

广东省精品课程教材

化工单元操作 过程与设备

上册

李功样 陈兰英 余林 编著

华南理工大学出版社

广东省精品课程教材

化工单元操作过程与设备

(上册)

李功样 陈兰英 余 林 编著

华南理工大学出版社

· 广州 ·

内 容 提 要

本书主要介绍化工生产过程中常用单元操作的基本原理、典型设备的结构及其选用(或设计)计算。全书分上、下两册。上册内容包括:绪论、流体流动、流体输送机械、沉降与过滤及其流态化、传热、蒸发及附录;下册内容包括:蒸馏、吸收、气液传质设备、干燥和膜分离。每章均配有一定的例题和习题。

全书内容循序渐进、深入浅出,强调工程观点与实际运用能力;文字简洁、语言通俗,便于自学。

本书可作为高等院校化工及相关专业的“化工原理”课程教材,并与已出版的《常用化工单元设备设计》一书配套使用;也可作为化工、医药、食品、环保等部门从事科研、设计和生产的技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工单元操作过程与设备. 上册/李功样, 陈兰英, 余林编著. —广州: 华南理工大学出版社, 2010. 6

广东省精品课程教材

ISBN 978-7-5623-3298-5

I. ①化… II. ①李… ②陈… ③余… III. ①化工单元操作 ②化工设备
IV. ①TQ02 ②TQ05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 085906 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)

营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail: scutcl3@scut.edu.cn http://www.scutpress.com.cn

责任编辑: 胡元 张颖

印刷者: 广州市穗彩彩印厂

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 20.5 字数: 538 千

版次: 2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1~3000 册

定 价: 35.00 元

版权所有 盗版必究

目 录

0 绪论	1	2.1.1 离心泵的主要部件及其工作原理	68
0.1 本书的内容与任务	1	2.1.2 离心泵的基本方程式	72
0.2 物料衡算及热量衡算	2	2.1.3 离心泵的主要性能参数与特性曲线	75
0.3 物理量的单位换算及经验公式的变换	5	2.1.4 离心泵性能的影响因素及其换算	78
习题	6	2.1.5 离心泵的允许安装高度	80
1 流体流动	7	2.1.6 离心泵的工作点及其流量调节	83
1.1 流体静力学方程式	8	2.1.7 离心泵的串、并联操作	86
1.1.1 有关物理概念	8	2.1.8 离心泵的类型与选用	88
1.1.2 流体静力学方程式	10	2.2 其他类型液体输送机械	91
1.1.3 流体静力学方程式的应用	12	2.2.1 往复泵	91
1.2 流体在管内的流动	15	2.2.2 旋转泵	96
1.2.1 有关物理概念	15	2.2.3 旋涡泵	96
1.2.2 流体输送管道直径的确定	17	2.3 气体输送和压缩机械	97
1.2.3 流体流动的连续性方程式	18	2.3.1 离心通风机	98
1.2.4 能量衡算方程式——柏努利方程式	19	2.3.2 鼓风机	100
1.2.5 能量衡算方程式的应用	23	2.3.3 压缩机	101
1.3 流动阻力的产生及其影响因素	26	2.3.4 真空泵	107
1.3.1 牛顿粘性定律与流体的粘度	26	习题	109
1.3.2 流动的类型与雷诺数	28	思考题	111
1.3.3 流体在圆直管内流动的速度分布	30	3 沉降与过滤及其流态化	112
1.3.4 边界层的概念	32	3.1 沉降分离	113
1.3.5 流动阻力的影响因素	34	3.1.1 重力沉降	113
1.4 流动阻力的计算	35	3.1.2 离心沉降	125
1.4.1 直管段阻力的计算	35	3.2 过滤	138
1.4.2 局部阻力损失的计算	41	3.2.1 有关概念	138
1.4.3 总能量损失的计算	44	3.2.2 过滤基本方程式	141
1.5 管路的计算和布置	46	3.2.3 过滤常数的测定	149
1.5.1 管路计算基础(对于不可压缩流体而言)	47	3.2.4 过滤设备	152
1.5.2 管路计算举例	48	3.3 流态化	161
1.5.3 管路的布置	54	3.3.1 固体流态化	161
1.6 流量测量	54	3.3.2 气力输送	170
习题	61	习题	174
思考题	66	思考题	175
2 流体输送机械	68	4 传热	177
2.1 液体输送机械	68	4.1 概述	177
		4.1.1 传热的基本方式及其	

热交换方式	178	附录	282
4.1.2 化工生产中常用的		一、常用单位的换算	282
换热设备	180	1. 一些物理量在三种单位制	
4.1.3 稳态传热和不稳态传热	183	中的单位和量纲	282
4.1.4 传热速率和热通量	184	2. 单位换算	282
4.2 热传导	184	二、干空气的物理性质	
4.2.1 热传导的基本方程式		(101.33 kPa)	285
——傅立叶定律	185	三、某些气体的重要物理性质	286
4.2.2 平壁的稳态热传导	187	四、某些液体的重要物理性质	287
4.2.3 圆筒壁的稳态热传导	189	五、水和蒸汽的物理性质	288
4.3 对流传热	194	1. 水的物理性质	288
4.4 热交换传热过程的计算	196	2. 水在不同温度下的粘度	290
4.4.1 热交换总传热速率方程式	196	3. 饱和水蒸气表(以温度为准)	291
4.4.2 热负荷(传热速率)		4. 饱和水蒸气表(以用 kPa	
的计算	197	为单位的压强为基准)	292
4.4.3 平均温度差的计算	198	六、某些液体的导热系数	294
4.4.4 传热单元数法	204	七、某些气体和蒸汽的导热系数	296
4.4.5 总传热系数的计算	210	八、某些固体材料的重要	
4.4.6 对流传热系数关联式	214	物理性质	297
4.4.7 壁温及其热损失的估算	228	九、流体物性共线图	298
4.4.8 换热器的传热面积与		1. 液体的粘度和密度	298
管长	230	2. 101.33 kPa 压强下气体的粘度	302
4.4.9 计算示例	230	3. 液体的比热容	304
4.5 间壁式换热器的强化途径	234	4. 101.33 kPa 压强下气体	
4.5.1 传热过程的强化途径	234	的比热容	306
4.5.2 新型热交换器	236	5. 汽化热(蒸发潜热)	308
4.6 管壳式换热器的选用		6. 液体的表面张力	310
及其设计	240	十、壁面污垢的热阻	
习题	244	(污垢系数) $[(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}]$	312
思考题	248	十一、无机盐水溶液的沸点	312
5 蒸发	249	1. 无机盐水溶液在 101.33 kPa	
5.1 概述	249	压强下的沸点	312
5.2 蒸发设备	249	2. 101.33 kPa 压强下溶液的沸点	
5.2.1 蒸发器	249	升高与浓度的关系	314
5.2.2 蒸发辅助设备	255	十二、管子规格(摘录)	314
5.3 蒸发过程的计算	257	十三、泵规格(摘录)	316
5.3.1 单效蒸发计算	257	十四、4—72—11 型离心通风机	
5.3.2 多效蒸发	268	规格(摘录)	319
5.4 蒸发操作的优化	278	十五、管壳式换热器系列	
习题	280	标准(摘录)	320
思考题	281	参考文献	324

绪论

0.1 本书的内容与任务

在化学工业生产中，每一种产品的生产，由原料变成产品，大都经历若干种方式、在若干个设备内进行。例如，从油井开采出的原油，经加工精制成不同使用目的的汽油、煤油、柴油等，其主要的精制方法是精馏。石油加工精制流程示意图如图 0-1 所示。

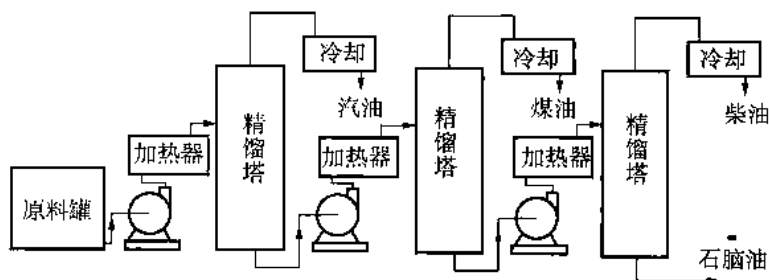


图 0-1 石油加工精制流程示意图

由图可见，除精馏外，还必须辅助有加热、冷却、保温和原料液的输送（流体流动）等，才能保证生产顺利、连续地进行。

在生产实践中，人们逐渐认识到化工、食品等工业，尽管其物料不同，但都有着共同的基础。例如，酿酒工业也是通过蒸馏方法生产出酒。正确的认识来源于实践，人们注意到在千变万化的化工产品的生产中，可将它们分解为若干种单元操作过程。研究各种单元操作过程的基础理论和典型设备的构造及工艺计算（或选型），这一学科就是俗称的化工原理。

本书所讨论的单元操作过程，仅限于化工及其有关各行业通用物理过程的基本原则和设备。这些单元操作过程的特点为：

(1) 它们都是物理操作。这些操作仅改变物料的状态或物理性质，并不改变其化学性质。对于改变其化学性质的操作过程，属化学反应工程学领域，本书不作讨论。

(2) 它们都是化工生产中的共同操作。例如，干燥操作过程，既可在造纸、制皂、染料和制药等有机工业中采用，也可在陶瓷、制碱和制盐等无机工业中采用。

(3) 某单元操作过程用于不同的化工过程，其基本原理相同，进行操作的设备往往也可通用。例如，不同行业对流体进行输送，其操作原理相同，均使用泵或风机来实现。泵与风机均可作为各生产行业的通用设备。

鉴于上述单元操作过程的特点，本书主要内容包括：

(1) 流体动力过程 讨论流体流动所遵循的自然法则，以及流体流动时与之相接触的固体表面间的关系和流体力学中各法则的应用。所包括的内容有流体力学基础、流体输

送、过滤和沉降、固体流态化与气力输送等。

(2) 热量传递过程 讨论热量传递的基本规律及其应用, 解决化工设备或管道的保温与绝热, 及其热交换设备的设计或选用等问题。所包括的主要内容有传热、结晶与蒸发等。

(3) 质量传递过程 讨论物质通过相界面的扩散分离原理及如何实现对混合物的分离。所包括的内容有蒸馏、吸收、气液传质设备和干燥等。

单元操作过程是化工生产的基础。通过对本书内容的学习, 我们的目的立足于:

(1) 根据各单元操作过程在技术和经济上的特点, 进行过程和设备的选择, 以适用于指定的物料特性, 经济而有效地满足工艺上的要求。

(2) 进行过程的计算和设备的设计。在缺乏数据的情况下, 组织相应的实验, 以获取必要的设计数据。

(3) 进行操作和调节以适应生产的不同要求。在操作发生故障时及时找出故障原因, 以便尽快解决或防止进一步发生。

0.2 物料衡算及热量衡算

在化工生产过程中涉及的基本定律很多, 如质量守恒定律、能量守恒定律、过程平衡关系及过程速率等。质量守恒定律在化工计算中具体应用于物料衡算, 而能量守恒定律则具体应用于热量衡算。物料衡算与热量衡算是化工计算的基础, 下面将分别进行说明。

1. 物料衡算

利用物料衡算, 可以计算出生产过程中原料的消耗量、所获得的产品量及过程中物料的损耗量, 也可计算出物料由一相转移到另一相的数量。

根据质量守恒定律, 向系统(某一特定范围、生产过程或设备)输入物料的总质量减去由系统输出物料的总质量必等于累积在系统中的物料质量, 可写成

$$\sum m_i - \sum m_o = m_A \quad (0-1)$$

式中, $\sum m_i$ —— 向系统输入物料质量的总和, kg;

$\sum m_o$ —— 由系统输出物料质量的总和, kg;

m_A —— 累积在系统内的物料质量, kg。

式(0-1)为物料衡算的通式, 既适用于连续操作过程, 也适用于分批操作(间歇操作)过程。

对于稳定连续操作过程, 由于常以单位时间为基准, 故可按质量流量及物料质量累积速率将式(0-1)改写为

$$\sum w_i - \sum w_o = \frac{dm_A}{d\theta} \quad (0-2)$$

式中, w_i, w_o —— 分别为输入与输出物料中每一股物料的质量流量, kg/s;

$\frac{dm_A}{d\theta}$ —— 物料的质量累积速率, kg/s。

由于是连续稳定过程, 系统内没有任何物料累积, 即 $\frac{dm_A}{d\theta} = 0$, 所以

$$\sum w_i - \sum w_o = 0 \quad (0-3)$$

也就是说，总输入质量流量等于总输出质量流量。

物料衡算在化工计算中占有相当重要的地位，其计算方法和步骤简述如下：

(1) 根据题意画出过程的简单示意图，用箭头表示物料的进、出路线，并注明各股物料的状态和数量。

(2) 选定衡算范围(常用虚线圈出)。衡算范围可取一个设备、一组设备或设备的某一部分，在化工计算中往往以一个生产过程作为基准。所选定的范围可认为与外界无关且独立，凡跨越虚线的箭头都是参与衡算的流股。

(3) 规定衡算基准。对于间歇操作，通常取一个操作循环作为基准；对于连续操作，通常以单位时间为基准。

(4) 列出若干个有用的独立方程。注意：所列出的方程数目应与未知数数目相等，对于所缺少的物性常数(如密度、粘度等)可从附录或有关手册中查出。

(5) 联立方程求解。

下面举例说明。

【例 0-1】 如本例附图所示，在两个蒸发器中，每小时将 5 400 kg 的 NaOH 水溶液从 9.8%(质量分数，下同)浓缩到 30%。已知经第一蒸发器流出的溶液质量分数为 14.6%，试求：(1)各蒸发器的蒸发水分量；(2)各蒸发器流出的浓缩液量。

解 根据题意画出流程示意图，如例 0-1 附图所示。以符号 W_1, F_1 和 W_2, F_2 分别表示经第一蒸发器与第二蒸发器的蒸发水分量和浓缩液量。如图虚线方框所示选取衡算范围 A 和 B，衡算基准为 1h。那么，

对于衡算范围 A，依 NaOH 组分写出： $F_0 x_0 = F_2 x_2 \longrightarrow 5400 \times 0.098 = F_2 \times 0.3$

依总物料写出： $F_0 = W_1 + W_2 + F_2 \longrightarrow 5400 = W_1 + W_2 + F_2$

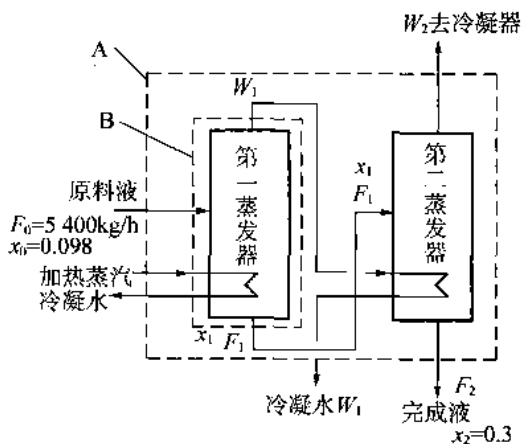
对于衡算范围 B，依 NaOH 组分写出：

$$F_0 x_0 = F_1 x_1 \longrightarrow 5400 \times 0.098 = F_1 \times 0.146$$

依总物料写出： $F_0 = W_1 + F_1 \longrightarrow 5400 = W_1 + F_1$

将上述方程联立求解得：

$$F_1 = 3624.7 \text{ kg/h} \quad W_1 = 1775.3 \text{ kg/h}$$

$$F_2 = 1764 \text{ kg/h} \quad W_2 = 1860.7 \text{ kg/h}$$


例 0-1 附图 物料衡算计算方法和步骤示意

2. 热量衡算

热量衡算的依据是能量守恒定律。热量衡算的方法和步骤与物料衡算大体相同，但应注意：

(1) 进行热量衡算时除必须明确规定参与衡算的范围和基准外，为了确定物料的焓值，还必须规定基准温度。此外，在有相变发生时，还要规定基准状态(通常以 0°C 液态为基准)。这是因为物料的焓值包括显热和潜热两部分，它与状态有关，因此是个相对值。

(2) 热量不仅由进、出系统的物料带入、带出，还可透过设备、管道的壁面向外界散失或由外界传入。因此，只要系统温度与外界环境温度有差异，就会有热量从外界输入或散失。

所以，根据能量守恒定律，对于稳定的连续过程，可写出其基本关系式为

$$\sum (wH)_i - Q_L = \sum (wH)_o$$

或

$$\sum (wH)_i = \sum (wH)_o + Q_L \quad (0-4)$$

式中， w ——物料的质量流量， kg/s ；

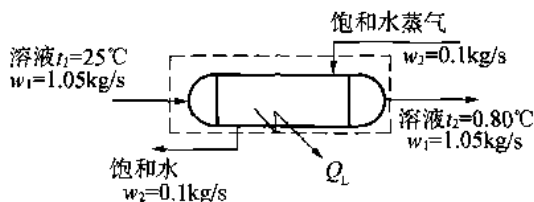
H ——单位质量物料的焓值， kJ/kg ；

$\sum (wH)_i$ ——进入系统各流股物料的总热流量， kW ；

$\sum (wH)_o$ ——离开系统各流股物料的总热流量， kW ；

Q_L ——系统向环境散失(或吸入)的热流量，也称“热损失”， kW 。

【例 0-2】 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 加热至 80°C ，溶液的流量为 1.05kg/s 。加热介质为 120°C 的饱和水蒸气，其消耗量为 0.1kg/s ，蒸汽冷凝成同温度下的饱和水后排出。试计算此换热器的热损失占水蒸气所提供热量的百分数。



例 0-2 附图

解 首先根据题意画出过程的示意图

(参见本例附图)。图中用虚线框表示出进行热量衡算的范围，取衡算基准为 1s ，基准温度为 0°C 。

由附录五查得 120°C 饱和水蒸气的焓值 H_2 为 2709kJ/kg ， 120°C 饱和水的焓值 H'_2 为 503.7kJ/kg ，那么

随溶液带入系统的热流量： $Q_{1i} = w_1 c_p (t_1 - t_0) = 1.05 \times 3.56 (25 - 0) = 93.45 (\text{kW})$

随饱和水蒸气带入系统的热流量： $Q_{2i} = w_2 H_2 = 0.1 \times 2709 = 270.9 (\text{kW})$

随溶液带出系统的热流量： $Q_{1o} = w_1 c_p (t_2 - t_0) = 1.05 \times 3.56 (80 - 0) = 299.04 (\text{kW})$

随饱和水带出系统的热流量： $Q_{2o} = w_2 H'_2 = 0.1 \times 503.7 = 50.37 (\text{kW})$

将上述数值代入式(0-4)可得 $93.45 + 270.9 = 299.04 + 50.37 + Q_L$

所以，热损失为： $Q_L = 14.94\text{ kW}$

热损失百分数为： $\frac{14.94}{270.9 - 50.37} \times 100\% = 6.77\%$

0.3 物理量的单位换算及经验公式的变换

1. 物理量的单位换算

在进行化工过程计算中,任一公式中的各物理量都规定了所对应的单位。如果所引用的数据单位不符合要求,必须进行换算,使所用物理量的单位完全符合要求后再代入公式。否则,临时才换算,往往容易出现错误和遗漏。

同一个物理量可用不同的“数字×单位”表达。例如,某线段长度可表示为1 m,也可表示为100 cm,可见1 m与100 cm是“等价”的。对于除温度以外的物理量,均可将“等价”的两种物理量表达式写成相比的形式,即构成“换算因数”。例如,1 m=100 cm,那么,m与cm之间的换算因数可写成 $\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}$ 或 $\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}$ 。由此可见,任何换算因数(包括其单位部分在内)其本质上都是纯数1,所以可采用引入换算因数的方法对物理量进行单位换算。

对于温度的单位换算不能采用换算因数的方法,须遵循其特殊规律。例如,原温度 t 的单位为 $^{\circ}\text{C}$,若采用 $T(\text{K})$ 表示时,那么 T 与 t 的换算关系为: $T=(t+273.16)$ 。

【例0-3】 试将通用气体常数 $R=82.06 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/(\text{mol} \cdot \text{K})^*$,换算为国家法定单位表示。

解 先列出各有关物理量不同单位间的换算关系,即

$$1 \text{ atm}=101\,330 \text{ N/m}^2, \quad 1 \text{ m}^3=10^6 \text{ cm}^3, \quad 1 \text{ kmol}=1\,000 \text{ mol}$$

引入换算因数,那么,

$$R=82.06 \times \left[\frac{[\text{atm}] \times \frac{101\,330 [\text{N/m}^2]}{1 [\text{atm}]} \times [\text{cm}^3] \times \frac{1 [\text{m}^3]}{10^6 [\text{cm}^3]}}{[\text{mol}] \times \frac{1 [\text{kmol}]}{1\,000 [\text{mol}]}} \right]$$

$$=8\,315 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

2. 经验公式的变换

在化工计算中会大量运用经验公式。所谓经验公式,是根据实验数据整理出来的式子,它仅适用于某种特定条件、范围(与实验相吻合的场合)。经验公式中各符号只代表物理量的数字部分,而它们的单位必须采用指定的单位,故经验公式又称为数字公式。当已知数据的单位与公式所规定的单位不同而这一公式又需经常使用时,可将整个公式进行变换。其具体的方法和步骤举例说明。

【例0-4】 试将泡核沸腾下对流传热分系数的经验公式 $\alpha=39p^{0.5}\Delta t^{2.33}$,其中 p 的单位为atm,由原所适用的工程单位 $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 改为现常用的国家法定单位 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

解 首先将经验公式中每个符号写成物理量与所规定的单位之比形式,即

$$\frac{\alpha'}{[\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}]} = 39 \left(\frac{p'}{[\text{atm}]} \right)^{0.5} \left(\frac{\Delta t'}{[^{\circ}\text{C}]} \right)^{2.33}$$

然后,列出各物理量不同单位间的换算关系及相应的换算因数:

* 注:本书考虑到实际工程应用的需要,采用了一些非法定单位,其具体换算见附录。

$$1 \text{ kcal} = 4187 \text{ J} \quad \text{写出换算因数为} \frac{4187 [\text{J}]}{1 [\text{kcal}]}$$

$$1 \text{ atm} = 101330 \text{ Pa} \quad \text{写出换算因数为} \frac{101330 [\text{Pa}]}{1 [\text{atm}]}$$

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s} \quad \text{写出换算因数为} \frac{3600 [\text{s}]}{1 [\text{h}]}$$

$$\text{温度差 } 1 [^{\circ}\text{C}] = 1 [\text{K}]$$

引入各换算因数进行单位变换, 写出为

$$\frac{\frac{\alpha'}{[\text{kcal}] \times \frac{4187 [\text{J}]}{1 [\text{kcal}]}}{[\text{m}^2] \times [\text{h}] \times \frac{3600 [\text{s}]}{1 [\text{h}]} \times [\text{K}]}}{\frac{[\alpha']}{[\text{J}]} = \left(\frac{39 \times 4187}{3600} \right) \times \left(\frac{1}{101330} \right)^{0.5} \times \left(\frac{p'}{[\text{Pa}]} \right)^{0.5} \times \left(\frac{\Delta t'}{[\text{K}]} \right)^{2.33}}{[\text{m}^2] \cdot [\text{s}] \cdot [\text{K}]}}$$

整理后得

$$\frac{\alpha'}{[\text{W}]} = 0.143 \left(\frac{p'}{[\text{Pa}]} \right)^{0.5} \left(\frac{\Delta t'}{[\text{K}]} \right)^{2.33}$$

最后, 写出经变换后的经验公式为

$$\alpha = 0.143 p^{0.5} \Delta t^{2.33}$$

变换后对流传热分系数经验公式的单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 而压强的单位为 Pa 。

习 题

1. 某湿物料在干燥器内由原来含水量为 18% (质量分数) 干燥到 0.8%。试求每吨物料干燥后的含水量。

2. 1 大气压下苯的饱和蒸气 (80.1°C) 在热交换器中冷凝并冷却为 70°C 的液体。冷却水在 30°C 下进入, 在 60°C 下排出。试求每千克苯蒸气需多少冷却水。1 大气压下苯的汽化热为 393.9 kJ/kg , 在 $70 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 范围苯的平均比热容为 $1.924 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

3. 试从基本单位入手, 将下列物理量的单位换算为法定单位:

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

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

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

4. 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, $^{\circ}\text{C}$ 。

试对该式进行换算, 将式中 p 的单位换为 Pa , 温度的单位换为 K 。

1 流体流动

在化工厂可以看到输送流体的管道非常多，这是因为从原料到产品的整个生产过程，物料需不断地从一个设备输送到另一个设备，而这些物料又大多数是流体。因此，人们把输送管路所起的作用比作人体内的血管所起的作用是恰如其分的。那么，对于如此大量的流体输送管路，包括各种管件和调节阀门、输送机械(泵与压缩机)以及计量流量、压强等的测量仪表，能否进行正确的设计和选用，是关系到整个生产过程增产节约的大问题。下面以从贮罐到某精馏塔输送料液为例(如图 1-1 所示)，分析一般管路设计所遇到的主要问题。

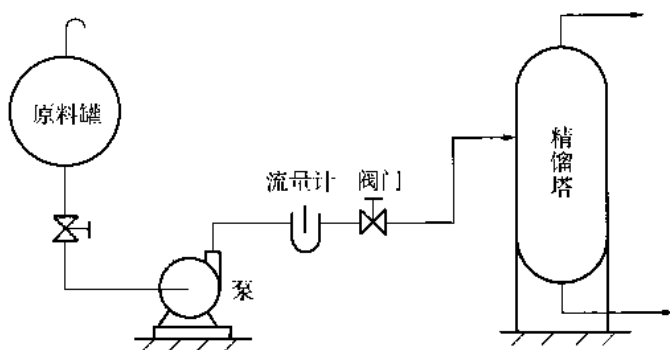


图 1-1 精馏塔原料液输送系统示意图

这是一段比较简单的管路，但设计起来也必然会遇到：

(1) 管道直径需多大？这是一个应如何选择适宜流动速度的问题。根据一定的输送任务(每小时要求输送料液若干 m^3)：管道细，则流速大；管道粗，则流速小。但流动时所消耗的能量一般与流速的平方成正比，因此管细流速大，所消耗能量大，反之则小。那么，应选择多大直径的管道？这是一个首先需要合理解决的问题。

(2) 计算在一定管路中完成工艺要求输送任务所需的能量，及其应外加多少能量。这是选择输送机械的基础数据。

(3) 选择什么样的输送机械？除需考虑能提供足够的能量而又不会过大(即效率高)外，还要根据物料的性质采用合适的类型。

(4) 在合适的位置配置流量、压强等测量仪表与调节阀门，这也是需要考虑的问题。

要解决上述问题，必须了解与流体流动有关的规律。学习与流体流动有关的规律及运用这些规律计算流体输送所需能量的方法等，就是本章的任务。至于上述第(3)项的内容将在第 2 章讨论。

值得一提的是，流体有液体和气体之分，它们都具有流动性，受力作用后容易变形，内部会产生相对运动等共同点。至于压缩性(密度随压强或温度变化而变化的特性)则有明

显差别。在研究流体流动时,认为液体都是不可压缩的,气体都是可压缩的。但在输送过程中,若气体密度变化不大时,也可按不可压缩流体处理。本章主要讨论的流体是不可压缩的流体。

1.1 流体静力学方程式

流体静力学是研究流体在外力(重力和压力)作用下达到平衡的规律。流体的静止只不过是流体流动的一种特殊形式(这在后面的学习中将会说明),两者既有区别又有联系;讨论前者,主要为讨论后者服务。

为了讨论上的方便,先介绍密度和压强这两个物理概念。

1.1.1 有关物理概念

1. 密度

单位体积流体所具有的质量称为流体密度。即

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

式中, ρ —— 流体密度, kg/m^3 ;

m —— 流体质量, kg ;

V —— 流体体积, m^3 。

气体和液体统称为流体,流体的密度通常可用函数关系表示为 $\rho = f(p, T)$ 。液体是不可压缩性的流体,其密度随压强和温度的变化不明显,在化工计算中一般可忽略其影响。各种液体的密度可从有关手册或附录中查取。气体是可压缩性的流体,其密度随压强和温度的变化明显,所以从手册查得的数据,通常还要换算为操作条件下的密度后才可使用。

对于气体,当压强不太高、温度不太低时,一般可按理想气体来处理。其体积、压强和温度之间的变化关系为

$$\frac{pV}{T} = \frac{p'V'}{T'}$$

将式(1-1)代入并整理可得

$$\rho = \rho' \frac{T'p}{Tp'} \quad (1-2)$$

式中, p, T —— 分别为操作条件下气体的绝对压强(Pa)和绝对温度(K);

p', T' —— 分别表示手册中指定条件下气体的绝对压强(Pa)和绝对温度(K)。

某种状态下理想气体的密度也可用下式计算,即

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2a)$$

或

$$\rho = \frac{MT_0 p}{22.4Tp_0} \quad (1-2b)$$

式中, M —— 气体的摩尔质量, kg/mol ;

R ——气体常数, 其值为 $8.315\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

p_0, T_0 ——标准状态下气体的绝对压强(Pa)和绝对温度(K)。

化工生产中的流体往往为含有几个组分的混合物。通常利用手册仅能查出纯物质的密度, 所以混合物的平均密度 ρ_m 还要通过下述公式进行计算。

对于液体混合物, 各组分的浓度用质量分率表示, 其平均密度换算式为

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{1A}}{\rho_A} + \frac{x_{1B}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{1n}}{\rho_n} \quad (1-3)$$

式中, $\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各纯组分的密度, kg/m^3 ;

$x_{1A}, x_{1B}, \dots, x_{1n}$ ——液体混合物中各纯组分的质量分率。

对于气体混合物, 各组分的浓度用体积分率表示, 其平均密度换算式为

$$\rho_m = \rho_A x_{GA} + \rho_B x_{GB} + \dots + \rho_n x_{Gn} \quad (1-4)$$

式中, $x_{GA}, x_{GB}, \dots, x_{Gn}$ ——气体混合物中各组分的体积分率;

$\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ ——气体混合物中各纯组分的密度, kg/m^3 。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可按式(1-2a)或式(1-2b)计算。这时, 式中的气体摩尔质量 M 应以气体混合物的平均摩尔质量 M_m 代替。气体混合物的平均摩尔质量 M_m 可依下式求算, 即

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \dots + M_n y_n \quad (1-5)$$

式中, m_A, m_B, \dots, m_n ——气体混合物中各组分的摩尔质量, kg/kmol ;

y_A, y_B, \dots, y_n ——气体混合物中各组分的摩尔分率。

2. 流体的静压强

流体的静压强是指单位面积上所受到流体垂直方向上的压力, 即

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-6)$$

流体静压强的单位为 Pa, 常用单位有 mmHg、atm、 kg/cm^2 及 m 流体柱等。现将它们之间的换算关系说明如下。

取一根截面积为 $A\text{m}^2$ 的管子, 将其上端封闭, 管口插入一盛水银的开口容器中, 如图 1-2 所示。若管内抽真空, 那么水银在大气压力的作用下被压入管中并上升至 $z\text{m}$ 。由于流体静止时, 同一水平液面上各点的压强相等, 若 p_2 表示管内液面压强, p_3 表示管外液面压强, 那么, $p_2 = p_3 = p_0$ (大气压), 由于管内上端是真空 ($p_1 = 0$), 所以, $p_0 = p_2 = p_{\text{静}}$ 。

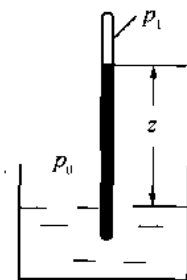


图 1-2 大气压强的测定

设流体的密度为 $\rho\text{kg}/\text{m}^3$, 那么流体本身的重量为 $(\rho g z \cdot A)$, 它作用于管内液面处的 $A\text{m}^2$ 截面上, 故

$$p_0 = p_{\text{静}} = \frac{\rho g z \cdot A}{A} = \rho g z$$

已知一个物理大气压等于 760mmHg , 水银的密度为 $13\,600\text{kg}/\text{m}^3$, 因此,

$$p_0 = 13\,600 \times 9.8 \times 0.76 = 1.013 \times 10^5 (\text{N}/\text{m}^2) = 1.013 \times 10^5 (\text{Pa})$$

各常用单位的换算关系如下:

$$1\text{atm}=760\text{mmHg 柱}=10.33\text{m 水柱}=1.033\text{kgf/cm}^2=1.0133\times 10^5\text{Pa}$$

工程上为了使用和换算方便,常将 1kgf/cm^2 近似地作为 1 个大气压,称为 1 个工程大气压(1at)。于是

$$1\text{at}=1\text{kgf/cm}^2=735.6\text{mmHg}=10\text{mH}_2\text{O}=9.807\times 10^4\text{Pa}$$

流体的压强除用不同的单位计量外,还可以用绝对压强、表压强和真空度来表示。以绝对零压为起点计算的压强称为绝对压强,它反映了系统内压强的实际数值。

流体的压强可用测量仪表来测量。若所测系统内的压强高于当地大气压强,其压强测量需用压力表。由压力表所读得的数值称为表压强。它不是所测系统内的实际数值,而是这个实际数值高于大气压强的数值。表压强与绝对压强的关系可表示为

$$\text{表压强}=\text{绝对压强}-\text{大气压强}$$

若所测系统内的压强低于当地大气压强,则流体压强的测量需用真空表。由真空表所读得的数值称为真空度。同样,真空度只表示所测系统压强的实际数值低于大气压强的数值。真空度与绝对压强间的关系可表示为

$$\text{真空度}=\text{大气压强}-\text{绝对压强}$$

$$\text{或 真空度}=-\left(\text{绝对压强}-\text{大气压强}\right) \\ =-\text{表压强}$$

可见,真空度用表压强表示时在其前面应加上负号。

绝对压强、表压强与真空度之间的关系可用图 1-3 直观地描述。

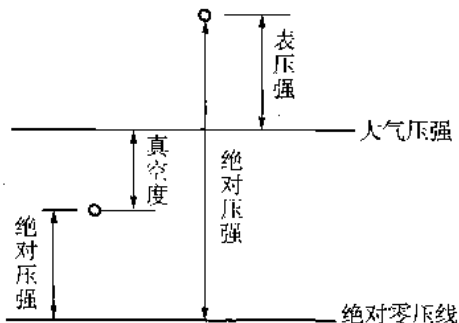


图 1-3 绝对压强、表压强与真空度之间的关系

1.1.2 流体静力学方程式

本节主要讨论流体在重力和压力作用下达到平衡的规律,以及反映这一规律的方程式。通常,游泳的人都会感到水中有压力,潜水员更能体会到,水中越深的地方,压力越大。那么,静止流体(即重力作用下达到平衡的流体)中不同高度的水面,其压强随高度变化的规律如何?能否用一个公式表示出来呢?

设在一盛有液体密度为 ρ 的容器中,取一底面积为 $dxdy$ 的垂直液柱,其上底面距容器底面距离为 z_1 ,其下底面距容器底面距离为 z_2 。若 Z 轴方向垂直向上,沿 z 方向的 z 位置选取一厚度为 dz 的微元体,如图 1-4 所示。

对于 Z 轴,作用于该微元体上的力有:

①向上作用于下底面的压力: $pdx dy$;

②向下作用于上底面的压力: $-\left(p+\frac{\partial p}{\partial z}dz\right)dxdy$;

③向下作用于整个立方体的重力: $-\rho g dxdydz$ 。

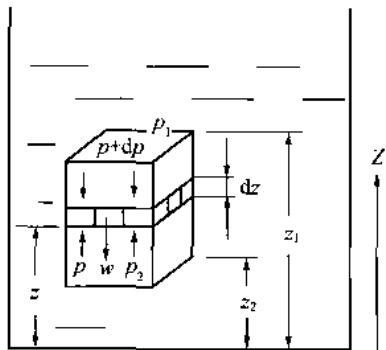


图 1-4 静力学基本方程式推导示意图

由于流体处于静止，作用于Z轴上各力的代数和应等于零。因此，Z方向上力的平衡式可写成

$$\rho dx dy - \left(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz\right) dx dy - \rho g dx dy dz = 0$$

即
$$-\frac{\partial p}{\partial z} dx dy dz - \rho g dx dy dz = 0$$

两边同除以 $dx dy dz$ 可得

$$\text{Z 轴} \quad -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g = 0 \quad (\text{a})$$

同理，因为作用于X、Y轴仅有压力，故相应可将X、Y方向力的平衡式写为

$$\text{X 轴} \quad -\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (\text{b})$$

$$\text{Y 轴} \quad -\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (\text{c})$$

将式(a)、(b)、(c)分别乘以 dz 、 dx 、 dy ，然后相加可得

$$\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz = -\rho g dz$$

上式等号的左侧为压强的全微分 dp ，所以

$$dp + \rho g dz = 0$$

对于不可压缩流体， $\rho = \text{常数}$ ，上式积分得

$$\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数}$$

对于所选取的垂直液柱上、下底面而言，可写出

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (1-7)$$

或

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \quad (1-7a)$$

若垂直液柱上底面与容器的液面平齐，液面上方的压强为 p_0 ，垂直液柱下底面距液面高度 h 处的压强为 p ，可将式(1-7a)改写成

$$p = p_0 + \rho g h \quad (1-7b)$$

式(1-7)、式(1-7a)和式(1-7b)称为流体静力学方程式。它表示在静力场下，静止流体内部压强的变化规律。

由式(1-7b)可见，在静止流体内部，在液面下任一点的压强是深度 h 的函数，距液面愈深，压强越大。若 p_0 有变化，那么液面下任一点的压强也将发生变化。所以，液面上所受的压强能以同样大小传递到液体内部(巴斯噶定律)。水压机就是利用这一原理制成的。

若将式(1-7b)改写成 $\frac{p-p_0}{\rho g} = h$ ，由于 h 的单位为 m ， $\frac{p-p_0}{\rho g}$ 的单位也应为 m ，它说明流体的压强可用相应流体的液柱高度来表示。压强的测量仪表就是根据这一原理设计的。

由式(1-7a)可知，当 ρ 相同(同一液体)， $z_1 = z_2$ 时， $p_1 = p_2$ 。它说明同一种流体在同

一水平面上各点的静压强相等。

值得注意的是，上述方程式是根据静止的连通着的同一种连续流体导出的，因此仅能应用于静止的连通着的同一种流体内部。如图 1-5 所示， $p_2 = p'_2$ ，这是因为同一水平面上连通的为同一种流体；但 $p_1 \neq p'_1$ ，这是因为虽在同一水平面上但连通的不是同一种流体。

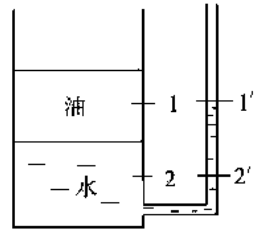


图 1-5 不同液体内的静压强

1.1.3 流体静力学方程式的应用

流体静力学方程式在化工生产中应用非常广泛。依据这一方程式所设计的测量压强与压强差的仪表，如 U 管压差计、微差压差计，可对流体的压强或压强差进行测量；利用静止流体内部压强的变化规律，可对贮罐(槽)的液位进行测量，以随时了解其内部的贮存量；此外，可用于确定液封高度，以使设备能在所要求的压力下稳定、连续地操作。

1. 压强与压强差的测量

(1) U 管压差计

U 管压差计的结构如图 1-6 所示。它是一根 U 形玻璃管，内装有液体指示液。指示液要与被测流体不互溶，不起化学作用，且其密度应大于被测流体的密度。

在图 1-6 的 U 形管底部装有指示液 A，其密度为 ρ_A ，U 形管两臂上部及连接管内均充满待测流体，其密度为 ρ 。图中 a、a' 两点都在连通着的同一种静止流体内，并且在同一水平面上，所以这两点的静压强相等，即 $p_a = p_{a'}$ ，根据流体静力学方程式可得：

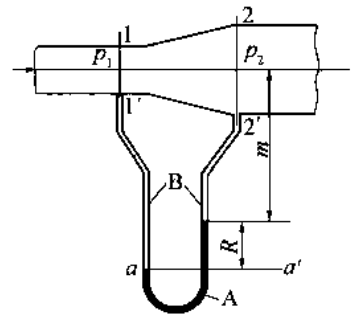


图 1-6 U 管压差计

$$p_a = p_1 + \rho g(m + R)$$

$$p_{a'} = p_2 + \rho g m - \rho_A g R$$

于是，压强差 ($p_1 - p_2$) 的计算式可写成

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho)gR \tag{1-8}$$

若被测量的流体为气体，由于指示液的密度远大于气体密度， ρ 可忽略，故上式可写为

$$p_1 - p_2 = \rho_A g R \tag{1-8a}$$

U 管压差计不但可用于测量流体的压强差，也能用于测量流体的压强。当 U 形管一端与设备或管道某一截面连接，另一端与大气相通，这时读数 R 反映该管道截面的绝对压强与大气压强之差，即为表压强。

(2) 双液 U 管微压差计

若所测量的压强差很小，U 管压差计的读数 R 也就很小，很难准确读出 R 的值。为了把读数放大，除选用指示液的密度 ρ_A 与被测流体的密度 ρ 相接近外，还可采用图 1-7 所示的双液 U 管微压差计。

双液 U 管微压差计内装有两种密度相近且不互溶的指示液 A 和 C。此外，为读数方便，U 管两侧臂顶端各装有扩大室，俗称“水库”。扩

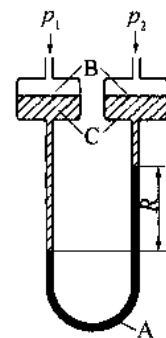


图 1-7 双液 U 管微压差计