



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高职高专专业基础课教材系列

化工原理

丁玉兴 主编



科学出版社
www.sciencep.com



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高职高专专业基础课教材系列

化工原理

丁玉兴 主编

图书在版编目(CIP)数据

化工原理 / 丁玉兴主编. — 北京: 科学出版社, 2007

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材·高职高专专业基础课教材系列)

(第2版)

ISBN 978-7-03-019130-4

I. 化… II. 丁… III. 化工原理—高等学校—教材 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第088250号

责任编辑: 沈力 封面设计: 陈彦

责任印制: 吕敬人 封面设计: 吕敬人 文字编辑: 吕敬人

科学出版社

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100071

http://www.sciencep.com

科学出版社发行 各地新华书店经销

2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16 印数: 2514

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是根据高职高专院校专业的教学特点,精选内容、突出重点、理论联系实际,以宽基础、重实践、引思考、便于教学为原则进行编写的。全书从认识规律出发,叙述了流体流动与输送、流体与粒子间的相对运动过程、传热基本原理和换热器、蒸发、蒸馏、吸收、吸附、萃取、结晶、膜分离、干燥、冷冻等单元操作。重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。在编写过程中,力争保持系统完整,并尽量深入浅出,在内容的取舍上注重化工单元操作基础理论和工程实际应用知识的介绍,注意吸收工业领域的新理论、新技术、新设备等新成果。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。可作为化工类及相关专业(包括化工、石油、生物工程、制药、材料、冶金、环保、食品等专业)的教材,也可供有关部门的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/丁玉兴主编. —北京:科学出版社, 2007

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材·高职高专专业基础课教材系列)

ISBN 978-7-03-019130-4

I. 化… II. 丁… III. 化工原理-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 088250 号

责任编辑:沈力匀/责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉/封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007 年 8 月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—2 000 字数:593 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

编辑部电话 010-62135235 销售部电话 010-62136230 (VH04)

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。可作为化工类及相关专业（包括化工、石油、生物工程、制药、材料、冶金、环保、食品等专业）的教材，也可供有关部门的技术人员参考。

本书是根据高职高专院校教学特点，精选内容、突出重点、理论联系实际，以宽基础、重实践、引思考、便于教学为原则进行编写的。全书重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。在编写过程中，力争保持系统完整，并尽量深入浅出，在内容的取舍上注重化工单元操作基础理论和工程实际应用知识的介绍，注意吸收工业领域的新理论、新技术、新设备等新成果。

本书从认识规律出发，叙述了流体流动与输送、流体与粒子间的相对运动过程、传热基本原理和换热器、蒸发、蒸馏、吸收、吸附、萃取、结晶、膜分离、干燥、冷冻等单元操作。每章设有小结、思考与练习题，帮助学生巩固所学知识，掌握分析问题的方法，提高解决问题的能力。

本书由承德石油高等专科学校丁玉兴主编。参加编写工作的有四川工商职业技术学院、郑州轻工业学院轻工职业学院闫桂甫、开封大学王迪、长春职业技术学院工程技术分院吕燕、山东胜利职业学院方绍燕。其中第3、5、8章及附录由丁玉兴编写，绪论及第1章由李肇全编写，第4章由王迪编写，第6、7章由山东胜利职业学院方绍燕编写，第9章由闫桂甫编写，第2章由吕燕编写。

本书在编写过程中得到了科学出版社、承德石油高等专科学校等单位领导的大力支持和帮助，在此一并致谢。

由于编写时间仓促，书中不妥之处在所难免，肯请读者提出宝贵意见，以便我们在重印和修订时加以纠正。

目 录

前言

绪论	1
小结	5
思考与练习	5
第一章 流体流动与输送	6
第一节 流体力学基础	6
第二节 管内流体流动时的阻力	25
第三节 简单管路的计算和管路布置	34
第四节 流量测定	37
第五节 液体输送机械	42
第六节 气体输送机械	58
小结	63
思考与练习	63
第二章 流体与粒子间的相对运动过程	66
第一节 重力沉降	67
第二节 过滤	71
第三节 离心机	82
第四节 气体净制设备	87
小结	90
思考与练习	90
第三章 传热	92
第一节 概述	92
第二节 热传导	95
第三节 对流传热	103
第四节 传热过程计算	105
第五节 对流传热系数经验关联式	119
第六节 辐射传热	133
第七节 换热器	140
小结	159
思考与练习	159
第四章 蒸发	164
第一节 蒸发器设备	164
第二节 单效蒸发	171
第三节 多效蒸发	177

第四节 影响蒸发器生产强度的因素	186
小结	187
思考与练习	187
第五章 蒸馏	189
第一节 气-液相平衡关系	190
第二节 简单蒸馏与精馏原理	196
第三节 精馏塔的物料衡算——操作线方程	200
第四节 双组分连续精馏过程的计算	210
第五节 回流比的影响及其选择	216
第六节 简捷法计算理论塔板数	220
第七节 连续精馏的热量衡算	221
第八节 特殊蒸馏	222
小结	225
思考与练习	225
第六章 气体吸收	231
第一节 概述	231
第二节 气-液相平衡关系	235
第三节 传质过程理论	238
第四节 吸收速率	244
第五节 吸收塔计算	248
小结	257
思考与练习	257
第七章 萃取、结晶、膜分离	260
第一节 萃取	260
第二节 结晶	284
第三节 膜分离	290
小结	298
思考与练习	298
第八章 干燥	300
第一节 概述	300
第二节 湿空气的性质和湿度图	302
第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算	311
第四节 干燥速率和干燥时间	319
第五节 干燥器	324
小结	332
思考与练习	333
第九章 冷冻	335
第一节 制冷操作的理论基础	335
第二节 蒸气压缩制冷机	340

第三节 制冷剂 and 载冷体	348
第四节 蒸汽压缩制冷机的装置	350
小结	352
思考与练习	353
参考文献	355
附录	356
一、单位换算	356
二、水在不同温度下的黏度	358
三、水的重要物理性质	358
四、某些液体的重要物理性质	360
五、某些气体的重要物理性质	362
六、干空气的物理性质 (101.33kPa)	363
七、液体比热容共线图	364
八、气体比热容共线图 (常压下用)	365
九、液体汽化潜热共线图	367
十、饱和水蒸气表 (按温度排列)	368
十一、饱和水蒸气表 (按压强排列)	370
十二、管子规格	371
十三、常用泵的规格	373
十四、4-72-11 型离心通风机规格 (摘录)	378
十五、无机物水溶液在大气压下的沸点	379
十六、常用固体材料的密度和比热容	380
十七、固体材料的导热系数	380
十八、某些固体材料的黑度	381
十九、某些液体的导热系数	382
二十、某些气体和蒸气的导热系数	383
二十一、总传热系数的工业实例	384
二十二、壁面污垢热阻 [污垢系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)]	385
二十三、某些气体溶于水的亨利系数	385
二十四、某些二元物系的汽液平衡组成	386
二十五、管板式热交换器系列标准 (摘录)	388
二十六、氟利昂-12 的物理性质	390
二十七、几种制冷剂的物理性质	390
二十八、氯化钠溶液的物理性质	391
二十九、氯化钙溶液的物理性质	392
三十、氯化钠溶液和氯化钙溶液的比热容 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	393

绪 论

《化工原理》是以化学工业的生产过程为研究对象,研究和探讨化工生产过程中具有共性规律的操作过程问题。尽管化学工业门类繁多,原料来源广泛,生产品种也千差万别,各种产品的生产流程和设备型号也各不相同,但是人们经过长期的生产实践,总结并归纳出在各种化工产品的生产过程中遵循共同的物理学定律,根据所用设备相似,原理相近,基本过程相同的特点提出了“化工单元操作”的概念。单元操作统一了通常被认为各不相同的独立的化工生产技术,使人们系统而深入地研究每一单元操作的内在规律和基本原理,而所有这些单元操作的综合,构成了化工的基础学科——化工原理。

现代轻工、食品、生物技术等行业与化学工业的关系愈来愈密切,随着化工单元操作的引入和运用,极大的促进了上述行业规模化、连续化生产发展。例如,以豆类为原料制造蛋白质制品和生物制药的现代化生产过程,前者是粉碎、离心分离、沉降、浓缩、喷雾干燥,后者是输送、加热、分离、沉降、过滤、萃取、结晶、吸附、干燥等一系列单元操作的典型运用。实际上,一个大型轻化工类工厂其反应器并不多,绝大多数设备都是进行着流体输送、加热、蒸发、蒸馏、干燥等单元操作,各种单元操作占据着企业大部分设备费用和操作费用,由此可见单元操作在生产中的重要地位。

一、本课程的性质、内容和任务

本课程是在学习数学、物理、化学的基础上,运用质量守恒和能量守恒定律及平衡关系等,来研究化工生产中内在的共同规律,讨论生产过程中共有的基本过程——单元操作的基本理论、基本原理、典型设备的构造及其计算方法,是化工及其相关专业教学计划中具有承上启下作用的重要技术基础课,它是化工类各门专业课的基础。

按照各个单元操作所遵循的基本规律,其内容归并为流体动力、传热、传质三个过程的基本理论及其应用。学习本课程的基本任务是掌握各个单元操作的基本规律及基本计算方法,熟悉典型设备的构造、性能及操作原理,并将这些知识应用于生产实践和研究中,寻求适宜的操作条件,探索强化生产过程的途径及改进设备的途径,以降低生产成本,提高生产效率,从而最大限度的获得经济效益。

二、单元操作中常用的两个基本概念

1. 物料衡算

在设计计算设备尺寸或确定所处理物料量的基本情况时,需要了解整个过程或某一步骤中原料、产物、副产物、废弃物各量之间的关系。物料衡算依据质量守恒定律可确定进入系统(某一过程或设备)的物料量,必须等于离开该系统的物料量与积累于该系统设备中的物料量之和,即

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{积累量}$$

即

$$G_1 = G_2 + G_{\text{积}} \quad (0-1)$$

式中: G_1 ——输入物料量;

G_2 ——输出物料量;

$G_{\text{积}}$ ——积累在设备中的物料量。

在连续生产过程中设备内不应有物料积存,进行物料衡算时,式(0-1)可简化为

输入=输出

即

$$G_1 = G_2 \quad (0-2)$$

[例 0-1] 将流量为 1000kg/h 的葡萄糖溶液送入一连续生产蒸发器,在 378K 下溶液从 8% 浓缩到 50%,请问该蒸发器在浓缩过程中的水分蒸发量是多少? 获得多少 50% 的葡萄糖浓缩液?

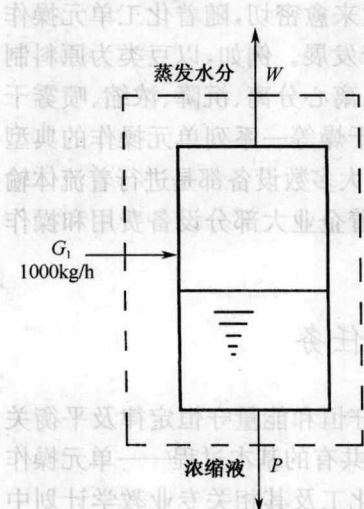


图 0-1 例 0-1 附图

解: (1) 根据题意画蒸发过程示意图,划定物料衡算范围,并标注过程数据,见图 0-1。

(2) 以 1h 为基准,则列出物料衡算式。连续生产过程无物料的积累,由式(0-2)可知

$$G_1 = G_2$$

式中: $G_1 = 1000\text{kg/h}$; $G_2 = \text{水分蒸发量} + \text{浓缩液量} = W + P$, 求 W 、 P 。

进出蒸发器溶液总量为

$$G_1 = W + P$$

即

$$1000 = W + P$$

进出蒸发器溶质量为

$$1000(0.08) = W(0) + P(0.5)$$

解得:水分蒸发量 $W = 840\text{kg/h}$, 浓缩液量 $P = 160\text{kg/h}$

2. 能量衡算

各类化工及相近企业在从原料到获得产品的生产过程中,处理物料需要消耗能量。要了解能量的消耗,以及与过程操作有关的各种形式能量之间的相互转换情况,(如热能、机械能、电能、化学能),可根据能量守恒定律列出能量衡算式。但是,在化工生产中许多过程以热能为主,所以能量衡算便简化为热量衡算。热量衡算中需要考虑的项目是进出系统或设备的物料本身所携带的焓,包括物料的显热和潜热两部分;从外界加入以及向外界送出的热,包括透过设备、管道的壁面由外界传入或向外扩散到环境里去的热量。在连续稳定过程中热量衡算的基本关系式为

输入热量=输出热量+热损失

即

$$Q_1 = Q_2 + Q_{\text{损}} \quad (0-3)$$

式中: Q_1 ——输入系统的热量;

Q_2 ——输出系统的热量;

$Q_{\text{损}}$ ——系统向环境散热时损失热量。

[例 0-2] 若例 0-1 中 8% 的葡萄糖溶液温度为 304K, 平均比热容为 $3.4\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 加热蒸汽压力为 198kPa, 溶液液面压力为 120kPa, 50% 葡萄糖溶液的温度为 384.5K, 冷凝水温度为 363K, 热损失可忽略不计。试求每小时加热蒸汽用量。

解: (1) 根据题意画出示意图(图 0-2), 确定热量衡算范围, (例 0-2 虚线框所示), 并标注数据。由式(0-3)得

$$Q_1 = Q_2 + Q_{\text{损}}$$

设 $Q_{\text{糖}}$ ——8% 葡萄糖溶液的热量;

$Q_{\text{蒸汽}}$ ——加热蒸汽的热量;

$Q_{\text{蒸发水}}$ ——蒸发水蒸气的热量;

$Q_{\text{浓缩液}}$ ——浓缩液的热量;

$Q_{\text{冷凝水}}$ ——冷凝水的热量。

式中: $Q_1 = Q_{\text{糖}} + Q_{\text{蒸汽}}$

$$Q_2 = Q_{\text{蒸发水}} + Q_{\text{浓缩液}} + Q_{\text{冷凝水}}$$

$$Q_{\text{损}} = 0$$

(2) 仍以 1h 为基准, 由附录十查出 198kPa 加热蒸汽及 120kPa 蒸发水蒸气的潜热分别为 $r =$

2205.57kJ/kg 和 $r' = 2246.8\text{kJ/kg}$ 。363K 冷凝水比热容为 $4.187\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。设加热蒸汽及蒸发水蒸气的焓分别为 H 和 H' (kJ/kg), 加热蒸汽的消耗量为 D , 则

$$Q_1 = 1000C_{\text{糖}}(T_{\text{进}} - T_0) + DH$$

$$Q_2 = 840r' + 1000C_{\text{糖}}(T_{\text{出}} - T_0) + DC_{\text{水}}(T_{\text{水}} - T_0)$$

式中: $C_{\text{糖}}$ ——葡萄糖溶液的比热容;

$C_{\text{水}}$ ——冷凝水的比热容;

T_0 ——273K 时水的温度;

$T_{\text{进}}, T_{\text{出}}$ ——葡萄糖溶液的进、出口温度;

$T_{\text{水}}$ ——冷凝水的温度。

该浓缩过程的热量衡算式为

$$1000C_{\text{糖}}(T_{\text{进}} - T_0) + DH = 840r' + 1000C_{\text{糖}}(T_{\text{出}} - T_0) + DC_{\text{水}}(T_{\text{水}} - T_0)$$

加热蒸汽的焓

$$H = Dr + DC_{\text{水}}(T_{\text{水}} - T_0)$$

整理后得

$$Dr = 840r' + 1000C_{\text{糖}}(T_{\text{出}} - T_{\text{进}})$$

因此, 加热蒸汽的用量为

$$\begin{aligned} D &= \frac{840r' + 1000C_{\text{糖}}(T_{\text{出}} - T_{\text{进}})}{r} \\ &= \frac{840 \times 2246.8 + 1000 \times 3.4(384.5 - 304)}{2205.57} \\ &= 976.5(\text{kg/h}) \end{aligned}$$

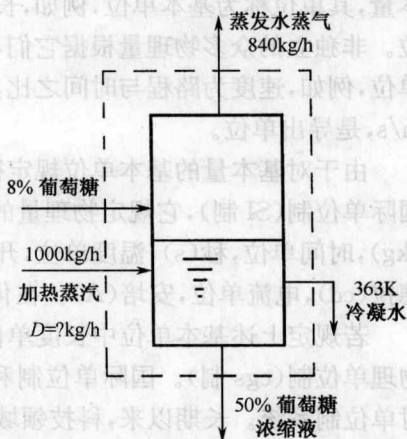


图 0-2 例 0-2 附图

三、物理量的单位及单位换算

1. 单位制度

在描述单元操作时将会用到很多物理量,物理量的大小都是用数字与单位的乘积来表示。物理量的单位可分为基本单位和导出单位两类。通常将几个独立的物理量称为基本量,其单位称为基本单位,例如,长度、时间、质量为基本量,其单位米、秒、千克为基本单位。非独立的众多物理量根据它们与基本量的关系来确定,称为导出量,其单位称为导出单位,例如,速度为路程与时间之比,由长度与时间相除而导出,是一个导出量,其单位为m/s,是导出单位。

由于对基本量的基本单位规定得不同,便产生了不同的单位制度。我国已广泛推行国际单位制(SI制),它规定物理量的基本单位有7个:长度单位,米(m),质量单位,千克(kg),时间单位,秒(s),温度单位,开尔文(K),物质量单位,摩尔(mol),发光强度单位,坎德拉(cd),电流单位,安培(A)。在化工原理中常用的只有前5个,即m、kg、s、K、mol。

若规定上述基本单位中长度单位为厘米(cm),质量单位克(g),时间单位秒(s),称为物理单位制(cgs制)。国际单位制和物理单位制的特点都是以质量为基本单位,属于绝对单位制系统。长期以来,科技领域还使用工程单位制,它以力作为基本单位,而不是以质量作为基本单位,属于重力单位制系统。工程单位制的基本单位是:长度单位米(m),力或重量单位千克(力)(kgf),时间单位秒(s)。千克在SI制中指质量,在工程制中指的是力或重量,容易混淆,所以,在工程制中的千克之后加注“力(f)”字表示,即公斤(力),用符号kgf表示。

上述三种单位制在化工中常见的物理量单位见附录一。

2. 单位换算

我国已广泛使用法定计量单位,但工程制在生产和设计中仍有使用,许多物理、化学数据也还在用物理单位制表示。各种来源得到的数据,不一定符合计算和使用要求,必须进行单位换算。

物理量由一种单位换算成为另一种单位时,量本身并无变化,但数值要改变。进行单位换算时要乘以两单位之间的换算因素,才能得到新单位的数字。所谓换算因素,就是同等量的原单位与新单位大小之比。例如,1atm(1个标准大气压)的压力和760mmHg的压力是两个相等的物理量,但所用单位不同,其数值就不同,即 $1\text{atm}=760\text{mmHg}$ 。那么,它们的换算因素就是760。

常用单位间的换算因素可查本书附录一。

[例 0-3] 已知一个标准大气压(1atm)的压力等于 1.033kgf/cm^2 ,试求此压力在SI制中为若干Pa?

解:在SI制中 $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ 。因此,应将工程单位制中 kgf/cm^2 的kgf转换为N, cm^2 转换为 m^2 ,由附录一查得各量在不同单位间的关系

$$1\text{kgf}=9.81\text{N} \quad 1\text{cm}=(1/100)\text{m}$$

因此得

$$1 \text{ atm} = \left(1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right) \left(\frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ kgf}}\right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}\right)^2 = (1.033 \times 9.81 \times 100^2) \left(\frac{\text{kgf} \times \text{N} \times \text{cm}^2}{\text{cm}^2 \times \text{kgf} \times \text{m}^2}\right) \\ = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

[例 0-4] 在绝对单位制中 277K 时水的密度为 $1.0(\text{g}/\text{cm}^3)$, 试将其换算为 SI 制单位表示的密度。

解: SI 制中密度的单位为 (kg/m^3) 。已知 $1\text{g}=0.001\text{kg}$, $1\text{cm}=0.01\text{m}$ 则

$$1.0 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) = 1 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}\right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}\right)^3 = 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$$



小 结

尽管化工产品种类繁多,生产流程、设备型号、工艺过程不尽相同,但都可以抽象归纳出一些本质相同的物理操作过程,即单元操作。使用“单元操作”的概念,统一了生产流程中的一些基本过程。物料衡算和热量衡算方法是化工原理处理问题的基本方法,而单位换算是学习本课程的一项基本功。



思考与练习

思考题

1. 本门课程的任务是什么?
2. 什么叫单元操作?
3. 物料衡算的理论依据是什么? 简述物料衡算的方法及步骤。
4. 热量衡算的理论依据是什么? 简述热量衡算的方法及步骤。
5. 在国际单位制(SI 制)中,常用的基本量有哪些? 有几个基本单位? 分别用什么符号表示?

6. 什么叫导出量、导出单位? 试举例说明。

练习题

1. 某湿物料原始含水量为 10%, 在干燥器内干燥至含水量为 1.1%(均为质量百分率)。求每吨湿物料除去的水量。
2. 在某一间壁式换热器中,利用冷却水将间壁另一侧 1500 kg/h 、 80°C 的某有机液体冷却到 40°C , 冷却水的初温为 30°C , 出口温度为 35°C , 已知该有机液体的比热容为 $1.38 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。试求冷却水用量。
3. 将下列各物理量以国际单位制表示: (1) 压力 $1.5 \text{ kgf}/\text{cm}^2$; (2) 密度 $1.23 \text{ g}/\text{cm}^3$; (3) 气体常数 $82.06 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})$

第一章 流体流动与输送



本章主要讲述:流体力学基础,即流体在静止和流动时的基本规律;流体阻力的基本理论和计算;以及用这些基本知识解决流体流动中的基本问题,即管路知识、流量测定及输送机械。

了解流体输送在生产过程中的重要作用、流量测定原理、简单管路的布置及计算、典型输送机械的工作原理及构造;熟练掌握柏努利方程式的物理意义及其应用、典型输送机械的选用及操作。

流体是指具有流动性的物体,包括液体和气体。在化工及食品、生物制品生产过程中所处理的原料、半成品和产品大多数是流体。为了把这些流体原料、半成品制成产品,常需要把流体从一个设备输送到另一个设备,并使流体在设备中保持最适宜的流动条件,或者从一个车间输送到另一个车间,使这些流体物料能参与生产过程的加热、冷却、沉降、过滤、离心分离等加工过程,保证生产顺利进行,达到高产、优质、低消耗、高效率的目的。因此,流体流动与输送是化工、食品、生物工程等生产中的一个基本操作,也是其他加工过程的基础。

第一节 流体力学基础

在力学范围内,研究流体平衡与运动一般规律的科学称为流体力学。流体力学基本知识,是解决流体输送问题的理论根据,也是今后学习其他章节的基础知识。

一、流体力学涉及的主要物理量

(一)流体的密度、相对密度、比体积

1. 密度

单位体积流体的质量,称为密度,用符号 ρ 表示。

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

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 。

任何流体的密度,都随它的温度和压力而变化。压力对液体的密度影响较小,可忽略不计。因此,常称液体为不可压缩流体。温度对液体密度有一定影响,一般是随温度的升高而降低。例如,纯水的密度在 4℃ 时为 1000 kg/m³,在 20℃ 时为 998.2 kg/m³,在 100℃ 时为 958.4 kg/m³。在选用密度数值时要注意确定所选液体的温度。

实际生产中常遇到的是混合液体,它们的密度的准确值需用实验方法测得。当液体混合时,体积变化不大,而工程计算上又不需要特别精确时,混合液体密度的近似值可用下式计算

$$\frac{1}{\rho} = \frac{X_{w1}}{\rho_1} + \frac{X_{w2}}{\rho_2} + \dots + \frac{X_{wn}}{\rho_n} \quad (1-2)$$

式中: ρ ——液体混合物的密度, kg/m³;

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——混合液中各组分的密度, kg/m³;

$X_{w1}, X_{w2}, \dots, X_{wn}$ ——混合液中各组分的质量分率。

2. 相对密度

相对密度是指液体在某温度时的密度与纯水在 4℃ 时的密度之比。用 d' 表示。

$$d' = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} = \frac{\rho}{1000} \quad (1-3)$$

式中: ρ ——液体温度在 t ℃ 时的密度, kg/m³;

$\rho_{\text{水}}$ ——水在 4℃ 时的密度, kg/m³。

由式(1-3)可知,相对密度是没有单位的。液体的相对密度用实验方法测定。工业上最简单的方法是将比重计放在液体中,即可以在比重计上读出液体的相对密度。若已知液体的相对密度,可由式(1-3)求得该液体的密度,即 $\rho = 1000d'$ 。

3. 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。

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知,流体比体积与密度互为倒数。即流体的比体积和密度的乘积等于 1。

气体的密度由于受气体温度和压力的变化而变化,计算方法在此不做阐述,其值需用时可在附录五中查得。

[例 1-1] 已知糖液的相对密度为 1.08,油的相对密度为 0.89。试分别求它们的密度、比体积。

解:(1)由式(1-3)得知 $\rho = d' 1000 \text{ kg/m}^3$, 它们的密度分别是:

糖液的密度 $\rho_1 = 1.08 \times 1000 = 1080 (\text{kg/m}^3)$

油的密度 $\rho_2 = 0.89 \times 1000 = 890 (\text{kg/m}^3)$

(2)由式(1-4)可计算出它们的比体积分别是

糖液的比体积 $v = \frac{1}{\rho_1} = \frac{1}{1080} = 0.000926 (\text{m}^3/\text{kg})$

油的比体积 $v = \frac{1}{\rho_2} = \frac{1}{890} = 0.00112 (\text{m}^3/\text{kg})$

【例 1-2】某糖厂混合汁泵每小时输送混合汁 50t, 设混合汁温度为 20℃, 相对密度为 1.059。试求每小时输送混合汁的体积为多少 m³。

解:已知每小时输送混合汁的质量为 50t, 其相对密度为 1.059。

混合汁的密度为 $\rho = 1.059 \times 1000 = 1059 (\text{kg/m}^3)$

由 $\rho = m/V$ 可知, 每小时输送的混合汁体积为

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{50000}{1059} = 47.21 (\text{m}^3)$$

(二) 作用在流体上的力

1. 压力

流体垂直作用于单位面积上的力, 称为流体的压强, 习惯上称为流体的压力, 用符号 p 表示。

设作用在流体整个表面的力是 F 牛顿(N), 该表面积是 A 平方米(m²), 则压力的关系式为

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{N/m}^2 \text{ 或 Pa}) \quad (1-5)$$

在 SI 制中, 压力的单位是 N/m², 读为牛每平方米, 其专用名称是帕斯卡, 简称为帕, 单位符号 Pa。由于生产中, 操作压力的高低相差很大, 有时需用比 Pa 大的单位, 如 kPa 和 MPa; 有时需用比 Pa 小的单位, 如 mPa 等。它们之间的关系为

$$1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10^9 \text{ mPa}$$

2. 液体的静压强与压力的单位换算

设容器的底面积为 A , 液柱高度为 h , 液体的密度为 ρ , 则液体作用在容器底面积上的力 F , 等于液柱的重量, 即

$$F = hA\rho g$$

式中: F ——力, N;

h ——液柱高度, m;

A ——容器的底面积, m²;

ρ ——液体的密度, kg/m³;

g ——重力加速度, m/s²。

作用在器底上的压力(或压强)为

$$p = \frac{F}{A} = \frac{hA\rho g}{A} = h\rho g \quad (1-6)$$

式中: p ——流体的静压强, Pa。

由式(1-6)可知, 压力 p 等于液柱高度 h 、液体密度 ρ 和重力加速度 g 的乘积。在指定液体时, ρg 是常数, 此时 $p \propto h$ 。因此, 可以用液柱高度的大小表示压力的大小。

由式(1-6)得

$$h = \frac{p}{\rho g} \quad (1-7)$$

由式(1-7)可知,当流体的压力 p 一定时,液体的密度 ρ 越大,则液柱高度 h 越小。用不同密度 ρ_1 和 ρ_2 的两种液体表示同一压力时,其液柱高度分别是 h_1 和 h_2 ,则

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (1-8)$$

即液柱高度与密度成反比。

由于生产装备和查阅的科技资料中,压力还采用许多 SI 制以外单位,如毫米汞柱(mmHg);米水柱(mH₂O);公斤(力)/平方厘米(kgf/cm²);工程大气压(at);物理大气压(atm)等,所以,应该了解 Pa 与其他单位的换算关系。

在生产中有些压力表上的单位是公斤(力)/平方厘米,其符号是 kgf/cm²,一般称 1kgf/cm² 为一个工程大气压,符号是 at。习惯上所说的几个“压力”,就是指几个工程大气压。在实验室中压力单位常用物理大气压或标准大气压,符号是 atm。压力之间的换算系数见附录一。

为便于换算,列出常见的压力单位换算关系如下

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$1 \text{ at} = 9.81 \times 10^4 \text{ Pa} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 735.6 \text{ mmHg} = 10 \text{ mH}_2\text{O}$$

3. 表压、真空度和绝对压力

测量流体压力用的仪表称为压力表。在设备或管路上装的压力表,其读数是设备或管路内流体的真实压力与外界大气压之差。若设备内的压力与外界相等,则压力表的读数为零。真实压力(实际压力)称为绝对压力,简称绝压,以符号 p 表示。从压力表上读得的压力值称为表压力,简称表压,符号 $p_{\text{表}}$ 。已知设备或管路内的表压($p_{\text{表}}$)和外界大气压($p_{\text{大}}$),就可求出绝对压力(p)。

$$p = p_{\text{表}} + p_{\text{大}} \quad (1-9)$$

或

$$p_{\text{表}} = p - p_{\text{大}} \quad (1-10)$$

当设备或管路内真实压力小于外界大气压时,则采用真空表。此时,真空表的读数表明外界大气压与设备或管路内的绝对压力之差,称为真空度,符号 $p_{\text{真}}$ 。绝对压力与真空度的关系为

$$p = p_{\text{大}} - p_{\text{真}} \quad (1-11)$$

或

$$p_{\text{真}} = p_{\text{大}} - p \quad (1-12)$$

由上述关系式可见,真空度越高则绝对压力越低;真空度最大值等于大气压力;真空度为定值时,大气压力越大,则绝对压力越大。所以,记录真空度时,必须同时注明当时外界大气压,否则无法计算绝对压力。真空又称负压。外界大气压可用气压计测定,大气压强随地区而异,在同一地区也会随季节、气候而稍有不同。

为了避免不必要的错误,用表压或真空度表示压力数值时,应在单位后加括号注明,如 $p = 2 \times 10^5 \text{ Pa}(\text{表压})$, $p = 4 \times 10^4 \text{ Pa}(\text{真空度})$ 等。如果没有注明,即为表压。

[例 1-3] 已测得加热器中 130℃ 蒸汽的压力为 1253mmHg,当时当地大气压在气压计上的读数为 770mmHg。试求加热器中蒸汽的实际压力为多少 kPa? 多少 mH₂O?

解:由式(1-6) $p = h\rho g$ 可知
加热器中蒸汽的表压为

$$p_{\text{表}} = 1.253 \times 13600 \times 9.81 = 167.17 (\text{kN/m}^2 \text{ 或 kPa})$$

同理,当时当地大气压为

$$p_{\text{大}} = 0.77 \times 13600 \times 9.81 = 102.73 (\text{kN/m}^2 \text{ 或 kPa})$$

加热器中蒸汽的绝对压力为

$$p = p_{\text{表}} + p_{\text{大}} = 167.17 + 102.73 = 269.9 (\text{kN/m}^2 \text{ 或 kPa})$$

用水柱表示为

$$h = \frac{p}{\rho g} = \frac{269900}{1000 \times 9.81} = 27.51 (\text{mH}_2\text{O})$$

二、静止流体的基本规律

流体的静止是流动的一种特殊形式。要研究流体的运动规律,一般先从静止流体这种特殊情况开始。静止的流体,由于流体本身的重力以及外加压力的存在,其内部各点都受着这些力的作用,达到静力平衡,因此,处于相对静止状态。重力是不变的,而静止流体内部各点的压力是不相同的。它们遵循的规律是什么?现在对静止流体内部压力的变化规律加以讨论。

(一)流体静力学基本方程

静止流体内部,从各个方向作用于某一点的力都是相等的,否则该点的流体便不能保持静止。同一水平面各点的静压力也是相等的,否则静止的液面便不会成水平。在不同高度的水平面上,流体的静压力不同。

如图 1-1 所示容器内的静止液体,其密度为 ρ 。在液体中任意划出一个液柱,上下底面积均为 A 。现以容器底面作为基准水平面。液柱上、下底与基准面的距离分别为 z_1 和 z_2 。

此静止流体在垂直方向所受的几个力应该平衡。液柱所受向下的力有:

重力 $F = \rho A(z_1 - z_2)g$

作用在液柱顶面上的压力 $F_1 = p_1 A$

液柱所受向上的力有:

作用在液柱底面积上的压力 $F_2 = p_2 A$

液柱处于平衡状态时,在垂直方向上的各力的代数和

应等于零,即

$$F_1 + F - F_2 = 0$$

或

$$p_1 A + \rho A(z_1 - z_2)g - p_2 A = 0$$

即

$$p_2 A = p_1 A + \rho A(z_1 - z_2)g$$

将上式整理得

$$p_2 = p_1 + \rho(z_1 - z_2)g \quad (1-13)$$

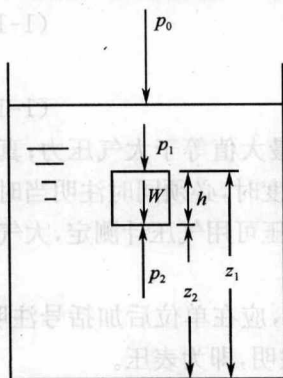


图 1-1 静止流体内部力的平衡