

教育部高职高专规划教材



食品工程原理

姜淑荣 主编 冷士良 主审



化学工业出版社
职业教育教材出版中心

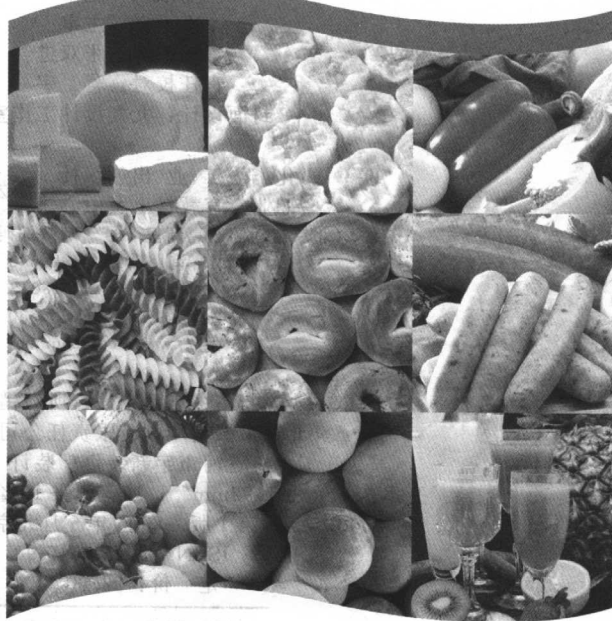
教育部高职高专规划教材



教育部高职高专规划教材 食品工程原理
姜淑荣 主编 冷士良 主审
化学工业出版社 (北京) 出版

食品工程原理

姜淑荣 主编 冷士良 主审



化学工业出版社
职业教育教材出版中心
·北京·

地址: 北京市东城区黄城根北街2号
电话: (010) 63996800
网址: www.cip.com.cn

图书在版编目 (CIP) 数据

食品工程原理/姜淑荣主编. —北京: 化学工业出版社, 2006. 4

教育部高职高专规划教材

ISBN 7-5025-8510-9

I. 食… II. 姜… III. 食品工程学-高等学校: 技术学院-教材 IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 033456 号

教育部高职高专规划教材

食品工程原理

姜淑荣 主编

冷士良 主审

责任编辑: 张双进

责任校对: 蒋宇

封面设计: 九九设计工作室

*

化学工业出版社 出版发行
职业教育教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市振南印刷有限责任公司印刷

三河市宇新装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 328 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8510-9

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

高职高专食品类专业规划教材

编审委员会

主 任	金长义				
副主任	葛 亮	盛成乐	徐恒山	阎保平	臧大存
	张立彬	张 泰	朱 珠		
委 员	陈剑虹	陈 志	杜克生	葛 亮	胡永源
	姜淑荣	冷士良	李晓华	梁传伟	穆华荣
	潘 宁	孙来华	唐 突	王 莉	王亚林
	文连奎	熊万斌	杨登想	杨清香	杨士章
	杨永杰	叶 敏	于艳琴	展跃平	张晓燕
	张 妍	张英富	赵思明	周凤霞	周光理
	朱乐敏	朱 珠			

(按姓氏汉语拼音排序)

出版说明

高职高专教材建设工作是整个高职高专教学工作中的重要组成部分。改革开放以来，在各级教育行政部门、有关学校和出版社的共同努力下，各地先后出版了一些高职高专教育教材。但从整体上看，具有高职高专教育特色的教材极其匮乏，不少院校尚在借用本科或中专教材，教材建设落后于高职高专教育的发展需要。为此，1999年教育部组织制定了《高职高专教育专门课课程基本要求》（以下简称《基本要求》）和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》（以下简称《培养规格》），通过推荐、招标及遴选，组织了一批学术水平高、教学经验丰富、实践能力强的教师，成立了“教育部高职高专规划教材”编写队伍，并在有关出版社的积极配合下，推出一批“教育部高职高专规划教材”。

“教育部高职高专规划教材”计划出版500种，用5年左右时间完成。这500种教材中，专门课（专业基础课、专业理论与专业能力课）教材将占很高的比例。专门课教材建设在很大程度上影响着高职高专教学质量。专门课教材是按照《培养规格》的要求，在对有关专业的人才培养模式和教学内容体系改革进行充分调查研究和论证的基础上，充分汲取高职、高专和成人高等学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验和教学成果编写而成的。这套教材充分体现了高等职业教育的应用特性和能力本位，调整了新世纪人才必须具备的文化基础和技术基础，突出了人才的创新素质和创新能力的培养。在有关课程开发委员会组织下，专门课教材建设得到了举办高职高专教育的广大院校的积极支持。我们计划先用2~3年的时间，在继承原有高职高专和成人高等学校教材建设成果的基础上，充分汲取近几年来各类学校在探索培养技术应用型专门人才方面取得的成功经验，解决新形势下高职高专教育教材的有无问题；然后再用2~3年的时间，在《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上，通过研究、改革和建设，推出一大批教育部高职高专规划教材，从而形成优化配套的高职高专教育教材体系。

本套教材适用于各级各类举办高职高专教育的院校使用。希望各用书学校积极选用这批经过系统论证、严格审查、正式出版的规划教材，并组织本校教师以对事业的责任感对教材教学开展研究工作，不断推动规划教材建设工作的发展与提高。

教育部高等教育司

2001年4月3日

前 言

依据高职高专课程改革精神，培养“强能力、宽适应”的高职高专人才已成为各高职院校专业课程设置与建设、教学内容与方法改革的指南，为满足高职高专这一课程改革需求，特编写此书。

本书力求体现高等职业教育规律和特征，体现对高等职业教育的规格、层次及教育对象的特点的把握，紧密围绕高等职业教育的培养目标和食品行业的职业需求，内容上以“必需、够用”为度，并做到繁简适度、深入浅出，突出职业特色。

《食品工程原理》是食品专业的一门重要课程，本书以食品工程单元操作的“三传”理论为主线安排各章节顺序，具体为：以动量传递为基础，叙述流体的流动、流体输送机械、非均相混合物的分离；以热量传递为基础，阐述换热过程及换热设备；以质量传递为基础，说明蒸馏、萃取等单元操作原理及其相关设备的设计计算。

本书是高职高专食品专业教学用书。建议 80~100 学时，各院校可根据实际需要增减教学内容。

全书共分九章。其中，绪论、第一章、第二章、第四章、第八章及附录由姜淑荣编写；第三章由葛亮编写；第五章、第六章由刘静编写；第七章、第九章由谢俊彪编写。全书由姜淑荣任主编，由冷士良任主审。在编写过程中，参考了一些公开出版的文献资料，在此向这些作者致以衷心的感谢！

由于时间仓促，加之编者水平有限，不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2006 年 3 月

目 录

绪论	1
一、课程的性质与任务	1
二、单元操作与“三传理论”	1
三、四个基本概念	2
四、单位制	3
练习题	3
第一章 流体流动	4
第一节 流体静力学	4
一、流体的主要物理量	4
二、流体静力学方程式及其应用	8
第二节 流体动力学	11
一、流体流动的相关概念	11
二、流体动力学方程式及其应用	12
第三节 流体阻力	17
一、流体流动现象	17
二、流体阻力	21
第四节 管路计算	27
一、管路分类	27
二、管路计算	27
第五节 流量的测量	29
一、测速管	29
二、孔板流量计	30
三、文丘里流量计	31
四、转子流量计	31
练习题	31
第二章 流体输送机械	34
第一节 液体输送机械	34
一、离心泵	34
二、其他类型泵	44
第二节 气体输送与压缩机械	46
一、风机	46
二、压缩机	48
三、真空泵	50
练习题	52
第三章 非均相混合物的分离	53

第一节 筛分	53
一、粉碎	53
二、筛分	54
第二节 重力沉降	56
一、重力沉降理论	56
二、颗粒与流体的分离	58
第三节 过滤	60
一、过滤的基本理论	60
二、过滤设备	67
第四节 离心分离	69
一、离心分离原理	69
二、离心机的分类及应用	69
练习题	71
第四章 混合乳化	73
第一节 混合	73
一、混合的基本理论	73
二、混合操作在食品生产中的应用	74
三、混合操作及设备	74
第二节 乳化	75
一、乳化的基本理论	75
二、乳化液的类型和稳定性	75
三、乳化剂的作用	76
四、乳化液的制备及乳化设备	76
练习题	78
第五章 传热	79
第一节 概述	79
一、传热在食品工业中的应用	79
二、传热的基本理论	79
三、传热的基本概念	80
第二节 热传导	81
一、热传导的基本定律	81
二、热导率	81
三、平壁的热传导	82
四、圆筒壁的热传导	83
第三节 对流传热	85
一、对流传热方程	85
二、对流传热系数及其影响因素	85
第四节 传热过程计算	89
一、热量衡算	90
二、传热速率方程	90

第五节 传热的强化	95
第六节 换热器	95
一、管式换热器	96
二、板式换热器	98
三、夹套式换热器	100
第七节 热辐射	101
一、辐射的基本概念	101
二、热辐射的基本定律	102
三、两物体间的辐射传热	103
四、辐射加热的方法	103
练习题	105
第六章 物料浓缩	106
第一节 食品浓缩的分类和目的	106
第二节 蒸发	107
一、蒸发的基本概念	107
二、单效蒸发	109
三、多效蒸发	112
四、蒸发设备	114
第三节 冷冻浓缩	121
一、冷冻浓缩的理论	121
二、冷冻浓缩中的结晶过程	121
三、冷冻浓缩的装置	123
第四节 膜分离	123
一、膜分离的分类与特点	124
二、分离膜	125
三、膜分离器	127
四、几种常用的膜分离技术	129
练习题	132
第七章 干燥	133
第一节 干燥基本原理	133
一、干燥的目的和方法	133
二、湿空气及湿物料的状态分析	134
三、干燥动力学	141
第二节 干燥过程的计算	144
一、干燥过程的物料衡算	144
二、热量衡算	146
第三节 干燥设备	148
一、干燥设备的结构和特点	148
二、干燥设备在食品生产中的应用	149
练习题	150

第八章 蒸馏	152
第一节 概述	152
第二节 蒸馏理论	152
一、双组分理想溶液的汽液相平衡	152
二、双组分非理想溶液汽液相平衡	156
第三节 蒸馏方法	156
一、单级蒸馏	156
二、多级蒸馏	157
第四节 板式塔中双组分精馏的计算	158
一、精馏塔的物料衡算	159
二、进料状况和加料方程	161
三、精馏操作塔板数的求法	163
四、回流比的影响和选择	165
第五节 精馏装置	168
一、板式塔的结构和性能	168
二、塔板上流体流动状况	169
三、塔板负荷性能	170
四、塔高和塔径	170
五、板式塔的应用	171
练习题	171
第九章 萃取	173
第一节 概述	173
一、萃取的基本概念	173
二、相平衡关系图	174
三、萃取剂的选择	179
第二节 萃取操作的流程和计算	181
一、单级萃取	181
二、多级错流萃取	182
三、多级逆流萃取	185
四、连续接触逆流萃取	188
第三节 萃取设备	189
一、混合-澄清槽	189
二、塔式萃取设备	190
三、几种工业上常用的萃取塔	190
练习题	192
附录	194
一、单位换算	194
二、干空气的物理性质 ($p=101.3\text{kPa}$)	195
三、水的物理性质	196

四、饱和水蒸气表	196
五、液体黏度和 293K 时的密度	199
六、液体比热容	200
七、水、煤气管（有缝钢管）规格	201
八、离心泵规格	201
九、4-72-11 型离心通风机性能表	203
十、苯-甲苯溶液在绝对压力为 101.3kPa 下的汽液平衡数据	204
十一、乙醇-水溶液在绝对压力为 101.3kPa 下的汽液平衡数据	204
主要参考文献	205

绪 论

[学习目标]

1. 了解本课程的性质、内容、任务及其在食品生产中的应用。
2. 掌握三传理论、单元操作、物料衡算及热量衡算等基本概念，为学习全书奠定基础。

一、课程的性质与任务

食品工程原理是食品工程专业一门重要专业基础课，主要研究食品生产中传递过程与单元操作的基本原理、内在规律，常用设备及过程的计算方法。通过本课程的学习，使学生掌握传递过程及各个单元操作的基本理论，熟悉各单元操作所用设备的工作原理、性能以及选择方法等，并能运用所学理论知识解决食品生产中的工程实际问题。

二、单元操作与“三传理论”

随着食品工业的不断发展，食品的种类与日俱增，食品生产过程千差万别。不论产品种类如何，食品的生产都包括两个过程，即物理加工过程与化学加工过程，其中化学过程是以化学反应为主的决定产品种类的过程，化学反应不同，反应机理也不同，所得的产品也不同。而物理过程是一种物理操作，它是改变物料的状态或其物理性质，并不进行化学反应。通常将这种操作称为单元操作，不同种类的食品其加工过程差别很大，但它们都是由若干个单元操作按食品生产加工工艺过程串联而成的，即某一单元操作用在不同的食品生产中，其基本原理相同，所用设备也是通用或相似的。如酒类生产和乳品生产都需要将液体从一处送至另一处，而且在输送各种液体的过程中，都遵循流体力学规律，都用泵进行输送，因此液体输送就是典型的单元操作。食品工程原理主要阐述食品生产中广泛应用的单元操作及所用设备的基本理论知识。

1. 单元操作分类

食品生产中各单元操作按其所遵循的规律，分为以下三类。

(1) 流体流动过程

遵循流体力学原理，如流体输送、搅拌、沉降、过滤、离心分离等。

(2) 传热过程

遵循热量传递原理，如传热、蒸发等。

(3) 传质过程

遵循质量传递原理，如吸收、蒸馏、干燥、萃取、膜分离等。

2. 三传理论

上述三个过程包含了三种理论，通常称之为“三传理论”，即动量传递，热量传递和质量传递理论。

(1) 动量传递

因流体流动而引起的发生在流体内部动量的传递过程。流体流动的过程也称为动量传递过程。

(2) 热量传递

因存在温差而导致热量由一处传到另一处的过程。传热过程也称为热量传递过程。

(3) 质量传递

因传质推动力，而导致的物质传递过程。传质过程也称为质量传递过程。

“三传理论”是单元操作的理论基础，单元操作是“三传理论”在实践中的具体应用。许多单元操作都会包含两种以上传递过程，如真空浓缩操作包含质量传递、热量传递和动量传递；蒸馏操作包含质量传递和热量传递等。本教材将依次介绍动量传递、热量传递和质量传递基本理论，介绍与“三传理论”相关的各单元操作原理以及工艺计算等。

三、四个基本概念

在讨论各单元操作时，常用到下列四个基本概念。

1. 物料衡算

物料衡算的理论基础是质量守恒定律。即流入某一系统的物料总质量必等于从该系统流出的物料质量与积存于该系统中的物料质量之和，即

$$\text{输入质量} = \text{输出质量} + \text{积存质量}$$

如过程进行中系统内物料无积存，此过程即为稳定过程，此时

$$\text{输入质量} = \text{输出质量}$$

2. 能量衡算

能量衡算的理论基础是能量守恒定律。与物料衡算相似，能量衡算为进入系统的总能量等于系统流出的能量与系统内积存的能量之和，即

$$\text{输入能量} = \text{输出能量} + \text{积存能量}$$

对于稳定过程，此时

$$\text{输入能量} = \text{输出能量}$$

能量的表现形式有多种，但食品生产中各单元操作所涉及的能量衡算主要是热量衡算，当只有热量变化时，能量衡算就变成了热量衡算，对于热量衡算同样也满足输入热量等于输出热量的关系。

物料衡算与能量衡算首先要选定衡算范围，即由框图圈定范围，再确定计算基准，找出各量进行计算，具体计算过程及方法将在以后各章中加以分析和讨论。

3. 平衡关系

一定条件下，物系所发生的变化总是向着一定的方向进行，直至达到一定的极限程度，除非影响物系的条件有变化，否则其变化的极限是不会改变的，把这种变化关系称为物系平衡关系。如两物体间的热量传递总是向着由高温到低温的方向进行，直至进行到两物体的温

度相等。物系平衡关系可用来推断过程能否进行以及能进行到何种程度。

4. 过程速率

任何物系，只要不是处于平衡状态，就必然发生向平衡状态变化的过程，其转变的快慢可用过程速率来表示。过程速率的大小与过程推动力成正比，与过程阻力成反比。如冷热两物体间的传热速率与传热推动力（即温差）成正比，与传热阻力（即热阻）成反比。

四、单位制

在生产及生活中，表征一个物理量的大小除要求要列出数字外，它要列出与之相应的计算单位。如某桶水的质量是 5kg，其中“kg”即为质量的单位。过去中国多采用的单位制为 MKS 制，cgs 制和工程单位制，1960 年国际度量衡会议制订了一种新的单位制，称为国际单位制，简称国际制，符号为“SI”。国际制通用于所有科学部门，而且国际制的任何一个导出单位都可以由基本单位相乘或相除直接得出，即二者之间的换算比例系数都是 1。国际制的基本单位共有 7 个，分别是：长度单位 m（米）、质量单位 kg（千克）、时间单位 s（秒）、温度单位 K（开尔文）、物质的量的单位 mol（摩尔）、电流的单位 A（安培）和物体发光强度单位 cd（坎德拉），其中前 5 个单位常用。国际制的导出单位有很多个，其中常用的有压力的单位 Pa（帕斯卡）、力的单位 N（牛顿）、体积的单位 m^3 （立方米）能量、热量、功的单位 J（焦耳）以及功率的单位 W（瓦特）等。本教材所采用的单位主要是 SI 制，但由于某些工程技术领域或有关手册中仍采用 MKS 制、cgs 制和工程单位制，因此，掌握单位间的换算关系，并能进行正确换算，是进行工程计算的关键。本教材附录中已列出了部分常用单位的换算关系可供参考。

练习 题

1. 将下列物理量换算成 SI 单位

(1) $5\text{L}/\text{min}=(\quad)\text{m}^3/\text{s}$; $15\text{m}^3/\text{h}=(\quad)\text{m}^3/\text{s}$;

(2) $2\text{atm}=(\quad)\text{Pa}$; $2\text{kgf}/\text{cm}^2=(\quad)\text{Pa}$; $760\text{mmHg}=(\quad)\text{Pa}$;

(3) $2\text{kgf}=(\quad)\text{N}$;

(4) $5\text{kcal}/\text{h}=(\quad)\text{W}$; $3\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{s}=(\quad)\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}=(\quad)\text{J}/\text{s}=(\quad)\text{W}$;

(5) 摩尔气体常数 $R=82.06(\text{atm}\cdot\text{cm}^3)/(\text{mol}\cdot\text{K})=(\quad)\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

2. 某厂将比热容为 $3.85\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 的果汁以 $500\text{kg}/\text{h}$ 的流量通入冷却器，使其由 92°C 降至 22°C ，冷却器内冷却水的温度由 20°C 升至 40°C ，求冷却水的流量（热量损失忽略不计）。

第一章 流体流动

[学习目标]

1. 能熟练地掌握流体流动过程中的基本概念、基本规律，并能用这些基本知识解决生产中有关流体流动的基本问题。
2. 了解复杂管路的计算、管路的布置及安装知识。

流体是指具有流动性的物体，包括液体和气体。食品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、产品常需要通过泵把流体从一个设备输送到另一个设备或从一个车间输送到另一个车间，即形成流体流动；流体流动是由其内部质点的运动体现的，流体内部无数质点运动的总和，就是流体流动。乳品、啤酒、果汁等的生产过程均与流体流动密不可分，因此流体流动的基本知识，是今后学习其他课程的重要基础。

本章主要讲述流体静力学、流体动力学基本原理，并进行流体流动中的相关计算。

第一节 流体静力学

流体静力学是研究流体处于相对静止状态下的平衡规律，在讨论此规律以前，先对与此有关的物理量加以说明。

一、流体的主要物理量

1. 密度、相对密度、重度、比体积

(1) 密度

① 定义。单位体积流体的质量，称为流体的密度，以 ρ 表示，若以 m 代表体积为 V 的流体的质量，则

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

② 与流体密度有关的因素。任何流体的密度，都随它的温度和压力而变化，但压力对液体的密度影响很小，可忽略不计，故常称液体为不可压缩的流体，温度对液体的密度有一定的影响，如纯水的密度在 277K 时为 1000kg/m^3 而在 293K 时则为 998.2kg/m^3 。因此，在选用液体密度数据时，要注意测定该数值所对应的温度。

气体具有可压缩性及热膨胀性，其密度随压力和温度的不同有较大的变化，因此气体的密度必须标明其状态（温度、压力），当查不到某一温度和压力条件下的气体密度数值时，在一般的温度和压力下，气体密度可近似的用理想气体状态式计算，即

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

式中 p ——气体的绝对压力, Pa 或 N/m^2 ;

T ——气体的热力学温度, K;

M ——气体的摩尔质量, kg/mol ;

R ——摩尔气体常数, $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

③ 流体的密度计算。流体的密度一般可在有关手册中查得, 常见气体和液体的密度数值见附录。

a. 液体密度的计算。纯组分液体密度的计算如下式

$$\rho = \frac{m}{V}$$

液体混合物密度的计算。液体混合物的组成常以质量分数表示, 要计算其密度, 可取 1kg 混合液体为基准, 设各组分在混合前后其体积不变, 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

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_{X1}}{\rho_1} + \frac{w_{X2}}{\rho_2} + \dots + \frac{w_{Xn}}{\rho_n} \quad (1-3)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各纯组分液体在混合液温度下的密度, kg/m^3 ;

$w_{X1}, w_{X2}, \dots, w_{Xn}$ ——液体混合物中各组分液体的质量分数。

b. 气体密度的计算。纯组分气体密度的计算如下式

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}$$

气体混合物密度的计算。气体混合物的组成常以体积分数表示, 其密度的计算方法如下: 以 1m^3 混合气体为基准, 设各组分在混合前后的质量不变, 则 1m^3 混合气体的质量等于各组分的质量之和, 即

$$\rho_m = \rho_1 \varphi_{X1} + \rho_2 \varphi_{X2} + \dots + \rho_n \varphi_{Xn} \quad (1-4)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——气体混合物中各纯组分气体的密度, kg/m^3 ;

$\varphi_{X1}, \varphi_{X2}, \dots, \varphi_{Xn}$ ——气体混合物中各组分气体的体积分数。

或

$$\rho_m = \frac{pM_{\text{均}}}{RT} \quad (1-5)$$

式中 $M_{\text{均}} = M_1 \varphi_{X1} + M_2 \varphi_{X2} + \dots + M_n \varphi_{Xn}$;

M_1, M_2, \dots, M_n ——气体混合物中各纯组分气体的摩尔质量, kg/mol 。

c. 液体密度的测定方法。工业上测定液体密度最简单的方法是用密度计, 但此时测得的数值为相对密度。

(2) 相对密度、重度

流体密度与 277K 时水的密度之比, 称相对密度, 用符号 d_{277}^T 表示, 习惯称为相对密度, 相对密度是没有单位的。

即

$$d_{277}^T = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-6)$$

重度 (γ) 是单位体积流体的重力, 其单位是 N/m^3 , 工程单位表示的重度与国际单位表示的密度在数值上相等, 但二者意义完全不同。密度与重度的关系, 犹如质量与重量的关系, 即

$$\gamma = \rho g \quad (1-7)$$

(3) 比体积 (v)

密度的倒数称为比体积，其单位为 m^3/kg 。即

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-8)$$

【例 1-1】 已知空气的组成为 21% 的 O_2 和 79% 的 N_2 (均为体积分数)，试求在 $100\text{kN}/\text{m}^2$ 和 400K 时空气的密度。

解 空气为混合气体，先求 $M_{\text{均}}$ 。

$$M_{\text{均}} = M_1 \varphi_{X1} + M_2 \varphi_{X2}$$

$$M_1 = M_{\text{O}_2} = 32\text{kg}/\text{kmol}$$

$$\varphi_{X1} = 0.21$$

$$M_2 = M_{\text{N}_2} = 28\text{kg}/\text{kmol}$$

$$\varphi_{X2} = 0.79$$

所以 $M_{\text{均}} = 0.21 \times 32 + 0.79 \times 28 = 28.8\text{kg}/\text{kmol}$

再由式 $\rho_m = \frac{pM_{\text{均}}}{RT}$ 计算

已知 $p = 100\text{kN}/\text{m}^2$; $T = 400\text{K}$; $R = 8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

所以 $\rho = \frac{100 \times 28.8}{8.314 \times 400} = 0.87\text{kg}/\text{m}^3$

【例 1-2】 已知乙醇水溶液中，按质量分数计，乙醇的含量为 95%，水分为 5%。求此乙醇水溶液在 293K 时的密度近似值。

解 由式 (1-3) $\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_{X1}}{\rho_1} + \frac{w_{X2}}{\rho_2} + \dots + \frac{w_{Xn}}{\rho_n}$ 得

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_{X1}}{\rho_1} + \frac{w_{X2}}{\rho_2}$$

令乙醇为第 1 组分，水为第 2 组分。已知

$$w_{X1} = 0.95$$

$$w_{X2} = 0.05$$

查附录，在 293K 时

$$\rho_1 = 789\text{kg}/\text{m}^3$$

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

将 w_X 、 ρ 值代入上式得

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_{X1}}{\rho_1} + \frac{w_{X2}}{\rho_2} = \frac{0.95}{789} + \frac{0.05}{998} = 0.001204 + 0.00005 = 0.001254$$

所以 $\rho = 1/0.001254 = 797\text{kg}/\text{m}^3$

查附录，95%乙醇在 293K 的密度为 $804\text{kg}/\text{m}^3$ ，上面的近似值的误差为 $(804 - 797)/804 = 0.9\%$ 。

2. 压力

流体的压力是流体垂直作用于单位面积上的力，严格地说应称为压强（压力强度），但习惯上称为压力。压力的 SI 单位为 N/m^2 即 Pa，其他常见压力单位及单位间的换算关系见附录。

测量流体压力用的仪表为压力表或真空表，也就是说压力是由压力表或真空表显示出来的，根据各表所显示数据性质的不同，压力有以下三种表示方法。