

密度·浓度测量

李兴华 编著



中国计量出版社

密度·浓度测量

李兴华 编著

中国计量出版社

新登(京)字024号

内 容 提 要

本书较系统地论述测量各种物质密度和浓度的测量原理、测量方法、测量装置与仪器以及误差影响因素等，并对近代测量的新技术和方法作了介绍，全书共十三章，有基本概念、测量方法以及密度标准及其量值传递等。附录部分列出在实际工作中必要的各种常用数据表。

本书可供工矿企业、工程技术、科研单位和计量等部门从事计量测试及分析工作的有关人员阅读，亦可作为大专院校有关专业师生参考用书。

密度·浓度测量

李兴华 编著

责任编辑 陈艳春

*

中国计量出版社出版

北京市和平里西街甲2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 850×1168 印张 16.5 字数436千字

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

印数1—7000

ISBN 7-5026-0416-2/TB·332

定价 10.00元

编 者 的 话

密度和浓度是表征物质特性的物理量，在科学技术大力发展的今天，对它们的测量几乎涉及到每个部门，应用相当广泛，它不仅与半成品、成品的数量与质量控制、检测有关，而且对加强及提高生产过程的计量管理水平、促进科学研究及国内外贸易的发展密切相关，因而不论从技术或经济观点上，密度和浓度计量测试都是必不可少的。在近十年期间随着测量技术数字化、自动化以及传感器的应用，密度和浓度新的测量技术、方法以及新型传感器的应用不断出现。然而，迄今为止，国内尚缺乏内容较为丰富和新颖的参考书，为了弥补上述不足和解决广大读者的急需。作者撰写了此书，供各界同仁参考，我想是有所裨益的。

全书共十三章，较系统地论述了密度和浓度及其测量的基本理论知识；用于测量气体、液体和固体密度的各种原理、方法及误差影响因素；各种类型实验装置及计量仪器的工作原理、结构、技术特点及其应用；重要而常用的石油、液化石油气、酒精溶液、糖溶液和海水以及熔体、粉粒体密度和浓度的测量方法；有关计量技术法规的规定。本书还用较大篇幅向读者介绍用于在线测量的几种常用的密度和浓度传感器。除外，还对作为密度和浓度测量基础的密度标准及其量值传递，以及密度标准参考物质的基本理论、作用和发展趋势作了介绍。

《密度·浓度测量》的出版，对普及与提高密度和浓度方面的计量测试知识，提高检测水平，推动生产质量管理和促进技术进步，提高社会效益，无疑将起到积极作用。

作者在酝酿和撰写本书过程中，得到程传箴高级工程师和其他人员的热忱鼓励和有益的指教，仅此一并致谢。

由于水平有限，时间仓促，书中难免有不少缺点甚至错误，敬请读者批评指正。

中国计量科学研究院 高级工程师 李兴华

1990年10月于北京

246181/OP

目 录

第一章 基本概念及定义

- 第一节 密度..... (1)
- 第二节 相对密度..... (5)
- 第三节 分子(粒子)数密度..... (7)
- 第四节 重度..... (7)
- 第五节 比体积..... (8)
- 第六节 浓度..... (8)
- 第七节 密度和浓度表示法..... (15)
- 第八节 密度与温度、压力的关系..... (16)
- 第九节 单位换算..... (23)

第二章 测量法分类及特征

- 第一节 密度测量法分类及特性..... (30)
- 第二节 浓度测量法分类及特性..... (35)

第三章 流体静力称量法

- 第一节 基本原理..... (37)
- 第二节 用液体静力天平测量液体和固体密度..... (38)
- 第三节 用双浮子法测量液体和气体密度..... (50)
- 第四节 测量影响因素和误差分析..... (55)
- 第五节 韦氏静力天平..... (61)
- 第六节 杠杆式静力天平..... (66)
- 第七节 液体静力秤..... (67)

第四章 密度瓶及其测量

- 第一节 基本原理..... (73)
- 第二节 密度瓶类型及技术要求..... (75)
- 第三节 液体密度测量和计算式..... (83)

第四节	固体密度测量和计算式	(92)
第五节	测量影响因素和误差分析	(96)
第六节	用微差密度瓶法测量液体密度	(99)
第七节	用泥浆密度测量仪测量泥浆密度	(101)
第八节	用密度瓶测量气体密度	(102)
第九节	有关密度瓶及测量方法的国际标准	(107)
第五章 浮计及其测量		
第一节	基本原理	(110)
第二节	浮计种类及技术要求	(112)
第三节	浮计基本理论基础	(116)
第四节	测量仪器及方法	(129)
第五节	测量影响因素及修正	(135)
第六节	浮计的校准方法	(162)
第七节	浮计检定基本知识	(168)
第八节	有关浮计及测量方法的国际标准	(189)
第六章 悬浮法		
第一节	基本原理	(196)
第二节	利用两种液体的浮力法	(196)
第三节	密度梯度管法	(200)
第四节	温度沉浮法	(209)
第五节	浮沉子法	(214)
第七章 密度标准参考物质和密度标准		
第一节	纯水密度及其测量	(217)
第二节	纯汞密度及其测量	(224)
第三节	空气密度及其测量	(230)
第四节	其它密度标准参考物质	(246)
第五节	密度标准及其建立	(247)
第八章 石油和液化石油气密度及其测量		
第一节	石油及石油产品的密度	(257)
第二节	液化石油气密度及其测量	(267)

第九章 酒精、糖溶液和海水密度-浓度及其测量

第一节 酒精溶液密度-浓度及其测量(289)

第二节 糖溶液密度-浓度及其测量(302)

第三节 海水密度-浓度及其测量(305)

第十章 气体密度及其测量

第一节 一般概念.....(309)

第二节 气态方程计算法.....(311)

第三节 气体密度天平法.....(320)

第四节 气柱平衡法.....(326)

第五节 离心力法.....(327)

第六节 转矩法.....(329)

第七节 流出法.....(331)

第十一章 熔体密度及其测量

第一节 液态金属密度的测量.....(338)

第二节 玻璃熔体密度的测量.....(344)

第十二章 粉粒体密度及其测量

第一节 一般概念及定义.....(346)

第二节 粉粒体密度的测量.....(348)

第十三章 工业过程用密度计和浓度计

第一节 浮子法.....(355)

第二节 静压法.....(366)

第三节 连续称量法.....(373)

第四节 射线法.....(376)

第五节 声学法.....(382)

第六节 振动法.....(390)

第七节 电导法.....(430)

第八节 电磁法.....(442)

第九节 热导法.....(447)

第十节 折光法.....(455)

第十一节 旋光法.....(470)

附录

附录 1	不含空气, 0~40℃和101 325Pa下纯水 密度表.....	(477)
附录 2	0~50℃和101 325Pa下纯汞密度表	(479)
附录 3	15~27℃和60 000~110 000Pa干 空气密度表.....	(481)
附录 4	在20℃时酒精水溶液体积百分数与密度 换算表.....	(482)
附录 5	在20℃时酒精水溶液质量百分数与密度 换算表.....	(483)
附录 6	酒精水溶液体积百分数与质量百分数换 算表.....	(484)
附录 7	酒精水溶液质量百分数与体积百分数换 算表.....	(485)
附录 8	在20℃时糖溶液质量百分数与密度换算 表.....	(486)
附录 9	在20℃时波美度与密度换算表.....	(487)
附录10	液体毛细常数表.....	(488)
10.1	密度大于水的液体毛细常数表	(488)
10.2	密度小于水的液体毛细常数表	(491)
10.3	糖溶液的毛细常数表.....	(493)
附录11	水饱和蒸气压表.....	(494)
附录12	10~80℃糖溶液质量百分数与密度换算 表.....	(496)
附录13	0℃和101 325Pa下单一气体密度和相对 密度表.....	(497)
附录14	湿空气压缩系数表.....	(498)
附录15	氮气压缩系数表.....	(501)
附录16	氩气压缩系数表.....	(508)
主要参考文献	(515)

第一章 基本概念及定义

第一节 密 度

自然界是由各种物质组成的。我们从实验中可以晓得，体积相同的不同物质，其质量是不同的。例如，一块铝比同体积的木块质量重，而比同体积的铁块质量轻；反之，质量相同的这些物质，其体积也是不同的。平时所说的一种物质比另一种物质轻或重是指同体积的这些物质说的，可见要比较各种物质的轻重，必须就相等的体积而言，为方便起见，常用单位体积的物质质量度量。譬如，1立方米铁的质量为7800千克，1立方米木头的质量为400千克，1立方米水的质量为1000千克以及1立方米空气的质量为1.2千克等等。这样，铁、木头、铝、水和空气等物质的轻重比较就显而易见了。

由此可见，密度(Density)是一个用于定量地描述物质特性的物理量。每种物质都有一定的密度值，物质不同密度不同，而且在一定的状态条件(如温度、压力)下一种物质的密度是个常数，它与该物质组成的物系的形状、光泽、质量多少和体积大小无关。

通常，为表征物质的密度特性有线密度、面密度和体密度，对于体密度常简称为“密度”，但若表示面密度(Surface density)或线密度(Linear density)就须分别予以明确。本书所述的密度是指的体密度。

单位体积的某种物质质量，叫做这种物质的密度。就是说它为物质质量与其体积之比，它的定义公式为：

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

式中： ρ ——物质密度；
 m ——物质质量；
 V —— m 的体积。

这里所说的物质系指可以局限于某一范围内的物质（固体、液体和气体）。它可以由单一的物质构成，也可以由多种物质来构成，或者按给定的成分由不同的物质所组成。

从密度定义方程(1.1)可以看出，密度在国际单位制(国际简称SI)中，是个由基本量质量与长度导出的SI导出量，其SI单位*的一贯导出单位**名称为“千克(公斤)每立方米”，单位符号为 kg/m^3 （也是我国的法定计量单位）。其量用符号“ ρ ”表示，量纲 $\dim \rho = M L^{-3}$ ，这里 M 、 L 分别是基本量质量与长度的量纲。量纲系指在量制中用基本量的幂积表示的数值系数为1的量的表达式，基本量的量纲就是它本身。在国际单位制的单位中，除一贯制的SI单位外，还包括非一贯制的SI单位的10进倍数和分数单位。为实际使用方便，密度也常选用千克每立方米的10进倍数和分数单位，譬如，兆克每立方米(Mg/m^3)（如在国际标准ISO2781硫化橡胶密度测定法和ISO705天然胶乳密度测定法中就采用了这个单位）、克每立方米(g/m^3)、千克每立方分米(kg/dm^3)、克每立方厘米(g/cm^3)等等。其中10进倍数单位克每立方厘米常用，它等于千克每立方米的1000倍。例如，20℃的水密度为 $0.999972 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，也就是 $999.972 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

根据我国在1984年颁布的法定计量单位，以体积单位升(L)、毫升(mL)等为单位的密度单位，如千克每升(kg/L)、克每升(g/L)、克每毫升(g/mL)等，以及以质量单位吨(t)为单位的密度单位吨每立方米(t/m^3)也是允许采用的。这些单位可以与S的密度单位并用，但应该注意，它们并不是SI单位。另外，还应

* SI中的一贯单位制的单位称之为SI单位。这种单位仅是国际单位制的单位的一部分。

** 一贯导出单位是用基本单位通过公式表示的系数等于1的计量单位。

该注意，由于存在体积升定义的历史演变问题，根据1964年第12届国际计量大会 (CGPM)，规定升作为立方分米的专门名称，所以现在的 $1\text{g/mL}=1\text{g/cm}^3$ (在1964年前， $1\text{g/mL}=0.999972\text{g/cm}^3$ 或 $1\text{g/cm}^3=1.000028\text{g/mL}$ ，两者相差 2.8×10^{-5})。

在这里还应该指出的是，为利于单位统一与国际交往，在密度测量领域中，今后只允许采用上述规定的法定计量单位，而且为了符合国际单位制的一贯性原则，应该积极采用千克每立方米作为密度单位。对于以往使用过的工程密度单位的工程质量每立方米($\text{kgf}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-4}$)以及英制的密度单位，如英吨每立方码(UK-ton/yd^3)、磅每立方英尺(1b/ft^3)等一律不予采用。

上述讲的是密度的基本概念，但是物质有均匀的和非均匀的，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，其均匀性可以忽略的情况是大量的。对于均匀物质，其密度在给定的温度、压力等条件下是确定值；对于非均匀物质，其密度在物质各处可能不尽相同，例如，多相物体(水和冰共存的状态)，在重力场作用下的空气柱，含有孔隙的烧结物或绝缘材料以及粉粒体等情况。因此，为适用于各种情况，在不同的专门领域中，还常用如下所述的一些以密度为构词成分的其它名词术语。

一、表观密度(apparent density)

表观密度是指多孔固体(粉末或颗粒状)材料质量与其表观体积(包括“孔隙”^{*}的体积)之比值。

有的称为假密度。

它多用于冶金、建筑、矿业和化工工业中，例如，金属及合金金属材料烧结物钕铁氧体的表观密度为 4850kg/m^3 ，若不包括空隙的密度即实际密度(见下节定义)变为 5260kg/m^3 ，又如焦炭的表观密度为 $1100\sim 1450\text{kg/m}^3$ ，其实际密度为 $1800\sim 2000\text{kg/m}^3$

* 孔隙包括材料间的空隙和本身的开口孔、裂口或裂纹(浸渍时能被液体填充)以及封闭或空洞(浸渍时不能被液体填充)。

等。显然表观密度比实际密度小。通过这样的测定，可以确定固体材料的气孔率。气孔率一般用百分数表示，即：

$$\text{气孔率}(\%) = \frac{\text{实际密度} - \text{表观密度}}{\text{实际密度}} \times 100\%$$

关于表观密度可参阅第十二章。

二、实际密度(actual density)

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。

它是与上述的表观密度相对应的量。有的称为真密度。

三、堆积密度(bulk density)

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的实际填充材料于既定容积的容器内的条件。譬如自然堆积，振动或敲击堆积和施加了一定的压力堆积，可相应称为松密度、振实密度和压实密度。

堆积密度随其填充材料的条件而异。

对于粒状物体，把颗粒之间的空隙计算在内时，在我国有的领域习惯称之为“容重”。例如，在粮食的分级中，有这一指标。它的计量单位与密度相同，但是为了与国际一致，今后应采用堆积密度这一术语。关于堆积密度可参阅第十二章。

四、标准密度(standard density)

标准密度是指在规范规定的标准条件下的物质密度。例如，在标准温度273.15K(0℃)和压力101325Pa下的气体密度；在标准温度20℃下的液体密度以及固体密度等。

标准密度很重要，它是为了便于各种物质比较与计算到规定的标准条件下的密度而必须的。

五、参考密度(reference density)

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。例如,参考物质纯水在20℃时的密度;参考物质干空气在273.15K和101325Pa时的密度等。有时参考状态即是标准状态。

参考密度也很重要,多在密度的相对测量中作为参考物质密度使用。

六、临界密度(critical density)

临界密度是指物质在临界点的密度。

临界点亦称为“临界状态”,是物质的气、液两态平衡共存的一个边缘状态。在这种状态下,液体和它的饱和汽的密度相同,故它们的分界面消失,这种状态只能在一定温度及压力下实现。此时的温度和压力称为“临界温度”和“临界压力”,而一定量物质所占的体积叫做“临界体积。”亦可称为“临界比容”。有关比容的概念见后面的第五节。各种物质的这些值是不同的,如氧的临界温度为-118.82℃,临界压力为4.88 MPa,临界比容为 $2.32 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$,其临界密度为 $430 \text{kg}/\text{m}^3$;对于水蒸气则分别为374℃,21.37 MPa, $3.04 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{kg}$ 和 $329 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

第二节 相对密度

除上述的密度及建立在密度基础上的各种密度量外,为方便起见,在许多科技和工程技术领域中,还常用相对密度量relative density来表达物质的特性。

相对密度是指在给定的条件下,物质密度 ρ_1 与参考物质密度 ρ_2 之比值,它的定义公式为:

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

在使用时,以上两种密度的条件必须分别指明。相对密度是个

无量纲量^{*}，即单位为1，也就是说相对密度的量纲 $\dim d = M^0 L^0$
=1该量用符号“ d ”表示。

在密度测量中，密度参考物质一般是指易获得、纯度高、性能稳定而且密度已知的物质。对于固体和液体的相对密度测量通常都采用某一参考温度下的纯水；对于气体的相对密度测量则采用与干燥气体同参考温度和压力下的干燥空气。在定义纯水密度时，国际上以及不同学科中参考温度有4°C、15°C、17.5°C、20°C、23°C、27°C，但常用4°C与20°C，其密度分别为999.9720kg/m³和998.2019kg/m³；气体是用标准状况($T=273.15\text{K}$ ， $p=101325\text{Pa}$)的干燥空气，其密度为1.2930kg/m³。

从式(1.2)可知，若测定时，使参考物质的体积 V_2 与某种物质的体积 V_1 相同，则式(1.2)变为下式：

$$d = m_1/m_2$$

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

关于相对密度这一概念，过去常常叫做“比重”(specific gravity或specific weight)，而且应用很普遍。但实际上，由于不同国家在生产实践和科技活动中使用比重的情况因时而异，同时保持各自的习惯，所以比重一词不但概念不确切，而且单位也不统一，在一定程度上妨碍了专业间的技术交流。分析原来所用的比重概念，对大多数确切地说是指的物质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。另外，比重一词的结构也欠科学，“比”这个字放在一个物理量的前面，对它的含义加以延伸时，一般是指这个物理量与其质量之比的意思。譬如，比热容 $c=C/m$ ，比熵 $s=S/m$ ，比结合能 $\epsilon=E/m$ ，比活度 $a=A/m$ ，比容 $v=V/m$ 等等，而比重却不是如此。总之，为概念正确，名词统一，今后要废除比重不用，一律用本节所述的相对密度替代它。

* 指所有量纲指数都等于零的量纲。

第三节 分子（粒子）数密度

分子（粒子）数密度 (number density of molecules or particles) 是指分子数 N 与其体积 V 之比值，它的定义公式为：

$$n = N/V \quad (1.3)$$

可见，该量是用于表达物质单位体积含有多少分子（或粒子）数量的一个物理量。其SI单位为每立方米 (m^{-3})。但常用每升 (L^{-1})表示。

式(1.3)中分子数在国家标准GB3102.8“物理化学和分子物理学的量和单位”称为分子或其它基本单元数，它表示分子或其它基本单元在系统中的数目，是个无量纲的量。

分子数 N 是个与基本量的物质的量(amount of substance) ν 直接有关的量。物质的量是用于描述物质多少的物理量，SI单位为摩尔(mol)、 N 与 ν 的关系式为： $N = N_A \nu$ ，其中 N_A 为阿伏加德罗常数，它表示分子数除以物质的量，SI单位为每摩尔 (mol^{-1})， $N_A = (6.022045 \pm 0.000031) \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ 。

由此可知，式(1.3)也可用下式表示：

$$n = \frac{N_A \nu}{V} \quad (1.4)$$

这里所说的基本单元可以是原子、分子、离子、原子团、电子、光子及其它粒子，或者是这些粒子的特定组合。在使用摩尔或与摩尔有关的量时，必须明确指出基本单元，否则没有意义。假如用 x 表示基本单元，则式(1.3)可用下式表示：

$$n(x) = N(x)/V$$

第四节 重 度

重度是指物体所受重力 G 与其体积 V 之比值。它的定义公式为：

$$\gamma = G/V \quad (1.5)$$

按 $G = mg$, $V = m/\rho$ 可得到重度 γ 与密度 ρ 的关系式:

$$\gamma = \rho g \quad (1.6)$$

由于重力 G 随当地重力加速度 g 而不同, 故 γ 值也随地而异。

γ 的SI单位是牛顿每立方米(N/m^3), 常用千牛顿每立方米(kN/m^3)。目前这个量用的还较多, 主要用在建筑工程技术上, 其它学科根据习惯与方便也可使用。然而, 重度这个量在GB3102/1~13和相应的ISO31/0~13中均未给出, 即这个量尚未达到标准化的程度。必要时, 需交待其定义, 以免混淆和误解。但今后随着工程单位的被淘汰, 它也应停止使用。

第五节 比 体 积

比体积 (specific valume) 是指物质体积 V 与其质量 m 之比值, 它的定义公式为:

$$v = V/m = 1/\rho \quad (1.7)$$

它是密度的倒数。它的SI单位为立方米每千克(m^3/kg)。有的称为比容。

第六节 浓 度

浓度 (concentration) 同密度一样也是一个用于表征物质特性的物理量。由于它与密度有关而且与密度相比在某些场合更能方便地求得物质成分或性质, 所以测量浓度已成为不可缺少的手段。

在浓度测量领域里, 浓度概念及单位也是相当混乱的, 为概念正确及单位统一, 本书将依据GB3102.8并参照ISO31/8和国际理论化学和应用化学学会(IUPAC), 以及有关国家标准(如联邦德国标准DIN1310与32625, 法国标准NF x02-208等)对有关浓度量加以概述。

一、一般概念

具有相同成分及相同物理、化学性质的均匀物质可称做“相”。这里所指的相是均匀的气、液、固三态物质的相，相可以由单一物质或多种物质构成。由两种或两种以上不同的物质所组成的相称为混合相或称为混合物。混合物、相分为三类，气体混合相也表达为混合气体，液体混合相也表达为溶液，固体混合相也表达为混晶或固溶体（例如铜镍合金等）。其中溶液应用很广泛。本书溶液是指由能互相溶解的溶质和溶剂组成的单相均匀体系。一般来说，可将含量较多的称为溶剂，较少的称为溶质，溶质在溶剂中分散成单个分子或离子。

平时我们都有这样一个概念，若溶液中溶质的含量多，则说明溶液浓度高；反之，若这种溶质含量少，则说明溶液浓度低。显然，溶液浓度是以溶质在溶液中的含量多少来度量的。为表示混合物的混合程度或是分析混合物中某种物质的含量多少，通常可用称为浓度的物理量来表示。这里所说的浓度是个总的概念，可以说是对混合物组成的一个定性地描述，为了说明混合物组成，一般可以通过给出其中的每个单一物的质量 m 、体积 V 、物质的量 ν 或粒子数 N 在总的组成物质中的含量来表示。下面将定量地对有关浓度加以叙述。

二、物质的量浓度 (a amount of substance concentration)

物质的量浓度是指物质B的物质的量 ν_B 与其混合物体积 V 之比，它的定义公式为：

$$c_B = \nu_B / V \quad (1.8)$$

可见，它是物质的量和体积单位的导出单位，其量纲 $\text{dim} c_B = \text{NL}^{-3}$ 。其SI单位为摩尔每立方米(mol/m^3)，它的常用10进倍数单位为摩尔每立方分米(mol/dm^3)，亦可使用摩尔每升(mol/L)。三者单位关系为： $1\text{mol}/\text{L} = 1\text{mol}/\text{dm}^3 = 10^3\text{mol}/\text{m}^3$ 。又由于式