蒸发这一单元操作而实现的；酒精工业中酒精的提纯与石油化工中烃类的分离，都要进行蒸馏操作等。所以，各种化

工产品的生产过程,可由若干单元操作与化学反应过程做适当的串联组合而构成。③某单元操作用于不同的化工产品生产过程时,其基本原理并无不同,而且进行该操作的设备往往也是通用的。如蒸发操作中使用的蒸发器;蒸馏操作中使用的蒸馏塔。

二、本课程的任务、性质与内容

本课程是化工及相关专业学生必修的一门专业基础课,其主要任务是介绍流体流动、传热、传质的基本原理及主要单元操作的典型设备构造、操作原理、计算、选型及实验研究方法;培养学生运用基础理论分析和解决化工单元操作中各种工程实际问题的能力。具体内容可分为以下三个部分:

① 讨论流体流动及流体和与其相接触的固相发生相对运动时的基本规律,以及主要受这些基本规律支配的单元操作,如流体输送、沉降、过滤、离心分离。

② 讨论传热的基本规律,以及受这些基本规律支配的单元操作,如加热、冷却、蒸发。

③ 讨论物质透过相界面迁移过程的基本规律,以及受这些基本规律支配的单元操作,如液体的蒸馏、气体的吸收、液-液萃取、固体的干燥。

本课程既不同于自然科学中的基本学科,又区别于具体的化工产品生产的工艺学。它是将基础学科中的一些基本原理用来研究化学工业生产过程中内在本质规律问题的一门综合性的工程技术课程。它不仅是一门为化学工业生产服务的,内容十分广泛的工程技术学科,同时也是涉及物质变化的工业部门,如冶金工业、轻工业以及环境保护所必需的。因此,它具有十分广泛的实用性。

学习本课程的主要任务是掌握各个单元操作的基本规律,熟练进行化工单元的操作,熟悉其操作原理及相关典型设备的构造、性能和基本选型和设计等,并能用以分析和解决工程技术中的某些问题。以便对现行的化学工业生产过程进行管理,使设备能正常运转,进而对现行的生产过程及设备做各种改进,以提高工作效率,从而使生产获得最大限度的经济效益。

三、单元操作中常用的一些基本概念

在研究化工单元操作时,经常用到下列四个基本规律,即物料衡算,能量衡算,物系的平衡关系,传递速率。这四个基本概念贯串于本课程的始终,在这里仅做简要说明,详细内容见各章。

1. 物料衡算

依据质量守恒定律,进入与离开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

$$G = \sum G_{\text{入}} - \sum G_{\text{出}} \quad (0-1)$$

式中 $\sum G_{\text{入}}$ ——输入量的总和;

$\sum G_{\text{出}}$ ——输出量的总和;

G ——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,过程中物料的积累为零。则物料衡算关系为:

$$\sum G_{\text{入}} = \sum G_{\text{出}} \quad (0-2)$$

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。

2. 能量衡算

本教材中所用到的能量主要有机械能和热能。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；热量衡算也将在传热、蒸馏、干燥等章中结合具体单元操作有详细说明。热量衡算的步骤与物料衡算的基本相同。热量衡算关系为：

$$Q = \sum Q_{\text{入}} + \sum Q_{\text{出}} \quad (0-3)$$

式中 $\sum Q_{\text{入}}$ ——输入量的总和；

$\sum Q_{\text{出}}$ ——输出量的总和；

Q ——累积量。

3. 物系的平衡关系

过程的平衡问题说明过程进行的方向和所能达到的极限。当过程不是处于平衡态时，此过程必将以一定的速率进行，直到达到平衡状态。例如传热过程，当两物体温度不同时，即温度不平衡，就会有净热量从高温物体向低温物体传递，直到两物体的温度相等为止，此时过程达到平衡，两物体间也就没有净的热量传递。平衡状态表示的就是各种自然发生的过程可能达到的极限程度，除非影响物系的情况有变化，否则其变化的极限是不会改变的。

对于许多化学工业生产过程，可以从物系平衡关系来推知其能否进行以及能进行到何种程度。平衡关系也为设备尺寸的设计提供了理论依据。

4. 传递速率

任何物系，只要不处于平衡状态，就必然发生使物系趋向平衡的过程，但过程以何速率趋向平衡，这不决定于平衡关系，而是取决于多方面的因素。传递过程所处的状态与平衡状态之间的差距通常称为过程的推动力。例如两物体间的传热过程，其过程的推动力就是两物体的温度差。

通常存在以下关系式：

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

即传递过程的速率与推动力成正比，与阻力成反比。显然过程的阻力是各种因素对过程速率影响的总的体现。

四、物理量的单位

长期以来，整个科学技术领域存在着各种单位制单位并用的现象，故物理量的大小常用不同单位制单位来表示。随着科学技术的迅速发展和国际学术交流的日益频繁，迫切需要一个公认的、统一的单位制。1960年10月第11届国际计量会议制定了一种国际上统一的国际单位制，其国际代号为SI。国际单位制中的单位是由基本单位、辅助单位（平面角和立体角）导出单位构成的，分别列于表0-2、表0-3、表0-4。

表 0-2 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	电流	安培	A
质量	千克	kg	热力学温度	开尔文	K
时间	秒	s	物质的量	摩尔	mol

表 0-3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示式示例
频率	赫兹	Hz	s^{-1}
力,重力	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	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 CGS 制与工程制的基本单位

项 目	CGS 制				工程制			
量的名称	长度	质量	时间	温度	长度	力	时间	温度
单位符号	cm	g	s	$^{\circ}C$	m	kgf	s	$^{\circ}C$

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。法定计量单位刚实行不久,由过去的 CGS 和工程单位制过渡到全部使用法定单位,还需要一段时间。因此,必须掌握这些单位间的换算关系。单位换算时,需要换算因数。化工中常用单位的换算因数,可从有关手册查得。

第一章 流体输送

学习目标

理论目标

◆ 流体的密度、黏度和压力的定义；流体静力学方程、连续性方程、柏努力方程及其应用；流体流动类型、雷诺数及其计算。

◆ 了解各种流量计的基本结构、测量原理和使用方法；离心泵的结构、工作原理、性能参数和特性曲线；离心泵的安装、操作、选型要点。

能力目标

- 能正确选择流体输送机械和管道。

流体 (fluid) 是指具有流动性的物体, 包括气体和液体。化工生产过程所处理的物料, 包括原料、中间体、半成品和成品等, 绝大多数都是流体。为了满足工艺生产要求, 通常需把流体物料从一道工序输送到下一工序, 或是从一个设备运送到另一个设备, 可见, 流体流动和输送是最为普遍的基本化工单元操作之一。不仅如此, 化工生产中的其他单元操作比如传热、精馏、吸收等大多处理对象也都是流体, 这些过程的各种问题都受到流体流动状况的影响, 因此, 流体流动规律是研究其他单元操作过程的基础。

从微观角度, 流体是由大量彼此之间有一定间隙的随机运动的单个分子组成的。在工程上, 常将流体视为由无数流体质点组成的彼此之间没有间隙的连续介质。这些假定的质点, 尺寸远大于分子自由程, 但却远小于设备尺寸。这种流体质点假定, 便于避开复杂的分子运动, 从宏观的角度来研究流体流动的规律, 但是对于高真空稀薄气体不成立。

根据流体体积随压力的变化关系, 可以将流体分为不可压缩性流体和可压缩性流体。一般液体的体积随压力变化很小, 可看作不可压缩流体; 而一般的气体体积随压力变化较大, 常可看作可压缩流体, 但如果压力的变化率不大, 则某些气体亦可视为不可压缩流体。

研究流体平衡和运动的宏观规律的科学称为流体力学。本章着重研究流体流动的基本规律, 解决实际化工生产中涉及到的诸如流体输送, 压力、流速或流量的测量, 强化其他化工生产过程等过程。

第一节 流体静力学

流体静力学主要研究流体处于静止状态时各种物理量的变化规律, 是流体流动状态的一种特殊方式。流体静力学基本原理在化工生产中应用广泛, 如压力、压力差的测量, 容器液位的测定和设备液封等。

一、流体的主要物理量

1. 密度

单位体积流体的质量, 称为流体的密度 (density)。表达式为

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

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 。

一般液体的密度与压力变化关系不大, 但随温度变化。液体密度随温度变化关系可由物理化学数据手册或有关资料查得, 本书附录也给出了一些常用液体的密度, 供参考使用。

一般气体的密度同时随压力和温度的变化而变化。当压力不太高、温度不太低时, 气体密度可由理想气体状态方程计算:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2)$$

式中 p ——气体的绝对压力, Pa ;

M ——气体的摩尔质量, kg/mol ;

R ——摩尔气体常数, 其值为 $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T ——热力学温度, K 。

对于气体混合物, 有

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n (\rho_i y_i) \quad (1-3)$$

对于液体混合物, 有

$$\frac{1}{\rho_m} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \quad (1-4)$$

式中, w_i 为液体混合物中各组分的质量分数。

2. 比容

单位质量流体的体积, 称为流体的比容 (specific volume), m^3/kg , 表达式为

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-5)$$

3. 压强

流体的压强 (pressure), 亦称为压力, 定义为流体垂直作用于单位面积上的力。流体压强的单位为 N/m^2 , 也称为帕斯卡 (Pa), 简称为帕。压强的单位还有很多习惯表示法, 如大气压 atm 、工程大气压 at 、液柱压强 (毫米汞柱 mmHg 、米水柱 mH_2O) 等, 它们之间的关系如下:

$$1\text{atm} = 101325\text{Pa} = 760\text{mmHg} = 1.033\text{kgf}/\text{cm}^2 = 10.33\text{mH}_2\text{O}$$

$$1\text{at} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{Pa} = 735.6\text{mmHg} = 10\text{mH}_2\text{O}$$

在化工计算中, 常采用两种基准来度量压强的数值大小, 即绝对压强 (absolute pressure) 和相对压强 (relative pressure)。上述的压强数值, 都是基于没有气体分子存在的绝对真空作为基准度量得到的, 即为绝对压强。另外还有以当地大气压为基准所度量得到的压强, 即为相对压强。常用的相对压强表示方法有两种: 表压 (gauge pressure) 和真空度 (vacuum)。若绝对压力值高于大气压, 高出的部分称为表压, 数值为正; 若绝对压力值低于大气压, 低的部分称为真空度。相对压强和绝对压强以及大气压之间的关系如下所示:

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

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

绝对压强、表压和真空度的关系还可图 1-1 表示。

【例 1-1】 某精馏塔塔顶操作压力须保持 5332N/m^2 绝对压力。试求塔顶真空计应控制在多少毫米汞柱 (mmHg)? 若 (1) 当时当地气压计的读数为 756mmHg 或 (2) 102.6kPa 时。

解: 真空度 = 大气压力 - 绝对压力

$$(1) 756 - \frac{760 \times 5332}{101325} = 716 \text{ (mmHg)}$$

$$(2) \frac{102.6 \times 1000}{133.3} - \frac{5332}{133.3} = 730 \text{ (mmHg)}$$

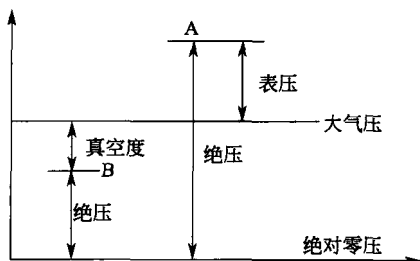


图 1-1 绝对压强、表压和真空度之间的关系

二、流体静力学方程

流体静力学 (fluid statics) 是用于描述静止流体内部的压力随高度变化的数学表达式。

对于不可压缩流体，密度不随压力变化。如图 1-2 所示，设液面上方的压强为 p_0 ，有一表面积为 A 的液柱，上表面的压强为 p_1 ，液柱下底面的压强为 p_2 ，液柱上表面离容器底高度为 h_1 ，下底面离容器底高度为 h_2 ，以向下为正方向，对液柱进行受力分析有：

液柱上端所受总压力为： $p_1 A$

下端总压力为： $-p_2 A$

液柱的重力： $G = \rho g A (h_1 - h_2)$

液柱处于静止时，竖直方向合力为零，即

$$p_1 A + (-p_2 A) + \rho g A (h_1 - h_2) = 0$$

图 1-2 流体静力学
方程的推导

整理得：

$$p_1 + \rho g h_1 = p_2 + \rho g h_2 \quad (1-6)$$

令 $h = h_1 - h_2$ ，则式(1-6) 变为

$$p_2 = p_1 + \rho g h \quad (1-7)$$

或

$$h = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} \quad (1-8)$$

或

$$\frac{p_1}{\rho g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho g} + h_2 = \text{常数} \quad (1-9)$$

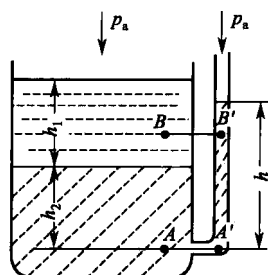
由式(1-7) 可知，流体某一深度的压力与深度和密度有关，与水平位置无关。或者，处于同一水平面上的各点，因其深度相同，其压力亦相等。也就是说，静止的、连续的同一流体内，同一水平面处，各点压力相等，压力相等的点构成的面称为等压面。

由式(1-8) 表明，压力差可用液柱的高度来表示，但在使用时要注明是何种液体。

由式(1-9) 可知，静止的、连续的同一流体内，同一水平面处，不同垂直位置上的各点 h 和 $p/(\rho g)$ 之和为常数，其中 h 称为位压头 (potential head)，其单位可写成 J/N ，其意义为单位重量 (1N) 流体的位能。 $p/(\rho g)$ 称为单位重量流体的静压能，或称静压头 (hydrostatic head)。

需要指出，静力学基本方程适用于静止的连续的同一流体。对于气体，虽然气体密度随着压力的改变而改变，但随容器高低变化甚微，故静力学基本方程亦适用于气体。

【例 1-2】 本题附图所示的开口容器内盛有油和水。油层高度 $h_1 = 0.7\text{m}$ 、密度 $\rho_1 = 800\text{kg/m}^3$ ，水层高度（指油水界面与小孔的距离） $h_2 = 0.6\text{m}$ 、密度 $\rho_2 = 1000\text{kg/m}^3$ 。



例 1-2 附图

(1) 判断下列两关系是否成立, 即 $p_A = p_{A'}$, $p_B = p_{B'}$; (2) 计算水在玻璃管内的高度 h 。

解: (1) 判断下列两关系是否成立。

$p_A = p_{A'}$ 的关系可以成立。因 A 和 A' 两点在静止的连通着的同一流体内, 并在同一水平线上。

$p_B = p_{B'}$ 的关系不能成立。因 B 和 B' 两点虽然在静止流体的同一水平面上, 但不是连通的同一流体。

(2) 计算玻璃管内水的高度 h 。

由上面讨论知 $p_A = p_{A'}$, 而 p_A 和 $p_{A'}$ 都可以用流体静力学方程计算, 即

$$p_A = p_a + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2$$

$$p_{A'} = p_a + \rho_2 g h$$

于是

$$p_a + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 = p_a + \rho_2 g h$$

简化上式并将已知值代入, 得

$$800 \times 0.7 + 1000 \times 0.6 = 1000h$$

解得 $h = 1.16\text{m}$ 。

三、流体静力学方程的应用

(一) 压力测量

1. U 形管液柱压差计

U 形管液柱压差计由一根装有指示液的 U 形玻璃管构成, 如图 1-3 所示。

设被测流体的密度为 ρ , 指示液的密度为 ρ_0 , 1—1' 截面的压强为 p_1 , 2—2' 截面的压强为 p_2 , 因 c—c 截面两端所连的是静止的连续的同一流体, 则根据流体静力学方程, c—c 截面两端的压强相等, 则根据左端的液柱可得

$$p_c = p_1 + \rho g (H + R) \quad (1-10)$$

根据右端的液柱可得

$$p_c = p_2 + \rho g H + \rho_2 g R \quad (1-11)$$

两式相减可得, p_1 和 p_2 的压差可表示为:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_0 - \rho) g R \quad (1-12)$$

当指示液的密度和被测流体密度已知时, 根据现场测得的 R 就可以求得 1—1' 和 2—2' 截面的压差。若 U 形管一端与设备或管道某一截面连接, 另一端与大气相通, 这时读数 R 所反映的是管道中某截面处的绝对压强与大气压强之差, 即为表压强或真空度, 从而可求得该截面的绝对压强。

必须指出, 在选择 U 形管压差计的指示液时, 必须保证与被测流体不互溶, 不发生化学反应, 且密度要大于被测流体。如果被测的流体为气体, 压差可近似为 $\rho_0 g R$ 。常用的指示液有汞、四氯化碳、着色水、液体石蜡等。

若被测流体为液体, 也可选用比其密度小的流体作为指示剂。则此时的压差计须倒立放置, 即为倒 U 形压差计, 常用的指示剂有空气等。

2. 斜管压差计

当压差不大时, 读数 R 必然很小, 为获得精确的读数, 可采用斜管压差计, 如图 1-4 所示, 其原理为:

$$R' = \frac{R}{\sin \alpha} \quad (1-13)$$

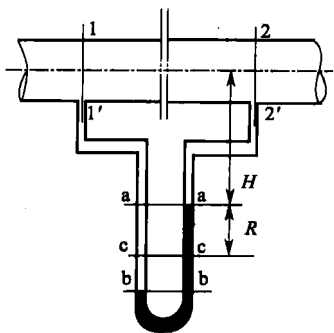


图 1-3 U 形管液柱压差计

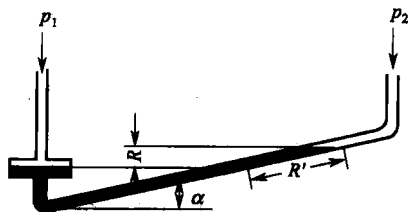


图 1-4 斜管压差计

式中， α 为倾斜角度。 α 越小， R 值放大为 R' 的倍数越大。

3. 微差压差计

如图 1-5 所示，在 U 形管中放置两种密度不同、互不相溶的指示液 A 和 C，管的上端有扩张室，当 R 变化时，由于扩张室有足够大的截面积，所以两扩张室中液面不至于有明显的变化。其测量原理为：

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_C) R g \quad (1-14)$$

式中 ρ_A 、 ρ_C 分别为重、轻两种指示液的密度， kg/m^3 。

(二) 液面测定

化工厂中经常要了解容器里物料的储存量，或要控制设备里的液面，因此要进行液位的测量。大多数液位计的作用原理均遵循静止液体内部压强变化的规律，即依据流体静力学基本方程式。常见的用于液面测定的有原始液位计、液柱压差液位计、鼓泡式液柱液位计。

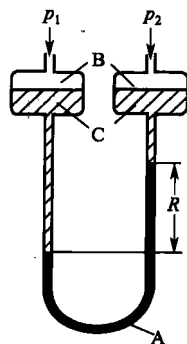
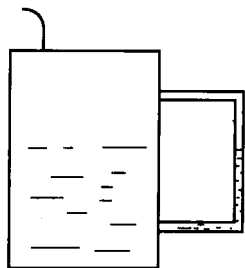
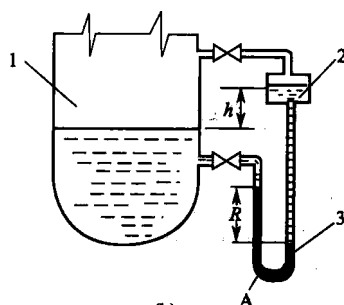


图 1-5 微差压差计

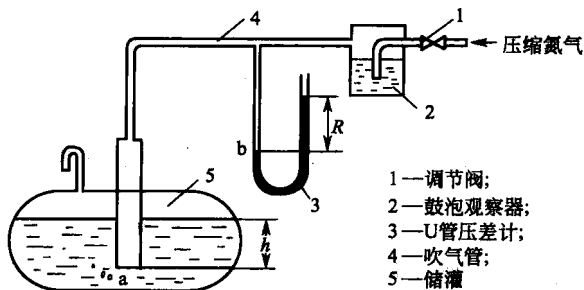


(a)



(b)

1—容器；2—平衡器小室；3—U 管压差计



(c)

1—调节阀；
2—鼓泡观察器；
3—U 管压差计；
4—吹气管；
5—储罐

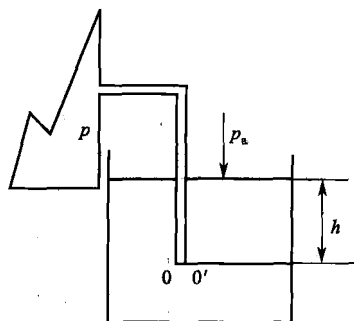
图 1-6 压差法测量液位

图 1-6(a) 中, 由于容器内和外部导管中是同一液体, 所以液位平齐。图 1-6(b) 中, $h = \frac{(\rho_A - \rho)}{\rho} R$ 。其中, ρ_A 是指示液的密度, ρ 为被测流体的密度。图 1-6(c) 中, $h = \frac{\rho_0}{\rho} R$, 其中 ρ_0 为指示液密度, ρ 为被测流体的密度。

(三) 确定液封高度

为了防止事故发生, 保证安全生产, 工业生产常常利用液柱高度封闭气体。当设备内压力超过规定值时, 气体就从液封管排出, 以确保设备操作的安全。现以例题 1-3 说明液封高度的工业应用。

【例 1-3】 某厂为了控制乙炔发生炉内的压强不超过 $10.7 \times 10^3 \text{ Pa}$ (表压), 需在炉外装有安全液封装置, 作用是当炉内压强超过规定值时, 气体就从液封管中排出, 试求此炉的安全液封管应插入槽内水面下的深度 h 。



例 1-3 附图

解: 以液封面为基准水平面 0—0', 则根据流体静力学方程有 0—0' 为等压面, 即

$$p_0 = p'_0$$

而

$$p_0 \approx p$$

$$p'_0 = p_a + \rho g h$$

从而有

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

解得 $h = 1.09 \text{ m}$ 。

工业上, 实际安装时管子插入液面下的深度应比计算值略低。

第二节 流体动力学

一、流量与流速

1. 流量

单位时间内流过管道任一截面的流体数量称为流量 (flow rate)。常见的流量表示方法有体积流量和质量流量。

① 体积流量 (volumetric flow rate): 单位时间内流体流经管道任一截面的体积。用 V 或 V_s 表示, 单位 m^3/s 。

② 质量流量 (mass flow rate): 单位时间内流体流经管道任一截面的质量。用 m_s 表示, 单位 kg/s 。

体积流量和质量流量之间的关系为:

$$m_s = V_s \rho \quad (1-15)$$

2. 流速

(1) 平均流速 (average velocity) 单位时间内流体质点在流动方向上所流经的距离。用 u 表示, 单位 m/s 。

之所以引入平均流速的概念, 是因为流体在管道内流动时, 由于其具有黏性, 管道横截面上流体质点速度沿半径变化。管道中心流速最大, 愈靠近管壁速度愈小。在紧靠管壁处, 由于流体质点黏附在管壁上, 故其速度为零。速度分布见图 1-7。工程上一般以体积流量除以管道截面积所得的值来表示流体在管道中的速度。通常把平均流速称为流速, 其与流量的