



国内贸易部部编中等专业学校教材

化工过程及设备

陈津群 主编

HGGCJSB

中国财政经济出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工过程及设备/陈津群主编.-北京:中国财政经济出版社,1999.3

国内贸易部部编中等专业学校教材

ISBN 7-5005-4039-6

I. 化… II. 陈… III. ①化工过程-专业学校-教材②化工设备-专业学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 04661 号

中国财政经济出版社出版

URL: <http://www.cfeph.com>

e-mail: cfeph@drvc.go.cn

(版权所有 翻印必究)

社址:北京东城大佛寺东街 8 号 邮政编码:100010

发行处电话:64033095 财经书店电话:64033436

北京京丰印刷厂印刷 各地新华书店经售

787×1092 毫米 16 开 26 印张 638 000 字

1999 年 9 月第 1 版 1999 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1-5 060 定价:35.00 元

ISBN 7-5005-4039-6/TQ·0008

(图书出现印装问题,本社负责调换)

编 审 说 明

为适应建立社会主义市场经济新体制的要求,我部于1994年颁发了财经管理类5个专业和理工类7个专业教学计划。1996年初印发了以上12个专业的教学大纲。《化工过程及设备》一书是根据新编油脂制取与储检专业教学计划和教学大纲的要求,结合我国科技进步和财税、金融等体制改革的情况重新编写的。经审定现予出版。本书是国内贸易部系统中等专业学校必用教材,也可供职业中专、职工中专、电视中专等选用,还可以作为业务岗位培训和广大企业职工自学读物。

本书由陈津群任主编,李殿宝任副主编。参加编写的有:安徽省粮食学校陈津群(绪论及第四、五章),辽宁省粮食学校李殿宝(第一、二、三、十二章),江苏省淮海工贸学校戴光顺(第六、十、十三章),贵州省贸易经济学校聂祥云(第七、九章),黑龙江省粮食学校王哲(第八、十一章)。全书由武汉食品工业学院刘大川教授主审。

由于编写时间仓促,编者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请广大读者不吝赐教,以便于修订,使之日臻完善。

国内贸易部教育司

1998年2月

目 录

绪 论	(1)
第一章 流体力学基础	(8)
第一节 流体静力学	(8)
第二节 流体动力学	(17)
第三节 流体阻力	(27)
第四节 简单管路计算和流量测量	(41)
习题	(47)
本章符号说明	(48)
第二章 流体的输送	(50)
第一节 管路	(50)
第二节 离心泵	(57)
第三节 其他类型的泵	(74)
第四节 真空泵	(80)
习题	(82)
本章符号说明	(84)
第三章 流体与粒子间的相对运动	(86)
第一节 重力沉降	(86)
第二节 过滤	(92)
第三节 离心分离	(102)
第四节 固体流态化	(107)
习题	(112)
本章符号说明	(112)
第四章 传热基本原理	(114)
第一节 基本概念	(114)
第二节 传热计算	(116)
第三节 热传导	(127)
第四节 对流传热	(134)

第五节 传热系数 K 的计算和讨论	(146)
第六节 热辐射*	(153)
习题	(158)
本章符号说明	(161)
第五章 加热、冷却和冷凝	(163)
第一节 加热	(163)
第二节 冷却和冷凝	(169)
第三节 热交换器	(170)
第四节 列管式换热器的工艺设计	(181)
习题	(194)
本章符号说明	(195)
第六章 蒸发	(197)
第一节 蒸发器	(197)
第二节 蒸发的方式及流程	(201)
习题	(212)
本章符号说明	(213)
第七章 结晶	(214)
第一节 结晶原理	(214)
第二节 结晶的工业方法与设备	(218)
习题	(220)
第八章 吸收与吸附	(221)
第一节 吸收的基本概念和物理基础	(221)
第二节 吸收速率方程	(232)
第三节 吸收过程的计算	(236)
第四节 填料塔	(240)
第五节 解吸和吸收流程	(256)
第六节 吸附	(258)
习题	(265)
本章符号说明	(267)
第九章 蒸馏	(269)
第一节 气—液相平衡	(269)
第二节 简单蒸馏与精馏原理	(274)
第三节 二元溶液精馏塔操作分析	(277)
第四节 板式精馏塔理论塔板数的图解法	(285)

第五节 水蒸气蒸馏	(288)
第六节 真空系统	(291)
习题	(297)
本章符号说明	(298)
第十章 固-液萃取(浸出)	(301)
第一节 固-液萃取(浸出)理论	(301)
第二节 固-液萃取(浸出)的操作方法	(305)
第三节 固-液萃取(浸出)的计算	(307)
习题	(315)
本章符号说明	(315)
第十一章 干燥	(317)
第一节 湿空气的性质和湿度图	(318)
第二节 干燥器的物料和热量衡算	(328)
第三节 干燥速率	(336)
第四节 干燥设备	(340)
习题	(344)
本章符号说明	(345)
第十二章 冷冻	(347)
第一节 压缩蒸气冷冻机	(347)
第二节 冷冻剂和载冷体	(357)
第三节 压缩蒸气冷冻机的主要设备	(358)
习题	(360)
本章符号说明	(361)
第十三章 液体搅拌	(362)
第一节 搅拌器	(362)
第二节 机械搅拌器功率估算	(365)
习题	(368)
本章符号说明	(369)
附 录	(370)
一、单位换算表	(370)
二、干空气的物理性质	(374)
三、水的物理性质	(376)
四、饱和水蒸气表(以温度为准)	(377)
五、饱和水蒸气表(以压力为准)	(379)

绪 论

一、本课程的性质、研究对象和任务

化工过程及设备是一门独立的学科，课程的性质属于技术基础课。对粮食学校的油脂制取与加工专业及其他相关专业来说，化工过程及设备是一门专业基础课。

化学工业是一个多行业、多品种的生产部门。例如生产酸、碱、盐的无机工业，生产醇、酚、醚、塑料、合成橡胶、纤维等的有机工业和高分子工业，以及与化学工业有关的一些工业，如从石油中提取各种化工产品的石油化学工业、天然气加工工业、冶金、食品、造纸、医药、海水综合利用和原子能工业等等，其原料广泛，产品种类繁多，生产工艺过程复杂多样且差别很大。然而，若将化学工业类产品的制造过程加以分析整理，则见其中有若干应用较广而又为数不多的基本过程。这些基本过程具有共同的基本原理并各有其通用的典型设备。例如在烧碱生产中，碱液借蒸发而浓缩；同样，在食盐精制、制糖工业中的溶液浓缩以及浸出法制取植物油工艺中的混合油浓缩等亦是采用蒸发操作来完成的。可见蒸发是一个化工基本过程。又如在氮肥生产中，获得的晶体肥料需要干燥；在纯碱生产中，纯碱亦需要干燥；其他如造纸厂中的片状纸张、植物油厂中的大豆浸出料胚等也都需要干燥。因此，干燥也是一个化工基本过程。化工基本过程也称单元操作。所谓单元操作是指在各种化工类产品的生产过程中，普遍采用的，遵循共同的规律，所用设备相似，具有相同工艺作用的基本操作。单元操作的概念在化工学科中占有重要的地位，这是因为任何一个具体的化工工艺过程，无论情况如何错综复杂，均可归纳为若干个单元操作；反之，若干个单元操作结合生产的具体要求也可以串联组合，构成一个完整的生产工艺过程。有如种类有限的电子元件，可以根据人们的要求组装成五花八门、令人目不暇接的各类电子产品。

各个单元操作并不是互相没有联系的，经过分析研究，按照各单元操作遵循的基本规律，可把它们归纳为几类过程。

（一）流体动力过程。包括遵循流体力学中各项规律的单元操作，如流体输运、过滤、离心分离、沉降和固体流态化等。

（二）热量传递过程（简称传热过程）。包括遵循传热学中各规律的单元操作，如热交换、蒸发、结晶等。

（三）质量传递过程（简称传质过程）。包括遵循传质规律，即物质透过相界面转移的规律的单元操作，如蒸馏、吸收与吸附、干燥和萃取等。

（四）热力过程。包括遵循热力学规律的单元操作，如冷冻等。

本课程既不同于自然科学中的基础学科，又区别于专门研究具体化工类产品的生产过程的专业工艺课。它是用基础学科中的一些基本原理来研究化工类生产过程中一些内在本质规律

问题的一门综合性的工程技术课程。它具有十分广泛的实用性。

学习本课程的主要任务是掌握各个单元操作的基本规律，熟悉其操作原理及基本计算方法，了解有关典型设备的构造、工作原理及主要性能，并能用以分析和解决工程技术中的一般问题。

二、化工过程的四个基本概念

在分析单元操作或化工过程中，常常用到下列四个基本概念：质量守恒、能量守恒、平衡关系和过程速率。化工计算中的物料衡算和热量衡算就是前两个概念的具体应用。

(一) 物料衡算

根据质量守恒定律，在一个化工过程中，输入该过程的物料质量必等于从过程中输出的物料质量与在过程中损失的物料质量之和。即：

$$\Sigma F = \Sigma D + A \quad (0-1)$$

式中： ΣF ——输入物料质量的总和(kg)；

ΣD ——输出物料质量的总和(kg)；

A ——在过程中损失的物料质量(kg)。

式 0—1 是物料衡算的通式，由此可对物料总量，也可对其中某一组分列出衡算方程式求解，这种运算称为物料衡算。

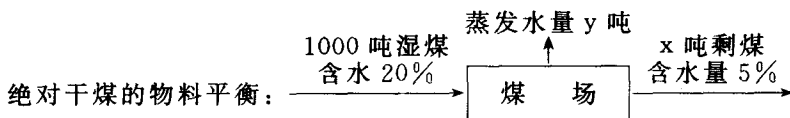
进行物料衡算时，要注意三点。首先要确定衡算的范围，它可以在一个单一的设备或其中一部分进行，也可以包括几个设备或几个处理阶段的全流程。其次，要确定衡算的基准。至于选用哪一范围，应视具体情况而定。另外，对有化学变化的过程，衡算对象以未发生变化的惰性物质或某一化学元素为基准。

[例 1] 煤场中存有 1000 吨湿煤，含水量 20%，堆放一定时间后，测得其含水量为 5%，问剩下的煤质量为多少？

解：解题前我们注意到煤在堆放过程中失去的是水分，而绝对干煤量存放前后不发生变化，可作为联系物质。这样，我们选定衡算范围：煤场；基准：1000 吨湿煤。

煤场总物料平衡：

$$1000 = x + y$$



$$1000(1-20\%) = x(1-5\%)$$

解方程得 $x = 842(\text{吨})$

$$y = 158(\text{吨})$$

剩下的煤质量为 842 吨。

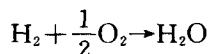
这个问题的关键是要认清原始湿煤中含水量 20% 的基准和剩煤中含水量 5% 的基准不同。前者为湿煤，后者为剩煤，二者质量不等。

[例 2] 设有含氢 15%(质量)和碳 85%(质量)的柴油，燃烧时所用的空气是理论量加过量 50%，使柴油可完全燃烧。试计算燃烧 100kg 柴油时所用的空气量及干烟道气的组分。

解：我们注意到本题中柴油的燃烧系化学反应，用 kmol 作计算单位肯定较方便。为此我们将 100kg 柴油中的氢和碳的含量换算成 kmol 计。

基准：100kg 柴油

化学反应： $C + O_2 \rightarrow CO_2$



柴油中含 15kg 氢 $= \frac{15}{2} = 7.5 (\text{kmol 氢})$

85kg 碳 $= \frac{85}{12} = 7.08 (\text{kmol 碳})$

燃烧中形成水和二氧化碳所需的氧为

$$7.5 \times \frac{1}{2} + 7.08 = 10.83 (\text{kmol 氧})$$

连同过量的 50%，所需总氧量为

$$10.83 \times 1.5 = 16.25 (\text{kmol 氧})$$

送入空气的总质量是

$$\frac{16.25}{21\%} = 77.35 (\text{kmol 空气})$$

送入空气中氮质量是

$$77.35 - 16.25 = 61.10 (\text{kmol 氮})$$

所以干烟道气的组分是

N_2 : 61.01 kmol

O_2 : $10.83 \times 0.5 = 5.42 \text{ kmol}$

CO_2 : 7.08 kmol

另，燃烧后生成了 7.5 kmol 的 H_2O 。

如要折算成 kg 数，只要将 kmol 数乘以各自的分子量即可。

由上面两个简单的物料衡算例题，我们注意到在进行物料衡算时，基准的选择、联系物质的选择和单位的选择的重要性。在例 2 中若不以 kmol 为单位，或选用 100 kmol 空气或 100 kmol 烟道气作基准，则计算将变得极为复杂。

物料衡算是化工计算中的重要内容之一，它对设备尺寸的设计和生产过程的分析，具有重要意义。

(二) 热量衡算

根据能量守恒定律，在稳定的化工生产过程中，进入该过程的能量必等于从该过程排出的能量。在化工过程中所涉及的能量多为热能，因此，通常涉及到的能量衡算是热量衡算。热量衡算的基本关系式可表示为：

$$\Sigma Q_F = \Sigma Q_D + q \quad (0-2)$$

式中： ΣQ_F ——输入该过程的各物料带入的总热量(J)；

ΣQ_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，此值为正，称为热损失(J)。

通过热量衡算,可以测验在生产操作中热量的利用及损失情况;而在生产工艺与设备设计时,通过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。

(三) 平衡关系

若组成不同的两相互相接触,则各组分将在两相间进行传递,直到每一组分在两相间相互传递的速率相等,两相的组成才不再发生变化,此时称为平衡。这种平衡是一种动态平衡。例如,将一包食盐放入一杯水中,盐逐渐溶解,直至溶液达到饱和为止。此时,单位时间从盐粒表面进入溶液的盐质量数与从溶液中沉积到盐粒表面的盐质量数相等,即达到动态平衡。只要温度不变,而且有过量食盐存在,溶液中食盐浓度即为一定值。这种平衡状态是自然界里广泛存在的现象,只有当与物系有关的条件(如温度)改变时,原平衡关系被打破,物系再建立新的平衡。

物系平衡关系表示了各种自发过程可能进行到的极限程度。对于化工生产过程,可以从物系平衡关系来判断其能否自发进行以及进行到何种程度。平衡关系也为设备的尺寸设计提供理论依据。

(四) 过程速率

平衡关系表示了物系自发变化的极限,但物系变化的快慢并不取决于平衡,而为多种因素所影响。各种不同物系变化速率的影响因素往往很复杂,其中有些影响机制还不清楚,因此很难将变化速率用一种能普遍适用的数学公式定量地表示出来。但对化工过程来说,为了发挥设备的生产能力,过程进行的速率往往比过程的极限显得更重要。因此,为了帮助分析许多化工过程,可将物系变化速率表述为推动力与阻力之间的关系。即:

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

推动力的性质取决于过程的内容,过程的内容不同,推动力的性质也不同,但物系在平衡状态时它必须等于零。传热过程的推动力是温度差,流体流动的推动力是压力差,物质扩散的推动力是浓度差。至于过程的阻力则较为复杂,具体过程要作具体分析。

过程速率与推动力成正比,与过程阻力成反比,三者的相互关系类似于电学中的欧姆定律。

三、单位制和单位换算

本课程涉及到的物理量很多,这些物理量的大小是用数字和计量单位来表示的。

人们把科技和工程领域中众多的物理量人为地分成基本量和导出量两大类,选定少数几个基本量,其他导出量可以根据有关物理定律由基本量导出。基本物理量的单位称基本单位,导出物理量的单位称为导出单位,也就是说,物理量的单位也分成两大类:基本单位和导出单位。例如,长度为基本量,其单位(米)为基本单位;时间亦为基本量,其单位(秒)亦为基本单位;速度为路程与时间之比,由长度与时间导出,是一个导出量,其单位(米/秒)为导出单位。

由于基本量选择得不同,或对基本单位规定得不同,便形成了不同的单位制。下面我们则将化学工程计算中经常涉及的几种单位制简介如下:

(一) 绝对单位制

常用的绝对单位制有两种:

1. 厘米·克·秒制(简称 CGS 制), 又称物理单位制。其基本量为长度、质量和时间, 它们的单位为基本单位。其长度单位是厘米, 质量单位是克, 时间单位是秒。力是导出量。力的单位由牛顿第二定律 $F=ma$ 导出, 其单位为克·厘米/秒², 称为达因。在科学实验和物理化学数据手册中常用这种单位制。

2. 米·千克·秒制(简称 MKS 制), 又称绝对实用单位制。其基本量与 CGS 制相同, 但基本单位不同, 长度单位是米, 质量单位是千克, 时间单位是秒。导出量力的单位是千克·米/秒², 称为牛顿。

(二) 工程单位制

选用长度、力和时间为基本量, 其基本单位分别为米、公斤力和秒。质量成了导出量。工程单位制中力的单位公斤力是这样规定的: 它相当于真空中以 MKS 制量度的 1 千克质量的物体, 在重力加速度为 9.807 米/秒² 下所受的重力。质量的单位相应为公斤力·秒²/米, 并无专门名称。

(三) 国际单位制

简称为“SI”。我国简称为国际制。国际单位制规定了七个基本量及对应的基本单位, 即长度——米、质量——千克、时间——秒、电流强度——安培、热力学温度——开尔文、发光强度——坎德拉及物质的量——摩尔, 还有两个辅助单位和大量的导出单位。这些构成了 SI 单位。SI 还规定了一套词冠(单位词头)来表示十进倍数或分数。

由于国际单位制(SI)有其独特的优点, 即它的通用性及一贯性, 世界各国都有采用 SI 的趋势。自然科学与工程技术领域里的一切单位都可以由 SI 的七个基本单位导出, 所以 SI 通用于所有科学部门, 这就是其通用性; 在 SI 中任何一个导出单位由基本单位相乘或相除而导出时, 都不引入比例常数, 换句话说其比例常数都等于 1, 从而使运算简便, 不易发生错漏, 这就是其一贯性。我国为了适应四化建设及对外开放、交流的需要, 1977 年国务院颁布的计量管理条例规定: “我国的基本计量制度是米制(即公制), 逐步采用国际单位制。” 1984 年 2 月国务院又发布了关于在我国统一实行法定计量单位的命令。我国的法定计量单位是以国际单位制为基础的, 能完全体现出国际单位制(SI)的优越性。

本书采用国际单位制(SI)。鉴于本课程过去曾有二十余年采用工程单位制的历史, 现存文献、手册中尚有许多采用非国际单位制的数据、图表, 而在进行化工计算之前必须把采用不同单位制表示的有关数据(物理量)换算成统一的单位, 因此, 熟悉各种不同单位制度, 并能熟练地相互换算是学好本课程及将来正确进行化学工程计算的关键技能之一。

实践证明, 对单位换算不能掉以轻心, 不仅初学者常常造成混乱, 就是很有经验的人, 如在运算中不遵守一定的规则也易发生错误。但只要熟练地掌握换算法则, 就可避免差错。

我们知道, 物理量由一种单位制的单位转换成另一种单位制的单位时, 量本身并无变化, 只是在数值上要改变。在进行单位换算时要乘以两单位间的换算因数。所谓换算因数, 就是彼此相等而各有不同单位的两个物理量的比值。譬如 1 小时的时间和 60 分的时间是两个相等的物理量, 但其所用的单位不同, 即:

$$1 \text{ 小时} = 60 \text{ 分}$$

那么, 小时和分两种单位的换算因数便是

$$\frac{60 \text{ 分}}{1 \text{ 小时}} = 60 \text{ 分/小时}$$

又如 1m^3 体积等于 10^6cm^3 的体积, 则将 m^3 换算成 cm^3 的换算因数就是 10^6 。

化工中常用的单位间的换算因数可从本书附录中查得。

单位换算的规则为: (1)一定大小的物理量, 在进行单位换算时, 其数值要跟着改变, 即将原单位的数值乘以换算因数, 才可以得到新单位的数值。(2)在一个组合形式的单位(简称组合单位)中, 任何一个单独的单位要换算成其他单位时, 要连同换算因数一起换算。

[例 3] 求把压强中的 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 单位换算成 N/m^2 单位时的换算因数。

解: 由附录查知

$$1\text{kgf}=9.807\text{N}, \quad 1\text{cm}^2=10^{-4}\text{m}^2$$

$$\text{因此所求换算因数}=\frac{9.807}{10^{-4}}=9.807\times 10^4$$

即

$$1\text{kg}/\text{cm}^2=9.807\times 10^4(\text{N}/\text{m}^2)$$

[例 4] $1\text{kcal}/\text{h}$ 等于多少 W ?

解: 由附录查知: $1\text{kcal}=4.187\times 10^3\text{J}$

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

$$\text{则} \quad 1\text{kcal}/\text{h}=\frac{4.187\times 10^3\text{J}}{3600\text{s}}=1.163\text{J}/\text{s}=1.163\text{W}$$

[例 5] 通用气体常数 $R=82.06\text{atm}\cdot\text{cm}^3/\text{mol}\cdot\text{K}$ 。

将其换算成(1)工程单位制: $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{kmol}\cdot\text{K}$;

(2) 国际单位: $\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}$

$$\begin{aligned}\text{解: (1) } R &= 82.06 \frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{K}} = 82.06 \left(\frac{10336\text{kgf}}{\text{m}^2} \right) (0.01\text{m})^3 \left(\frac{1}{0.001\text{kmol}} \right) \left(\frac{1}{\text{K}} \right) \\ &= 848\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{kmol}\cdot\text{K}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{(2) } R &= 82.06 \frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{K}} = 82.06 \left(\frac{1.013\times 10^5\text{N}}{\text{m}^2} \right) (0.01\text{m})^3 \cdot \left(\frac{1}{0.001\text{kmol}} \right) \left(\frac{1}{\text{K}} \right) \\ &= 8313\text{N}\cdot\text{m}/\text{kmol}\cdot\text{K} = 8.313\text{kJ}/\text{kmol}\cdot\text{K}\end{aligned}$$

四、学习本课程的要求

各门学科都有其自身固有的特点。在学习时要注意针对学科的特点总结并改进学习方法, 才能取得较好的效果。现对本课程提出以下几点要求, 供学习时参考:

(一) 化工过程及设备中涉及的物理量很多, 要高度重视各物理量的意义及单位, 把每个物理量的确切意义弄明白并注意相近或相似物理量之间的区分和联系。例如流体的体积流量和质量流量, 流体混合物各组分的摩尔分率和比摩尔分率, 传热速率与热负荷等等。这是因为工程上涉及到相当多的计算, 而计算中又涉及到众多物理量, 如果对物理量缺乏明确的理解, 就容易引起混淆。

(二) 化工过程中牵连的影响因素多, 化工学科是一门综合性的课程, 它以实际化工生产中的有关问题为研究对象, 探讨其原理及规律, 因此, 涉及的面很广, 牵连的因素很多。对这些因素不能等量齐观, 而应当通过分析, 分清主次, 抓住主要矛盾, 并搞清主、次间的相互关系, 只有这样, 才可能理解得比较深刻, 所获得的知识就不是零碎的和孤立的, 而是比较系统和完整的。

(三) 本课程中计算公式多, 计算数字比较繁复, 这正体现了工程类课程的特点。要求对

基本计算方程式的物理意义及应用条件有清晰的了解。根据以往经验,工程计算中的大部分错误主要来自三个方面:套用公式而不明了公式的物理意义,不掌握公式应用的前提或条件;物理量的运用不严格,单位不统一或单位没有经过必要的换算;计算时没有选用一定的基准,以致先后数据混淆。这三点是我们学习时必须避免的。

(四) 与其他课程一样,学习时首先要理解各章中的基本概念、基本原理和基本运算方法,然后在此基础上联系实际,逐步深入。要注意防止及纠正重计算轻概念及原理的倾向。以第一章流体力学基础中的伯努利方程为例,只有对该公式的本质——机械能守恒在流体流动中应用时的特殊表达形式,及公式中每一项表达的确切的物理意义搞清楚了,才能正确而灵活地应用它进行计算。

习 题

1. 一锅炉采用连续操作,每小时送入煤 $A\text{kg}$, 空气 $B\text{kg}$, 水 $C\text{kg}$, 同时排出炉渣 $D\text{kg}$, 烟道气 $E\text{kg}$, 产生水蒸汽 $F\text{kg}$ 。当操作达到稳定,即上述各量以及炉内存渣量和压力锅内水液面、水蒸汽压力都不随时间而变化时,求各量之间的关系。若已知 $A=2000\text{kg}$, $D=560\text{kg}$, $E=26000\text{kg}$; 那么 B 是多少?

2. 燃烧某种含碳 79% 和灰分 6% 的煤,所得的煤渣中含灰分 90% 和碳 10% (以上均为质量百分数)。试计算燃烧 100kg 煤所得的煤渣质量和未利用的可燃物的百分数。

3. 某厂硝化车间的废酸,经分析后,得知其中含有 23% HNO_3 , 57% H_2SO_4 和 20% H_2O , 均以质量百分数表示。现拟掺入 93% 浓度的 H_2SO_4 和 90% 浓度的 HNO_3 , 以制备含有 27% HNO_3 和 60% H_2SO_4 的混合酸。试问制备每 1000kg 的混合酸,需要多少废酸、浓硝酸和浓硫酸(假定物料无损失)?

4. 求把压强单位 kgf/cm^2 换算成下列单位的换算因数:

(1) lbf/in^2 ; (2) kgf/m^2 。

5. $5\text{kgf} \cdot \text{m/s}$ 等于多少 J/s ? 多少 kW ?

6. $1\text{kgf} \cdot \text{s/m}^2$ (粘度单位) 等于多少 $\text{Pa} \cdot \text{s}$?

第一章 流体力学基础

气体和液体都具有流动性，统称为流体。流体力学是研究流体在静止和运动时宏观规律的科学。

流体力学可分为流体静力学和流体动力学。流体力学是流体输送、传热、传质等化工过程的基础，所以我们首先研究流体力学的基本原理。

本章主要讲述：流体静力学、流体动力学、流体阻力的理论和计算，以及应用这些基本理论解决流体平衡及流体流动中的基本问题。

第一节 流体静力学

流体静力学的任务是研究流体静止或平衡时的基本规律。其主要内容是研究静止流体内部的压强变化规律，以及这些规律的实际应用。

下面，先介绍在流体静力学中涉及的流体的主要物理量。

一、流体的主要物理量

(一) 密度和比容

1. 密度。单位体积流体的质量，称为流体的密度。若以 m 表示流体的质量， V 表示流体的体积， ρ 表示流体的密度，则：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-1)$$

某液体的密度 ρ 与 4°C 时纯水的密度 ρ_* 之比称为相对密度，习惯上将其称为液体的比重，若以 S 表示，则：

$$S = \frac{\rho}{\rho_*} \quad (1-2)$$

由于 4°C 时水的密度为 1000kg/m^3 ，所以有：

$$\rho = 1000S \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-2a)$$

2. 比容。单位质量流体的体积，称为流体的比容。显然，它与密度互为倒数。若以 v 表示，即：

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-3)$$

任何流体的密度，都随温度和压强而变化。但压强对液体密度的影响很小，可忽略不计，故常称液体为不可压缩流体。温度对液体的密度有一定影响，如纯水的密度在 4°C 时为 1000kg/m^3 ，而在 20°C 时则为 998.2kg/m^3 。因此，在选用液体密度数值时，要注意测定该数

值时的温度。

气体具有可压缩性和热膨胀性，其密度随压强和温度的不同有较大的变化。在一般温度和压强下，气体密度可近似用理想气体状态方程式计算。即：

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-4)$$

或

$$\rho = \frac{M}{22.4} \cdot \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-5)$$

式中： p ——气体的压强(kN/m²)；

T ——气体的温度(K)；

M ——气体的分子量(kg/kmol)；

R ——气体常数(8.314kJ/kmol·K)；

下标“0”表示标准状态。

流体的密度一般可在有关手册或资料中查得。本书附录中也列出一些常见气体和液体的密度，仅供做习题时查用。

3. 流体混合物密度的计算。在化工生产中所遇到的流体，往往是含有几个组分的混合物，而手册中所列出的通常为纯物质的密度。流体混合物的平均密度 ρ_m 可近似按下述公式计算。

对于液体混合物，各组分的浓度常用质量分率来表示。现以1kg混合液体为基准，若各组分在混合前后体积不变，则1kg混合液体的体积应等于各组分单独存在时的体积之和。即：

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{w1}}{\rho_1} + \frac{x_{w2}}{\rho_2} + \cdots + \frac{x_{wn}}{\rho_n} \quad (1-6)$$

式中： $\rho_1, \rho_2 \cdots \rho_n$ ——液体混合物中各纯组分液体的密度(kg/m³)；

$x_{w1}, x_{w2} \cdots x_{wn}$ ——液体混合物中各纯组分液体的质量分率。

对于气体混合物，各组分的浓度常用体积分率表示。现以1m³混合气体为基准，若各组分在混合前后的质量不变，则1m³混合气体的质量应等于各组分的质量之和。即：

$$\rho_m = \rho_1 \cdot x_{v1} + \rho_2 \cdot x_{v2} + \cdots + \rho_n \cdot x_{vn} \quad (1-7)$$

式中： $\rho_1, \rho_2 \cdots \rho_n$ ——气体混合物中各纯组分气体的密度(kg/m³)；

$x_{v1}, x_{v2} \cdots x_{vn}$ ——气体混合物中各组分气体的体积分率。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可按式1—4计算，但此时应以气体混合物的平均分子量 M_m 代替式中的气体分子量 M 。气体混合物的平均分子量 M_m 可按下式计算：

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-8)$$

式中： $M_1, M_2 \cdots M_n$ ——气体混合物中各组分的分子量(kg/kmol)；

$y_1, y_2 \cdots y_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分率。

对气体来说，其摩尔分率等于体积分率。

[例1—1] 已知甲醇水溶液中，甲醇的浓度为90%(质量百分数)，求此溶液在20℃时的平均密度。

解：由式1—6
$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{w1}}{\rho_1} + \frac{x_{w2}}{\rho_2}$$

令甲醇为第一组分，水为第二组分。

已知 $x_{w1}=0.9$ ，则 $x_{w2}=0.1$

查附录：在20℃时，

$$\rho_1 = 792 \text{ kg/m}^3, \rho_2 = 998 \text{ kg/m}^3$$

将 x_w 、 ρ 值代入式 1—6 得:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{0.9}{792} + \frac{0.1}{998} = 0.001236$$

$$\text{则 } \rho_m = \frac{1}{0.001236} = 809 (\text{kg/m}^3)$$

[例 1—2] 已知空气的组分为 21% O_2 和 79% N_2 (均为体积百分数), 试求在 100 kN/m² 和 300 K 条件下空气的密度。

解: 空气为混合气体, 先求 M_m

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2$$

$$\text{已知 } M_1 = M_{\text{O}_2} = 32$$

$$y_1 = x_{v1} = 0.21$$

$$M_2 = M_{\text{N}_2} = 28$$

$$y_2 = x_{v2} = 0.79$$

$$\text{故 } M_m = 0.21 \times 32 + 0.79 \times 28 = 28.8$$

再由 $\rho_m = \frac{p M_m}{RT}$ 计算

$$\text{已知 } p = 100 \text{ kN/m}^2$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$R = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$$

$$\text{则 } \rho_m = \frac{100 \times 28.8}{8.314 \times 300} = 1.15 (\text{kg/m}^3)$$

(二) 流体的静压强

1. 流体的静压强。流体垂直作用于单位面积上有压力, 称为流体的静压强, 简称压强。若以 p 表示压强, P 为流体垂直作用于面积 A 上的力, 则压强:

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-9)$$

在 SI 单位中, p 的单位为 N/m^2 , 代号为 Pa。由于化工生产中, 操作压强的高低相差很大, 有时需要比 Pa 大的单位, 如 MN/m^2 (兆帕) $\cdot \text{kN/m}^2$ (千帕); 有时需要用比 Pa 小的单位, 如 mN/m^2 (毫帕)。上述各单位的关系为:

$$1 \text{ MN/m}^2 = 10^3 \text{ kN/m}^2 = 10^6 \text{ N/m}^2 = 10^9 \text{ mN/m}^2$$

此外, 压强还常用其他单位来计量。如标准大气压 (atm), 某流体柱高度, 毫米汞柱 (mmHg) 或米水柱 (mH_2O) 等, 它们之间的换算关系为:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

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

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

2. 绝对压强, 表压强, 真空度。流体的静压强除用不同的单位计量外, 还可以用不同的方法来表示。

以绝对零压作起点计算的压强, 称为绝对压强, 它是流体的真实压强。

流体的压强可用测压仪表来测量。当被测流体的绝对压强高于外界大气压强时, 所用的

测压仪表称为压强表。压强表上的读数表示被测流体的绝对压强比大气压强高出的数值，称为表压强。即：

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

当被测流体的绝对压强低于外界大气压强时，所用测压仪表称为真空表。真空表上的读数表示被测流体的绝对压强低于大气压强的数值，称为真空度。即：

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

显然，设备内流体的绝对压强愈低，则它的真空度就愈高。因此，真空度是表压强的负值，故常称真空度为负压。如某设备的真空度为 500mmHg，则它的表压强是 -500mmHg。

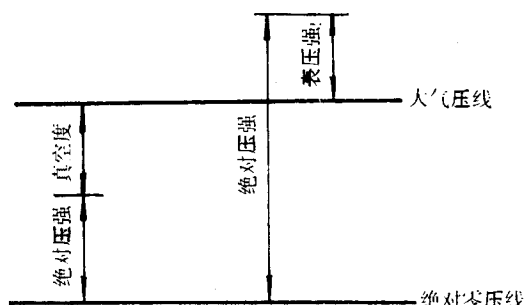


图 1-1 绝对压强、表压强和真空度的关系

绝对压强、表压强与真空度之间的关系可用图 1-1 表示。

应当指出，大气压强随大气的温度、湿度和所在地区的海拔高度而改变。因此，测定真空度和表压强时，应该注明当时的大气压强，否则无法计算绝对压强。

为了避免混淆，在以后的讨论中，对表压强和真空度均加以标注。如 2kN/m^2 (表压)、 600mmHg (真空度)。如无说明，即表示绝对压强。

[例 1—3] 某油厂脱臭罐上所装真空表上的读数为 720(mmHg)，已知当地大气压强为 1kgf/cm^2 ，求脱臭罐内的绝对压强。

解：绝对压强 = 大气压强 - 真空度

$$\text{已知 大气压强 } p_1 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$\text{真空度 } p_2 = 720 \times 133.3 = 9.598 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{故 } p_{\text{绝}} &= p_1 - p_2 = 9.807 \times 10^4 - 9.598 \times 10^4 \\ &= 2.09 \times 10^3 \text{ (N/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

[例 1—4] 某油厂蒸发器内的蒸汽压强为 0.6MPa，已知当地大气压强为 0.1MPa，试问压强表上的读数应为多少？

解：表压强 = 绝对压强 - 大气压强

$$= 0.6 - 0.1$$

$$= 0.5 \text{ (MPa)}$$

$$= 5 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

二、流体静力学基本方程及其应用

(一) 流体静力学基本方程式

流体静力学基本方程式，是用于描述静止流体内部压强变化规律的数学表达式。流体在重力和压力的作用下，达到静力平衡，因而处于相对静止状态。在静止流体内部，从各个方向作用于某一点的力都是相等的，否则该点的流体便不能保持静止；处于同一水平面上各点的静压强是相等的，否则各点的流体便不会保持在同一水平面上。在不同高度的水平面上，流体的静压强不同。下面讨论其变化规律，进而推导出流体静力学基本方程。

在图 1-2 所示的容器中盛有密度为 ρ 的静止液体。现从液体内部任意划出一底面积为 A