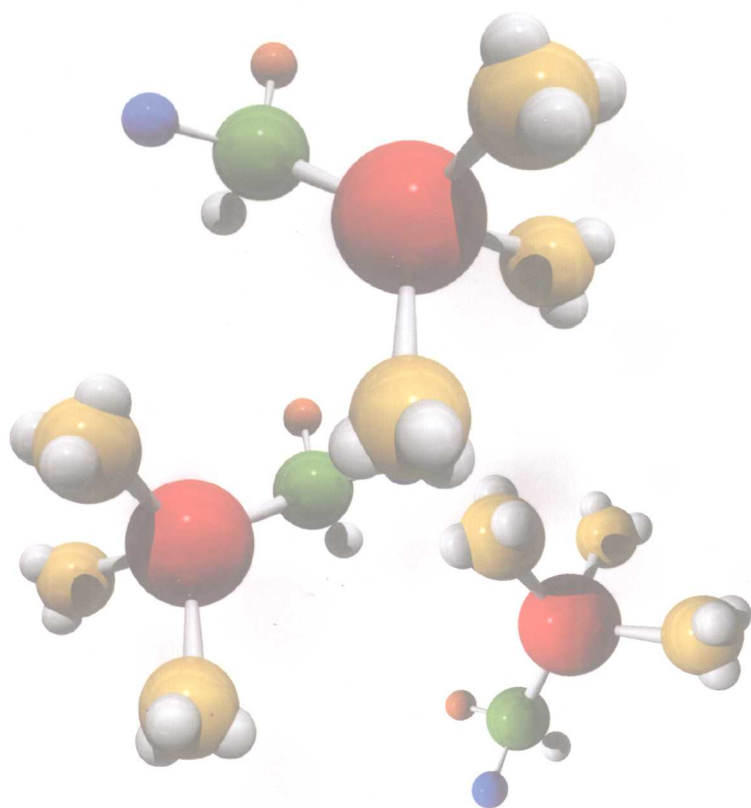




21世纪高等职业教育精品规划教材



教育部高职高专化工技术类专业教学指导委员会推荐教材

# *Chemical Engineering Unit Operation* **化工单元操作技术**

◎ 主 编 申奕

◎ 副主编 简华



天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

教育部高职高专化工技术类专业教学指导委员会推荐教材

# 化工单元操作技术

主 编 申 奕

副主编 简 华

江苏工业学院图书馆  
藏书章



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

本书是根据高职高专化工技术类专业高技能、高素质人才培养目标的要求编写的。遵循国家职业标准与生产岗位需求相结合的原则,围绕高等职业教育的基本特征和职业教育的特点,突出职业技能,强调化工单元操作与设备维护。本书内容包括:绪论、流体输送操作技术、沉降与过滤操作技术、传热操作技术、蒸发操作技术、蒸馏操作技术、吸收操作技术、吸附操作技术、萃取操作技术、干燥操作技术、膜分离技术。在内容安排上,通过化工单元操作过程的典型案例,重点介绍其应用、生产原理、设备结构、操作方法及设备使用维护。

本书可作为高等职业教育化工类及相关专业(化工、石油、生物、制药、轻纺、食品、环保、冶金、材料等)教材,也可作为相关企业的培训教材以及供从事化工生产和管理的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工单元操作技术/申奕主编. —天津:天津大学出版社, 2009. 6

教育部高职高专化工技术类专业教学指导委员会推荐教材

ISBN 978 - 7 - 5618 - 3061 - 1

I. 化… II. 申… III. 化工单元操作-高等学校:技术学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 105221 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  
网 址 www.tjup.com  
印 刷 廊坊市长虹印刷有限公司  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 169mm×239mm  
印 张 26.5  
字 数 565 千  
版 次 2009 年 6 月第 1 版  
印 次 2009 年 6 月第 1 次  
印 数 1-3 000  
定 价 49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

# 前 言

本教材是根据高职高专化工技术类专业高技能、高素质人才培养目标的要求而编写的。在内容上针对职业资格标准对知识、能力、素质结构等要求,紧紧围绕高等职业教育的基本特征和职业教育的特点,挑选和提炼知识点和能力点,突出适应性、实用性和针对性等。主要介绍流体输送、沉降与过滤操作、传热操作、蒸发操作、蒸馏操作、吸收操作、干燥操作、萃取操作及膜分离技术等单元操作。

“化工单元操作技术”是化工技术类专业的主干课、核心课,旨在培养学生掌握化工生产中各单元操作过程所遵循的规律和具备的职业道德,对学生职业能力和职业素质的养成起主要支撑作用。因此在教材内容上注重把握两个基本点:

第一,在充分进行岗位调研、听取企业工程技术人员意见的基础上,选取内容以技能为核心,依据岗位需求确定其广度与深度,不追求学科自身内容的系统完整;

第二,突出实践性教学,适当阐述技术原理和依据,删除理论公式的推导,强化应用技术内容。

本书由申奕主编,简华为副主编,全书分为10个单元。绪论由申奕、简华编写;第1单元由申奕编写;第2单元由申奕、简华编写;第3、4单元由佟妍编写;第5、6单元由杨洪珍编写;第7、10单元由简华编写;第8、9单元由高红编写;附录由简华整理。在本书编写过程中得到了天津大学化工学院柴诚敬教授的帮助和天津大学出版社的大力支持,还得到了天津渤海化工集团公司有关企业工程技术人员的大力支持,在此向他们一并表示衷心感谢。

由于编者学识水平有限,虽经努力,仍不免有不妥之处,恳请批评指正。

编 者

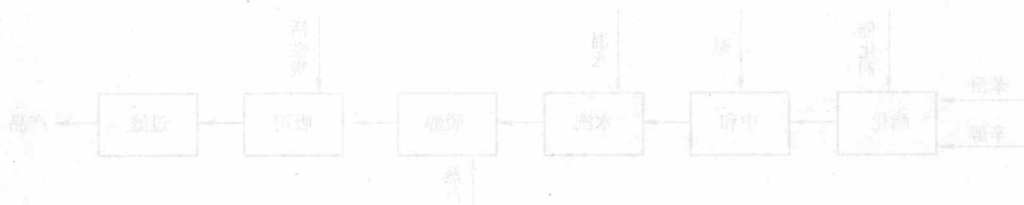
2009年4月



|     |                    |       |
|-----|--------------------|-------|
| 4.2 | 蒸发设备 .....         | (152) |
| 4.3 | 单效蒸发 .....         | (158) |
| 4.4 | 多效蒸发 .....         | (164) |
| 4.5 | 蒸发操作与维护 .....      | (168) |
|     | 思考题 .....          | (170) |
|     | 习题 .....           | (171) |
| 5   | 蒸馏操作技术 .....       | (172) |
| 5.1 | 概述 .....           | (173) |
| 5.2 | 蒸馏设备 .....         | (174) |
| 5.3 | 蒸馏基本知识 .....       | (183) |
| 5.4 | 蒸馏原理和流程 .....      | (191) |
| 5.5 | 两组分连续精馏计算 .....    | (198) |
| 5.6 | 精馏塔操作技术 .....      | (217) |
|     | 思考题 .....          | (228) |
|     | 习题 .....           | (228) |
| 6   | 吸收操作技术 .....       | (231) |
| 6.1 | 概述 .....           | (232) |
| 6.2 | 吸收设备 .....         | (234) |
| 6.3 | 吸收基本知识 .....       | (244) |
| 6.4 | 吸收塔的计算 .....       | (255) |
| 6.5 | 填料塔吸收操作技术 .....    | (265) |
|     | 思考题 .....          | (269) |
|     | 习题 .....           | (269) |
| 7   | 吸附操作技术 .....       | (272) |
| 7.1 | 概述 .....           | (272) |
| 7.2 | 吸附剂及其选择 .....      | (274) |
| 7.3 | 吸附平衡 .....         | (275) |
| 7.4 | 吸附过程与吸附速率的控制 ..... | (277) |
| 7.5 | 吸附操作 .....         | (278) |
| 7.6 | 吸附过程的强化 .....      | (281) |
|     | 思考题 .....          | (281) |
|     | 习题 .....           | (282) |
| 8   | 萃取操作技术 .....       | (283) |
| 8.1 | 概述 .....           | (284) |
| 8.2 | 萃取设备 .....         | (287) |
| 8.3 | 萃取基本知识 .....       | (296) |

|                                                                    |       |
|--------------------------------------------------------------------|-------|
| 8.4 液-液萃取过程的计算 .....                                               | (303) |
| 8.5 萃取的操作与控制 .....                                                 | (306) |
| 思考题 .....                                                          | (309) |
| 习题 .....                                                           | (310) |
| <b>9 干燥操作技术</b> .....                                              | (311) |
| 9.1 概述 .....                                                       | (312) |
| 9.2 干燥设备 .....                                                     | (313) |
| 9.3 干燥过程基本知识 .....                                                 | (323) |
| 9.4 干燥过程的物料衡算与热量衡算 .....                                           | (331) |
| 9.5 常用干燥设备的使用与维护 .....                                             | (344) |
| 思考题 .....                                                          | (348) |
| 习题 .....                                                           | (348) |
| <b>10 膜分离技术</b> .....                                              | (349) |
| 10.1 概述 .....                                                      | (349) |
| 10.2 反渗透 .....                                                     | (352) |
| 10.3 超滤和微滤 .....                                                   | (355) |
| 10.4 电渗析 .....                                                     | (357) |
| 10.5 膜污染的防治 .....                                                  | (360) |
| 思考题 .....                                                          | (362) |
| 习题 .....                                                           | (363) |
| <b>附录</b> .....                                                    | (364) |
| 1. 中华人民共和国法定计量单位制度 .....                                           | (364) |
| 2. 常用单位的换算 .....                                                   | (365) |
| 3. 某些气体的重要物理性质 .....                                               | (368) |
| 4. 某些液体的重要物理性质 .....                                               | (369) |
| 5. 某些固体的重要物理性质 .....                                               | (370) |
| 6. 干空气的物理性质( $101.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ ) .....               | (371) |
| 7. 水的物理性质 .....                                                    | (372) |
| 8. 水在不同温度下的饱和蒸汽压与黏度( $-20 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ..... | (373) |
| 9. 饱和水蒸气表(按温度顺序排) .....                                            | (377) |
| 10. 饱和水蒸气表(按 kPa 顺序排) .....                                        | (378) |
| 11. 某些液体的导热系数 .....                                                | (380) |
| 12. 某些气体和蒸气的导热系数 .....                                             | (383) |
| 13. 某些固体材料的导热系数 .....                                              | (384) |
| 14. 液体的黏度和密度 .....                                                 | (386) |
| 15. $101.33 \text{ kPa}$ 压强下气体的黏度 .....                            | (390) |

|                                                                |       |
|----------------------------------------------------------------|-------|
| 16. 液体的比热容 .....                                               | (392) |
| 17. 101.33 kPa 压强下气体的比热容 .....                                 | (395) |
| 18. 汽化热(蒸发潜热) .....                                            | (397) |
| 19. 液体的表面张力 .....                                              | (399) |
| 20. 壁面污垢热阻(污垢系数)( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) ..... | (401) |
| 21. 101.33 kPa 压强下溶液的沸点升高与浓度的关系 .....                          | (402) |
| 22. 管壳式换热器总传热系数 $K_0$ 的推荐值 .....                               | (402) |
| 23. 管子规格 .....                                                 | (404) |
| 24. 泵规格(摘录) .....                                              | (408) |
| 25. 4—72—11 型离心通风机规格(摘录) .....                                 | (412) |
| 26. 管壳式换热器系列标准(摘自 TB/T 4714, 4715—92) .....                    | (413) |
| 参考文献 .....                                                     | (416) |



## 绪论

“化工单元操作技术”是化工类专业及相近专业的一门主干课,是基础课与专业课的桥梁,是必修的一门主要技术基础课程。它是综合运用数学、物理、化学等基础知识,分析和解决化工生产中各种物理过程的工程学科。

本课程以化工生产中的物理加工过程为背景,研究若干“化工单元操作”(流体流动、传热、吸收、蒸馏、干燥、机械分离、蒸发等)的基本原理、典型设备构造、设备操作特性、过程和设备的设计与计算、设备的选择等内容。

化工单元操作技术属工程科学,其特点是强调工程观点,不仅解决过程的基本规律,并且能解决复杂和真实生产过程中的问题。本课程重视理论和实际相结合,注重培养认识问题、分析问题及解决问题的能力。作为一门应用性课程,学完本课程后应初步具有以下能力。

- (1)根据生产工艺要求和物系特性,进行单元操作和设备的选择。
- (2)能理论联系实际,用工程和经济观点处理遇到的各种化工单元操作的问题。
- (3)能控制设备的正常运转,找出故障的原因并及时排除,能操作和调节生产过程,了解优化生产过程的方法。

- (4)综合已学知识对单元操作进行选择、设置,组织生产工艺过程。

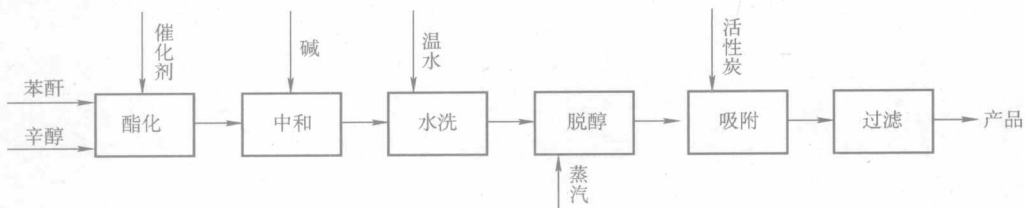
### 一、化工生产过程与单元操作

#### 1. 化工生产过程

用化工手段将原料加工成产品的生产过程通称为化工生产过程。化工生产过程包括原料预处理过程、反应过程和反应产物后处理过程。

例如:邻苯二甲酸二辛酯(DOP)的生产。由辛醇和苯酐在催化剂作用下发生酯化反应生成酯,经过一系列分离提纯后得

到产品邻苯二甲酸二辛酯。其流程如下：



此生产过程除酯化反应过程外,原料和反应产物的提纯、精制等工序均属前、后处理过程。前、后处理工序中所进行的过程多数是纯物理过程,但都是化工生产所不可缺少的。即使在一个现代化的大型工厂中,反应器的数目也并不多,在绝大多数的设备中都是进行着各种前、后处理操作。这些分离纯化的操作直接影响着产品的质量。由此可见,前、后处理过程在化工生产中的重要地位。

## 2. 单元操作

将前、后处理过程按其操作目的的不同划分为若干个单元,称之为单元操作。每一个单元操作完成一个特定的任务,各种单元操作都是依据一定的物理和物理化学原理。根据各单元操作所遵循的基本规律,可将单元操作划分为以下3大类。

### 1) 流体动力过程(动量传递过程)

流体动力过程研究流体流动及流体和与之接触的固体间发生相对运动时的基本规律,以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作,如流体的输送、沉降、过滤、搅拌及固体的流态化等。

输送:利用外力做功将一定量流体由一处输送到另一处。

沉降:对由流体(气体或液体)与悬浮物(液体或固体)组成的悬浮体系,利用其密度差在力场中发生非均相分离操作。

过滤:液固或气固混合体系中的流体强制通过多孔性过滤介质,将悬浮的固体物截留而实现的非均相分离过程。

混合:使两种或两种以上的物料相互分散,以达到一定的均匀程度的操作。

### 2) 传热过程(热量传递过程)

传热过程研究传热的基本规律以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作,如热交换、蒸发等。

换热:冷热物料间由于温度差而发生热量传递,以改变物料的温度或相态的操作。

蒸发:溶液中的溶剂受热汽化与不挥发的溶质分离,从而得到高浓度溶液的操作。

### 3) 传质分离过程(质量传递过程)

传质分离过程研究物质通过相界面迁移过程的基本规律,以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作,如液体的蒸馏、气体的吸收、液-液萃取、固体的干燥及结

晶等。

蒸馏:利用均相液体混合物中各组分的挥发度不同,使液体混合物分离的操作。

吸收:利用气体组分在液体溶剂中的溶解度不同,以实现气体混合物分离的操作。

萃取:利用液体混合物中组分在液体萃取剂中的溶解度不同而分离液体混合物的操作。

## 二、单元操作中的基本计算

### 1. 物料衡算

根据质量守恒定律,任何一个化工生产过程都遵循以下规律:

$$\sum F = \sum d + A$$

式中:  $\sum F$  ——输入物料质量的总和, kg;

$\sum d$  ——输出物料质量的总和, kg;

$A$  ——积累在过程中的物料质量, kg。

此式是物料衡算的通式,可对总物料或其中某一组成列出物料衡算式,进行求解。

由于物流常常是多组分的混合物,因此可以按进、出衡算系统的各物流的总物料量列出总衡算式,也可以按各物流中的各组分分别列出组分衡算式。此外,物流中各组分的质量分数  $\omega_i$  和摩尔分数  $x_i$  之和均等于 1, 即有  $\sum \omega_i = 1$ ,  $\sum x_i = 1$ , 这称为组成归一性方程。

对于定常态操作过程,系统中物料的积累量为零。即

$$\sum F = \sum d$$

进行物料衡算的步骤:①画出流程示意图,物料的流向用箭头表示;②圈出衡算的范围(或称系统);③确定衡算对象及衡算基准;④写出物料衡算方程进行求解。

**例 0.1** 两股物流 A 和 B 混合得到产品 C。每股物流均由两个组分(代号 1、2)组成。物流 A 的质量流量为  $G_A = 6\ 160\text{ kg/h}$ , 其中组分 1 的质量百分数  $\omega_{A1} = 80\%$ ; 物流 B 中组分 1 的质量百分数  $\omega_{B1} = 20\%$ ; 要求混合后产品 C 中组分 1 的质量百分数  $\omega_{C1} = 40\%$ 。试求: (1) 需要加入物流 B 的量  $G_B$ , kg/h; (2) 产品量  $G_C$ , kg/h。

**解:**按题意,画出混合过程示意图如例 0.1 附图,标出各物流的箭头、已知量与未知量,用闭合虚线框出衡算系统。

过程为连续定常,故取 1 h 为衡算基准。列出衡算式:

总物料衡算  $G_A + G_B = G_C$ , 代入已知数据得

$$6\ 160 + G_B = G_C \quad (1)$$

组分 1 的衡算式  $G_A \omega_{A1} + G_B \omega_{B1} = G_C \omega_{C1}$ , 代入已知数据得

$$6\ 160 \times 0.80 + G_B \times 0.20 = G_C \times 0.40 \quad (2)$$

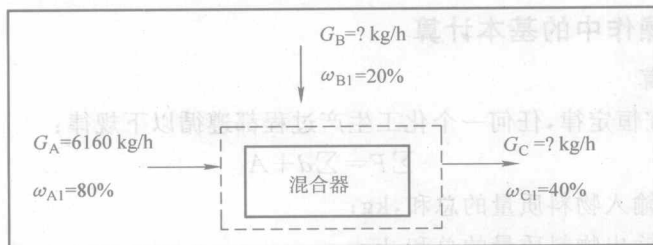
联解式(1)、(2)得

$$G_B = 12\,320 \text{ kg/h}, \quad G_C = 18\,480 \text{ kg/h}$$

据组成归一性方程,物流组分质量分数之和为 1,即  $\omega_{A1} + \omega_{A2} = 1, \omega_{B1} + \omega_{B2} = 1, \omega_{C1} + \omega_{C2} = 1$ ,因此也可列出组分 2 的衡算式:

$$G_A(1 - \omega_{A1}) + G_B(1 - \omega_{B1}) = G_C(1 - \omega_{C1}) \quad (3)$$

对于组分数为  $k$  的系统,可以列出  $k$  个组分衡算式和一个总衡算式,即有  $k+1$  个物料衡算方程,其中只有  $k$  个方程是独立的。



例 0.1 附图

## 2. 能量衡算

根据能量守恒定律,在任何一個化工生产过程中,凡向该过程输入的能量必等于该过程输出的能量。在许多化工生产中所涉及的能量仅为热能,所以本课程中能量衡算简化为热量衡算:

$\Sigma Q_F = \Sigma Q_D + Q$

式中:  $\Sigma Q_F$  —— 输入该过程的各物料带入的总热量, J;

$\Sigma Q_D$  —— 输出该过程的各物料带出的总热量, J;

$Q$  —— 该过程与环境交换的总热量,当系统向环境散热时为正,称为热损, J。

通过热量衡算,可以了解在生产操作中热量的利用和损失情况,从而在生产过程与设备设计时,利用热量衡算可以确定是否需要从外界引入热量或向外界输出热量的问题。

## 3. 平衡关系

物系在自然界发生变化时,其变化必趋于一定方向,如果任其发展,结果必达到平衡关系为止。

平衡状态表示的就是各种自然发生的过程可能达到的极限程度,除非影响物系的情况有变化,否则其变化的极限是不会改变的。一般平衡关系则为各种定律所表明,如热力学第二定律、拉乌尔定律等。

在化工生产过程中,可以从物系平衡关系来推知其能否进行以及进行到何种程度。平衡关系也为设备尺寸的设计提供了理论依据。

## 4. 过程速率

任何一个不处于平衡状态的物系,必然发生使物系趋向平衡的过程,但过程以什么速率趋向平衡,这不决定于平衡关系,而是由多方面因素影响的,由于对这些因素

有些还不清楚,目前过程速率近似采用下式表示:

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

这里的过程推动力,可依据具体过程而有不同的理解,但必要的条件是物系在平衡状态时推动力必须等于零。

至于过程的阻力则较为复杂,要具体情况具体分析。

### 三、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。

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<br>单位制度    |       | 长度( <i>l</i> ) | 时间( <i>t</i> ) | 质量( <i>m</i> ) | 力或重力( <i>f</i> ) |
|------------------|-------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| 绝对单位制            | cgs 制 | cm             | s              | g              | —                |
|                  | mks 制 | m              | s              | kg             | —                |
|                  | 英制    | ft             | s              | lb             | —                |
| 重力单位制<br>(工程单位制) | 米制    | m              | s              | —              | kgf              |
|                  | 英制    | ft             | s              | —              | lb(f)            |

##### 3. 国际单位制度(SI 制)

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,称为国际单位制度,其代号为 SI。

由于 SI 制的“统用性”和“一贯性”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)

中华人民共和国法定计量单位制度的内容见附录 1。

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,在物理单位制度中,单位为 cm,其值为 100;而在英制中,其单位为 ft,其值为 3.280 8。它们之间的换算关系为

$$\text{反应器的直径} \quad D = 1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 3.280 8 \text{ ft}$$

同理,重力加速度  $g$  在不同单位制之间的换算关系为:

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

常用物理量的单位换算关系可查附录 2。

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。

**例 0.2** 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 制,即  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

**解:** 在本教材附录 2 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 2 查出基本物理量的换算关系为

$$1 \text{ kg} = 2.204 6 \text{ lb}$$

$$1 \text{ m} = 3.280 8 \text{ ft}$$

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

采用“原单位消去法”便得到新的单位。

质量速度

$$G = 1 \left( \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \right) = 1 \left( \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \right) \left( \frac{1 \text{ kg}}{2.204 6 \text{ lb}} \right) \left( \frac{3.280 8 \text{ ft}}{1 \text{ m}} \right)^2 \left( \frac{1 \text{ h}}{3 600 \text{ s}} \right) =$$

$$1.356 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

### 2. 经验公式(或数字公式)的单位换算

经验公式中各符号都要采用规定单位的数字代入,不能随意变更。当已知数据的单位与公式所规定的单位不同时,应将整个公式加以变化,使其中各符号都采用计算者所希望的单位。由于,物理量 = 数字 × 单位,所以,数字 = 物理量 / 单位。

若将经验公式中每个符号都写成这种形式,便可利用单位间的换算因子,把原来规定的单位换算成计算者所希望的单位。

# 1

## 流体输送操作技术

### 本单元符号说明

|                                                       |                                                      |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 英文字母                                                  | 量长度, m;                                              |
| $a$ ——加速度, $\text{m/s}^2$ ;                           | $m$ ——质量, kg;                                        |
| $a$ ——质量分数;                                           | $M$ ——摩尔质量, $\text{kg/kmol}$ ;                       |
| $A$ ——截面积, $\text{m}^2$ ;                             | $N$ ——输送设备的轴功率, kW;                                  |
| $C_o$ 、 $C_v$ ——流量系数;                                 | $N_e$ ——输送设备的有效功率, kW;                               |
| $d$ 、 $d_e$ ——分别为圆管直径及非圆管的当量直径, m;                    | $p$ ——压强, Pa;                                        |
| $e$ ——涡流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;              | $\Delta p_f$ ——因克服流体阻力而引起的压强降, Pa;                   |
| $E$ ——1 kg 流体具有的机械能, J/kg;                            | $P$ ——压力, N;                                         |
| $Eu$ ——欧拉数, 无因次;                                      | $r$ ——半径, m;                                         |
| $F$ ——流体的内摩擦力, N;                                     | $r_H$ ——水力半径, m;                                     |
| $g$ ——重力加速度, $\text{m/s}^2$ ;                         | $R$ ——液柱压差计读数, m;                                    |
| $G$ ——质量速度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; | $R$ ——气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ; |
| $h$ ——高度, m;                                          | $S$ ——两流体间的接触面积, $\text{m}^2$ ;                      |
| $h_f$ ——1 kg 流体流动时因克服摩擦阻力而损失的能量, 简称能量损失, J/kg;        | $T$ ——热力学温度, K;                                      |
| $h'_f$ ——局部能量损失, J/kg;                                | $u$ ——速度, m/s;                                       |
| $H_g$ ——离心泵的允许安装高度, m;                                | $u_{\max}$ ——流体截面上的最大速度, m/s;                        |
| $l$ 、 $l_e$ ——分别为直管的长度及管件的当量长度, m/s;                  | $u_r$ ——流体截面上某点的局部速度, m/s;                           |

|                                                        |                                                      |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| $U$ ——1 kg 流体的内能, J/kg;                                | $\epsilon'$ ——体积膨胀系数;                                |
| $v$ ——比容, $\text{m}^3/\text{kg}$ ;                     | $\zeta$ ——阻力系数;                                      |
| $V$ ——体积, $\text{m}^3$ ;                               | $\eta$ ——效率;                                         |
| $q_V$ ——体积流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;                  | $\mu$ ——黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;             |
| $q_m$ ——质量流量, $\text{kg}/\text{s}$ ;                   | $\nu$ ——运动黏度, $\text{m}^2/\text{s}$ 或 $\text{cSt}$ ; |
| $w_e$ ——1 kg 流体通过输送设备获得的能量, 或输送设备对 1 kg 流体做的有效功, J/kg; | $\rho$ ——密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;                |
| $y$ ——气体的摩尔分数, 即质量分数;                                  | $\tau$ ——内摩擦应力, Pa。                                  |
| $z$ ——相对高度, m。                                         | 下标                                                   |
| 希腊字母                                                   | 1, 2——截面序号;                                          |
| $\epsilon$ ——绝对粗糙度, m 或 mm;                            | $f$ ——摩擦的;                                           |
|                                                        | $s$ ——秒的;                                            |
|                                                        | $m$ ——平均。                                            |

## 1.1 概述

流体是指可以流动的物体, 包括气体和液体。两者共同的特点是具有流动性、无固定形状, 其形状随容器形状而变化, 受外力作用时内部产生相对运动。液体几乎不具有压缩性, 受热时体积膨胀不显著, 所以一般将液体视为不可压缩流体。对于气体, 压缩性很强, 受热时体积膨胀很大, 所以气体属于可压缩流体。如果在操作过程中气体的温度和压强改变很小, 气体也可以近似地按不可压缩流体来处理。

化工生产中所处理的原料、半成品以及产品大多数是流体。生产过程中, 流体物料按照工艺流程的要求, 通过管道, 用流体输送机械输送到各个车间、设备中进行物理或者化学变化。不难看出, 流体流动的状况对化工过程的动力消耗、设备投资等有着重要的影响。因此流体流动与输送是化工生产中的一个重要单元操作, 流体流动规律也是进行其他过程的基础。

流体输送指的是按照一定目的, 把流体从一处送到另一处。为了完成工艺要求的流体输送任务, 可从生产实际出发采取不同的输送方式, 流体的输送方式有以下 4 种。

### 1.1.1 高位槽进料

高位槽进料是指利用容器、设备之间存在的位差, 将处于高位设备的流体输送到低位设备中。在工程上当需要稳定流量时, 通常设置高位槽, 以避免输送机械带来波动, 如图 1.1 所示。

### 1.1.2 真空抽料

真空抽料是指通过真空系统造成的负压来实现流体从一设备输送到另一个设备的操作, 如图 1.2 所示。储罐 2 内的空气经空气缓冲罐由真空泵抽出, 两罐之间形成

负压,实现物料由储罐1到储罐2的输送。

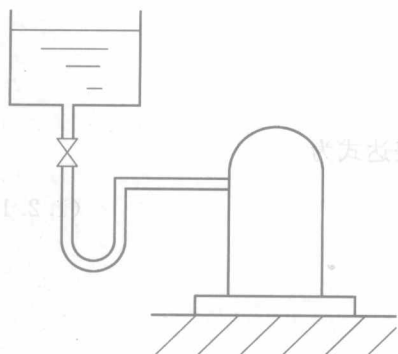


图 1.1 高位槽进料示意

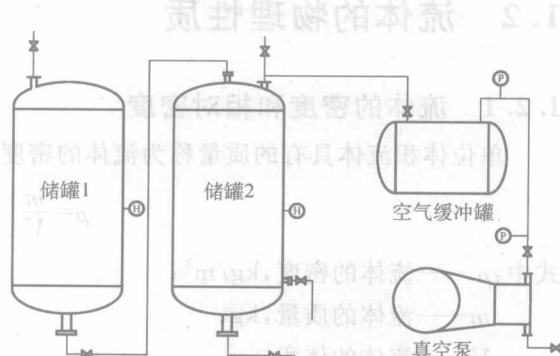


图 1.2 真空输送物料示意

真空抽料是化工生产中常用的一种流体输送方法,其特点是结构简单,没有运动部件,操作方便,但流量调节不方便,需要真空系统,且不能输送易挥发性的液体,主要用在间歇送料的场合。

### 1.1.3 压缩空气送料

压缩空气送料是指通过压缩空气实现流体从一个设备输送到另一个设备的操作,如图 1.3 所示。压缩空气送料结构简单,无运动部件,可以间歇输送腐蚀性液体以及易燃易爆流体。但是此法流量小、不易调节并且只能间歇输送流体。

### 1.1.4 流体输送机械送料

流体输送机械送料是指借助流体输送机械对流体做功,实现流体输送的操作。由于流体输送机械的类型很多,压头及流量的可选范围较宽,流体输送机械送料是化工厂中最常见的流体输送方式,如图 1.4 所示。

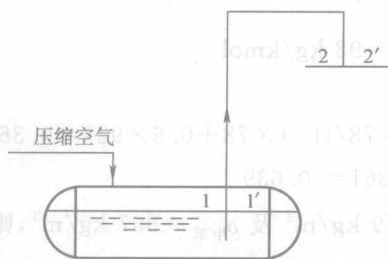


图 1.3 压缩空气送料示意

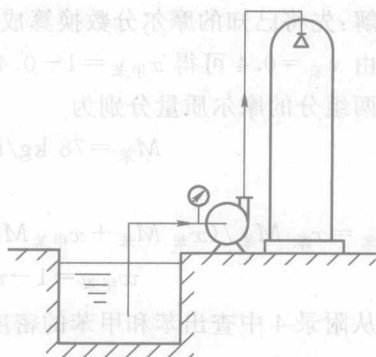


图 1.4 流体输送机械送料示意

为了完成有关流体输送的任务,化工生产一线的操作人员必须对流体的性质、流体流动的基本规律、化工管路、流体阻力以及流体输送机械等相关知识有一定了解。