



全国高职高专教育“十一五”规划教材



蒋丽芬 主编

化工原理



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

化工原理

蒋丽芬 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是根据最新高等职业教育化工技术专业人才培养目标而编写的。本书根据高等职业教育的特点,以“必需、够用”为度对内容进行精简、提炼。全书内容共分十章,包括流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离、传热、蒸发、气体吸收、液体的蒸馏、液液萃取、固体干燥、现代分离技术等,每章均编有适量的例题、习题,并插有部分实际案例分析,重点培养学生分析和解决问题的能力。

本书适用于应用性、技能型人才培养的各类教育的化工及其相关专业,也可供相关企业工程科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/蒋丽芬主编. —北京:高等教育出版社,
2007.8

ISBN 978 - 7 - 04 - 022125 - 1

I. 化… II. 蒋… III. 化工原理 - 高等学校:技术学校 -
教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 124834 号

策划编辑 周先海 责任编辑 刘 佳 封面设计 于 涛 责任绘图 朱 静
版式设计 王艳红 责任校对 张 颖 责任印制 毛斯璐

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 北京未来科学技术研究所
有限责任公司印刷厂

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.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 28.25
字 数 690 000

版 次 2007 年 8 月第 1 版
印 次 2007 年 8 月第 1 次印刷
定 价 32.00 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 22125 - 00

前 言

本书是根据最新高等职业教育化工技术类专业人才培养目标而编写的。本书根据高等职业教育的特点,以“必需、够用”为度对内容进行精简、提炼,适用于化工技术类专业和化工机械、化工仪表、化工分析、环境保护、化工管理、轻工、制药及其相近专业的相应课程。

为适应高等职业教育应用性、技能型的特点,本书内容避开繁琐的公式推导,增加实用的案例分析,尽量简化但保留够用的成熟基础理论,努力反映学科的现代特点,强调实际应用技能和能力的培养。在文字上力求简练,通俗易懂,尽量符合化工专业技术人员的特点和需要。全书侧重于基础知识、基本理论在实际应用中的分析讨论,注意培养和启发学生解决问题的思路、方法及能力。

全书共分十章,参考教学时数约为 130 学时,其中,第一、二、三章介绍动量传递过程,第四、五章介绍热量传递过程,第六、七、八、十章介绍物质传递过程,第九章固体干燥则属于热、质同时传递过程。

本书由南京化工职业技术学院蒋丽芬主编、统稿并编写了第三、六、十章,参加编写的人员有:南京化工职业技术学院王纬武(第一、七章)、季锦林(第二章)、汤立新(第四、五章),泰州职业技术学院李融(第九章)和王立中(第八章)。

本书承蒙南京化工职业技术学院许宁教授和常州工程职业技术学院张裕萍副教授审定,提出了一些宝贵的意见和建议;在编写过程中,得到了编者所在学校相关领导和教师的关心和大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有欠妥和错误之处,希望专家、读者予以批评指正。

编 者

2007 年 6 月

目 录

绪论	1	第七节 流量的测量	54
一、化工生产过程与单元操作	1	一、皮托测速计	54
二、本课程的性质、内容和任务	1	二、文丘里流量计	55
三、化工过程中的几个基本概念	2	三、孔板流量计	57
第一章 流体流动	4	四、转子流量计	58
学习目标	4	案例分析	59
第一节 概述	4	本章小结	60
一、流体流动的研究对象	4	复习与思考	60
二、流体连续性假定	4	习题	61
三、流体流动在化工生产中的应用	5	本章主要符号说明	63
第二节 流体的基本性质	5	第二章 流体输送机械	65
一、流体的密度	5	学习目标	65
二、流体的黏度	7	第一节 概述	65
第三节 流体静力学	9	第二节 离心泵	66
一、流体的压强	9	一、离心泵的结构类型与工业应用	66
二、流体静力学基本方程	10	二、离心泵的原理与性能	73
三、静力学基本方程的应用	12	三、离心泵的选用	77
第四节 流体动力学	16	四、离心泵的安装	77
一、定态流动与非定态流动	16	五、离心泵的日常运行与操作	79
二、流量与流速	17	第三节 其他类型泵	86
三、定态流动的物料衡算——连续性 方程	18	一、往复泵	86
四、定态流动的能量衡算——伯努利 方程	19	二、齿轮泵	89
第五节 管内流动阻力	27	三、螺杆泵	90
一、化工管路	27	四、旋涡泵	90
二、流体流动现象	34	五、轴流泵	91
三、流体在管内流动阻力的计算	37	第四节 气体输送机械	92
四、减小流动阻力的途径	46	一、离心式通风机	93
第六节 管路计算	46	二、鼓风机	96
一、阻力对管内流动的影响	46	三、压缩机	97
二、简单管路计算	48	四、真空泵	100
三、复杂管路计算原则	53	案例分析	102
		本章小结	103
		复习与思考	103

习题	104	三、总传热系数	145
本章主要符号说明	105	四、平均温度差	148
第三章 非均相物系的分离	107	五、传热过程计算举例	154
学习目标	107	第六节 换热器	157
第一节 概述	107	一、传热过程的强化途径	157
第二节 沉降	108	二、间壁式换热器分类	159
一、重力沉降	109	三、列管换热器的工艺设计和选型	165
二、离心沉降	111	第七节 工业循环冷却水系统	169
第三节 过滤	114	一、概述	169
一、基本概念	114	二、冷却水系统	169
二、影响过滤速度的因素	115	三、节水环保型水处理技术	171
三、典型过滤设备	116	案例分析	172
本章小结	121	本章小结	175
复习与思考	122	复习与思考	176
本章主要符号说明	122	习题	176
第四章 传热	123	本章主要符号说明	178
学习目标	123	第五章 蒸发	180
第一节 概述	123	学习目标	180
一、传热在化工生产中的应用	123	第一节 概述	180
二、传热的基本方式	124	一、蒸发操作的基本概念	180
三、工业生产中的换热方法	124	二、蒸发流程	180
四、定态传热与非定态传热	126	三、蒸发的分类	181
五、传热速率与热通量	126	四、蒸发操作的特点	181
第二节 热传导	127	第二节 蒸发设备	182
一、傅里叶定律和导热系数	127	一、蒸发器的型式与结构	182
二、平壁定态热传导	128	二、蒸发器的辅助设备	187
三、圆筒壁定态热传导	131	第三节 单效蒸发	187
第三节 对流传热	133	一、单效蒸发流程	187
一、对流传热的过程分析	133	二、单效蒸发的计算	188
二、对流传热基本方程和对流传热系数	134	三、蒸发设备中的温度差损失	192
三、流体无相变时的对流传热系数	135	四、单效蒸发过程的计算	193
四、流体有相变时的对流传热	138	第四节 多效蒸发	194
第四节 辐射传热	140	一、多效蒸发流程	194
一、热辐射的基本概念和特点	140	二、多效蒸发效数的限制	196
二、影响辐射传热的主要因素	141	第五节 蒸发器的生产能力和生产	
三、对流与辐射联合传热	141	强度	196
第五节 传热计算	142	一、蒸发器的生产能力	196
一、传热速率方程	142	二、蒸发器的生产强度	197
二、热负荷的确定	142	三、蒸发操作的其他节能措施	198

本章小结	200	三、填料塔的附件	244
复习与思考	200	第九节 吸收操作分析	248
习题	200	一、吸收操作分析	248
本章主要符号说明	201	二、吸收操作的调节	249
第六章 气体吸收	203	案例分析	250
学习目标	203	本章小结	252
第一节 概述	203	复习与思考	253
第二节 气液相平衡	205	习题	253
一、气体在液体中的溶解度	205	本章主要符号说明	255
二、亨利定律	206	第七章 液体的蒸馏	257
三、相平衡与吸收过程的关系	209	学习目标	257
第三节 传质的两种基本方式	210	第一节 概述	257
一、分子扩散	211	一、蒸馏分离的依据	257
二、涡流扩散	211	二、蒸馏分离的分类	258
第四节 对流传质	212	第二节 双组份物系的气液相平衡	258
一、吸收机理模型	212	一、理想物系的气液相平衡	258
二、对流传质速率	213	二、双组份非理想物系的气液相平衡	265
第五节 吸收塔的计算	217	三、总压的改变对气液平衡的影响	267
一、低浓度气体吸收的特点	217	第三节 简单蒸馏与平衡蒸馏	267
二、吸收塔的物料衡算与操作线方程	218	一、简单蒸馏	267
三、吸收剂用量的确定	219	二、平衡蒸馏	268
四、低浓度气体定态吸收填料层高度的 计算	222	第四节 精馏原理	269
五、传质单元高度与传质单元数	222	一、连续精馏原理	269
六、吸收塔计算举例	229	二、连续精馏流程	271
七、板式吸收塔塔板数的计算	232	第五节 双组份溶液连续精馏塔的计算	272
八、解吸塔的计算	233	一、基本型精馏塔的计算条件	272
第六节 其他类型吸收简介	235	二、全塔物料衡算	273
一、高浓度气体吸收	235	三、精馏操作线方程	274
二、非等温吸收	235	四、精馏塔塔板层数确定	279
三、多组分吸收	236	五、填料精馏塔的填料层高度确定	284
四、化学吸收	236	六、回流比的影响及其选择	284
第七节 吸收与解吸操作流程	237	七、精馏塔的热量衡算与进料热状态的 选择	287
一、吸收剂部分再循环的吸收流程	237	八、其他类型的连续精馏计算	289
二、多塔串联吸收流程	237	第六节 精馏操作分析	296
三、吸收-解吸联合操作流程	238	一、操作压力的影响	296
第八节 填料塔	238	二、操作温度的控制	296
一、填料塔与填料	238	三、进料状况的影响	297
二、填料塔的流体力学性能	241		

四、回流比的调节	298	一、萃取设备的种类	346
五、采出量的控制	298	二、萃取设备的选用	349
第七节 间歇精馏	299	本章小结	350
一、馏出液维持恒定时的间歇精馏	299	复习与思考	351
二、回流比维持恒定时的间歇精馏	299	习题	351
第八节 特殊精馏	300	本章主要符号说明	353
一、恒沸精馏	300	第九章 固体干燥	355
二、萃取精馏	301	学习目标	355
第九节 板式塔	302	第一节 概述	355
一、塔板类型和塔板结构	302	一、固体物料的去湿方法	355
二、板式塔的流体力学性能	307	二、干燥过程的分类	356
三、浮阀塔的设计原则	309	三、对流干燥过程	357
四、板式塔与填料塔的比较	319	第二节 湿空气的性质和湿度图	357
案例分析	320	一、湿空气的性质	357
本章小结	321	二、湿空气的湿度图及其应用	364
复习与思考	322	第三节 干燥过程的物料衡算和热量	
习题	322	衡算	367
本章主要符号说明	324	一、干燥过程的物料衡算	367
第八章 液液萃取	326	二、干燥过程的热量衡算	369
学习目标	326	三、干燥器出口空气状态的确定	371
第一节 概述	326	四、干燥器的热效率和干燥效率	372
一、液液萃取的原理	326	第四节 干燥速率和干燥时间	373
二、液液萃取流程	327	一、物料中所含水分的性质	373
三、萃取操作的工业应用	328	二、干燥速率及其影响因素	374
四、萃取操作的特点	329	三、恒定干燥条件下干燥时间的计算	376
第二节 液液相平衡	329	第五节 干燥过程的操作分析	378
一、三角形相图	329	一、干燥操作条件的确定	378
二、部分互溶物系的相平衡	331	二、干燥操作过程的节能	379
三、分配系数和分配曲线	333	第六节 干燥器	380
第三节 萃取操作流程和计算	335	一、对干燥器的要求	380
一、单级萃取	335	二、干燥器的主要型式	380
二、多级萃取	337	三、干燥器的选用	383
三、完全不互溶物系的萃取	342	本章小结	384
第四节 萃取操作分析	343	复习与思考	385
一、萃取剂性质的影响	343	习题	385
二、萃取剂的组成和用量的影响	345	本章主要符号说明	386
三、萃取操作温度的影响	345	第十章 现代分离技术	387
四、分散相选择的影响	345	学习目标	387
第五节 萃取设备	346	第一节 吸附技术	387

一、吸附原理与吸附剂	387	6. 饱和水与饱和蒸汽表(按温度排列) ...	411
二、吸附速率	389	7. 饱和水与饱和蒸汽表(按压力排列) ...	413
三、吸附操作	390	8. 某些有机液体的相对密度共线图	415
四、吸附过程的强化与展望	392	9. 液体黏度共线图	416
第二节 膜分离技术	393	10. 液体的比热容共线图	418
一、膜分离技术的基本原理	393	11. 液体汽化潜热共线图	420
二、分离用膜	397	12. 气体黏度共线图(常压下使用)	421
三、膜分离设备	398	13. 101.3 kPa 压强下气体的比热容共线图	
第三节 超临界流体萃取技术	400	422
一、超临界流体萃取技术的发展与特点	400	14. 某些液体的导热系数(单位: $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	
二、超临界流体萃取与液液萃取的比较	401	423
三、超临界流体萃取过程简介	402	15. 常用气体的导热系数图	424
四、超临界流体萃取的工业应用	402	16. 常见固体的导热系数	424
本章小结	404	17. 某些双组分混合物在 101.3 kPa 压力下	
复习与思考	404	的气液平衡数据	425
本章主要符号说明	404	18. 某些气体溶于水中的亨利系数	426
附录	406	19. 管子规格	428
1. 单位换算表	406	20. IS 型离心泵性能表	429
2. 水的物理性质	407	21. 列管式换热器标准系列(摘录)	434
3. 水在不同温度下的黏度	408	22. 几种常用填料的特性数据(摘录)	438
4. 某些液体的物理性质	409	参考书目	439
5. 干空气的物理性质($p = 101.3 \text{ kPa}$)	410		

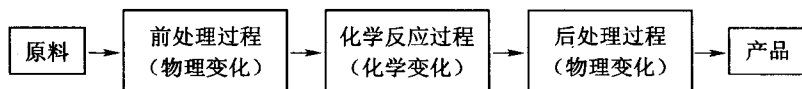
绪 论

一、化工生产过程与单元操作

化学工业是将自然界中的各种物质,经过化学和物理方法将其加工为产品的制造业。化工产品的品种数以万计,它包括了各种生产资料和生活资料,在国民经济和日常生活中占有重要地位。

化学工业是一个多门类、多品种的生产部门,其中任何一种化工产品的生产都是将各种原料通过许多工序和设备,在一定的工艺条件下,进行一系列的加工处理,最后制得产品。一种产品从原料到成品的生产过程中,除了化学反应过程外,还有大量的物理加工过程。不同的原料、不同的产品具有不同的生产过程,但在其过程中都要用到一些类型相同、具有共同特点的基本过程和设备。如流体输送、换热、精馏等物理操作,反应器中进行的化学反应等典型操作。由此可见,任一个化工过程都是由化学反应过程和一系列物理过程构成,而化学反应过程是化工生产过程的核心。

一个完整的化工生产过程包括如下步骤:



在反应进行之前,须对原料进行一系列的处理。为使化学反应过程得以经济有效地进行,反应器内必须保持适宜的反应条件,如适当的温度、压强及物料组成等;原料必须经过一系列处理以达到较高的纯度。通常将反应前对原料进行的处理称为原料的预处理或前处理;在反应进行过程中,为维持适宜的反应条件,需向体系输入或输出热量以保证适宜的反应温度;在反应结束后,仍需对反应产物进行分离、精制等,以制得合格产品,我们称之为反应产物的后处理过程。因而,可以认为,化工生产过程是由原料的前处理过程、化学反应过程和产物的后处理过程组成。化学工业中将具有共同的物理变化,遵循共同的物理学规律,以及具有共同作用的基本操作称为单元操作。

二、本课程的性质、内容和任务

化工原理是化工专业必修的一门技术基础课,它在基础课程与专业课程之间起着承前启后的作用。

单元操作按其理论基础可分为三类:

- ① 流体流动过程 包括流体输送、沉降、过滤等。

- ② 传热过程 包括传热、蒸发等。
 ③ 传质过程 包括吸收、蒸馏、萃取、吸附等。

本课程的主要任务是使读者熟悉相关单元操作的基本原理、典型设备的结构原理、操作性能和基本计算方法,能在工程实践中运用这些知识去分析和解决实际问题。学会单元操作过程的具体操作和调节,解决操作中的实际问题,确保操作在最优化条件下进行。

三、化工过程中的几个基本概念

在分析单元操作或工艺过程中,经常要用到物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率等概念来反映物料的变化规律,从理论上探索它的可能性,技术上的可行性以及经济上的合理性。它们是分析任一化工过程的出发点。

(一) 物料衡算

物料衡算是以质量守恒定律为基础,用来分析和计算化工过程中物料的进、出量以及组成变化的定量关系,确定原料消耗定额、产品的产量和产率,还可以用来核定设备的生产能力,确定设备的工艺尺寸,发现生产中所存在的问题,从而找到解决方案。所以它是化工计算的基础。

进行物料衡算时,首先根据需要对衡算对象人为地划定一个衡算范围。其次要规定一个衡算基准。衡算基准要根据实际需要来决定,在连续操作中以单位时间为基准较为方便;对于产品量已确定,则可用单位产品量为基准,由此来衡算出其他各股物料量。必须注意的是:参与衡算的物料量要以质量或物质的量表示,一般不宜用体积表示,这是由于体积尤其气体的体积是随着温度、压强的变化而变化。

若进入体系的各股物料总量为 $\sum G_i$,从体系中排出的各股物料总量为 $\sum G_o$,体系内的物料累积量为 G_a ,根据质量守恒定律应有

$$\sum G_i = \sum G_o + G_a$$

对于连续操作,进、出体系的各股物料量恒定,体系内任一位置处物料的各参数(温度、压强、组成、流速等)都不随时间而变,这样的操作过程称为定态过程。对定态过程,控制体内无物料积累, $G_a = 0$,则物料衡算式为

$$\sum G_i = \sum G_o$$

物料衡算中控制体的概念同样可以用到能量衡算或动量衡算中去。

(二) 能量衡算

能量衡算的依据是能量守恒定律。根据此定律,输入体系的能量应等于从体系输出的能量与体系内累积的能量之和。

对定态操作系统,若输入体系的热量为 $\sum Q_i$,输出的热量为 $\sum Q_o$,体系的热损失为 Q_a ,该体系的热量衡算式为

$$\sum Q_i = \sum Q_o + Q_a$$

通过热量衡算可以了解热量的利用和损失情况,确定过程中需要加入的热量,是生产工艺条件的确定、设备设计不可缺少的环节,也是评价技术经济效果的重要工具。

(三) 平衡关系

任何一个物理或化学变化过程,在一定条件下必然沿着一定方向进行,直至达到动态平衡为止。这类平衡现象在化工生产中很多,如化学反应中的反应平衡,吸收、蒸馏操作中的气-液平

衡,萃取操作中的液-液平衡等。

任何过程的平衡状态都是在一定条件下达到暂时、相对统一的状态,一旦条件变化,则原来的平衡就要被破坏,直至建立起新的平衡。因此我们只要适当地改变操作条件,过程进行就可按指定的方向进行,并尽可能使过程接近平衡,使设备能发挥最大的效能。平衡关系也为设备尺寸的设计提供了理论依据。

(四) 过程速率

平衡关系只能说明过程的方向和限度,而不能确定过程进行的快慢,过程进行的快慢只能用过程速率来描述。过程速率受诸多因素影响,目前还不能用一个简单的数学式来表示化工过程速率与其影响因素之间的关系。工业生产中过程速率常以过程推动力与过程阻力的比值来表示,即

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

不同过程的推动力有不同的含义,如冷、热两流体之间传热推动力应为冷、热两流体之间的温度差,流体流动的推动力为势能差,而物质传递的推动力则为浓度差。无论是什么含义,它们有一个共同点,即过程达平衡时推动力均为零。过程阻力较为复杂,应根据具体过程进行分析。

第一章 流体流动

学习目标

知识目标:

了解流体主要性质,化工管路的基本知识,复杂管路计算原则,流量计的测量原理;
理解温度、压强对流体性质的影响,流体内摩擦力产生的原因,不同流动条件对流体阻力的影响;

掌握流体主要物性以及压强、流量的获取方法,压强的单位换算,流体流动基本方程在化工计算中的应用,流体在管内的阻力损失的计算,简单管路计算与布置。

能力目标:

能应用流体流动基本方程解决简单管路计算问题,能分析流体阻力对管内流动的影响;
能根据需要正确选用管子、管件和阀门,完成简单管路的拆装。

第一节 概 述

一、流体流动的研究对象

流体流动研究的是流体的宏观运动规律,并运用这些规律去解决实际工程问题。

流体流动的研究对象是流体,其基本特性是它具有流动性。气体和液体同属流体,它们有共性,也有各自的特性:如液体不容易被压缩,而气体则很容易被压缩。所以在讨论它们共性的同时,也要讨论它们各自的特性和处理方法。

二、流体连续性假定

从物理学中知道,流体是由大量的流体分子组成,分子之间有间隙,所以从微观上看,流体不是一种连续的物质。这些流体分子处于杂乱的热运动状态中,要想跟踪每一个分子,详细地去研究分子的运动规律是没有实际价值的,工程上只需要研究流体宏观运动规律就够了。因此,流体流动引入了流体具有连续性的假定:认为流体是由彼此之间没有间隙的无数流体微团(又称为流体质点)所组成,是一个内部没有间隙的连续体。事实说明,引入这样一个假定是合理的,这是因为在工程实际中,所要解决的流体流动问题,都有较大的特征尺寸,其最小尺寸也是远大于

分子自由程,可以将流体看为无间隙的连续体。因此就能用连续函数去分析和研究流体流动的实际问题。

这里必须指出:并不是在任何情况下都可以将流体视为连续介质,如高度真空下的气体,连续性假定就不再适用。

三、流体流动在化工生产中的应用

化工生产中所处理的物料,不论是原料、中间产品还是产品,大部分都是流体。在生产过程中,流体从一个设备流到另一个设备,从一个车间送到另一个车间,为了完成流体输送的任务,必须解决管路的配置,流量、压强的测定,输送流体所需能量的确定和输送设备选用等技术问题。除此以外,设备中的传热、传质以及化学反应都是在流动流体中进行,它们与流体流动形态密切相关,研究流体的流动形态和条件,可作为强化化工设备的依据。因此,流体流动与输送是化工生产中必不可少的单元操作,流体流动基本原理是本课程的重要基础。

第二节 流体的基本性质

在研究流体平衡和运动规律之前,必须要熟悉流体的一些基本性质。它们是流体的密度、黏度等。

一、流体的密度

(一) 密度

流体和其他物体一样具有质量。单位体积流体所具有的质量称为密度,通常用 ρ 表示。如均质流体的体积为 V ,质量为 m ,则密度 ρ 为

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

在SI单位制中质量单位用kg,体积单位用 m^3 ,所以密度的单位为 kg/m^3 。

1. 液体的密度

一定的流体,其密度是压强和温度的函数。液体可视为不可压缩流体,密度随压强变化很小(极高压强下除外),可忽略其影响。温度对液体的密度有一定的影响,在查取液体密度时,要注意注明其温度条件。但在温度变化不大的情况下,也可忽略温度的影响。如水在常温下的密度都可按 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 计。

2. 气体的密度

气体的压缩性和膨胀性要比液体大得多,无论是压强还是温度,对气体密度的影响都不能忽略。所以气体为可压缩流体,气体的密度是温度和压强的函数。在压强不太高、温度不太低的情况下,对空气和一些不易液化的理想气体,可以用下式表达气体密度与其压强和温度之间的关系:

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

式中 ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;
 p ——气体的绝对压强, kPa ;
 M ——气体的摩尔质量, g/mol ;
 T ——气体的热力学温度, K ;
 R ——摩尔气体常数, 数值为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

气体的密度亦可按下式进行计算:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0}$$

式中 ρ_0 ——标准状态下气体的密度, kg/m^3 , $\rho_0 = \frac{M}{22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}}$;

T_0 ——标准状态温度, K , $T_0 = 273 \text{ K}$;

p_0 ——标准状态压强, kPa , $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$ 。

尽管气体具有较大的压缩性和膨胀性,但是在许多实际问题中,只要气体速度远小于音速,密度变化不大,即 $\left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \times 100\%\right) \leq 20\%$ 时,也可将气体作为不可压缩流体处理。本章主要讨论的是不可压缩流体的运动规律,对可压缩流体讨论时,将特别指出。

3. 混合物密度的确定

化工生产中常见的流体为混合物,以下介绍液体混合物和气体混合物平均密度的计算方法。

若几种纯液体混合前的分体积之和等于混合后的总体积,则混合液体的平均密度可按下式计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-3)$$

式中 ρ_m ——液体混合物的平均密度, kg/m^3 ;

w_1, w_2, \dots, w_n ——液体混合物中各组分的质量分数, $w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 1$;

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

对理想气体混合物的平均密度仍可用式(1-2)计算,即

$$\rho_m = \frac{p M_m}{RT}$$

应注意:式中的 p 为混合气体的总压, M_m 为混合气体的平均摩尔质量,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 ——气体混合物中各组分的摩尔质量, g/mol ;

y_1, y_2, \dots, y_n ——气体混合物中各组分的摩尔分数或体积分数, $y_1 + y_2 + \cdots + y_n = 1$ 。

常见液体和气体的密度可由有关书刊或手册中查取。本书附录中选录部分气体和液体的密度,可在计算时选用。

(二) 比体积

单位质量流体所具有的体积称为流体的比体积,用符号 v 表示。其表达式如下:

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

由式可见,流体的比体积是密度的倒数,单位为 m^3/kg 。

(三) 相对密度

流体的密度 ρ 与 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时蒸馏水的密度 ρ_w 之比值称为相对密度,用 d 表示:

$$d = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (1-6)$$

相对密度是一个量纲为一的量,不要与密度相混淆。

二、流体的黏度

(一) 牛顿黏性定律

静止流体不能承受任何切向应力,当有切向应力作用时,流体不再静止,将发生连续不断的变形,其内部质点间产生相对运动,同时各质点间产生剪切力以抵抗其相对运动,流体的这种性质称为黏性。所对应的切向应力称为黏滞力,也称为内摩擦力。

设有两块平行的平板,其间充满流体,如图 1-1 所示。假定 A 板固定, B 板以某一速度 u_0 向右移动。由于流体与板间的附着力,紧贴 B 板的流体层附着在板上,以速度 u_0 随 B 板向右运动,而紧贴 A 板的一层流体将如 A 板一样静止不动。介于两板之间的各层流体,自上而下以逐层递减的速度向右移动。流动较快的流体层带动流动较慢的流体层;反之流动较慢的流体层却又阻止流动较快的流体层向前运动,从而两层流体之间产生了内摩擦力。

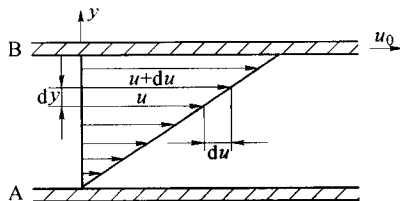


图 1-1 平板间流体速度变化图

根据牛顿研究的结果,发现流体运动时所产生的内摩擦力与流体的物理性质有关,与流体层的接触面积和接触面法线方向的速度梯度成正比。其关系可用下式表示:

$$F = \mu S \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式中 F ——流体层与流体层间的摩擦力, N;

S ——流体层间的接触面积, m^2 ;

$\frac{du}{dy}$ ——法向速度梯度,即流体在垂直于运动方向上的速度变化率, $1/\text{s}$;

μ ——表示流体物理性质的比例系数,称为动力黏度,简称黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

单位面积上的内摩擦力(称为剪应力)可表示为

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

式(1-7)和式(1-8)两表达式称为牛顿黏性定律。流体静止时, $du/dy = 0$, 流体不受内摩擦力。对运动的流体,凡遵循牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体,如空气和水等低分子流体;凡不遵循牛顿黏性定律的流体称为非牛顿型流体,如油脂、牙膏、水泥浆和高分子化合物溶液等。本篇只限于讨论牛顿型流体。

(二) 流体的黏度及其影响因素

流体的黏度是流体的一个重要的物理性质,在 S 和 du/dy 相同的情况下,黏度越大,其内摩擦力越大。因此黏度在数值上可看成是当速度梯度 $du/dy = 1$ 时,由于黏性引起的流体层间单位

面积上的内摩擦力。由此也可推出,流体的黏度越大,在相同的流动条件下,所产生的流动阻力也就越大。

在 SI 单位中,黏度的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; 在 cgs 单位中,黏度的单位为 P(泊), $1 \text{ P} = 100 \text{ cP}$ (厘泊),它与 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 之间的换算关系为

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = 1000 \text{ cP}$$

不同的流体具有不同的黏度,同一种流体的黏度在不同的温度和压强下数值也不相同。流体的黏度随温度升高而减小,而压强的影响则可忽略;气体的黏度随温度升高而增大,当压强变化范围较大时,要考虑压强变化的影响,一般气体的黏度是随压强升高而增大。当气体的压强变化不大时,一般情况下也可忽略其影响。水和常压空气及其他常见流体在不同温度下的黏度可见附录。

在分析黏性流体运动规律时,动力黏度 μ 和密度 ρ 常同时出现,所以在流体流动中习惯于将其组成一个量用 ν 来表示,称为运动黏度。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

运动黏度的单位在 SI 单位中为 m^2/s , 在 CGS 单位中为 cm^2/s , 简称为 St (stokes), $1 \text{ St} = 100 \text{ cSt}$ (centistokes)。

(三) 混合物的黏度

黏度是流体的物理性质之一,其值均由实验测定,一般流体的黏度值可从有关手册中查取。而对混合物的黏度,在缺乏实验测定条件和数据时,可选用适当的经验公式进行估算。

对分子不缔合的液体混合物黏度,可用下式估算:

$$\lg \mu_m = \sum x_i \lg \mu_i \quad (1-10)$$

式中 μ_m ——液体混合物的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

x_i ——液体混合物中 i 组分的摩尔分数;

μ_i ——与液体混合物同温度下 i 组分的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

常压下气体混合物的黏度,可用下式估算:

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum y_i M_i^{1/2}} \quad (1-11)$$

式中 μ_m ——气体混合物的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

y_i ——气体混合物中 i 组分的摩尔分数或体积分数;

M_i ——气体混合物中 i 组分的摩尔质量, g/mol ;

μ_i ——与气体混合物同温度下 i 组分的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

[例 1-1] 空气可近似地看为由 21% 的氧气, 79% 的氮气(均为体积分数)组成的混合气。试求温度为 200°C 时常压空气的黏度。(200°C 常压氧气的黏度为 $0.0286 \text{ mPa} \cdot \text{s}$; 200°C 常压氮气的黏度为 $0.0249 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。)

解: 由于为常压空气, 所以此题有两种确定方法。一种可在本书附录中直接查取, 可得 101.3 kPa 、 200°C 空气的黏度为 $0.026 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

另一种可按混合气体处理, 由式(1-11)