

◆ 高等学校教学用书

●● 修订版

化工原理 上册

HUAGONG

○ 天津大学化工原理教研室

姚玉英 黄凤廉 陈常贵 柴诚敬 编

姚玉英 主编

(2)

天津科学技术出版社

化 工 原 理

上 册 （修订版）

天津大学化工原理教研室

姚玉英 黄凤廉 陈常贵 柴诚敬 编

姚玉英 主编



天津科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工原理.上册/姚玉英主编. - 修订版. - 天津:天津科学技术出版社,2004
ISBN 7-5308-3647-1

I.化…… II.姚… III.化工原理 IV.TQ022

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 010514 号

责任编辑:丁文红

版式设计:雒桂芬

责任印制:张军利

天津科学技术出版社出版、发行

出版人:胡振泰

天津市西康路 35 号 邮编 300051 电话(022)23332393

网址:www.tjkjcs.com.cn

天津市蓟县宏图印务有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 24.5 字数 593 000

2004 年 7 月第 2 版第 20 次印刷

定价:24.00 元

内 容 提 要

本书重点介绍化工单元操作的基本原理、典型设备及其计算。本书对基本概念的阐述力求严谨,注意理论联系实际,并突出工程观点。全书分上下两册。上册包括绪论、流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离和固体流态化、传热、蒸发及附录。下册包括蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、萃取、干燥。每章均编入较多的例题,章末有习题,并附有参考答案。

本书可作为高等院校化工系及有关专业的教材,也可供有关部门从事科研、设计及生产的技术人员参考。

本书由姚玉英任主编,陈常贵任副主编。参加上册编写工作的有姚玉英(绪论、蒸发及附录)、黄凤廉(流体流动)、陈常贵(流体输送机械及传热)、柴诚敬(非均相物系的分离和固体流态化)。参加下册编写工作的有陈常贵(蒸馏)、刘邦学(吸收)、刘国维(蒸馏和吸收塔设备)、柴诚敬(萃取)及姚玉英(干燥)。

目 录

绪 论	(1)
第一章 流体流动	(7)
本章符号说明	(7)
第一节 流体静力学基本方程式	(8)
1-1-1 流体的密度	(8)
1-1-2 流体的静压强	(10)
1-1-3 流体静力学基本方程式	(11)
1-1-4 流体静力学基本方程式的应用	(13)
第二节 流体在管内的流动	(17)
1-2-1 流量与流速	(17)
1-2-2 定态流动与非定态流动	(19)
1-2-3 连续性方程式	(20)
1-2-4 能量衡算方程式	(21)
1-2-5 柏努利方程式的应用	(25)
第三节 流体的流动现象	(31)
1-3-1 牛顿黏性定律与流体的黏度	(31)
1-3-2 非牛顿型流体	(34)
1-3-3 流动类型与雷诺数	(35)
1-3-4 滞流与湍流	(37)
1-3-5 边界层的概念	(40)
第四节 流体在管内的流动阻力	(44)
1-4-1 流体在直管中的流动阻力	(45)
1-4-2 管路上的局部阻力	(55)
1-4-3 管路系统中的总能量损失	(56)
第五节 管路计算	(59)
第六节 流量测量	(66)
习题	(74)
思考题	(79)
第二章 流体输送机械	(81)
本章符号说明	(81)
第一节 液体输送机械	(82)
2-1-1 离心泵	(82)
2-1-2 其他类型泵	(111)

第二节 气体输送和压缩机械.....	(116)
2-2-1 离心通风机、鼓风机与压缩机.....	(117)
2-2-2 旋转鼓风机、压缩机与真空泵.....	(120)
2-2-3 往复压缩机	(122)
习题.....	(129)
思考题.....	(130)
第三章 非均相物系的分离和固体流态化	(132)
本章符号说明.....	(132)
第一节 颗粒和颗粒群的特性.....	(134)
第二节 重力沉降.....	(136)
3-2-1 沉降速度	(137)
3-2-2 重力沉降设备	(142)
第三节 离心沉降.....	(147)
3-3-1 惯性离心力作用下的沉降速度	(147)
3-3-2 旋风分离器的操作原理	(148)
3-3-3 旋风分离器的性能	(149)
3-3-4 旋风分离器的结构形式与选用	(154)
3-3-5 旋液分离器	(157)
第四节 过滤.....	(158)
3-4-1 颗粒床层的特性	(158)
3-4-2 过滤操作原理	(159)
3-4-3 过滤基本方程式	(161)
3-4-4 恒压过滤	(165)
3-4-5 恒速过滤与先恒速后恒压的过滤	(167)
3-4-6 过滤常数的测定	(169)
3-4-7 过滤设备	(172)
3-4-8 滤饼的洗涤	(175)
3-4-9 过滤机的生产能力	(176)
第五节 离心机.....	(179)
3-5-1 一般概念	(179)
3-5-2 离心机的结构与操作	(180)
第六节 固体流态化技术.....	(182)
3-6-1 固体流态化的基本概念	(183)
3-6-2 流化床的总高度	(190)
3-6-3 提高流化质量的措施	(191)
3-6-4 气力输送	(194)
习题.....	(196)
思考题.....	(198)
第四章 传热.....	(199)
本章符号说明.....	(199)

第一节 概述.....	(200)
4-1-1 传热的基本方式	(200)
4-1-2 典型的传热设备	(201)
4-1-3 载热体及其选择	(203)
第二节 热传导.....	(204)
4-2-1 基本概念和傅里叶定律	(204)
4-2-2 导热系数	(205)
4-2-3 平壁的热传导	(206)
4-2-4 圆筒壁的热传导	(210)
第三节 对流传热概述.....	(213)
4-3-1 对流传热速率方程	(213)
4-3-2 对流传热机理	(215)
4-3-3 保温层的临界直径	(216)
第四节 传热计算.....	(217)
4-4-1 能量衡算	(218)
4-4-2 总传热速率微分方程和总传热系数	(218)
4-4-3 平均温度差法	(222)
4-4-4 传热单元数法	(230)
第五节 对流传热系数关联式.....	(236)
4-5-1 影响对流传热系数的因素	(236)
4-5-2 对流传热过程的量纲分析	(238)
4-5-3 流体无相变时的对流传热系数	(240)
4-5-4 流体有相变时的对流传热系数	(249)
4-5-5 壁温的估算	(256)
第六节 辐射传热.....	(257)
4-6-1 基本概念和定律	(257)
4-6-2 两固体间的辐射传热	(261)
4-6-3 对流和辐射的联合传热	(264)
第七节 换热器.....	(265)
4-7-1 换热器的分类	(265)
4-7-2 间壁式换热器的结构形式	(267)
4-7-3 管壳式换热器的设计和选型	(275)
4-7-4 各种间壁式换热器的比较和传热的强化途径	(284)
习题.....	(286)
思考题.....	(288)
第五章 蒸发.....	(290)
本章符号说明.....	(290)
第一节 蒸发设备.....	(292)
5-1-1 蒸发器的结构	(292)
5-1-2 蒸发系统的辅助装置	(297)

5-1-3 蒸发器的选型	(298)
第二节 单效蒸发	(299)
5-2-1 溶液的温度差损失	(299)
5-2-2 溶液的总温度差损失及有效温度差	(302)
5-2-3 单效蒸发计算	(303)
5-2-4 减小蒸发器传热面积的探讨	(308)
第三节 多效蒸发	(309)
5-3-1 多效蒸发的操作流程	(310)
5-3-2 多效蒸发的计算	(311)
5-3-3 多效蒸发和单效蒸发的比较	(321)
5-3-4 蒸发操作的节能	(322)
第四节 蒸发器的工艺设计	(323)
习题	(326)

附录	(328)
----------	-------

一、化工中常用的法定计量单位	(328)
二、常用单位的换算	(329)
三、某些气体的重要物理性质	(332)
四、某些液体的重要物理性质	(333)
五、干空气的物理性质(101.33 kPa)	(335)
六、水的物理性质	(336)
七、水在不同温度下的黏度	(337)
八、水的饱和蒸汽压(-20℃~100℃)	(338)
九、饱和水蒸气压(按温度顺序排列)	(339)
十、饱和水蒸气压(按 kPa 顺序排列)	(340)
十一、某些液体的导热系数	(342)
十二、某些气体和蒸气的导热系数	(343)
十三、某些固体材料的导热系数	(344)
十四、常用固体材料的密度和比热容	(346)
十五、液体的黏度和密度	(347)
十六、101.33 kPa 压强下气体的黏度	(351)
十七、液体的比热容	(353)
十八、101.33 kPa 压强下气体的比热容	(356)
十九、汽化热(蒸发潜热)	(358)
二十、某些有机液体的相对密度(液体密度与 4℃ 水的密度之比)	(360)
二十一、液体的表面张力	(362)
二十二、壁面污垢热阻(污垢系数)/m ² ·K/W	(365)
二十三、101.33 kPa 压强下溶液的沸点升高与浓度的关系	(366)
二十四、管壳式换热器总传热系数 K 的推荐值	(367)
二十五、管子规格	(369)

二十六、离心泵规格(摘录)	(373)
二十七、4-72-11 型离心通风机规格(摘录)	(377)
二十八、管壳式换热器系列标准(摘自 JB/ T4714,JB/ T4715-92).....	(378)

绪 论

用化工手段将原料加工成产品的生产过程统称为化工生产过程,如高压聚乙烯生产过程的主要步骤如图 0-1 所示。

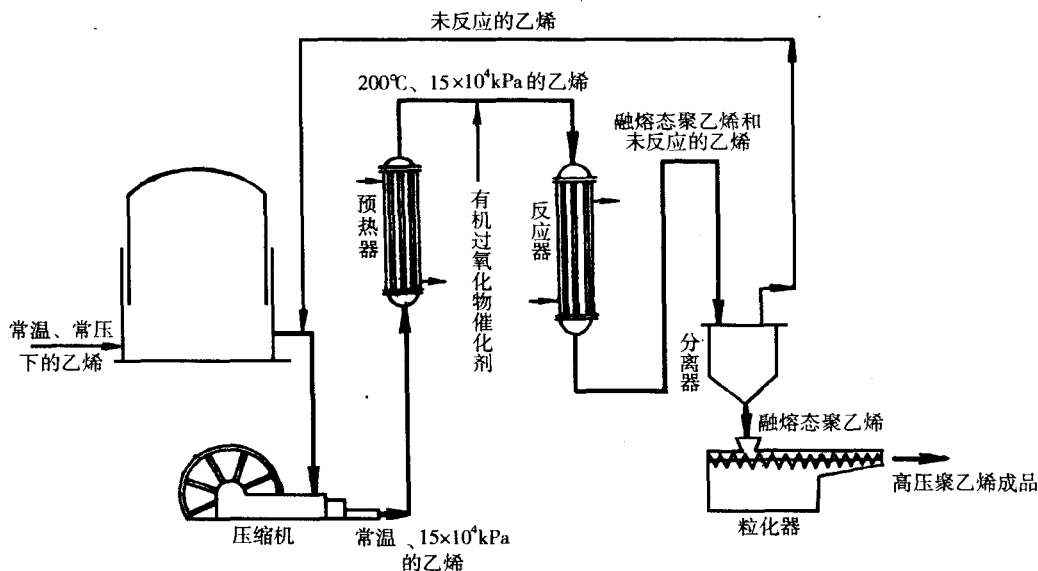


图 0-1 高压聚乙烯的生产流程示意图

图 0-1 的操作中除反应器内有化学反应外,其余步骤均属物理操作,实际上该生产过程是以化学反应为核心,而物理步骤只起到为化学反应准备必要的反应条件以及进一步将粗产品提纯的作用。

虽然有千千万万个不同的化工生产过程,但归纳起来,各种生产过程都是由类似上述的化学反应和若干个物理操作串联而成,所以不必将每一个化工生产过程都当作一种特殊的或独有的知识去研究,只研究组成生产过程的每一个单独操作即可。诸物理操作统称为化工单元操作,简称单元操作。化工原理课程就是研究这些物理操作的,至于化学反应则不属于本课程范畴。单元操作不仅在化工生产中占有重要地位,也广泛应用于石油化工、冶金、食品、制药及原子能等工业中。

根据单元操作所遵循的基本规律,可将单元操作分为以下几类。

- (1) 遵循流体动力基本规律的单元操作,包括流体输送、沉降、过滤、固体流态化等。
- (2) 遵循传热基本规律的单元操作,包括加热、冷却、冷凝、蒸发等。
- (3) 遵循传质基本规律的单元操作,包括蒸馏、吸收、萃取、膜分离等。因这些操作的最终目的是将混合物分离,故又称之为分离操作。
- (4) 同时遵循传热、传质规律的单元操作,包括空气的增湿与减湿、干燥、结晶等。

此外,还有其他单元操作,但超过本教材范畴。随着工业生产的日新月异,定会开发出新的单元操作以适应某些新生产的特殊要求。

随着对单元操作不断地深入研究,人们认识到流体流动是一种动量传递现象,所以凡是遵循流体流动基本规律的诸单元操作,都可以用动量传递理论去研究,其余的单元操作则可分别用热量传递理论和质量传递理论进行研究。三种传递现象中存在类似的规律和内在的联系,且可用数学公式表达,逐渐形成了“三传理论”或“传递理论”,它是化工单元操作在理论上的进一步发展与深化。这部分内容已成为化工系的独立课程。目前已有个别教材以动量、热量、质量三种传递理论为主线来介绍各种单元操作。

同一单元操作在不同的化工生产中有共性也有各自的特性。例如制碱和制糖生产中都有蒸发这个单元操作,它们共同遵循传热基本规律,都采用蒸发器,这就是蒸发操作在两种不同工业生产中的共性。但制碱工业的蒸发条件有别于制糖的,且两者所选的蒸发器类型也各异,这就是特殊性。化工原理主要是研究诸单元操作共性的课程。但不管在哪种生产过程中,单元操作的研究方法是统一的,一般采用数学模型和实验两种方法。数学模型法先对被研究过程建立称为数学模型的数学方程(若被研究过程太复杂可做合理的简化)。若方程可求解称为解析法;若不能求解,则借助实验确定参数间的关系,这种方法称为半经验半理论法。实验法一般以量纲分析或相似理论为指导,依赖实验将影响被研究现象的诸因素组成以无量纲数群(又称准数)间的关系,这种方法可以避免建立数学方程,称为实验法或经验法。

单元操作内容包括“过程”和“设备”两个部分,所以本课程曾被称为“化工过程与设备”。化工原理课程为高等数学、化学、物理、物理化学等课程的后继课程,属于技术基础课,起到为自然学科与应用学科的搭桥作用,是一门实践性很强的课程,主要介绍单元操作的基本原理,所用的典型设备的结构、计算和选用。计算分为设计型计算和操作型计算两大类。设计型计算是指对给定的生产任务设计出所需设备的工艺尺寸;操作型计算是指对已有的设备进行查定计算。

学生学完本课程后应具有以下的能力。

- (1)能理论联系实际用工程和经济观点解决化工单元操作中的各类问题。
- (2)会筛选出合理的单元操作完成给定的生产任务。
- (3)在设备设计工作中会寻求所需的经验数据或公式。
- (4)能管理和调试运转的设备,遇到故障时找出原因并能及时排除。
- (5)具有独立进行科学研究和强化设备的能力。
- (6)初步具有开发新设备和新的单元操作能力。

各单元的操作原理和设备的计算都是以物料衡算、能量衡算、传递速率和平衡关系为依据的。它们都涉及到各种物理量,而物理量的大小要用数字和单位表示,所以在绪论中介绍单位制度和单位换算。

一、单位制度

任何物理量都是用数字和单位联合表达的。一般先选几个独立的物理量,如长度、时间等,并以使用方便为原则规定出它们的单位。这些物理量称为基本量,其单位称为基本单位。其他的物理量,如速度、加速度等的单位则根据其本身的物理意义,由有关基本单位组合构成,这种单位称为导出单位。

目前我国采用法定单位制度。由于历史、地区及不同学科领域的不同要求,对基本量及其单位的选择有所不同,因而产生了不同的单位制度,如绝对单位制度与重力单位制度,每种制度中又有米制与英制之分。绝对单位制度以长度、质量及时间为基本量;重力单位制度以长度、力(或重量)及时间为基本量。两者的主要区别在于绝对单位制度以质量为基本量,其单位

为基本单位,力(或重量)的单位为导出单位;重力单位制以力(或重量)为基本量,其单位为基本单位,质量的单位为导出单位。力和质量之间的关系为

$$F = ma$$

(0-1)

式中 F ——作用于物体上的力;
 m ——物体的质量;
 a ——物体在作用力方向上的加速度。

两种不同单位制度中基本量的米制单位列于表 0-1 中。

长期以来,工程计算中存在多种单位制度并用的局面,而同一物理量在不同单位制度中又具有不同的单位与数值,致使计算与交流极不方便,而且易引起错误。鉴于此,1960 年 10 月第十一届国际计量大会通过了一种优越性较大的新单位制度,称为国际单

位制度,代号为 SI。该单位制度提出后即在国际上得到迅速推广,我国国务院于 1977 年确定逐步采用国际单位制,1984 年又发布命令,确定我国统一实行以国际单位为基础,包括由我国指定的若干非国际单位在内的《中华人民共和国法定计量单位制度》(简称法定单位制),规定从 1991 年起,除个别领域外,不允许再使用非法定单位制。

SI 与法定单位制有高度的统一性,包括了所有领域中的计量单位,从而使科学技术、工业生产、经济贸易甚至日常生活只使用 SI(或法定单位制)一种单位制度。SI(或法定单位制)中任何一个物理量只有一个单位,但重力单位制就有所不同,例如在重力单位制中,热量单位为 kcal(千卡),功的单位为 kgf·m,而热量和功是本质相同的物理量,计算时必须采用“热当量”(即 1 kcal=427 kgf·m)来换算使之统一,但在 SI 中热量与功都采用同一单位,即 J(焦耳)。

本书采用法定单位制,在少数例、习题中有意识地编入一些非法定单位,有助读者练习新旧单位之间的换算。

中华人民共和国法定计量单位内容见附录一。

二、单位换算

目前国际上各科学领域采用的单位制度虽为 SI,但旧文献资料中的数据又是多种单位制度并存,使用时要进行换算,所以读者应掌握物理量在不同单位制中的换算方法。

1. 物理量的单位换算

同一物理量,若单位不同其数值就不同,例如重力加速度在法定单位制中的单位为 m/s^2 ,其值为 9.81;在 cgs 制中的单位为 cm/s^2 ,其值为 981。重力加速度在法定单位制与 cgs 制中的单位换算因子为

$$\frac{9.81\text{ m/s}^2}{981\text{ cm/s}^2} = \frac{1}{100}\text{ m/cm}$$

任何单位换算因子都是两个相等量之比,所以包括单位在内的任何换算因子在本质上都是纯数 1,故任何物理量乘以或除以单位换算因子,都不会改变原量的大小。

常见物理量单位间的换算关系见附录二。

【例 0-1】从已有资料中查出常温下苯的导热系数 λ 为 0.091 9 BTU/(ft·h·°F)(BTU 为英制单位中热量单位的代号),试从基本单位换算开始,将苯的导热系数单位换算为

表 0-1 两种不同单位制度中的米制单位

基本量		长度	时间	质量	力(或重力)
单位制度	绝对单位制度				
	cgs 制 (物理单位制)	cm	s	g	—
	mks 制	m	s	kg	—
	重力单位制 (工程单位制)	m	s	—	kgf

W/(m·℃)。

【解】 单位换算时,一般首先从附录二查出原单位与要换算的新单位之间的关系,其次采用单位间的换算因数与各基本单位相乘或相除的方法,以消去原单位而引入新单位。

新单位 W/(m·℃)也可写为 J/(m·s·℃)。

从附录二查出:

长度 1 m = 3.280 8 ft

热量 1 J = 9.486 × 10⁻⁴ BTU

温度差 1 ℃ = 1.8 °F

时间 1 h = 3 600 s

苯的导热系数为

$$\lambda = 0.0919 \text{ BTU}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$$

$$= \left(\frac{0.0919 \text{ BTU}}{\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) \left(\frac{1 \text{ J}}{9.486 \times 10^{-4} \text{ BTU}} \right) \left(\frac{3.2808 \text{ ft}}{\text{m}} \right) \left(\frac{1.8 ^\circ\text{F}}{1 ^\circ\text{C}} \right)$$

↑	↑	↑	↑	↑
原有的数值	引入 s,	引入 J, 消去 BTU,	引入 m, 消	引入 ℃, 消
与单位	消去 h,	括号内的数值等	去 ft, 括号	去 °F, 括号
	括号内	于 1	内的数值	内的数值
	的数值		等于 1	等于 1
	等于 1			

$$= 0.159 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}) = 0.159 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

为了使读者练习单位换算方法,故本题要求从基本单位开始进行换算。实际上可以从附录二直接查出

$$1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) = 0.578 \text{ BTU}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$$

$$\text{所以 } 0.0919 \text{ BTU}/(\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = \frac{0.0919}{0.578} = 0.159 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

熟练单位换算方法后,不必在式子中间写出单位。

2. 经验公式(或数字公式)的变换

工程中遇到的公式有两大类。一是反映物理量之间关系的物理方程,它是根据物理规律建立起来的,如前述的式 0-1,式中各物理量的单位可以任选一种单位制度的,但同一式中绝不允许同时采用两种单位制度,因此物理方程又称单位一致性或量纲一致性方程。另一类是根据实验数据整理而成的经验公式,式中各符号只代表物理量数字部分,而它们的单位必须采用指定的单位,故经验公式又称数字公式。若已知物理量的单位与公式中规定的不相符,则应先将已知数据换算成经验公式中指定的单位后才能进行运算。若经验公式要经常使用,则应将公式加以变换,使式中各符号都采用计算者所希望的单位,这就是经验公式的变换,变换方法见例 0-2。

【例 0-2】管壁对周围空气的对流传热系数经验公式为

$$\alpha = 0.026 G^{0.6} D^{-0.4}$$

式中 α ——管壁对周围空气的对流传热系数, BTU/(h·ft²·°F);

G ——空气的质量速度, lb/(ft²·h) (1b 为英制中质量单位磅的代号);

D ——管子外径, ft。

试对上式进行换算, 将 α 的单位改为 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 、 G 的单位改为 $kg/(m^2 \cdot s)$ 、 D 的单位改为 m 。

【解】从附录查出:

$$1 \text{ kg} = 2.204 \text{ lb}$$

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

$$1 \text{ BTU} = 1.055 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\text{温度差 } 1^\circ \text{F} = \frac{5}{9}^\circ \text{C}$$

(1) 质量速度 G 的变换

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \times \frac{1 \text{ kg}}{2.204 \text{ lb}} \times \frac{1 \text{ ft}^2}{(0.3048 \text{ m})^2} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0.001356 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

令 G 代表原单位的质量速度, G' 代表新单位的质量速度, G 与 G' 的关系为

$$G = \frac{G'}{0.001356} \quad (1)$$

(2) 外径 D 的变换

令 D 代表原单位的外径, D' 代表新单位的外径, D 与 D' 的关系为

$$D = \frac{D'}{0.3048} \quad (2)$$

(3) 对流传热系数 α 的变换

$$\begin{aligned} 1 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{F}} &= 1 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{F}} \left[\frac{1.055 \times 10^3 \text{ J}}{1 \text{ BTU}} \right] \left[\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right] \left[\frac{1 \text{ ft}}{0.3048 \text{ m}} \right]^2 \left[\frac{1^\circ \text{F}}{\frac{5}{9}^\circ \text{C}} \right] \\ &= 5.678 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ \text{C}} = 5.678 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C}} \end{aligned}$$

令 α 代表原单位的对流传热系数, α' 代表新单位的对流传热系数, α 与 α' 的关系为

$$\alpha = \frac{\alpha'}{5.678} \quad (3)$$

将式(1)、式(2)、式(3)代入原经验公式

$$\frac{\alpha'}{5.678} = 0.026 \left(\frac{G'}{0.001356} \right)^{0.6} \left(\frac{D'}{0.3048} \right)^{-0.4}$$

整理上式并略去符号上标即得到变换后的经验公式

$$\alpha = 4.824 G^{0.6} D^{-0.4}$$

习 题

1. 已知: 1 大气压 = 14.697 lbf/in² (磅(力)/英寸²), 试从基本单位换算开始, 求法定单位制中 1 大气压相

当若干 Pa。算出的结果与从附录单位换算表中查出的数值相比较。 [答:法定单位制中 1 大气压 = 101.33 $\times 10^3$ Pa,从附录中查出的数值与计算结果完全吻合]

2. 在各种单位制中物质的比热容 c_p 的单位分别为

法定单位 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$

米制重力单位 $\text{kcal}/(\text{kgf}\cdot^\circ\text{C})$

英制重力单位 $\text{BTU}/(\text{lb}\cdot^\circ\text{F})$

上式中 $^\circ\text{C}$ 及 $^\circ\text{F}$ 都是指温度差的单位。

4 $^\circ\text{C}$ 时法定单位中水的比热容为 4.186 8 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。试从基本单位换算开始,将 4 $^\circ\text{C}$ 时水的比热容换算成米制及英制的数值。 [答:4 $^\circ\text{C}$ 时米制重力单位水的比热容 $c_p = 1 \text{ kcal}/(\text{kgf}\cdot^\circ\text{C})$,英制重力单位水的比热容 $c_p = 1 \text{ BTU}/(\text{lb}\cdot^\circ\text{F})$]

3. 30 $^\circ\text{C}$ 时二氧化碳水溶液上方气体中二氧化碳的平衡蒸气压可用下式计算

$$p = 575c$$

式中 p ——二氧化碳的平衡蒸气压,mmHg;

c ——二氧化碳在水溶液中的浓度,g/L。

试将上式加以变换,使式中蒸气压单位改为 kPa,溶液浓度单位改为 kmol/m^3 。 [答:用新单位的经验式为 $p = 3\,373\,c$]

第一章 流体流动

本章符号说明

英文字母

a ——加速度, m/s^2 ;
 A ——截面积, m^2 ;
 C ——系数;
 C_o 、 C_v ——流量系数;
 d ——管道直径, m ;
 d_e ——当量直径, m ;
 d_o ——孔径, m ;
 e ——涡流黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;
 E ——1 kg 流体所具有的总机械能, J/kg ;
 Eu ——欧拉数;
 f ——范宁摩擦系数;
 F ——流体的内摩擦力, N ;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 G ——质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;
 h ——高度, m ;
 h_f ——1 kg 流体流动时为克服流动阻力而损失的能量, 简称能量损失, J/kg ;
 h_f' ——局部能量损失, J/kg ;
 H_e ——输送设备对流体所提供的有效压头, m ;
 H_f ——压头损失, m ;
 K ——系数;
 l ——长度, m ;
 l_e ——当量长度, m ;
 m ——质量, kg ;
 M_r ——相对分子质量;
 N ——输送设备的轴功率, kW ;
 N_e ——输送设备的有效功率, kW ;
 p ——压强, Pa ;
 Δp_f ——1 m^3 流体流动时所损失的机械能, 或因克服流动阻力而引起的压强降, Pa ;

P ——压力, N ;
 r ——半径, m ;
 $\dot{r}$ ——剪切速率, s^{-1} ;
 r_H ——水力半径, m ;
 R ——液柱压差计读数, 或管道半径, m ;
 Re ——雷诺数;
 S ——两流体层间的接触面积, m^2 ;
 T ——热力学温度, K ;
 u ——流速, m/s ;
 u' ——脉动速度, m/s ;
 $\bar{u}$ ——时均速度, m/s ;
 $u_{\max}$ ——流动截面上的最大速度, m/s ;
 u_r ——流动截面上某点的局部速度, m/s ;
 U ——1 kg 流体的内能, J/kg ;
 v ——比容, m^3/kg ;
 V ——体积, m^3 ;
 V_s ——体积流量, m^3/s ;
 w_s ——质量流量, kg/s ;
 W_e ——1 kg 流体通过输送设备所获得的能量, 或输送设备对 1 kg 流体所作的有效功, J/kg ;
 x_o ——稳定段长度, m ;
 x_v ——体积分数;
 x_w ——质量分数;
 y ——气相的摩尔分数;
 z ——1 kg 流体所具有的位能, J/kg 。

希腊字母

δ ——流动边界层厚度, m ;
 δ_b ——滞流内层厚度, m ;
 ϵ ——绝对粗糙度, mm ;
 ϵ_k ——体积膨胀系数;
 ζ ——阻力系数;

η ——效率;	ν ——运动黏度, m^2/s 或 cSt ;
η_0 ——刚性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;	Π ——润湿周边, m ;
κ ——绝热指数;	ρ ——密度, kg/m^3 ;
μ ——黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;	τ ——内摩擦应力, Pa ;
μ_a ——表观黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;	τ_0 ——屈服应力, Pa 。

液体和气体统称为流体。流体的特征是具有流动性,即其抗剪和抗张的能力很小;无固定形状,随容器的形状而变化;在外力作用下其内部发生相对运动。

化工生产中所处理的原料及产品,很多都是流体。制造产品时,往往按照生产工艺的要求把它们依次输送到各种设备内,进行化学反应或物理变化;制成的产品又常需要输送到贮罐内贮存。过程进行的好坏,例如动力的消耗及设备的投资,与流体的流动状态密切相关。

在化工生产中,有以下几个主要方面经常要应用流体流动的基本原理及其流动规律。

(1)流体的输送 欲想把流体按所规定的条件,从一个设备送到另一个设备,通常设备之间是用管道连接的,这就需要选用适宜的流动速度,以确定输送管路的直径。在流体的输送过程中,常常要采用输送设备,因此就需要计算流体在流动过程中应加入的外功,为选用输送设备提供依据。这些都是要应用流体流动规律的数学表达式以进行计算。

(2)压强、流速和流量的测量 为了了解和控制生产过程,需要对管路或设备内的压强、流速及流量等一系列参数进行测定,以便合理地选用和安装测量仪表,而这些测量仪表的操作原理又多以流体的静止或流动规律为依据。

(3)为强化设备提供适宜的流动条件 化工生产的传热、传质等过程,都是在流体流动的情况下进行的,设备的操作效率与流体流动状况有密切关系。因此,研究流体流动对寻找设备的强化途径具有重要意义。

本章着重讨论流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律,并运用这些原理与规律去分析和计算流体的输送问题。

在研究流体流动时,常将流体视为由无数分子集团所组成的连续介质。把每个分子集团称为质点,其大小与容器或管路相比是微不足道的。质点在流体内部一个紧挨一个,它们之间没有任何空隙,即可认为流体充满其所占据的空间。把流体视为连续介质,其目的是为了摆脱复杂的分子运动,而从宏观的角度来研究流体的流动规律。但是,并不是在任何情况下都可以把流体视为连续介质,如高真空度下的气体就不能再视为连续介质了。

第一节 流体静力学基本方程式

流体静力学是研究流体在外力作用下达到平衡的规律。在工程实际中,流体的平衡规律应用很广,如流体在设备或管道内压强的变化与测量、液体在贮罐内液位的测量、设备的液封等均以此一规律为依据。

本章只讨论流体在重力作用下的平衡规律。

1-1-1 流体的密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,其表达式为