



普通高等教育“十五”国家级规划教材

化工原理 上册

天津大学化工学院
柴诚敬 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十五”国家级规划教材

化工原理

上册

天津大学化工学院

柴诚敬 主编

张国亮 夏清 张凤宝

刘明言 贾绍义 等编

图书在版编目(CIP)数据

化工原理.上册 / 柴诚敬主编. — 北京: 化学工业出版社, 2002.6

ISBN 7-03-010570-3

I. ①化… II. 柴… III. ①化工原理—高等学校—教材

②W. 402

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第042314号

责任编辑 王松林 封面设计 王松林

天津大学
天津大学
天津大学
天津大学

出版发行 化学工业出版社
社址 北京东城区
邮政编码 100011
电话 010-64615258
地址 北京朝阳区
邮编 100029
本 787×109
张 32.75
印 200000

高等教育出版社

本社地址 北京东城区
邮政编码 100000

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,也是高等教育出版社“高等教育百门精品课程教材建设计划”一类精品项目。本书以传递过程的理论和处理工程问题的方法论为两条主线,重点介绍化工单元操作的基本原理、过程计算、典型设备及其强化。全书共十二章,分上、下两册出版。上册除绪论和附录外,包括流体流动、流体输送机械、非均相混合物分离及固体流态化、液体搅拌、传热及蒸发;下册包括传质与分离过程概论、气体吸收、蒸馏、萃取(液-液萃取及浸取)、干燥(含增减湿)及其他分离过程(结晶、膜分离及吸附等)。每章均有学习指导、例题、习题与思考题。

本书专业适用面宽,可供高等院校化工、石油、生物、制药、食品、环境、材料等有关专业使用,也可供有关部门从事科研、设计、管理及生产等工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理.上册 / 柴诚敬主编. —北京:高等教育出版社,2005.6

ISBN 7-04-016760-3

I. 化... II. 柴... III. 化工原理-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 046356 号

策划编辑 郭新华 责任编辑 翟怡 封面设计 于涛 责任绘图 朱静
版式设计 王艳红 责任校对 金辉 责任印制 孔源

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网址	http://www.hep.edu.cn
总机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经销	北京蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印刷	化学工业出版社印刷厂		http://www.landaco.com.cn
开本	787×1092 1/16	版次	2005年6月第1版
印张	22.75	印次	2005年6月第1次印刷
字数	550000	定价	23.90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

物料号 16760-00

前 言

根据现代科学技术飞速发展对高等化工专门人才“知识、能力和综合素质”的要求,新编教材以“加强基础,拓宽知识面,培养学生的创新能力”为宗旨,坚持“面向 21 世纪的教学内容和课程体系改革”的主导思想,力求在内容和体系上有新意。

考虑到生物工程、制药工程、环境工程、食品工程等不同类型专业的需要,新编教材不仅拓展了内容,增加了新的知识点(如非牛顿型流体的流动和传热、生物溶液的浓缩、冷冻干燥及固体浸取等),而且注意吸收本学科领域最新科技成果,及时反映学科发展的前沿,力求达到博而精,实现科学性、先进性和适用性的有机统一。

本教材以化工传递过程的基本理论和工程方法论为两条主线,突出工程学科的特点,系统而简明地阐述了化工单元操作的基本原理、过程计算、典型设备的结构特点及性能、过程或设备的强化途径等。全书分上、下两册出版。上册除绪论和附录外,包括流体流动、流体输送机械、非均相混合物分离及固体流态化、液体搅拌、传热和蒸发;下册包括传质与分离过程概论、气体吸收、蒸馏、萃取、干燥及其他分离过程(结晶、膜分离及吸附等)。

本教材在编写过程中,注意吸收我校在长期教材建设方面的经验和成果,按照学科的发展和认识规律,由浅入深、循序渐进、层次清晰、难点分散、理论联系实际,力求概念准确、论述严谨、可读性强。每章开篇有学习指导,且编入适量具有工程背景的实例、习题和思考题,有利于启迪思维,增强工程观念和创新意识,便于教与学。

本书可作为高等学校化工类及相关专业(化工、石油化工、生物、制药、环境、食品、材料、冶金等)的教材,也可供有关部门从事科研、设计、生产及管理工作的科技人员参考。

本书主编柴诚敬。参加各章编写工作的有:柴诚敬(绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏)、张国亮(流体流动、其他分离过程)、夏清(非均相混合物分离及固体流态化、干燥)、张凤宝(传热、萃取)、刘明言(传热)、贾绍义(附录、传质与分离过程概论、气体吸收)。王军、马红钦、吴松海、张裕卿、杨晓霞、张缨、姜峰等教师参加部分文字加工、素材搜集与制作等工作。在本书编写过程中,化工系的有关教师给予热情关心和支持,姚玉英、陈常贵等老师给予了具体的帮助,在此表示衷心的感谢。

本书承蒙清华大学蒋维钧教授主审,对书稿提出许多宝贵意见,在此致以诚挚的感谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处甚至错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2005 年 1 月

目

录

绪论	1	1.6.4 非圆形管的摩擦阻力	51
0.1 化工原理课程的内容和特点	1	1.6.5 管路中的局部阻力	51
0.2 单位制度及单位换算	4	1.6.6 管流阻力计算小结	53
习题	6	1.7 流体输送管路的计算	56
思考题	7	1.7.1 简单管路	56
第一章 流体流动	8	1.7.2 复杂管路	59
学习指导	8	1.7.3 可压缩流体管路的计算	63
1.1 流体的重要性质	9	1.8 流量的测量	65
1.1.1 连续介质假定	9	1.8.1 测速管	65
1.1.2 流体的密度	9	1.8.2 孔板流量计	67
1.1.3 流体的可压缩性与不可压缩流体	10	1.8.3 文丘里流量计	69
1.1.4 流体的黏性	11	1.8.4 转子流量计	70
1.2 流体静力学	13	1.9 非牛顿型流体的流动	71
1.2.1 流体的受力	13	1.9.1 非牛顿型流体的流动特性	71
1.2.2 静止流体的压力特性	14	1.9.2 幂律流体在管内流动的阻力	72
1.2.3 流体静力学方程	14	习题	75
1.2.4 流体静力学方程的应用	16	思考题	79
1.3 流体流动概述	20	本章主要符号说明	80
1.3.1 流动体系的分类	20	第二章 流体输送机械	82
1.3.2 流量与平均流速	21	学习指导	82
1.3.3 流动型态与雷诺数	23	2.1 概述	82
1.4 流体流动的基本方程	25	2.1.1 流体输送机械的作用	82
1.4.1 总质量衡算——连续性方程	25	2.1.2 流体输送机械的分类	84
1.4.2 总能量衡算方程	27	2.2 离心泵	85
1.4.3 机械能衡算方程的应用	31	2.2.1 离心泵的工作原理和基本结构	85
1.5 动量传递现象	35	2.2.2 离心泵的基本方程	87
1.5.1 层流——分子动量传递	35	2.2.3 离心泵的性能参数与特性曲线	91
1.5.2 湍流特性与涡流传递	36	2.2.4 离心泵在管路中的运行	97
1.5.3 边界层与边界层分离现象	38	2.2.5 离心泵的类型与选择	104
1.5.4 动量传递小结	41	2.3 其他类型化工用泵	108
1.6 流体在管内流动的阻力	41	2.3.1 往复式泵	108
1.6.1 管流阻力计算的通式	41	2.3.2 回转式泵	112
1.6.2 管内层流的摩擦阻力	44	2.3.3 旋涡泵	113
1.6.3 管内湍流的摩擦阻力与量纲分析	45	2.3.4 常用液体输送机械性能比较	113

2.4 气体输送和压缩机械	114	4.1 搅拌器的性能和混合机理	194
2.4.1 气体输送机械的分类	114	4.1.1 搅拌设备	194
2.4.2 离心式通风机、鼓风机和压缩机	115	4.1.2 搅拌作用下流体的流动	197
2.4.3 往复压缩机	117	4.1.3 混合机理	201
2.4.4 回转鼓风机、压缩机	123	4.1.4 其他类型混合器	202
2.4.5 真空泵	124	4.1.5 搅拌器的选型和发展趋势	203
2.4.6 常用气体输送机械的性能比较	126	4.2 搅拌功率	204
习题	126	4.2.1 搅拌功率的准数关联式	204
思考题	128	4.2.2 均相系统搅拌功率的计算	205
本章主要符号说明	129	4.2.3 非均相物系搅拌功率的计算	208
第三章 非均相混合物分离及固体		4.2.4 非牛顿型流体的搅拌功率	210
流态化	130	4.3 搅拌设备的放大	210
学习指导	130	习题	212
3.1 沉降分离原理及设备	131	思考题	213
3.1.1 颗粒相对于流体的运动	131	本章主要符号说明	213
3.1.2 重力沉降	136	第五章 传热	215
3.1.3 离心沉降	143	学习指导	215
3.2 过滤分离原理及设备	152	5.1 传热过程概述	216
3.2.1 流体通过固体颗粒床层的流动	152	5.1.1 热传导及导热系数	216
3.2.2 过滤操作的原理	156	5.1.2 对流	218
3.2.3 过滤基本方程	158	5.1.3 热辐射	219
3.2.4 恒压过滤	162	5.1.4 冷热流体(接触)热交换方式及	
3.2.5 恒速过滤与先恒速后恒压的过滤	164	换热器	219
3.2.6 过滤常数的测定	165	5.1.5 载热体及其选择	221
3.2.7 过滤设备	167	5.2 热传导	221
3.2.8 滤饼的洗涤	171	5.2.1 平壁一维稳态热传导	222
3.2.9 过滤机的生产能力	172	5.2.2 圆筒壁的一维稳态热传导	224
3.3 离心机	175	5.3 换热器的传热计算	226
3.3.1 一般概念	175	5.3.1 热平衡方程	226
3.3.2 离心机的结构与操作简介	175	5.3.2 总传热速率微分方程和总传热	
3.4 固体流态化	178	系数	227
3.4.1 流态化的基本概念	178	5.3.3 传热计算方法	231
3.4.2 流化床的流体力学特性	180	5.4 对流传热	240
3.4.3 流化床的浓相区高度与分离高度	185	5.4.1 对流传热机理和对流传热系数	241
3.4.4 气力输送简介	186	5.4.2 对流传热的量纲分析	243
习题	189	5.4.3 流体无相变时的对流传热系数	246
思考题	190	5.4.4 流体有相变时的对流传热系数	250
本章主要符号说明	191	5.4.5 非牛顿型流体的传热	256
第四章 液体搅拌	193	5.5 辐射传热	257
学习指导	193	5.5.1 基本概念和定律	258

5.5.2 两固体间的辐射传热	261	习题	316
5.6 换热器	263	思考题	316
5.6.1 间壁式换热器的结构形式	263	本章主要符号说明	317
5.6.2 换热器传热过程的强化	268	附录	318
5.6.3 传热过程强化效果的评价	269	一、中华人民共和国法定计量单位	318
5.6.4 管壳式换热器的设计和选型	270	二、常用单位的换算	319
习题	277	三、某些气体的重要物理性质	322
思考题	279	四、某些液体的重要物理性质	323
本章主要符号说明	279	五、干空气的物理性质(101.3 kPa).....	325
第六章 蒸发	282	六、水的物理性质	326
学习指导	282	七、水的饱和蒸气压(-20~100℃)	327
6.1 概述	282	八、饱和水蒸气表(以压力为准, 单位 kPa).....	328
6.2 蒸发设备	284	九、某些液体的导热系数	330
6.2.1 循环型蒸发器	284	十、某些气体和蒸气的导热系数	332
6.2.2 单程型蒸发器	288	十一、某些固体材料的导热系数	333
6.2.3 蒸发设备和蒸发技术的进展	291	十二、常用固体材料的密度和比热容	335
6.2.4 蒸发器的选型	292	十三、壁面污垢热阻(污垢系数)	336
6.2.5 蒸发器的辅助设备	292	十四、无机盐水溶液的沸点(101.3 kPa).....	337
6.3 单效蒸发的计算.....	294	十五、IS 型单级单吸离心泵性能表 (摘录)	338
6.3.1 物料衡算与热量衡算	294	十六、离心通风机规格 (摘自 GB/T 13276—91)	342
6.3.2 蒸发器的传热面积	297	十七、输送流体用无缝钢管规格 (摘自 GB 8163—87)	343
6.3.3 蒸发器的生产强度	301	十八、输送流体用不锈钢无缝钢管规格 (摘自 GB/T 14976—94)	345
6.3.4 蒸发过程的节能措施	302	十九、管壳式换热器系列标准(摘录)	347
6.4 多效蒸发	305	二十、管壳式换热器总传热系数 K 的推 荐值	350
6.4.1 多效蒸发的流程	305	参考书目	352
6.4.2 多效蒸发的计算	305		
6.4.3 多效蒸发与单效蒸发的比较	311		
6.4.4 多效蒸发的适宜效数	312		
6.5 生物溶液的增浓.....	312		
6.5.1 生物溶液的蒸发	312		
6.5.2 冷冻浓缩	312		

绪 论

0.1 化工原理课程的内容和特点

化工原理课程是化工类各专业(包括化工、生物、制药、轻工食品、环境、石油、材料等)重要的技术基础课。它是综合运用数学、物理、化学等基础知识,分析和解决化学加工类生产中各种物理过程问题的工程学科,它承担着工程科学与工程技术的双重教育任务。

一、化工原理课程内容

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。例如用乙烯生产高压聚乙烯需经过气体压缩、热量交换、化学反应、分离、造粒等一系列过程;抗生素(又称抗菌素)的整个生产工艺过程可分为上游(包括菌种保存、选育、纯化、孢子制备、种子培育和发酵)、下游(包括发酵液的过滤、预处理、抗生素的提取和纯化)和成品(主要指制剂和包装)等阶段。由于产品、原料的多样性及生产过程的复杂性,形成了数以万计的化工生产工艺过程。综观纷杂众多的化工生产过程,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。物理操作过程则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有用产品的作用。这些物理步骤在整个化工生产中发挥着极其重要的作用,在很大程度上决定了生产过程的经济性和生产技术的先进性。这些物理操作统称为化工单元操作,简称单元操作。“化工原理”是研究单元操作共性的课程。

需要强调指出,随着生产发展和技术进步,许多单元操作中利用到化学反应,如化学吸收、反应精馏、反应萃取等,从而使得过程速率提高,设备台数减少,缩短了生产工艺流程。

《化工原理》是沿用1923年世界上第一部系统阐述单元操作物理化学原理及定量计算方法的著作“Principles of Chemical Engineering”的名称。从以产品来划分的化工生产工艺中抽象出单元操作,是认识上的一个飞跃,从而奠定了化学工程作为一门独立工程学科的基础。化学工程是研究化学工业和其他过程工业生产中进行的化学过程和物理过程共同规律的一门工程学科。20世纪初,对于化学工程的认识仅限于单元操作。

我国于20世纪20年代开办了化学工程系,也开出了化工原理课程。新中国成立以后,我国先后出版了以单元操作为主线的《化工原理》、《化工过程及设备》、《化工操作过程原理与设备》等教科书。至今仍沿用“化工原理”这个名称。

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。计算机应用技术的快速发展,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,推动了特殊领域化学工程的进步,同时,

也拓宽了化工原理课程的研究内容。

二、单元操作的分类和特点

1. 单元操作的分类

各种单元操作根据不同的物理化学原理,采用相应的设备,达到各自的工艺目的。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和工程目的,将其划分为表 0-1 所列的主要类型。除表中所列之外,还有热力过程(制冷)、粉体或机械过程(粉碎、分级)等单元操作。

表 0-1 化工中常用单元操作

类别	单元操作	目的	原理	传递过程
流体动力过程	流体输送 沉降 过滤 搅拌	液体、气体的输送 非均相混合物分离 非均相混合物分离 混合或分散	输入机械能 密度差引起的相对运动 介质对不同尺寸颗粒的截留 输入机械能	动量传递
传热过程	换热 蒸发	加热、冷却或变相态 溶剂与不挥发溶质分离	利用温度差交换热量 供热汽化溶剂	热量传递
传质过程	蒸(精)馏 气体吸收 萃取 浸取 吸附 离子交换 膜分离	液体均相混合物分离 气体均相混合物分离 液态均相混合物分离 用溶剂从固体中提取物料 流体均相混合物分离 从液体中提取某些离子 流体均相混合物分离	各组分挥发度的差异 各组分在溶剂中溶解度不同 各组分在萃取剂中溶解度不同 固体中组分在溶剂中溶解度不同 固体吸附剂对组分吸附力不同 离子交换剂的交换离子 固体或液体膜的截留	质量传递
热质传递过程	干燥 增、减湿 结晶	固体物料去湿 调节控制气体中水气含量 从溶液中析出溶质晶体	供热汽化液体 气体与不同温度的水接触 利用物质溶解度的差异	热质同时传递

随着新产品、新工艺的开发或为实现绿色生产工艺,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,如参数泵分离、电磁分离、超临界技术和纳米技术等。同时,以节约能耗,提高效率或洁净无污染生产为特点的集成化工艺(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。

2. 单元操作的特点

单元操作是组成各种化工生产过程,完成一定加工目的的过程。同一单元操作在不同的生产过程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。另一方面,对于同样的工程目的,可采用不同的单元操作来实现。例如,一种均相液态混合物中组分的分离,既可用精馏方法,也可用萃取方法,还可用结晶或膜分离方法。究竟采用什么方法,要根据物料特性、工艺要求和综合技术经济分析作出抉择。

随着人们对单元操作研究的不断深入,逐渐发现若干个单元操作之间存在着共性。从本质上讲,所有的单元操作都可分解为动量传递、热量传递、质量传递这三种传递过程和它们的结合。三种传递过程中存在着类似的规律和内在的联系。“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。传递过程是单元操作的基础,从理论上揭示单元操作的原理,并为所研究的过程提供数学模型。传递过程是联系各单元操作的一条主线。

单元操作的研究内容包括“过程”和“设备”两个方面,故单元操作又称为“化工过程和设备”。“化工原理”是研究各单元操作的基本原理,所运用的典型设备结构和工艺尺寸设计,设备强化和选型的共性问题。

三、化工原理课程的研究方法

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,形成了两种基本的研究方法。

1. 试验研究方法(经验法)

该方法一般用量纲分析和相似论为指导,依靠试验来确定过程变量之间的关系,通过量纲为一数群(或称准数)构成的关系式来表达。它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进行深入分析的基础上,在抓住过程本质的前提下,作出某种合理简化,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。

需要强调指出,在计算机数学模拟技术快速发展的今天,试验研究方法仍不失其重要性,因为即使采用数学模型方法,模型参数的确定还需通过实验来完成。

研究工程问题的方法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。不同计算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、本课程的学习要求

该课程在化工类及相关专业(包括化工、石油、生物、制药、轻工食品、环境等)专门创新人才培养中具有举足轻重的地位。在教学的全过程中,本课程强调对学生工程观点、定量运算、实验技能及设计能力的培养,强调理论联系实际,增强创新意识。

具体地说,学生在学习本课程时,应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料特性,合理地选择单元操作及相应的设备。
- (2) 工程设计的能力 学习工艺过程计算和设备设计。当缺乏现成数据时,能够从网络或资料中查取,实验测取或到生产现场查定。
- (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,使之达到整体优化。
- (4) 过程开发或科学研究的能力 学习运用物理或物理化学原理去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 学习试验设计、单元操作实验、数据处理、误差分析方法,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。

0.2 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。例如,钢管长度为 2 m,“2”和“m”二者缺一均不能构成长度这个物理量。

一、单位和单位制度

在工程和科学中,由于历史、地区及学科的不同,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定律相关联,即

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

式中 F ——作用在物体上的力;

m ——物体的质量;

a ——物体在作用力方向上的加速度。

上述两种单位制度中又有米制单位与英制单位之分。

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单位具有“通用性”和“一惯性”的优点,在国际上迅速得到推广。

4. 中华人民共和国法定计量单位(简称法定单位制)

我国的法定计量单位除SI的基本单位、辅助单位及导出单位,又规定了一些我国选定的单位(详见附录一)。例如:时间可以用分(min)、小时(h)、日(d);质量还可以用吨(t);长度可以用海里(n mile)等。

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单位,目的是让读者练习单位之间的换算。

二、单位换算

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 3.2808。它们之间的换算关系为:

反应器的直径

$$D=1 \text{ m}=100 \text{ cm}=3.2808 \text{ ft}$$

同理,重力加速度 g 不同单位制之间的换算关系为:

$$\text{重力加速度} \quad g = 9.81 \text{ m/s}^2 = 981 \text{ cm/s}^2 = 32.18 \text{ ft/s}^2$$

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。常用物理量的单位换算关系可查附录二。

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。

【例 0-1】 某物质的比热容 $c_p = 1.00 \text{ BTU}/(\text{lb}\cdot^\circ\text{F})$, 试从基本单位换算入手,将其换算为 SI 单位,即 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。

解: 从本教材附录中查出基本物理量的换算关系为:

$$1 \text{ BTU} = 1.005 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ lb} = 0.4536 \text{ kg}$$

$$1^\circ\text{F} = 5/9^\circ\text{C}$$

$$\text{则 } c_p = 1.00 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{lb}\cdot^\circ\text{F}} \right) \left(\frac{1 \text{ lb}}{0.4536 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1.005 \text{ kJ}}{1 \text{ BTU}} \right) \left(\frac{1^\circ\text{F}}{5/9^\circ\text{C}} \right) = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

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。同一物理方程中绝对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,它是根据实验数据整理而成的公式,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。可采用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运算;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 0-2】 清水在圆管内对管壁的强制湍流对流传热系数可用下面经验公式表示,即

$$\alpha = 180(1 + 2.93 \times 10^{-3} T) u^{0.8} d^{-0.2}$$

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。

解: 本题为经验公式的单位换算。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的换算关系,导出物理量“数字”表达式,然后代入经验公式并整理,便将式中各物理量都变为所希望的单位。本例的具

体计算过程如下。

(1) 从附录中查出经验公式有关物理量新旧单位之间的换算关系为

$$1 \text{ BTU}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 5.678 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

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

$$1 \text{ in} = 2.54 \times 10^{-2} \text{ m}$$

热力学温度 T 及时间 θ 不必换算。

(2) 将原物理量的符号加上“'”以代表新单位的符号, 导出原符号的“数字”表达式。

$$\alpha \frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}} = \alpha' \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

因而

$$\alpha = \alpha' \left[\frac{\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}}{\frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}}} \right] \left[\frac{1 \frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}}}{5.678 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} \right] = \frac{\alpha'}{5.678}$$

同理

$$u = u' \left[\frac{\text{m/s}}{\text{ft/s}} \right] \left[\frac{3.2803 \text{ ft/s}}{1 \text{ m/s}} \right] = 3.2803 u'$$

$$d = d' \left[\frac{\text{m}}{\text{in}} \right] \left[\frac{1 \text{ in}}{2.54 \times 10^{-2} \text{ m}} \right] = 39.37 d'$$

(3) 将以上关系式代入原经验方程式, 得

$$\frac{\alpha'}{5.678} = 180(1 + 2.93 \times 10^{-3} T)(3.2803 u')^{0.8} (39.37 d')^{-0.2}$$

经整理得

$$\alpha = 1268.4(1 + 2.93 \times 10^{-3} T)(u')^{0.8} (d')^{-0.2}$$

去掉符号上标“'”, 得

$$\alpha = 1268.4(1 + 2.93 \times 10^{-3} T)u^{0.8} d^{-0.2}$$

应予指出, 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

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) 水的黏度 $\mu = 0.00856 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$

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

(3) 某物质的比热容 $c_p = 0.24 \text{ BTU}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{F})$

(4) 传质系数 $K_G = 34.2 \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{atm})$

(5) 表面张力 $\sigma = 74 \text{ dyn}/\text{cm}$

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

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

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

式中 H_E ——等板高度, ft;

G ——气相质量速度, $\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$;

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 ——液相黏度, 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。

思考题

1. 何谓单元操作? 如何分类?
2. 联系各单元操作的两条主线是什么?
3. 比较数学模型法和实验研究方法的区别和联系。
4. 何谓单位换算因子?

第一章

流体流动

学习指导

一、学习目的

通过本章学习,掌握流体在管内流动过程的基本原理和规律,并运用这些原理和规律分析和计算流体流动过程中的有关问题。本章主要内容包括:

- (1) 流体的重要性质,流体静力学方程及其应用;
- (2) 流体流动的若干基本概念,连续性方程、机械能衡算方程及其应用;
- (3) 流体内部分子及涡流动量传递原理,流体与壁面之间的对流动量传递原理,边界层与边界层分离现象;
- (4) 机械能损失与管流阻力(压力降)的概念,管内摩擦阻力、局部阻力的计算;
- (5) 简单管路、并联与分支管路的计算,气体(可压缩流体)输送管路、非牛顿型流体输送管路的计算;
- (6) 流速与流量的测量方法。

二、学习要点

1. 重点掌握的内容

- (1) 流体静力学方程的应用;
- (2) 管流连续性方程、机械能衡算方程的物理意义、适用条件及其应用;
- (3) 管路系统的摩擦阻力、局部阻力和总阻力的计算方法。

2. 学习时应注意的问题

(1) 流体流动原理(动量传递)是过程工业中流体的输送、流体-固体混合物系的分离、流体的分散与混合、固体流态化等单元操作的基础。此外,流体流动原理与传热、传质之间存在着非常密切的联系和类似性。因此,它也是许多与热量、质量传递相关的单元操作(如物料的加热与冷却、蒸发、吸收、精馏、萃取、干燥等)的基础。因此,从开始学习流体流动时就要学扎实,为后续课程的学习打好基础。

(2) 应用流体静力学方程、机械能衡算方程解题要绘图,正确选择衡算范围。

物质的常规聚集状态分为气、液、固三态,气体和液体合称为流体。在化工、石油、生物、制药、轻工、食品等工业中,所涉及的加工对象(包括原料、半成品与产品)多为流体。这些工业的共同特征是在流体流动过程中进行化学或物理加工,故称为过程工业,相应地把加工流体的设备称之为过程设备。因此,流体的流动规律是上述领域的共同基础。

其次,过程工业中进行传热、传质操作的物料大多是在流动状态下进行的,流体的流动状况极大地影响传热和传质过程的速率。因此流体流动规律又是研究传热、传质的基础。

本章重点讨论黏性流体流动的基本原理,并运用这些原理分析和计算流体的输送问题。

1.1 流体的重要性质

1.1.1 连续介质假定

流体是由大量的彼此之间有一定间隙的分子所组成,每个分子都处于永不停息的随机热运动和相互碰撞之中。因此,表征流体物理性质和运动参数的物理量在空间和时间上的分布是不连续的。但在工程技术领域,对流体物理性质和运动参数的表征是基于大量分子的统计平均特性,而不是单个分子的微观运动。为此引入流体的连续介质假定。

连续介质假定是将流体视为由无数流体微团或质点组成的连续介质。所谓流体微团或质点,是由大量分子组成的分子集合(以体积 $\Delta V'$ 表示)。宏观上 $\Delta V'$ 的几何尺寸很小,但包含足够多的分子;微观上其尺度远大于分子的平均自由程。在此体积中,流体的宏观特性即为其中的分子统计平均特性。

根据连续介质假定,流体是由连续分布的流体质点所组成,表征流体物理性质和运动参数的物理量在空间和时间上是连续的分布函数。

1.1.2 流体的密度

描述流体性质及其运动规律的物理量有密度、压力、组成、速度等。根据连续介质假定,任意空间点上流体的物理量是指位于该点上的流体质点的物理量。以流体的密度 ρ 为例,其物理意义是流体空间某点上单位体积流体的质量,即

$$\rho = \lim_{\Delta V' \rightarrow \Delta V} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

由于 $\Delta V'$ 很小,上式又可表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V' \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

由于流体是由连续的质点组成的,因此流体的密度是位置 (x, y, z) 和时间 θ 的函数

$$\rho = \rho(x, y, z, \theta)$$

在 SI 单位中, ρ 的单位为 kg/m^3 , 常见流体的密度参见本书附录。

液体的密度基本上不随压力变化(极高压力除外),但随温度略有改变。因此在查阅液体的密度数据时,一定要注意其所指的温度。

气体的密度随温度、压力改变。低压气体的密度(极低压力除外)可按理想气体状态方程计算,即

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

式中 ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

m ——气体的质量, kg ;

V ——气体的体积, m^3 ;

M ——气体的摩尔质量, g/mol ;

p ——气体的绝对压力, kPa ;

T ——热力学温度, K ;

R ——摩尔气体常数, 其值为 $8.314 \text{ J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ 。

高压气体的密度可用实际气体的状态方程进行计算。

过程工业中所遇到的流体, 多为含有若干组分的混合物。混合物的密度 ρ_m 可以通过纯物质的密度进行计算。

液体混合物的组成常用质量分数表示。以 1 kg 液体混合物为基准, 设混合物中各纯组分的密度分别为 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n (\text{kg}/\text{m}^3)$, 各组分的质量分数分别为 w_1, w_2, \dots, w_n , 且混合前后的体积不变(理想溶液), 则 1 kg 液体混合物的体积等于各组分单独存在时体积之和, 即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-2)$$

气体混合物的组成常用体积分数 φ 来表示。以 1 m^3 混合气体为基准, 设气体混合物中各组分的体积分数分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, 则各组分的质量分别为 $\varphi_1 \rho_1, \varphi_2 \rho_2, \dots, \varphi_n \rho_n$ 。于是 1 m^3 混合物的质量等于各组分的质量之和, 即

$$\rho_m = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \dots + \rho_n \varphi_n \quad (1-3)$$

1.1.3 流体的可压缩性与不可压缩流体

一、流体的可压缩性

在外力作用下, 流体的体积将发生变化。当作用在流体上的外力增加时, 流体的体积将减小, 这种特性称为流体的可压缩性。

流体的可压缩性通常用体积压缩系数 β 来表示。其意义为在一定温度下, 外力每增加一个单位时, 流体体积的相对缩小量

$$\beta = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (1-4)$$

式中, v 为单位质量流体的体积, 即流体的比容 (m^3/kg), 负号表示压力增加时, 体积缩小。

由于 $\rho v = 1$, 故有

$$\rho dv + v d\rho = 0$$

据此, 式(1-4)又可以写成

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-5)$$

二、不可压缩流体

由以上讨论可知, β 值越大, 流体越容易被压缩。通常液体的压缩系数都很小, 甚至某些液