

计量职工中专试用教材

密度计量

李兴华 潘惠彬 编

中国计量出版社

出版前言

国家技术监督局是国务院统一管理和组织协调全国技术监督工作的职能部门。负责管理全国标准化、计量、质量监督工作,并对质量管理进行宏观指导。

随着技术监督事业的迅速发展,当前迫切需要大量的各级、各类计量专门人才。举办各种形式的计量中等教育,对于提高在职计量人员的素质、改善计量队伍的结构,培养一批计量队伍的新生力量,都具有重要意义,并将对计量事业的发展产生深远影响。

近几年来,由于一批计量职工中专学校的创办,各种形式的计量中等教育如委托或联合办计量中专班、计量函授中专、计量职业高中、计量中专的专业证书培训等,也在各地陆续开展起来,但是缺少教材已成为计量中等教育迫切需要解决的重大问题。因此我们根据国家技术监督局决定,组织编写了一套计量职工中专教材,其中包括:几何量、热工、力学、电磁学计量四个专业的部分专业基础课和专业课试用教材,争取在1988至1990年内出版齐。

本书是委托四川省标准计量职工中等专业学校组织编写的力学计量专业的专业课教材。

计量事业教育基础十分薄弱。组织编写行业性教材还是第一次,基本条件和经验都不足。因此,这套教材的编写工作是在时间紧、难度大的情况下进行的,虽然经过多方面努力,但仍存在很多不足之处,甚至于错误。我们拟在试用过程中听取各方面意见,于适当时机再次组织修改。

另外,这套教材主要是根据三年制全脱产的计量职工中等专业教育的需要编写的。在目前情况下,要对各种形式的计量中等教育都编出相应的教材难以做到。因此,在编写过程中,也一定程度地考虑了适用的多样性。其他形式的计量中等教育可参考本套教材的基本内容,适当调整使用。

在教材的编写、审议过程中,得到了中国计量出版社、中国计量科学研究院、中国测试技术研究院、中国计量学院、中国计量测试学会,河北、四川、山东、吉林省标准计量局及有关的高等院校、省市计量部门、科研单位、大中型企业的大力支持,在此,谨表示衷心感谢!

国家技术监督局宣传教育司

1988.8

编 者 的 话

本教材是根据原国家计量局教育处制定的中专教材编写要求，按照“密度计量”教学大纲编写的。

密度是表征物质特性的一个重要物理量。密度计量涉及到石油、化工、冶金、建材、轻工、煤炭、交通、医疗、贸易、国防建设及科学研究等领域，应用十分广泛。它不仅关系到半成品、产品质量控制、检测以及生产过程管理，而且还关系到科学研究及国内外贸易的促进与发展。

密度计量教材全书共十一章。第一章系统地阐明了密度、浓度基本概念、单位和定义以及密度表示法。第二章至第四章讲述了用于测定液体、固体密度必须掌握的基本方法，并在第四章着重讲解了浮计种类、浮计设计原理、在液体中的平衡方程式、影响因素以及浮计检定方面的有关知识与技能。为加强理解还给出了必要的例题。第五章主要介绍作为密度计量基础的密度标准参考物质——水和汞的基本知识及其作用。第六章至第七章着重概述了在国民经济中占重要地位的常用的酒精溶液、石油及其石油产品（包括液化石油气）密度测量方法及其与国际标准有关的国家标准内容与应用。第八章主要讲述了国家液体密度标准及以浮计为系列的量值传递体系。第九章为对物质三态密度计量基本知识有所全面系统了解，并考虑到以往测定气体密度方面缺乏资料，故专门讲述了常用的几种测量方法，并对重要的空气密度测量有关知识作了介绍。第十章针对近代在线连续自动测量密度的实际需求，介绍了用于工业生产流程的几种常用密度计，重点讲解了仪器工作原理、结构、技术特性及应用。第十一章从四个方面概述了密度计量国内外正在发展的问题，向读者揭示了具有浓厚兴趣的新方法、新技术及其发展趋势。

由于密度计量涉及面广，内容较丰富，为使教材内容完整、系统而且有一定的深度和广度，编者致力于将教材写的全面并力求作到通俗易懂、深入浅出、内容新颖、先进和实用性强。但又考虑到作为教材会受制于学时，在保证教学质量的前提下，讲授时可针对实际情况允许有一定的灵活性，书中有些章节教学中可以不讲授其内容，而由专业人员视实际需要参考。

本教材还可作为计量部门培训专业人员用书，并可供具有中等以上文化程度的计量测试人员、工程技术人员和科技工作者学习参考。亦可供中专以上院校师生参考。

本书由北京有色金属研究院高级工程师程传箴主审。中国计量科学研究院高级工程师李兴华主编。

由于编者经验不足和水平有限，缺点和错误在所难免，希望广大读者批评指正。

1988年7月

目 录

绪论	(1)
第一章 基本概念	(3)
第一节 密度定义及单位	(3)
一、密度	(3)
二、表观密度	(4)
三、实际密度	(5)
四、堆积密度	(5)
五、标准密度	(5)
六、参考密度	(5)
七、相对密度	(5)
八、比体积	(6)
第二节 浓度定义及单位	(6)
一、物质 B 的质量分数	(7)
二、物质 B 的体积分数	(7)
三、质量分数与体积分数之间的关系	(7)
第三节 密度与温度、压力的函数关系	(8)
一、密度与温度的函数关系	(8)
二、密度与压力的函数关系	(10)
第四节 密度单位的换算	(11)
练习题	(13)
本章小结	(15)
第二章 流体静力称量法	(17)
第一节 阿基米德定律	(17)
第二节 密度测量原理及方法	(18)
一、液体密度的测量	(19)
二、固体密度的测量	(20)
第三节 测量装置及有关仪器设备	(21)
第四节 韦氏静力天平	(23)
练习题	(25)
本章小结	(27)
第三章 密度瓶测量法	(28)
第一节 密度瓶形式结构	(28)
第二节 液体密度的测量	(31)

第三节 固体密度的测量	(34)
第四节 测量装置及有关仪器设备	(36)
练习题	(37)
本章小结	(38)
第四章 浮计测定法	(39)
第一节 浮计构造及其工作原理	(39)
第二节 浮计种类及其特性	(40)
一、密度计	(40)
二、浓度计	(41)
三、假定刻度浮计	(42)
第三节 浮计设计与浮计各参数之间的关系	(45)
第四节 浮计在液体中的平衡方程式	(47)
第五节 浮计刻度的理论计算基础	(48)
第六节 液体表面张力	(51)
第七节 液体弯月面和毛细常数	(52)
第八节 弯月面对浮计示值的影响	(55)
第九节 液体标准温度和浮计标准温度	(57)
第十节 温度对浮计示值的影响	(58)
第十一节 浮计使用和检定	(60)
一、浮计的使用	(60)
二、浮计的检定	(60)
练习题	(73)
本章小结	(76)
第五章 密度标准参考物质	(78)
第一节 水密度	(78)
一、纯水密度及热膨胀的测量	(78)
二、水的同位素组成及其对密度的影响	(79)
三、溶解空气对水密度的影响	(79)
四、压强对水密度的影响	(80)
第二节 水银密度	(80)
一、水银密度测量方法	(80)
二、水银密度表	(82)
练习题	(82)
本章小结	(83)
第六章 酒精水溶液密度	(84)
第一节 酒精密度测量发展史	(84)
第二节 关于 OIML 国际建议	(84)
一、OIML 国际建议 No. 22 “酒精浓度的测定”	(85)
二、OIML 国际建议 No. 44 “酒精计和酒精密度计”	(85)
第三节 关于国际酒精表	(86)
练习题	(88)

本章小结	(89)
第七章 石油及石油产品的密度	(90)
第一节 术语及定义	(90)
第二节 石油密度的测定	(91)
一、石油产品密度测定法 (密度瓶法)	(91)
二、石油和液体石油产品密度测定法 (密度计法)	(92)
第三节 关于石油密度温度系数	(94)
第四节 石油数量计量与换算	(94)
第五节 液化石油气密度测量	(97)
一、液化石油气密度测量方法	(97)
二、液化石油气密度标准试验方法	(98)
练习题	(100)
本章小结	(100)
第八章 密度标准及其量值传递	(102)
第一节 液体密度标准及其量值传递	(102)
一、复现密度单位方法及其装置	(102)
二、基准密度计组和副基准酒精计组	(103)
三、标准浮计组	(104)
四、密度单位量值传递与检定系统	(104)
第二节 固体密度标准及其量值传递	(106)
一、研究建立固体密度标准方法	(106)
二、密度量值传递方法	(107)
练习题	(110)
本章小结	(110)
第九章 气体密度测量	(111)
第一节 气态方程计算法	(111)
第二节 浮力法	(112)
第三节 密度瓶法	(112)
第四节 空气密度及其测量	(113)
一、国际上用以确定湿空气密度的通用公式	(114)
二、用双浮子法直接测定空气密度	(116)
第五节 用流出法测量气体密度	(116)
一、气体流出法基本原理	(116)
二、仪器形式及其结构	(117)
三、密度计算与测量误差估计	(118)
练习题	(118)
本章小结	(118)
第十章 工业用密度计	(120)
第一节 浮子式密度计	(120)
一、漂浮浮子式密度计	(120)
二、全浸浮子式密度计	(123)

第二节 液体静压式密度计	(124)
第三节 放射性密度计	(128)
第四节 声学密度计	(131)
第五节 振动式密度计	(134)
一、密度计基本原理	(134)
二、密度计类型与结构	(136)
三、密度计的校准	(140)
四、密度计的应用	(144)
练习题	(145)
本章小结	(145)
第十一章 密度计量发展方向	(147)
一、密度标准参考物质的精密测量	(147)
二、密度基准、标准的研究	(147)
三、提高密度计量强制管理的水平	(148)
四、密度自动检测方法及其仪器的研究	(149)
练习题	(149)
附录	(150)
附录 1 不含空气, 0~40℃和 101 325 Pa 下纯水密度表	(150)
附录 2 0—50℃和 101 325 Pa 下纯汞密度表	(152)
附录 3 15—27℃和 (60 000—110 000 Pa) 干空气密度表	(154)
附录 4 在 20℃时酒精水溶液体积百分数与密度换算表	(155)
附录 5 在 20℃时酒精水溶液质量百分数与密度换算表	(156)
附录 6 酒精水溶液体积百分数与质量百分数换算表	(157)
附录 7 酒精水溶液质量百分数与体积百分数换算表	(158)
附录 8 在 20℃时糖溶液质量百分数与密度换算表	(159)
附录 9 在 20℃时波美度与密度换算表	(160)
附录 10 液体毛细常数表	(161)
书中缩略语索引	(167)
主要参考文献	(168)

绪 论

密度是表征物质特性的一个重要物理量。

密度测量涉及到石油、化工、冶金、建材、轻工、煤炭、医疗、贸易、国防建设以及科学研究等领域，应用十分广泛。它不仅关系到半成品和产品数量与质量的控制、检测及生产过程的管理，而且关系到科学技术、国际贸易的促进与发展。因此不论从经济或技术观点来看，准确地计量都是必不可少的。

在石油工业中，对原油和石油产品的数量计量，通常均是通过测量它的密度和体积计算出来的，这将对原油及其石油产品的计算、储运以及贸易起着重要的作用。特别在原油管线计量方面，通过测量密度计算质量流量是在线计量的重要方法。在国内各大原油产地和输油管道基地也正在逐步采用这种方法。同样，在石油炼制中，在很多场合，例如蒸发，吸收和蒸馏操作上以及最终产品的质量监视与检测，密度也是重要的参数。另外，在石油钻井水泥浆的配制上，测量其密度也是重要手段。

在化学工业中，应用也很广泛。例如，在结晶和溶解过程中，用密度计测量各种溶液的密度来确定浓度（在某些情况下，测量密度是确定溶液浓度最为直接的方法），可以有利地控制结晶生长速度和溶解速度；密度计还可以用在酸、碱溶液稀释过程中，使其稀释成一定浓度的酸、碱液。同时，密度还是各种化学试剂的一项重要指标，它的准确与否将直接关系到化工产品的质量。

在建材工业中，常利用密度法监控各种玻璃的生产。对建筑材料，如砖、瓦、陶瓷等材料也需测量密度，以确定其表观密度和孔隙率等。

在酿造工业中，酒精和各种饮用酒是用酒精浓度或密度来表示的。为生产质量合格的酒精和酒，必须严格控制与检测其浓度或密度，并根据用途，制造出不同浓度的酒精和酒，它不仅与人民生活、医疗质量密切相关，而且与国家税收也有着密切的关系。

在食品工业中，制造奶和奶制品以及制糖的过程都需要确定其浓度，以保证生产质量。

在原子能工业中，在重水浓缩车间，采用带有温度补偿的高精度密度计，可以更好地控制产品的纯度。

在冶金工业中，对钢铁业、矿业上铁矿石浆、精矿的泥浆、水泥浆、泥浆等也需测定其密度或浓度。还有，有些场合，还需随时确定金属成品（如合金钢、特种钢、稀有金属、有色金属和贵金属）的密度，以鉴别产品质量（金属内含气孔量、金属纯度）的优劣。

在农业生产上，做到科学种田、农药配制和粪液浓度是否适当等都要测量密度，在农林和一些建筑、公路部门对土壤也要测定其密度，以确定土壤的粒度。

测量对象为气体的场合，密度计被利用于测量气体分子量，城市气体和液化石油气的热量、组分等。在氨制造工程的氢气和硫酸制造业中二氧化硫成分的测定也被应用。另外，

测量气体密度，对于锅炉、燃烧炉的燃烧质量也有直接的关系。

在制革、制盐和造纸工业中，也需分别测定丹宁酸、卤液和纸浆的浓度或密度。

在进出口商品检验项目中，检验密度数据也是个重要的技术指标，以此判定商品是否符合要求。

在国防建设中，密度测量也有多方面的应用。例如，作为喷气飞机燃料的航空煤油就需要测定其密度。在军事和航道测量中，测量海水密度也是研究大洋环流、水声学、海洋资源的重要参数。还有，在地矿部门中，对铀矿及其铀锭的密度测定在研究与生产中，也是非常重要的数据。

从上可见，密度测量不但重要而且用途很广。可以说，在国民经济中，几乎涉及到每一个部门。可以预料，今后随着国民经济的发展和科学技术的进步，一定会对密度测量提出更高的要求。

第一章 基本概念

第一节 密度定义及单位

密度是表征物质特性的一个重要物理量。

在日常生活中，我们会看到，木块、冰块会浮在水上，而铁块、石块会沉到水下。然而，若将铁块、石块放入水银中，水滴在油上，它们就会分别漂浮在水银面和水面上。如果取同一质量或同一体积的这些物质（水、铁、水银……）来分析，我们还可以发现，它们的体积或质量是不相同的。究其原因，是因为这些物质有着不同密度的缘故。众所周知，自然界是由物质组成的，每种物质都以其各自的密度而存在。例如，人类赖以生存的环境中，空气的平均密度在 101 325 Pa（一个标准大气压）和 20℃ 下约为 1.20 kg/m^3 ；大量蕴藏于地球上各种金属中的铀比铂的密度还要大，约为 $22.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ；大陆地表的水在 4℃ 时的密度约为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，而人类的摇篮——地球的平均密度为 $5.52 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，大约是水的 5.5 倍。假如我们将视野扩展到整个宇宙，则宇宙的物质密度更是千差万别。在太阳系中，太阳的平均密度为 $1.41 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，仅仅是地球密度的四分之一。密度最小的要算是九大行星中的土星了，其平均密度仅有 $0.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，而地球的卫星——月球的平均密度为 $3.34 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。由此可见，密度是物质的一种内在特性，每种物质都有一定的密度值，物质不同，密度也就不同。而且在一定的条件（温度、压力）下，一种物质的密度是不变的，它与该物质组成的物体的形状、光泽、质量与体积大小等无关。

为表述物质的这种内在特性，下面给出密度及与密度有关的密度量的定义、单位及其符号。

一、密 度

一般来说，一个量分布在空间和线上时，各微小部分所包含的质量对其长度、面积和体积之比，统称为密度。而相应称为线密度、面密度和体密度。而体密度通常就简称为密度。但若要表示线密度与面密度，就要分别予以明确。本教材所述的密度是指体密度。

单位体积的某种物质的质量，叫做这种物质的“密度”。就是说它为物质质量 m 与其体积 V 之比。其定义公式为

$$\rho = m/V \quad (1.1)$$

根据定义，密度在国际单位制（SI）中，实际上是由基本量质量 m 和长度 L 导出的一个 SI 导出量，用符号“ ρ ”表示。其基本导出单位为千克（公斤）每立方米（ kg/m^3 ），也是

我国法定计量单位。其量纲为 mL^{-3} ，这里的 m 、 L 分别为质量和长度的量纲。为使用方便，也可选用它的十进分数和十进倍数单位，例如，兆克每立方米 (Mg/m^3)、克每立方米 (g/m^3)、千克每立方分米 (kg/dm^3) 和克每立方厘米 (g/cm^3) 等。其中，十进倍数单位 g/cm^3 常用，它等于 kg/m^3 的 1000 倍。例如，20℃ 的汞密度是 $13.54587 g/cm^3$ ，也就是 $13545.87 kg/m^3$ 。

为利于单位的统一和加深理解，现向读者说明一下过去所用的几种密度单位。

过去在力学中，由于存在几种单位制，所以相应的密度单位也就很多，如 MKS (米-千克-秒) 制 (又称实用单位制) 的 kg/m^3 ，CGS (厘米-克-秒) 制 (又称物理单位制) 的 g/cm^3 ，MTS (米-吨-秒) 制的吨每立方米 (t/m^3) 等。它们都是建立在米制基础上的单位。其中， kg/m^3 正好与 SI 单位一致，而 g/cm^3 是 SI 单位的十进倍数单位。另一个， t/m^3 是得到国际计量大会 (CGPM) 承认，被国际标准 ISO 31/3 《力学量和单位》和国家标准 GB 3102.3 《力学的量和单位》列为可与 SI 并用的非 SI 单位 (也是我国的法定计量单位)，故在应用上都不会产生什么问题。问题是还存在一种不是基于十进制的工程密度单位 $kgf \cdot s^2/m^4$ (工程质量每立方米)，它等于 $9.80665 kg/m^3$ 。它是由 MKGFS (米-千克力-秒) 制 (又称工程单位制或重力单位制) 中的工程质量和米导出的。这种单位制是自 19 世纪以来在工程技术上被广泛采用的，对我国有着较大的影响。但这种单位已被国际计量委员会 (CIPM) 列为避免使用的单位，国际标准化组织 (ISO) 也宣布禁止使用。目前，我国也规定不再使用。还有，除上述物理学界普遍采用的米制绝对单位外，还存在一种英制绝对单位的密度单位，如 lb/ft^3 (磅每立方英尺)， $UK ton/yard^3$ (英吨每立方码) 等。这种单位种类繁多，极为混乱，对我国影响也很大，但是在我国早已不用了，而且国内外有关标准中也没有列入。

除此以外，还有一种以体积单位升 (L) 和毫升 (mL) 等为单位的密度单位，如千克每升 (kg/L) 克每毫升 (g/mL)，克每升 (g/L) 等等。目前，国标中规定它可与 SI 的密度单位并用 (也是我国法定计量单位)，但不是 SI 单位。然而，由于存在体积单位升定义的历史演变问题，在使用中要特别注意。早在 1901 年第三届 CGPM 对升定义为：“在标准大气压下，纯水密度 (4℃) 最大时，1 千克水所占的体积”。根据这个定义， $1L = 1.000028 dm^3$ ，或 $1 mL = 1.000028 cm^3$ ，与此相应的密度单位 $1 g/cm^3 = 1.000028 g/mL$ 。即 $1 g/cm^3 \neq 1 g/mL$ ，二者相差 2.8×10^{-5} 。后来，为防止它们之间关系发生混乱或被误解，在 1964 年第十二届 CGPM 上宣布升作为立方分米的专门名称，重新定义了升。这时， $1L = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3$ ，故相应的密度单位为 $1 g/cm^3 = 1 g/mL$ 。该大会还建议今后在高精度计量时不用升。鉴于上述情况，今后在测量密度和使用密度数据时要特别注意这一点，并建议最好不采用带体积单位升等的密度单位，而且应该积极采用 SI 的密度基本导出单位 kg/m^3 。

以上所述的是密度的基本概念。但是物质有均匀和非均匀的，有带孔隙也有不带孔隙的。实际上理想的均匀物质是不存在的，大量的非均匀的情况，仅在测定时视为均匀物质而已。这是本教材叙述的对象。对于带有孔隙的非均匀物质，应该知道体积是包含孔隙在内的，其密度概念见“表观密度”。

二、表观密度

从这节起将向读者逐一叙述适用于某些情况，且与密度基本概念有关的常用的几个密

度量如：表观密度、实际密度、堆积密度、标准密度、参考密度、相对密度及比体积等。

“表观密度”是指多孔固体（颗粒或粉末）材料质量与其表观体积（包括“孔隙”的体积）之比值。

“孔隙”包括材料间的孔隙和本身的开口孔、裂口或裂纹（浸渍时不能被液体填充），以及闭孔或空洞（浸渍时不能被液体填充）。

三、实际密度

“实际密度”是指多孔固体材料质量与其体积（不包括孔隙的体积）之比值。亦称真实密度。

四、堆积密度

“堆积密度”是指在特定条件下，在既定容积的容器内，疏松状（小块、颗粒、纤维）材料质量与其材料所占体积之比值。

定义中的特定条件是指，如自然堆积、振动或敲击或施加一定压力的堆积等。堆积密度随填充材料的密度而异。

五、标准密度

“标准密度”是指在规范规定的标准条件下的物质密度。例如，温度在 273.15 K (0℃)、压力 101 325 Pa 下的气体标准密度；温度 20℃、压力 101 325 Pa 下的液体标准密度。

六、参考密度

“参考密度”是指在规定的参考状态（温度和压力）下的物质密度。多在相对密度测定中作为密度参考物质*用。例如，参考物质纯水在 20℃ 时的参考密度；参考物质干空气在 0℃ 和 101 325 Pa 下的参考密度。一般来说，参考状态就是标准状态。亦可用在其他状态。

七、相对密度

为方便起见，在许多科研、生产部门中，常用“相对密度”单位来表示物质的特性。所谓相对密度是指在特定条件下，物质密度 ρ_1 与参考物质密度 ρ_2 之比值。其定义公式为

$$d = \rho_1 / \rho_2 \quad (1.2)$$

* 密度参考物质一般是指易获得、纯度高、性能稳定且密度已知的物质。最主要的是纯水，其次是纯汞等。

可见，它是一个与密度直接有关的密度量。它无单位，即是无量纲的量或量纲为 1^* 。

在密度计量工作中，参考物质对于液体和固体，通常均采用某一温度下的纯水；对于气体，通常则采用与干燥气体同温度、同压力的干燥空气。当然根据实际测定情况也可选用其他密度已知的物质。

从式(1.2)可知，若测量时，使参考物质的体积 V_2 与某种物质的体积 V_1 相同，则根据相对密度定义公式，式(1.2)就变为

$$d = \frac{m_1}{m_2} \times \frac{V_2}{V_1}$$

因为
所以

$$V_1 = V_2$$

$$d = m_1/m_2$$

显然，这时的相对密度也可看作某种物质的质量 m_1 ，与同体积的参考物质的质量 m_2 在特定条件下之比值。

关于相对密度这一概念，过去常叫做“比重”。实际上，不但比重一词不确切，而且严重存在概念混乱和单位不统一的问题。分析原来所用的比重概念，通常是指的某种物质的密度与纯水密度之比值，可见它已包含在上述的相对密度概念之中。近几年来，在ISO 31/3及GB 3102.3中均未列入“比重”一词。在1985年国际法制计量组织(OIML)国际建议草案“密度测量名词术语”法规文件里也未被列入。由国家计量局颁布的JJG 1009—87“容量与密度计量名词及术语”中的密度部分也没列入。总之，今后要废除“比重”，一律采用本节所述的相对密度代替它。

八、比 体 积

“比体积”是指物质体积 V 与其质量 m 之比值。它是密度 ρ 的倒数，即

$$v = V/m = 1/\rho \quad (1.3)$$

它的SI单位为立方米每千克(m^3/kg)。比体积过去常称为比容。

第二节 浓度定义及单位

由两种或多种成分组成的均匀单相体系，叫做“溶液”。这个定义可以适用于物质的任何聚集状态。通常所说的溶液是指液态溶液，它是最常见的一种。溶液均由溶质和溶剂组成。其中水是常用的溶剂，故水溶液亦常简称为溶液。如硫酸溶液、酒精溶液等。为表示溶液中溶质和溶剂的组成，通常用浓度一量来表示。表示浓度的方法很多，如质量分数、体积分数、物质的量浓度、质量浓度以及质量摩尔浓度等。本教材仅叙述质量分数和体积分数浓度。

*指所有量纲指数都等于零的量纲。

一、物质 B 的质量分数

溶液中所含溶质 B 的质量 m_B 与溶液质量 m 的比值，叫做物质 B 的质量分数。简称“质量分数”。其定义公式为

$$w_B = m_B/m \quad (1.4)$$

式中，溶液质量为溶质质量和溶剂质量之和。该量的名称与符号 w_B 是 GB 3102·8-86 所规定的，它是质量之比，通常常用百分数表示，即过去所说的“质量百分浓度”。国际上用符号 ρ 和 % (m/m) 或 % mass 表示(这些符号是国际有关标准引用的)。例如 $w_B = 0.650 = 65.0\%$ (m/m) = 65.0% mass。根据定义，如酒精溶液的质量分数 $w_B = 0.65$ ，就是指每 100 g 酒精溶液中含有纯酒精 65 g。同理若为糖溶液，就是指每 100 g 糖溶液中，含有纯糖 65 g。根据需要，有时也可用质量千分数‰ (m/m) 表示。当特定成分含量很微小时，也可用质量百万分数 ppm (m/m) 表示溶液的质量分数。

二、物质 B 的体积分数

在一定温度 $t^\circ\text{C}$ 下，溶液中所含溶质 B 的体积 V_B 与其同温度下溶液体积 V 的比值，叫做物质 B 的体积分数。简称“体积分数”。其定义公式为

$$\varphi_B = V_B/V \quad (1.5)$$

式中，溶液体积为溶质与溶剂混合后的体积。根据定义，如果是指酒精溶液的体积分数 $\varphi_B = 0.65$ ，就是指每 100 cm^3 酒精溶液中含有纯酒精 65 cm^3 。同理，若为糖溶液，就是指每 100 cm^3 糖溶液中含有纯糖 65 cm^3 。该量的名称与符号 φ_B 也是 GB 3102·8-86 所规定的，它是体积之比。通常常用百分数表示，即过去所说的“体积百分浓度”，国际上用符号 q 和 % (V/V) 或 % vol (这些符号是国际有关标准引用的)。例如 $\varphi_B = 0.650 = 65.0\%$ (V/V) = 65.0% vol。根据需要，有时也可用体积千分数‰ (V/V) 表示，当特定成分含量很微小时，也可用体积百万分数 ppm (V/V) 表示溶液的体积分数。

从上所述的溶液浓度概念可知，溶液浓度高，说明溶液中的溶质多。反之，溶液浓度低，则说明溶液中的溶质少。显然，溶液浓度是以在溶液中某物质含量多少来度量的。它是表征液体密度特性的另一种表示方法。

不论是溶液的质量分数还是体积分数都与它的密度有着一定的函数关系。有的还有现成的换算表，故测定溶液浓度问题归根结底仍属于密度测定范畴问题。

三、质量分数与体积分数之间的关系

在浓度计算时，常遇到质量分数与体积分数相互换算的问题，以下给出它们之间的关系。

设某种溶液在温度 $t^\circ\text{C}$ 时的质量分数为 w_B ，而它在同一温度时的体积分数为 φ_B ；并设这时溶液和溶液中所含纯物质的密度分别为 ρ 和 ρ_B ，则根据质量分数和体积分数定义以及 $\rho = m/V$ $\rho_B = m_B/V_B$ 可得

$$w_B = \frac{\rho_B}{\rho} \cdot \varphi_B \quad (1.6)$$

$$\varphi_B = \frac{\rho}{\rho_B} \cdot w_B \quad (1.7)$$

式 (1.6) 和式 (1.7) 即为质量分数和体积分数之间的相互换算关系式。对于酒精水溶液，当温度为 20℃ 时，则式 (1.6) 和式 (1.7) 变为

$$w = \frac{789.24}{\rho_{20}} \cdot \varphi \quad (1.8)$$

$$\varphi = \frac{\rho_{20}}{789.24} \cdot w \quad (1.9)$$

式中，789.24 为纯酒精的密度， ρ_{20} 为 20℃ 下酒精溶液密度。单位均为 kg/m^3 。

第三节 密度与温度、压力的函数关系

如前所述，密度是物质质量与其体积之比值。简单地说，它反映了各种物质因分子间作用力不同而呈现的聚集状态。如通常所说的物质三态——固体、液体和气体。然而这种状态是与物质所受的温度、压力直接有关系的，也就是说密度是温度 t 和压力 p 的函数，用函数式表示为 $\rho = \rho(t, p)$ 。例如，水在常温、常压下为液态，密度约为 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，当温度达到 100℃ 时变为水蒸气，这时密度约为 $0.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，而温度下降到 0℃ 时，则又变成固体——冰，这时，密度约为 $0.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。另外，若将 20℃ 水加压到 $390 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，则水密度变为 $1.13 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。由此可见，物质的密度与它的温度、压力关系密切。

一、密度与温度的函数关系

现在先来讨论物体的热膨胀特性。从密度定义可知，密度是物体质量 m 与其体积 V 的函数。一般说质量是不变的，而它的体积却随其温度、压力而变化。在压力一定时，一般是温度上升、体积膨胀；温度下降，体积收缩，其程度则由构成物体的物质种类而不同。为表达这种特性，我们假定物体在 0℃ 的体积为 V_0 ，在温度变化到 t ℃ 时的体积为 V_t ，则 V_t 与 t 之关系通常用下式表示即

$$V_t = V_0(1 + a_v t) \quad (1.10)$$

式中， a_v 称为“体膨胀系数”。它表示了物体温度每变化 1℃ 时，其体积的变化与 0℃ 的体积之比值，即温度每变化 1℃ 时，物体体积的相对变化率。单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$ 。

从式 (1.10) 可得

$$a_v = \frac{V_t - V_0}{V_0 \cdot (t - 0)} = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1.11)$$

严格地讲， a_v 是与温度有关的量，仅在一定温度范围内是个常数。一般所列的 a_v 值表，是指在较小的温度范围内的平均值。例如，表 1.1 所示。

式 (1.10) 对于物质三态都适用。只有 4℃ 的水有反常膨胀, 这时密度最大, 体积最小。在三态物质中, 以气态的 α_V 值最大, 液态居中, 固态最小。对于各向同性的固体来说, 其体膨胀系数可以由它的线膨胀系数 α_l 求得, 其关系为 $\alpha_V = 3\alpha_l$ 。

表 1.1 某些物质在常温范围内的体膨胀系数

名 称	$\alpha_V (^\circ\text{C}^{-1})$	名 称	$\alpha_V (^\circ\text{C}^{-1})$
乙 醚	0.001 66	铅	0.000 072
汽 油	0.001 24	铝	0.000 071
甲 醇	0.001 15	银	0.000 057
酒 精	0.001 10	黄铜	0.000 057
煤 油	0.001 00	铜	0.000 051
硫 酸	0.000 56	铁	0.000 036
甘 油	0.000 50	钢	0.000 033
水	0.000 20	铂	0.000 027
水 银	0.001 81	玻璃	0.000 025
锌	0.000 081	殷钢	0.000 015
锡	0.000 081	石英玻璃	0.000 001 5

液体膨胀一般要比固体大上十倍。而气体的体膨胀系数当外界压力不变时, 约为 $0.003 67^\circ\text{C}^{-1}$ 。即约为 $1/273^\circ\text{C}^{-1}$ 。

通常在实际工作中, 并不常知物体在 0°C 时的体积, 而是已知在某个参考温度 t_r 时的体积 V_r (r 表示参考状态), 要计算它在 $t^\circ\text{C}$ 时的体积 V_t , 则根据式 (1.10) 可得到下列两个等式, 即

$$V_r = V_0(1 + \alpha_V t_r)$$

$$V_t = V_0(1 + \alpha_V t)$$

两式相除, 则有

$$\frac{V_r}{V_t} = \frac{1 + \alpha_V t_r}{1 + \alpha_V t}$$

将上式经数学加工整理, 并忽略带有 α_V^2 的小项, 则有下列近似的数学表达式, 即

$$V_t = V_r[1 + \alpha_V(t - t_r)] \quad (1.12)$$

若式 (1.12) 中参考温度 $t_r = 20^\circ\text{C}$, 则式 (1.12) 式变为

$$V_t = V_{20}[1 + \alpha_V(t - 20)] \quad (1.13)$$

该式在密度测量工作中经常用到。

以上知道了物体体积与其温度的关系，再看看密度随温度的变化关系。

设一定量的物体质量为 m ，其密度在参考温度 t_r 和另一温度 t 时分别为 ρ_r 和 ρ_t 。根据密度定义公式，则有

$$\rho_r = m/V_r$$

$$\rho_t = m/V_t$$

将它们分别代入式 (1.12)，可得

$$\rho_t/\rho_r = 1/[1 + \alpha_V(t - t_r)]$$

经数学加工整理后，并忽略带有 α_V^2 的小项，则有下列近似的数学表达式，即

$$\rho_t = \rho_r[1 + \alpha_V(t_r - t)] \quad (1.14)$$

从公式可知，在实际测量时，若 ρ_r 、 α_V 、 t_r 和 t 已知，则根据式 (1.14)，即可直接得到物体在另一温度下的密度值。进一步，若式 (1.14) 中参考温度 t_r 为标准状态 20°C 时的温度（该温度是计量学一般规定的标准温度），则式 (1.14) 变为

$$\rho_t = \rho_{20}[1 + \alpha_V(20 - t)] \quad (1.15)$$

式 (1.15) 即是常用的密度与温度关系的表达式。

二、密度与压力的函数关系

以上由 $V = V(t)$ 关系，描述了 $\rho = \rho(t)$ 的关系，现再由 $V = V(p)$ 关系，看看 $\rho = \rho(p)$ 的关系。为表征物体可压缩性的压缩系数概念，过去国内外长期处于混乱状态。本教材仅叙述在密度计量工作中经常用到的割压缩系数概念。

割压缩系数（亦称割压缩率） k 定义为

$$\begin{aligned} k &= -\frac{1}{V_r} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{1}{p - p_r} \cdot \frac{V_r - V}{V_r} \\ &= \frac{1}{p - p_r} \left(1 - \frac{V}{V_r}\right) \end{aligned} \quad (1.16)$$

式中， V_r 为参考压力 p_r 时的体积， V 为另一压力 p 时的体积。

式 (1.16) 表明了物体单位体积中体积的减少量 $(-\Delta V)$ 与所需压力增量 (Δp) 的比值。因压力增加体积减少，所以定义公式中有“负号”。 k 值是指一定压力范围内的平均值。它是割体积模量 K （单位为 Pa）的倒数，单位为 Pa^{-1} 。

然后，根据物体密度和体积关系，再结合上述关系，则得

$$\rho_p = \frac{\rho_r}{1 - k(p - p_r)} \approx \rho_r[1 + k(p - p_r)] \quad (1.17)$$

式中， ρ_r 和 ρ_p 分别为物体在压力 p_r 和 p 时的密度。

若上式中参考压力 p_r 为标准状态（101 325 Pa）时的压力，并用 Pa 表示，则上式变为

$$\rho_p = \rho_{p_0}[1 + k(p - p_0)] \quad (1.18)$$

式 (1.18) 是常用的密度与压力关系的表达式。

除此之外，还要顺便提一下，还有一个等温压缩系数 β_t 的概念， β_t 定义公式为