

高等学校大专教学用书

化工原理 上册

天津大学出版社

姚玉英 陈常贵 柴诚敬

T002-43

7502-03
5

高等学校大专教学用书

化工原理

上 册

姚玉英 陈常贵 柴诚敬

天津大学出版社

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의阐述力求严谨,在内容的安排上注意理论联系实际以及知识的连贯性。全书采用循序渐近与深入浅出的编写方法,力求突出工程观点。

本书分上、下两册出版。上册除绪论、附录外,还有流体流动、流体输送设备、非均相物系的分离、传热和蒸发等五章。下册有蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、液-液萃取及干燥等五章。每章均编入较多的例题、章末有习题。书末附有各章习题的参考答案。

本书可作为高等院校化工及有关专业的大专班教材,也可供大本学生、设计及生产单位技术人员的参考。

参加本书编写人员有姚玉英(上册:绪论、第一章、第五章及附录。下册:第三章及第五章)、陈常贵(上册:第二章和第四章。下册:第一章)和柴诚敬(上册:第三章。下册:第二章及第四章)。

2434/05

高等学校大专教学用书
化工原理
(上册)
姚玉英 陈常贵 柴诚敬

*

天津大学出版社出版
(天津大学内)
邮编:300072
天津宝坻第二印刷厂印刷
新华书店天津发行所发行

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:19¼ 字数:476千
1996年3月第一版 1997年5月第二次印刷
印数:7001—15000

ISBN 7-5618-0799-6
TQ·29 定价:19.80元

目 录

绪论	(1)
第一章 流体流动	(6)
本章符号说明	(6)
第一节 流体静力学	(7)
1-1-1 流体的密度	(7)
1-1-2 流体的静压强	(9)
1-1-3 流体平衡时的规律——流体静力学基本方程式	(10)
1-1-4 流体静力学基本方程式的应用	(12)
第二节 流体在管内的流动	(18)
1-2-1 流量和流速	(18)
1-2-2 定态流动和非定态流动	(20)
1-2-3 流动系统中的物料衡算——连续性方程式	(20)
1-2-4 流动系统中的能量衡算——柏努利方程式	(22)
第三节 流体在管内流动时的摩擦阻力	(30)
1-3-1 产生流动阻力的原因——内摩擦	(30)
1-3-2 牛顿粘性定律与流体的粘度	(31)
1-3-3 流动类型与雷诺准数	(34)
1-3-4 层流和湍流的比较	(36)
1-3-5 流体在圆形管内流动时的摩擦阻力	(37)
1-3-6 流体在非圆形直管内流动时的摩擦阻力	(44)
1-3-7 管路上的局部阻力	(45)
第四节 管路系统的计算	(49)
1-4-1 管路系统中的总流动阻力(总能量损失)	(49)
1-4-2 管路系统的计算	(49)
第五节 流量的测量	(57)
习题	(63)
第二章 流体输送机械	(68)
本章符号说明	(68)
第一节 概述	(69)
第二节 离心泵	(70)
2-2-1 离心泵的工作原理及主要部件	(70)
2-2-2 离心泵的能量方程	(73)
2-2-3 离心泵的主要性能参数	(76)
2-2-4 离心泵的特性曲线	(78)
2-2-5 离心泵的气蚀现象与安装高度	(83)
2-2-6 离心泵的工作点与流量调节	(87)
2-2-7 离心泵的类型与选用	(91)
第三节 其它类型化工用泵	(95)
2-3-1 往复泵	(95)

2-3-2 旋转泵	(97)
2-3-3 旋涡泵	(98)
第四节 气体输送机械	(98)
2-4-1 离心式通风机	(99)
2-4-2 离心鼓风机和压缩机	(101)
2-4-3 旋转鼓风机和压缩机	(101)
2-4-4 往复压缩机	(102)
2-4-5 真空泵	(107)
习题	(108)
第三章 非均相物系的分离	(110)
本章符号说明	(110)
第一节 重力沉降	(112)
3-1-1 沉降速度	(112)
3-1-2 降尘室	(116)
3-1-3 沉降槽	(119)
第二节 离心沉降	(120)
3-2-1 离心沉降速度	(120)
3-2-2 旋风分离器	(121)
3-2-3 旋液分离器	(128)
第三节 过滤	(129)
3-3-1 过滤操作的基本概念	(129)
3-3-2 过滤基本方程式	(131)
3-3-3 恒压过滤	(134)
3-3-4 过滤设备	(139)
3-3-5 滤饼的洗涤	(143)
3-3-6 过滤机的生产能力	(144)
第四节 离心机	(146)
3-4-1 概述	(146)
3-4-2 离心机的结构与操作	(147)
习题	(149)
第四章 传热	(151)
本章符号说明	(151)
第一节 概述	(152)
第二节 热传导	(155)
4-2-1 热传导的基本概念和定律	(155)
4-2-2 导热系数	(156)
4-2-3 通过平壁的热传导	(157)
4-2-4 通过圆筒壁的热传导	(160)
第三节 对流传热	(162)
4-3-1 对流传热的分析	(162)
4-3-2 对流传热速率方程和对流传热系数	(162)
第四节 传热过程的计算	(164)

4-4-1	热量衡算	(164)
4-4-2	总传热速率微分方程	(165)
4-4-3	总传热系数	(166)
4-4-4	传热平均温度差	(169)
4-4-5	总传热速率方程应用举例	(175)
第五节 对流传热系数关联式		(177)
4-5-1	对流传热系数的主要影响因素	(177)
4-5-2	对流传热系数经验公式的建立	(178)
4-5-3	流体无相变时的对流传热	(179)
4-5-4	流体有相变时的对流传热	(185)
第六节 辐射传热		(189)
4-6-1	热辐射的基本概念	(189)
4-6-2	物体的辐射能力	(190)
4-6-3	两固体间的辐射传热	(192)
4-6-4	对流和辐射的联合传热	(194)
第七节 换热器		(195)
4-7-1	换热器的分类	(195)
4-7-2	间壁式换热器的类型	(196)
4-7-3	换热器传热过程的强化	(202)
4-7-4	列管式换热器的设计和选用	(203)
习题		(211)
第五章 蒸发		(214)
本章符号说明		(214)
第一节 蒸发器的型式		(216)
5-1-1	蒸发器的结构	(216)
5-1-2	蒸发器的选型	(221)
第二节 单效蒸发及其计算		(223)
5-2-1	蒸发器内的传热	(223)
5-2-2	单效蒸发的计算	(227)
5-2-3	蒸发器的生产能力和生产强度	(232)
第三节 多效蒸发		(233)
5-3-1	多效蒸发的操作流程	(234)
5-3-2	多效蒸发的计算	(235)
5-3-3	多效蒸发与单效蒸发的比较	(244)
5-3-4	多效蒸发中效数的限制及最佳效数	(245)
第四节 蒸发器的工艺设计及辅助装置		(245)
5-4-1	自然循环型蒸发器的工艺设计	(245)
5-4-2	蒸发器的辅助装置	(247)
习题		(248)
附录		(250)
一、中华人民共和国法定计量单位		(250)
二、常用单位的换算		(251)

三、某些气体的重要物理性质	(254)
四、某些液体的重要物理性质	(255)
五、干空气的物理性质(101.33kPa)	(258)
六、水的物理性质	(259)
七、水在不同温度下的粘度	(260)
八、水的饱和蒸气压(-20°C 至 100°C)	(261)
九、饱和水蒸气表(以温度为准)	(263)
十、饱和水蒸气表(以 kPa 为单位的压强为准)	(265)
十一、某些液体的导热系数	(267)
十二、某些气体和蒸气的导热系数	(269)
十三、某些固体材料的导热系数	(270)
十四、常用固体材料的密度和比热	(272)
十五、液体的粘度和密度	(273)
十六、101.33kPa 压强下气体的粘度	(277)
十七、液体的比热	(279)
十八、101.33kPa 压强下气体的比热	(282)
十九、(蒸发潜热)汽化热	(284)
二十、液体的表面张力	(286)
二十一、壁面污垢的热阻(污垢系数)($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	(288)
二十二、101.33kPa 压强下溶液的沸点升高与浓度的关系	(289)
二十三、管子规格(摘录)	(289)
二十四、泵规格(摘录)	(292)
二十五、4-72-11 型离心通风机规格(摘录)	(297)
二十六、管板式热交换器系列标准(摘录)	(298)
参考答案	(300)

绪 论

用化工手段将原料加工成产品的生产过程统称为化工生产过程。例如高压聚乙烯生产过程是将常温、常压下的乙烯气体加压和升温达到反应时所需的状态,然后在催化剂的作用下进行聚合反应,即将单体乙烯聚合成聚乙烯,反应出的产物经分离出其中未反应的乙烯及其它副产品后,余下的聚乙烯在粒化器中成型即为粒状产品聚乙烯。该过程是以化学反应,即聚合反应为核心,其它步骤只起到为化学反应准备必要的反应条件以及进一步将产品提纯的作用,而且这些步骤全是物理性的操作。化工产品有千千万万种,都是由不同的原料、使用不同的工艺方法和设备而制成的,但归纳起来,各个产品的工艺生产过程都是由类似上述的化学反应和若干个物理操作步骤组合而成。化工原理就是研究除化学反应以外的诸物理操作步骤的课程。这些物理操作步骤称为化工单元操作,简称化工单元操作。根据单元操作所遵循的基本规律,可将单元操作分为:

1. 遵循流体动力规律的单元操作 包括流体输送、沉降、过滤、搅拌等单元操作。
2. 遵循传热基本规律的单元操作 包括加热、冷却、冷凝、蒸发等操作。
3. 遵循传质基本规律的单元操作 包括蒸馏、吸收、萃取、干燥等单元操作。因这些操作的最终目的是将混合物中的组分分开,故又称为分离操作。

同一单元操作在不同的工艺生产中有共性也有各自的特性。例如前述的高压聚乙烯生产过程中要将 $15 \times 10^4 \text{kPa}$ 的常温乙烯气体加热到 200°C ;用发酵法制造工业酒精时,要将低浓度的常温酒精加热到 60°C 左右后送入精馏塔内提纯,两种操作中都采用换热器这样的设备将流体温度升高,这就是加热单元操作在两种不同工业生产中的共性。但在高压聚乙烯生产过程中是加热高压的气体,而酒精生产过程中是加热常压下的液体,两者所用的热交换器在型式和结构上均有差异,而且两者在工艺方面的要求也有所不同,这就是加热操作在不同生产过程中的特殊性。

化工原理是研究单元操作共性的课程,主要介绍各单元操作的基本原理、所用典型设备的结构及设备工艺尺寸的计算或设备的选用。学生学习本课程后应具有用工程观点和经济观点独立处理实际问题及设计设备的能力。

各单元的操作原理及设备的计算都是以物料衡算、能量衡算、传递速率和平衡关系四种概念为依据。绪论中扼要介绍前两项,余下的以后陆续介绍。因物料衡算与能量衡算都涉及到物理量的数量,而任何数量均要用数字和单位联合表达,故先介绍单位制度及其换算。

一、单位制度和单位换算

通过任意选择几个独立物理量,如长度、时间等作为基本量,并根据使用方便的原则定出这些基本量的单位,称为基本单位。其它的物理量,如速度、加速度等物理量的单位便可根据它们与基本量之间的关系来确定,这些物理量称为导出量,其单位称为导出单位。根据基本量及其单位的选择不同,因而产生了不同的单位制度,如重力单位制度和绝对单位制度,两种单位制度又分为英制和米制两种。重力单位制度以长度、时间及力为基本单位;绝对单位制度以长度、时间及质量为基本单位。重力单位制度与绝对单位制度的主要区别在于前者

以力为基本量,其单位为基本单位,质量为导出量,其单位为导出单位;后者以质量为基本量,其单位为基本单位,力为导出量,其单位为导出单位。力与质量间的关系为:

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

式中 F ——作用于物体上的力;

m ——物体的质量;

a ——物体在作用力方向上的加速度。

应用式 0-1 时,各物理量单位可任选一种单位制度;算出的结果是一致的,但绝对不允许同时采用两种不同单位制度。因此式 0-1 称为单位一致性方程。

两种不同单位制度中基本量的米制单位列于表 0-1 中。

表 0-1 两种不同单位制度中基本量的米制单位

基本量 单位制度		长度	时间	质量	力 (或重力)
		绝对单位制			
绝对单位制	cgs 制 (物理单位制)	m	s	g	—
	mks 制	m	s	kg	—
重力单位制 (工程单位制)		m	s	—	kgf

目前,国际上各科学领域所采用的单位制度已逐渐改为国际单位制度(简称 SI)。我国从 1990 年开始采用《中华人民共和国法定单位制度》(简称法定单位制度),它是在国际单位制度的基础上,加上若干个由我国指定的国际单位制度以外的单位所组成。这种单位制度的基本量与国际单位的基本量一样,计有:长度(单位为米,代号为 m)、时间(单位为秒或时,代号为 s 或 h)、质量(单位为千克,代号为 kg)、电流强度(单位为安培,代号为 A)、热力学温度(单位为开尔文,代号为 K)、发光强度(单位为烛光,代号为 cd)及物质的量(单位为摩尔,代号为 mol);另外还有两个辅助量,即平面角(单位为弧度,代号为 rad)及立体角(单位为球面度,代号为 ar)。

法定单位制与 SI 一样,有高度的统一性,包括了所有领域中的计量单位,任何物理量只有一个单位,使科学技术、工业生产、经济贸易甚至日常生活都统一用一种单位制度。本教材采用法定单位制,但在少数例题、习题中有意识地编入一些非法定制单位,有助读者熟悉新旧单位间的关系。

化工领域中常用的法定单位制中的有关内容列于本教材的附录一中。

目前国际上虽基本采用国际单位,但旧有文献资料中的数据又是多种单位制度并存,使用这些数据时应将它们换算到所需的单位制度,所以读者应掌握物理量的单位换算方法。

同一种物理量用不同单位制度的单位表示时,其数值不同,例如重力加速度在法定单位制中的单位为 m/s^2 ,数值为 9.81;在 cgs 制中的单位为 cm/s^2 ,数值为 981,二者包括单位在内的数值比称为单位换算因子,例如重力加速度在法定单位制与 cgs 制中的单位换算因子为:

$$\frac{9.81m/s^2}{981cm/s^2} = \frac{1}{100} m/cm$$

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,故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因子列于附录二中。

[例 0-1] 从旧有资料中查出常温下水的密度 $\rho=62.43\text{lb}/\text{ft}^3$ (磅/呎³),试将水的密度单位换算成法定单位制,即 kg/m^3 。

解:单位换算时,一般先从附录二查出原单位与要换算的新单位间的关系,即单位换算因子,由附录二查出:

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

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

所以 kg 与 lb 、 ft 与 m 间的换算因子分别为: $0.4536\text{kg}/\text{lb}$ 及 $\text{ft}/(0.3048\text{m})$ 。

因此算出法定单位制中的密度为:

$$\rho = 62.43\text{lb}/\text{ft}^3$$

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{array}{c} \text{原有的} \\ \text{数值与} \\ \text{单位} \\ \downarrow \end{array} & & \begin{array}{c} \text{引入} \\ \text{kg,} \\ \text{消去} \\ \text{lb,} \\ \text{括号} \\ \text{内的} \\ \text{数值} \\ \text{为纯} \\ \text{数 1} \\ \downarrow \end{array} & & \begin{array}{c} \text{引入} \\ \text{m,} \\ \text{消去} \\ \text{ft,} \\ \text{括号} \\ \text{内的} \\ \text{数值} \\ \text{为纯} \\ \text{数 1} \\ \downarrow \end{array} \\
 \\
 = (62.43 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}) (\frac{0.4536\text{kg}}{\text{lb}}) (\frac{\text{ft}}{0.3048\text{m}})^3 \\
 = 1000\text{kg}/\text{m}^3
 \end{array}$$

二、物料衡算

物料衡算为质量守恒定律的一种表现形式,即:

$$\Sigma G_1 = \Sigma G_2 + G_A \quad (0-2)$$

式中 ΣG_1 ——输入物料的总和;

ΣG_2 ——输出物料的总和;

G_A ——集累的物质质量。

式 0-2 既适用于连续操作,也适用于间歇操作,它是总物料衡算式。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。对连续操作,物料的累积量 G_A 为零,式 0-2 简化为:

$$\Sigma G_1 = \Sigma G_2 \quad (0-2a)$$

化工厂中多半是连续不断的流水作业,故本教材只讨论连续操作时的情况。

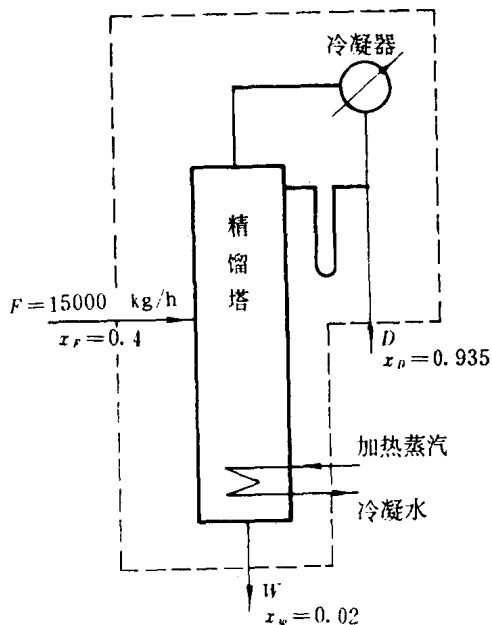
式 0-2 及式 0-2a 中各股物料的数量可以用质量或物质质量衡量。对于液体或处于恒温、恒压条件下的理想气体还可用体积衡量。常用质量分率表示液体或固体混合物的组成(即浓度),对于理想混合气体可以用分压分率、体积分率或摩尔分率表示组成。

[例 0-2] 每小时将 15000kg 含苯 0.4(质量分率,下同)的苯-甲苯混合溶液在连续精馏塔中进行分离,要求从塔底获得含苯 0.02 的苯-甲苯混合液,从塔顶获得含苯 0.935 的苯-甲苯混合液。试求塔顶和塔底产品的流量。

解:初学者进行物料衡算时应首先注意以下各要点:

1. 依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,并用数字及符号说明物料的量及组成。

2. 圈出衡算范围,如附图中封闭的虚线所示。在工程计算中,可以根据具体情况以一个生产过程、或一组设备、甚至设备某一局部作为衡算范围。凡是穿越虚线范围的流股,其箭头向内的,为输入的物料,相反的为输出的物料。设有穿越虚线范围的流股不参与物料衡算,如



例 0-2 附图

图中 F —原料液流量,kg/h;
 x_F —苯在原料液中的质量分率;
 x_D, x_W —分别为苯在塔顶及塔底产品中的质量分率;
 D, W —分别为塔顶及塔底产品的流量,kg/h。

本题附图中,由冷凝器出来流股中有一部分返回塔顶(这是精馏工艺的要求,在蒸馏章中要介绍),但它没有穿越虚线范围,故不必参与物料衡算。另外,塔的下部有加热蒸汽加入,它在塔内放出热量后以冷凝水的状态排出虚线范围外,这股物料在虚线范围内进、出一次,故也不参与衡算。

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(即一个循环)为基准。若基准选得不当,会使计算变为复杂。图中所标各物料数量都按所选的基准进行计算。

对本例题选 1h 为基准,在虚线范围内列总物料及苯的衡算:

$$\text{总物料} \quad F = D + W$$

$$\text{苯} \quad Fx_F = Dx_D + Wx_W$$

将已知值代入上二式:

$$15000 = D + W$$

$$15000 \times 0.4 = 0.935D + 0.02W$$

联立以上二式,解出:

$$D = 6229.5 \text{ kg/h}$$

$$W = 8770.5 \text{ kg/h}$$

三、能量衡算

能量的种类很多,化工厂中涉及的能量往往是热能或热量,故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,对热量衡算可以写出:

$$\Sigma Q_1 = \Sigma Q_2 + Q_L \quad (0-3)$$

式中 ΣQ_1 ——随物料进入系统的总热量,kJ 或 kW;

ΣQ_2 ——随物料离开系统的总热量,kJ 或 kW;

Q_L ——系统向周围散失的热量,kJ 或 kW。

式 0-3 也可以写成:

$$\Sigma(wH)_1 = \Sigma(wH)_2 + Q_L \quad (0-4)$$

式中 w ——物料的质量,kg 或 kg/h;

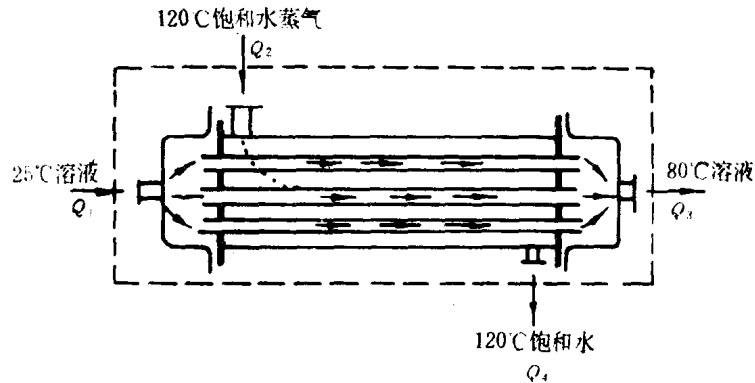
H ——物料的焓,kJ/kg。

式 0-3 及 0-4 用于间歇操作时,式中 Q 及 w 单位分别为 kJ 及 kg,用于连续操作时则分别为 kW 及 kg/h。

进行能量衡算时,除了和物料衡算一样,要画出流程图、圈出衡算范围、选出衡算基准外,还要指出基准温度,简称基温。因为焓是相对值,与从哪一个温度算起有关,习惯上选 0°C 为基准,并规定 0°C 时液体的焓为零。

[例 0-3] 在换热器内将平均比热为 $3.56\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 的某种溶液自 25°C 加热到 80°C , 溶液流量为 $3600\text{kg}/\text{h}$ 。加热介质为 120°C 的饱和水蒸气, 蒸汽冷凝成同温度的水排出。已知此换热器的热损失占水蒸气提供热量的 6.5% , 试求蒸汽用量为若干 kg/h 。

解: 先根据题意画出如本题附图所示的流程图, 在图上圈出如虚线所示的衡算范围。



例 0-3 附图

基准: 1h ; 基温: 0°C

从附录九查出 120°C 饱和水蒸气的焓为 $2708.9\text{kJ}/\text{kg}$ 、 120°C 饱和水的焓为 $503.67\text{kJ}/\text{kg}$ 。

在图中虚线范围内列焓衡算:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_L$$

式中 Q_1 —— 溶液带入系统的焓, kJ/h ;

Q_2 —— 饱和蒸汽带入系统的焓, kJ/h ;

Q_3 —— 溶液带出系统的焓, kJ/h ;

Q_4 —— 冷凝水带出系统的焓, kJ/h ;

Q_L —— 系统向周围损失的焓, kJ/h 。

令 $D =$ 加热蒸汽消耗量, kJ/h 。各项的计算如下:

$$Q_1 = 3600 \times 3.56(25 - 0) = 320400 \text{ kJ}/\text{h}$$

$$Q_2 = 2708.9D \text{ kJ}/\text{h}$$

$$Q_3 = 3600 \times 3.56(80 - 0) = 1025280 \text{ kJ}/\text{h}$$

$$Q_4 = 503.67D \text{ kJ}/\text{h}$$

$$Q_L = (2708.9 - 503.67)D \times 0.065 = 143.34D \text{ kJ}/\text{h}$$

$$\therefore 320400 + 2708.9D = 1025280 + 503.67D + 143.34D$$

解得 $D = 342 \text{ kg}/\text{h}$

第一章 流体流动

本章符号说明

英文字母

a ——加速度, m/s^2 ; 或质量分率;
 A ——截面积, m^2 ;
 C_o, C_v ——流量系数;
 d, d_e ——分别为圆管直径及非圆管的当量直径, m ;
 e ——涡流系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 E —— 1kg 流体具有的总机械能, J/kg ;
 Eu ——欧拉准数, 无因次;
 F ——流体的内摩擦力, N ;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 G ——质量速度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 h ——高度, m ;
 h_f —— 1kg 流体流动时为克服摩擦阻力而损失的能量, 简称能量损失, J/kg ;
 h'_f ——局部能量损失, J/kg ;
 l, l_e ——分别为直管的长度及管件的当量长度, m ;
 m ——质量, kg ;
 M ——分子量, kg/kmol ;
 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 ——因克服流动阻力而引起的压强降, Pa ;
 P ——压力, N ;
 r ——半径, m ;
 r_H ——水力半径, m ;
 R ——液柱压差计读数, m ; 或气体常数, $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;
 Re ——雷诺准数;

S ——两流体层间的接触面积, m^2 ;
 T ——热力学温度, K ;
 u ——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 —— 1kg 流体的内能, J/kg ;
 ν ——比容, m^3/kg ;
 V ——体积, m^3 ;
 V_s ——体积流量, m^3/s ;
 w_s ——质量流量, kg/s ;
 W_e —— 1kg 流体通过输送设备所获得的能量, 或输送设备对 1kg 流体所作的有效功, J/kg ;
 y ——气体的摩尔分率;
 z ——高度, m 。

希腊字母

ε ——绝对粗糙度, m 或 mm ;
 ε' ——体积膨胀系数;
 ζ ——阻力系数;
 η ——效率;
 μ ——粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 ν ——运动粘度, m^2/s 或 cSt ;
 Π ——润湿周边, m ;
 ρ ——密度, kg/m^3 ;
 τ ——内摩擦应力, Pa 。

下标

1, 2——截面序号;
 f ——摩擦的;
 s ——秒的。

流体流动是化工厂中最基本的现象。在化工厂内,不论是待加工的原料或是已制成的产品,常以液态或气态存在。各种工艺生产过程中,往往需要将液体或气体输送至设备内进行物理处理或化学反应,这就涉及到选用什么型式、多大功率的输送机械,如何确定管道直径及如何控制物料的流量、压强、温度等参数以保证操作或反应能正常进行,这些问题都与流体流动密切相关。

流体是液体和气体的统称。流体具有流动性,其形状随容器的形状而变化。液体有一定的液面,气体则否。液体几乎不具压缩性,受热时体积膨胀的不显著,所以一般将液体视为不可压缩的流体。与此相反,气体的压缩性很强,受热时体积膨胀很大,所以气体是可压缩的流体。如果在操作过程中,气体的温度和压强改变很小,气体也可近似地按不可压缩流体来处理。

流体是由大量的不断作不规则运动的分子组成,各个分子之间以及分子内部的原子之间均保留着一定的空隙,所以流体内部是不连续而存在空隙的,要从单个分子运动出发来研究整个流体平衡或运动的规律,是很困难而不现实。所以在流体力学中,不研究个别分子的运动,只研究由大量分子组成的分子集团,设想整个流体由无数个分子集团组成,每个分子集团称为“质点”。质点的大小与它所处的空间相比是微不足道的,但比分子自由程要大得多。这样可以设想在流体的内部各个质点相互紧挨着,它们之间没有任何空隙而成为连续体。用这种处理方法就可以不研究分子间的相互作用以及复杂的分子运动,主要研究流体的宏观运动规律,而把流体模化为连续介质,但不是所有情况都是如此的,高真空度下的气体就不能视为连续介质了。

由于连续介质的质点间无任何空隙而是连续的,故在研究流体流动各项内容时可以应用连续函数这一工具。

第一节 流体静力学

流体静力学是研究流体在外力作用下处于静止或相对静止状态下的规律,即流体平衡规律。在实际生产中,流体平衡规律的应用面很广,如管道或设备内压强的测量、贮槽内液面的测量以及为了防止气体从设备内逸出时液封高度的计算,都是以流体平衡规律为依据的。

1-1-1 流体的密度

单位体积流体具有的质量称为密度,其表达式为:

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

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——体积, m^3 。

当 ΔV 趋近于零时, $\Delta m/\Delta V$ 的极限值为流体内部某点的密度,可以写成:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-1a)$$

各种流体的密度可以从物理化学手册和有关资料中查得,本教材附录三、四及十五均列

出某些流体在给定条件下的密度,仅供做习题时查用。

气体具有可压缩性及膨胀性,故其密度随温度及压强而变化,因此对气体密度必须标出其所处的状态。从手册中查出的气体密度是某指定状态下的数值,应用时一定要换算到操作条件的数值。当气体的压强不太高、温度不太低时,可按理想气体来处理,即热力学温度、压强和体积间具有如下关系:

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{pV}{T}$$

上式等号两侧除以一定质量 m 后,变为:

$$\frac{p_0}{\rho_0 T_0} = \frac{p}{\rho T}$$

或

$$\rho = \rho_0 \frac{p T_0}{p_0 T} \quad (1-2)$$

式中 p ——气体的压强,Pa;

T ——气体的热力学温度,K;

下标 0 表示由手册中查得的条件。

在某指定的温度和压强下,理想气体的密度也可以直接用气体状态方程来求算,即

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

或

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-3)$$

式中 R ——气体常数, $R = 8.315 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

M ——气体的分子量,kg/kmol;

n ——气体的千摩尔数,kmol。

若气体为混合气体,计算其密度的最简单方法是将式 1-3 中的气体分子量 M 换以混合气体的平均分子量 M_m 。混合气体的平均分子量可由加和规则求得,即:

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \dots + M_n y_n \quad (1-4)$$

式中 y ——混合气体中组分的摩尔分率;

下标 m 表示平均,下标 1、2、……、 n 示组分的序号。

液体的密度基本上不随压强而变(极高压强除外),随温度略有变化,在工程计算中,常将液体密度视为常数。

化工厂中所处理的液体经常是混合液体,是若干单纯液体的混合物。从手册中难于查到混合液体的密度,但可近似由计算求得。液体混合时体积略有变化,为了便于计算,一般忽略这种体积变化,认为各纯液体混合后总体积为各纯液体体积之和。以 1kg 混合液为基准,混合液的平均密度可近似地用下式计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n}$$

或

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n}} \quad (1-5)$$

式中 ρ_m ——混合液的平均密度,kg/m³;

a ——混合液中各纯组分的质量分率。

应指出:同一物质在不同单位制中,密度的单位与数值均不同,应用时需密切注意。

还应指出:在化工计算中,常采用密度的倒数,称为比容,其定义为单位质量物质具有的体积,以 v 表示,单位为 m^3/kg 。

[例 1-1] 标准状况下某烟道气的密度为 $1.338\text{kg}/\text{m}^3$,试求该烟道气在 $2 \times 10^5\text{Pa}$ 及 50°C 状况下的密度。

解: $2 \times 10^5\text{Pa}$ 及 50°C 时烟道气的密度为:

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_0 \frac{p T_0}{p_0 T_0} = 1.338 \times \frac{2 \times 10^5}{1.0133 \times 10^5} \times \frac{273}{273 + 50} \\ &= 2.232 \text{ kg}/\text{m}^3\end{aligned}$$

[例 1-2] 求 20°C 乙醇质量分率为 0.4 的乙醇水溶液的平均密度。

解:由附录四查得 20°C 时乙醇和水的密度分别为 $789\text{kg}/\text{m}^3$ 及 $998\text{kg}/\text{m}^3$,故乙醇水溶液的平均密度为:

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2}} = \frac{1}{\frac{0.4}{789} + \frac{1-0.4}{998}} = 902.4 \text{ kg}/\text{m}^3$$

1-1-2 流体的静压强

在静止流体中,取通过某点的任意截面积 ΔA ,垂直作用于该面上的压力为 ΔP ,单位截面上所受的压力为:

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

式中 p 称为静压力强度,简称压强,俗称压力。当 $\Delta A \rightarrow 0$ 时, $\Delta P/\Delta A$ 的极限值即为该点的压强,即:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-6)$$

式中 p ——流体的静压强, Pa;

A ——作用面的面积, m^2 ;

P ——垂直作用于流体表面 A 上的压力, N。

由于在化工生产中,操作压强的高低相差悬殊,有的工艺过程的压强很高,如生产高压聚乙烯时反应器中的绝对压强为 $15 \times 10^7\text{Pa}$,而有的工艺过程却在负压或真空条件下操作,如蒸发 NaNO_3 水溶液时,冷凝器中的绝对压强约为 $15 \times 10^3\text{Pa}$,为了各行各业使用方便,除采用统一的法定计量单位制中规定的压强单位 Pa 外,还采用历史上沿用的 atm(大气压)、 kgf/cm^2 (千克力/厘米²)、mmHg(毫米汞柱)、 mH_2O (米水柱)、bar(巴)等压强单位,它们间的关系为:

$$\begin{aligned}1\text{atm} &= 1.033\text{kgf}/\text{cm}^2 = 760\text{mmHg} \\ &= 10.33\text{mH}_2\text{O} = 1.0133\text{bar} \\ &= 1.0133 \times 10^5\text{Pa}\end{aligned}$$

工程上为了使用和换算方便,常将 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 近似地作为 1 个工程大气压,以 at 表示,于是:

$$\begin{aligned}1\text{at} &= 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 735.6\text{mmHg} \\ &= 10\text{mH}_2\text{O} = 0.9807\text{bar}\end{aligned}$$

$$=0.9807 \times 10^5 \text{Pa}$$

流体的压强用测压仪表测量,当被测流体的压强大于外界大气压时,所用的仪表称为压强表,俗称压力表。压强表上的读数称为表压强,它不是流体的真正压强,因为校正压强表零点时,是以外界大气压强作为零点,所以被测流体的实际压强(又称绝对压强)等于外界大气压强与表压强之和,即:

$$\text{绝对压强(实际压强)} = \text{外界大气压强} + \text{表压强(表上读数)}$$

当被测流体的实际压强小于外界大气压强时,所用的测压仪表称为真空表,真空表上的读数称为真空度,它也不是流体的真正压强。同压强表一样,真空表也是以外界大气压强作为零点,真空表测出的数值代表实际压强低于外界大气压强的数值,即:

$$\text{绝对压强(实际压强)} = \text{外界大气压强} - \text{真空度(表上读数)}$$

绝对压强、表压强及真空度三者间的关系可以用图 1-1 表示。

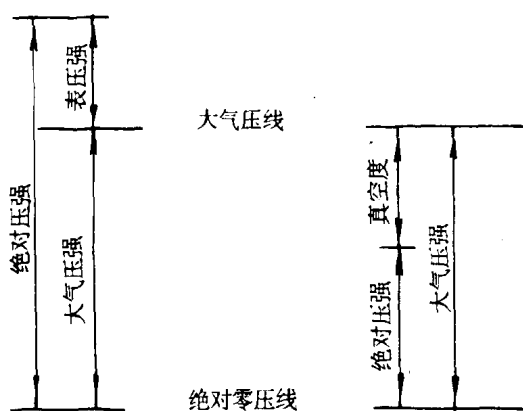


图 1-1 绝对压强、表压强和真空度之间的关系

外界大气压强随温度、空气中的湿度和所在地区的海拔高度而改变。如北京地区大气压强为 $1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$, 兰州地区约为 $0.85 \times 10^5 \text{Pa}$, 西藏地区海拔 4500m, 大气压强约为 $0.6 \times 10^5 \text{Pa}$ 。本教材如不特别指明, 大气压强的数值都是指 $1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$ 而言的。

为了避免绝对压强、表压强、真空度三者间相互混淆, 规定在以后的讨论中, 对表压强和真空度均加以标注, 如 $2 \times 10^3 \text{Pa}$ (表压)、 $4 \times 10^3 \text{Pa}$ (真空度) 等。

[例 1-3] 用多效蒸发设备蒸发 NaNO_3 水溶液, 规定末效的绝对压强为 $0.15 \times 10^5 \text{Pa}$, 问在北京地区和兰州地区操作时真空表上读数各为若干 Pa。

解: 北京地区大气压强为 $1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$, 故在该地区操作时真空表上读数, 即真空度为:

$$1.0133 \times 10^5 - 0.15 \times 10^5 = 0.8633 \times 10^5 \text{Pa (真空度)}$$

兰州地区大气压强为 $0.853 \times 10^5 \text{Pa}$, 故在该地区操作时真空表上读数, 即真空度为:

$$0.853 \times 10^5 - 0.15 \times 10^5 = 0.703 \times 10^5 \text{Pa (真空度)}$$

1-1-3 流体平衡时的规律——流体静力学基本方程式

本节只介绍流体在重力和压力作用下的平衡。重力就是地心吸力, 可以看作是不变的, 起变化的是压力, 故研究流体平衡时的规律, 其实质是研究处于相对静止状态下流体内部压力变化的规律。为了便于讨论, 先介绍静止液体内部压力变化的规律, 然后推广到气体。

图 1-2 所示容器中的液体是静止的, 于其中任意分割出底面积为 A 的垂直液柱, 如以容器底为基准水平面, 液柱在容器中的相对位置已标于图中。作用于液柱上、下底的力必是垂直于表面的, 否则产生与底面平行的分力, 使液柱不能维持平衡。作用于液柱上、下底的力有: (1) 作用于上底的压力 P_1 ; (2) 作用于下底的压力 P_2 ; (3) 作用于整个液柱的重力 W 。设