

HUAXUE GONGCHENG JICHU

QUANCHENG DAOXUE YU

XITI XIANGJIE

高等学校教学用书

化学工程基础

全程导学与习题详解

李德华 编



化学工业出版社

TQ02
I.142

高等学校教学用书

化学工程基础全程导学 与习题详解

李德华 编



化学工业出版社

· 北京 ·

TQ02
I.142

本书是与李德华编著的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《化学工程基础》(第二版)配套的学习指导用书。为读者更好地把握《化学工程基础》一书的脉络,准确地掌握书中涉及的重要概念及计算提供有益的帮助。内容编排依据《化学工程基础》(第二版)教材,且章节、公式、符号亦与教材一致。各章编写基本顺序为:学习指导(包括学习目的、学习要点、重点提示)、例题及解题分析、习题详解等。

本书可作为高等院校教师讲授化工原理课程或化学工程基础课程的参考书,也可作为化学、应用化学、材料、环境工程、生物工程等相关专业的本专科学生自习、复习、练习的指南,有助于学生理清各章学习的知识要点,并配合练习加深对知识点的理解与应用。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程基础全程导学与习题详解/李德华编.

北京:化学工业出版社,2010.5

高等学校教学用书

ISBN 978-7-122-07875-9

I. 化… II. 李… III. 化学工程-高等学校-
教学参考资料 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第034755号

责任编辑:刘俊之

文字编辑:丁建华

责任校对:王素芹

装帧设计:杨 北

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11 字数277千字 2010年5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:22.00元

版权所有 违者必究

前 言

本书是与李德华编著的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《化学工程基础》(第二版)配套的学习指导用书。为能更好地体现教学目标,突出重点,分清主次,本书在内容的编排上,均按《化学工程基础》(第二版)教材的章节顺序编写,且公式、符号与教材一致。目的是帮助读者更好地把握《化学工程基础》一书的脉络,按照正确的思维方法,准确地掌握书中所涉及的重要概念和计算方法,以提高读者的知识水平和应试能力。

《化学工程基础全程导学与习题详解》各章编写基本顺序为:学习指导(包括学习目的、学习要点、重点提示)、例题及解题分析、习题详解等。在内容叙述、例题选编和习题详解方面,有以下特点。

1. 注重基础 《化学工程基础全程导学与习题详解》强调《化学工程基础》(第二版)所涉及的化学工程学中的基本概念和基本原理。本书中的例题与习题解答是专门针对与化学工程学有关概念的练习,在强调对相关概念理解的同时,还特别注重其应用环境。对基本概念和基本原理的强调,有助于迅速把握课程的精髓。

2. 突出重点 《化学工程基础全程导学与习题详解》紧扣《化学工程基础》(第二版)的内容要点。其中,“学习要点”简明扼要地叙述、归纳和总结各章的内容,列出学习该章之后读者应能够回答的问题。“重点提示”详细列出了每章内容的知识要点、复习要点和概念。各章均提纲挈领地列出了教材中的重要内容,便于读者迅速掌握《化学工程基础》(第二版)的知识架构和重要知识点。

3. 应用面广 《化学工程基础全程导学与习题详解》适合于化学工程、环境工程、生物工程等相关专业的师生在讲授和学习化学工程基础课程或化工原理课程时使用。对于教师而言,本书中的“学习要点”即为教学重点,重点提示则是一份完整的教学提纲,而书中的例题及习题则可为编制试卷提供参考。对于上述相关专业的学生来说,本书为其扎实掌握基础知识提供了复习要点与练习的空间。借助于本书,可以迅速掌握《化学工程基础》(第二版)的框架结构和重要概念,以便复习和更加灵活地应用所学知识。

4. 启发性大 《化学工程基础全程导学与习题详解》并非是对《化学工程基础》(第二版)教材内容的简单重复,而是列出其关键点。有利于读者在遵循一定的逻辑思路的前提下,逐步形成自己对该学科的认识,以达到启发读者思路的效果。基于这样的目的,“习题详解”针对《化学工程基础》(第二版)每章的课后习题,给出了解答。

作者借本书抛砖引玉,望能启发读者的答题思路,得到更加简洁、明晰的解题过程,达到学以致用目的。

本书编写过程中,参考了一些文献资料,在此对相关作者和单位深表感谢。书中错漏与不妥之处,亦望广大读者批评指正。

李德华

2010年2月于武昌桂子山

目 录

第一章 化学工业与化学工程	1	一、学习指导	90
一、学习指导	1	学习目的	90
学习目的	1	学习要点	90
学习要点	1	重点提示	96
重点提示	4	二、例题及解题分析	96
二、例题及解题分析	5	三、习题详解	99
第二章 流体流动过程	7	第七章 萃取	109
一、学习指导	7	一、学习指导	109
学习目的	7	学习目的	109
学习要点	7	学习要点	109
重点提示	20	重点提示	114
二、例题及解题分析	20	二、例题及解题分析	114
三、习题详解	27	三、习题详解	116
第三章 传热	41	第八章 新型分离技术	120
一、学习指导	41	一、学习指导	120
学习目的	41	学习目的	120
学习要点	41	学习要点	120
重点提示	51	重点提示	125
二、例题及解题分析	51	二、思考题	125
三、习题详解	55	第九章 干燥	126
第四章 蒸发	66	一、学习指导	126
一、学习指导	66	学习目的	126
学习目的	66	学习要点	126
学习要点	66	重点提示	132
重点提示	69	二、例题及解题分析	132
二、例题及解题分析	69	三、习题详解	134
三、习题详解	71	第十章 化学反应工程学——反应器基本	
第五章 吸收	74	原理	139
一、学习指导	74	一、学习指导	139
学习目的	74	学习目的	139
学习要点	74	学习要点	139
重点提示	80	重点提示	155
二、例题及解题分析	80	二、例题及解题分析	155
三、习题详解	83	三、习题详解	159
第六章 精馏	90	参考文献	169

第一章

化学工业与化学工程

一、学习指导

★ 学习目的

通过本章的学习,了解化学工业与化学工程基础课程的发展、性质、地位和作用;了解化工生产过程的构成,单元操作的基本内容和特点,更好地理解“三传一反”的有关概念、基本原理及其内在联系;能够以物料衡算、能量衡算、平衡关系、过程速率、经济核算等基本概念为理论依据,掌握化学工程基础的学习方法和分析问题的思路,增强解决工程问题的能力。

★ 学习要点

1. 化学工程基础的研究对象

化学工程是以物理学、化学和数学为基础,并结合工业经济基本法则,研究化学工业中的物理变化和化学变化过程及其有关机理和设备的共性规律,并将之应用于化工装置的开发、设计、操作、控制、管理、强化以及自动化等过程中,在化工工艺与化工设备之间起着承上启下的桥梁和纽带作用的一门工程技术学科。

(1) 化学工业 是以天然物质或其他物质为原材料,利用这些物质的性质或形态变化,或以这些物质组合,加工成对国民生计有价值的化学产品的一种工业。

(2) 化工生产过程 是指将原料进行若干化学和物理加工、处理,生产出预期产品或中间产品,并获得一定附加值的生产过程。其基本构成如图 1-1 所示。



图 1-1 基本化工生产过程



图 1-2 化学反应工程的任务

(3) 单元操作 是使物料在典型设备中,发生除化学反应以外的、具有相同物理变化特点的基本操作过程。亦即,单元操作研究的是化工生产过程中具有一般意义的基本过程和典型设备。

(4) 化学反应工程 是运用化学热力学和化学动力学的知识,结合化学反应器中的流体流动、混合、传热和传质,进行反应过程的解析、反应技术的开发、反应器的分析、设计与选择,研究反应过程的最优化,从而提高化学反应的工程与工艺水平的一门工程技术学科。亦即,化学反应工程学是研究化学反应工程问题的科学。其任务如图 1-2 所示。

2. 基本概念

(1) 物料衡算 物料衡算的依据是质量守恒定律。它反映一个过程中的原料、产物和副产物等之间的关系,即

$$\sum G_1 = \sum G_O + G_A \quad (1-1)$$

式中 $\sum G_1$ ——输入物料量的总和;

ΣG_O ——输出物料量的总和；

G_A ——累积或损失的物料量。

对于连续定态操作的过程，各物理量不随时间改变，则

$$\Sigma G_I = \Sigma G_O \quad (1-2)$$

利用物料衡算关系可由过程的已知量求出未知量。其衡算步骤为：

① 确定衡算系统，可以是一个设备或者其中的一部分，也可以包括几个处理阶段的全流程。然后，画出各物流的流程示意图，其中物料的流向用箭头表示，并标上已知数据与待求量；

② 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，列出衡算式，求解未知量，注意，应保持式中各项单位一致。

(2) 能量衡算 能量衡算的依据是能量守恒定律。能量衡算包括与该过程有关的各种形式的能：热能、机械能、电能、化学能等，机械能衡算将在流体流动与输送中予以说明。而在许多化工生产中所涉及的能量仅为热能，故热量衡算式可写成如下形式：

$$\Sigma Q_I = \Sigma Q_O + Q_L \quad (1-3)$$

式中 ΣQ_I ——进入系统各股物料带入的总热量，kJ 或 kW；

ΣQ_O ——离开系统各股物料带出的总热量，kJ 或 kW；

Q_L ——向系统周围散失的热量，kJ 或 kW。

式(1-3)也可以写成：

$$\Sigma (wH)_I = \Sigma (wH)_O + Q_L \quad (1-4)$$

式中 w ——物料的质量；kg 或 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ；

H ——物料的焓， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3) 平衡关系 任何一个物理或化学变化过程，都会在一一定的条件下沿着一定的方向进行。当过程达到了变化的极限，即达到了平衡状态。平衡的建立和保持是有条件的。当反应在一定条件下处于平衡状态时，尽管反应物和产物的浓度保持恒定，但此时正、逆两个方向的反应仍在不停地进行，反应并没有停止，而是处于一种动态平衡。一旦条件改变，暂时的平衡状态就会破坏。由于平衡的这种相对性和暂时性，人们便可利用这种暂时存在的平衡状态衡量某一物理或化学反应过程在一定条件下所能达到的最大限度，同时，也可以利用某一物理或化学反应过程的特定状态与平衡状态之间的差距来衡量其转化的能力，从而使之朝着有利于提高产品的质量、产量、节能和环保的方向进行。平衡关系可以用各种定律予以说明，如拉乌尔定律、亨利定律等。

(4) 过程速率 过程速率是物理或化学变化过程进行快慢程度的标志，即单位时间过程的变化量。过程速率决定装置和设备的生产能力。其表达式为：

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}} \quad (1-5)$$

从该表达式可知，任何增大推动力或减小阻力的措施都能增大过程速率，但是，对于一个具体的生产过程，其速率的控制应当综合分析技术、经济等方面的因素。

(5) 经济核算 在设计或选用具有一定生产能力的设备时，根据设备的型式和材料的不同，可以有若干不同的设计方案。究竟选择哪一个方案？决策的核心就是通过对不同方案经济效果的衡量和比较，从而确定最优方案。

此外，化工生产需要考虑生产成本的问题。图 1-3 中围绕生产成本的三个圆框代表着成本要素。企业必须对其进行严格的经济核算和控制，方能取得最大的经济效益。

进行经济核算时应当明确以下几点：

① 原料、辅助材料的成本占总成本 70% 以上，在物料管理上需对少量成本较高的关键原材料或辅助材料予以严格控制；

② 设备投资金额在固定资产中的比重高达 80%~90%，尽快收回固定资产投资将成为化工企业成本管理的重点；

③ 动力成本在总成本中也占有较大比重，准确了解各工段或设备的能耗（水、电、汽）等数据，对加强能源管理，节约能源，提高成本核算的准确性，降低产品成本十分重要。

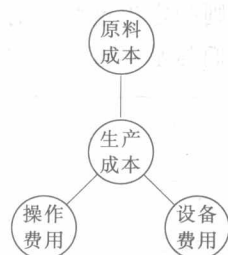


图 1-3 化工生产成本基本构成

3. 量纲、单位与单位制及单位换算

(1) 量纲与量纲一致性

① 量纲 量纲是表征各种物理量性质和类别的标志。它可以定性表示物理量与基本量之间的关系；利用它可以有效地进行单位换算；可以用来检查公式的正确与否；还可以用来推知某些物理规律。量纲也称因次。

量纲可分为基本量纲和导出量纲。基本量纲是互不依赖，互相独立的，不能从其他量纲推导出来的量纲。而导出量纲则是可用基本量纲推导出来的量纲。

根据国家标准 GB 3101—93 有关量、单位和符号的一般原则中规定，任一量 Q 的量纲可以表示为量纲积

$$\dim Q = A^\alpha B^\beta C^\gamma \cdots \quad (1-6)$$

式中， $A, B, C, \cdots$ 表示基本量 $A, B, C, \cdots$ 的量纲；而 $\alpha, \beta, \gamma, \cdots$ 则为量纲指数。

在以 7 个基本量：长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量、发光强度为基础的量制中，其基本量的量纲可分别用 L, M, T, I, Θ, N 和 J 表示，而量 Q 的量纲一般为

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta \quad (1-7)$$

例如

量	量纲	量	量纲
速度	LT^{-1}	能	L^2MT^{-2}
力	LMT^{-2}	熵	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$
压强	$L^{-1}MT^{-2}$		

所有量纲指数都等于零的量称为无量纲量。无量纲量具有数值的特性，它可以通过两个量纲相同的物理量相除得到，也可由几个量纲不同的物理量通过乘除组合得到。

例如，雷诺数 Re 就是无量纲量（量纲一）

$$\dim Re = L^0 M^0 T^0 = 1$$

任何量纲一的量的 SI 单位都是一，符号是 1。在表示量值时它们一般并不明确写出。因其既无量纲又无单位，故其数值大小与所选单位无关，即无论选择什么单位制计算，其结果总是相同的。

② 量纲一致性 在化工计算过程中，计算公式各项的量纲必须相同。量纲一致性是量纲分析的基础。

(2) 单位与单位制

① 单位 单位是量度各种物理量数值大小的标准量。

通常可以任意选取几个独立的物理量（如长度、时间等），称为基本量，并根据使用方

便的原则制定出这些量的单位,称为基本单位。其他各量(如速度、加速度等)的单位便可根据它们与基本量之间的关系来确定,这些物理量称为导出量,其单位称为导出单位。

量	方程式	量纲	导出单位符号
速度	$u=dl/dt$	LT^{-1}	$m \cdot s^{-1}$
力	$F=mdu/dt$	MLT^{-2}	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
动能	$E_k=mu^2/2$	ML^2T^{-2}	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
势能	$E_p=mgh$	ML^2T^{-2}	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
相对密度	$d=\rho/\rho_0$	1	1

② 单位一致性 在化工计算过程中,计算公式各项的单位必须一致。

③ 单位制 基本单位与导出单位的总和称为单位制。

(3) 单位换算 由于历史和地区等原因,各种单位制在自然科学和工程技术领域中同时使用,所以在化学工程中经常会遇到以不同单位制表示的各种数据和关系式。另外,为测量不同数量级的物理量,对同一量纲也往往使用不同单位,如长度的量纲 L,其单位就有 m, cm, mm 等多种,故在一个具体问题计算过程中,应将所有数据换算成 SI 单位。

① 物理量的单位换算 物理量由一种单位换成另一种单位时,量本身并无变化,只是数值要发生改变。换算时要乘以两单位间的换算因数。所谓换算因数,就是彼此相等而各有不同单位的两个物理量之比。如大气压强以标准大气压 atm、工程大气压 at 和用水银计压差示数 mmHg 表示时,则各种单位之间的换算因数如下所示:

单位名称	符号	SI 单位换算因数/Pa	SI 单位换算因数/kPa	SI 单位换算因数/MPa
标准大气压	atm	1.01325×10^5	101.325	0.101325
工程大气压	at	9.80665×10^4	98.0665	0.0980665
水银计压差示数	mmHg	133.322	0.133322	1.33322×10^{-4}

② 使用公式时的单位换算 化工计算中所用到的公式可分两类:一类是根据物理规律建立的理论公式(物理量方程);另一类是单纯根据实验数据整理得来的经验公式。因此,使用物理量单位的方法也就不同。

对于理论公式,开始使用时选定一种单位制,贯穿始终,其结果也当属同一种单位制。

例如:牛顿第二定律

$$F=ma \begin{cases} \text{CGS 制} & \begin{matrix} m & a & F \\ g & \text{cm/s}^2 & g \cdot \text{cm/s}^2 \text{ (即 dyn)} \end{matrix} \\ \text{SI 制} & \begin{matrix} kg & m \cdot s^{-2} & kg \cdot m \cdot s^{-2} \text{ (即 N)} \end{matrix} \end{cases}$$

由此可见,理论公式具有单位一致性的特点,对于其中各个符号的单位不需另加限制,而只需采用同一单位制便可以了。

对于经验公式,其中各符号都要用规定单位的数字代入,不可随意变更。当已知数据的单位与公式所规定的单位不同而该公式又要经常使用时,可以把整个公式加以变换,使其中各符号都采用指定的单位。

★ 重点提示

掌握量纲与量纲的一致性,单位与单位的一致性及单位换算。

二、例题及解题分析

1. 物理量的单位换算

【例 1-1】1 标准大气压 [atm] 等于多少 Pa?

质量、重量(或力)之间的换算是按照牛顿第二运动定律($F=mg$)进行的。质量 $m=1\text{kg}$ 的物体,在 $g=9.81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的重力场中,其重量(或力) F 为 1kgf 。根据 $F=mg$,则

$$1\text{kgf}=1\text{kg}\times 9.81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}=9.81\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}=9.81\text{N}$$

$$\text{解: } 1\text{atm}=1.033\text{kgf}/\text{cm}^2=\frac{1.033\text{kgf}\times\left[\frac{9.81\text{N}}{1\text{kgf}}\right]}{\text{cm}^2\left[\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right]^2}=1.0134\times 10^5\text{N}\cdot\text{m}^{-2}=1.0134\times 10^5\text{Pa}$$

【例 1-2】用直径为 1in 的管子输送 20°C 的 25% 的盐水 ($\text{NaCl-H}_2\text{O}$) 溶液,已知该溶液的密度 ρ 为 $1.180\text{g}/\text{cm}^3$,黏度 μ 为 2.3cP ,流量 q_V 为 $600\text{cm}^3/\text{s}$,试计算数群 $\frac{du\rho}{\mu}$ 的值。

由 d , u , ρ 和 μ 四个物理量组合的数群 $\frac{du\rho}{\mu}$,要求其中物理量具有单位一致性。欲用 SI 单位,则须先将各物理量单位换算成 SI 单位,然后再算出数群的值。

解:管径 $d=1\text{in}=0.0254\text{m}$

$$\text{流速 } u=\frac{q_V}{\frac{\pi}{4}d^2}=\frac{600\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\times\left[\frac{1\text{m}}{100\text{cm}}\right]^3}{0.785\times[0.0254\text{m}]^2}=1.18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\text{密度 } \rho=1.180\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\left[\frac{1\text{kg}}{10^3\text{g}}\right]\left[\frac{1\text{cm}^3}{10^{-6}\text{m}^3}\right]=1180\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\text{黏度 } \mu=2.3\text{cP}=2.3\times 10^{-2}\text{P}=2.3\times 10^{-2}\left[\frac{\text{dyn}\cdot\text{s}}{\text{cm}^2}\right]\left[\frac{1\text{N}}{10^5\text{dyn}}\right]\left[\frac{100\text{cm}}{1\text{m}}\right]^2=2.3\times 10^{-3}\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$$

因 $1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,故

$$2.3\times 10^{-3}\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}=2.3\times 10^{-3}\left[\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}\right]\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}=2.3\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\text{数群 } \frac{du\rho}{\mu}=\frac{0.0254\text{m}\times 1.18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\times 1180\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}}{2.3\times 10^{-3}\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}}=1.54\times 10^4$$

2. 经验公式的单位换算

【例 1-3】在填料塔中用水吸收二氧化硫时,气相总体积吸收系数的经验公式为:

$$\frac{1}{K_Y a}=\frac{0.00114}{u^{0.8}}+0.00875$$

式中 $K_Y a$ ——气相总体积吸收系数, $\text{lb}/(\text{ft}^2\cdot\text{h}\cdot\text{atm})$;

u ——气相空塔气速, ft/s 。

试将该式改用法定单位制,即气相总体积吸收系数和气相空塔气速单位分别用 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kPa}^{-1}$ 和 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 表示的经验公式。

此题是经验公式的单位换算。首先应将所有已知量的单位换算成经验公式中规定的单位,然后,再代入经验公式中,并计算出结果。

解: $1\text{ft}=0.3048\text{m}$; $1\text{lb}=0.4536\text{kg}$; $1\text{atm}=101.325\text{kPa}$,则

$$1\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}) = 1 \left[\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{atm}} \right] \left[\frac{0.4536\text{kg}}{\text{lb}} \right] \left[\frac{\text{ft}}{0.3048\text{m}} \right]^2 \left[\frac{\text{atm}}{101.325\text{kPa}} \right]$$

$$= 0.04819 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$$

$$1\text{ft}/\text{s} = 1 \left[\frac{\text{ft}}{\text{s}} \right] \left[\frac{0.3048\text{m}}{\text{ft}} \right] = 0.3048\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

故气相总体积吸收系数及气相空塔气速换算前后的关系为:

$$K_{Ya} = \frac{(K_{Ya})'}{0.04819} \quad \text{及} \quad u = \frac{u'}{0.3048}$$

将以上关系代入 $\frac{1}{K_{Ya}} = \frac{0.00114}{u^{0.8}} + 0.00875$ 之中, 得

$$\frac{1}{\frac{(K_{Ya})'}{0.04819}} = \frac{0.00114}{\left(\frac{u'}{0.3048} \right)^{0.8}} + 0.00875$$

$$\frac{1}{(K_{Ya})'} = \frac{0.00114 \times 0.3048^{0.8}}{(u')^{0.8} \times 0.04819} + \frac{0.00875}{0.04819}$$

整理得

$$\frac{1}{(K_{Ya})'} = \frac{0.009144}{(u')^{0.8}} + 0.1816$$

通过单位换算, 一种单位制表示的关系式转换为另一种单位制表示的关系式, 其函数形式将不变, 而关系式中的系数和常数将发生变化。

第二章

流体流动过程

一、学习指导

★ 学习目的

通过本章的学习,了解流体静止与流动的宏观规律;理解流体流动的内部结构;掌握流体流动过程中流速、流量及管径的选择与确定,阻力损失计算,流体输送管路的计算;能运用流体流动原理进行压强(压力)、流速(流量)的测量,并能将流体力学原理应用于工程实际,进行离心泵的扬程、功率和效率的计算及其选型。

★ 学习要点

第一节 概 述

可压缩流体 在一定温度下,流体的体积随压力升高而缩小的性质,称为流体的可压缩性。气体的压缩性很大,当温度不变时,气体的体积与压强成反比,压强增加一倍,体积减小为原来的一半;当压强不变时,温度升高 1°C 体积就比 0°C 时的体积膨胀 $1/273$ 。故常把气体看成是可压缩流体。

不可压缩流体 液体的压缩性都很小,随着压强和温度的变化,液体的密度仅有微小的变化,在大多数情况下,可以忽略压缩性的影响,视液体的密度为常数,故一般称液体为不可压缩流体。

第二节 流体静力学基本方程式

一、流体的热力学属性

1. 密度

单位体积内流体所具有的质量,称为流体的密度。以符号 ρ 表示密度, m 表示质量, V 表示体积,则其定义式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

密度的 SI 单位是 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

不同的流体密度是不同的,对一定的流体,密度是压力和温度的函数, $\rho = f(p, T)$ 。

通常,液体的密度随压力变化较小,但温度对其有一定的影响,故引用和计算液体的密度数据时,要注意温度。

对于由若干组分组成的液体混合物,若混合前后体积不变,则可由下式求其平均密度。

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (2-2)$$

$$\text{或} \quad \rho = \frac{M}{5 \sum_i n_i v_i} \quad (2-3)$$

气体的密度随压力和温度的变化较大, 当压力不太高 ($1.0133 \times 10^6 \text{ Pa}$ 以下)、温度不太低时, 气体的密度可近似地按理想气体状态方程式计算, 即

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (2-4a)$$

$$\text{或} \quad \rho = \frac{M}{22.4} \frac{p T_0}{p_0 T} \quad (2-4b)$$

当气体混合物的压力、温度接近理想气体时, 仍可用式(2-4) 计算气体的密度。此时, 式中气体分子的摩尔质量 M 以混合气体的平均摩尔质量代替

$$\bar{M} = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (2-5)$$

一般情况下, 气体混合物的平均密度可按下式进行计算:

$$\bar{\rho} = \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 + \cdots + \rho_n y_n \quad (2-6)$$

2. 比体积

单位质量流体的体积, 称为流体的比体积。用符号 v 表示, SI 单位是 $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 则

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (2-7)$$

3. 压力

单位面积上所受的流体垂直作用力, 称为流体的压强, 工程上常称之为压力。

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2-8)$$

1atm (标准大气压) $= 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$, 相当于 760mmHg 或 10.33mH₂O。

1at (工程大气压) $= 1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$, 相当于 735.6mmHg 或 10mH₂O。

压力值的表达方式可以有不同的计量基准, 如以零压力 (绝对真空) 为基准的绝对压力。还有相对于当地大气压力的相对值。若压力比大气压力高, 则其差称为表压, 可以下式表示

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

若比大气压低, 其差值则称为真空度, 即

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

$$\text{真空度} = -\text{表压}$$

注意, 此时绝对压力是指在负压操作情况下设备内剩余的绝对压力, 亦称余压。

二、流体静力学基本方程式

对于密度为 ρ 的静止液体, 其内部两截面之间的关系为

$$\rho g z_1 + p_1 = \rho g z_2 + p_2 \quad (2-9)$$

$$\text{或} \quad \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = z_1 - z_2 = h \quad (2-9a)$$

此式表明, 压力的大小可用密度为 ρ 的液柱的高度来表示。则静止液体内部某截面与液柱表面上的压力 p_0 之间的关系为

$$p_2 = p_0 + \rho g h \quad (2-9b)$$

$$\frac{p_2 - p_0}{\rho g} = h \quad (2-9c)$$

三、流体静力学基本方程的讨论

(1) 当容器液面上方的压力 p_0 一定时, 静止流体内任一点压力的大小, 与液体本身的密度 ρ 和该点距液面的深度 h 有关。因此, 在静止的、连通的同一种液体中, 处于同一水平面上的各点的压力都相等。此压力相等的水平面, 称为等压面。

(2) 当 p_0 改变时, 液体内部各点的压力也将发生同样大小的改变。

(3) 由式(2-9c)可知, 压力或压力差的大小可用液柱高度来表示。由此引申出压力的大小也可以用一定高度的液柱来表示, 这就是压力可以用 mmHg、mH₂O 等单位计量的依据。

(4) 为说明静力学基本方程式中各项意义, 将式(2-9)两边同除以 ρg 。并加以整理可得

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} = \text{常数} \quad (2-9d)$$

式(2-9d)说明, 在静止连通的同一种流体中, 单位质量流体的位能与静压能之和等于常数。

对于密度变化不大的气体(变化率小于20%), 其密度采用 $\bar{\rho}$ 表示时, 亦可用上式近似计算。

四、流体静力学基本方程的应用

化工生产中, 许多场合都可以应用到流体静力学基本方程, 诸如: 压力的测量, 可利用 U 形管压差计, 将其两端分别连接在两个测压点上, 以测定两点之间的压差; 将 U 形管压差计一端连接在测压点上, 另一端通大气, 以测定该点的压力(表压或真空度)。此外, 还可以进行液位的测量和确定液封高度等。

应用流体静力学基本方程式时应当注意:

(1) 正确选择等压面。关键是要选择静止、连通的、同一种流体的同一水平面。

(2) 计算时, 特别是要注意不同压力表示方法之间的相互转换, 以保证方程式各项物理量的单位一致。

第三节 流体流动的基本方程式

一、流体的流动属性

1. 流量

(1) 单位时间内流经某一截面的流体体积, 称为体积流量。以 q_V 表示, 其单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 单位时间内流经某一截面的流体质量, 称为质量流量。以 q_m 表示, 其单位为 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

体积流量和质量流量之间的关系为

$$q_m = \rho q_V \quad (2-10)$$

2. 流速

(1) 平均流速 单位时间内流体在流动方向上所流经的距离称为流速, 以 u 表示, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$u = \frac{q_V}{A} \quad (2-11)$$

(2) 质量流速 单位时间内流经通道截面积的流体质量称为质量流速, 以 W 表示, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。它与流速的关系表示如下:

$$W = \frac{q_m}{A} = \frac{\rho A u}{A} = \rho u \quad (2-12)$$

(3) 管径的估算 输送流体管道的直径是根据流量和流速计算的, 管道截面为圆形, 故可以根据式(2-11) 求取管径 d 。

$$u = \frac{q_V}{A} = \frac{q_V}{\frac{\pi}{4} d^2}$$

则

$$d = \sqrt{\frac{q_V}{0.785u}} \quad (2-13)$$

化工生产中使用的管子都有一定规格, 故根据选择的适宜流速, 按式(2-13) 算出管径后, 还需要查阅管子的规格, 以定出确切的管径。

二、流体的运动状态

1. 定态流动

流体在管道中流动时, 各截面上的流速、压力等有关物理参量仅随位置变化, 而不随时间改变的流动称为定态流动。

2. 非定态流动

若流体流动时, 其在管道内部各截面上的有关物理参量既随位置变化, 又随时间而变化流动称为非定态流动。

化工生产过程中, 除了开车、停车阶段之外, 流体的流动情况多为定态流动。

三、连续性方程式

作定态流动系统中, 任意两截面间 $W_1 = W_2$, 故

$$\rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 \quad (2-14)$$

当不可压缩的流体在圆管中作定态流动时, 则有

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (2-15)$$

式(2-15) 表明, 流速与管道截面积成反比, 与管径的平方成反比。

四、伯努利方程式

1. 流体流动过程的能量衡算

伯努利方程的实质是能量守恒定律在流体力学上的一种表达形式, 是对流体在流动时输入物料带入的能量和输出物料带出的能量进行清理衡算的结果。其能量衡算只是机械能的衡算。

流体在定态流动情况下, 若不考虑其他方面的影响, 无摩擦、不可压缩、无其他损失, 故称为理想流体的伯努利方程式。

$$mgz_1 + \frac{mp_1}{\rho} + \frac{mu_1^2}{2} = mgz_2 + \frac{mp_2}{\rho} + \frac{mu_2^2}{2} \quad (2-16)$$

(1) 以单位质量 ($m=1\text{kg}$) 流体为基准

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (2-17)$$

(2) 以 1N 流体为基准

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (2-18)$$

由于外界能量的加入和流体输送过程中能量消耗,结合式(2-16),实际流体通过的总能量衡算式为:

$$mgz_1 + \frac{mp_1}{\rho} + \frac{mu_1^2}{2} + mW_e = mgz_2 + \frac{mp_2}{\rho} + \frac{mu_2^2}{2} + mW_f \quad (2-19)$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H_e = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum h_f \quad (2-20)$$

式(2-20)具有长度量纲,说明伯努利方程式中各项能量均可用流体柱的高度来表示。此时,常将 z 称为位压头; $\frac{p}{\rho g}$ 为静压头; $\frac{u^2}{2g}$ 为动压头(或速度头); H_e 称为外加压头(即扬程); $\sum h_f$ 称为压头损失。

2. 伯努利方程式的应用

应用伯努利方程时,需要注意如下事项。

(1) 绘图 为使计算过程清晰且有助于解题,通常在计算之前根据题意画出示意图,并标出流动方向和主要数据。

(2) 选取截面 应当注意流体输送系统是在连续、定态流动范围内,截面应与流动方向垂直,且拥有已知条件最多,并将待求未知参量包含在所选截面构成的流动系统中。

(3) 确定基准面 基准面是用以衡量位能大小的基准。通常取所选定的截面之中较低的一个水平面为基准面,这样有一个 z 值便为零。若所选截面与基准水平面不平行,则 z 值可取该截面中心点到基准水平面的垂直距离。

(4) 注意采用一致的单位 计算时,方程式中的各项单位必须一致,并均以SI单位表示。两截面上的压力只能同时使用表压或者绝对压力,不能混用。

第四节 管内流体流动现象

一、牛顿黏性定律与流体的黏度

流体在流动时呈现出内摩擦力的特性,称为流体的黏性。

流体流动时,需克服内摩擦力做功,消耗的机械能转化为热能在流动过程中散失。这种散失的热能,不能用来做其他功,称为压头损失,故黏性是流体流动时产生压头损失的根源。

1. 牛顿黏性定律

流体内摩擦力 F' 的大小与流体的性质有关,且与两流体层间的速度差 du 及两层之间的接触面积 A' 成正比,与两层之间的垂直距离 dy 成反比,即

$$F' = \mu A' \frac{du}{dy} \quad (2-21)$$

若定义单位面积 A' 上的内摩擦力 F' 为剪应力 τ ,即 $\tau = \frac{F'}{A'}$,故

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-22)$$

式(2-22)称为牛顿黏性定律。所有气体和大部分液体在运动时均服从此定律,故称为牛顿型流体。稠厚液体和悬浮液在运动过程中与该定律不符,则称其为非牛顿型流体。

2. 流体的黏度

黏度是用以衡量流体黏性大小的物理量。由式(2-22),得

$$\mu = \tau / \frac{du}{dy} \quad (2-23)$$

二、流体流动的内部结构

1. 流动的类型

有两种流动型态：层流（又称滞流）和湍流（又称紊流）。

(1) 流体质点均沿轴向运动，没有其他方向的互相碰撞和混合，这种流型称为层流。

(2) 流体质点不仅沿轴向运动，同时还有其他各个方向的随机脉动，可引起质点间互相碰撞、混合，这种流型称为湍流。

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (2-24)$$

实验证明：当 $Re < 2000$ 时，流体流动类型属层流；当 $Re > 4000$ 时，流体流动类型属湍流；当 $2000 < Re < 4000$ 时，流体流型可能是层流，也可能是湍流，故称为过渡流。过渡流不是一种流型，而表示一种状态，是一个不稳定区域。

2. 管内层流与湍流的比较（见表 2-1）

表 2-1 两种流型的比较

项 目	层 流	湍 流
质点运动方式	沿轴向作有规则的平行运动	除轴向运动外，产生径向位移，质点碰撞
雷诺数	$Re < 2000$	$Re > 4000$
速度分布	管内分布呈抛物线状	抛物线顶部变得平坦
平均速度	$u = 0.5u_{\max}$	$u = 0.8u_{\max}$
流动阻力	黏性摩擦力为主，符合牛顿黏性定律	因漩涡、质点碰撞产生的阻力为主
边界层	层流层厚度等于管道半径	层流底层-缓冲层-湍流层

第五节 管内流体流动的阻力

化工管路中流体流动阻力为直管阻力和局部阻力之和，即

$$\sum h_f = h_f + h_l \quad (2-25)$$

一、流体在直管中的流动阻力

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (2-26)$$

式(2-26)中的 λ 称为摩擦系数。它与 Re 及管壁粗糙度（绝对粗糙度 ϵ ；相对粗糙度 ϵ/d ）有关，其数值由实验测定。

1. 层流时的摩擦系数

$Re < 2000$ 时，流体质点运动非常平稳，层流边界层很厚，粗糙的管壁浸没在边界层中，因而使得摩擦系数 λ 与管壁粗糙度无关，仅为 Re 的函数，即 $\lambda = f(Re)$ ，则

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2-27)$$

2. 湍流时的摩擦系数

$Re > 4000$ 时，一方面流体质点间的相互碰撞，另一方面，湍动引起的层流底层减薄，使得粗糙管壁的凸出部分暴露于湍流主体中，使流体质点受阻而损失能量。故摩擦系数 λ 既