

新世纪网络课程建设工程项目教材

上册

化工原理及实验

贾绍义 主编
柴诚敬 张金利 副主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

新世纪网络课程建设工程项目教材

化工原理及实验

上册

贾绍义 主编

柴诚敬 张金利 副主编

高等教育出版社

内容提要

本书是“新世纪网络课程建设工程”立项研究成果——“化工原理及实验”网络课程的配套教材,旨在通过开设网络课程,使该课程实现现代化远程教学,以便更广泛地培养具有创新能力、满足 21 世纪需要的高级化工专门人才。全书共含 16 章,分上、下两册出版。第十六章是实验,其余为流体流动、流体输送机械、机械分离及固体流态化、传热、蒸发、蒸馏、气体吸收、气液传质设备、液-液萃取、固体物料的干燥、其他传质与分离过程、实验概论与实验误差分析、实验数据处理、试验设计方法、化工测量技术等。每章内均编入较多例题,章末有习题、思考题和学生自测题,便于理解和自学。

本书可作为网络学院化学化工专业和普通高等学校化学、化工专业化工原理课程教材,也可供相关专业选用和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理及实验.上册/贾绍义主编. -北京:高等教育出版社,2004.6
ISBN 7-04-013980-4

I. 化... II. 贾... III. ① 化工原理-高等学校-教材 ② 化学工业-化学实验-高等学校-教材
IV. ① TQ02 ② TQ016

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 016234 号

策划编辑 岳延陆 责任编辑 应丽贞 封面设计 于涛 责任绘图 杜晓丹
版式设计 王艳红 责任校对 尤静 责任印制 孔源

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京星月印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 23.75
字 数 580 000

版 次 2004 年 6 月 第 1 版
印 次 2004 年 6 月 第 1 次印刷
定 价 24.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

本书是为“新世纪网络课程建设工程”而编写的网络课程教材。本书作为“化工原理及实验”网络课程的配套教材,旨在通过开设网络课程,使“化工原理及实验”课程实现现代化远程教学,以培养具有创新能力、满足 21 世纪需要的高级化工人才。

在本书的编写过程中,吸取了我校多年教学改革的经验以及本校编写的《化工原理》、面向 21 世纪课程教材《化工流体流动与传热》及《化工传质与分离过程》、《化工基础实验》等教材的优点,力求在内容、体系上有新意,将新的单元操作过程和新的化工技术引入网络课程,体现了该课程的最新发展;力求符合科学发展和认识的规律,由浅入深,循序渐进,引导思维,启迪创新,便于理解和自学。

在本书的编写过程中,充分考虑了网络教学的特点,以知识点为线索进行编写,各知识点相互独立,又有机结合,可满足不同层次学生的学习需要,适应性强。在每章开篇有具体的学习指导,以便于学生掌握重点、难点,有针对性地自学;在每章篇末有思考题和学生自测题,供学生在学完本章内容后进行思考,以加深对所学内容的理解,并对学习效果进行检测。

本书包括传统的“化工原理”及“化工原理实验”等课程的内容。参加本书编写的人员及分工如下:

主 编	贾绍义		
副主编	柴诚敬	张金利	
分 工	绪 论		柴诚敬
	第一章 流体流动		柴诚敬
	第二章 流体输送机械		柴诚敬
	第三章 机械分离及固体流态化		王 军
	第四章 传热		王 军
	第五章 蒸发		王 军
	第六章 蒸馏		贾绍义
	第七章 气体吸收		贾绍义
	第八章 气液传质设备		贾绍义
	第九章 液-液萃取		马红钦
	第十章 固体物料的干燥		马红钦
	第十一章 其他传质与分离过程		马红钦
	第十二章 实验概论与实验误差分析	张金利	冯 炜
	第十三章 实验数据处理	张金利	冯 炜
	第十四章 试验设计方法	张金利	冯 炜
	第十五章 化工测量技术	张金利	

第十六章 化工原理实验

张金利 郭翠梨

附录

贾绍义 张金利

本书除作为“化工原理及实验”网络课程的配套教材外,亦可供有关部门从事科研、设计及生产管理的工程技术人员参考。

由于编者的水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2003年4月

目 录

绪论	1	二、流体在直管中的流动阻力	43
知识点 0-1 课程简介及单位换算	1	三、管路上的局部阻力	50
一、化工原理及实验课程研究内容、特点和 学习要求	1	四、管路系统中的总能量损失	51
二、单位制度及单位换算	3	知识点 1-6 管路计算	55
习题	7	一、管路计算内容和基本关系式	55
思考题	7	二、简单管路计算	55
第一章 流体流动	8	三、复杂管路计算	55
学习指导	8	知识点 1-7 流量测量	61
知识点 1-1 概述	9	一、差压流量计	61
一、流体的定义和分类	9	二、截面流量计——转子流量计	65
二、流体特征	9	习题	68
三、作用在流体上的力	9	思考题	72
知识点 1-2 流体静力学基本方程	10	学生自测	73
一、流体的密度	10	本章符号说明	76
二、流体的静压力	11	第二章 流体输送机械	78
三、流体静力学基本方程	12	学习指导	78
四、流体静力学原理的应用举例	13	知识点 2-1 概述	79
知识点 1-3 流体在管内的流动	21	一、管路对流体输送机械的基本要求	79
一、流体流动的考察方法	21	二、输送机械的分类	79
二、流量和流速	21	知识点 2-2 离心泵的工作原理及 性能参数	79
三、定态流动与非定态流动	22	一、离心泵的基本结构和工作原理	80
四、连续性方程	23	二、离心泵的基本方程——能量方程	82
五、能量衡算方程——伯努利方程	24	三、离心泵的性能参数与特性曲线	86
六、伯努利方程的应用举例	26	知识点 2-3 离心泵在管路中的运行	93
知识点 1-4 流体流动现象	32	一、离心泵的安装高度	93
一、牛顿粘性定律与流体的粘度	32	二、离心泵的工作点和流量调节	95
二、非牛顿型流体	35	三、离心泵的类型与选择	98
三、流动类型与雷诺数	35	知识点 2-4 其他流体输送机械	105
四、滞流与湍流	37	一、其他流体输送机械的分类及主要 特点	105
五、边界层的概念	39	二、其他液体输送机械	106
知识点 1-5 流体在直管内的流动 阻力	42	三、气体输送机械	110
一、概述	42	习题	122

思考题	124	一、传热的基本方式	207
学生自测	124	二、传热过程中冷热流体(接触)热交换 方式	207
本章符号说明	127	三、典型的间壁式换热器	209
第三章 机械分离及固体流态化		四、载热体及其选择	210
——颗粒与流体之间的		知识点 4-2 热传导	211
相对运动	129	一、基本概念和傅立叶定律	211
学习指导	129	二、导热系数	212
知识点 3-1 概述	130	三、平壁的热传导	214
一、混合物的分类	130	四、圆筒壁的热传导	216
二、非均相混合物分离方法的分类	130	知识点 4-3 对流传热概述	219
三、非均相混合物分离的目的	130	一、对流传热速率方程和对流传热系数	220
知识点 3-2 颗粒及颗粒床层的特性	131	二、对流传热机理	221
一、单一颗粒的特性	131	三、保温层的临界直径	223
二、颗粒群的特性	133	知识点 4-4 传热过程计算	224
三、颗粒床层的特性	134	一、能量衡算	224
四、流体通过固定床流动的压力降	135	二、总传热速率微分方程和总传热系数	225
知识点 3-3 沉降分离	138	三、平均温度差法	229
一、重力沉降分离	138	四、传热单元数法	233
二、离心沉降分离	146	知识点 4-5 对流传热系数关联式	243
知识点 3-4 过滤分离	163	一、影响对流传热系数的因素	243
一、过滤操作的原理	163	二、对流传热过程的量纲分析	244
二、过滤的基本方程	165	三、流体无相变时的对流传热系数	247
三、恒压过滤	169	四、流体有相变时的对流传热系数	253
四、恒速过滤与先恒速后恒压的过滤	171	五、壁温的估算	258
五、过滤设备	172	知识点 4-6 辐射传热	261
六、滤饼的洗涤	178	一、基本概念和定律	261
七、过滤机的生产能力	179	二、普朗克定律、斯特藩-玻耳兹曼定律及 克希霍夫定律	262
知识点 3-5 固体流态化技术	185	三、两固体间的辐射传热	264
一、固体流态化的基本概念	185	四、对流和辐射联合传热	266
二、流化床的总高度	191	知识点 4-7 换热器	269
三、提高流化质量的措施	192	一、间壁式换热器的结构形式	269
四、气力输送简介	194	二、换热器传热过程的强化	277
习题	198	三、管壳式换热器的设计和选型	279
思考题	200	习题	288
学生自测	201	思考题	290
本章符号说明	203	学生自测	291
第四章 传热	205	本章符号说明	293
学习指导	205	第五章 蒸发	295
知识点 4-1 传热过程概述	206		

学习指导	295	二、某些气体的重要物理性质	328
知识点 5-1 蒸发过程概述与蒸发		三、某些液体的重要物理性质	329
设备	296	四、干空气的物理性质(101.3 kPa)	331
一、蒸发过程概述	296	五、水的物理性质	332
二、蒸发设备	297	六、水的饱和蒸气压(-20~100 ℃)	333
知识点 5-2 单效蒸发	304	七、饱和水蒸气压表	334
一、物料与热量衡算方程	305	八、某些液体的导热系数	336
二、传热速率方程	307	九、某些气体和蒸气的导热系数	338
三、蒸发强度与加热蒸汽的经济性	313	十、某些固体材料的导热系数	339
知识点 5-3 多效蒸发	317	十一、常用固体材料的密度和比热容	341
一、多效蒸发流程	318	十二、壁面污垢热阻(污垢系数)	342
二、多效蒸发与单效蒸发的比较	319	十三、无机盐水溶液的沸点(101.3 kPa)	343
三、多效蒸发中的效数限制及最佳效数	320	十四、IS 型单级单吸离心泵性能表	344
四、提高加热蒸汽经济性的其他措施	320	十五、离心通风机规格	348
习题	321	十六、输送流体用无缝钢管规格	349
思考题	322	十七、输送流体用不锈钢无缝钢管规格	351
学生自测	322	十八、管壳式换热器系列标准	353
本章符号说明	323	十九、管壳式换热器总传热系数 K 的 推荐值	356
附录	325	二十、 F 分布数值表	358
一、常用单位的换算	325	二十一、常用正交表	362

绪 论

知识点 0-1 课程简介及单位换算

一、化工原理及实验课程研究内容、特点和学习要求

(一) 化工原理及实验课程研究内容

1. 化工生产过程

对原料进行化学加工获得有用产品的过程称为化工生产过程。如高压聚乙烯生产的主要步骤如图 0-1 所示。

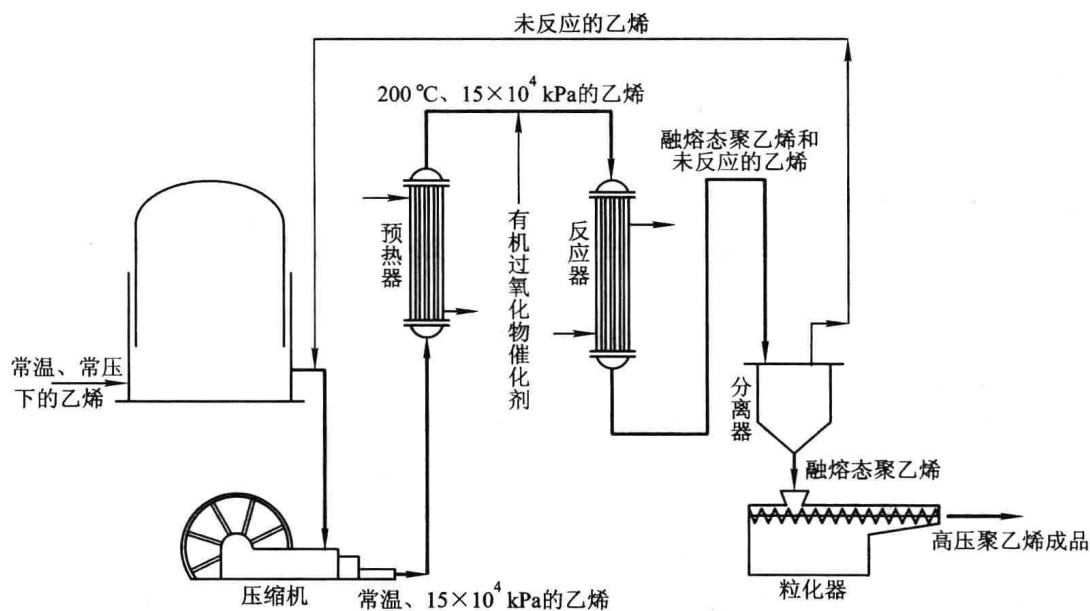


图 0-1 高压聚乙烯的生产流程示意图

综观纷杂的化工生产工艺流程都是由化学反应和物理操作有机组合而成。其中化学反应及其设备是化工生产的核心,该部分内容由“反应工程”课程来研究。物理操作过程起到为化学反应准备必要条件以及将反应物分离提纯而获得最终产品的作用。这些物理操作统称为化工单元操作,是本课程研究的主要内容。

2. 化工原理

1923年美国麻省理工学院的著名教授华克尔 W H 等人编写出版的第一部关于单元操作的著作——《化工原理》，从而奠定了化学工程作为一门独立工程学科的基础，完成了从化工生产工艺到单元操作的发展，推进认识上的一个飞跃。

3. 化学工程的发展

20世纪60年代“三传一反”概念的提出，开辟了化学工程发展过程的第二个历程。计算机应用的快速发展，使化学工程成为更完整的体系，并推向了“过程优化集成”、“分子模拟”的新阶段。随着科学技术的高速发展，化学工程与相邻学科相融合逐渐形成了若干新的分支与生长点，诸如：生物化学工程、分子化学工程、环境化学工程、能源化学工程、计算化学工程、软化学工程、微电子化学工程等。上述新兴产业与学科的发展，也推动了特殊领域化学工程的进步，同时也拓宽了化工原理的研究领域。

(二) 单元操作分类和特点

1. 单元操作分类

各种单元操作根据不同的物理化学原理，采用相应的设备，达到各自的工程目的。对于单元操作，可从不同角度加以分类。根据各单元操作所遵循的规律，将其划分为如下类型，即

(1) 遵循流体动力学基本规律的单元操作 包括流体输送、沉降、过滤、物料混合(搅拌)等。

(2) 遵循热量传递基本规律的单元操作 包括加热、冷却、冷凝、蒸发等。

(3) 遵循质量传递基本规律的单元操作 包括蒸馏、吸收、萃取、吸附、膜分离等。从工程目的来看，这些操作都可将混合物进行分离，故又称之为分离操作。

(4) 同时遵循热质传递规律的单元操作 包括气体的增湿与减湿、结晶、干燥等。

另外，还有热力过程(制冷)、粉体工程(粉碎、颗粒分级、流态化)等单元操作。

2. 单元操作特点

(1) 单元操作讨论的只是化工生产中的物理过程。

(2) 同一单元操作在不同的化工生产中遵循相同的过程规律，但在操作条件及设备类型(或结构)方面会有很大差别。

(3) 对同样的工程目的，可采用不同的单元操作来实现。

3. 开发新的单元操作

随着新产品、新工艺的开发或为实现绿色化工生产，对物理过程提出了一些特殊要求，又不断地发展出新的单元操作或化工技术，如膜分离、参数泵分离、电磁分离、超临界技术等。同时，以节约能耗，提高效率或洁净无污染生产的集成化工艺(如反应精馏、反应膜分离、萃取精馏、多塔精馏系统的优化热集成等)将是未来的发展趋势。

单元操作的研究包括“过程”和“设备”两个方面的内容，故单元操作又称为化工过程和设备。化工原理是研究诸单元操作共性的课程。

“三传理论的建立”是单元操作在理论上的进一步发展和深化。传递过程是联系各单元操作的一条主线。

(三) 本课程研究方法

本课程是一门实践性很强的工程学科，在长期的发展过程中，形成了两种基本研究方法，即

1. 实验研究方法(经验法)

该方法一般用量纲分析和相似论为指导，依靠实验来确定过程变量之间的关系，通过量纲为

—数群构成的关系式来表达,是一种工程上通用的基本方法。

2. 数学模型法(半经验半理论方法)

该方法是在对实际过程的机理深入分析的基础上,在抓住过程本质的前提下,做出某种合理简化,建立物理模型,进行数学描述,得出数学模型,并通过实验确定模型参数。

如果一个物理过程的影响因素较少,各参数之间的关系比较简单,能够建立数学方程并能直接求解,则称为解析法。

研究工程问题的方法论是联系各单元操作的另一条主线。

(四) 化工过程计算的理论基础

化工过程计算可分为设计型计算和操作型计算两类,其在不同计算中的处理方法各有特点,但是不管何种计算都是以质量守恒、能量守恒、平衡关系和速率关系为基础的。上述四种基本关系将在有关章节陆续介绍。

(五) 本课程特点及学习要求

1. 本课程特点

该课程是化工类及相近专业一门重要的技术基础课,兼有“科学”与“技术”的特点,它是综合运用数学、物理、化学等基础知识,分析和解决化工类型生产中各种物理过程问题的工程学科。在化工类专门人才培养中,它承担着工程科学与工程技术的双重教育任务。本课程强调工程观点、定量运算、实验技能及设计能力的培养,强调理论联系实际。

本课程主要研究各单元操作的基本原理,所用的典型设备结构,工艺尺寸设计和设备的选型问题。

2. 学习要求

学习本课程中,要紧密切联系生产和科学研究实际,并注意以下几个方面能力的培养:

(1) 单元操作和设备选择的能力 根据生产工艺要求和物系特性,合理选择单元操作和设备。

(2) 工程设计能力 学习进行工艺过程计算和设备设计。

(3) 操作和调节生产过程的能力 学习如何操作和调节生产过程,了解优化生产过程的途径。

(4) 过程开发或科学研究能力 学习如何根据物理或物理化学原理选择或开发单元操作,进而组织一个生产工艺过程。

(5) 实验能力 学习实验设计、单元操作实验、数据处理及误差分析的方法,提高动手能力和实验技能。

将可能变现实,实现工程目的,这是综合创造能力的体现。

二、单位制度及单位换算

任何物理量的大小都是由数字和单位联合来表达的,二者缺一不可。

(一) 单位制度

在工程和科学中,单位制度有不同的分类方法。

1. 基本单位和导出单位

一般选择几个独立的物理量(如质量、长度、时间、温度等),根据使用方便的原则规定出它们

的单位,这些选择的物理量称为基本物理量,其单位称为基本单位。其他的物理量(如速度、加速度、密度等)的单位则根据其本身的物理意义,由有关基本单位组合而成。这种组合单位称为导出单位。

2. 绝对单位制度和重力单位(工程单位)制度

绝对单位制以长度、质量、时间为基本物理量,力是导出物理量,其单位为导出单位;重力单位制以长度、时间和力为基本物理量,质量是导出物理量,其单位为导出单位。力和质量的关系用牛顿第二运动定律相关联,即

$$F = ma \quad (0-1)$$

上述两种单位制度中又有米制单位与英制单位之分。两种单位制度中米制与英制的基本单位列于表 0-1。

3. 国际单位制(SI)

1960年10月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制度,称为国际单位制,其代号为SI,它是米千克秒制(MKS制)的引申。

由于SI单位的“通用性”和“一贯性”的优点,使得它在国际上迅速得到推广。

表 0-1 两种单位制度中的米制与英制的基本单位

基本物理量		长度(L)	时间(t)	质量(m)	力或重力(F)
单位制度					
绝对单位制度	CGS制	cm	s	g	—
	MKS制	m	s	kg	—
	英制	ft	s	lb	—
重力单位制度 (工程单位制)	米制	m	s	—	kgf
	英制	ft	s	—	lb(f)

4. 中华人民共和国法定计量单位(简称法定单位制)

中华人民共和国法定计量单位制的内容可参阅有关书籍。本套教材中采用法定单位制。在少数例题与习题中有意识地编入一些非法定计量单位,目的是让读者练习单位之间换算。

(二) 单位换算

换算因子——彼此相等而单位不同的两个同名物理量(包括单位在内)的比值称为换算因子。如 1 m 和 100 cm 的换算因子为 100 cm/m。

1. 物理量的单位换算

同一物理量,若采用不同的单位则数值就不相同。例如最简单的一个物理量,圆形反应器的直径为 1 m,在物理单位制中,单位为 cm,其值为 100;而在英制中,其单位为 ft,其值为 3.280 3。它们之间的换算关系为

反应器的直径

$$D = 1\text{m} = 100\text{ cm} = 3.280\ 3\text{ ft}$$

同理,重力加速度 g 不同单位制之间的换算关系为

重力加速度

$$g = 9.81\text{m/s}^2 = 981\text{cm/s}^2 = 32.18\text{ft/s}^2$$

常用物理量的单位换算关系可查附录一。

若查不到一个导出物理量的单位换算关系,则从该导出单位的基本单位换算入手,采用单位之间的换算因子与基本单位相乘或相除的方法,以消去原单位而引入新单位。具体换算过程见例 0-1。

2. 经验公式(或数字公式)的单位换算

化工计算中常遇到的公式有两类:

一类为物理方程,它是根据物理规律建立起来的,如前述的式(0-1)。物理方程遵循单位或量纲一致的原则。同一物理方程中绝不允许采用两种单位制度。

用一定单位制度的基本物理量来表示某一物理量,称为该物理量的量纲。在 MKS 单位制度中,基本物理量质量、长度、时间、热力学温度的量纲分别用 M、L、T 与 Θ 表示,力的量纲为 MLT^{-2} ;在重力单位制度中,力为基本量,其量纲用 F 表示,质量的量纲则变为 FT^2L^{-1} 。量纲一致的原则是量纲分析方法的基础。

另一类为经验方程,它是根据实验数据而整理成的公式,式中各物理量的符号只代表指定单位制度的数据部分,因而经验公式又称数字公式。当所给物理量的单位与经验公式指定的单位制度不相同,则需要进行单位换算。可采取两种方式进行单位换算:将诸物理量的数据换算成经验公式中指定的单位后,再分别代入经验公式进行计算;若经验公式需经常使用,对大量的数据进行单位换算很繁琐,则可将公式加以变换,使式中各符号都采用所希望的单位制度。换算方法见例 0-2。

【例题与解题指导】

【例 0-1】 质量速度的英制单位为 $\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$,试将其换算为 SI 单位,即 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

解:在本教材附录一中查不到质量速度不同单位制之间的换算关系,则只能从基本单位换算入手。从附录一查出基本物理量的换算关系为

$$1\text{kg} = 2.204\ 62\ \text{lb}$$

$$1\text{m} = 3.280\ 3\ \text{ft}$$

$$1\text{h} = 3\ 600\ \text{s}$$

采用“原单位消去法”便得到新的单位。

质量速度

$$G = 1\left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}}\right) = 1\left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}}\right) \left(\frac{1\text{kg}}{2.204\ 62\ \text{lb}}\right) \left(\frac{3.280\ 3\ \text{ft}}{1\ \text{m}}\right) \left(\frac{1\text{h}}{3\ 600\ \text{s}}\right) = 1.356 \times 10^{-3}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

分析:求解本题的关键是掌握“原单位消去法”进行单位换算。

【例 0-2】 乱堆 25 mm 拉西环的填料塔用于精馏操作时,等板高度可用下面经验公式计算,即

$$H_E = 3.9A(2.78 \times 10^{-4}G)^B(12.01D)^C(0.3048Z_0)^{1/3} \left(\frac{\alpha\mu_L}{\rho_L}\right)$$

式中 H_E ——等板高度, ft;
 G ——气相质量速度, lb/(ft²·h);
 D ——塔径, ft;
 Z_0 ——每段(即两层液体分布板之间)填料层高度, ft;
 α ——相对挥发度, 量纲为一;
 μ_L ——液相粘度, cP;
 ρ_L ——液相密度, lb/ft³。

A 、 B 、 C 为常数, 对 25 mm 的拉西环, 其数值分别为 0.57、-0.1 及 1.24。

试将上面经验公式中各物理量的单位均换算为 SI 单位。

解: 上面经验公式是混合单位制度, 液体粘度为物理单位制, 而其余诸物理量均为英制。经验公式单位换算的基本要点是: 找出式中每个物理量新旧单位之间的换算关系, 导出物理量“数字”的表达式, 然后代入经验公式并整理, 便使式中各符号都变为所希望的单位。具体换算过程如下:

(1) 从附录一查出或计算出经验公式有关物理量新旧单位之间的关系为

$$1\text{ft} = 0.3049\text{ m}$$

$$1\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) = 1.356 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \quad (\text{见例 } 0-1)$$

α 量纲为一, 不必换算

$$1\text{cP} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 1 \left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) \left(\frac{1\text{kg}}{2.2046\text{ lb}} \right) \left(\frac{3.2803\text{ ft}}{1\text{ m}} \right)^3 = 16.01 \text{ kg}/\text{m}^3$$

(2) 将原符号加上标“'”以代表新单位的符号, 导出原符号“数字”表达式。下面以 H_E 为例:

$$H_E \text{ft} = H'_E \text{m}$$

$$\text{则} \quad H_E = H'_E \frac{\text{m}}{\text{ft}} \times \frac{3.2803\text{ ft}}{1\text{ m}} = 3.2803 H'_E$$

$$\text{同理} \quad G = G' / 1.356 \times 10^{-3} = 737.5 G'$$

$$D = 3.2803 D'$$

$$Z_0 = 3.2803 Z'_0$$

$$\mu_L = \mu'_L / 1 \times 10^{-3} = 1000 \mu'_L$$

$$\rho_L = \rho'_L / 16.01 = 0.06246 \rho'_L$$

(3) 将以上关系式代入原经验公式, 得

$$3.2803 H'_E = 3.9 \times 0.57 (2.78 \times 10^{-4} \times 737.5 G')^{-0.1} (12.01 \times 3.2803 D')^{1.24} (0.3048 \times 3.2803 Z'_0)^{1/3} \left(\alpha \frac{1000 \mu'_L}{0.0624 \rho'_L} \right)$$

整理上式并略去符号的上标, 便得到换算后的经验公式, 即

$$H_E = 1.084 \times 10^{-4} (0.205 G)^{-0.1} (39.4 D)^{1.24} (Z_0)^{1/3} \left(\frac{\alpha \mu_L}{\rho_L} \right)$$

分析:求解本题时应注意,经验公式中物理量的指数是表明该物理量对过程的影响程度,与单位制度无关,因而经过单位换算后,经验公式中各物理量的指数均不发生变化。

习 题

0-1 从基本单位换算入手,将下列物理量的单位换算为 SI 单位。

(1) 40 ℃ 时水的粘度 $\mu = 0.00656 \text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$

(2) 某物质的比热容 $c_p = 0.21 \text{ BTU}/(\text{lb}\cdot^\circ\text{F})$

(3) 密度 $\rho = 1386 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$

(4) 传质系数 $K_G = 24.2 \text{ kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{atm})$

(5) 表面张力 $\sigma = 71 \text{ dyn}/\text{cm}$

(6) 导热系数 $\lambda = 1 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$

0-2 清水在圆管内对管壁的强制湍流对流传热系数随温度的变化可用下面经验公式表示,即

$$\alpha = 150(1 + 2.93 \times 10^{-3} T) u^{0.8} d^{-0.2}$$

式中 α ——对流传热系数, $\text{BTU}/(\text{ft}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F})$;

T ——热力学温度, K ;

u ——水的流速, ft/s ;

d ——圆管内径, in 。

试将式中各物理量的单位换算为 SI 单位,即 α 为 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, T 为 K , u 为 m/s , d 为 m 。

思 考 题

1. 比较实验研究方法和数学模型的区别。
2. 何谓单位换算因子?
3. 联系各单元操作的两条主线是什么?

第一章

流 体 流 动

学习指导

1. 学习目的

通过本章学习,掌握流体流动过程的基本原理、管内流动的规律,并运用这些原理和规律去分析和计算流体流动过程中的有关问题,诸如:

- (1) 流体输送:流速的选择,管径的计算,输送机械选型。
- (2) 流动参数的测量:压力、流速(流量)等。
- (3) 不互溶液体(非均相物系)的分离和分散(混合)。
- (4) 选择适宜的流体流动参数,以适应传热、传质和化学反应的最佳条件。

2. 重点掌握的内容

- (1) 静力学基本方程的应用。
- (2) 连续性方程、伯努利方程的物理意义、适用条件,应用伯努利方程解题的要点和注意事项。
- (3) 管路系统总能量损失方程(包括 λ 数据的获得)。

应掌握的内容

- (1) 两种流型(层流和湍流)的本质区别,处理两种流型的工程方法(解析法和实验研究方法)。
- (2) 流量测量。
- (3) 管路计算。

一般了解的内容

- (1) 边界层的基本概念(边界层的形成和发展,边界层分离)。
- (2) 牛顿型流体和非牛顿型流体。

3. 学习应注意的问题

(1) 流体力学是传热和传质的基础,它们之间存在着密切的联系和相似性,从开始学习流体流动就要学扎实,打好基础。

(2) 应用伯努利方程、静力学方程解题要绘图,正确选取衡算范围。解题步骤要规范。

4. 教学时数分配

知识点 1-1 与 1-2	授课学时数 2	自学学时数 4
知识点 1-3	授课学时数 3	自学学时数 6

知识点 1-4	授课学时数 2	自学学时数 4
知识点 1-5	授课学时数 3	自学学时数 6
知识点 1-6	授课学时数 3	自学学时数 6
知识点 1-7	授课学时数 2	自学学时数 4

5. 学习资料

必读书籍

《化工原理及实验》网络课程教材

参考书籍

- (1) 姚玉英等. 化工原理 上册. 天津: 天津大学出版社, 1999
- (2) 柴诚敬, 张国亮. 化工流体流动和传热. 北京: 化学工业出版社, 2000
- (3) 蒋维钧, 雷良恒, 刘茂林等. 化工原理 上册. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2003
- (4) 陈敏恒等. 化工原理 上册. 北京: 化学工业出版社, 1999
- (5) McCabe W L, Smith J C. Unit Operations of Chemical Engineering. 5th ed. New York: McGraw Hill Inc, 1993

知识点 1-1 概 述

一、流体的定义和分类

气体(含蒸汽)和液体统称流体。流体有多种分类方法:

- (1) 按状态分为气体、液体和超临界流体。
- (2) 按可压缩性可分为不可压缩流体和可压缩流体。
- (3) 依是否可忽略分子间作用力分为理想流体和粘性(实际)流体。
- (4) 按流变特性(剪力与速度梯度之间关系)分为牛顿型和非牛顿型流体。

二、流体特征

- (1) 流动性, 即抗剪抗张的能力很小;
- (2) 无固定形状, 易变形(随容器形状), 气体能充满整个密闭容器空间;
- (3) 流动时产生内摩擦, 从而构成了流体流动内部结构的复杂性。

三、作用在流体上的力

外界作用于流体上的力有两种, 即质量力和表面力。

1. 质量力(又称体积力)

质量力作用于流体的每个质点上, 并与流体的质量成正比, 对于均质流体也与流体的体积成正比。流体在重力场中受到的重力、在离心力场中受到的离心力都是典型的质量力。

2. 表面力(又称接触力或机械力)