

全国普通高等学校优秀教材

Unit Operations of
Chemical Engineering

化工原理

上册

修订版

夏清 陈常贵 主编 姚玉英 主审



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

国普通高等学校优秀教材

65

Unit Operations of
Chemical Engineering

化工原理

上册
修订版

夏清 陈常贵 主编 姚玉英 主审



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

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。本书对基本概念的叙述力求严谨,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。每章均编入较多的例题,章末有习题及思考题,并附有参考答案。

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

图书在版编目(CIP)数据

化工原理.上册 /夏清,陈常贵主编. —天津:天津
大学出版社,2005.1(2005.8重印)

ISBN 7-5618-2086-0

I.化... II.①夏... ②陈... 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003392号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
印 刷 天津市宝坻区第二印刷厂
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 23.5
字 数 604千
版 次 2005年1月第1版
印 次 2005年8月第3次
印 数 20 001 - 26 000
定 价 28.00元

本书自问世以来,已多次再版和重印,具有广泛的读者群,得到良好的评价,2002年由教育部评为全国普通高等学校优秀教材。

本次修订本着加强基础教学、反映科技进展、培养创新能力的精神,在1999年出版的由姚玉英主编的版本基础上,适当增减了一些内容,更新了设备的系列标准。但全书保持了原有的整体结构和特点风格。全书重点介绍化工单元操作的基本原理、典型设备及其计算,对基本概念的阐述力求严谨,注重理论联系实际。编写中按照科学认识规律,循序渐进,深入浅出,使得难点分散,例题和习题丰富,更便于教与学。归纳起来本书主要有以下特点:

(1)以单元操作为主线,重点论述单元操作的基本原理和计算方法,同时还注意介绍典型的过程设备,不仅较好地将原理和设备两者结合起来,还注意与国内的实际情况(如系列标准等)相配合。

(2)按流体流动过程、传热过程和传质过程顺序编写。这种编写格局容易被读者(初学者)接受,反映了先易后难、循序渐进的原则,系统性也好。

(3)各个单元操作的广度和深度基本上相同,注意由浅入深,重视教学方法,是化工原理教学经验的积累和总结。

(4)根据各单元操作基本原理,每章都配有相当数量的例题和习题,这样不仅便于学生加深对基本原理的理解,而且有利于理论联系实际,提高分析和解决工程实际问题的能力。

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、非均相物系的分离和固体流态化、传热和蒸发5章。下册包括蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、液-液萃取、干燥、结晶和膜分离6章。

本书可作为高等院校化工及有关专业的教材,也可供有关行业的科研、设计及生产单位的科技人员参考。

本书主编夏清、陈常贵。绪论、第3章由柴诚敬编写,第1章由夏清编写,第2章、第4章由陈常贵编写,第5章由王军编写,附录由姚玉英编写。在修订过程中,得到了原书主编姚玉英和编者黄风廉、刘邦孚、刘国维等老师的大力帮助,在此表示衷心感谢。

绪论	(1)
习题	(8)
第1章 流体流动	(9)
1.1 流体的物理性质	(10)
1.1.1 流体的密度	(10)
1.1.2 流体的黏度	(12)
1.1.3 非牛顿型流体简介	(14)
1.2 流体静力学基本方程式	(16)
1.2.1 静止流体的压力	(16)
1.2.2 流体静力学基本方程式	(18)
1.2.3 流体静力学基本方程式的应用	(20)
1.3 流体流动的基本方程	(25)
1.3.1 流量与流速	(25)
1.3.2 稳态流动与非稳态流动	(26)
1.3.3 连续性方程式	(27)
1.3.4 柏努利方程式	(28)
1.3.5 柏努利方程式的应用	(32)
1.4 流体流动现象	(37)
1.4.1 流体类型与雷诺数	(37)
1.4.2 流体在圆管内流动时的速度分布	(40)
1.4.3 边界层的概念	(43)
1.5 流体在管内的流动阻力	(46)
1.5.1 流体在直管中的流动阻力	(47)
1.5.2 管路上的局部阻力	(56)
1.5.3 管路系统中的总能量损失	(57)
1.6 管路计算	(59)
1.7 流量测量	(67)
习题	(76)
思考题	(81)
第2章 流体输送机械	(83)
2.1 离心泵	(84)
2.1.1 离心泵的工作原理和主要部件	(84)
2.1.2 离心泵的基本方程式	(87)
2.1.3 离心泵的主要性能参数和特性曲线	(91)
2.1.4 离心泵的气蚀现象和允许安装高度	(98)
2.1.5 离心泵的工作点与流量调节	(103)
2.1.6 离心泵的类型、选择与使用	(110)
2.2 其他类型液体输送机械	(114)
2.2.1 往复泵	(114)
2.2.2 旋转泵	(118)
2.2.3 旋涡泵	(119)

目 录

2.2.4 常用化工用泵的性能比较	(119)
2.3 气体输送和压缩机械	(120)
2.3.1 离心通风机、鼓风机与压缩机	(120)
2.3.2 旋转鼓风机与压缩机	(124)
2.3.3 往复压缩机	(124)
2.3.4 真空泵	(132)
习题	(133)
思考题	(135)
第3章 非均相物系的分离和固体流态化	(136)
3.1 概述	(137)
3.2 颗粒及颗粒床层的特性	(138)
3.2.1 颗粒的特性	(139)
3.2.2 颗粒床层的特性	(140)
3.2.3 流体通过床层流动的压降	(141)
3.3 沉降分离	(143)
3.3.1 重力沉降	(144)
3.3.2 离心沉降	(154)
3.4 过滤	(165)
3.4.1 过滤操作的基本概念	(165)
3.4.2 过滤基本方程式	(166)
3.4.3 恒压过滤	(170)
3.4.4 恒速过滤与先恒速后恒压过滤	(172)
3.4.5 过滤常数的测定	(174)
3.4.6 过滤设备	(177)
3.4.7 滤饼的洗涤	(181)
3.4.8 过滤机的生产能力	(182)
3.5 离心机	(185)
3.5.1 一般概念	(185)
3.5.2 沉降离心机和分离离心机	(185)
3.5.3 过滤离心机	(187)
3.6 固体流态化	(189)
3.6.1 流态化的基本概念	(189)
3.6.2 流化床的主要特征	(190)
3.6.3 流化床的操作范围	(193)
3.6.4 提高流化质量的措施	(195)
3.6.5 气力输送简介	(198)
习题	(201)
思考题	(203)
第4章 传热	(204)
4.1 概述	(205)
4.1.1 传热的基本方式	(205)

目 录

4.1.2	传热过程中热、冷流体(接触)热交换的方式	(206)
4.1.3	典型的间壁式换热器	(208)
4.1.4	传热速率和热通量	(209)
4.1.5	稳态传热和非稳态传热	(209)
4.1.6	载热体及其选择	(210)
4.2	热传导	(210)
4.2.1	基本概念和傅里叶定律	(210)
4.2.2	导热系数	(212)
4.2.3	通过平壁的稳态热传导	(213)
4.2.4	通过圆筒壁的稳态热传导	(217)
4.3	对流传热概述	(219)
4.3.1	对流传热速率方程和对流传热系数	(220)
4.3.2	对流传热机理简介	(221)
4.3.3	保温层的临界直径	(223)
4.4	传热过程计算	(224)
4.4.1	热量衡算	(224)
4.4.2	总传热速率微分方程和总传热系数	(225)
4.4.3	平均温度差法和总传热速率方程	(229)
4.4.4	总传热速率方程的应用	(235)
4.4.5	传热单元数法	(238)
4.5	对流传热系数关联式	(244)
4.5.1	影响对流传热系数的因素	(244)
4.5.2	对流传热过程的量纲分析	(245)
4.5.3	流体无相变时的对流传热系数	(248)
4.5.4	流体有相变时的对流传热系数	(255)
4.5.5	壁温的估算	(261)
4.6	辐射传热	(262)
4.6.1	基本概念	(262)
4.6.2	物体的辐射能力和有关的定律	(263)
4.6.3	两固体间的辐射传热	(266)
4.6.4	对流和辐射的联合传热	(269)
4.7	换热器	(271)
4.7.1	间壁式换热器的类型	(271)
4.7.2	管壳式换热器的设计和选型	(279)
4.7.3	各种间壁式换热器的比较和传热的强化途径	(288)
习题		(290)
思考题		(292)
第5章	蒸发	(294)
5.1	蒸发设备	(296)
5.1.1	蒸发器的结构	(296)
5.1.2	蒸发器的辅助装置	(301)

目 录

5.1.3 蒸发器的选型	(302)
5.2 单效蒸发	(303)
5.2.1 溶液的沸点和温度差损失	(303)
5.2.2 单效蒸发的计算	(306)
5.2.3 蒸发器的生产能力和生产强度	(313)
5.3 多效蒸发	(314)
5.3.1 多效蒸发的操作流程	(315)
5.3.2 多效蒸发的计算	(317)
5.3.3 多效蒸发和单效蒸发的比较	(317)
5.3.4 提高加热蒸汽经济性的其他措施	(318)
5.4 蒸发器的工艺设计	(319)
习题	(322)
思考题	(323)
附录	(324)
1. 中华人民共和国法定计量单位制	(324)
2. 常用物理量单位的换算	(325)
3. 某些气体的重要物理性质	(327)
4. 某些液体的重要物理性质	(328)
5. 某些固体材料的重要物理性质	(329)
6. 干空气的物理性质(101.33 kPa)	(330)
7. 水的物理性质	(331)
8. 水在不同温度下的饱和蒸汽压与黏度(-20℃~100℃)	(332)
9. 饱和水蒸气表(按温度顺序排列)	(334)
10. 饱和水蒸气表(按压强 kPa 顺序排列)	(335)
11. 某些液体的导热系数	(337)
12. 某些气体和蒸气的导热系数	(338)
13. 某些固体材料的导热系数	(339)
14. 液体的黏度和密度	(341)
15. 101.33 kPa 压强下气体的黏度	(344)
16. 液体的比热容	(346)
17. 101.33 kPa 压强下气体的比热容	(348)
18. 汽化热(蒸发热)	(350)
19. 某些液体的表面张力	(352)
20. 壁面污垢的热阻(污垢系数)($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	(354)
21. 101.33 kPa 压强下溶液的沸点升高与浓度的关系	(355)
22. 管壳式换热器总传热系数 K_o 的推荐值	(355)
23. 管子规格	(357)
24. 泵规格(摘录)	(362)
25. 4-72-11 型离心通风机规格(摘录)	(365)
26. 管壳式换热器系列标准(摘自 TB/T 4714,4715-92)	(366)
参考文献	(368)

绪论

1. 化工原理课程的性质和基本内容

化工原理课程是化工、制药、生物、环境等类专业的一门主干课。它是综合运用数学、物理、化学、计算技术等基础知识,分析和解决化工类型生产过程中各种物理操作问题的技术基础课。在化工类专业创新人才培养中,它承担着工程科学与工程技术的双重教育任务。

1) 课程的基本内容

化工生产过程泛指对原料进行化学加工,最终获得有价值产品的生产过程。由于原料、产品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。纵观纷杂众多的化工生产过程,都是由化学(生物)反应及若干物理操作有机组合而成。其中,化学(生物)反应及反应器是化工生产的核心,物理过程则起到为化学(生物)反应准备适宜的反应条件及将反应物分离提纯而获得最终产品的作用。构成多种化工产品生产的物理过程按其原理都可归纳为几个基本过程。这些基本的物理操作统称为化工单元操作,简称为单元操作。只有对各种不同的化工生产中的单元操作进行研究,才能揭示其共性的本质、原理和规律。化工原理的基本内容就是阐述各单元操作的基本原理、过程计算及典型设备。

各种单元操作依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基本规律,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。

单元操作内容包括“过程”和“设备”两个方面,故单元操作又称化工过程和设备。同一单元操作在不同的化工生产中虽然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。例如一种液态均相混合物,既可用蒸馏方法分离,也可用萃取方法,还可用结晶或膜分离方法,究竟哪种单元操作最适宜,需要根据工艺特点、物系特性,通过综合技术经济分析作出选择。

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、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。

随着对单元操作研究的不断深入,人们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或它

们的结合。前述的四大类单元操作可分别用动量、热量、质量传递的理论进行研究。三种传递现象中存在着类似的规律和内在联系,可用相类似的数学模型进行描述,并可归结为速率问题进行综合研究。“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,构成了联系各种单元操作的一条主线。

2)课程的研究方法

本课程是一门实践性很强的工程学科,在其长期的发展过程中,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,通常用无量纲数群(或称准数)构成的关系来表达。实验研究方法避免了数学方程的建立,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,作出某些合理简化,建立物理模型,进行数学描述,得出数学模型。通过实验确定模型参数。这是一种半经验半理论的方法。

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,则称之为解析方法。

值得指出的是,尽管计算机数学模拟技术在化工领域中的应用发展很快,但实验研究方法仍不失其重要性,因为即使是可以采用数学模型方法,但模型参数还需通过实验来确定。

研究工程问题的方法论是联系各单元操作的另一条主线。

3)课程的学习要求

本课程是“科学”与“技术”的融合,它强调工程观点、定理运算、实验技能及设计能力的培养,强调理论联系实际。学生在学习本课程中,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系特性,合理地选择单元操作及设备。

②工程设计能力。学习进行工艺过程计算和设备设计。当缺乏现成数据时,要跑够从资料中查取,或从生产现场查定,或通过实验测取。学习利用计算机辅助设计。

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。在操作发生故障时,能够查找故障原因,提出排除故障的措施。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而开发单元操作,进而组织一个生产工艺过程。将可能变现实,实现工程目的,这是综合创造能力的体现。

2. 单位制和单位换算

1)物理量的单位

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。

由于历史、地区及各个学科的不同要求,对基本量及其单位的选择有所不同,因而产生了多种不同的单位制度。目前,国际上逐渐统一采用国际单位(SI);我国采用中华人民共和国法定计量单位(简称法定单位),它的内容详见本书末附录1。

2)单位换算

当前,各学科领域都有采用国际单位制度的趋势,但要在全球全面推广尚需一段时间,况且,过去文献资料中的数据又是多种单位制并存,这就需要掌握不同单位制之间的换算方

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 ,数值约为 9.81;在物理单位制(cgs制)中的单位为 cm/s^2 ,数值约为 981。二者包括单位在内的比值称为换算因子。例如重力加速度在 cgs 制与法定单位制间的换算因子为

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

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,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。化工中常用的单位换算关系列于附录中。

【例 0-1】 从已有资料中查出常温下苯的导热系数 λ 为 $0.0919 \text{ BTU}/(\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F})$ (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 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。

解:单位换算时,一般首先从附录查出原单位与要换算的新单位之间的关系,即定出换算因子,用换算因子与各基本量相除或相乘,以消去原单位而引入新单位,即可得到要换算的数值。

新单位 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 也可写为 $\text{J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ 。

从附录查出:

长度	$1 \text{ m} = 3.2808 \text{ ft}$
热量	$1 \text{ J} = 9.486 \times 10^{-4} \text{ BTU}$
温度差	$1^\circ\text{C} = 1.8^\circ\text{F}$
时间	$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$

以上四个物理量在不同单位制中的换算因子分别为 3.2808 ft/m 、 $\text{J}/(9.486 \times 10^{-4} \text{ BTU})$ 、 $1.8^\circ\text{F}/^\circ\text{C}$ 及 $\text{h}/(3600 \text{ s})$ 。

苯的导热系数为

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.0919 \text{ BTU}/(\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F}) \\ &= \left(0.0919 \frac{\text{BTU}}{\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F}} \right) \left(3.2808 \frac{\text{ft}}{\text{m}} \right) \left(\frac{\text{J}}{9.486 \times 10^{-4} \text{ BTU}} \right) \left(1.8 \frac{^\circ\text{F}}{^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{\text{h}}{3600 \text{ s}} \right) \\ &\quad \begin{array}{ccccccc} \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow & & \uparrow \\ \text{原有的数值} & & \text{引入 m,} & & \text{引入 J,} & & \text{引入 }^\circ\text{C,} & & \text{引入 s,} \\ \text{与单位} & & \text{消去 ft} & & \text{消去 BTU} & & \text{消去 }^\circ\text{F} & & \text{消去 h} \end{array} \\ &= 0.159 \text{ J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}) = 0.159 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

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

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

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

熟悉单位换算方法后,不必在式子中间写出单位。

(2) 经验公式(或数字公式)的换算 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,例如牛顿第二运动定律式为

$$F = ma$$

式中 F ——作用在物体上的力;

(0-1)

m ——物体的质量；

a ——物体在作用力方向上的加速度。

式 0-1 中各物理量的单位可以任选一种单位制度,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(量纲将在第 1 章中介绍)。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,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。若计算过程中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所需的单位,这就是经验公式的换算,换算方法见例 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) (lb 为英制中质量单位磅的符号)；

D ——管子外径, ft。

试对上式进行换算,将 α 的单位改为 W/(m²·°C)、 G 的单位改为 kg/(m²·s)、 D 的单位改为 m。

解:从附录查出或算出以下有关物理量单位之间的关系为

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

$$1 \text{ kg} = 2.20462 \text{ lb}$$

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

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

$$\text{所以 } 1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \times \frac{1 \text{ kg}}{2.20462 \text{ lb}} \times \frac{(1 \text{ ft})^2}{(0.3048)^2} \times \frac{\text{h}}{3600 \text{ s}} = 0.001356 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

令式中各物理量加上标“'”,以代表采用新单位时的物理量,新、旧单位的物理量间的关系为

$$\text{对流传热系数} \quad \alpha = \frac{\alpha'}{5.678} \quad (1)$$

$$\text{质量速度} \quad G = \frac{G'}{0.001356} \quad (2)$$

$$\text{直径} \quad D = \frac{D'}{0.3048} \quad (3)$$

将以上关系代入原式,得

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

整理上式并略去符号的上标,得到换算后的经验公式为

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

3. 物料衡算和能量衡算

化工过程计算可分为设计型计算和操作型计算两类,其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。下面,简单介绍物料衡算和能量衡算。关于平衡关系和速率关系将在有关章节讨论。

1) 物料衡算

为了弄清生产过程中原料、成品以及损失的物料数量,必须要进行物料衡算。

物料衡算为质量守恒定律的一种表现形式,即

$$\Sigma G_1 = \Sigma G_0 + G_A \quad (0-2)$$

式中 ΣG_1 ——输入物料的总和;

ΣG_0 ——输出物料的总和;

G_A ——累积的物料量。

式 0-2 为总物料衡算式。当过程没有化学反应时,它也适用于物料中任一组分的衡算;当有化学反应时,它只适用于任一元素的衡算。若过程中累积的物料量为零,则式 0-2 可以简化为

$$\Sigma G_1 = \Sigma G_0 \quad (0-3)$$

上式所描述的过程属于稳态过程,一般连续不断的流水作业(即连续操作)为稳态过程,其特点是在设备的各个不同位置上,物料的流速、浓度、温度、压强等参数可各自不相同,但在同一位置上这些参数都不随时间而变。若过程中有物料累积,则属于非稳态过程,一般间歇操作(即分批操作)属于非稳态过程,在设备的同一位置上诸参数随时间而变。

式 0-2 或式 0-3 中各股物料数量可用质量或物质量衡量。对于液体及处于恒温、恒压下的理想气体还可用体积衡量。常用质量分数表示溶液或固体混合物的组成,对理想混合气体还可用体积分数(或摩尔分数)表示组成。

【例 0-3】 双效并流蒸发器是将待浓缩的原料液加入第一效中浓缩到某组成后由底部排出送至第二效,再继续浓缩到指定的组成,完成液由第二效底部排出。加热蒸汽也送入第一效,在其中放出热量后冷凝水排至器外。由第一效溶液中蒸出的蒸汽送至第二效作为加热蒸汽,冷凝水也排至器外。由第二效溶液中蒸出的蒸汽送至冷凝器中。

每小时将 5 000 kg 无机盐水溶液在双效并流蒸发器中从 12% (质量百分数,下同)浓缩到 30%。已知第二效比第一效多蒸出 5% 的水分。试求:

(1) 每小时从第二效中取出完成液的量及各效蒸出的水分量;

(2) 第一效排出溶液的组成。

解:初学者进行物料衡算时应首先注意以下几点。

① 根据题意画出如本题附图所示的流程示意图,在图上用箭头标出物料的流向,并用数字和符号说明物料的数量和单位。

图中 F_0 ——原料液的质量流量, kg/h;

B_1 ——第一效排出液流量, kg/h;

B_2 ——完成液流量, kg/h;

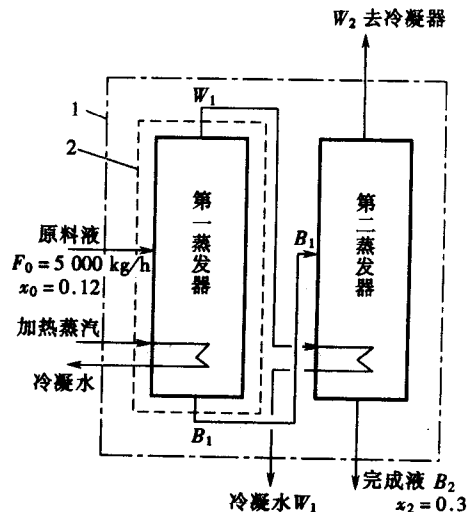
x ——溶液中无机盐的质量分数;

下标 0 表示原料液,下标 1、2 为蒸发器序号。

② 圈出衡算范围,如图中虚线 1 及虚线 2

所示。在工程计算中,可以根据具体情况以一个生产过程或一个设备,甚至设备某一局部作衡算范围。凡穿越所划范围的流股,其箭头向内的为输入物料,向外的为输出物料。没有穿越所划范围的流股不参与物料衡算。

③ 定出衡算基准。对连续操作常以单位时间为基准;对间歇操作,常以一批物料(即一



例 0-3 附图

个操作循环)为基准。基准选得不当,会使计算过程变得复杂。基准选定后,参与衡算的各流股都按所选的基准进行计算。本题选 h 为基准。

(1)每小时从第二效中取出完成液的量及各效蒸出的水分量

在图中虚线 1 范围内列盐及总物料衡算。这里要说明两点:一是第一效蒸发器的加热蒸汽与冷凝水都是穿越虚线 1 的两个流股,它们进、出虚线 1 各一次,只与系统有热量交换而没有质量交换,故不参与衡算;二是第一效蒸出的 W_1 kg/h 的蒸汽送至第二效蒸发器放出热量后排至外界,故 W_1 应参与衡算。

$$\text{盐的衡算} \quad F_0 x_0 = B_2 x_2$$

$$\text{总物料衡算} \quad F_0 = W_1 + W_2 + B_2$$

将已知值代入以上二式

$$5\,000 \times 0.12 = 0.3 B_2 \tag{1}$$

$$5\,000 = W_1 + W_2 + B_2 \tag{2}$$

$$\text{由题知} \quad W_2 = 1.05 W_1 \tag{3}$$

联立以上三式,得

$$\text{完成液流量} \quad B_2 = 2\,000 \text{ kg/h}$$

$$\text{第一效蒸出的水分} \quad W_1 = 1\,463 \text{ kg/h}$$

$$\text{第二效蒸出的水分} \quad W_2 = 1\,537 \text{ kg/h}$$

(2)第一效排出溶液的组成

在图中虚线 2 范围内列盐及总物料衡算:

$$\text{盐} \quad F_0 x_0 = B_1 x_1$$

$$\text{总物料} \quad F_0 = W_1 + B_1$$

将已知值代入上二式

$$5\,000 \times 0.12 = B_1 x_1$$

$$5\,000 = 1\,463 + B_1$$

联立以上二式解得

$$\text{第一效排出溶液组成} \quad x_1 = 0.1696 = 16.96\%$$

【例 0-4】需将含有有机气体的贮槽进行内部清扫,罐的内径为 4 m、高度为 10 m。拟用通风机以 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的送风量送入不含有机气体的空气,同时以相等的流量将气体排出。试计算罐内有机气体组成由 6% (体积分数,下同)降到 0.1% 时所需的时间。

设通风过程中罐内气体完全混合,且罐内温度恒定。

解:通风过程中罐内气体能完全混合,因此任何时间排出气体的组成与残留在罐内气体的组成相同。

罐内的气体可视为恒温理想气体,故可对气体作体积衡算。

选 1 s 为基准。

每秒向罐内送入 1.5 m^3 空气,每秒又有等体积气体从罐内排出,故罐内气体的总体积恒定,但有机气体的组成随时间增长而下降。设罐内有机气体的瞬间体积组成为 v 。

在 $d\theta$ 时间内,围绕全罐作有机气体的体积衡算,根据式 0-2 得

$$\Sigma G_1 = \Sigma G_0 + G_A$$

通风机送入有机气体的体积 $\Sigma G_1 = 0$

排出有机气体的体积 $\Sigma G_0 = 1.5v d\theta$

$$\text{罐内有机气体的积累量 } G_A = \frac{\pi}{4} (4)^2 \times 10dv = 125.6dv \text{ m}^3$$

$$\text{所以 } 0 = 1.5vd\theta + 125.6dv$$

$$\text{或 } d\theta = -83.73 \frac{dv}{v}$$

在下述边界条件下积分上式,即

$$\text{开始 } \theta = \theta_1 = 0 \quad v = v_1 = 0.06$$

$$\text{終了 } \theta = \theta_2 \quad v = v_2 = 0.001$$

$$\text{所以 } \theta = \int_0^{\theta_2} d\theta = -83.73 \int_{0.06}^{0.001} \frac{dv}{v} = -83.73 [\ln v]_{0.06}^{0.001} = 83.73 \ln \frac{0.06}{0.001} = 342.8 \text{ s}$$

2) 能量衡算

机械能、热量、电能、磁能、化学能、原子能等统称为能量,各种能量间可以相互转换。化工计算中遇到的往往不是能量间的转换问题,而是总能量衡算,有时甚至可以简化为热能或热量衡算。本教材以热量衡算作为讨论能量衡算的重点。

能量衡算的依据是能量守恒定律,对热量衡算可以写成

$$\Sigma Q_1 = \Sigma Q_0 + Q_L \tag{0-4}$$

式中 ΣQ_1 ——随物料进入系统的总热量, kJ 或 kW;

ΣQ_0 ——随物料离开系统的总热量, kJ 或 kW;

Q_L ——向系统周围散失的热量, kJ 或 kW。

式 0-4 也可写成

$$\Sigma (wH)_1 = \Sigma (wH)_0 + Q_L \tag{0-5}$$

式中 w ——物料的质量, kg 或 kg/s;

H ——物料的焓, kJ/kg。

式 0-4 及式 0-5 既适用于间歇过程(此时 Q 的单位为 kJ、 w 的单位为 kg),也适用于连续过程(此时 Q 的单位为 kW、 w 的单位为 kg/s)。

作热量衡算时也和物料衡算一样,要规定出衡算基准和范围。此外,由于焓是相对值,与从哪一个温度算起有关,所以进行热量衡算时还要指明基准温度(简称基温)。习惯上选 0°C 为基温,并规定 0°C 时液态的焓为零,这一点在计算中可以不指明。有时为了方便,要以其他温度作基准,这时应加以说明。

【例 0-5】 在换热器里将平均比热容为 $3.56 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 的某种溶液自 25°C 加热到 80°C , 溶液流量为 1.0 kg/s 。加热介质为 120°C 的饱和水蒸气, 其消耗量为 0.095 kg/s , 蒸汽冷凝成同温度的饱和水后排出。试计算此换热器的热损失占水蒸气所提供热量的百分数。

解: 首先根据题意画出过程示意图(见本例附图)。

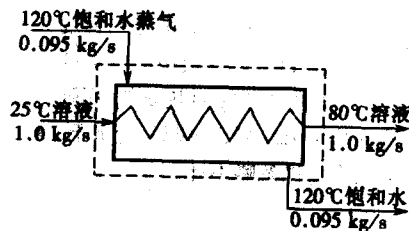
选 1 s 作为基准。

从附录查出 120°C 饱和水蒸气的焓值为 2708.9 kJ/kg , 120°C 饱和水的焓值为 503.67 kJ/kg 。

在图中虚线范围内作热量衡算。

式 0-4 中各项为

随流股带入换热器的总热量 $\Sigma Q_1 = Q_1 + Q_2$, 其中:



例 0-5 附图

蒸汽带入的热量 $Q_1 = 0.095 \times 2708.9 = 257.3 \text{ kW}$

溶液带入的热量 $Q_2 = 1 \times 3.56(25 - 0) = 89 \text{ kW}$

所以 $\Sigma Q_1 = 257.3 + 89 = 346.3 \text{ kW}$

随流股带出换热器的总热量 $\Sigma Q_0 = Q_3 + Q_4$, 其中:

冷凝水带出的热量 $Q_3 = 0.095 \times 503.67 = 47.8 \text{ kW}$

溶液带出的热量 $Q_4 = 1 \times 3.56(80 - 0) = 284.8 \text{ kW}$

所以 $\Sigma Q_0 = 47.8 + 284.8 = 332.6 \text{ kW}$

将以上诸值代入式 0-4 中:

$$346.3 = 332.6 + Q_L$$

热损失 $Q_L = 13.7 \text{ kW}$

$$\text{热损失百分数} = \frac{Q_L}{Q_1 - Q_3} = \frac{13.7}{257.3 - 47.8} = 0.0654 = 6.54\%$$

习 题

1. 热空气与冷水间的总传热系数 K 值约为 $42.99 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$, 试从基本单位换算开始, 将 K 值的单位改为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。〔答: $K = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 〕

2. 密度 ρ 是单位体积物质具有的质量。在以下两种单位制中, 物质密度的单位分别为:

SI kg/m^3

米制重力单位 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$

常温下水的密度为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 试从基本单位换算开始, 将该值换算为米制重力单位的数值。〔答: $\rho = 101.9 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 〕

3. 甲烷的饱和蒸气压与温度的关系符合下面经验公式:

$$\lg p = 6.421 - \frac{352}{t + 261}$$

式中 p ——饱和蒸气压, mmHg;

t ——温度, $^\circ\text{C}$ 。

今需将式中 p 的单位改为 Pa, 温度单位改为 K, 试对该式加以变换。〔答: $\lg p = 8.546 + \frac{352}{T - 12}$ 〕

4. 将 A, B, C, D 四种组分各为 0.25(摩尔分数, 下同)的某混合溶液, 以 $1000 \text{ kmol}/\text{h}$ 的流量送入精馏塔内分离, 得到塔顶与塔釜两股产品, 进料中全部 A 组分、96% B 组分及 4% C 组分存于塔顶产品中; 全部 D 组分存于塔釜产品中。试计算塔顶和塔釜产品的流量及其组成。〔答: 塔顶产品流量及其组成分别为: $D = 500 \text{ kg}/\text{h}$, $x_{D,A} = 0.5$, $x_{D,B} = 0.48$, $x_{D,C} = 0.02$ 。塔底产品流量及其组成分别为: $W = 500 \text{ kg}/\text{h}$, $x_{W,B} = 0.02$, $x_{W,C} = 0.48$ 及 $x_{W,D} = 0.5$ 〕

5. 将密度为 $810 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的油与密度为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的水充分混合成为均匀的乳浊液, 测得乳浊液的密度为 $950 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。试求乳浊液中油的质量分数。水和油混合后体积无变化。(答: 油的质量分数 = 0.2244)

6. 每小时将 200 kg 过热氨气(压强为 1200 kPa)从 95°C 冷却、冷凝为饱和液氨。已知冷凝温度为 30°C 。采用冷冻盐水为冷凝、冷却剂, 盐水于 2°C 下进入冷凝、冷却器, 离开时为 10°C 。求每小时盐水的用量。

热损失可以忽略不计。

数据:

95°C 过热氨气的焓, kJ/kg 1647

30°C 饱和液氨的焓, kJ/kg 323

2°C 盐水的焓, kJ/kg 6.8

10°C 盐水的焓, kJ/kg 34

〔答: $9735 \text{ kg}/\text{h}$ 〕

第 1 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 ;
 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 1 N 流体提供的有效压头, 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 ——摩尔质量 kg/kmol ;
 n ——指数;
 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 流体流动时损失的机械能, 或因

克服流动阻力而引起的压强降, Pa ;
 P ——总压力, N ;
 r ——半径, m ;
 \dot{r} ——剪切速率, s^{-1} ;
 r_H ——水力半径, m ;
 R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$;
 R ——液柱压差计读数, 或管道半径, m ;
 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_h ——体积流量, m^3/h ;
 V_s ——体积流量, m^3/s ;
 w_s ——质量流量, kg/s ;
 W_e ——1 kg 流体通过输送设备获得的能量, 或输送设备对 1 kg 流体所作的有效功, J/kg ;
 x_0 ——稳定段长度, m ;
 x_v ——体积分数;
 x_w ——质量分数;
 y ——气相摩尔分数;
 Z ——1 kg 流体具有的位能, m 。

希腊字母

α ——倾斜角;
 δ ——流动边界层厚度, m ;