密度测量技术

麻育英 编

机械工业出版社

密度测量技术

廉育英 编

机械工业出版社

本书较全面地介绍了液体、固体和气体密度测量的各种方法及其原理、实验装置、实验技术和误差分析等。全书共七章，第一章基本概念和定义；第二章浮计；第三章液体静力衡量法；第四章比重瓶测量法；第五章粒子密度测量；第六章绝对测量法；第七章自动密度计。

本书可供从事密度研究及其测量工作的科技人员、实验和检定人员参考，亦可供有关大专院校师生参考。

密度测量技术

康育英 编

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）
（北京市书刊出版业营业许可证出字第１１７号）
北京市密云县印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092 1/32·印张11·字数233千字
1982年5月北京第一版·1982年5月北京第一次印刷
印数0,001—6,400·定价1.15元

统一书号：15033·4791

前　言

密度是指单位体积中的物质的质量，它是表征物质特性的一个基本物理量。

密度测量，是一项重要的测量技术工作，它不仅在物理学、化学、计量学、海洋学等学科中对物质性质的研究起着重要的作用，而且在石油、化工、冶金、轻工、材料等工业部门中应用十分广泛，对实现生产过程和产品质量的自动控制和检验也同样起着很重要的作用。可以预见，随着国民经济的发展必将对密度测量技术提出更高的要求。

到目前为止，在密度测量技术方面我国还没有一套较为完整系统的资料，为实现四化需要，承广大科技工作者及实验、检定人员的迫切要求，作者根据自己多年工作实践，并参阅了国内、外有关资料和文献，编写了《密度测量技术》一书，供有关读者参考。

本书在编写过程中，得到了潘子锜、程勇华及刘家增、朱源宏同志的热情鼓励和支持。初稿完成以后，程勇华、李兴华、潘根初、刘智敏、刘泽东等同志对初稿进行了全面的审阅，提出了许多宝贵的意见，在此谨表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中缺点和错误之处在所难免，恳请广大读者予以批评指正。

作　者　1978年12月

目　录

第一章　基本概念和定义 ……1
一、密度 ……1
二、相对密度 ……3
三、测量单位之间的密度换算 ……6
四、比重 ……8
五、密度和温度的关系 ……9
六、密度和压力的关系 ……14
七、溶液的浓度 ……15
（一）重量百分浓度 ……16
（二）体积百分浓度 ……16
（三）克分子浓度 ……18
（四）当量浓度 ……18
（五）波美度 ……24
第二章　浮计 ……29
一、浮计的分类 ……29
二、浮计的构造及其作用原理 ……31
三、弯月面 ……33
四、毛细现象与毛细作用常数 ……39
五、浮计在液体中的平衡方程式 ……48
六、浮计的设计原理 ……50
七、对毛细作用的修正 ……54
八、温度对浮计示值的影响 ……56
九、玻璃浮计的使用 ……62
十、玻璃浮计的检定 ……65

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

（一）主要检定设备 ……66
（二）检定用液及其配制 ……67
（三）浮计的检定 ……73
第三章 液体静力衡量法 ……76
一、固体密度测量 ……77
（一）测量原理 ……77
（二）实验及其装置 ……80
（三）误差分析 ……82
二、液体密度测量 ……86
三、用液体静力天平测定液体与固体密度 ……91
（一）液体静力天平的结构 ……91
（二）静力天平的作用原理 ……93
四、用液体比重天平测定液体密度和固体的体积及其质量 ……102
五、水的密度 ……109
（一）水密度测量简史 ……109
（二）溶解空气和压力补正 ……114
（三）水的同位素组成及其对水密度的影响 ……117
六、空气密度的精确测量 ……119
第四章 比重瓶测量法 ……134
一、比重瓶的结构 ……134
二、灌注和抽空比重瓶装置 ……137
三、测量液体密度的原理 ……138
四、测定液体密度的误差分析 ……142
五、比重瓶的使用 ……147
六、计算举例——汞密度测量 ……152
（一）衡量空比重瓶 ……152
（二）衡量盛蒸馏水的比重瓶 ……152
（三）衡量盛汞的比重瓶 ……153
七、固体密度的测量 ……153

第五章　粒子密度测量 ……157
一、定义 ……157
二、液浸法 ……159
（一）比重瓶法……159
（二）悬浮法……161
三、气体容积法 ……161
（一）定容压缩法……162
（二）定压法……165
（三）压力比较法……165
四、梯度管法 ……166
（一）测量原理……166
（二）标准浮子密度的校准……166
第六章　绝对测量法 ……182
一、钢球密度测量 ……182
（一）沙登茨（J. B. Saunders）干涉仪的结构 ……183
（二）标准具及其长度的测量……185
（三）标准具和钢球间的距离测量……189
（四）激光光源……190
（五）增大干涉级的方向……191
（六）干涉图的分析……193
（七）钢球的密度……197
二、固体的体积传递 ……197
三、液体和固体密度的统一基准 ……202
四、用“容量法”绝对测量液体密度 ……204
（一）测量原理……204
（二）熔凝氧化硅空心立方体结构……205
（三）毛细管的容积……207
（四）灌注液体的真空装置……208
（五）温度的控制和液体的体积的确定……209

（六）实验计算和误差源……210
第七章　自动密度计 ……214
一、浮子式密度计 ……215
（一）漂浮浮子式密度计……215
（二）浸没浮子式密度计……221
二、天平式密度计 ……237
（一）弹簧天平式密度计……238
（二）具有空气压缩转换器的天平式密度计……238
（三）具有分布磁参数变换器的天平式密度计……243
（四）自动天平式密度计……246
（五）ABII-1 型天平式密度计 ……250
三、液体静力式密度计 ……253
四、放射性同位素密度计 ……265
（一）关于辐射源能量的选择……267
（二）放射辐射接收器……270
（三）几种主要型号的放射性同位素密度计……271
五、光学密度计 ……279
（一）自动折射计……279
（二）自动偏振仪……285
六、超声波密度计 ……288
（一）阻抗法……289
（二）测速法……295
（三）阻抗-测速法 ……301
七、振动式密度计 ……304
（一）测量原理(以管的横振动为中心的研究)……305
（二）误差因素……310
（三）实用振动式密度计……315
（四）仪器的标定问题……324
主要参考文献 ……343

第一章　基本概念和定义

一、密　　度

众所周知，由不同材料制成的在同样条件下（如，温度、压力等）具有相同体积的物体，它们的质量不同；相反地，在相同的条件下，具有同样质量的物体，而它们占有的体积却不等。

物体的质量与它的体积之比在一定的温度、压力条件下是一个常数，这常数表明该物质的性质。我们称这常数为物质的密度。

所以，物质的密度等于用该物质组成的物体的质量与它的体积之比。

某种物质的密度越大，那么，它在相同的体积内所含有的质量越多。如果用m表示物体的质量，V表示物体的体积，ρ表示物质的密度，则，根据定义，有：

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

因为液体与固体的密度主要取决于温度，所以常在ρ的右下角下标以密度测定时的温度。例如，ρ_{20}表示的是温度20℃时的密度。

物质的一个体积单位所含有一个质量单位的密度作为一个密度单位。

因此，密度单位和所选择的单位制有关。在厘米·克·秒制中密度单位是克/厘米^3，在米·千克·秒制中密度单位是千克/米^3。另外有时也用克/分米^3，千克/分米^{3}作密度单位。这种单位是基于采用过去旧的（分米）^{3}体积单位为基础的。

在密度测定时，常常也使用千克/升、克/升和克/毫升的密度单位。所谓一升就是蒸馏水一千克，在它的最大密度的温度（3.98℃）和标准压力（760mmHg）之下的体积。

由公式（1-1）知，密度单位〔ρ〕含有的因子为：

$$〔\rho〕=\frac{M}{L^3}=ML^{-3} \qquad (1-2)$$

这里，M是质量单位；L是长度单位。

根据式(1-2)可容易地建立起不同密度单位之间的联系。

因为　1千克$=10^3$克，1米$^3=10^3$分米$^3=10^6$厘米^3

所以　1千克/厘米$^3=0.001$千克/分米$^3=1$克/分米^3

$=0.001$克/厘米^3

由于　1工程质量单位 $=1$千克·力·秒^2/米$=9.81$千克

得到：

1工程质量单位/米$^3=9.81$千克/米$^3=0.00981$千克/分米^3

$=9.81$克/分米$^3=0.00981$克/厘米^3

众所周知，国际公斤标准质量（即1千克质量单位）等于1.000028分米^{3}体积的蒸馏水在4℃（精确地讲为3.98℃）时的质量。于是，根据上述升的定义，得到升和立方分米之间的关系：

1升$=1.000028$分米$^3=1000.028$厘米^3

或

1分米$^3=0.99972$升

相应地

1 毫升＝1.000028 厘米^3

1 厘米^3＝0.999972 毫升

由此，直接地得到下列关系：

1 克/厘米^3＝1.000028 克/毫升

1 克/毫升＝0.999972 克/厘米^3

所以，1 厘米^{3}不等于 1 毫升，而 1 克/厘米^{3}与 1 克/毫升大约相差 0.003%。故，在误差大于 0.01%的密度测量中，可以忽略它们之间的不大的差别，并且认为 1 克/厘米^{3}近似地等于 1 克/毫升。

密度测量单位之间的换算见表 1-1。单位N_2沿纵行排列，它可以通过横行所表示的别的单位 N_1表示。所求的转换因子位于相应的横行和纵行的交叉方格中。例如，为了将克/厘米^{3}表示成千克/米^3，在横行“1 千克/米^3”和纵行“克/厘米^3”的交叉点方格中得到转换因子 0.001；所以 1 千克/米^3＝0.001 克/厘米^3。

二、相对密度

在某些科学技术部门里，作为物质特性常以所谓“相对密度”值表示。我们说，任何一种物质的相对密度就是在标准条件下，该物质的密度与别的物质密度之比。它是一个无名数。

液体和固体物质的相对密度通常是根据与蒸馏水的密度相比较确定的，即

$$\rho_{omH}=\frac{\rho}{\rho_B} \qquad (1\text{-}3)$$

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

表1-1 用不同测量单位表示的密度值之间的关系

N_2 \ N_1	工程质量单位/米^3	千克/米^3	千克/分米^3	千克/升	克/分米^3	克/升	克/厘米^3	克/毫升
工程质量单位/米^3	1	0.102	102	101.97	0.102	0.10197	102	101.97
千克/米^3	9.81	1	1000	999.97	1	0.99997	1000	999.97
千克/分米^3	0.00981	0.001	1	0.99997	0.001	0.99997×10^{-3}	1	0.99997
千克/升	9.8069×10^{-3}	1.00003×10^{-3}	1.00003	1	1.00003×10^{-3}	0.001	1.00003	1
克/分米^3	9.81	1	1000	999.97	1	0.99997	1000	999.97
克/升	9.8069	1.00003	1000.03	1000	1.00003	1	1000.03	1000
克/厘米	0.00981	0.001	1	0.99997	0.001	0.99997×10^{-3}	1	0.99997
克/毫升	9.8069×10^{-3}	1.00003×10^{-3}	1.00003	1	1.00003×10^{-3}	0.001	1.00003	1

式中 $\rho=\frac{m}{V_s}$——物质的密度；

$\rho_B=\frac{m_B}{V_B}$——蒸馏水的密度。

要注意，此时 ρ 和 ρ_B 要用同一单位表示。

如果取水的体积 V_B 等于该物质的体积，则由公式(1-3)得：

$$\rho_{omH}=\frac{m}{m_B} \tag{1-4}$$

由此看出：相对密度同样可以看作是该物质的质量与同体积水的质量在确定的标准状况下之比值。

相对密度通常是在 ρ 的右上方和右下方分别加上两个数字表示，或者将这两个数字写成分数形式写在 ρ 的右下方。右上方的数字表示被测样品的密度测定时的温度，右下方的数字表示该物质的密度和水的密度相比的水温。例如，$\rho_{15}^{20}(\rho_{20/15})$ 表示在 20℃ 时测定的物质密度和 15℃ 时的水的密度之比。

目前，相对密度一般是指在标准温度20℃下的物质密度与蒸馏水在 4℃ 时的密度之比。并以 $\rho_4^{20}(\rho_{20/4})$ 表示之。当密度测定误差大于 0.01%，则可认为 4℃时的水的密度等于 1 克/厘米^3，于是，此时物质的相对密度 ρ_4^{20} 与物质在 20℃ 时的密度是一致的。

海水的相对密度特殊，它是指温度在17.5℃时的海水密度与蒸馏水在温度为17.5℃时的密度之比。因此，海水的相对密度表示成 $\rho_{17.5}^{17.5}$。

三、测量单位之间的密度换算

任何值的测量，就是确定该值与测量单位之比值。用各种单位测量该值的结果，其大小是与这些单位成反比的。对于密度测量来讲，可依此写出下式：

$$\rho_2=\frac{N_1}{N_2}\rho_1=k\rho_1 \qquad (1\text{-}5)$$

式中 ρ_1——用测量单位 N_1 表示的密度；

ρ_2——用测量单位 N_2 表示的密度；

$k=\frac{N_1}{N_2}$，称为转换因子。

要将一种测量单位测量所得的结果用另一单位表示，就须将其结果乘上转换因子。表 1-2 列出了一些测量单位间的转换因子。表中第一行表示的是测量单位 N_1（密度值用 N_1 表示），其中第一列表示的是测量单位 N_2（密度值用 N_2 表示），所求的转换因子位于相应的行和列相交处的方格中。例如，将克/厘米^{3}测量单位（N_1）表示的密度换算成以千克/米^{3}测量单位表示，所求的转换因子在行"千克/米^3"和列"克/厘米^3"相交的方格中，于是有：

$$\rho_2(\text{千克/米}^3)=1000\rho_1(\text{克/厘米}^3)$$

进而，让我们研究在确定相对密度时，同样存在着换算问题的一般表示式。

设液体在温度 t℃时的相对密度 $\rho_{t_1}^{t}$ 已知，求该液体在同一温度 t℃时的相对密度 $\rho_{t_2}^{t}$ 值。

根据上述法则，依据公式（1-5）可写出下列比例：

$$\rho_{t_2}^{t}:\rho_{t_1}^{t}=(\rho_B)_{t_1}:(\rho_B)_{t_2}$$

表1-2　密度单位之间的关系

N_2 \ N_1	工程质量单位/米^3	千克/米^3	千克/分米^3	千克/升	克/分米^3	克/升	克/厘米^3	克/毫升
工程质量单位/米^3	1	9.81	0.00981	9.8069×10^{-3}	9.81	9.8069	0.00981	9.8069×10^{-3}
1千克/米^3	0.102	1	0.001	1.00003×10^{-3}	1	1.00003	0.001	1.00003×10^{-3}
1千克/分米^3	102	1000	1	1.00003	1000	1000.03	1	1.00002
1千克/升	101.97	999.97	0.99997	1	999.97	1000	0.99997	1
1克/分米^3	0.102	1	0.001	1.00003×10^{-3}	1	1.00003	0.001	1.00003×10^{-3}
1克/升	0.10197	0.99997	0.99997×10^{-3}	0.001	0.99997	1	0.99997×10^{-3}	0.001
1克/厘米	102	1000	1	1.00003	1000	1000.03	1	1.00003
1克/毫升	101.97	999.97	0.99997	1	999.97	1000	0.99997	1

式中 $(\rho_B)_{t_1}$ 和 $(\rho_B)_{t_2}$ 分别是温度为 t_1℃和 t_2℃时水的密度值。

由此得到所求的换算公式为：

$$\rho^t_{t_2}=\frac{(\rho_B)_{t_1}}{(\rho_B)_{t_2}}\rho^t_{t_1} \qquad (1-6)$$

表 1-3 给出了某些温度下的水的密度值。

表1-3 蒸馏水的密度

温 度 (℃)	密 度 (克/毫升)
4	0.9999720
15	0.9990977
17.5	0.9986845
20	0.9982019

依据公式 (1-6) 和蒸馏水的密度表，就可以将已知的一种相对密度 $\rho^t_{t_1}$ 换算成所需要的另一种相对密度 $\rho^t_{t_2}$。这在实际工作中是经常会遇到的问题。

四、比 重

为了比较各种物质在相同体积下所具有的重量大小，我们采用比重这一物理量来描述。

一种物质组成的物体，它的重量跟它的体积之比，叫做这种物质的比重。

某种物质的比重越大，那么，它在相同的体积下所具有的重量越大。如果用 W 表示物体的重量，V 表示物体的体积，d 表示物质的比重，则有：

$$d=\frac{W}{V} \tag{1-7}$$

比重的单位和密度的单位一样，同样由所选择的单位制决定。例如，在厘米·克·秒制中，比重的单位是达因/厘米^3；在米·千克力·秒制中，比重的单位是千克力/米^3。

物质的密度和比重有下列关系：

$$d=K\rho g \tag{1-8}$$

式中 g——当地的重力加速度值；

K——比例系数，其值与测量单位制的选择有关。

若式（1-8）中的各量系用不同单位制表示，那么，$K\fallingdotseq 1$。例如，当密度用千克/米^{3}表示，而比重用千克力/米^{3}表示，则比例系数$K=\frac{1}{9.80665}$。将该值代入式（1-8）可知，在具有标准重力加速度值的地方，密度值和比重值是一致的。同样，若比重以千克力/厘米^{3}为单位表示，密度以克/厘米^{3}为单位表示，此时，$K=\frac{1}{980.665}$，故也只有对于在具有标准重力加速度值的地方，密度值和比重值才一致；而对于其他不等于标准重力加速度值的地方，密度值和比重值就不同了，但相差很小。

若式（1-8）中的各量系用一种单位制表示，则$K=1$。此时，密度值和比重值在任何地方都不可能一致。

五、密度和温度的关系

物体的体积随着温度的升高而增大，随着温度的降低而减小*。

---

* 水例外——水从0 °C升到4 °C时没有膨胀，而被压缩。还有某些别的物质也是这样。另外，上述关系在物质相变时，同样受到破坏。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com