

高等职业技术教育教材

# 化工原理

张木全 云智勉 编

华南理工大学出版社

高等职业技术教育教材

# 化工原理

张木全 云智勉 编

华南理工大学出版社  
·广州·

## 内容提要

本书是轻化工专业的一门技术基础教材,着重介绍轻化工生产中常用的单元操作的基本原理、典型设备及计算方法。

全书共八章,内容包括流体力学、流体输送、非均相物系分离、气力输送、传热、蒸发、精馏和干燥。每章都结合轻化工生产实际选编例题,各章末还附有习题。书后附录有常用物性参数图表及管子、泵、通风机、换热器的部分规格等,供学习时参考。

本书可作为高等职业专科学校、普通中专及技工学校轻化工专业教学用书,也可供从事轻化工生产的有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工原理 张木全,云智勉编 广州:华南理工大学出版社, 2004.10  
高等职业技术教育教材  
ISBN 7-5646-0410-9

- I 化...
- II ①张...②云...
- III Ⅱ化工原理 高等学校教材
- IV Ⅱ64.4

华南理工大学出版社出版发行

(广州五山 邮编 510640)

责任编辑 胡元

各地新华书店经销

广州市新明光印刷有限公司印装

\*

2004年 10月第 1版 2004年 10月第 1次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 15.5 字数: 360千字

印数: 1—1000册

定价: 38.00元

# 前 言

本书是根据高等职业技术学院“化工原理”课程教学大纲要求编写的。

在本书的编写过程中,我们根据高等职业教育的培养目标和教学要求,以“必需、够用”为度,合理选择教材内容。同时特别注意理论联系实际,结合轻化工专业的特点,通俗易懂地讲清楚基本概念和原理,并注重引导学生从工程角度、经济观点考虑问题。对于设备,着重典型分析,以操作原理和选型为主、结构细节为次。至于计算公式则尽量避免繁琐、艰深的数学推导,力求深入浅出,既简明又实用。

根据教学大纲要求,本书以流体力学、流体输送、传热、干燥为重点。全书内容的讲课时数约为 ~~五~~四学时,适合造纸、塑料、食品、工业发酵、制糖、环保、精细化工、轻工机械等专业使用。

本书由张木全主编并编写绪论、第一至第三章及第八章;云智勉编写第四至第七章。全书由中山大学祁存谦教授审定。

由于编写时间仓促,编写水平有限,书中缺点、不足在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

二〇〇五年 愿月

# 目 录

绪论.....	员
一、单元操作 .....	员
二、源个基本概念 .....	圆
三、本课程的性质和任务.....	圆
第一章 流体力学.....	源
第一节 流体静力学.....	源
一、流体的密度和比体积 .....	源
二、流体的压力 .....	远
三、流体静力学基本方程 .....	愿
四、流体静力学基本方程的应用 .....	怨
第二节 流体动力学 .....	员圆
一、流量与流速 .....	员圆
二、稳定流动和不稳定流动 .....	员源
三、连续性方程 .....	员源
四、柏努利方程 .....	员缘
五、柏努利方程的应用 .....	员怨
第三节 流体阻力 .....	员圆
一、流体的粘度 .....	员圆
二、流体的流动型态 .....	员源
三、流体阻力的计算 .....	员苑
第四节 管路 .....	猿猿
一、管子的标准 .....	猿猿
二、管子、管件和阀门 .....	猿猿
三、管道直径的选择和计算 .....	源员
四、管路的计算 .....	源猿
五、管路的连接和布置原则 .....	源远
第五节 流量的测量 .....	源愿
一、测速管 .....	源愿
二、孔板流量计 .....	缘圆
三、文丘里流量计.....	缘猿
四、转子流量计 .....	缘猿
习题 .....	缘远

第二章 流体输送机械 .....	远
第一节 概述 .....	远
第二节 离心泵 .....	远
一、离心泵的工作原理 .....	远
二、离心泵的主要部件 .....	远
三、离心泵的主要性能参数 .....	远
四、离心泵的性能曲线 .....	远
五、离心泵的吸上高度和气蚀现象 .....	远
六、离心泵的型号和选用 .....	远
七、离心泵的工作点 .....	远
八、流量调节 .....	远
九、离心泵的操作、安装与运转 .....	远
第三节 往复泵 .....	远
一、往复泵的构造和操作原理 .....	远
二、往复泵的流量与压头 .....	远
三、往复泵的流量调节 .....	远
第四节 其他类型泵 .....	远
一、计量泵 .....	远
二、旋转泵 .....	远
三、旋涡泵 .....	远
第五节 通风机、鼓风机、压缩机和真空泵 .....	远
一、通风机 .....	远
二、鼓风机 .....	远
三、压缩机 .....	远
四、真空泵 .....	远
习题 .....	远
第三章 非均相物系的分离 .....	远
第一节 沉降 .....	远
一、重力沉降 .....	远
二、沉降器的构造和计算 .....	远
三、离心沉降 .....	远
四、离心沉降设备 .....	远
第二节 过滤 .....	远
一、过滤操作的基本概念 .....	远
二、过滤基本方程 .....	远
三、过滤设备 .....	远
四、滤渣的洗涤 .....	远
五、过滤机的生产能力 .....	远
第三节 离心机 .....	远

一、一般概念 .....	员员
二、离心机的结构与操作 .....	员园
第四节 气体的其他净制设备 .....	员缘
一、袋滤器 .....	员缘
二、泡沫除尘器 .....	员远
三、文丘里除尘器 .....	员远
四、水膜除尘器 .....	员苑
习题 .....	员苑
第四章 气力输送 .....	员怨
第一节 概述 .....	员怨
一、气力输送的特点 .....	员怨
二、气力输送的分类 .....	员怨
第二节 气力输送装置 .....	员园
一、供料器和卸料器 .....	员园
二、物料分离器和除尘器 .....	员猿
三、管道和风机 .....	员源
第三节 气力输送系统的计算 .....	员缘
一、主要参数的选用和计算 .....	员缘
二、设计计算步骤 .....	员怨
习题 .....	员员
第五章 传热 .....	员猿
第一节 概述 .....	员猿
一、传热的基本方式 .....	员猿
二、工业上的换热方法 .....	员源
三、稳定传热和不稳定传热 .....	员缘
第二节 热传导 .....	员远
一、傅立叶定律和导热系数 .....	员远
二、平壁的稳定热传导 .....	员苑
三、圆筒壁的稳定热传导 .....	员园
第三节 对流传热 .....	员园
一、对流传热的分析 .....	员园
二、壁面和流体间的对流传热速率 .....	员园
三、影响对流传热系数的因素及一般关联式 .....	员猿
四、对流传热系数的经验关联式 .....	员缘
第四节 间壁两侧流体间的传热 .....	员园
一、传热基本方程 .....	员员
二、热负荷的计算 .....	员员
三、传热平均温度差计算 .....	员猿
四、流体流动方向的选择 .....	员远

五、传热系数 运值的确定 .....	页源
六、传热面积 .....	页源
七、壁温的估算 .....	页远
八、设备的热损失 .....	页远
第五节 换热器 .....	页愿
一、间壁式换热器 .....	页愿
二、列管式换热器 .....	页愿
三、新型换热器 .....	页猿
四、间壁式换热器的比较 .....	页远
五、强化传热的途径 .....	页远
习题 .....	页愿
第六章 蒸发 .....	页园
第一节 概述 .....	页园
第二节 单效蒸发 .....	页园
一、单效蒸发的计算 .....	页园
二、溶液的沸点和温差损失 .....	页苑
第三节 多效蒸发及提高加热蒸汽经济性的其他措施 .....	页园
一、多效蒸发原理 .....	页园
二、多效蒸发流程 .....	页猿
三、多效蒸发的效数 .....	页源
四、提高加热蒸汽经济性的其他措施 .....	页缘
第四节 蒸发设备 .....	页苑
一、蒸发器 .....	页苑
二、蒸发器的辅助设备 .....	页猿
三、蒸发器的生产强度 .....	页源
习题 .....	页缘
第七章 蒸馏 .....	页苑
第一节 概述 .....	页苑
第二节 双组分溶液的气液相平衡 .....	页苑
一、相组成的表示方法 .....	页苑
二、双组分溶液的气液相平衡 .....	页园
三、挥发度与相对挥发度 .....	页源
第三节 简单蒸馏和精馏 .....	页缘
一、简单蒸馏 .....	页缘
二、精馏原理和流程 .....	页远
第四节 双组分混合液连续精馏塔的计算 .....	页怨
一、全塔物料衡算 .....	页园
二、理论板的概念及恒摩尔流的假设 .....	页园
三、操作线方程 .....	页园

四、进料状况对操作线的影响 .....	圆猿
五、理论塔板数的求法 .....	圆源
六、实际塔板数和板效率 .....	圆愿
七、回流比的影响及其选择 .....	圆缘
八、连续精馏的热量衡算 .....	圆缘
第五节 精馏塔 .....	圆苑
一、板式塔的构造 .....	圆苑
二、板式塔性能的比较 .....	圆园
第六节 特殊蒸馏 .....	圆猿
一、水蒸气蒸馏 .....	圆猿
二、恒沸蒸馏 .....	圆源
习题 .....	圆缘
第八章 干燥 .....	圆愿
第一节 概述 .....	圆愿
第二节 湿空气的性质和湿度图 .....	圆怨
一、湿空气的性质 .....	圆怨
二、湿空气的湿度图及其用法 .....	圆缘
三、湿空气的增湿和减湿 .....	圆怨
第三节 干燥器的物料和热量衡算 .....	圆园
一、物料衡算 .....	圆园
二、热量衡算 .....	圆猿
三、干燥器出口状态的确定 .....	圆缘
四、干燥器的热效率 .....	圆源
第四节 干燥速率和干燥时间 .....	圆愿
一、物料中所含水分的性质 .....	圆愿
二、干燥速率及其影响因素 .....	圆园
三、恒定干燥情况下干燥时间的计算 .....	圆猿
第五节 干燥器 .....	圆缘
一、厢式干燥器 .....	圆缘
二、带式干燥器 .....	圆苑
三、气流干燥器 .....	圆苑
四、沸腾床干燥器(流化床干燥器) .....	圆苑
五、转筒干燥器 .....	圆愿
六、滚筒干燥器 .....	圆怨
七、喷雾干燥器 .....	圆怨
八、冷冻干燥器 .....	猿园
九、红外线干燥器(辐射干燥器) .....	猿园
十、微波加热干燥器 .....	猿员
十一、干燥器的选择 .....	猿园

习题.....	猿园
附录.....	猿缘
猿化工业常用法定计量单位 .....	猿缘
猿常用单位的换算 .....	猿缘
猿某些气体的主要物理性质 .....	猿愿
猿某些液体的主要物理性质 .....	猿怨
猿水的主要物理性质 .....	猿园
猿干空气的主要物理性质( 袁越元册猿肆猿) .....	猿员
猿饱和水蒸气表( 按温度排列) .....	猿园
猿饱和水蒸气表( 按压力排列) .....	猿猿
猿水的粘度( 园- 猿肆益) .....	猿源
猿液体粘度共线图及密度 .....	猿缘
猿某些固体材料的主要物理性质 .....	猿远
猿糖溶液的主要物理性质 .....	猿苑
猿乙醇水溶液的主要物理性质 .....	猿愿
猿牛乳的主要物理性质 .....	猿怨
猿管子规格 .....	猿园
猿离心泵规格 .....	猿园
猿离心通风机规格 .....	猿苑
猿旋风分离器的主要性能 .....	猿愿
猿列管( 固定管板) 式换热器规格( 摘录) .....	猿怨

# 绪 论

## 一、单元操作

化工生产是以化学变化或化学处理为主要特征的工业生产过程,其原料来源广泛,产品种类繁多,加工过程复杂多样。很久以前,各种化工产品的生产技术被看成彼此孤立而少有相同之处。那时,只从一种产品到另一种产品逐个地去认识化工生产过程的规律,反映化工生产技术的科学,也仅是每一种化工产品的工艺学,如造纸工艺学、制糖工艺学等等。

经过长期的生产实践和科学实验,至 19 世纪 60 年代初期,提出了化工单元操作的概念。人们发现,在各种化工产品的生产过程中,除去化学反应外,其余步骤皆可归纳为若干种基本的物理过程,如流体的输送与压缩、沉降、过滤、传热、蒸发、蒸馏、吸收、干燥、冷冻等,这些基本过程称为单元操作。若干单元操作与化学反应过程串联组合则可构成一个工艺制造过程。

单元操作不仅在化学工业中占据重要地位,也广泛应用于石油、冶金、轻工、制药、原子能等工业中。

不同工艺过程中的同一种单元操作,具有共同的基本原理和通用的典型设备。譬如,制糖工业中糖水的浓缩与制碱工业中苛性钠溶液的浓缩,都是通过蒸发这一单元操作而实现的,它们共同遵循热交换原理并且都采用蒸发器。又如酿造工业中酒精的提纯与石油工业中烃类的分离都是通过蒸馏这一单元操作实现的,它们共同遵循物质传递原理并都采用精馏塔。但是,不同的工艺过程各有其独特的要求与条件,制糖工业中蒸发操作的条件以及对蒸发器的要求就有别于制碱工业,酿造工业与石油工业中的蒸馏操作也同样如此。

对于轻化工企业来说,绝大多数的设备都进行着各种单元操作,它占用工厂绝大部分的设备投资和操作费用,决定了整个生产的经济效益。因此单元操作在轻化工企业中占有相当重要的地位。本课程的研究对象就是各种单元操作,各单元操作包括两个方面:过程和设备。

各单元操作并不是没有相互联系的,经过研究,按照各单元操作遵循的基本原理,可把它们归纳为下面几个基本过程:

(1) 动量传递过程:包括遵循流体力学原理的单元操作,如流体输送、沉降、过滤、离心分离、搅拌及气力输送等。

(2) 热量传递过程(简称传热过程):包括遵循热量传递原理的单元操作,如加热、冷却、蒸发和结晶等。

(3) 质量传递过程(简称传质过程):包括遵循传质理论的单元操作,如吸收、蒸馏、吸附、萃取、干燥等。

(4) 源热力过程:包括遵循热力学定律的单元操作,如冷冻和深度冷冻等。

本课程根据轻化工企业的特点和教学大纲的要求,只研究比较重要而又常用的一些单

元操作 重点是流体输送和非均相物系的分离、传热、蒸发及干燥等单元操作 而流体力学为学习本课程的基础。

## 二、源个基本概念

在研究化工单元操作时 经常用到物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系和过程速率 源个基本概念 现就其含义作简要说明。

### 源物料衡算

根据质量守恒定律,在任一化工生产过程中,进入该过程的物料质量必等于从该过程输出的物料质量与积累于该过程中的物料质量之和,即

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{积累量}$$

对于连续稳定的操作过程,过程中不应有物料的积累,则其物料衡算关系式为

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

物料衡算可按下列步骤进行:①根据题意画出各物料的流程示意图,物料的流向用箭头表示,并标上已知数据与待求量。在较复杂的流程示意图上应画出衡算的范围。②在写物料衡算式之前,要选定计算基准,一般选用单位进料或出料量、时间及设备的单位体积等作为计算的基准。③对总物料或其中某一组分列出物料衡算式,进行求解。

### 源能量衡算

本教材中所用到的能量主要有机械能和热能。能量衡算的依据是能量守恒定律。机械能衡算将在流体力学有关章节中说明,热量衡算的步骤与物料衡算的步骤基本相同,但列热量衡算式时还需注意物料的状态基准,这将在传热、蒸发、蒸馏和干燥等章节中结合具体单元操作作详细说明。

### 源物系的平衡关系

平衡状态是自然界中广泛存在的现象。例如,在一定温度下,不饱和的食盐溶液与固体食盐接触时,食盐向溶液中溶解,直到溶液为食盐所饱和,食盐就停止溶解,此时固体食盐表面已与溶液达到动平衡状态。反之,若溶液中食盐浓度大于饱和浓度,则溶液中的食盐会析出,最终达到平衡状态。由此可见,平衡关系可以用来判断过程能否进行,以及进行的方向和能达到的极限。

### 源过程速率

任何一个物系,如果不是处于平衡状态,必然存在一个趋向平衡的过程,而过程的快慢,即过程速率受多方面因素的影响,通常它与过程的推动力成正比,与阻力成反比,即

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

过程推动力依具体过程而有所不同,它可以是压强差、温度差或浓度差等。过程速率是选定化工设备的重要因素,过程速率大时,设备尺寸就小。增大过程的推动力或减小过程的阻力均可提高过程的速率。

## 三、本课程的性质和任务

本课程是轻化工各专业的一门技术基础课,而不是专门研究某一轻化工产品的工艺专业课。其内容既广泛又实用,是从事专业生产的技术人员必须掌握的一门基础知识。学习

本课程的主要任务是研究各单元操作的基本原理和规律,熟悉各单元操作所用的典型设备的结构、性能、工作原理以及基本计算,做到既能根据工艺要求进行设备选型或主要尺寸的计算,同时还能应用所学的知识去分析和解决生产中出现的有关问题,对现行生产过程进行科学管理,使设备达到安全、高效运转,从而使生产获得最大的经济效益。

# 第一章 流体力学

气体和液体都具有流动性,通常总称为流体。轻化工生产中所处理的物料,包括原料、半成品及产品等,大多数是流体。为了把流体原料制成半成品、产品,常需把流体从一个设备送到另一个设备,或从一个车间送到另一个车间。因此,流体输送操作是轻化工生产中经常遇到的操作。另外,在现代轻化工生产的各项操作过程中,无论是传热、传质或化学反应,大多是在流体流动的情况下进行的,流体流动状态对这些过程有很大的影响。因此,流体输送是轻化工生产中的一个基本操作,也是其他化工过程的基础。

流体力学的基本知识是解决流体输送问题的理论依据,也是今后学习其他化工过程必要的基础知识。本章主要讲述流体静力学,即流体在静止时的平衡规律;流体动力学,即流体流动时的基本规律;流体阻力的理论和计算;以及运用这些基本知识解决流体流动中的基本问题,即管路的计算和流量的测量。

应当指出,流体是由不断运动着的分子所构成的,流体除了由内部分子所引起的运动外,还存在着由外部原因例如重力、离心力、压力差等的作用而引起的流体运动。但是,在工程实际中主要是研究流体的宏观运动规律,即研究由外部原因而引起的流体运动,一般不研究流体分子的运动。因此,在研究流体力学时,就要把流体作为无数微团(或质点)所组成的连续介质,流体所占的空间全部为这种连续介质所充满。但并不是在任何情况下都可以把流体视为连续介质,如在高度真空下的气体,由于此时气体分子极少,就不能把它视为连续介质了。

## 第一节 流体静力学

流体静力学主要研究流体在静止状态下所受的各种力之间的关系,实质上是讨论流体静止时其内部压强变化的规律。由于它涉及流体的密度、压力等物理量,因此这里首先介绍一下有关的概念。

### 一、流体的密度和比体积

#### (一)流体的密度

单位体积流体的质量,称为流体的密度,用符号  $\rho$  表示。其表达式为:

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

式中:  $m$  为流体的质量,  $V$  是质量为  $m$  的流体的体积,  $\rho$  因此密度的单位为  $\text{kg/m}^3$ 。

流体的密度一般可在有关手册中查到,本书附录中也列有某些常见液体和气体的密度数值。

对同一流体而言,其密度的大小受到温度和压力的影响,但影响程度不同。

## 液体的密度

压力对液体的密度影响很小,工程上常忽略不计,故工程上又称液体为不可压缩的流体。但温度对它则有一定的影响,故从手册中查取液体密度时,要注意其所指的温度。如纯水在 20℃ 时的密度为 999.84 kg/m<sup>3</sup>,在 4℃ 时为 999.97 kg/m<sup>3</sup>。

液体的密度用实验方法测定。如工程上最简单的方法是用比重计来测定,测出的数值称为相对密度。液体的相对密度是指液体在温度 t℃ 时的密度与 4℃ 时纯水的密度的比值,用符号 ρ<sub>r</sub> 表示,它是一个无单位的物理量。即

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (10)$$

式中: ρ 为液体在 t℃ 时的密度, kg/m<sup>3</sup>; ρ<sub>水</sub> 为纯水在 4℃ 时的密度,其值等于 999.97 kg/m<sup>3</sup>; ρ<sub>r</sub> 为液体在 t℃ 时的相对密度。

由式(10)可知,若已知液体的相对密度,便可求得该液体的密度。即

$$\rho = \rho_r \rho_{\text{水}} \quad (11)$$

实际生产中常遇到的是混合液体,同样,可用实验方法测得其密度。若工程计算不要求特别精确时,当混合体积不变时,则混合液体的密度可近似用下式计算:

$$\rho_{\text{混}} = \sum_{i=1}^n w_i \rho_i \quad (12)$$

式中: w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, …, w<sub>n</sub> —— 混合液中各组分的质量分率;

ρ<sub>1</sub>, ρ<sub>2</sub>, …, ρ<sub>n</sub> —— 混合液中各纯组分的密度, kg/m<sup>3</sup>;

ρ<sub>混</sub> —— 混合液的平均密度。

例 10 某输送管路每小时输送 1000 kg 的乙醇,试求每小时通过的乙醇体积为若干 m<sup>3</sup>?

解 查附录 1 得, 20℃ 乙醇的密度为 789 kg/m<sup>3</sup>。

由式 ρ<sub>r</sub> = ρ/ρ<sub>水</sub> 有 ρ = ρ<sub>r</sub>ρ<sub>水</sub>, 已知 ρ<sub>r</sub> = 0.789, 所以

$$\rho = 0.789 \times 999.84 = 788.77 \text{ kg/m}^3$$

例 11 已知 20℃ 时脂肪、非脂肪、蔗糖和水的相对密度分别为 0.92, 0.91, 1.58, 1.0, 今欲制出含脂肪 10%、非脂肪 10%、蔗糖 10% 和水分 70% (以上皆为质量分数)的甜炼乳,试求此温度下的甜炼乳的密度。

解 将已知值代入公式(12)得

$$\rho_{\text{混}} = 0.1 \times 0.92 \times 999.84 + 0.1 \times 0.91 \times 999.84 + 0.1 \times 1.58 \times 999.84 + 0.7 \times 999.84 = 999.84 \text{ kg/m}^3$$

因此,此甜炼乳的密度 ρ<sub>混</sub> = 999.84 kg/m<sup>3</sup>。

## 气体的密度

气体因具有可压缩性和热膨胀性,其密度的大小受温度和压力影响较大,因此气体的密度必须标明其状态。如在物理标准状态(温度 0℃,压力 101.325 kPa)下,空气的密度为 1.293 kg/m<sup>3</sup>。

当手册中查不到某一温度和压力下的气体密度数值时,在工程计算中,对一般温度和压力下的气体,其密度可近似用理想气体状态方程式计算,即由

$$p = \rho R T$$

可得  $\rho = \frac{p}{R T}$  (13)

式中:  $p$  为气体的绝对压力,  $M$  为气体的摩尔质量,  $R$  为通用气体常数, 其值为  $8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ ;  $T$  为气体的绝对温度,  $\rho$

对于混合气体的平均密度, 同样可以用式(1.10)计算, 但式中气体摩尔质量  $M$  要用混合气体平均摩尔质量  $M_{\text{混}}$  代替, 即

$$\rho_{\text{混}} = \frac{p}{R T} M_{\text{混}} \quad (1.10)$$

式中:  $M_{\text{混}}$  为混合气体的平均摩尔质量,  $M_{\text{混}}$

平均摩尔质量  $M_{\text{混}}$  可按下式计算

$$M_{\text{混}} = \sum_{i=1}^n \nu_i M_i \quad (1.11)$$

式中:  $M_1, M_2, \dots, M_n$  ——混合气体中各组分的摩尔质量,  $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$

——混合气体中各组分气体的摩尔分率。

例 某糖厂石灰窑能生产窑气, 窑气的成分:  $\text{CO}_2$  15%, 空气 85% (均为体积分数)。若窑气温度为  $1000^\circ\text{C}$ , 压力为  $101325 \text{ Pa}$  (绝对压力), 试求每小时能生产的窑气体积量。

解 根据式(1.10)可得

$$\rho_{\text{混}} = \frac{p}{R T} M_{\text{混}}$$

已知

窑气的平均摩尔质量  $M_{\text{混}}$  为:

$$M_{\text{混}} = 0.15 \times 44 + 0.85 \times 29 = 30.25 \text{ g/mol}$$

窑气的平均密度  $\rho_{\text{混}}$  为:

$$\rho_{\text{混}} = \frac{101325}{8.314 \times 1273} \times 30.25 = 3.02 \text{ kg/m}^3$$

将已知值代入公式得窑气体积量:

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{混}}} = \frac{1000}{3.02} = 331.1 \text{ m}^3$$

## (二) 流体的比体积

单位质量流体的体积, 称为流体的比体积, 用符号  $v$  表示, 其表达式为:

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.12)$$

式中:  $v$  为流体的比体积,  $\rho$  为流体的密度, 其余符号的意义、单位同前。

从式(1.12)可知, 流体的比体积与其密度互为倒数。

## 二、流体的压力

垂直作用于流体单位面积上的力, 称为流体的压力, 或称为静压强, 以符号  $p$  表示, 其表达式为:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1.13)$$

式中:  $F$  为垂直作用于流体面积  $A$  上的力,  $p$  为流体的压力,  $p$  称为帕斯卡, 简称为帕, 代号为  $\text{Pa}$ 。

在国际单位制(SI)中, 为了表示方便, 压力单位还常用  $\text{MPa}$  或写成  $\text{兆帕}$  (读兆帕),  $\text{kPa}$  或写成  $\text{千帕}$ ,  $\text{Pa}$  或写成  $\text{帕}$  (读毫帕) 等。

它们的换算关系为：
$$1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar} = 10^6 \text{ Pa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^2 \text{ N/cm}^2 = 10 \text{ N/mm}^2$$

由于目前一些工厂还习惯用其他压力单位来表示压力的大小，故要熟悉它们之间的换算：

$$1 \text{ MPa} (\text{物理大气压}) = 10 \text{ bar} = 10^6 \text{ Pa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^2 \text{ N/cm}^2 = 10 \text{ N/mm}^2$$

$$1 \text{ MPa} (\text{工程大气压}) = 10 \text{ bar} = 10^6 \text{ Pa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^2 \text{ N/cm}^2 = 10 \text{ N/mm}^2$$

$$1 \text{ MPa} (\text{巴}) = 10 \text{ bar} = 10^6 \text{ Pa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^2 \text{ N/cm}^2 = 10 \text{ N/mm}^2$$

流体的压力除了可以用不同的单位来计量以外，还可以用不同的压力基准来表示。

以绝对零压为起点计算的压力，称为绝对压力，简称绝压，是流体的真实压力。

流体的压力可用测压仪表来测量，当被测流体的绝压大于外界大气压力时，压力表上的读数表示被测流体的绝压比大气压力高出的数值，称为表压力，简称表压，即

$$\text{表压力} = \text{绝对压力} - \text{原大气压力} \quad (1.1-1)$$

当被测流体的绝压小于外界大气压力时，真空表上的读数表示被测流体的绝压低于大气压力的数值，称为真空度，即

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{原绝对压力} \quad (1.1-2)$$

如将真空度刻在压力表上，则零点的两侧分别为表压和真空度。所以，真空度又称负表压，简称负压。

绝压、表压与真空度之间的关系，可以用图 1.1-1 表示。

从图 1.1-1 可以清楚地看出，流体的表压愈大，其绝压也愈大；当流体的绝压为外界大气压时，其表压为零。流体的真空度愈小，其绝压愈大；当流体的绝压为零时，其真空度等于外界大气压。

为了避免绝压、表压和真空度三者相互混淆，在以后的讨论中规定，对说明表压或真空度时均加以标注，如  $P_{\text{表}}$  (表压)、 $P_{\text{真}}$  (真空度) 或写成  $P_{\text{绝}}$  (表压)，对绝压可以不用标注。

由于外界大气压与所在地区的海拔高度、大气温度、湿度等因素有关，并不是一个常量，故记录表压或真空度时还要注明当地当时的外界大气压。若没有注明，则认为外界大气压等于  $P_{\text{绝}}$ 。

例 1.1-1 在兰州操作的苯乙烯精馏塔顶的真空表读数为  $0.05 \text{ MPa}$ ，在广州操作时，若要求塔内维持相同的绝压，真空表读数应为若干  $\text{MPa}$ ？已知兰州地区的平均大气压力为  $0.1013 \text{ MPa}$ ，而广州地区为  $0.1013 \text{ MPa}$ 。

解 根据兰州地区的大气压力，可求得操作时塔顶的绝压为：

$$\text{绝压} = \text{大气压力} - \text{原真空度} = 0.1013 \text{ MPa} - 0.05 \text{ MPa} = 0.0513 \text{ MPa}$$

在广州操作时，若塔内维持相同的绝压，则

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{原绝压} = 0.1013 \text{ MPa} - 0.0513 \text{ MPa} = 0.05 \text{ MPa}$$

例 1.1-2 装在某设备进口和出口的压力表的读数分别为  $0.1 \text{ MPa}$  和  $0.05 \text{ MPa}$ ，试求此设备进出口之间的压力差，用  $\Delta P$  表示。

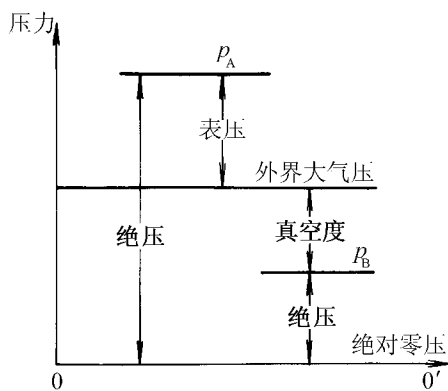


图 1.1-1 绝压、表压和真空度的关系