

化工原理及其应用

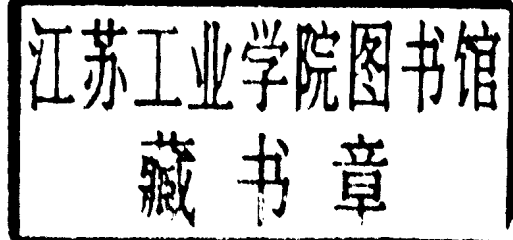
王 淼 编著

济 南 出 版 社

教学用书和自学用书

化工原理及其应用

王 淼 编 著



济 南 出 版 社

内 容 提 要

全书由四篇十章组成。第一篇“流体力学和流体力学为基础的单元操作”，包括：第一章“流体力学”，第二章“流体输送”，第三章“非均相物系的分离和固体流态化”。第二篇“传热基本原理和传热为基础的单元操作”，包括：第四章“传热基本原理”，第五章“传热设备和列管换热器的设计”，第六章“蒸发”。第三篇“质量传递理论和质量传递理论为基础的单元操作”，包括：第七章“吸收”，第八章“蒸馏”，第九章“固体干燥”。第四篇“热力学为基础的单元操作”，共一章，为第十章“制冷技术”。

本书阐述条理清楚，简明扼要，理论联系实际。可作学校教学用书，自学用书和工程技术人员的参考书。

造 机 理 及 其 应 用

主 编 著

济 南 出 版 社 出 版
(济 南 市 经 二 路 182 号)
山 东 省 新 华 书 店 发 行
济 南 教 育 学 院 印 刷 厂 印 刷

787×1092毫米 16开 35.875印张 850千字

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

印数 1—5000

ISBN 7-80572-152-1

TQ·2 定价：9.50元

编 者 的 话

本人经过“化工原理”课的教学实践，感到很需要有一本有理论又结合生产实际的简明扼要的化工原理。以适用于少学时专业学生的学习。于是就着手写了“简明化工原理”讲义。经试用后，效果较好。在此基础上又经过多次修改和补充。为了使读者学完一章后能明确掌握本章的主要内容，又在每章后面加了小结和练习题。最后写成了《化工原理及其应用》这本书。

本书共有四篇十章。其中第八章和第九章分别由山东轻工业学院王建成和张桂英编写。其余部分和每章的小结及练习题均由王森编写而成。书中的图及图表由张桂英绘制。全书经华东化工学院戴干策教授和叶金大副教授审定。

本书内容精练，条理清楚，简明扼要且例题较多。另外为了使读者便于解决生产中的实际问题，又在每一章的后面加了结合生产实际的综合性大例题。本书从易到难，使初学者入门容易，由浅入深，顺理成章。本书适于做化工、轻工学校的教材，也适于做自学用书。另外书中还有许多设计举例，及其分析和说明，所以本书还可做工程技术人员工作和设计的参考书。

由于本人学识有限，缺点和错误在所难免，欢迎各位读者批评指正。

王 森

1989年8月于济南

目 录

绪 论	(1)
第一篇 流体力学和流体力学为基础的单元操作	(6)
第一章 流体力学	(6)
第一节 流体静力学	(6)
§ 1—1 流体的主要物理量	(6)
§ 1—2 压力(压强)	(8)
§ 1—3 流体静力学基本方程式	(10)
§ 1—4 静力学基本方程式的应用	(10)
第二节 流体动力学	(13)
§ 1—5 流量和流速	(13)
§ 1—6 定态流动和非定态流动	(14)
§ 1—7 流体作定态流动时的物料衡算——连续性方程	(15)
§ 1—8 流体作定态流动时的能量衡算	(16)
第三节 流体流动的阻力及其计算	(26)
§ 1—9 流体的粘度	(26)
§ 1—10 流体的流动类型	(31)
§ 1—11 流体在圆管中的速度分布	(34)
§ 1—12 流体流动的阻力计算	(37)
第四节 管路的计算和布置	(52)
§ 1—13 简单管路的计算	(52)
§ 1—14 可压缩流体的管路计算	(61)
§ 1—15 管路布置和安装的一般原则	(61)
第五节 流速和流量的测量	(63)
§ 1—16 毕托测速管	(63)
§ 1—17 孔板流量计	(64)
§ 1—18 文氏管流量计和转子流量计	(67)
第六节 非牛顿型流体的流动简介	(69)
§ 1—19 牛顿型流体和非牛顿型流体	(69)
§ 1—20 非牛顿型流体在管内流动的计算	(70)
第七节 本章小结和练习题	(70)
第二章 流体输送	(78)
第一节 液体输送	(78)
§ 2—1 离 心 泵	(78)

§2—2 其他类型的泵	(93)
第二节 气体输送	(100)
§2—3 通风机	(100)
§2—4 鼓风机	(104)
§2—5 压缩机	(105)
§2—6 真空泵	(113)
第三节 本章小结和练习题	(114)
第三章 非均相物系的分离和固体流态化	(121)
第一节 重力沉降	(122)
§3—1 重力沉降速度	(122)
§3—2 沉降器的构造和计算	(127)
第二节 过 滤	(129)
§3—3 过滤的基本概念	(129)
§3—4 过滤的基本理论	(131)
§3—5 过滤机的构造和操作	(136)
第三节 离 心 机	(143)
§3—6 离心力沉降	(143)
§3—7 离心机的构造及操作	(144)
第四节 旋风分离器和旋液分离器	(148)
§3—8 旋风分离器	(148)
§3—9 旋液分离器	(157)
第五节 固体流态化	(157)
§3—10 固体流态化的基本概念	(158)
§3—11 流化床的流体力学性质	(160)
第六节 气力输送	(161)
§3—12 气力输送	(161)
第七节 机械搅拌	(164)
§3—13 搅拌设备	(164)
第八节 本章小结和练习题	(166)
第二篇 传热基本原理和传热为基础的单元操作	(174)
第四章 传热基本原理	(174)
第一节 传热的三种基本方式	(174)
§4—1 传热的三种基本方式	(174)
第二节 热 传 导	(175)
§4—2 傅立叶定律及导热系数	(175)
§4—3 通过平壁的定态热传导	(180)
§4—4 通过圆筒壁的定态热传导	(183)
§4—5 非定态热传导及其他	(185)
第三节 热 辐 射	(187)

§4—6 热辐射的基本规律	(187)
§4—7 两物体间的辐射传热	(191)
第四节 对流传热和对流传热膜系数	(196)
§4—8 间壁两侧流体进行热交换的分析	(197)
§4—9 对流传热速率方程式和对流传热膜系数	(198)
§4—10 对流传热膜系数的关联式	(198)
§4—11 对流传热膜系数的求算	(200)
§4—12 壁温和设备热损失的计算	(215)
第五节 换热器的传热计算	(217)
§4—13 工业生产中的换热方法	(217)
§4—14 两流体间的热量传递速率方程和总传热系数	(218)
§4—15 平均温度差的计算	(226)
第六节 本章小结和练习题	(232)
第五章 传热设备和列管换热器的设计	(242)
第一节 传热设备	(242)
§5—1 列管换热器	(242)
§5—2 其它形式的传热设备	(244)
第二节 加热剂和冷却剂	(252)
§5—3 加热方法和加热剂	(252)
§5—4 常用冷却剂	(253)
第三节 列管换热器的工艺设计	(255)
§5—5 传热过程的热量衡算	(256)
§5—6 流体流动方向的选择和总传热系数K的估算	(258)
§5—7 列管换热器工艺设计中应考虑的问题	(260)
§5—8 列管换热器的设计举例	(270)
第四节 本章小结和练习题	(283)
第六章 蒸 发	(286)
第一节 蒸发设备	(287)
§6—1 蒸发器的结构及特点	(287)
§6—2 除沫器和冷凝器	(292)
第二节 单效蒸发器	(293)
§6—3 单效蒸发器的计算	(293)
§6—4 蒸发设备中的温度差损失及真空蒸发	(298)
第三节 多效蒸发	(300)
§6—5 多效蒸发设备的流程	(301)
§6—6 多效蒸发的计算	(302)
§6—7 蒸发器的设计举例	(310)
§6—8 多效蒸发器效数的限度和生产能力	(316)
第四节 本章小结和练习题	(318)

第三篇 质量传递理论和质量传递理论为基础的单元操作	(325)
第七章 吸 收	(325)
第一节 生产中的吸收过程	(326)
§ 7—1 吸收的用途和分类	(326)
§ 7—2 吸收操作和吸收剂	(326)
第二节 质量传递理论	(328)
§ 7—3 气液相平衡	(328)
§ 7—4 分子扩散	(334)
§ 7—5 对流扩散	(338)
§ 7—6 传质速率方程	(338)
§ 7—7 传质理论简介	(350)
第三节 气液传质设备	(351)
§ 7—8 板式塔	(351)
§ 7—9 填料塔	(355)
第四节 吸收塔的计算	(358)
§ 7—10 吸收塔的物质衡算——操作线方程	(358)
§ 7—11 填料吸收塔填料层高度的计算	(364)
§ 7—12 填料吸收塔的设计	(372)
§ 7—13 板式吸收塔高度的计算	(378)
第五节 其它类型的吸收	(380)
§ 7—14 高浓气体的吸收	(380)
§ 7—15 多组分吸收	(383)
§ 7—16 化学吸收和非等温吸收	(384)
第六节 脱吸(解吸)和吸收流程	(385)
§ 7—17 脱吸(解吸)	(385)
§ 7—18 吸收流程	(386)
第七节 本章小结和练习题	(387)
第八章 蒸 馏	(393)
第一节 双组分溶液的汽液平衡	(394)
§ 8—1 理想物系的汽液平衡	(394)
§ 8—2 非理想物系的汽液平衡	(396)
§ 8—3 挥发度与相对挥发度	(397)
第二节 简单蒸馏与平衡蒸馏	(398)
§ 8—4 简单蒸馏	(398)
§ 8—5 平衡蒸馏	(398)
第三节 精 馏	(400)
§ 8—6 精馏过程简述	(400)
§ 8—7 精馏过程的分析和数学描述	(401)
第四节 精馏塔的设计型计算	(407)

§8—8 理论塔板数的计算	(407)
§8—9 回流比和进料状态的选择	(409)
§8—10 理论板数的捷算法	(411)
§8—11 平衡线为直线时理论板数的解析计算	(412)
第五节 精馏塔的操作型计算	(413)
§8—12 回流比的变化对精馏结果的影响	(413)
§8—13 进料组成变动的的影响	(413)
第六节 间歇精馏	(414)
§8—14 保持馏出液组成恒定的间歇精馏	(414)
§8—15 回流比保持恒定的间歇精馏	(415)
第七节 特殊精馏	(416)
§8—16 水蒸汽蒸馏	(416)
§8—17 恒沸精馏和萃取精馏	(417)
第八节 精馏塔设计	(419)
§8—18 板式塔设计要领	(419)
§8—19 设计举例	(423)
第九节 本章小结和练习题	(426)
第九章 固体干燥	(432)
第一节 湿空气的性质和湿度图	(433)
§9—1 湿空气的性质	(433)
§9—2 湿空气的湿度图及其应用	(442)
第二节 干燥器的物料衡算和热量衡算	(450)
§9—3 空气干燥器的操作过程	(450)
§9—4 空气干燥器的物料衡算	(451)
§9—5 空气干燥器的热量衡算	(454)
§9—6 干燥器出口空气状态的确定	(456)
第三节 干燥速度和干燥时间	(460)
§9—7 物料中所含水分的性质	(460)
§9—8 恒定干燥条件下的干燥速度	(462)
§9—9 恒定干燥条件下干燥时间的计算	(467)
§9—10 干燥条件变动情况下的干燥速度和干燥时间的计算	(472)
第四节 干燥器	(473)
§9—11 干燥器的分类	(473)
§9—12 干燥器的结构和特点	(473)
§9—13 干燥器的比较和选择	(476)
§9—14 干燥器的设计	(477)
第五节 本章小结和练习题	(482)
第四篇 热力学原理为基础的单元操作	(486)
第十章 制冷技术	(486)

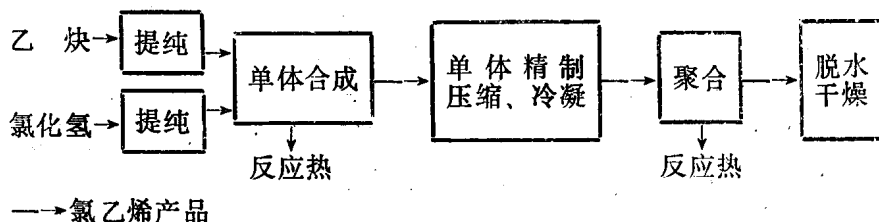
第一节 蒸汽压缩式制冷的原理	(486)
§10—1 蒸汽压缩式制冷的工作过程	(486)
§10—2 温熵图	(487)
§10—3 制冷能力和制冷剂循环量的计算	(488)
§10—4 多级压缩及复迭式制冷机	(496)
第二节 制冷剂与载冷剂	(498)
§10—5 制冷剂的热力学性质	(498)
§10—6 载冷剂	(500)
第三节 蒸汽压缩式制冷机的主要设备	(501)
§10—7 氨制冷工艺流程	(501)
§10—8 蒸汽压缩式制冷机的主要设备简介	(502)
第四节 其它制冷系统的简介	(504)
第五节 本章小结及练习题	(506)
参考书目	(509)
附 录	(510)
一、单位因次及其换算	(510)
二、水与蒸汽的物理性质	(515)
三、干空气的物理性质 ($P=760$ 毫米汞柱)	(524)
四、液体及水溶液的物理性质	(525)
五、气体的重要物理性质	(538)
六、固体性质	(544)
七、管子规格	(545)
八、泵与风机	(548)
九、换 热 器	(550)
十、标准筛目	(553)
十一、气体常数 R	(554)
十二、气体的扩散系数	(555)
十三、几种气体溶于水时的亨利系数	(556)
十四、某些双组分混合物在 101.3KN/m^2 (绝压)下的气液平衡数据	(557)
十五、几种常用填料的特性数据	(559)
十六、饱和水蒸汽在 $253\sim 373\text{K}$ 时的压力	(560)
十七、几种冷冻剂的物理性质	(562)
十八、几种冷冻剂的沸点和饱和蒸气压的关系	(563)
十九、氟里昂—12的物理性质	(563)
二十、氯化钠溶液的物理性质	(564)
二十一、氯化钙溶液的物理性质	(565)
二十二、氯化钠溶液和氯化钙溶液的比热 $\text{KJ/kg}\cdot\text{k}$	(566)
二十三、氨的热力性质	(567)

绪 论

一、化工过程与单元操作

化工原理是研究化学工业生产过程中单元操作的工作原理及其规律性，并根据对这些规律性的认识去解决化学工业生产中工程问题的一门工程学科。

化学工业是对原材料进行化学加工处理以得到有用的产品。我们把化学加工处理的生产过程简称为化工过程。从原材料到产品，一般要经过一个或若干个化工过程，而每一个化工过程又包括许多步骤。例如用乙炔和氯化氢为原料进行加成反应制取氯乙烯单体的生产过程简要图示如下：



此生产过程中除单体合成、聚合发生化学反应外，其余步骤均是状态和物理性质上发生变化。把在化工过程中仅发生物理性质变化的操作步骤称为单元操作。它们是各种化工产品的生产过程中普遍采用的，遵循共同的物理学定律，所用设备相似，具有相同作用的那些基本操作。例如流体的输送，在制酒厂需要，制革厂需要，石油化工厂和其他化工产品的生产中也需。并且在输送流体的操作中，都遵循着流体力学的规律，都用泵进行工作，其目的都是要把流体从一个地方送到另一个地方去。所以，流体输送就是应用最广泛的单元操作之一。由此可见，化工原理研究的对象，就是化工过程中的单元操作。换言之，化工原理是研究单元操作的规律和所用设备的基本理论的一门学科。

单元操作按其所遵循的基本规律，可归纳为下列几类：

- (1) 以流体力学为基础的单元操作：流体输送、沉降、过滤、离心分离、搅拌、固体流态化等。
- (2) 以热量传递理论为基础的单元操作：加热、冷却、蒸发等。
- (3) 以质量传递理论为基础的单元操作：蒸馏、吸收、吸附、萃取、干燥、膜分离等。
- (4) 以热力学为基础的单元操作：制冷技术。

化工原理是运用“物料衡算”、“能量衡算”、“平衡关系”及“过程速率”等概念来研究单元操作的规律性和所用设备的基本理论。

物料衡算：单元操作中，原料、产物、副产物、废弃物各量之间的关系，可通过物料衡算确定。单元操作所用设备大小和尺寸，也要通过物料衡算求出所加工处理的物料量，才能算出它的尺寸。物料衡算是质量守恒定律在单元操作中的具体运用。进入任何

单元操作中的物料量，必须等于从该单元操作离开的物料与积存于该单元操作的物料质量之和：输入=输出+积存

多数情况下，化工生产中的单元操作属定态过程，定态过程中的物料衡算关系：

$$\text{输入} = \text{输出}$$

如蒸馏塔进料F，等于塔顶产品D和塔底产品W之和

$$F = D + W \text{ (kg/h)}$$

热量衡算：化工生产中所需的能量以热为主，用于改变物料的温度与聚集状态，提供反应所需要的热量等。若单元操作中有几种能量相互转化，则其间的关系用能量衡算来计算；若只涉及到热，能量衡算便简化为热量衡算。能量衡算是能量守恒定律在单元操作中的具体运用。

在定态过程中，热量衡算的关系式：输入=输出

在SI中能量和热量都是用J（焦耳）或KJ（千焦耳）为单位。

1 J = 1 N · m。工程制的能量单位是〔千克（力）·米〕，热量单位是〔千卡〕。它们之间的换算关系如下：

$$1 \text{ [千卡]} = 427 \text{ [千克(力) · 米]} = 4.187 \text{ [千焦]}$$

平衡关系和过程速率：在单元操作中物质的运动是普遍的，绝对的，而静止是相对的，有条件的。要认识单元操作中的规律性，不仅要研究它的运动，而且要看到绝对运动中的静止。因为运动和静止是相互联系的，而且“运动应当从它的反面即从静止找到它的量度”。例如流体流动的压强差，热量传递的温度差，扩散过程的浓度差，均反映了过程进行的一定方向，由不平衡趋向平衡。这些平衡揭示了过程进行的方向和限度，为设备尺寸的设计提供了理论依据。

单元操作中的速率（即过程速率）是化工生产中具有实际意义的问题。速率快，节省时间，提高了设备的生产能力。但化学反应的速率受许多因素的影响。要把一切影响速率的规律都找出来确有困难。目前常采用归纳法来概括这类问题，即把速率归纳为：

$$\text{速率方程} = \frac{\text{过程的推动力}}{\text{过程的阻力}}$$

式中的过程推动力可理解为流体的压强差、温度差、浓度差，它是发自过程有利于趋向平衡因素的总概括。式中的过程阻力则更为复杂，对具体情况应作具体分析。

人们借助于对单元操作的“物料衡算”、“热量衡算”、“平衡关系”、“过程速率”来认识化工过程中单元操作的规律性和所用设备的特征。但是，目前化学工程尚处于从经验到科学的过渡，所以研究的方法，是实验归纳法（即经验法）和数学模型法（即半理论半经验法）。

认识世界的目的在于改造世界。学习化工原理的主要任务是掌握各个单元操作的基本规律，熟悉所用设备的工作原理、性能和运转注意事项等，并能把这些认识用于化工生产中，使生产技术不断改进。

二、单位及其换算

1. 三种单位制度：

物理制（即Cgs制）：基本单位是：长度单位厘米（cm），质量单位是克（g），时

间单位是秒 (S)。

国际制 (即SI制)：基本单位是：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)，物质数量单位摩尔 (mol)，电流强度单位安培 (A)，光强单位坎得拉 (cd)。

工程制：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)。

2. 单位换算：

我国使用SI制，但在生产中、设计中仍习惯使用工程制，而一些物理、化学数据中还有许多仍以物理制单位表示。因此，学习化工原理必须首先注意单位的换算。

要在化工计算中正确地运用单位，并弄清SI单位与工程单位的关系，首先要了解质量、重量、力三者的意义及单位。

质量和重量 (或力) 是两个截然不同的概念。一件物体的质量是它所包含物质的多少；而它的重量是它所受地球吸引力 (重力) 的大小，一件物体的质量是固定的，而它的重量却随距地球的远近而异。通常所谓重量是指在地球表面附近的重量而言。

质量和力的关系，可用牛顿第二定律表示：

$$f = kma \quad (1)$$

式中：f是作用于物体上的力，m是物体的质量，a是物体在力作用方向上的加速度，比例常数k的数值取决于各物理量所用的单位。若各物理量所用单位都属于同一单位制，则k=1。

物理制：[f] = ma = g × $\frac{\text{cm}}{\text{s}^2}$ = g · cm/s² = dyn (达因)

SI制：[f] = ma = Kg × $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ = Kg · m/s² = N (牛顿)

工程制：f千克 (力) = ma

$$\text{工程制的 } [m] = \frac{f}{a} = \frac{\text{千克 (力)}}{\text{米/秒}^2} = \text{千克 (力)} \cdot \text{秒}^2/\text{米}$$

由此可见，1N是作用于质量为1kg的物体上能够产生1m/s²的加速度所需要的力。1工程单位质量是在1千克 (力) 的作用之下其加速度为1米/秒²的那个物体的质量。

物体在地面附近受重力作用所产生的加速度a=9.81m/s²，故作用于质量m=1kg的物体上的重力为

$$f = ma = 1\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2 = 9.81\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.81\text{N} \quad (2)$$

物体所受的重力即为其重量，而质量1kg的物体在地面附近的重量为1千克 (力) 即1kgf，故得：

$$1\text{kgf} = 9.81\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.81\text{N} \quad (3)$$

或 $1\text{kg} = \frac{1}{9.81}\text{kgf s}^2/\text{m} \quad (4)$

式 (3) (或 (4) 式) 表示kg与kgf的关系，也是工程制与SI制之间换算的桥梁。

工程制中很少采用质量，在可能的场合都改用重量。例如不用密度而用重度，后者的单位是 [千克 (力)/米³]，其意义为单位体积物料的重量。

例1 1标准大气压 (1atm) 的压力等于1.033kgf/cm²，将其换算成SI单位。

解：SI单位所表示的大气压N/m²，则工程单位kgf/cm²，所以只要将kgf转换为

N, cm转换成m即可。

$$1\text{kgf}=9.81\text{N}$$

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

例2 通用气体常数 $R=82.06\text{atm}\cdot\text{cm}^3/\text{mol}\cdot\text{k}$, 将其换算成下列单位: (a) 工程单位 千克(力)·米/千克分子·°C; (b) 国际单位 $\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{k}$ 。

$$\begin{aligned} \text{解: (a)} R &= 82.06 \frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{k}} = 82.06 \left(\frac{10330\text{kgf}}{\text{m}^2} \right) (0.01\text{m})^3 \left(\frac{1}{0.001\text{kmol}} \right) \left(\frac{1}{^\circ\text{C}} \right) \\ &= 848\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{kmol}\cdot^\circ\text{C} \\ \text{(b)} R &= 82.06 \frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{k}} = 82.06 \left(\frac{1.013 \times 10^5 \text{N}}{\text{m}^2} \right) (0.01\text{m})^3 \left(\frac{1}{0.001\text{kmol}} \right) \left(\frac{1}{\text{k}} \right) \\ &= 8313\text{N}\cdot\text{m}/\text{kmol}\cdot\text{k} = 8.313\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{k} \end{aligned}$$

附表1 化学工程中若干常用物理量的单位

物 理 量	cgs单位	SI单位	工程单位
长度	cm (厘米)	m (米)	m 米
质量	g (克)	kg (千克)	kgf·s ² /m 千克(力)秒 ² /米
力	g·cm/s ² -dyn (达因)	kg m/s ² =N(牛顿)	kgf 千克(力)
时间	s (秒)	s	s 秒
速度	cm/s	m/s	m/s 米/秒
加速度	cm/s ²	m/s ²	m/s ² 米/秒 ²
能量、功	dyn·cm-erg (尔格)	N m=J (焦耳)	kgf·m 千克(力)米
功率	erg/s	J/s-W (瓦)	kgf·m/s 千克(力)·米/秒
压力	dyn/cm ² -10 ⁻⁶ bar(巴)	N/m ² -pa(帕斯卡)	kgf/m ² 千克(力)/米 ²
密度	g/cm ³	kg/m ³	kgf·s ² /m ⁴ 千克(力)秒 ² /米 ⁴
粘度	dyn·s/cm ² -p (泊)	N s/m ²	kgf·s/m ² 千克(力)·秒/米 ²
表面张力	dyn/cm	N/m	kgf/m 千克(力)/米
扩散系数	cm ² /s	m ² /s	m ² /s 米 ² /秒
温度	°C	k (开)	°C °C
热	cal (卡)	J	kcal 千卡
热容、焓	cal/g·°C	J/kg K	kcal/kgf·°C 千卡/千克(力)°C
焓、潜热	cal/g	J/kg	kcal/kgf 千卡/千克(力)
导热系数	cal/cm·s·°C	W/m K	kcal/m·s·°C 千卡/米·秒·°C

练 习 题

第一部分 思考题

1. 什么是化工过程和化工单元操作? 化工原理研究哪些单元操作?
2. 举例说明什么是单元操作的物料衡算? 热量衡算? 平衡关系及过程速率? 它们在单元操作的研究中有何意义?
3. 在化学工程计算中为什么会遇到复杂的单位换算? 在换算过程中要掌握哪些基本关系式?

第二部分 计算题

1. 用常压连续精馏塔, 分离含苯40%的苯-甲苯混合液体。要求塔顶产品中含苯97%, 塔底产品中含苯2% (均为质量百分率)。若每小时有15000kg原料液送入塔中, 试求塔顶产品及塔底产品的千摩尔流率? (答: $D=76.7\text{kmol/h}$; $W=98.3\text{kmol/h}$ 。)
2. 某干燥器, 将含水16%的湿物料干燥到含水0.8%, 试求每吨湿物料干燥出的水量? (答: 149kg)
3. 1大气压下苯的饱和蒸汽(80.3°C) 在换热器中冷凝并冷却到 70°C 的液体。冷却水于 30°C 下送入, 于 60°C 下送出。求每千克(重量)苯蒸汽需多少冷却水。1大气压下苯的气化潜热为94.2〔千卡/千克(力)〕, 平均比热在 $0\sim 70^{\circ}\text{C}$ 范围内为0.42〔千卡/千克(力) $\cdot^{\circ}\text{C}$ 〕, 在 $70\sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围内为0.46〔千卡/千克(力) $\cdot^{\circ}\text{C}$ 〕。〔答3.3克(力)〕
4. 进行下列单位换算
 - (1) 30°C 时水的表面张力 $\sigma=71\text{dyn/cm}$, 将此cgs制单位换算成SI单位, 再换算成工程单位。
 - (2) 30°C 时水的粘度 $\mu=0.008\text{g/cm}\cdot\text{s}$, 将此cgs单位换算成SI单位, 再换算成工程单位。
 - (3) 传质系数 $K_G=1.6$ 〔千摩尔/米² $\cdot$ 小时 $\cdot$ 大气压〕, 换算成SI单位, $\text{kmol/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$ 。
 - (4) $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$, 向等于多少 kgf/cm^2 , atm , mmHg , mH_2O ?
(答: 0.077N/m , 7.24×10^{-3} 〔千克(力)/米〕; $0.0008\text{kg/m}\cdot\text{s}$, 0.000807 〔千克(力) $\cdot$ 秒²/米〕; $0.0587\text{kmol/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$; 10.2kgf/cm^2 , 9.87atm , 7502.7mmHg , $102.04\text{mH}_2\text{O}$ 柱。)

第一篇 流体力学和流体力学 为基础的单元操作

气体和液体都具有流动性，总称为流体。化工生产过程中所处理加工的物料，绝大多数是流体。为了使这些物料参与生产过程的物理变化（如加热、冷却、蒸发、干燥、蒸馏、吸收、萃取等）和化学反应（如催化、裂化、发酵等）。必须将流体从一个地方送到另一个地方，从一个设备流到另一个设备，并使流体在单元操作设备中保持最适宜的流动条件，以便发挥设备的最大效益。提高产品质量，增加产量，降低成本。因此，流体动力学理论和以它为基础的单元操作，是研究化工原理的重要基础。

第一章 流 体 力 学

通过对流体静力学（即流体在静止时的平衡规律），流体动力学（即流体流动时的基本规律），流体流动阻力的理论和计算，来研究流体流动的规律性及其内部结构的特性。并以此为指导，来解决化工生产过程中流体流量的测定、压强的测定、流体流动过程中物料衡算、能量衡算、流体流动阻力与管路的计算等。

第一节 流体静力学

流体静力学是研究流体在静止时的平衡规律，即研究静止流体内部压力变化的规律。流体的静止是流体在重力与压力作用下达到平衡，所呈现的一种暂时的平衡状态。若平衡被破坏，便产生流动，所以说流体的静止是流体运动的一种特殊形式。研究流体问题，一般是先从静止流体这种特殊事物的研究开始。

§ 1—1 流体的主要物理量

一、密度、比容、比重、重度。

1. 密度：单位体积流体的质量，称为流体的密度。如以 m 表示流体的总质量， V 表示流体的总体积， ρ 表示流体的密度，则

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

密度的SI单位是 kg/m^3 。

液体的密度。液体是不可压缩的流体，所以其密度基本上不随压力而变化（极高压力除外）。但随温度稍有改变。从资料中查得的数据，要特别注意温度。

气体的密度。气体具有可压缩性及热膨胀性，其密度随温度和压力的变化较大。在一般温度和压力下，气体的密度可近似的用理想气体状态方程式计算。

由理想气体状态方程式

$$pV = nRT = (m/M)RT$$

得
$$p = \frac{m}{V} \cdot \frac{RT}{M} = \rho \cdot \frac{RT}{M}$$

于是密度
$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-2)$$

式中 p —气体的压力, KN/m^2 ;

T —气体的温度, K ;

V —气体的体积, m^3 。在标准状态下 (1atm , 0°C) 每 kmol 理想气体的体积为 22.4m^3 。

M —气体的分子量, kg/kmol ;

R —通用气体常数, $8.314\text{KJ/kmol}\cdot\text{K}$ 。

在化工生产过程中, 经常遇到气体或液体的混合物, 它们的密度如何计算呢?

气体混合物的密度。其计算公式如下:

$$\rho = (\overline{PM})/RT \quad (1-3)$$

$$\overline{M} = M_1X_{v1} + M_2X_{v2} + M_3X_{v3} + \dots + M_nX_{vn}$$

式中: $M_1, M_2, \dots, M_n$ ——气体混合物中各组分的分子量, kg/kmol ;

$X_{v1}, X_{v2}, \dots, X_{vn}$ ——气体混合物中各组分的体积分数。

液体混合物的密度。由下式求得:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{Xw_1}{\rho_1} + \frac{Xw_2}{\rho_2} + \frac{Xw_3}{\rho_3} + \dots + \frac{Xw_n}{\rho_n} \quad (1-4)$$

式中: ρ —液体混合物的密度;

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——混合液中各组分单独存在时的密度;

$Xw_1, Xw_2, \dots, Xw_n$ ——混合液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。则

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-5)$$

比容与密度互为倒数。

3. 比重: 流体密度与 277K 时水的密度之比, 称为比重, 又称相对密度。即

$$d_{277}^T = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-6)$$

式中 ρ —液体在 $T\text{K}$ 时的密度;

$\rho_{\text{水}}$ —水在 277K 时的密度。

用比重计测出的密度是相对密度 d_{277}^T , 可由 (1-6) 求得液体的密度 $\rho = \rho_{\text{水}} d_{277}^T$,

因为水在 277K 时的密度为 1000kg/m^3 , 所以 $\rho = 1000 d_{277}^T$, 即将测得的相对密度乘以 1000 即得液体的密度 ρ , kg/m^3 。

4. 重度: 单位体积流体的重量, 称为流体的重度。公式如下: