

化工原理

上册

成都科技大学化工原理教研室编著

张洪沅 审定

成都科技大学出版社

内 容 提 要

本书系根据成都科技大学化工原理教研室多年的教学实践,参考国内外有关教材及专著,并参照化学工业部教育司拟定的“化工原理”指导性教学大纲编著的。以化学工程中单元操作原理、典型化工设备结构及工艺设计计算为基本内容,并注意理论与实践结合,培养解决化学工程实际问题的能力。“化工原理”上册内容包括绪论、流体流动、流体输送设备、流体通过颗粒层的流动、气体非均相混合物分离、流态化、液体搅拌、传热及蒸发等八章。可供有关高等院校化工及同类专业选作教材及教学参考书,亦可供化工、石油、轻工、食品等部门从事科学研究、设计及生产科技人员参考。

本书由王能勤、马克承主编,张洪沅教授审定。参加执笔的人员还有:余华瑞、黄荣积、陈文靖、张俊华、刘慕尧、张桂昭。

化 工 原 理

上册

成都科技大学化工原理教研室编

责任编辑: 李晓琴

成都科技大学出版社出版、发行

成都科技大学出版社印刷厂印刷

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 24.375

1986年9月第1版 1986年9月第1次印刷

字数 590,000

印数 1—6,000

书号: 15475·14

定价: 4.50元

绪 论

自本世纪初以来,由于化学工业产品种类和生产规模的迅速发展,人们越来越重视对化工生产过程中共性基本规律的研究。提出了化工单元操作的概念,将各种不同的化工生产过程看成是由为数不多的基本的化工单元操作(如蒸馏、蒸发、过滤、吸收、干燥等)组合而成。二十年代初高等学校化工系开设了以单元操作为内容的“化工原理”课程,并随着化学工业的发展,学科领域逐步发展形成了具有几个重要分支学科的化学工程学。

我国于二十年代末期开设了“化工原理”课程,1936年出版了由中文写成的“化学工程机械”。新中国成立后,1954年出版了第一本我国自编的“化工原理”讲义。此后,又相继出版了“化学工业过程及设备”、“化工过程及设备”、“化学工程”等教材,这些教材皆以化工单元操作为其内容。我国老一辈化工学者张洪沅、丁绪淮、顾毓珍、张克忠、杜长明等,对化工单元操作的研究和我国化工教育事业的发展上都作出了有价值的贡献。

在化学工程领域,除化工单元操作外,我国对化学工程学的其它分支:化学反应工程学、化工热力学及化工系统工程学,都开展了不少工作,在学校中并开设了相应的课程。

一、本课程的性质、内容与任务

本课程是将物理、化学、数学等学科的一些基本原理(如质量守恒、能量守恒、平衡关系等)用来研究化工生产中内在的共同规律的学科,讨论化学工业生产过程中共有的基本过程的基本原理、设备及其计算方法,其内容包括:

1. 流体流动过程,包括遵循流体力学规律的单元操作,如流体流动、流体输送、流体通过颗粒层的流动、气体非均相混合物的分离、流态化、液体搅拌等。
2. 传热过程,包括遵循传热规律的单元操作,如传热、蒸发等。
3. 传质过程,包括遵循传质规律的单元操作,如吸收、蒸馏、气液传质设备、萃取、干燥、吸附、结晶、膜分离等。

本课程是一门基础技术课,其基本任务是:

- (1) 掌握化工过程的基本原理,典型设备的构造、性能及操作原理;
- (2) 掌握这些过程的基本计算方法和设备的设计;
- (3) 寻求适宜的操作条件,探索强化过程的方向及改进设备的途径。

二、单位换算

本课程的计量单位采用国际单位制(SI制),即以长度单位m(米),时间单位S(秒)、质量单位kg(千克)、热力学温度单位K(开尔文)、物质的量的单位mol(摩尔)、电流单位A(安培)和光强度单位cd(坎德拉)为基本单位,其它单位都由这七个基本单位导出。由于历史原因,工程界过去曾经采用了英制或工程单位制,若干实验数据长期采用CGS制(厘米、克、秒制);因此现在我们在化学工程计算之先,不可避免地要遇到需将某物理量由其它单位换算成SI制单位。将物理量的单位从一种制度换算成另一种制度

是很简便的，换算时需乘以两相关物理单位间的换算因数。例如长度为1m和3.2808呎是两个单位不同的相等物理量，即

$$1\text{ m}=3.2808\text{ 呎}$$

$$\frac{1\text{ m}}{3.2808\text{ 呎}}=\frac{1}{3.2808}\text{ m/呎}$$

各单位的换算因数参见本书附录。兹将单位的换算举例如下。

例1 已知50%硫酸在18℃时的表面张力 σ 为77.3达因/厘米，试计算此硫酸在SI制中 σ 为多少N/m?

解：查本书附录单位换算表知：

$$1\text{ 达因}=10^{-5}\text{ N}$$

$$1\text{ 厘米}=10^{-2}\text{ m}$$

$$\text{则 } \sigma=77.3\text{ 达因/厘米}=\frac{77.3\times 10^{-5}\text{ N}}{10^{-2}\text{ m}}=7.73\times 10^{-2}\text{ N/m}$$

例2 30℃时丙酮的导热系数 λ 为0.146千卡/小时·米·℃，试求在SI制中此丙酮的导热系数 λ 为多少W/m·K?

解：查本书附录单位换算表知：

$$1\text{ 千卡/米}\cdot\text{时}\cdot\text{℃}=1.163\text{ W/m}\cdot\text{K}$$

则30℃时丙酮的导热系数为：

$$\lambda=0.146\text{ 千卡/小时}\cdot\text{米}\cdot\text{℃}=0.146\times 1.163\text{ W/m}\cdot\text{K}=0.17\text{ W/m}\cdot\text{K}$$

例3 用工程单位制表示的某溶液的重度 γ 为950kgf/m³，求此溶液在SI制中的密度 ρ 为多少kg/m³?

解：查本书附录单位换算表知：

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

溶液重度为：

$$\gamma=950\text{ kgf/m}^3=950\times 9.81\text{ N/m}^3$$

$$\text{而 } \gamma=\frac{G}{V}$$

由牛顿第二定律知 $G=mg$

$$\text{则 } \frac{G}{V}=\frac{m}{V}g \quad \gamma=\rho g$$

$$\rho=\frac{\gamma}{g}=\frac{950\times 9.81\text{ N/m}^3}{9.81\text{ m/s}^2}=950\frac{\text{N}\cdot\text{S}^2}{\text{m}^4}$$

$$=950\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}\cdot\frac{\text{s}^2}{\text{m}^4}=950\text{ kg/m}^3$$

此例说明物质在工程单位制中的重度与SI制中的密制在数值上是相等的，但需指出，其物理意义是不同的。

例4 用水吸收 SO_2 ，在特定实验条件下，其体积传质系数可按式计算：

$$K_{ca} = 0.044 G_L^{0.82} \quad \text{磅分子/呎}^3 \cdot \text{小时} \quad (\text{磅分子/呎}^3)$$

式中 G_L ——液体质量速率，磅/呎²·小时。

试将上式换成以SI制的单位表示的计算式，即式中 K_{ca} 的单位为 $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ (kmol/m^3)， G_L 的单位为 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

解：查本书附录单位换算表知：

$$1 \text{ 磅} = 0.4536 \text{ kg}; \quad 1 \text{ 呎} = 0.3048 \text{ m};$$

$$1 \text{ 小时} = 3600 \text{ s}.$$

根据 $K_{ca} = 0.044 G_L^{0.82} \text{ 磅分子/呎}^3 \cdot \text{小时} \quad (\text{磅分子/呎}^3)$

$$\text{则} \quad \frac{K_{ca}}{G_L^{0.82}} = 0.044$$

要把方程式左边的单位换为SI制，其右边必须乘上一相应的系数C，现将方程式左边引入各换算因数进行单位变换：

$$\begin{aligned} \frac{(\text{磅分子/呎}^3 \cdot \text{小时} \quad (\text{磅分子/呎}^3))}{(\text{磅/呎}^2 \cdot \text{小时})^{0.82}} &= \frac{(\text{呎})^{2.46}}{(\text{磅})^{0.82} \cdot (\text{小时})^{0.18}} \\ &= \frac{(0.3048 \text{ m})^{2.46}}{(0.4536 \text{ kg})^{0.82} \cdot (3600 \text{ s})^{0.18}} \end{aligned}$$

因而系数C为：

$$C = \frac{0.3048^{2.46}}{0.4536^{0.82} \times 3600^{0.18}} = 0.02355$$

则

$$\begin{aligned} K_{ca} &= 0.044 C G_L^{0.82} = 0.044 \times 0.02355 G_L^{0.82} \\ &= 1.036 \times 10^{-3} G_L^{0.82} \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s} \quad (\text{kmol/s}) \end{aligned}$$

目 录

绪论	(1)
第一章 流体流动	(1)
1—1 概述	(1)
第一节 流体的基本性质	(1)
1—2 密度	(1)
1—3 流体的压力	(2)
1—4 粘度	(3)
第二节 流体静力学基本方程式及其应用	(6)
1—5 流体静力学基本方程式	(6)
1—6 液柱压力计	(7)
第三节 在管道内的流体流动	(9)
1—7 流体的流量和流速	(9)
1—8 流体的稳定和不稳定流动	(11)
1—9 流体流动的总物料衡算	(12)
1—10 流体流动的能量衡算	(14)
第四节 管道内流体流动的阻力	(24)
1—11 流体流动的类型	(24)
1—12 边界层概念	(28)
1—13 流体流动阻力	(29)
1—14 直管阻力	(30)
1—15 局部阻力	(39)
1—16 可压缩流体流动时的阻力	(43)
1—17 管内流体流动的流速分布	(47)
第五节 管路计算	(49)
1—18 管路计算	(49)
第六节 流量测量	(57)
1—19 流量测量	(57)
习题	(63)
本章符号说明	(69)
第二章 流体输送设备	(71)
2—1 概述	(71)
第一节 液体输送设备	(71)
2—2 离心泵	(72)

2—3 其它类型泵	(94)
第二节 气体压缩与输送设备	(100)
2—4 离心式通风机、鼓风机及压缩机	(100)
2—5 旋转式鼓风机及压缩机	(105)
2—6 往复式压缩机	(106)
2—7 真空泵	(112)
习题	(114)
本章符号说明	(116)
第三章 流体通过颗粒层的流动	(117)
3—1 概述	(117)
第一节 通过固定床的流体流动	(117)
3—2 颗粒床层的特性	(117)
3—3 通过固定床层的流动	(121)
第二节 过滤	(126)
3—4 过滤操作的基本概念	(126)
3—5 过滤设备	(127)
3—6 过滤基本方程式	(131)
3—7 恒压过滤	(134)
3—8 恒速过滤与先升压后恒压过滤	(140)
3—9 过滤常数的测定	(141)
第三节 离心分离	(146)
3—10 离心分离的基本概念	(146)
3—11 影响离心分离的主要因素	(147)
3—12 固体物料自液体中的分离	(148)
3—13 两种不互溶液体的分离	(148)
3—14 离心机的类型	(149)
习题	(152)
本章符号说明	(153)
第四章 气体非均相混合物的分离	(155)
4—1 概述	(155)
第一节 重力沉降	(155)
4—2 自由沉降	(155)
4—3 干扰沉降	(163)
4—4 降尘室	(166)
第二节 离心沉降	(168)
4—5 离心沉降速度	(169)
4—6 旋风分离器	(171)
4—7 影响旋风分离器的性能和阻力的因素	(177)

4—8 旋风分离器的结构型式和选用	(179)
第三节 过滤除尘	(184)
4—9 袋滤器	(184)
第四节 静电除尘	(185)
4—10 静电除尘的原理	(185)
4—11 管式电除尘器的构造	(186)
第五节 湿法除尘	(187)
4—12 泡沫除尘器	(188)
4—13 文丘里除尘器	(188)
习题	(189)
本章符号说明	(190)
第五章 固体流态化	(192)
第一节 基本概念	(192)
5—1 流体通过固体颗粒床层的情况	(192)
5—2 散式流态化与聚式流态化	(193)
第二节 流化床的主要特性	(194)
5—3 流化床的主要特性	(194)
5—4 流化床的不正常现象	(195)
5—5 固体颗粒粒度对流化质量的影响	(196)
5—6 流化床的优缺点	(196)
第三节 流化床的操作范围	(197)
5—7 临界流化速度 u_{mf}	(197)
5—8 带出速度 u_t	(199)
5—9 流化床的操作范围	(200)
第四节 流化床的浓相区高度与分离高度	(200)
5—10 浓相区的高度	(200)
5—11 分离高度 (TDH)	(201)
第五节 流化床的结构	(202)
5—12 流化床的类型	(202)
5—13 流化床的结构及计算	(203)
第六节 气力输送	(211)
5—14 概述	(211)
5—15 稀相输送	(212)
5—16 密相输送	(212)
5—17 稀相输送的流动特性	(213)
习题	(216)
本章符号说明	(217)
第六章 液体搅拌	(218)

6—1 概述	(218)
第一节 机械搅拌装置及槽内流动特性	(218)
6—2 机械搅拌装置	(218)
6—3 搅拌器的类型	(219)
6—4 混合机理	(219)
6—5 搅拌效果	(222)
6—6 搅拌槽的附件	(223)
6—7 搅拌装置的几何特性	(225)
6—8 搅拌槽内液体的流量和压头	(225)
第二节 搅拌功率	(227)
6—9 功率关联式	(227)
6—10 功率曲线	(228)
第三节 搅拌器的放大	(232)
6—11 搅拌器的选型	(232)
6—12 放大原理	(232)
6—13 功率的放大	(233)
6—14 搅拌结果的放大	(234)
习题	(236)
本章符号说明	(236)
第七章 传热	(237)
第一节 概述	(237)
7—1 传热的三种基本方式	(237)
7—2 工业换热方式和典型传热设备	(238)
7—3 稳定传热与不稳定传热	(238)
第二节 热传导	(239)
7—4 基本概念和傅立叶定律	(239)
7—5 导热系数	(240)
7—6 圆筒壁和平壁的稳定热传导	(243)
第三节 传热的基本方程	(249)
7—7 对流传热的基本概念	(249)
7—8 传热基本方程	(250)
7—9 传热量的计算	(251)
7—10 传热温度差及平均温度差的计算	(252)
7—11 流体流动方向的选择	(257)
7—12 传热系数	(259)
第四节 对流传热	(264)
7—13 对流给热过程分析	(264)
7—14 对流给热的准数关系式	(265)

7—15	流体无相变时的对流给热系数	(267)
7—16	自然对流的给热系数	(273)
7—17	蒸汽冷凝时的给热系数	(275)
7—18	液体沸腾时的给热系数	(280)
7—19	壁温计算	(284)
7—20	传热边界层	(285)
第五节	热辐射与热损失	(286)
7—21	热辐射的基本概念	(286)
7—22	斯蒂芬——波尔茨曼定律	(286)
7—23	克希霍夫定律	(288)
7—24	两物体间的辐射传热	(289)
7—25	热损失	(292)
第六节	换热器	(293)
7—26	列管式换热器	(293)
7—27	夹套式换热器及其他管式换热器	(296)
7—28	板式换热器	(298)
7—29	热管	(300)
第七节	列管换热器的工艺计算	(301)
7—30	列管换热器的工艺设计	(301)
7—31	传热效率与传热单元数	(314)
习题		(318)
本章符号说明		(322)
第八章	蒸发	(324)
8—1	概述	(324)
第一节	蒸发器的类型	(325)
8—2	自然循环蒸发器	(325)
8—3	强制循环蒸发器	(327)
8—4	液膜蒸发器	(327)
第二节	蒸发器的选用与设计原则	(329)
8—5	选用与设计原则	(329)
第三节	蒸发过程计算基础	(330)
8—6	蒸发过程中的温度差损失	(330)
8—7	蒸发器的传热系数	(333)
8—8	溶液的稀释热和热含量浓度图	(335)
第四节	单效蒸发计算	(336)
8—9	单效蒸发物料衡算	(336)
8—10	单效蒸发热量衡算	(336)
第五节	多效蒸发	(338)

8—11 多效蒸发流程.....	(338)
8—12 多效蒸发的最佳效数.....	(340)
8—13 多效蒸发计算.....	(340)
第六节 蒸发设备的附属装置.....	(349)
8—14 除沫装置.....	(349)
8—15 冷凝器和真空装置.....	(349)
习题.....	(350)
本章符号说明.....	(350)
主要参考文献	(352)
附录	(353)

第一章 流体流动

1-1 概 述

在化学工业生产中，流体的流动是经常遇到的，因为化工生产所用的原料或加工后所得的半成品，多为液体和气体。常需将这些流体按照工艺流程的要求，依次输送到如换热设备、塔设备或反应器等设备中，以制得产品。在一般情况下，要把流体从一个设备送到另一个设备，或从一地输送到另一地，需借助于管道和输送设备（如泵和风机等）才能完成。

在化工厂中，流体输送管道纵横密布，到处可见，据有的化工厂统计，除仪表不计外，流体流动所用的设备的台数占所用各种类型设备总台数的一半以上。因此流体流动在化工生产中起着重要的作用。

此外，化工生产中的各个单元操作（如传热、传质、多相混合物的分离等），大多是在流体流动的情况下进行的。流体流动的状态，直接影响着这些过程。因此，流体流动是化工生产中的一个基本过程。

学习本章的基本要求是：

1. 了解流体流动在化工生产中的重要作用。
2. 掌握流体静力学的基本方程及其应用。
3. 了解流体流动中的连续性、稳定性和流动类型，熟练掌握柏努利方程式及其应用。
4. 了解因次分析的基本方法及其在化工中的应用。
5. 掌握流体在管路中流动时的阻力损失的计算，熟悉各类简单管路和复杂管路的计算。
6. 掌握管路中流速和流量的测定，以及所使用的仪表的原理。

第一节 流体的基本性质

1-2 密 度

流体单位体积所具有的质量称密度，以符号 ρ 表示。如果 m 表示流体的质量， V 表示流体的体积，则

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

ρ 的单位为 kg/m^3 。

密度的单位和数值，在不同的单位制中是不同的。常用的流体的密度，可由有关书

刊或手册中查得。本书附录中选载有部分流体密度，可供参考。有时查得的密度 ρ ，单位以（克/厘米³）表示，由于 1（克/厘米³）相当于 1000 kg/m³，因此，查得的 ρ （克/厘米³），只须将其数值乘以 1000 就可求得用 SI 单位表示的密度 ρ kg/m³。

对于任何一种流体，其密度是压力和温度的函数

即：
$$\rho = f(p, T) \quad (1-2)$$

压力对液体的密度影响很小，可忽略不计，故称液体为不可压缩流体。温度对液体的密度则有一定的影响，通常在介绍液体密度时，应标明对应的温度条件。

气体具有可压缩性及膨胀性，其密度随压力和温度的不同差别很大。当得不到气体的密度数据时，在气体的温度不太低、压力不太高的情况，气体的密度可近似地按理想气体状态方程式计算。

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

式中 P —气体的压力，kN/m²； M —气体的分子量，kg/kmol；

T —气体的绝对温度，K； R —气体常数，8.314 kJ/kmol·K。

如果气体应按照真实气体处理时，则应用上式计算时须进行校正。

对于含有几个组分的液体混合物，其平均密度 ρ_m 可近似地按下式计算：

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{X_{WA}}{\rho_A} + \frac{X_{WB}}{\rho_B} + \dots + \frac{X_{Wn}}{\rho_n} \quad (1-4)$$

式中 $\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ —液体混合物中各组分的密度，kg/m³；

$X_{WA}, X_{WB}, \dots, X_{Wn}$ —液体混合物中各组分的质量分率。

通常，对于气体混合物的平均密度，一般可由下式计算：

$$\rho_m = \rho_A X_{VA} + \rho_B X_{VB} + \dots + \rho_n X_{Vn} \quad (1-5)$$

式中 $\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ —在气体混合物的压力下，各组分的密度，kg/m³；

$X_{VA}, X_{VB}, \dots, X_{Vn}$ —在气体混合物中各组分的体积分率。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可按式 1-3 计算。此时应以气体混合物的平均分子量 M_m 代替式中的气体分子量 M ，气体混合物的平均分子量 M_m 可按下式求得：

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \dots + M_n y_n \quad (1-6)$$

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

y_A, y_B, y_n —气体混合物中各组分的摩尔分率。

1-3 流体的压力

垂直作用于流体单位面积上的力，称为流体的静压力，或称为压力，以符号 P 表示。若以 P 为垂直作用于流体单位面积 A 上的力，则压力 P 为：

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-7)$$

在 SI 单位制中，压力 p 的单位为 N/m²，称为帕斯卡（Pa），其 10⁵ 倍称为巴（bar）。此外，还常用大气压（atm）或流体柱高表示。它们之间的数量关系为：

1atm (标准大气压) = 1.013bar = 101325N/m² = 760(毫米汞柱) = 10.33米水柱 = 1.033(公斤/厘米²) 在工程上为计算方便, 常取 1(公斤/厘米²) 称为 1(工程大气压) 或 1at, 于是:

1at(工程大气压) = 0.9807bar = 9.807 × 10⁴N/m² = 735.6(毫米汞柱) = 10(米水柱) = 1(公斤/厘米²)

在工业上压力是用压力计来测定的。在压力计上通常读出的数值, 只是被测定的真实压力 (称绝对压力) 与当时当地的外界大气压力的差值, 故还需通过计算才能得到绝对压力。

当被测流体的真实压力大于外界大气压力时, 压力计所测得的压力值称为表压, 此时

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

当被测流体的真实压力小于外界大气压力时, 压力计所测得的压力值称为真空度, 此时

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

1-4 粘 度

流体流动时产生内摩擦力的这种特性, 称为粘性。粘性是流动性的反面。流体的粘性越大, 其流动性就越小。例如, 从桶底把一桶油放完比把一桶水放完要慢得多, 其原因就是油的粘性比水大, 流动时内摩擦大, 因而流体阻力也大, 故流动慢。

衡量流体粘度大小的物理量称为粘度, 以符号 μ 表示。为了明确粘度的物理意义, 可以从下述的设想加以说明。

设有上下两块平行放置而相距很近的平板, 其间充满了静止的液体, 如图1-1所示。如将下板固定, 对上板施加一恒定的外力 F , 使上板作平行于下板的等速直线运动, 则板间的液体也随之移动。紧靠着上层平板的液体, 因附着在板面上, 具有与平板相同的速度; 而紧靠着下层板面的液体, 却因附着于板面而静止不动。但在两层平板之间液体的流速分布, 则是从上到下, 速度逐渐变小。此两平板间的液体可看成为许多平行于平板的流体层, 而层与层之间存在着速度差, 即各液层之间存在着相对运动。运动较快的液层对与之相邻的运动较慢的液层, 有着拖动其向运动方向前进的力, 而同时运动较慢的液层, 对紧邻的上层运动较快的液层也作用着一个大小相等、方向相反的力, 从而阻碍运动较快的液层的运动。这种运动着的流体内部相邻两流体层间的相互作用力, 称为流体的内摩擦力或粘滞力。流体运动时内摩擦力的大小, 体现了流体粘性的大小。

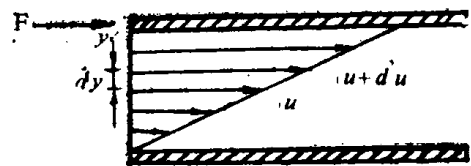


图1-1 平板间流体速度变化图

参阅图1-1若某层流体的速度为 u , 在其垂直距离为 dy 处的邻近流体层的速度为 $u + du$, 则 $\frac{du}{dy}$ 表示速度沿法线方向上的变化率, 称为速度梯度。实验证明, 两流体层

间的接触面积A越大，速度梯度越大，则内摩擦力F也越大，于是有：

$$F \propto A \frac{du}{dy}$$

即

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

这种内摩擦力，通常以每单位面积上的力来计算，即力学中所谓的剪应力，于是剪应力 τ 由上式可写成：

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式中 μ 为比例系数，称为粘性系数，或称为动力粘度，简称粘度。

式1-9所显示的关系，称为牛顿粘性定律。服从此定律的流体，称为牛顿型流体。

从式1-9可以看出，若取 $A=1\text{m}^2$, $\frac{du}{dy}=1\text{S}^{-1}$ ，则在数值上 $\mu=F$ 。由此可表明粘度的物理意义为：速度梯度为1时，在单位接触面积上，由流体的粘性所引起的内摩擦力的大小。显然，若流动条件相同，粘度越大的流体，所产生的粘性力也越大，即流体流动时阻力越大。

粘度的单位，从式1-9得：

$$\mu = \left(\frac{F}{A \frac{du}{dy}} \right) = \frac{\text{N}}{\text{m}^2 \times \frac{\text{m/S}}{\text{m}}} = \frac{\text{N} \cdot \text{S}}{\text{m}^2}$$

通常从手册中查得的粘度数据，很多都用物理单位表示。

在物理单位制中，粘度的单位为：

$$\mu = \left(\frac{F}{A \frac{du}{dy}} \right) = \frac{\text{达因}}{\text{厘米}^2 \cdot \frac{\text{厘米/秒}}{\text{厘米}}} = \frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2} = \text{泊(P)}$$

$$1 \text{ 泊} = 100 \text{ 厘泊 (CP)}$$

流体的粘度均由实验测定。一般流体粘度的实测数据可由有关资料中查得。当缺乏实验数据时，也可选用经验公式计算粘度的近似值。通常资料中所列的粘度数据，单位多以厘泊或泊表示，若须换算成SI单位，即将粘度的厘泊数值除以1000，其换算关系如下：

$$1 \text{ 厘泊} = \frac{1}{100} \frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2} = \frac{1}{100} \times \frac{100000 \text{ N} \cdot \text{S}}{\left(\frac{1}{100}\right)^2 \text{ m}^2} = \frac{1}{1000} \frac{\text{NS}}{\text{m}^2}$$

例如，从资料中查得20℃时，硝基苯的粘度是2.0厘泊，换算成SI单位则为

$$\mu_{20^{\circ}\text{C}} = 2.0 \times 10^{-3} \text{ NS/m}^2$$

流体粘性的大小, 还可用运动粘度 ν 表示, 即:

$$\nu = \frac{\text{粘度}}{\text{密度}} = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

运动粘度 ν 的单位为 m^2/S , 其物理单位为 $\text{厘米}^2/\text{秒}$, 简称, $1\text{st} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{S}$

某些气体和液体的粘度与温度的关系, 分别绘于图1-2, 1-3中。由图中可见, 气体的粘度随温度的升高而增大, 液体的粘度则随温度的增高而降低。

压力对于液体粘度的影响可忽略不计, 对气体粘度的影响一般也可忽略不计, 只有在极高或极低的压力下才需考虑压力的影响。

气体或液体混合物的粘度, 如缺乏实验数据时, 可参阅有关资料, 选用适当的经验公式进行估算, 如对不缔合混合液体的粘度可由下式计算:

$$\log \mu_m = \sum x_i \log \mu_i \quad (1-11)$$

式中 μ_m —混合液体的粘度;

X_i —混合液体中某一组分的摩尔分率;

μ_i —混合液体中某一组分的粘度。

对于低压下混合气体的粘度, 则可采用下式计算:

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{\frac{1}{2}}}{\sum y_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-12)$$

式中 μ_m —混合气体的粘度;

y_i —混合气体中某一组分的摩尔分率;

μ_i —混合气体中某一组分的粘度;

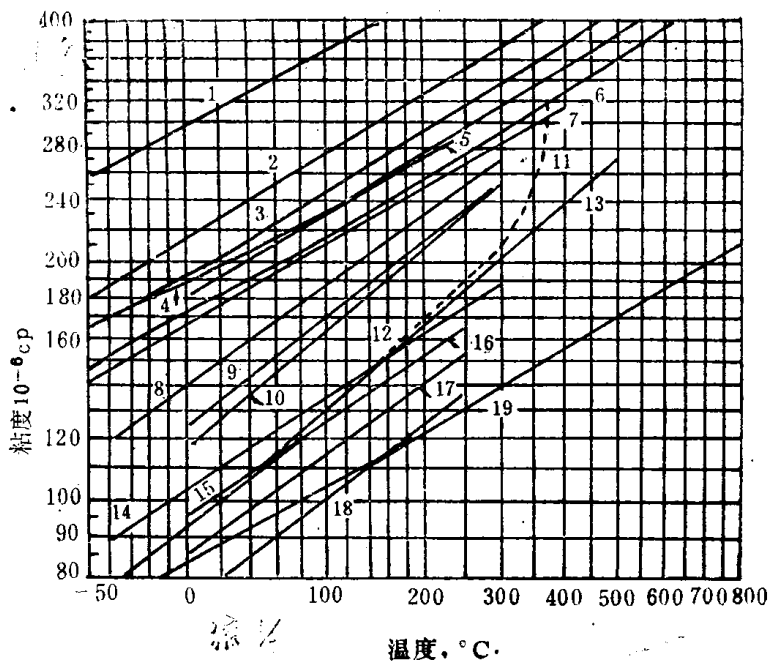


图1-2 气体的粘度(1atm)

1. Ne; 2. Ar; 3. O₂; 4. He; 5. No; 6. 空气; 7. CO, N₂; 8. CO₂, N₂O; 9. Cl₂; 10. SO₂; 11. 饱和水蒸汽; 12. NH₃; 13. 过热水蒸汽 (atm); 14. CH₄; 15. C₂H₂; 16. C₂H₄; 17. C₂H₆; 18. C₃H₈; 19. H₂

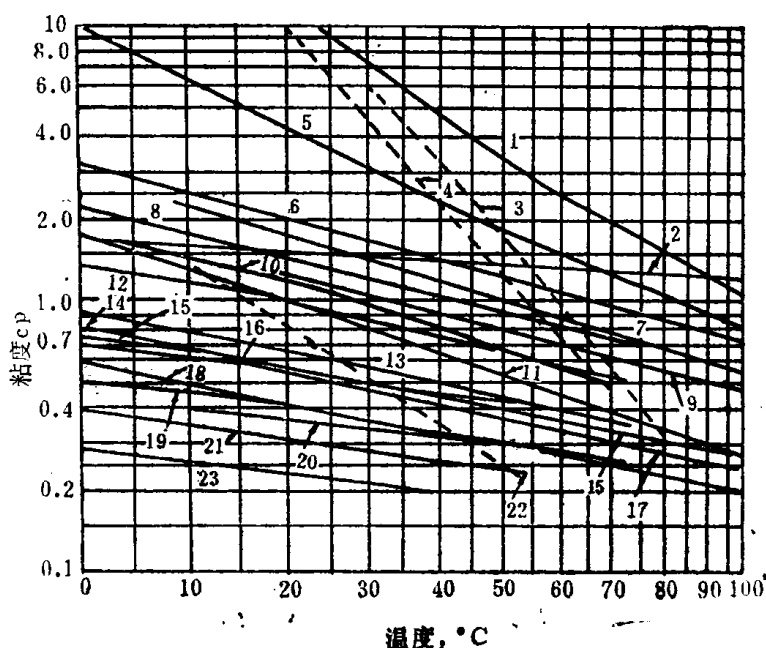


图1-3 液体的粘度

1. 石炭酸; 2. 汞; 3. 甘油; 4. 蓖麻油; 5. 苯胺; 6. 硝基苯; 7. 甲酸; 8. 松节油; 9. 醋酸; 10. 乙醇; 11. 水; 12. CCl₄; 13. 苯; 14. 甲苯; 15. 甲苯; 16. CHCl₃; 17. C₆H₁₈; 18. 醋酸乙酯; 19. C₇H₁₆; 20. CS₂; 21. C₆H₁₄; 22. 橄榄油; 23. 乙醚。

M_i —混合气体中某一组分的分子量。

例1-1 液体混合物的组成(以摩尔分率计)为乙烷40%和丙烯60%, 计算在 -100°C 时此液体混合物的粘度。

解: 查得在 -100°C 时

乙烷的粘度 $\mu_A=0.19\text{cp}$ 丙烯的粘度 $\mu_B=0.26\text{cp}$

将已知各值代入式1-11中计算混合液的粘度

$$\begin{aligned}\log \mu_m &= \sum X_i \log \mu_i = 0.40 \log 0.19 + 0.60 \log 0.26 \\ &= 0.40(-0.722) + 0.60(-0.585) = -0.289 - 0.351 = -0.64\end{aligned}$$

$$\mu_m = 0.229\text{cp} = 2.29 \times 10^{-4} \text{NS/m}^2$$

例1-2 混合气体的组成(按体积%计)为: CO_2 17%, O_2 4%及 N_2 79%, 计算此气体混合物在压力为1at(绝压), 温度为 400°C 时的粘度。

解: 查出在常压及 400°C 时各组分的粘度:

CO_2 $\mu_A=0.0303\text{cp}$ O_2 $\mu_B=0.0382\text{cp}$ N_2 $\mu_C=0.0322\text{cp}$

CO_2 、 O_2 及 N_2 的分子量分别为 $M_A=44$, $M_B=32$ 及 $M_C=28$, 将已知各值代入式1-11计算混合气体的粘度。

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{\frac{1}{2}}}{\sum y_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad y_A M_A^{\frac{1}{2}} = 0.17 \sqrt{44} = 1.13$$

$$y_B M_B^{\frac{1}{2}} = 0.04 \sqrt{32} = 0.226 \quad y_C M_C^{\frac{1}{2}} = 0.79 \sqrt{28} = 4.18$$

$$\mu_m = \frac{0.0303 \times 1.13 + 0.0382 \times 0.226 + 0.0322 \times 4.18}{1.13 + 0.226 + 4.18}$$

$$= 0.0321\text{cp} = 3.21 \times 10^{-5} \text{NS/m}^2$$

第二节 流体静力学基本方程式及其应用

1-5 流体静力学基本方程式

由于流体本身的重力及外加压力的存在, 在静止流体内部各点都受着这些力的作用。流体静力学即是研究流体在这些力的作用达到平衡或静止时的规律。

在如图1-4所示的容器中盛有静止的液体, 设从中任意取一段垂直液柱, 此液柱的底面积为 $A(\text{m}^2)$ 。液体的密度为 $\rho(\text{kg/m}^3)$, 任意选定一水平基准面, 此处以器底为基准面。液柱的上、下两面与基准面的垂直距离分别为 Z_1 与 $Z_2(\text{m})$ 。现分析液柱受力的情况:

作用于液柱上面的压力 $= p_1 A$;

液柱自身的重力 $= \rho g A (Z_1 - Z_2)$

作用于液柱下底面的压力 $= p_2 A$

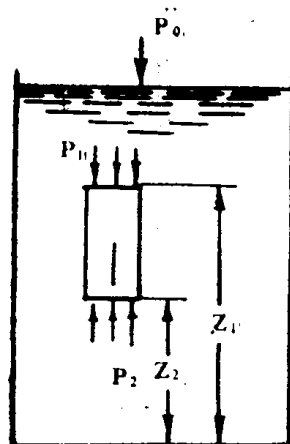


图1-4 流体静力学基本方程式的推导