

中等职业学校规划教材·化工中级技工教材

化工单元过程及

操作

HUAGONG DANYUAN GUOCHENG JI CAOZUO

刘红梅 主编 毛民海 主审



化学工业出版社

中等职业学校规划教材·化工中级技工教材

化工单元过程及操作

刘红梅 主编
毛民海 主审



化学工业出版社

·北京·

本教材作为化工工艺专业中级技工培训用书，贯彻以理论联系实际为基础，以理论指导实际操作为主，以培养实践能力为重点的现代技工教育观念；在内容的取舍上，在以必需、够用为原则，阐述理论的基础上，面向生产实际操作，同时还考虑单元操作新技术的发展。全书共十一章，内容包括绪论、流体力学、流体输送机械、非均相物系的分离、传热原理及换热器、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、干燥、冷冻和新型单元操作简介等，可供学习者选学选用。

本书采用了“同步教学”模式，在理论讲授的同时安排相应的技能训练，并将制作配套教学录相片共模拟操作训练用。

本书可作为化工中级技工教材，也可作为化工企业工人培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工单元过程及操作/刘红梅主编. —北京: 化学工业出版社, 2008.1
中等职业学校规划教材·化工中级技工教材
ISBN 978-7-122-01915-8

I. 化… II. 刘… III. 化工单元操作-专业学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 003729 号

责任编辑: 旷英姿 于 卉
责任校对: 李 林

文字编辑: 杨欣欣
装帧设计: 朱 曦

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: 北京市白帆印务有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 423 千字 2008 年 2 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: 27.00 元

版权所有 违者必究

中等职业学校规划教材

全国化工中级技工教材编审委员会

主任 毛民海

副主任 (按姓氏笔画排序)

王黎明	刘 雄	苏靖林	张文兵	张秋生
律国辉	曾繁京			

委 员 (按姓氏笔画排序)

马武飏	王 宁	王跃武	王黎明	毛民海
刘 雄	米俊峰	苏靖林	李文原	李晓阳
何迎建	宋易骏	张 荣	张文兵	张秋生
陈建军	林远昌	周仕安	郑 骏	胡仲胜
律国辉	郭养安	董吉川	韩 谦	韩立君
程家树	曾繁京	雷 俊		



前 言

本书是根据中国化工教育协会批准颁布的《全国化工中级技工教学计划》，由全国化工高级技工教育教学指导委员会领导组织编写的全国化工中级技工教材，也可作为化工企业工人培训教材使用。

本书主要介绍化工各单元操作的基本原理、典型设备以及有关的化工工程实用知识。编写原则是：用基础理论知识指导实际操作，以必需、够用为度，运用工程观点分析和解决化工实际问题，加强化工操作技能的训练。

为了体现中级技工的培训特点，本教材内容力求通俗易懂、涉及面宽，突出实际技能训练。本书按“掌握”、“理解”和“了解”三个层次编写，在每章开头的“学习目标”中均有明确的说明以分清主次。每章末的阅读材料内容丰富、趣味性强，是对教材内容的补充，以提高学生的学习兴趣。

本书在处理量和单位问题时执行国家标准（GB 3100~3102—93），统一使用我国法定计量单位。本书为满足不同类型专业的需要，增添了教学大纲中未作要求的一些新知识和新技能。教学中各校可根据需要选用教学内容，以体现灵活性。

本书由山东化工高级技校刘红梅主编、陕西工业技术学院毛民海主审。全书共分十一章。绪论，第一、二、十一章由山东省化工高级技校刘红梅编写；第三、七章由宁夏化工技校陈玲编写；第四、五、六章由广西石化高级技校唐艳梅编写；第八、九、十章由南京化工技工学校徐荣华编写；全书由刘红梅统稿。

本教材在编写过程中得到中国化工教育协会、全国化工高级技工教育教学指导委员会、化学工业出版社及相关学校领导和同行们的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，不完善之处在所难免，敬请读者和同行们批评指正。

编者
2008年1月

目 录

绪论	1	三、转子流量计	37
一、本课程的内容、性质和任务	1	第六节 流体流动单元技能训练	38
二、化工单元操作的有关概念	2	一、雷诺实验	38
三、化工常用量和单位	3	二、管路阻力的测定	39
思考题与习题	5	本章小结	40
第一章 流体力学	6	阅读材料 测速管	41
第一节 流体静力学	6	思考题与习题	42
一、流体的密度	6	第二章 流体输送机械	44
二、流体的压强	8	第一节 液体输送机械	44
三、流体静力学基本方程式及其 应用	9	一、离心泵	44
第二节 流体动力学	14	二、往复泵	56
一、流量与流速	14	三、其他类型泵	58
二、稳定流动与非稳定流动	15	四、各类泵的比较	60
三、稳定流动系统的物料衡算 ——连续性方程式	16	第二节 气体压缩和输送机械	61
四、稳定流动系统的能量衡算 ——伯努利方程	17	一、往复式压缩机	62
五、伯努利方程的应用	19	二、离心式压缩机	67
第三节 流体阻力	21	三、鼓风机	69
一、流体阻力的来源和表现	21	四、通风机	69
二、流体的黏度	22	五、真空泵	70
三、流体的流动类型	23	第三节 离心泵操作技能训练	72
四、流体阻力的计算	24	一、离心泵的操作技能训练	72
第四节 化工管路的基础知识	29	二、离心泵的性能特性曲线测定	74
一、管子的类型	29	第四节 离心式压缩机操作技能 训练	75
二、管件、阀及管路的连接方式	30	一、开车前准备工作	75
三、管路布置和安装的一般原则	32	二、正常操作	75
四、简单管路的计算	34	三、维护和保养	75
第五节 流量的测量	36	四、停车操作	76
一、孔板流量计	36	五、异常现象及处理方法	76
二、文丘里流量计	37	本章小结	76

阅读材料 蒸汽轮机与燃气轮机	77
思考题与习题	78

第三章 非均相物系的分离	79	过程	105
第一节 沉降	79	二、热负荷的计算	106
一、重力沉降	79	三、平均温度差的计算	107
二、离心沉降	81	四、传热系数的测定和估算	110
第二节 过滤	82	五、传热面积的计算	111
一、过滤原理	82	第六节 强化传热的途径	112
二、过滤介质和助滤剂	82	一、增大传热面积	113
三、过滤速率及其影响因素	83	二、增大平均温度差	113
四、过滤设备	84	三、增大传热系数	113
第三节 固体流态化	86	第七节 换热器	114
一、基本概念	86	一、列管式换热器	114
二、流化床中常见的不正常现象	87	二、套管式换热器	116
第四节 恒压过滤操作技能训练	87	三、蛇管换热器	116
一、训练目的	87	四、夹套式换热器	117
二、训练内容	88	五、板式换热器	117
三、训练装置与流程	88	六、热管换热器	119
四、训练操作步骤	88	第八节 传热操作技能训练	119
五、常见事故及处理方法	89	一、套管式换热器操作技能	
本章小结	89	训练	119
阅读材料 气力输送	90	二、套管式换热器传热系数的	
思考题与习题	91	测定	121
第四章 传热原理及换热器	92	本章小结	122
第一节 概述	92	阅读材料 新型传热技术	122
一、有关的基本概念	92	思考题与习题	123
二、传热的三种基本方式	93	第五章 蒸发	125
三、工业上的换热方法	93	第一节 概述	125
第二节 热传导	94	一、蒸发的基本概念	125
一、傅里叶定律	94	二、蒸发的目的	125
二、平面壁及圆筒壁的热传导	96	三、蒸发操作的分类	125
第三节 对流传热	100	第二节 单效蒸发	126
一、对流传热方程式	100	一、单效蒸发的原理和流程	126
二、对流传热膜系数	101	二、单效蒸发的计算	127
三、有相变传热	101	第三节 多效蒸发	129
四、提高对流传热膜系数的		一、多效蒸发的原理及流程	129
途径	103	二、提高蒸发器生产强度的	
第四节 辐射传热	103	措施	131
一、热辐射的基本概念	103	第四节 蒸发设备	132
二、热辐射的基本定律	104	一、蒸发器的基本结构	132
三、两固体间的辐射传热	105	二、蒸发器的种类和性能	132
第五节 传热计算	105	三、蒸发装置中的辅助设备	137
一、间壁两侧冷热流体的热交换		本章小结	138

思考题与习题.....	138	思考题与习题.....	166
第六章 结晶	139	第八章 蒸馏	168
第一节 结晶原理.....	139	第一节 蒸馏过程的气液平衡.....	169
一、固液体系相平衡.....	139	一、理想二元溶液的气液平衡	
二、结晶过程.....	142	关系.....	169
第二节 结晶方法.....	143	二、 $T-x(y)$ 图和 $y-x$ 图.....	170
一、冷却法.....	143	三、非理想二元溶液的气液	
二、溶剂汽化法.....	143	平衡.....	172
三、真空冷却法.....	144	四、挥发度和相对挥发度.....	173
四、盐析法.....	144	第二节 精馏原理.....	174
第三节 结晶设备.....	144	一、简单蒸馏的原理.....	174
一、常用结晶设备.....	144	二、精馏原理.....	175
二、结晶设备的特点与选择.....	147	三、精馏流程.....	176
本章小结.....	148	第三节 精馏过程的基本计算.....	177
思考题与习题.....	148	一、物料衡算及操作线方程.....	177
第七章 吸收	149	二、精馏塔塔板数的确定.....	182
第一节 吸收的基本原理.....	150	三、回流比的影响与选择.....	184
一、相组成的表示方法.....	150	第四节 特殊蒸馏简介.....	186
二、气-液两相平衡关系.....	151	一、水蒸气蒸馏.....	186
三、吸收机理——双膜理论.....	153	二、恒沸蒸馏.....	187
四、吸收速率方程式.....	154	三、萃取蒸馏.....	187
第二节 吸收过程的计算.....	155	* 第五节 液-液萃取简介.....	188
一、全塔物料衡算——操作线		第六节 精馏设备.....	189
方程式.....	155	一、板式塔的基本结构.....	189
二、实际吸收剂用量的确定.....	156	二、几种典型的板式塔.....	190
第三节 吸收流程.....	158	三、精馏过程中气液相接触状态和	
一、部分吸收剂再循环的吸收		几种典型的异常现象.....	192
流程.....	158	第七节 精馏操作技能训练.....	193
二、多塔串联吸收流程.....	159	一、训练目的.....	193
三、吸收-解吸联合操作流程.....	159	二、训练内容.....	193
第四节 吸收设备.....	159	三、训练装置.....	193
一、填料塔.....	160	四、训练步骤.....	194
二、其他类型吸收设备.....	162	五、精馏操作的调节.....	194
第五节 吸收操作技能训练.....	163	本章小结.....	195
一、训练目的.....	163	阅读材料 复合(或耦合)精馏.....	195
二、训练内容.....	164	思考题与习题.....	197
三、训练装置.....	164	第九章 干燥	199
四、训练操作步骤与注意事项.....	164	第一节 湿空气的性质.....	200
五、常见事故及处理方法.....	165	一、湿空气的压强.....	200
本章小结.....	165	二、湿度.....	200
阅读材料 亨利定律的发现人.....	166	三、相对湿度.....	201

四、干球温度和湿球温度.....	201	一、超临界流体萃取技术的	
第二节 湿度图.....	202	发展.....	227
一、等相对湿度线.....	202	二、超临界流体萃取过程简介.....	228
二、湿球温度线.....	202	本章小结.....	229
第三节 干燥过程的物料衡算.....	203	思考题与习题.....	230
一、物料含水量的表示方法.....	204	思考题与习题答案(部分).....	231
二、物料衡算.....	204	附录.....	233
第四节 对流干燥设备.....	205	一、化工常用法定计量单位及	
一、常见对流干燥设备.....	205	单位换算.....	233
二、干燥器的比较和选择.....	207	三、某些气体的重要物理性质.....	234
本章小结.....	208	三、某些液体的重要物理性质.....	235
阅读材料 真空冷冻干燥花的		四、常用固体材料的密度和	
实践.....	208	比热容.....	236
思考题与习题.....	209	五、水的重要物理性质.....	237
第十章 冷冻.....	211	六、干空气的重要物理性质	
第一节 压缩蒸气冷冻机.....	211	(101.33kPa).....	237
一、压缩蒸气冷冻机的工作		七、饱和水蒸气表(按压强	
过程.....	211	排列).....	238
二、冷冻能力、冷冻剂和载		八、饱和水蒸气表(按温度	
冷体.....	212	排列).....	240
三、多级压缩蒸气冷冻机.....	216	九、液体黏度共线图.....	241
第二节 压缩蒸气冷冻机的主要		十、气体黏度共线图(常压下用)...	243
设备.....	217	十一、液体比热容共线图.....	245
一、压缩机.....	217	十二、气体比热容共线图(常压	
二、冷凝器.....	217	下用).....	247
三、蒸发器.....	218	十三、液体比汽化焓共线图.....	249
四、膨胀阀.....	218	十四、固体材料的热导率.....	250
本章小结.....	218	十五、某些液体的热导率.....	251
阅读材料 冷冻疗法.....	219	十六、气体的热导率共线图	
思考题与习题.....	219	(常压下用).....	252
第十一章 新型单元操作简介.....	221	十七、管子规格.....	253
第一节 吸附.....	221	十八、泵及通风机规格.....	254
一、概述.....	221	十九、部分双组分混合液在	
二、吸附原理.....	222	101.3kPa下的气液平衡	
三、吸附设备.....	223	数据.....	255
第二节 膜分离.....	224	二十、若干气体水溶液的亨利	
一、分离膜和膜分离技术.....	224	系数.....	256
二、膜分离原理.....	225	二十一、氨的温-熵图.....	257
第三节 超临界流体萃取.....	227	参考文献.....	258

绪论

学习目标

1. 掌握化工单元操作、物料衡算和能量衡算、平衡关系和过程速率的概念。
2. 理解化工生产过程的构成；常用的化工单元操作；化工常用基本物理量及单位。
3. 了解“化工单元过程及操作”的内容、性质、任务。

一、本课程的内容、性质和任务

化工过程是指化学工业的生产过程。化学工业门类很多，如酸、碱、化肥、医药、染料及石油化学工业等。由于不同的化学工业所用的原料与所得的产品不同，所以各种化工过程的差别很大。

例如，甲醇的生产过程，如图 0-1 所示，合成气进入脱硫塔 1 脱硫净化，经水冷器 2 冷却后，进入压缩机 3 初步压缩，初步压缩的合成气送入换热器 5 与从合成塔 4 出来的气体换热，换热后温度达到反应温度（513~543K）后，进入合成塔 4 进行反应，从合成塔 4 底部出来的粗甲醇、少量的副产品和少量未反应的原料气的混合物，经换热器 5、水冷器 6 降温冷却后变为液态甲醇，进入分离器 7 将气体分离出去，未反应的气体返回压缩机，液态甲醇进入闪蒸罐 8，脱除部分溶解气体后进入脱醚塔 9，从塔顶脱除二甲醚等轻组杂质，塔底出来的液体送入主精馏塔 10 进行精馏，由塔顶得到纯度 99.85% 的合格精甲醇。

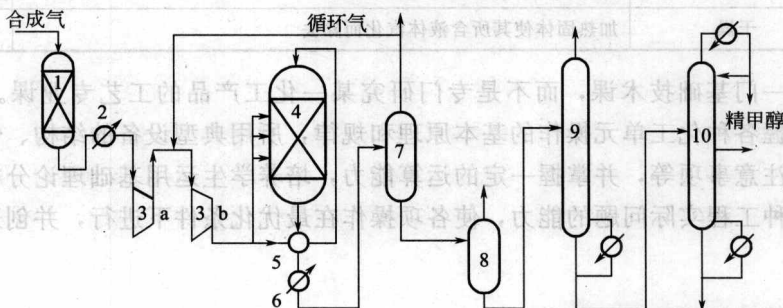


图 0-1 低压法制取甲醇工艺流程示意

1—脱硫塔；2—水冷器；3—压缩机；4—合成塔；5—换热器；6—水冷器；
7—分离器；8—闪蒸罐；9—脱醚塔；10—主精馏塔

该生产过程包括原料的预处理过程（合成气的加压、升温，达到反应所需要的适宜温度和压力）、化学反应过程（在合成塔中进行）和反应产物的后处理过程（粗甲醇的提纯，通过精馏操作实现甲醇的提纯）三部分，该生产过程中除了合成气的合成反应外，原料的升温、加压和反应物的精制等工序中所进行的过程大多数是纯物理过程。

从甲醇产品的生产过程可以看出，任何一个化工过程都包括原料的预处理、化学反应、反应产物加工这三个基本步骤。化学反应通常是在反应器中进行，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并不占据主要比例；原料预处理过程和反应产物后处理过程为物理过程，它们决定了整个生产的经济效益。我们把化工生产过程中的化学性操作称为化工单元反应，把化工生产过程中的物理性操作称为化工单元操作。

根据各单元操作所遵循的基本规律，可将化工单元操作划分为三大类，如表 0-1 所示，即：

- (1) 动量传递过程单元操作 包括流体输送、沉降、过滤、固体流态化等单元操作。
- (2) 热量传递过程单元操作 包括加热、冷却、冷凝、蒸发等单元操作。
- (3) 物质传递过程单元操作 包括蒸馏、吸收、萃取、结晶、干燥、膜分离等单元操作。

表 0-1 常用单元操作一览表

类别	名称		目的	设备举例
动量传递过程	流体输送	液体输送	以一定流量将液体从一处送到另一处	泵
		气体输送	以一定流量将气体从一处送到另一处	风机
		气体压缩	提高气体压力，克服输送阻力	压缩机
	非均相物系分离	沉降	从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒、液滴或气泡	沉降槽
		过滤	从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒	板框式过滤器
		离心分离	在离心力作用下，分离悬浮液或乳浊液	离心机
	固体流态化	用流体使固体颗粒悬浮并使其具有流体状态的特性	流化床反应器	
热量传递过程	传热	使物料升温、降温或改变相态	换热器	
	蒸发	使溶液中的溶剂受热汽化而与不挥发的溶质分离，达到浓缩目的	蒸发器	
	结晶	使溶液中的溶质变成晶体析出	结晶器	
质量传递过程	蒸馏	利用均相液体混合物中各组挥发度不同使液体混合物分离	精馏塔	
	吸收	用液体吸收剂分离气体混合物	吸收塔	
	干燥	加热固体使其所含液体汽化而除去	干燥器	

本课程是一门基础技术课，而不是专门研究某一化工产品的工艺专业课。其主要任务是：使学生掌握各种化工单元操作的基本原理和规律，所用典型设备的结构、性能、操作技能和运转中的注意事项等，并掌握一定的运算能力，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，使各项操作在最优化条件下进行，并创造较好的经济效益。

二、化工单元操作的有关概念

在研究化工单元操作时，经常用到四个基本概念，即物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系、过程速率等，这四个基本概念贯穿于本课程的始终。

(1) 物料衡算 物料衡算的依据是质量守恒定律。对于任何一个化工生产过程，其原料消耗量应为产品量与物料损失量之和。即：

$$\text{输入的物料质量} = \text{输出的物料质量} + \text{损失物料的质量}$$

按照这一规律进行的计算称为物料衡算。掌握物料衡算的方法，运用这一概念去分析和

解决工程问题，这就是研究本课程有关物料量的计算中应当掌握的一个基本方法。

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确定物料衡算范围和衡算对象。物料衡算的范围可以是一个系统，一段工序或某一设备；衡算对象就是对哪种物料进行平衡计算。③确定计算基准，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。④列出物料衡算式，求解未知量。

(2) 能量衡算 能量衡算的依据是能量守恒定律，在任何一个化工生产过程中，凡向该过程输入的能量必等于该过程输出的能量与过程损失的能量之和。即：

$$\text{输入的能量} = \text{输出的能量} + \text{能量损失}$$

按照这一规律进行的计算称为能量衡算。通过能量衡算，可以了解在生产操作中能量的利用和损失情况，在生产过程与设备设计时，利用能量衡算可以确定是否需要从外界引入能量或向外界输出能量的问题。显然，能量损失越少，经济效益越好。能量衡算是研究本课程中有关能量问题的基本方法。能量衡算的步骤与物料衡算的步骤基本相同。

(3) 平衡关系 平衡关系就是研究过程进行的方向和过程进行的极限。任何过程都是在变化的，是由不平衡状态向平衡状态转化。平衡状态就是指在一定的条件下，过程所能达到的极限。例如传热过程，当两物体温度不同时，即温度不平衡，就会有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，两物体间也就没有热量传递。

一般平衡关系则为各种定律所表达，如热力学第二定律、亨利定律和拉乌尔定律等。在化工生产过程中，可以从物系平衡关系来推知过程能否进行以及进行到何种程度。

(4) 过程速率 过程速率是指单位时间内过程的变化率。如传质过程的速率，是指单位时间内传递的质量；传热过程的速率，是指单位时间内传递的热量。实验证明，过程速率是过程推动力和过程阻力的函数，可以用下式表示：

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

可以看出，过程速率与过程推动力成正比，与过程阻力成反比。过程推动力是指直接导致过程进行的动力，如传热过程的推动力是冷热流体的温度差，传质过程的推动力是浓度差。过程阻力的影响因素很多，与过程的性质、操作条件都有关系，是各种因素对过程速率影响的总的体现。在化工单元操作中，应努力寻求提高过程速率的途径。怎样加大过程推动力和减小过程阻力，是提高设备生产能力的重要问题。

三、化工常用量和单位

1. 量和单位

量是指物理量，物理量分为基本量和导出量。作为其他物理量的基础的量称为基本量，由基本量导出的量称为导出量。国际单位制将长度 (l)、时间 (t)、质量 (m)、热力学温度 (T)、电流 (I)、发光强度 (I_v)、物质的量 (n) 确定为基本量，由这七个量导出的量都是导出量，如速度、密度等。

用来度量同类量大小的标准量称为计量单位。基本量的主单位称为基本单位，用基本单位通过相乘、相除得出的单位称为导出单位。

2. 国际单位

由于科学技术的迅速发展和国际学术交流的日益频繁，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米、千克、秒、安 [培]、开 [尔文]、摩 [尔]、坎 [德拉]^① 等七个基本单位和一系列导出单位构成的完整的单位体系，分别列于表 0-2 和表 0-3。它具有统一性、科学性、简明性、实用性、合理性等优点，是国际公认的较先进的单位制。

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	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 0-3 国际单位制中具有专门名称的导出单位 (部分)

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)	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	℃	

(1) 化工常用的 5 种 SI 基本单位

① 长度 基本单位是米(m)，其倍数和分数单位有千米(km)、厘米(cm)、毫米(mm)、微米(μm)等。

② 时间 基本单位是秒(s)。国家选定的 SI 制外时间单位有分(min)、[小]时(h)、日(d)。

③ 质量 千克(kg)是基本单位，可使用克(g)及其倍数和分数单位，如兆克(Mg)、毫克(mg)、吨(t)。

④ 热力学温度 基本单位是开尔文(K)。摄氏温度单位为摄氏度(℃)。热力学温度(K)与摄氏温度(℃)的换算公式为： $T/K = t/℃ + 273.15$

⑤ 物质的量 基本单位是摩尔(mol)，其倍数、分数单位有 kmol、mmol 等。

(2) 化工常用的具有专门名称的 4 种 SI 导出单位

① 力、重力 牛 [顿] (N) 及其倍数、分数单位，如 MN、kN、mN 等。

② 压力、压强 帕 [斯卡] (Pa) 及其倍数、分数单位，如 kPa、MPa 等。

③ 能 [量]、功、热 [量] 焦 [耳] (J) 及其倍数、分数单位，如 kJ、mJ 等，以及瓦·秒 ($W \cdot s$)、千瓦·时 ($kW \cdot h$) 等。

④ 功率 瓦 [特] (W) 及其倍数、分数单位，如 kW、mW 等。

3. 法定计量单位

由国家以法令形式规定允许使用的单位称为法定计量单位。它是在 1984 年由中华人民

① 单位名称中，方括号内的部分，在不致引起混淆、误解的情况下，可以省略，下同。

共和国国务院公布实施的。中国的法定计量单位是以国际单位制为基础，并根据本国实际情况适当选用一些非国际制单位构成的。其组成如表 0-4 所示。在处理量和单位问题时目前应执行国家标准 (GB 3100~3102-93)。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。单位换算时，需要换算因数。化工中常用单位的换算因数，可从本教材附录一中查得。

表 0-4 中国法定计量单位的组成

法定计量单位组成内容		举 例		备 注
		单位名称	单位符号	
SI 单位	SI 基本单位	米、千克	m, kg	
	具有专门名称的 SI 导出单位	牛、焦	N, J	
	组合形式的 SI 导出单位	米每秒	m/s	
国家选定的 SI 制外单位		吨、升	t, L	
由以上单位构成的组合形式单位		千瓦时	kW · h	
由以上单位加 SI 词头构成的倍数和分数单位		毫米、千焦	mm, kJ	倍数词头: M(兆)、k(千) 分数词头: m(毫)、μ(微)

【例 0-1】 已知 $1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$ ，试将此压强换算为 SI 单位。

解 查附录一可知 $1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 9.81 \text{ N}$ 。

故: $1 \text{ atm} = 1.033 \times 9.81 \text{ N} / (10^{-2} \text{ m})^2 = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

【例 0-2】 试将 $0.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 换算为用 SI 制单位 kJ 表示的量。

解 从附录一的能量换算表查出 $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 3.6 \times 10^3 \text{ kJ}$ 。

则 $0.5 \text{ kW} \cdot \text{h} = 0.5 \times 3.6 \times 10^3 \text{ kJ} = 1.8 \times 10^3 \text{ kJ}$ 。



思考题与习题

- 0-1 试说出学习本课程的目的。
- 0-2 物料衡算和能量衡算的步骤是什么?
- 0-3 列出三种常用的基本量和基本单位。
- 0-4 在工程单位制中，每 $102 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 1.341$ 马力。今有一台 40 马力的柴油机，试计算成以 SI 单位 kW 表示的量。

第一章 流体力学



学习目标

1. 掌握流体的密度、压力、黏度、流量、流速的概念及单位；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；流体的流动型态及其判断和简单管路的计算。
2. 理解流体阻力的来源和表现；直管阻力的计算；孔板流量计、文丘里流量计、转子流量计的基本构造、测量原理。
3. 了解局部阻力的计算方法和管路布置的原则。

流体力学是一门基础性很强和应用性很广的学科。流体在流动过程中不仅有动量传递问题，还伴随传热传质现象，因此流体力学是研究流体静止或流动时有关参数变化规律的学科。

流体是指具有流动性的物体，包括液体和气体。其中，液体体积随压力变化不大，视为不可压缩性流体；气体体积随压力变化很大，是可压缩性流体。

在化工生产中，原料、半成品、成品，多是流体，流体流动是最广泛的物料状态。传热、蒸发、蒸馏等过程都离不开流体的流动，因此流体力学是本课程的重要内容，是研究各个单元操作的重要基础。

第一节 流体静力学

流体静力学主要研究静止流体内部的压力变化规律。为此，首先要了解流体的一些主要物理性质。

一、流体的密度

1. 密度

单位体积流体所具有的质量，称为流体的密度，以 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。

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

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 。

2. 相对密度

一定温度下，流体的密度与 277K 时纯水密度的比值，称为相对密度，以 d_{277}^T 表示，量纲为一。

$$d_{277}^T = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——流体在温度 T (K) 时的密度, kg/m^3 ;
 $\rho_{\text{水}}$ ——纯水在 277K 时的密度, $\rho_{\text{水}} = 1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。
 则式(1-2) 可写成:

$$\rho = 1000d_{277}^T \quad (1-2a)$$

3. 比容

单位质量流体所占有的体积, 称为比容, 也称为比体积, 以 v 表示, 单位为 m^3/kg 。

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-3)$$

4. 密度的计算

流体的密度受温度和压强的影响比较大。对于不可压缩性流体, 由于压力的变化对密度的影响很小, 通常可以忽略不计; 认为其密度仅随温度变化。例如纯水在 277K 的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$, 293K 时的密度为 $998.2\text{kg}/\text{m}^3$, 373K 时的密度为 $958.4\text{kg}/\text{m}^3$ 。常见纯液体的密度值可查教材附录三 (注意所指温度)。

(1) 气体的密度 气体属于可压缩性流体, 其密度受温度和压强的影响比较大。当查不到气体密度数据时, 在压力不太高、温度不太低的情况下, 气体密度可按理想气体状态方程计算。即:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-4)$$

式中 p ——气体的压强, kPa ;
 M ——气体的千摩尔质量, kg/kmol ;
 T ——热力学温度, K ;
 R ——通用气体常数, $8.314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

化工生产中遇到的流体, 大多为几种组分构成的混合物, 而通常手册中查得的是纯组分的密度, 混合物的平均密度 ρ_m 可以通过纯组分的密度进行计算。

(2) 液体混合物的密度 对于液体混合物, 其组成通常用质量分数表示。假设各组分在混合前后体积不变, 则有:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{w1}}{\rho_1} + \frac{x_{w2}}{\rho_2} + \dots + \frac{x_{wn}}{\rho_n} \quad (1-5)$$

式中 $x_{w1}, x_{w2}, \dots, x_{wn}$ ——液体混合物中各组分的质量分数;
 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各纯组分的密度, kg/m^3 。

【例 1-1】 已知硫酸与水的密度分别为 $1830\text{kg}/\text{m}^3$ 与 $998\text{kg}/\text{m}^3$, 试求含硫酸为 60% (质量分数) 的硫酸水溶液的密度为多少?

解 根据式(1-5) 得:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{0.6}{1830} + \frac{0.4}{998} = (3.28 + 4.01) \times 10^{-4} = 7.29 \times 10^{-4}$$

则 $\rho_m = 1372\text{kg}/\text{m}^3$

(3) 气体混合物的密度 对于气体混合物, 其组成通常用摩尔分数 (或体积分数) 表示。各组分在混合前后质量不变, 则有:

$$\rho_m = \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 + \dots + \rho_n y_n \quad (1-6)$$

式中 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）；

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

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可利用式(1-4) 计算，但式中的千摩尔质量 M 应用混合气体的平均千摩尔质量 M_m 代替， $M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \dots + M_n y_n$ ；则有：

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} \quad (1-7)$$

式中 M_1, M_2, \dots, M_n ——各纯组分的千摩尔质量， kg/kmol ；

y_1, y_2, \dots, y_n ——气体混合物中各组分的摩尔分数。

【例 1-2】 已知某混合气体的组成为 18% N_2 、54% H_2 、28% CO_2 （均指摩尔分数），试求 100m^3 的混合气体在温度为 300K 和 5MPa 下的质量。

解 已知 $M_1 = M_{\text{N}_2} = 28$ 、 $M_2 = M_{\text{H}_2} = 2$ 、 $M_3 = M_{\text{CO}_2} = 44$

$y_1 = 0.18$ 、 $y_2 = 0.54$ 、 $y_3 = 0.28$

则 $M_m = 28 \times 0.18 + 2 \times 0.54 + 44 \times 0.28 = 18.44\text{kg}/\text{kmol}$

由式(1-7) 得：

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} = \frac{5 \times 10^3 \times 18.44}{8.314 \times 300} = 36.97\text{kg}/\text{m}^3$$

则 $m = V\rho_m = 100 \times 36.97 = 3.697 \times 10^3\text{kg}$

二、流体的压强

1. 流体的压强（压力）

流体垂直作用于单位面积上的力，称为流体的静压强，简称为压强或压力。以 p 表示，单位为 Pa 。若以 F 表示流体垂直作用在面积 A 上的力，则：

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-8)$$

目前工程上压强的大小也间接地以流体柱高度表示，如用米水柱（ mH_2O ）或毫米汞柱（ mmHg ）等。若流体的密度为 ρ ，则液柱高度 h 与压力 p 的关系为：

$$p = \rho gh \quad (1-9)$$

式中， g 为重力加速度。

用液柱高度表示压力时，必须指明流体的种类，如 600mmHg 、 $10\text{mH}_2\text{O}$ 等。

在 SI 单位中，压力的单位是帕 [斯卡]，以 Pa 表示。除了 SI 单位 Pa 之外，还有一些常用的单位：如 mmHg 、 mH_2O 、 atm （标准大气压）、 at （工程大气压）、 bar （巴）等，各单位间的换算关系如下：

$$1\text{atm} = 1.013 \times 10^5\text{Pa} = 760\text{mmHg} = 10.33\text{mH}_2\text{O} = 1.013\text{bar}$$

$$1\text{at} = 9.81 \times 10^4\text{Pa} = 735.6\text{mmHg} = 10\text{mH}_2\text{O} = 0.981\text{bar}$$

2. 绝对压强、表压和真空度

压强的大小常用绝对零压和大气压强两种不同的基准来表示。基准不同，表示方法也不同。单位面积上作用力为零的压强称为绝对零压（或绝对真空）。凡是以绝对零压为起点计算的压强称为绝对压强，简称绝压，它是流体内部或设备内部的实际压强；以大气压强为基准测量的压强称为表压或真空度。若绝对压强高于大气压强，则高出部分称为表压，即：

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

若绝对压强低于大气压强，则低的部分称为真空度，即：