

21世纪高等院校课程教材

流体

力学与传热

■ 邹华生 钟理 伍钦 主编

华南理工大学出版社

流体力学与传热

邹华生 钟理 伍钦 主编

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

本书以动量传递和热量传递基本理论为主线,以工程应用为背景,论述了流体流动输送、颗粒与流体之间相对运动(包括颗粒的沉降分离、过滤分离)、传热过程与设备以及蒸发等单元操作的基本原理、典型设备的主要特征和设计计算方法。

全书共五章,内容包括:流体力学与应用,流体输送机械,非均相机械分离,传热及换热设备和蒸发。

本书注重工程实际问题处理方法的介绍,列举了较多的典型例题、习题,便于读者理解和掌握单元操作的基本原理和计算方法,培养分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高等院校化工工艺类及相关专业教材,也可作为从事石油、化工、制药、食品、环境、材料等科研、设计和生产的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学与传热/邹华生,钟理,伍钦主编.—广州:华南理工大学出版社,2004.8

ISBN 7-5623-2084-5

I. 流… II. ①邹… ②钟… ③伍… III. ①流体力学-高等学校-教材 ②传热-高等学校-教材 IV. ①O35 ②TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 050457 号

总 发 行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail:scut202@scut.edu.cn

http://www.scutpress.com

责任编辑:张 颖

印 刷 者:广东省阳江市教育印务公司

开 本:787×1092 1/16 印张:18.75 字数:450 千

版 次:2004 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1~3 000 册

定 价:30.00 元

版权所有 盗版必究

序

“化工原理”是化工工艺类及其相关专业的骨干课程,该课程以化工生产中单元操作为主线,以工程应用为背景,重点研究和讨论主要的化工单元操作的基本原理、过程、计算方法,介绍常见化工单元设备的结构特点和操作性能,使过程的原理与所用的设备有机结合,并为化工过程进一步开发和效率的提高指出方向。因此,它在化工工艺类及相关专业的课程体系中占有十分重要的位置。传统的“化工原理”课程强调实践性,而在理论性与系统性方面显得薄弱,这与培养 21 世纪具有创新能力的高素质人才要求不相适应。为加强该主干课程的理论基础,本书作者将传统的“化工原理”和“化工传递过程原理”有机整合,使之具有理论与实践并重的特点,并依据传递过程理论和单元操作的特点,将整合后的内容开设为“流体力学与传热”和“传质与分离工程”两门课程,相应地编写出版了两本教科书。这样做不仅可以满足教育改革的需要,在大幅度减少授课时情况下,而不削弱课程体系力度,同时,还可以厚实学生的基础。

本书作者邹华生博士、钟理博士和伍软老师是受过系统高学历教育的年轻教授,都有 20 余年的化工原理课程教学经验。其中,钟理博士曾在美国密西西比州立大学讲授过“流体力学与传热”课程两年。他们在长期的教学和科研实践中,积累了丰富的经验和资料。本教材体系不仅加深了理论基础,拓宽了课程内容,同时注意吸收、消化化工及相关领域的新理论、新方法、新技术、新设备,介绍学科前沿的发展动态及最新成果,力求达到教材的科学性、先进性、时代性和实用性的统一,使之在培养学生创新能力和实践能力中发挥更大的作用。

《流体力学与传热》一书以动量传递和热量传递基本理论为主线,以工程应用为背景,论述了流体流动输送、颗粒与流体之间相对运动(包括颗粒的沉降分离、过滤分离)、传热过程与设备以及蒸发等单元操作。结合具体实例,对不同层次的理论和工程问题采取多样化处理方法和数学推导,以求扩大眼界,增加知识面,培养学生处理问题的灵活性。同时,本教材注重工程实际问题处理方法的介绍,以增强工程观点。

为了便于学生理解和掌握单元操作基本原理和计算方法,培养分析问题和解决问题的能力,该教材还列举了较多的典型例题、习题、思考题,同时还列出适当的讨论题,作为安排专题讨论课时参考。

本书内容丰富,层次分明,逻辑性强,论述问题具有相当深度,也反映了我国化工教学改革的特色。它的出版是十分需要的,也是很及时的。我很乐意向读者推荐本书,相信它有助于化工类及相关专业(包括化工、工程制药、材料、生物工程、造纸、环境工程、冶金、石油和核能等)教学水平的进一步提高,对阅读本书的科研、设计和生产单位的工程技术人员也有所裨益。

华南理工大学
化工学院教授

陈焕钦

2004 年 3 月 22 日

前 言

培养厚基础、宽口径、强能力、具有创新意识和实践能力的高级专门人才是高等院校的基本任务。本书以实现该任务为宗旨,根据《教育部高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的要求和精神编写。

“化工原理”课程是一门实践性很强的技术基础课,但其理论性与系统性较为薄弱。国际化工知名学者、美国普林斯顿大学 James Wei 教授在回顾化工高等教育一百多年历史,展望未来发展时指出:“化学工程学科与材料、环境、生物等领域交叉融合,其工程基础学科的重要性必将有进一步的加强。”本书为加强化工类主干课程的理论基础,将传统的“化工原理”和“化工传递过程原理”有机结合,使之具有理论与实践并重的特点,并依据传递过程理论和单元操作的特点,将整合后的内容开设为“流体力学与传热”和“传质与分离工程”两门课程。

本教材体系不仅加深了理论基础,拓宽了课程内容,同时注意吸收消化化工及相关领域的新理论、新方法、新技术、新设备,介绍学科前沿的发展动态和其他学科最新成果,力求达到科学性、先进性和实用性的统一,使之在培养学生创新能力和实践能力中发挥更大的作用。

本书以动量传递和热量传递基本理论为主线,以工程应用为背景,论述了流体流动输送、颗粒与流体之间相对运动(包括颗粒的沉降分离、过滤分离)、传热过程与设备以及蒸发等单元操作。本书结合具体实例,对不同层次的理论和工程问题采取多样化的处理方法,简繁结合。有主有次的数学手段对不同的流体流动问题进行讨论,以求扩大眼界,增加知识面,培养学生处理问题的灵活性。同时本教材注重工程实际问题处理方法的介绍,以增强工程观点。

本书由华南理工大学化工与能源学院邹华生、钟理、伍钦主编。其中绪论、第 1 章、第 2 章、第 3 章和附录由邹华生编写,第四章由钟理编写,第五章由伍钦编写。华南理工大学梅慈云教授和中山大学祁存谦教授担任主审。

本书可作为化工类及相关专业(包括化工、工程制药、材料、生物工程、造纸、环境工程、冶金、石油和核能等)的教材,也可作为相关科研、设计和生产单位工程科技人员的参考书。

本书的出版得到华南理工大学教务处的支持。华南理工大学化工与能源学院和学校的有关专家、教授为本书的编写提出了许多宝贵意见和建议。在此,我们致以诚挚的谢意。

由于水平有限,书中难免存在缺点和错误,敬请同仁和读者批评指正。

编者

2004 年 4 月

目 录

0 绪论	1	1.4.2 纳维尔-斯托克斯 (Navier-Stokes)方程	29
0.1 化工生产过程与单元操作	1	1.4.3 机械能衡算	31
0.1.1 化工生产过程	1	1.5 管内流动阻力与能量损失	37
0.1.2 化工生产过程的特点	2	1.5.1 流体阻力与范宁公式	37
0.2 化工过程科学的产生与发展	2	1.5.2 层流时的阻力损失计算	39
0.2.1 化工过程的历史使命	2	1.5.3 量纲分析方法	39
0.2.2 单元操作	3	1.5.4 湍流时摩擦损失的计算	41
0.2.3 学习任务	3	1.5.5 局部阻力损失	45
0.3 “化工原理”研究方法	4	1.6 流体流动和静力学方程的应用	49
0.4 理论分析的三大法规	4	1.6.1 简单管路计算	49
0.4.1 质量守恒定律及物料衡算	4	1.6.2 复杂管路	51
0.4.2 能量守恒定律及能量衡算	6	1.6.3 可压缩流体管路计算	56
0.4.3 平衡关系与过程速率	6	1.6.4 流量测量	57
0.5 单位及单位换算	7	习题 1	64
0.5.1 目的与意义	7	思考题	68
0.5.2 各种单位制的异同点	7	2 流体输送机械	70
1 流体力学与应用	9	2.1 液体输送机械	70
1.1 概述	9	2.1.1 离心泵	70
1.1.1 流体的连续性与特征	9	2.1.2 离心泵的主要性能参数	75
1.1.2 作用在流体上的力	9	2.1.3 离心泵特性曲线	76
1.1.3 非牛顿型流体	11	2.1.4 离心泵的工作点和流量调节	81
1.2 流体静力学	12	2.1.5 离心泵安装高度	85
1.2.1 流体密度	12	2.1.6 离心泵的型号与选用	88
1.2.2 压强及其表示方法	13	2.2 其他类型的泵	91
1.2.3 流体静力学基本方程	14	2.2.1 往复泵	91
1.2.4 流体静力学基本方程在工程的 中应用	15	2.2.2 计量泵	92
1.3 流体流动现象	19	2.2.3 旋转泵	93
1.3.1 流动过程与基本概念	19	2.3 气体输送机械	94
1.3.2 流动型态	21	2.3.1 离心式风机	95
1.3.3 圆管内稳定流动过程数学分析 2	24	2.3.2 旋转鼓风机	98
1.3.4 边界层简介	26	2.3.3 往复式压缩机	98
1.4 质量、能量和动量衡算	27	2.3.4 真空泵	100
1.4.1 连续性方程	28	习题 2	101
		思考题	103

3 非均相机械分离	105	4.5 流体无相变时的对流表面传热系数	158
3.1 颗粒与颗粒群特性	105	4.5.1 流体在管内作强制对流	158
3.1.1 颗粒与颗粒群的特点	105	4.5.2 流体在管外强制对流传热	162
3.2 颗粒的沉降	109	4.6 有相变流体的对流传热	165
3.2.1 颗粒在流体中的沉降过程	109	4.6.1 蒸气冷凝传热	165
3.2.2 重力沉降设备	113	4.6.2 沸腾传热	169
3.2.3 离心沉降与设备	115	4.7 辐射传热	173
3.3 过滤	119	4.7.1 基本概念和定律	173
3.3.1 概述	119	4.7.2 两固体间的辐射传热	177
3.3.2 过滤设备	120	4.7.3 对流和辐射的联合传热	179
3.3.3 过滤基本方程式	123	4.8 总热流量和传热过程计算	180
3.3.4 过滤生产能力及滤饼洗涤	129	4.8.1 热流量方程	181
习题3	132	4.8.2 热量衡算	181
思考题	133	4.8.3 总传热系数	182
4 传热及换热设备	135	4.8.4 换热器的平均温度差	185
4.1 概述	135	4.8.5 传热效率法	191
4.1.1 传热的基本方式及其机理	135	4.9 换热器	194
4.1.2 冷、热流体热量传递方式及换热设备	136	4.9.1 换热器的类型	194
4.2 能量方程	137	4.9.2 强化传热技术及新型的传热设备	201
4.2.1 能量方程的推导	138	4.9.3 列管式换热器设计时应考虑的问题	203
4.2.2 能量方程的特定形式	141	习题4	209
4.2.3 柱坐标系和球坐标系中的能量方程	142	思考题	214
4.3 热传导	143	5 蒸发	215
4.3.1 热传导基本概念和傅立叶定律	143	5.1 蒸发设备	215
4.3.2 傅立叶(Fourier)定律	144	5.1.1 短管蒸发器	215
4.3.3 导热系数	144	5.1.2 外加热式和强制循环式蒸发器	216
4.3.4 平壁的稳态热传导	145	5.1.3 膜式蒸发器	217
4.3.5 圆筒壁一维稳态热传导	147	5.2 溶液沸点校正	218
4.3.6 有内热源的一维稳态热传导	150	5.2.1 溶质引起的沸点改变	218
4.4 对流传热	150	5.2.2 液柱静压头引起的沸点变化	219
4.4.1 对流传热及其类型	150	5.2.3 摩擦阻力引起的温度变化	220
4.4.2 对流传热速率与对流表面传热系数	153	5.3 单效蒸发	220
4.4.3 对流表面传热系数的影响因素	153	5.3.1 物料衡算	221
4.4.4 与传热有关的准数及准数关联式的确定方法	155	5.3.2 热量衡算	221
		5.3.3 蒸发器传热面积	222
		5.4 多效蒸发	223

5.4.1 多效蒸发的流程	223	附录三 饱和水蒸气表	243
5.4.2 多效蒸发的计算	225	附录四 干空气的物理性质	247
5.4.3 蒸发传热面积	227	附录五 液体水溶液的物理性质	248
5.4.4 多效蒸发的综合分析	234	附录六 气体的重要物理性质	265
习题 5	237	附录七 固体性质	271
思考题	238	附录八 管子规格	273
附录一 化工常用法定计量单位与常用单位 的换算	239	附录九 泵与风机	276
附录二 水的物理性质	242	附录十 换热器	281
		参考文献	287

绪论

0.1 化工生产过程与单元操作

0.1.1 化工生产过程

从自然界得到的物质绝大多数都不能直接满足人们的某种要求,因此,需要对物料进行大规模的物理或化学加工,以求得到合乎人们某种要求的产品。对物料进行大规模的物理或化学加工的过程称为化学工业生产过程,简称化工过程。如以酒精和苯为原料生产聚苯乙烯的过程,见图 0-1。

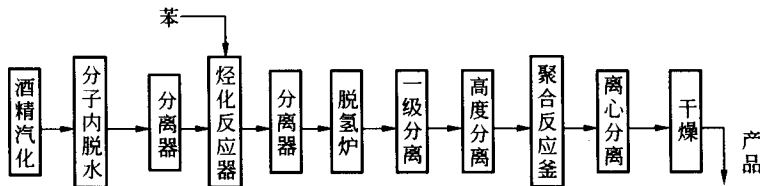


图 0-1 合成聚苯乙烯过程

液态酒精经过汽化后,进入脱水反应器,发生分子内脱水,生成乙烯;从反应后的混合物中分离出乙烯,与苯一道送入烷化反应器,在催化剂作用下发生烷化反应生成乙苯;然后从反应后的混合物中提纯乙苯,并送入脱氢反应器,在脱氢催化剂作用下乙苯脱氢生成苯乙烯和其他副产物。为了得到高纯度苯乙烯单体,需要对脱氢后的混合液进行高度分离,得到含量为 99.99% 精苯乙烯,并送入聚合反应釜,在引发剂作用下聚合生成聚苯乙烯,经过熟化后,将聚苯乙烯颗粒与悬浮介质分离并经过干燥后得到产品。

用煤、水蒸气和空气为原料生产 NH_3 的过程见图 0-2。

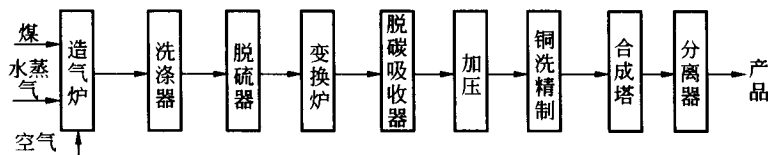


图 0-2 合成氨生产过程

煤、空气和水蒸气在造气炉中反应,生成水煤气。水煤气中含有大量碳粒,需进入洗涤器除尘。为防止水煤气中 H_2S 对后继设备的腐蚀和防止催化剂的中毒,水煤气需经过脱硫。为除去水煤气中碳氧化物,需将其中的 CO 变化成 CO_2 , 然后通过吸收脱碳,得到

基本符合氨合成化学反应配比所要求的原料气。原料气经过加压以满足合成压力的要求。为防止原料气中残留的微量 CO 对合成催化剂的毒性,需将原料气与铜氨液反应,最后得到合格的原料气进入合成塔发生合成反应生成氨,从反应后的混合物中分离出产品——氨。

0.1.2 化工过程的特点

聚苯乙烯和氨分别是有机化工和无机化工比较典型的产品。从这两个化工生产过程的例子可以看出,尽管用不同原料生产不同产品的化工过程相差很大,但它们都是由若干个简单过程按一定的顺序和方式组合而成的。这些简单过程可以分为两类:物理过程(如输送、分离、干燥、汽化、加压等)和化学过程(脱水、聚合、造气、脱硫、变换、合成等)。对这两类过程的内在规律,设备的构造、设计、操作、控制,以及全过程的开发与优化研究就形成了化学工程这门科学。“化工原理”就是这门科学的一个分支,它只研究化工过程中的物理操作过程。

0.2 化工过程科学的产生与发展

0.2.1 化工过程的历史使命

化学工艺是一门很古老的技术,而“化学工程”作为一门系统的科学,其历史只有 100 多年。这是因为最初的化工生产规模较小,生产过程不很复杂,技术要求不高,因此只凭工艺技师和熟练工人的经验就可以组织并进行生产。

18 世纪中期工业革命兴起,工业界发生了一场巨大的革命。化学工业同样受到很大的触动。机器的出现是工业革命的起点,机械化首先在投资少、见效快的轻纺工业得到发展。由于纺织机械化使纺织品产品产量大幅度提高,传统的漂白、染色工艺远不能适应其发展现状。那时,在英国用类似酸牛奶一样的有机酸和海藻烧制的草木灰作为酸碱用于漂白和染色,这样来源的酸和碱显然不能满足纺织机械化的需要。这就迫使人们将实验室制取少量硫酸的实验方法进行改革、放大,转变成工业生产,同时开发出利用食盐和硫酸为原料制备纯碱的方法,以同时满足纺织、造纸、肥皂、玻璃等工业对酸碱的需要。

工业革命带来的是大量机器的制造,增加了对金属材料,特别是钢铁的需要,因而推动了炼铁的发展。在炼铁中使用大量的焦炭是从煤炼焦过程得到的。炼焦过程产生大量“黑色油状液体”,当时人们对“黑色油状液体”缺乏认识,而作为废物弃置,造成严重的环境污染,在英国等欧洲国家引起公害,而且造成很大的浪费。这迫使当时的化学家们对“黑色油状液体”进行分析,并加以利用。化学家们克服重重阻力,先后从“黑色油状液体”——煤焦油中分离出苯、甲苯、酚、萘、蒽等多种芳香烃化合物,为合成染料、医药品提供了原料,从而大大推动了染料、医药工业的发展。

无机化学工业和有机化学工业规模的迅速发展,要解决日益发展而又复杂的化工生产过程中出现的新问题,迫切需要既懂机械又熟悉化工生产的技术人才。为培养和造就这种专门人才,化学工程这门科学应运而生。

化学工程是一门工程技术科学,它研究化学工业生产过程机械和设备的规律性,并把这些规律应用到化工过程装置的开发、设计、操作、管理、强化以及自动化控制等工作中。经过不断发展、补充、完善,已经成为一门系统的科学。它包括化工单元操作、化工反应工程、化工系统工程、化工过程电子计算和优化等分支。

0.2.2 单元操作

0.2.2.1 单元操作的概念

单元操作是“化学工程”这门工程技术科学最早和最基本的内容。回顾前述两个化工生产过程可知,任何一个化工过程都包含相当数量的物理操作,如传热、精馏、干燥、离心分离、输送、吸收、过滤等。这些操作都是物理过程,称为单元操作。它一般占整个化工过程的80%左右。单元操作具有如下特点:

- (1)操作中只有物理变化而无化学变化;
- (2)它们是化工生产过程中共有的操作;
- (3)同种单元操作在不同的化工过程中的操作原理不变。

由于单元操作具有上述共性并种类有限,因此,将他们从数以万计的化工过程中抽取出来进行研究,形成了“化工原理”这门化工类工程学科。利用各种单元操作模块与特征反应模块科学有序组合,就可以开发多种多样满足新产品生产的化工过程。

0.2.2.2 单元操作的分类

化工生产过程的单元操作种类较多,但按照它们内在的理论进行分类的话,有下面三种类型:

- (1)以流体力学为基础的,包括流体输送、沉降、过滤、离心分离等;
- (2)以热量传递理论为基础的,包括加热、冷却、冷凝、蒸发等;
- (3)以质量传递理论为基础的,包括蒸馏、吸收、萃取、干燥等。

这三类单元操作人们常称之为三传(动量传递、热量传递、质量传递)。实际上,在许多单元操作设备中,所进行的往往并非单一的单元操作过程,而是多种单元操作过程同时发生,此时常根据过程中矛盾的主次进行分类。随着科学技术的不断进步,出现了一些新型的分离技术,如超重力场分离、超临界萃取、膜分离和电磁分离等,这些技术往往是由多种理论和技术的交叉和结合而产生的。

0.2.3 学习任务

“化工原理”是建立在数学、物理、物理化学、工业化学等基础课程上的一门技术基础课。它既要研究各种单元操作理论上的可能性,又要研究工程技术上的可行性和经济上的合理性。作为一门工程范畴的课程,其主要学习任务有:

- (1)掌握各种单元操作过程的基本原理,典型设备的构造、性能以及操作原理;
- (2)掌握这些过程和典型设备的设计、计算方法和操作管理;
- (3)寻找适宜的操作条件,探索强化过程的方向及改进设备的途径。

0.3 “化工原理”研究方法

大家知道,用数学的方法进行研究处理是最严密和科学的。然而,由于化工过程的复杂性,以及求解数学方程的限制,使得至今对于多数化工单元操作的研究无法从纯理论上用数学手段完成,而是用理论和实验相结合的办法来研究化工单元操作。因此,实验课在“化工原理”这门课程中占有相当重要的位置。

0.4 理论分析的三大法规

0.4.1 质量守恒定律及物料衡算

0.4.1.1 质量守恒

在化工过程中或具体单元操作中,往往会碰到这样的一些问题。输入量为 $q_{m,\text{in}}$ 的物料,经过某一单元操作后,可以得到的产品、副产品等各为多少?液体流过某一单元设备时,设备内物料量怎么变化?物料从一相转移到另一相后,各相物质的量怎么变化?这些问题都涉及物料在过程前后的变化情况,要解决这些问题就必须进行质量衡算。

0.4.1.2 质量衡算的定义

质量衡算是质量守恒定律在化工过程中的具体运用。根据质量守恒定律,进入任何系统的物料质量必须等于离开该系统的物料质量与过程中物料质量积累之和,用以下公式表示:

$$\text{输入物质量 } q_{m,\text{in}} = \text{输出物质量 } q_{m,\text{o}} + \text{积存量 } M$$

$q_{m,\text{in}}$ 为质量输入速率, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; $q_{m,\text{o}}$ 为质量输出速率, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; $M = \frac{dm}{dt}$ 为质量积累速率, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

大多数化工生产过程一般都是连续稳定的过程,也就是说过程中无物料积累,即稳定条件下的质量衡算式为

$$\text{输入物质量 } q_{m,\text{in}} = \text{输出物质量 } q_{m,\text{o}}$$

进行质量衡算应注意以下几点:

- (1) 上述衡算只有在质量衡算时才具有普遍性,物质的量和体积衡算往往不存在。
- (2) 用质量衡算来说明物料流过某一设备时的情况,对于非稳定过程:

① $q_{m,\text{in}} > q_{m,\text{o}}$, 则 $M = \frac{dm}{dt} > 0$, 设备内物料质量越积越多;

② $q_{m,\text{in}} < q_{m,\text{o}}$, 则 $M = \frac{dm}{dt} < 0$, 设备内物料质量逐渐减少。

- (3) 若物料是一种混合物。假设为 $A + B$ 混合物,对其中组分 A 进行质量衡算,就有

$$q_{m,\text{in},A} = q_{m,\text{o},A} + \frac{dm_A}{dt}$$

0.4.1.3 质量衡算的方法和步骤

结合下面的例子,说明物料衡算的过程。

例 0-1 将两台蒸发器串联用于连续浓缩 NaOH 溶液。NaOH 溶液的处理量为 $5\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$, 质量分数为 12%, 要求 NaOH 溶液经第一台蒸发器浓缩到 20% 后, 送入第二台蒸发器浓缩到 50% 作为产品。试计算两台蒸发器分别每小时蒸发的水量和 NaOH 产品量。

解 第一步:画一简单的过程示意图,方框代替设备,箭头表示物流方向;

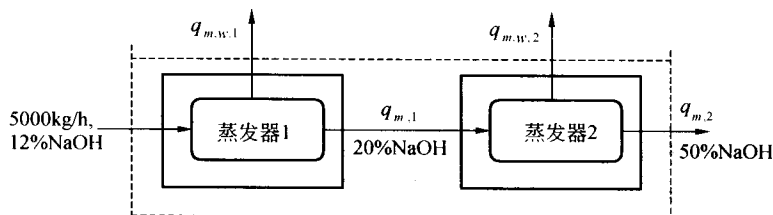


图 0-3 例 1 过程图

第二步:划定衡算范围,范围的划定比较灵活,可单独把每个蒸发器作为衡算对象(图中内虚线框),也可以把两个蒸发器合并作为一个衡算对象(图中外虚线框),但总原则是,所要求的物流箭头应穿过界面,并便于列方程求解问题。

第三步:规定衡算基准,目的在于使衡算方程式中各个量都具有统一的度量基准。原则上根据解题方便来选择基准。本例题给出的物流基准是以小时计,所以计算的基准取 1h。

第四步:列衡算方程,对蒸发器 1 物料衡算

$$5000\text{kg}\cdot\text{h}^{-1} = q_{m,w,1} + q_{m,1} \quad (0-1)$$

对 NaOH 物料衡算

$$5000\text{kg}\cdot\text{h}^{-1} \times 12\% = q_{m,w,1} \times 0\% + q_{m,1} \times 20\% \quad (0-2)$$

由式(0-2)解得

$$q_{m,1} = 3000\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$$

代入式(0-1)得

$$q_{m,w,1} = 2000\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$$

对蒸发器 2 物料衡算

$$q_{m,1} = q_{m,w,2} + q_{m,2} \quad (0-3)$$

对 NaOH 物料衡算

$$q_{m,1} \times 20\% = q_{m,w,2} \times 0\% + q_{m,2} \times 50\% \quad (0-4)$$

将 $q_{m,1} = 3000\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 代入式(0-4),得

$$q_{m,2} = 1200\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$$

代入式(0-3)得

$$q_{m,w,2} = 1800\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$$

思考题: 水以 $150\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 的流率,食盐以 $30\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 的流率加入搅拌槽中,制成溶液后,以 $120\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 的流率离开容器,由于搅拌充分,槽内质量浓度各处均匀。开始时槽内先盛有新鲜水 100kg。试计算 1h 以后从槽中流出的溶液质量浓度。

0.4.2 能量守恒定律及能量衡算

0.4.2.1 能量衡算的目的与意义

化工生产中无论是化学过程还是物理过程,往往伴随着能量的变化。能量变化的结果是过程对外输出能量,还是需要外界对过程输入能量? 输出或输入的能量多大? 这些问题都涉及能量的传递与转化。对于这样一类问题,一般必须用能量守恒定律才能解决。能量衡算是能量守恒定律在化工过程中的具体应用。

0.4.2.2 能量衡算的定义

对于单元操作过程,能量衡算方程为

$$\text{输入的能量} = \text{输出的能量} + \text{积累的能量}$$

对稳定过程,能量的积累为 0,所以输出的能量 = 输入的能量。

上述的能量包括机械能、热量和其他形式的能量。如果只有热能一种能量,上述的衡算式叫热量衡算式。

0.4.2.3 有关问题

能量衡算的具体步骤、原理与质量衡算的相同,不再举例。但用焓表示热能参与能量衡算时,应指出基准温度。所以能量衡算有两个衡算基准。

0.4.3 平衡关系与过程速率

0.4.3.1 推动力

在物理学中,物体克服阻力进行运动,就必须有推动力。与此类似,化工生产中的任何一种单元操作要得以进行,必定存在相应的推动力。如流体流动时总势能差,冷热物体间的传热过程的温差,扩散过程中的浓度差等等。推动力对过程的影响有三方面:①决定过程进行的方向,过程总是自发地朝推动力减小的方向发展;②影响过程的速率,推动力大,过程的速率大;反之,过程的速率小;③揭示过程达到平衡时的条件。对于不同的单元操作过程,其推动力的具体物理形式不同,但只要推动力等于 0 时,过程的速率为 0,这时过程达到平衡。

平衡是相对的,有条件的。一旦条件发生改变,平衡就会被破坏。平衡是任何一种过程在一定条件下进行的限度,相对于实际情况来说,它是一种理想的情况。

0.4.3.2 过程速率

化工过程可以说是生产财富的,因此人们总是希望过程的速率越快越好,这样可以节省时间,提高设备生产能力。过程的速率大小由过程推动力和过程阻力这样一对矛盾来决定。对于不同的过程,其推动力和阻力的具体物理形式各不相同,应具体情况具体分析。过程速率通常表示为

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

即过程速率与推动力成正比,与阻力成反比。

0.5 单位及单位换算

0.5.1 目的与意义

在用某一个正确的公式进行计算时,首先必须使公式中每个物理量在相同的单位制下,这样计算才能得到正确结果。由于历史上沿用过工程单位制和物理单位制,而这些单位制与我国目前法定的国际单位制(SI)有较大区别。从不同资料得到的物理数据,往往具有不同的单位制,因此,科研、工程技术人员经常碰到单位换算问题。

0.5.2 各种单位制的异同点

0.5.2.1 物理量大小的构成要素

表征一个物理量的大小由两个要素构成。一是单位,单位的作用在于表明该物理量的性质,并给出度量的基准。二是数字,它说明该物理量等于多少个度量单位。人们所涉及的物理量有成千上万种,各物理量之间往往相互联系,因此,可从这么多的物理量中选定若干个独立的物理量作基础。作为基础的物理量称为基本物理量。根据这些基本物理量的性质给定其基本单位,然后通过物理定律或定义就可以推导出其他所有物理量的单位。根据所选的基本物理量及其单位,构成了特定的单位系统或单位制。

0.5.2.2 常用的单位制

目前我国实行的法定单位制为 SI 制。我国以前常用工程单位制(MKGFS 制)和物理单位制(CGS 制),这三种单位制的区别在于它们的基本物理量或基本单位不同,如表 0-1 所示。

表 0-1 三种单位制的基本物理量和基本单位

基本物理量 基本单位		长度	质量	力	时间	温度	物质的量
法定单位制(SI)		米(m)	千克(kg)		秒(s)	开尔文(K)	摩尔(mol)
工程单位制(MKGFS)		米(m)		千克力(kgf)	秒(s)	度(°C)	摩尔(mol)
物理单位制(CGS)		厘米(cm)	克(g)		秒(s)	度(°C)	摩尔(mol)

值得一提的是,完整的国际单位制(SI)有 7 个基本物理量,除表 0-1 中所列 5 个基本物理量外,还有两个基本物理量,它们是光强度(坎德拉)和电流(安培),但由于这两个基本物理量在化工中较少涉及,所以表中未列出。

从表 1 可见,不同的单位制的区别:①基本物理量不同。如在 SI 制中基本物理量是长度、质量、时间、温度和物质的量。在工程单位制中基本物理量是长度、力、时间、温度和物质的量。由此可见 SI 制与工程单位制的根本区别在于前者以质量作为一个基本物理量,而后者以力作为一个基本物理量。②基本物理量的基本单位不同。如 CGS 制与 SI 制,它们的基本物理量相同,但基本量中的长度、质量的基本单位大小不同。

0.5.2.3 各种单位制之间的换算

1. CGS 制与 SI 制之间的换算

由于这两种单位制的基本物理量相同,只是基本单位的大小不同,因此这两种单位的换算比较简单。除了热物性方面的单位(导热系数、比热容)换算要用到热功当量 $1 \text{ 卡} = 4.1868 \text{ J}$,其他物理量的换算往往是 10 整数倍。

2. SI 制与工程单位制(Engineering Unite System)之间的换算

在 SI 制中质量是基本量,而力是导出量 $F = mg$;而在工程单位制中力是基本量,质量 $m = F/g$ 是导出量。因此,这两种单位制间的换算主要依据是牛顿第二定律。

大家知道,地球上任何 1 kg 质量的物体,所受到的重力为 1 kgf ,并产生 $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的加速度。SI 制的力与工程单位制的力之间换算,或 SI 制中的质量与工程单位制中的质量换算遵守牛顿第二定律。

力的换算

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 9.81 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

质量的换算

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

例 0-2 一标准大气压 1 atm 的压力等于 $1.033 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$,将其换算成 SI 制单位。

解 SI 制的压力单位是帕 $\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$,因此,就是把 kgf 换算为 N ; cm^2 换算为 m^2 。

所以

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 1.033 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2} \times 9.81 \text{ N} \cdot \text{kgf}^{-1} \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-2} \\ &= 1.013 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

例 0-3 在物理单位制中 4°C 水的密度为 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,换算成 SI 制和工程单位制各为多少?

解 SI 制 $\rho = 1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{g}^{-1} \times 10^6 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3} = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

工程制

$$\begin{aligned} \rho &= 1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{g}^{-1} \times \frac{1}{9.81} \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \times 10^6 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-3} \\ &= 102 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4} \end{aligned}$$

1 流体力学与应用

化工过程处理加工的主要对象是流体,即气体与液体,因此,流体输送是化工过程不可缺少的单元操作之一。它的理论基础是流体流动规律,而且这个规律对处于流动状态下流体的对流传热、传质过程也有极其重要的影响。应用流体流动规律实现流体输送,具体要解决如下几个主要工程问题:(1)流体在输送系统中压强的变化与测量;(2)输送管路与所需功率的计算;(3)流量测量;(4)输送设备的选型与操作;(5)根据流体流动规律减小输送能耗,强化化工生产设备中传热、传质过程等。在解决这些工程问题之前,须对输送对象作些定性讨论。

1.1 概 述

1.1.1 流体的连续性与特征

1.1.1.1 流体质点及连续性介质

流体由大量分子组成,分子间有间隙,每个分子都在不断地、杂乱无章地运动,因此从分子角度来看,流体是不连续的,运动是无规则的。

在绝大多数工程应用中,人们关心的是大量流体分子总的宏观运动结果,因此,需要取由大量分子组成的流体质点(流体微团)为最小单位来研究流体的机械运动。所谓流体质点是保持其宏观力学性的最小流体单元,流体质点的尺寸远远大于分子自由程,同时又远小于设备尺寸,这样就可以认为流体是由无数彼此相连的流体质点组成,是一种连续性介质,由此,流体的物理性质和运动参数也相应是连续分布。不过,流体的连续性在分子密度稀薄的高真空中将不成立。因为此时气体分子的平均自由程可与设备的特征尺寸相比拟。

1.1.1.2 流体的特征与压缩性

流体分子间的距离较大,当流体受到外部剪切力作用时,易于变形产生流动。在外部压力和温度的作用下,流体分子间的距离会发生一定的改变,表现为密度大小的变化。尤其是气体分子间距离较大,所以气体密度受外压作用变化较为显著,故称之为可压缩性流体;液体分子间距离较小,所以液体的密度受外压作用变化较小,若外压不是很大的情况下,外压作用使液体密度的变化可以忽略,液体称为不可压缩性流体。

1.1.2 作用在流体上的力

力是决定物体运动状态的根本因素,流体在运动过程中反映出来的一些运动规律是流体受力作用的外部表现。

作用在任何流体上的力,按作用方式可以分为表面力与质量力两种。