



高职高专“十一五”规划教材

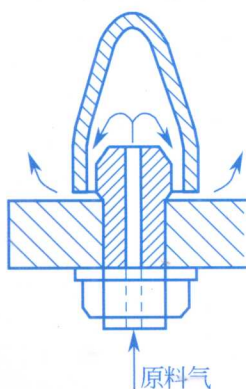
GAOZHI GAOZHUAN SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI

化工工艺基础

第二版

● 王伟武 主编
● 秦建华 主审

HUAGONG
GONGYI JICHU



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

化工工艺基础

第二版

王伟武 主编

秦建华 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要是为与化工生产有关而又非化学工艺专业人员编写的教材。教材根据化工原理、化学反应工程以及化工工艺学等课程中相关内容,按高职高专的特点,以必需、够用为度进行精简、提炼汇编而成。全书共分八章,其中包括流体流动与输送、非均相物系的分离与设备、传热与换热器、气体的吸收、液体的蒸馏、干燥、化学反应器和典型化工生产工艺,每章编有适量的例题和习题以及复习思考题。针对非化工工艺专业的特点,教材中安排一些实际范例分析,目的是培养学生分析和解决问题的能力。

本书可作为化工机械、化工仪表、化工分析、环境保护、化工管理、轻工、制药及其相近专业相应课程的教材或教学参考书,也可供化工企业一般工程技术人员及工人参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工工艺基础/王伟武主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 2010.5

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-08026-4

I. 化… II. 王… III. 化工过程-生产工艺-高等学校:技术学院-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 048613 号

责任编辑:高 钰

装帧设计:刘丽华

责任校对:战河红

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{3}{4}$ 字数367千字 2010年8月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:26.00 元

版权所有 违者必究

第一版前言

在化工生产中,除专业技术人员外,凡是与化工生产有关的非化工工艺工作人员,对化工生产的基本原理、操作设备以及操作过程,都要有一个基本的了解,只有这样才能在生产中更好地发挥自己的专业特长。本书就是按职业教育特点和要求,为高职高专类院校非化工工艺专业编写的技术基础课教材。它可作为化工机械、化工仪表、化工分析、环境保护、化工管理、轻工、制药及其相近专业相应课程的教材或教学参考书。

为适应职业技术教育应用性、针对性、岗位性以及专业性的特点,本书所编写的内容体现了必需、够用、实用的高职高专特色,避开繁琐的公式推导,增加实用的范例分析。尽量简化但保留够用的成熟基础理论,努力反映学科的现代特点,强调实际应用技能和分析能力的培养。在文字上力求简练,通俗易懂,尽量符合非化工专业技术人员的特点和需要。全书侧重于基础知识、基本理论,在实际应用中分析讨论,注意培养和启发学生解决问题的思路、方法及能力。

本书共分8章,全部内容讲课时数约为100学时。考虑到各种专业的需要以及学时安排的不同,其中加有*号的章节可作为不同专业的选讲内容。

本书由王伟武主编,秦建华主审。参加编写的人员有王伟武(绪论,第一、三、七章)、蒋丽芬(第二、四章)、曹为民(第五、六章)、徐忠娟(第八章)。本书在编写过程中,得到了编者所在学校领导的关心和相关教研室老师的大力支持,在教材内容与工程实际联系上提供了一些有益的建议,在此一并表示衷心地感谢。

尽管在编写过程中得到了许多同志的支持和帮助,但由于编者业务水平有限,书中难免有欠妥和错误之处,希望各位专家、读者予以批评指正,以便再版时修正。

编者

2004年7月

第二版前言

本书自 2005 年出版以来，受到了许多读者和同行的支持和鼓励，同时也在使用过程中发现一些错误，并对本书提出一些宝贵的建议。综合读者和同行的建议以及目前高等职业教育的教学要求，本书在修订过程中，除了针对非化工工艺专业的教学特点，保留第一版的文字简炼、通俗易懂，内容侧重于实际应用分析，注意培养和启发学生解决问题的思路、方法及能力等特色以外，主要有以下几方面变动：

(1) 每一章增加了知识目标和能力目标，使教学目的更加明确。

(2) 增加了习题解答，有利于教师辅导和学生自学使用。

(3) 纠正了原来课文和附图中的错误，改写了部分章节内容。

(4) 修改了部分思考题和习题，使之更接近于生产实际。

(5) 本书内容已制作成用于多媒体教学的 PPT 课件，并将免费提供给采用本书作为教材的院校使用。如有需要，请发电子邮件至 cipedu@163.com 获取。

感谢南京化工职业技术学院蒋丽芬、扬州工业职业技术学院徐忠娟、广西工业职业技术学院曹为民三位参编老师在修订过程中提出的宝贵意见，感谢南京化工职业技术学院化工原理教研室同事在修订工作中给予的帮助。

由于编者水平有限，加之时间仓促，考虑不周之处盼读者多提建议。

编者

2010 年 3 月

目 录

绪论	1
一、化学工业与化工过程	1
二、本课程的性质、内容和任务	1
三、化工过程中的几个基本概念	2
复习思考题	3
第一章 流体流动与输送	4
第一节 概述	4
第二节 流体流动的基本概念	4
一、流体的密度	4
二、作用在流体上的力	6
三、定态流动与非定态流动	8
四、流量和流速	9
第三节 流体在管内流动的守恒原理	11
一、定态流动的物料衡算	11
二、定态流动的能量衡算	12
第四节 流体在管内的流动阻力	21
一、流体的两种流动形态	21
二、流体在管内流动阻力的计算	23
三、减小流动阻力的途径	30
第五节 流体输送机械	31
一、液体输送机械	31
二、气体输送与压缩机械	35
复习思考题	38
习题	38
本章主要符号说明	40
第二章 非均相物系的分离与设备	41
第一节 概述	41
一、非均相物系分离在化工生产中的应用	41
二、常见非均相物系的分离方法	41
第二节 气-固分离	42
一、降尘室	42
二、旋风分离器	43
三、其他常见的气-固分离法	45
第三节 液-固分离	46
一、沉降槽	47
二、过滤	47

三、离心分离	51
复习思考题	54
本章主要符号说明	55
第三章 传热与换热器	56
第一节 概述	56
一、传热在化工生产中的应用	56
二、工业生产中的换热方法	56
三、定态传热与非定态传热	57
四、传热速率与热通量	58
第二节 传热方式	58
一、热传导	58
二、对流给热	63
三、热辐射	67
第三节 间壁式换热器的传热分析和计算	67
一、传热速率方程	68
二、换热器的热负荷	68
三、传热系数	70
四、平均温度差	72
五、传热过程的强化	75
第四节 间壁式换热器	76
一、间壁式换热器分类	76
二、常见的间壁式换热器	77
复习思考题	83
习题	83
本章主要符号说明	84
第四章 气体的吸收	85
第一节 概述	85
一、吸收操作在工业生产中的应用	85
二、吸收操作分类	86
三、吸收剂的选择	86
四、吸收操作相组成表示法	86
第二节 气液相平衡	87
一、气体在液体中的溶解度	87
二、亨利定律	88
三、物质传递的方向与过程推动力	92
第三节 吸收机理与传质速率	93
一、物质传递的两种基本方式	93
二、对流传质	94
第四节 吸收过程计算	96
一、吸收过程的物料衡算和吸收剂用量的确定	97
二、低浓度气体定态吸收过程的填料层高度计算	101

第五节 填料塔	106
一、填料塔与填料	106
* 二、填料塔的附件	108
复习思考题	111
习题	111
本章主要符号说明	112
第五章 液体的蒸馏	113
第一节 概述	113
一、蒸馏操作在化工生产中的应用	113
二、蒸馏操作的分类	113
第二节 双组分溶液的气液平衡	114
一、理想溶液的气液平衡	114
二、非理想溶液的气液平衡	118
第三节 蒸馏方式	119
一、平衡蒸馏	119
二、简单蒸馏	120
三、精馏	121
第四节 双组分连续精馏计算	122
一、全塔物料衡算	122
二、精馏操作线方程	123
三、精馏塔的塔板数确定	126
四、回流比的确定	129
第五节 板式塔	131
一、板式塔的结构和类型	131
二、板式塔的流体力学特性与操作性能	134
三、板式塔与填料塔的比较	136
复习思考题	137
习题	137
本章主要符号说明	138
第六章 干燥	139
第一节 概述	139
一、固体物料的去湿方法	139
二、干燥过程的分类	139
第二节 湿空气的性质及湿度图	140
一、湿空气的性质	140
二、湿空气的湿度图及其应用	143
第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算	145
一、干燥过程的物料衡算	145
二、干燥过程的热量衡算与热效率	147
第四节 干燥速率	148
一、物料中所含水分的性质	148

二、恒定干燥条件的干燥速率·····	150
第五节 工业上常见的干燥器·····	151
一、厢式干燥器·····	151
二、气流干燥器·····	151
三、沸腾床干燥器·····	152
四、喷雾干燥器·····	152
五、转筒干燥器·····	153
复习思考题·····	154
习题·····	154
本章主要符号说明·····	155
第七章 化学反应器·····	156
第一节 概述·····	156
一、化学反应器的分类·····	156
二、对反应器的要求·····	157
第二节 典型化学反应器·····	157
一、釜式反应器·····	157
二、管式反应器·····	159
三、固定床反应器·····	160
四、流化床反应器·····	161
复习思考题·····	165
第八章 典型化工生产工艺·····	166
第一节 合成氨工业·····	166
一、概述·····	166
二、合成氨生产工艺·····	167
第二节 石油化工·····	181
一、概述·····	181
二、石油炼制·····	183
三、石油烃的裂解与分离·····	188
第三节 精细化工·····	192
一、精细化工的概念和精细化工产品的分类·····	192
二、精细化工生产工艺举例·····	195
三、精细化工的发展趋势·····	199
复习思考题·····	201
习题答案·····	203
附录·····	205
1. 单位换算表·····	205
2. 水的物理性质·····	206
3. 水在不同温度下的黏度·····	206
4. 干空气的物理性质 ($p=101.3\text{kPa}$)·····	207
5. 饱和水与干饱和蒸汽表 (按温度排列)·····	208
6. 有机液体相对密度 (液体密度与 4°C 水的密度之比) 共线图·····	210

7. 液体黏度共线图	211
8. 液体比热容共线图	213
9. 液体蒸发潜热（汽化热）共线图	215
10. 气体黏度共线图（常压下）	216
11. 101.3kPa 压强下气体的比热容共线图	217
12. 某些液体的热导率 λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	218
13. 常用气体的热导率图	219
14. 常见固体的热导率	219
15. 某些双组分混合物在 101.3kPa 压力下的气液平衡数据	220
16. 某些气体在溶于水中的亨利系数	221
17. 管子规格	222
18. 几种常用填料的特性数据（摘录）	223
参考文献	224

绪 论

一、化学工业与化工过程

化学工业是以天然资源或其他工业产品为原料，用物理和化学手段将其加工为产品的制造业。化学工业产品的品种数以万计，它包括了各种生产资料和生活资料，若按原料的来源和产品的去向可将其分为通用化学品工业和精细化学品工业两大类。

通用化学品工业是以石油、煤、矿石、水、空气、农副产品等天然资源为原料，经过物理和化学加工过程而制成的产量大、应用范围较广的化工产品，如“三酸二碱”、合成氨、“三苯三烯”、合成纤维、合成橡胶、合成树脂等无机和有机化工产品；精细化学品工业是以通用化学品为原料，进行深度加工，制成多品种具有特定功能产品的工业，如药品、涂料、化妆品和杀虫剂等。精细化工产品以其特定的功能和专用性质，对促进工农业发展，丰富人民的生活起到重要的作用，因此它在化学工业中的地位在不断的提高。

化学工业是一个多门类、多品种的生产部门，其中任何一种化工产品的生产都是将各种原料通过许多工序和设备，在一定的工艺条件下，进行一系列的加工处理，最后制得产品。一个特定的化工产品，从原料到产品的生产过程称为化工过程。不同的原料，不同的产品具有不同的生产过程，但在其过程中都要用到一些类型相同、具有共同特点的基本过程和设备。如流体输送、换热、精馏等物理操作，反应器中进行的化学反应等典型操作。由此可见，任何一个化工过程都是由一系列化学反应操作和一系列物理操作构成。化学工业中将具有共同的物理变化，遵循共同的物理学规律，以及具有共同作用的基本操作称为“化工单元操作”；将化学反应操作称为“化工单元过程”。

二、本课程的性质、内容和任务

化工工艺基础是化工机械、化工仪表和化工分析等非化工专业必修的一门技术基础课，它在数学、物理、化学等基础课程与专业课程之间起着承前启后的作用。为满足各非化工专业的学习的需要，本课程内容包括三个部分。

（一）单元操作

单元操作按其理论基础可分为三类。

- ① 流体流动过程。包括流体流动与输送、搅拌、沉降、过滤等。
- ② 传热过程。包括传热、蒸发等。
- ③ 传质过程。包括吸收、蒸馏、萃取、吸附、干燥等。

鉴于专业的需要，在课程中仅讨论流体流动与输送、沉降和过滤、传热、吸收、精馏、干燥等主要单元操作。

（二）化学反应器

化学反应器是化工生产的核心设备，它的性能优劣对产品的产量和质量起着决定性的作用，本课程主要讨论化工生产中典型反应器的结构和特点，以及化工生产对反应器的基本要求。

（三）典型化工工艺

本教材所涉及的化工生产工艺，是在学习单元操作和反应器的基础上讨论几个典型的化工生产过程，如合成氨、石油化工等。主要讨论在各种化工生产工艺中单元操作设备及反应

器的不同组合情况,并根据物理、化学的基本原理分析最优的工艺条件,确定合理的工艺流程,同时对物料和能量的充分利用,以及“三废”处理等进行分析和介绍。

本课程的主要任务是使读者熟悉化工生产的基本原理、典型设备的构造、操作、应用和基本计算方法以及影响过程的因素。培养学生运用基础理论分析和解决生产中各种工程实际问题的能力。

三、化工过程中的几个基本概念

在分析单元操作或工艺过程中,经常要用到物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率等概念来反映物料的变化规律,从理论上探索它的可能性,技术上的可行性以及经济上的合理性。它们是分析任一化工过程的出发点。

(一) 物料衡算

物料衡算是以质量守恒定律为基础,用来分析和计算化工过程中物料的进、出量以及组成变化的定量关系,确定原料消耗定额、产品的产量和产率,还可以用来核定设备的生产能力,确定设备的工艺尺寸,发现生产中所存在的问题,从而找到解决方案,所以它是化工计算的基础。

进行物料衡算时,首先根据需要对衡算对象人为地划定一个衡算范围。这样一个范围称为“控制体”,并用箭头在控制体表面标出各股物料进、出数量、组成等。其次要规定一个衡算基准,衡算基准要根据实际需要来决定,在连续操作中以单位时间为基准较为方便;对于产品量已确定,则可用单位产品量为基准,由此来衡算出其他各股物料量。必须注意的是参与衡算的物料量要以质量或物质的量表示,一般不宜用体积表示,这是由于体积尤其气体的体积是随着温度、压强的变化而变化的。

若进入控制体的各股物料总量为 $\sum G_i$,从控制体中排出的各股物料总量为 $\sum G_o$,控制体内的物料的积累量为 G_a ,根据质量守恒定律应有:

$$\sum G_i = \sum G_o + G_a$$

对于连续操作,进、出控制体的各股物料量恒定,在控制体内任一位置处物料的各参数(温度、压强、组成、流速等)都不随时间而变,这样的操作过程称为定态过程。对定态过程,控制体内无物料积累, $G_a=0$,则物料衡算式为:

$$\sum G_i = \sum G_o$$

物料衡算中控制体的概念同样可以用到能量衡算或动量衡算中去。

(二) 能量衡算

能量衡算的依据是能量守恒定律。根据此定律,输入控制体的能量应等于从控制体输出的能量与控制体内积累的能量之和。

能量可以随物料一起输入或输出,如物料自身具有的内能、动能和位能等。也可以通过一些设备输入或输出,如通过泵或压缩机给流体增加机械能,通过器壁向系统输入热量以及从设备损失到周围介质中的热量等。

能量的形式很多,在化工生产中用到的最多的是热能,热量衡算则是化工计算中一个常用的工具。对定态操作系统,若输入控制体的热量为 $\sum Q_i$,输出的热量为 $\sum Q_o$,控制体的热损失为 Q_l ,该控制体的热量衡算式为:

$$\sum Q_i = \sum Q_o + Q_l$$

通过热量衡算可以了解热量的利用和损失情况,确定过程中需要加入的热量。这是生产工艺条件的确定、设备设计不可缺少的环节,也是评价技术经济效果的重要工具。

(三) 平衡关系

任何一个物理或化学变化过程,在一定条件下必然沿着一定方向进行,直至达到动态平衡为止。这类平衡现象在化工生产中很多,如化学反应中反应平衡、吸收、蒸馏操作中的气液平衡、萃取操作中液液平衡等。

描述化工过程中物系平衡关系的定律有热力学第二定律、亨利定律、拉乌尔定律以及化学平衡定律等。必须指出,任何过程的平衡状态都是在一定条件下达到的暂时、相对统一的状态,一旦条件变化,原来的平衡就要被破坏,直到建立起新的平衡。因此只要适当地改变操作条件,过程就可按指定的方向进行,并尽可能使过程接近平衡,使设备发挥最大的效能。平衡关系也为设备尺寸的设计提供了理论依据。

(四) 过程速率

平衡关系只能说明过程的方向和限度,而不能确定过程进行的快慢,过程进行的快慢只能用过程速率来描述。过程速率受诸多因素影响,目前还不能用一个简单的数学式来表示化工过程速率与其影响因素之间的关系。所以目前过程速率是以过程推动力与过程阻力的比值来表示的,即:

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

不同的过程推动力有不同的含义,如冷、热两流体之间传热推动力应为冷、热两流体之间的温度差,流体流动的推动力为势能差,而物质传递的推动力则为浓度差。无论是什么含义,它们有一个共同点,即过程达平衡时推动力均为零。过程阻力较为复杂,应根据具体过程进行分析。

复习思考题

1. 何谓化工单元操作和化工单元过程?
2. 单元操作包括哪些内容?
3. 何谓“控制体”?确定控制体的作用是什么?
4. 物料衡算和能量衡算分别依据什么基本定律?

第一章 流体流动与输送

学习目标

知识目标

掌握流体主要物性（密度、黏度）和压强定义、单位及其换算，连续性方程、柏努利方程的应用，流动类型的判断以及流体在管内的阻力损失的计算，离心泵结构、工作原理以及性能。

理解温度、压强对流体物性的影响，不同流动类型对流动阻力的影响，流量计的测量原理，各种常见的流体输送机械基本结构及工作原理。

了解流体流动与输送在工业生产中的应用，流体流动阻力的类型和产生的原因，流体流速分布，非圆管阻力计算。

能力目标

能应用流体流动基本方程解决简单管路计算问题。能识别常见管子、管件和阀门，熟知它们的作用，能完成简单管路的拆装。能对离心泵进行开停车操作和简单故障分析、排除。

第一节 概 述

流体是液体和气体的总称，其基本特性是它具有流动性。所谓流动性就是在静止时不能承受剪切力的性质，当有剪切力作用于流体时，流体就会产生连续的变形，也就是说流体质点之间就会产生相对运动。气体和液体同属流体，它们有共性，也有各自的特性：如液体的体积随压力及温度的改变变化很小，所以一般将液体称为不可压缩流体；而气体则具有较大的压缩性，当压力和温度改变时，气体的体积会有较大变化，称为可压缩流体。因此在讨论液体和气体共性的同时，也要讨论它们各自的特性和处理方法。

化工生产中所处理的物料，不论是原料、中间产品还是产品，大部分都是流体。在生产过程中，流体从一个设备流到另一个设备，从一个车间送到另一个车间，为了完成流体输送的任务，必须解决管路的配置，流量、压强的测定，输送流体所需能量的确定和输送设备选用等技术问题。除此以外，设备中的传热、传质以及化学反应都是在流动流体中进行，它们与流体流动形态密切相关。研究流体的流动形态和条件，可作为强化化工设备的依据。因此，流体流动与输送是化工生产中必不可少的单元操作，流体流动基本原理是本课程的重要基础。

第二节 流体流动的基本概念

一、流体的密度

（一）流体的密度

流体和其他物体一样具有质量。单位体积流体所具有的质量称为密度，通常用 ρ 表示。如均质流体的体积为 V ，质量为 m ，则密度 ρ 为：

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

质量的单位用 kg, 体积的单位用 m^3 , 所以密度的单位为 kg/m^3 。

1. 液体的密度

一定的流体, 其密度是压力和温度的函数。液体可视为不可压缩流体, 密度随压力变化很小 (极高压力下除外), 可忽略其影响。温度对液体的密度有一定的影响, 在查取液体密度时, 要注意注明其温度条件。但在温度变化不大的情况下, 也可忽略温度的影响。如水在常温下的密度都可按 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 计。

2. 气体的密度

气体的压缩性要比液体大得多, 无论是压强还是温度, 对气体密度的影响都不能忽略。在压强不太高、温度不太低的情况下, 对空气和一些不易液化的气体, 可以用下式表达气体密度与其压强和温度之间的关系:

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

式中 ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

p ——气体的绝对压强, kPa;

M ——气体的摩尔质量, kg/kmol ;

T ——气体的热力学温度, K;

R ——气体常数, 数值为 $8.314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

气体的密度亦可按下式进行计算:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-3)$$

式中 ρ_0 ——标准状态下气体的密度, kg/m^3 , $\rho_0 = \frac{M}{22.4}$;

T_0 ——标准状态温度, K, $T_0 = 273\text{K}$;

p_0 ——标准状态压强, kPa, $p_0 = 101.33\text{kPa}$ 。

3. 混合物密度的确定

化工生产中常见的流体为混合物, 以下介绍液体混合物和气体混合物平均密度的计算方法。

若几种纯液体混合前的分体积之和等于混合后的总体积, 则混合液体的平均密度可按下式计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{a_n}{\rho_n} \quad (1-4)$$

式中 ρ_m ——液体混合物的平均密度, kg/m^3 ;

$a_1, a_2, \dots, a_n$ ——液体混合物中各组分的质量分数, $a_1 + a_2 + \cdots + a_n = 1$;

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各组分的密度, kg/m^3 。

气体混合物的平均密度仍可用式(1-2) 计算, 即:

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} \quad (1-5)$$

应注意, 式中的 p 为混合气体的总压, M_m 为混合气体的平均摩尔质量, 即:

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-6)$$

式中 $M_1, M_2, \dots, M_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔质量, kg/kmol ;

$y_1, y_2, \dots, y_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分数或体积分数, $y_1 + y_2 + \dots + y_n = 1$ 。

常见液体和气体的密度可从有关书刊或手册中查取。本书附录中列出了部分气体和液体的密度, 可在计算时选用。

【例 1-1】 由 A 和 B 组成的混合液, 其中 A 的质量分数为 0.4。已知常压、20℃下 A 和 B 的密度分别为 879kg/m³ 和 1106kg/m³。试求该条件下混合液的密度。

解 由式(1-4)可得:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} = \frac{0.4}{879} + \frac{1-0.4}{1106} = 9.98 \times 10^{-4}$$

所以 $\rho_m = 1002 \text{ kg/m}^3$

【例 1-2】 干空气的组成近似为 21% 的氧气, 79% 的氮气 (均为体积分数)。试求压强为 294kPa、温度为 80℃ 时空气的密度。

解 氧气的摩尔质量为 32kg/kmol, 氮气的摩尔质量为 28kg/kmol, 干空气的平均摩尔质量为:

$$M_m = 32 \times 0.21 + 28 \times 0.79 = 28.84 \text{ kg/kmol}$$

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} = \frac{294 \times 28.84}{8.314 \times (273 + 80)} = 2.89 \text{ kg/m}^3$$

(二) 流体的比容与相对密度

单位质量流体所具有的体积称为流体的比容, 又称为比体积, 用符号 v 表示。其表达式如下:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-7)$$

由此可见, 流体的比容是密度的倒数, 单位为 m³/kg。

温度为 T K 的流体密度 ρ 与 277K 时纯水的密度 $\rho_{\text{水}}$ 之比值称为相对密度, 用 d_{277}^T 表示:

$$d_{277}^T = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-8)$$

相对密度是一个无量纲量, 无单位, 不要与密度相混淆。由于 277K 纯水的密度 $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{ kg/m}^3$, 所以流体密度与其相对密度之间的关系为:

$$\rho = 1000 d_{277}^T \quad (1-9)$$

二、作用在流体上的力

流体所受的力, 可以分为外力和内力两大类。流体内部分子之间的作用力称为内力, 它包括分子之间的引力、压力及摩擦力, 它对流体的运动没有影响, 在这里不作讨论。外界作用于所研究的那块流体上的力称为外力, 它又分为表面力和质量力两种。流体运动的情况决定于外力, 它是研究的主要对象。

(一) 质量力

质量力是作用在所研究的流体各个质点上的一种力, 其值大小与流体质点的质量成正比。对均质流体, 这种力的大小与所研究的流体体积成正比, 所以又称为体积力。流体在重力场运动时所受到的重力、在离心力场所受到的离心力都是典型的质量力。

(二) 表面力

表面力作用在所研究的那块流体表面上, 其值大小与流体的表面积成正比。它又可分为垂直作用于流体表面的法向力和平行作用于流体表面的切向力。垂直作用于流体表面的力称为流体静压力, 单位流体面积上的流体静压力称为压强。平行作用于流体表面的力称为剪

力, 单位流体面积上的剪力称为剪应力。

1. 流体的静压力和静压强

流体静压力和流体静压强的区别在于: 流体静压力是作用在某一流体面积上的总压力, 压强则是作用在单位面积上的压力。工程上习惯将流体静压强称为压力, 而将流体静压力称为总压力。若以 P 表示流体的总压力, A 表示流体的作用面积, 则流体的压强 p 为:

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-10)$$

总压力 P 的单位为 N , 面积 A 的单位为 m^2 , 则压强 p 的单位为 N/m^2 , 也称为帕斯卡 (Pa), 简称为帕。压强单位除了用 Pa 表示以外, 还有许多种表示法, 以下为常见压强单位之间的换算关系:

$$1 \text{ atm} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 101.325 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 10 \text{ mH}_2\text{O} = 735.6 \text{ mmHg} = 98.07 \text{ kPa}$$

其中符号 atm 为物理大气压, 符号 at 为工程大气压。

在化工计算中, 常采用两种基准来度量压强的数值大小, 这是绝对压强和相对压强。以没有气体分子存在的绝对真空作为基准所测得的压强称为绝对压强 (绝压); 以当地大气压强为基准所测得的压强称为相对压强。

绝对压强永远为正值, 而相对压强则可能为正值, 也可能为负值。化工生产中所使用的各种压强测量装置, 其读数一般都为相对压强, 当设备中绝对压强大于当地大气压时, 相对压强值为正, 所用的测压仪表称为压力表, 压力表上的读数为被测流体绝对压强高出当地大气压的数值, 称为表压强 (表压)。它与绝对压强之间的关系为:

$$\text{绝对压强} = \text{当地大气压力} + \text{表压强}$$

当设备中绝对压强小于当地大气压时, 相对压强值为负, 所用的测压仪表称为真空表, 真空表上的读数为被测流体绝对压强低于当地大气压力的数值, 称为真空度。它与绝对压强之间的关系为:

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

绝对压强、表压和真空度之间的关系可用图 1-1 来表示。取 $0-p$ 为压强轴; $0-0$ 为绝对真空线, 即绝对压强的零线; $1-1$ 线为当地大气压线。

当地大气压力不是固定不变的, 它应按当时当地气压计上的读数为准。另外为了避免绝对压强、表压和真空度三者的混淆, 在今后的讨论中, 对表压和真空度均加以标注, 如 200 kPa (表)、 20 kPa (真), 没有标注的均指的是绝对压强。

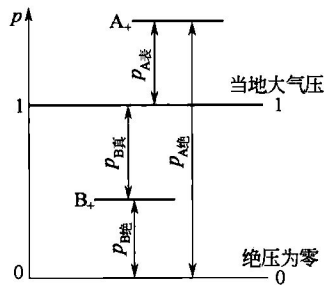


图 1-1 压强的基准

【例 1-3】 设备外环境大气压为 720 mmHg , 而以真空表测得设备内真空度为 580 mmHg 。问设备内的绝对压强是多少? 设备内外的压强差为多少?

解 分别以 p 表示设备内绝压, 以 $p_{\text{大气}}$ 表示环境的大气压强, 以 $p_{\text{真}}$ 表示设备的真空度, 有:

$$p = p_{\text{大气}} - p_{\text{真}} = 720 - 580 = 140 \text{ mmHg} = 18.67 \text{ kPa}$$

设备内外的压强差为:

$$\Delta p = p_{\text{大气}} - p = 720 - 140 = 580 \text{ mmHg} = 77.3 \text{ kPa}$$

2. 流体的剪力和黏度

(1) 牛顿黏性定律。研究流体流动时, 可以将流体看成是彼此之间没有间隙的无数质点