



称重应用汇编

密度测定

Simplifying Progress

SARTORIUS



重要的所用公式符号

索引	
a	空气
fl	流体（流动系统）
s	固体
(a)	在空气中测定
(fl)	在流体中测定
B	浮力
b	散装
tot	总计

符号	尺寸	位
m	质量	kg
V	体积	m ³
A	表面	m ²
F	力	N = kg × m/s ²
G = m × g	重力	N = kg × m/s ²
g (gravity)	重力加速度	m/s ²
p = F / A	压力	Pa = N / m ²
ρ (rho)	密度	kg/m ³ ; g/cm ³
T	温度（开尔文）	K
t	温度（摄氏度）	°C, t = T - 273.15 K
γ (gamma)	比重（旧!）	kp / dm ³
α (alpha)	线性膨胀系数 (固体)	1/K = K ⁻¹
γ (gamma)	体积膨胀系数 (液体或气体)	1/K = K ⁻¹
φ (phi)	相对湿度	%
π (pi)	孔隙度	体积%

首项附注

密度管理

密度测量有着悠久的历史，可以追溯到古希腊。著名的希腊学者阿基米德（公元前 287 年 - 212 年）最早定义了密度的测量方法，即将固体样品浸入水中，然后使用显示的液体体积和参考样品的体积来确定样品的密度。这种方法基于一个物理学原理：样品的浮力与排开的体积成正比，且样品密度越高，排开液体的体积越小： $F_{\text{浮力}} = V_{\text{排开液体}} \times \rho_{\text{液体}} \times g$ 。

伊朗学者、博学家阿布·雷汉·穆罕默德·比鲁尼（公元 973 - 1048 年）发明了第一个用于测量密度的比重瓶，并用其测定各种元素的密度。比重瓶的测量原理基于待测样品排开的液体。在测量过程中，首先对空容器（或预先装满水的容器）进行称重。然后，将待测液体或样品添加到容器中。测得的重量差用于计算液体或固体的密度。

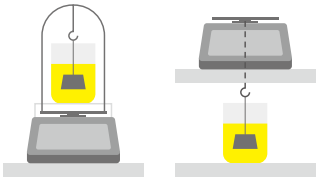
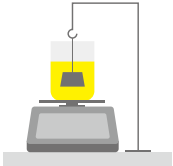
密度测量设备的发展一直持续到 18 世纪。另一种应用广泛的发明是带刻度的玻璃测量设备，如比重计。这些设备的使用基于最初的阿基米德原理，目前仍用于一些特定应用，如酒精浓度测定。

目前，密度测量在原材料和货物质量控制中起着重要作用。虽然基本原理保持不变，先进的仪器为现代实验室提供了诸多便利，这些仪器带有引导方案，可以简化使用浮力法或位移法或使用比重瓶测量密度的过程。

记录保留在如今的监管环境中也发挥着更大的作用。使用集成电子数据处理功能之后，可以以数字形式记录测得的重量值和环境条件，密度值可以自动计算。测量完成后，用户将收到一份包含所有记录值和计算结果的报告。这些功能有助于将测量和记录中的错误降至最低，增强实验室中数据的可靠性。

实验室天平测定密度的方法概述。

有关密度测定方法的详细比较，请参见第 35 页。

	重量分析（浮力法）	重量分析（位移法）	比重瓶法
方法	 装有液体的烧杯放在平台上或天平下面	 装有液体的烧杯放在天平上	 规定容积的玻璃容器
样品类型：	■ 固体 ■ 液体（带玻璃瓶身）	■ 糊状物质（带伽马射线球） ■ 液体（带玻璃铅垂） ■ 固体	■ 液体、分散体 ■ 粉末 ■ 颗粒
优势	■ 快速程序 ■ 样品数量灵活	■ 快速程序	■ 测定方法准确 ■
缺点	■ 对温度敏感 ■ 样品必须非常小心地润湿 ■ 不得出现气泡	■ 对温度敏感 ■ 需要大量样本	■ 对温度敏感 ■ 工作量大 ■ 耗费时间 ■ 不得出现气泡

目录

一般原则..... 6

密度测定应用示例..... 6

密度定义 6

密度单位 7

密度与温度的相关性..... 7

阿基米德原理 9

重量法测定密度 11

基于阿基米德原理的密度测定方法 11

浮力法 12

位移法 13

空气密度的测定 13

使用比重瓶测定密度 15

规定体积称重法（“升重”）..... 16

比重瓶法..... 16

其他密度测定方法.....17

U形管振荡法|振荡法 18

悬浮法 18

比重计法..... 18

应用示例19

固体密度的测定 19

样品的特性 19

合适的密度测定方法 19

使用位移法测定密度 19

多孔固体密度的测定 20

样品的特性 20

合适的密度测定方法 20

使用浮力法测定密度（遵循EN 993-1）..... 21

粉末和颗粒密度的测定 22

样品的特性..... 22

合适的密度测定方法 22

使用比重瓶法测定密度（基于DIN EN ISO 18753）..... 23

均质液体密度的测定 24

样品的特性 24

合适的密度测定方法 24

使用浮力法测定密度 24

分散体密度的测定 25

样品的特性 25

合适的密度测定方法 25

使用位移法测定密度 25

密度测定的误差和精度	26
空气浮力修正	26
位移法试验程序.....	26
浮力法	26
比重瓶法	27
样品支架浮力修正	27
浮力法	27
位移法	28
系统错误的避免	29
静水试验程序.....	29
比重瓶法	30
误差计算	30
浮力法	30
位移法试验程序	33
比重瓶法	33
不同密度测定方法的比较	35
附录	37
密度与温度的相关性.....	37
静水密度测定——消除密度方程中的体积	37
空气密度测定	38
空气浮力修正	39
密度相关问题	38
问题答复	40
索引	41

一般原则

密度测定应用示例

在许多不同的应用领域中，密度用于确定材料或产品特性。结合其他信息，密度可以提供有关产品特性变化可能原因的信息。密度测定是实验室中最常用的重量分析方法之一。密度可以指示材料成分的变化或铸造零件（即气孔）中裂纹或空洞形式的缺陷，例如卫生陶瓷或钢铁行业铸造厂产品中的缺陷。

在铝铸造厂，会铸造用于监测熔体质量的两个样品，一个置于大气压下，另一个置于负压下（例如 80 mbar）。凝固和冷却后，测定铸造样品的密度。通过测得的两个值的比值，便可得知熔体纯度。

在工程塑料中，晶体由于几何顺序更加复杂而比非晶体部分具有更高的密度，因此可以推断结晶相的比例。玻璃的密度由熔体的冷却速度和化学成分决定。

在多孔材料中，受孔隙比例的影响，密度可决定诸如屋面瓦的抗冻融性性能或砌砖、灰砂砖或加气混凝土的隔热性能等性能。

在葡萄酒中，除其他因素，决定质量的还有所谓的葡萄汁含糖量（单位为 Oechsle）——严格来说，由于密度与溶剂中物质的浓度成正比（例如，水溶液中的糖、盐或酒精），葡萄汁含糖量同样是一个密度值。

当包装上需要体积数据，而包装内容物借助天平确定时，密度是预包装检验领域的一个重要参数。

密度定义

密度 ρ 是物质质量 m 和体积 V 的比值。这些名称在 DIN 1306 中有规定。

等式 1

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

根据领域的不同，还使用了特殊的组合密度术语：

- 标准密度——标准状态（0°C 和 1013 hPa）下的气体密度
- 浇注密度——未定义条件下粉末的密度，例如在运输过程中（根据 DIN EN ISO 3252）或指定测量容器中未压实干集料质量除以测量容器体积的商（根据 DIN EN1097-3）
- 堆积密度——填充状态下粉末的密度，根据规定的试验方法确定，对冲压模具的填充量十分重要
- 原始密度——质量与体积（包括多孔材料的孔隙）的商
- 固体密度——含孔固体质量与体积的商，即不包括孔隙体积
- 纯密度——仍然通常用于固体密度
- 相对密度——材料的密度 ρ 与参考密度 ρ_0 之比，相对密度为尺寸比，尺寸为 1
- 尽管仍然可以找到其他重量或比重的表示方法，但如今几乎已不再使用。

等式 2

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{m \times g}{V}$$

与密度相反，以上为重量相对于体积的表示方法，即密度和比重因重力加速度 g 的系数而不同。

密度单位

在国际单位制中, 密度单位为 kg/m^3 , 最常用的单位为 g/cm^3 , 与以 g/mL 为单位的规范相对应。部分数据也可以用 kg/dm^3 表示。

$$1 \text{ kg/m}^3 = 0.001 \text{ g/cm}^3 \text{ or } 1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/dm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

密度与温度的相关性

- 所有固体、液体和气体物质的密度都与温度相关。
- 态物质的密度不仅与温度相关, 还与压力相关。气体在“正常”压力下是可压缩的, 这就说明空气密度会随大气压力的变化而变化。
- 标准密度是标准条件下气体（或气体混合物）的密度：温度 $T=0^\circ\text{C}$, 压力 $p=101325 \text{ kPa}$ 。
- 通常, 遵循以下规律：温度越高, 密度越低。材料受热膨胀时, 体积增大, 密度减小。这种效应在固体中不如在液体中明显, 在气体中最为明显。
- 可以使用热膨胀系数计算给定温度区间的密度变化；表示物质的体积随温度的变化。（“密度与温度的相关性”见第 37 页）
- 在下面的图表中, 各种物质的密度随温度的变化进行了计算, 并以图形形式显示出来——纵轴显示（空气除外）每种情况下的密度范围为 0.06 g/cm^3 。
- 图表显示, 不同物质的密度与温度的相关性不同。就密度测量而言, 这意味着, 根据所需的测量精度, 必须非常精确地设置测试温度并保持恒定。
- 例如, 对于静水密度测定方法, 将水作为浮力介质比使用乙醇更为有利：例如, 当温度从 20°C 升高到 21°C 时, 水的密度仅降低 0.00021 g/cm^3 , 而乙醇的密度则降低 0.00085 g/cm^3 , 是原来的四倍多。这便意味着, 必须比使用水时更仔细地控制温度恒定性, 或者在实验期间温度变化的情况下, 预计密度测定会出现较大误差。

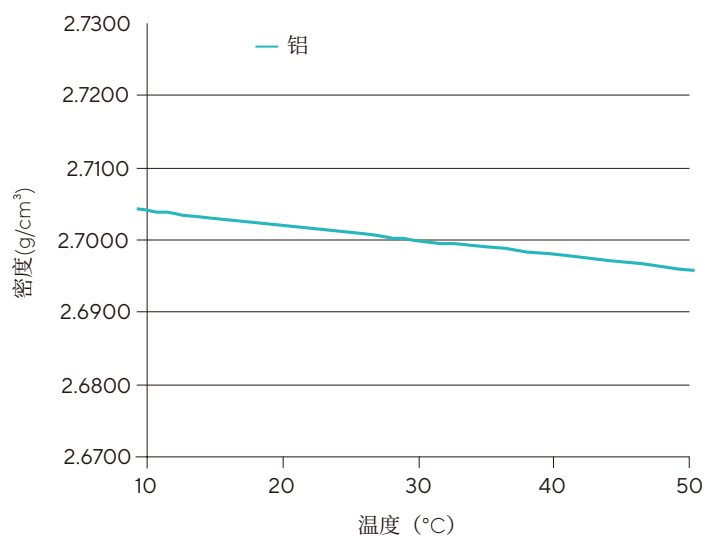
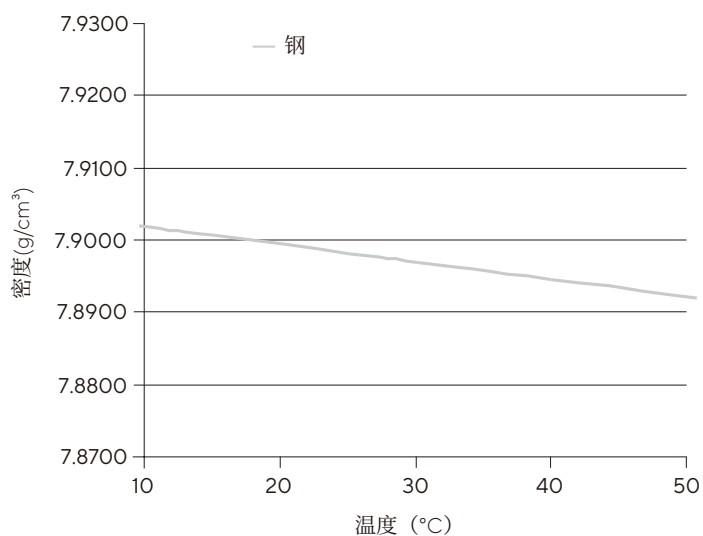
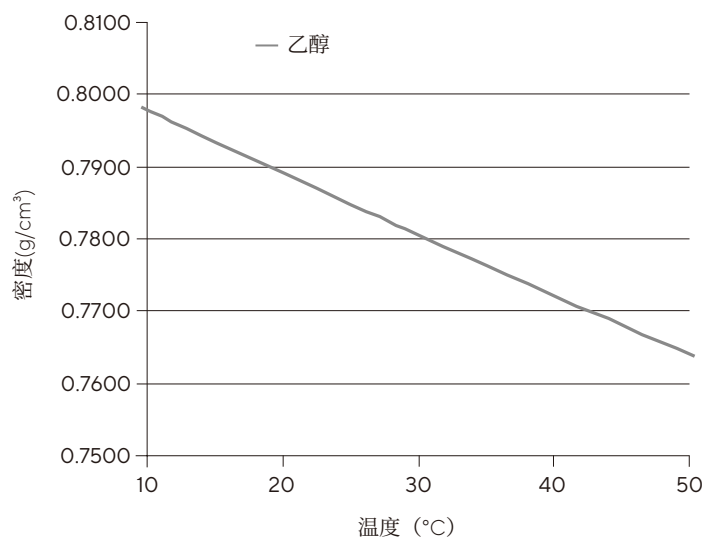
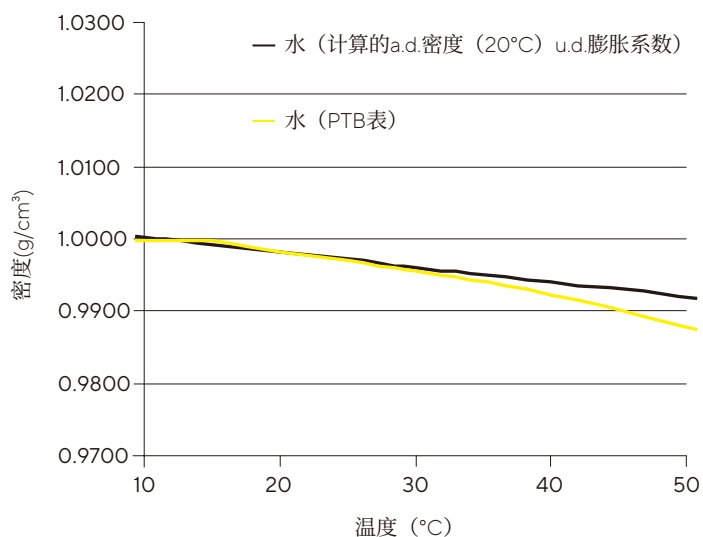
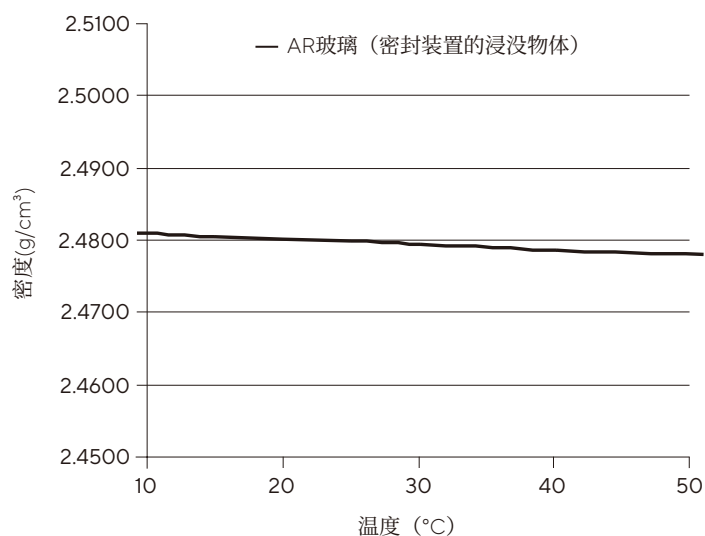
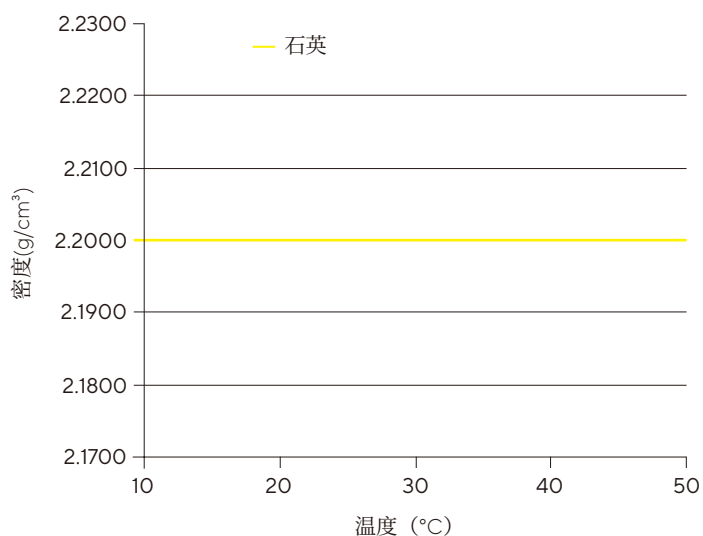


图1: 水和乙醇（上图）以及钢和铝（下图）的密度与温度的相关性



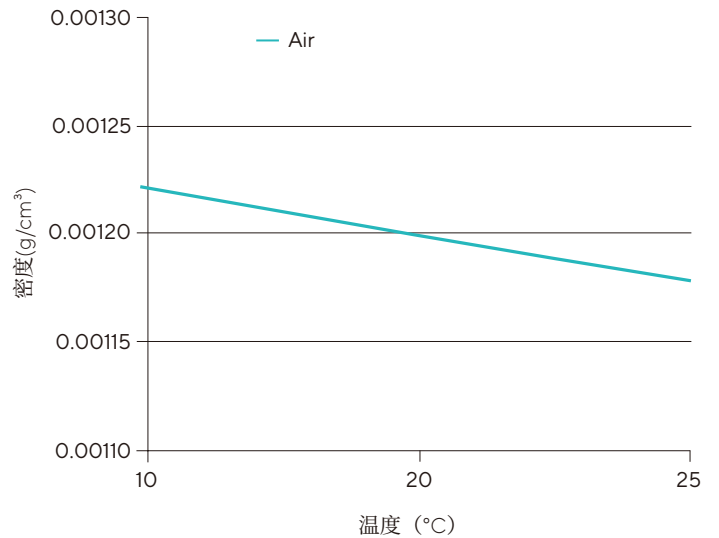
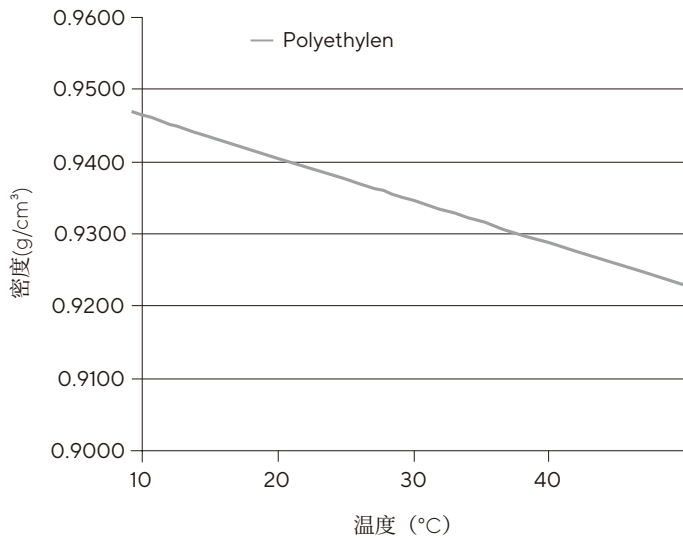


图2：玻璃、聚乙烯和空气的密度与温度的相关性

阿基米德原理

如果您想测定材料的密度，您需要根据密度的定义，测定样品的质量和体积

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

借助天平可以直接测定质量。

通常情况下，体积无法直接测定；但在精度要求低，并且存在立方体、长方体或圆柱体等简单几何体的情况下，其体积可以根据边长或高度和直径轻松计算。液体的体积可以用量筒或移液器测量——固体的体积原则上可以根据物体浸入充满水的量筒后的液位上升来确定。

由于难以精确测定体积（尤其是形状不均匀物体的体积），各种测定密度的方法都要走“弯路”。阿基米德原理描述了浸没在液体中的固体的重力（或质量）、体积与密度之间的关系：日常生活中，每个人都知道身体在水中比在空气中更轻——甚至身体在游泳池中也是如此。

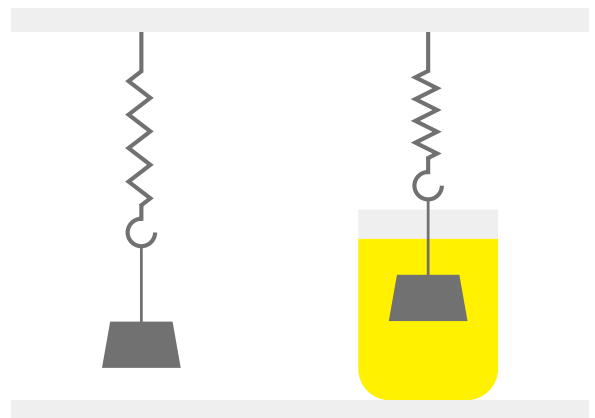


图3：空气中（左）和水中（右）的物体在弹簧秤上的力

这一点的原因以及各个变量之间的相关性将在以下章节中加以解释。由于静水压力，浸入液体中的物体受到来自各个方向的力的作用。水平方向上的力大小相等，方向相反，即相互抵消。

垂直方向上，距离液体表面越远，压力就越大。液体平面上的液体层在液体平面内产生的压力称为重力压力。根据液体密度、液柱高度和重力加速度计算得出：

$$p = \rho_{\text{fl}} \times g \times h$$

因此，深度 h 处作用在表面 A 上的力如下：
等式 3

$$F = p \times A = \rho_{fl} \times g \times A \times h$$

其中 $\rho_{fl} = 1\text{ g/cm}^3$ and $g \cong 10\text{ m/s}^2$

	h	p	A	F
1	1 cm	0.01 N/cm ²	1 cm ²	0.01 N
2	10 cm	0.1 N/cm ²	1 cm ²	0.1 N
3	50 cm	0.5 N/cm ²	1 cm ²	0.5 N

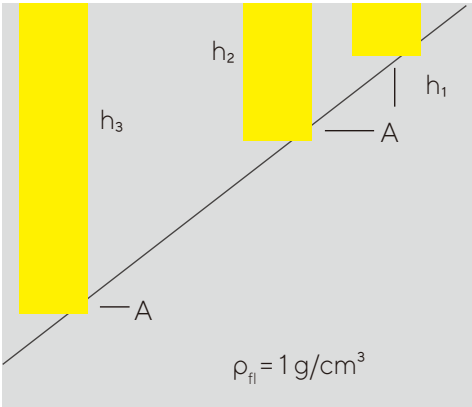


图4：液体中的压力过程

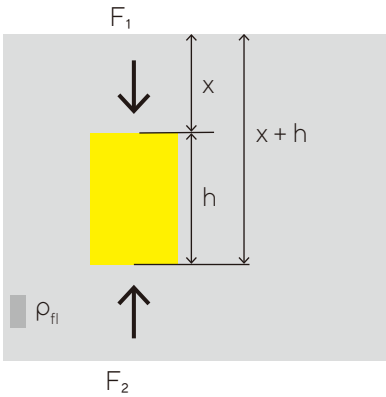


图5：浮力的生成

由于表面上的重力压力，力 $F_1 = A \times x \times \rho_{fl} \times g$ 作用于完全浸没在液体中的底面 A 的物体表面。

作用力 $F_2 = A \times (x+h) \times \rho_{fl} \times g$ 作用于底部。
作用在物体上的合力是由这两种力的差值产生的：

等式 4

$$\begin{aligned} F_{res} &= F_2 - F_1 \\ &= [A \times (x+h) \times \rho_{fl} \times g] - [A \times x \times \rho_{fl} \times g] \\ &= A \times (x+h-x) \times \rho_{fl} \times g \\ &= A \times h \times \rho_{fl} \times g \end{aligned}$$

物体底面积和高度的乘积等于该物体的体积。同时，该体积对应于液体的排出量。

等式 5

$$(A \times h) = V_s - V_{fl}$$

因此，合力为

等式 6

$$F_{res} = V_{fl} \times \rho_{fl} \times g = F_B$$

它称为浮力，其中包含了您所需要的体积值。

观察浸没固体上的力与被其排开液体上的力的关系时，我们可以看到：在垂直方向上，向下的力 G_s 作用于物体，向上的浮力 F_B 也一样。合力为这两个力的差值 $F_{合} = G_s - F_B$ 。作用在物体上的浮力 F_B 对应于物体排出的液体量的重力 G_{r0} 。

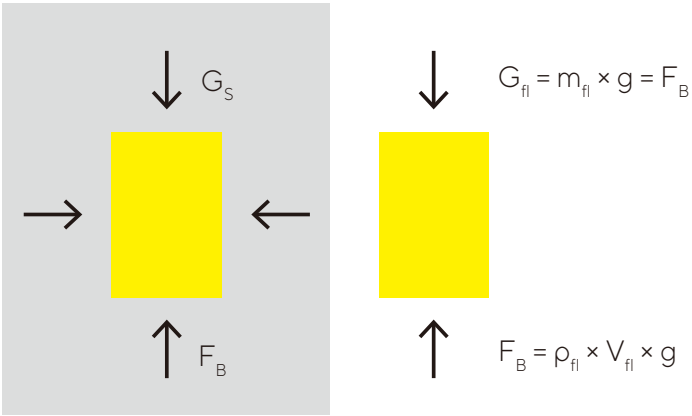


图6：根据阿基米德原理——左侧固体浸没在液体中，右侧为液体元素

即

等式 7

$$G_{\text{fl}} = m_{\text{fl}} \times g = \rho_{\text{fl}} \times V_{\text{fl}} \times g$$

当固体和液体元素处于平衡状态时, 浮力 F_{B} 必须等于(量级) 重力 G_{fl} , 即

等式 8

$$F_{\text{B}} = G_{\text{fl}}$$

因此, 浮力是由于流体中的压力条件而产生的。浮力与浸没在液体中的物体的重力相反。这说明物体在液体中比在空气中显得更轻。根据物体重力与浮力的比值, 浸没在液体中的物体可以沉到底部, 也可以浮起来。

当浮力小于重力 ($F_{\text{B}} < G_{\text{s}}$) 时, 物体会下沉到底部。在这种情况下, 固体的密度大于液体的密度 ($\rho_{\text{s}} > \rho_{\text{fl}}$)。

常用的浮力法密度测定方法通常是在这些条件下进行的。

当浮力等于重力 ($F_{\text{B}} = G_{\text{s}}$) 时, 物体保持完全浸没并漂浮在液体中。由于物体的体积等于排出液体的体积, 物体的质量等于排出液体的质量, 因此固体和液体的密度相等。这种情况适用于多种密度测定方法 (见第 17 页)。

当浮力大于重力 ($F_{\text{B}} > G_{\text{s}}$) 时, 物体会漂浮, 即上升到液体表面, 仅有部分物体浸入液体。直到其排开液体体积的重量等于其自身重量, 物体才会浸入液体中: 在物体上浮的情况下, 排开液体的体积小于固体体积 ($V_{\text{fl}} < V_{\text{s}}$), 液体的密度大于固体的密度 $\rho_{\text{fl}} > \rho_{\text{s}}$ 。这种情况下, 可使用比重计测定密度 (见第 18 页)。

重量法测定密度

基于阿基米德原理的密度测定方法

阿基米德描述的是浸没在液体中的固体的质量、体积和密度之间的关系, 可用于确定未知物质的密度。密度测定的难题在于准确测定样品材料的体积。固体完全浸没在液体中时, 根据实验安排, 固体的体积等于排出液体的体积。在这种假设下, 可以推导出液体和固体的密度于质量之间的以下一般关系, 其中不再明确涉及体积 (推导见第 37 页“附录”):

等式 9

$$\rho_{\text{s}} = \rho_{\text{fl}} \times \frac{m_{\text{s}}}{m_{\text{fl}}}$$

因此, 固体物质的未知密度可以用已知密度的辅助液体和两个质量测量值来确定

等式 10

$$\rho_{\text{fl}} = \rho_{\text{s}} \times \frac{m_{\text{fl}}}{m_{\text{s}}} \quad \text{resp.} \quad \rho_{\text{fl}} = \frac{m_{\text{fl}}}{V_{\text{s}}}$$

相反, 液体密度可以通过使用辅助固体的质量值和已知固体体积值来确定。

因此，可以用简单、准确的质量测定代替体积测量。

在某些情况，仍使用所谓的静水压天平或莫尔天平进行密度测量。莫尔天平是一种杠杆式天平，现已被作为实验室天平附件的密度仪广泛取代。必须对两种静水压称重方法进行基本区分。根据测试安排，天平显示的测量值具有不同的含义：在浮力法中（见图 7 和图 8），可测定液体中固体因浮力而减少的重量；在位移法中（见图 9），排开液体的重量或质量是直接确定的。

基于阿基米德原理的其他方法是用比重计测定密度（见第 18 页）和各种悬浮法测定密度（见第 17 页）。

浮力法

浮力法通常用于测定固体和液体的密度。测量液体中物体的表观重量，即重量减去浮力，然后根据此重量和空气中的重量计算密度。

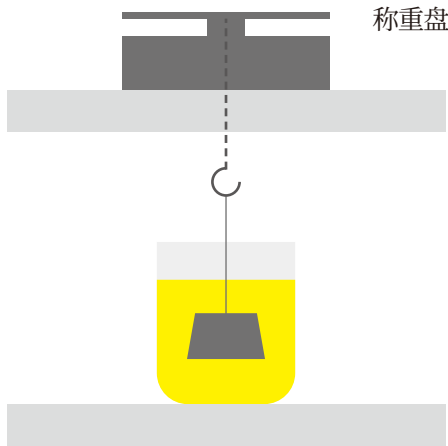


图7：使用地板下称重设备的浮力法的原理试验装置

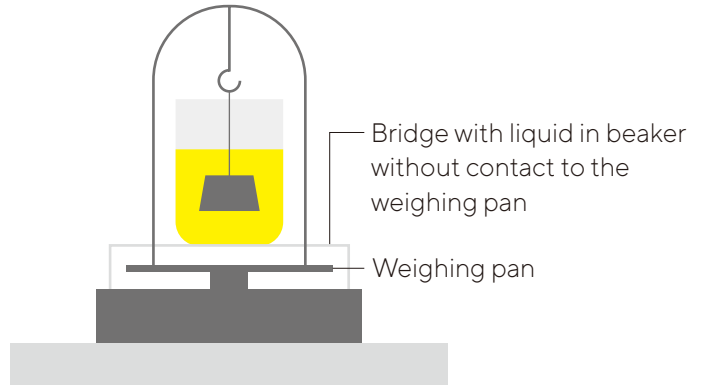


图8：使用带有悬挂装置框架的浮力法（用于液罐浸没物体和桥架）的原理试验装置

在图 7 和图 8 所示的实验装置中，天平的读数对应于因浮力而减少的浸没固体的质量（见图 3）。

也就是说，基于方程 $\rho_s = \rho_{fl} \times (m_s / m_{fl})$ ，已知在空气中称重的固体质量 $m_s = m_{(a)}$ 。液体的质量 m_{fl} 无法直接得知，但可以通过空气中固体重量 ($m_{(a)}$) 与液体中固体质量 ($m_{(fl)}$) 之差推导得出：

$$m_{fl} = m_{(a)} - m_{(fl)}$$

因此，用于测定固体密度的等式2变为：

等式 11

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{(fl)}}$$

若要测定液体密度，则再次根据空气中固体质量和浸没在液体中的固体质量的测量值计算 m_{fl} ($m_{fl} = m_{(a)} - m_{(fl)}$)，然后带入等式 3。由此便得到了用浮力法测定液体密度的关系式。

等式 12

$$\rho_{fl} = \rho_s \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{fl}} = \frac{m_{(a)} - m_{fl}}{V_s}$$

V_s 是浸没物体的已知体积，可以用于计算液体密度。因此，一种物质的密度可以通过两种重量来确定。

位移法

借助同样使用阿基米德原理的位移法，可以测定固体和液体的密度。

在位移实验中，固体所排开液体的质量直接决定于固体所排开液体的数量。

浸没固体时，液体容器直接放在称重盘上。在这种情况下，固体通常会悬挂在三脚架上。浸入液体中时，固体排开液体的体积为 V_{fl} ，密度为 ρ_{fl} ，质量为 m_{fl} 。作用在固体上的浮力为 $F_B = \rho_{fl} \times V_{fl} \times g = m_{fl} \times g$ 。由于固体的重量 $G_s = m_s \times g$ 由支架固定，且不加载天平，所以天平的显示直接对应于液体质量 m_{fl} ，但前提是天平与液体容器已事先涂上焦油。

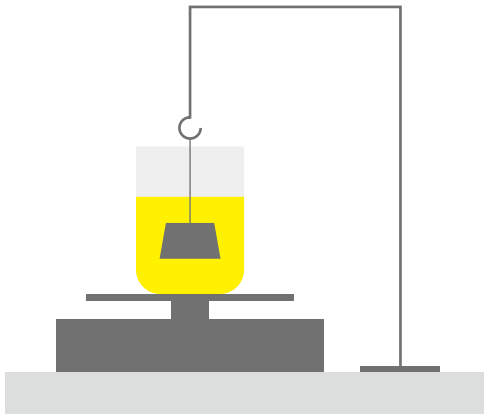


图9：位移法原理试验装置

也就是说，对于位移法，等式 2 和 3（见第 11 页）可以直接应用于密度测定。以下适用于固体密度：

等式 13

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl}}$$

以及液体密度测定

等式 14

$$\rho_{fl} = \rho_s \times \frac{m_{fl}}{m_s} = \frac{m_{fl}}{V_s}$$

如果使用体积 V_s 已知的柱塞，则只需一个测量值即可计算出液体的未知密度 ρ_{fl} 。

空气密度的测定

要将重量值转换为真实质量，需要用到空气密度值。

相对于 1.2 mg/cm^3 的标准密度，一天中的平均值可能会有 $\pm 0.05 \text{ mg/cm}^3$ 的变化。因此，当前必须测定用于质量测定的空气密度，相对测量不确定度 $< 5 \times 10^{-4}$ 。空气密度 ρ_a 取决于温度 T 、压力 p 和空气相对湿度 ϕ 。借助现有的不同精度的近似方程，可以计算空气密度并将其作为气压、温度和湿度的函数，也可以考虑空气中的 CO_2 含量。

此外，使用高分辨率天平，可以测定空气密度（误差约为 1%）。测量过程中使用了由不同密度材料（如铝和钢）制成的两种不同校准砝码。测定方法同样是以阿基米德原理为基础的。由于空气也是由物质组成的，所以空气中的物质和液体中的物质一样，都会受到浮力的作用。正如“阿基米德原理”一章所述，同样的定律也适用。

如果我们首先考虑真空中铝制圆柱体的密度 $\rho_{Al} \approx 2.7 \text{ g/cm}^3$ （图 10，左），则它与重量标准（ $\rho_N = 8.000 \text{ g/cm}^3$ ）平衡。

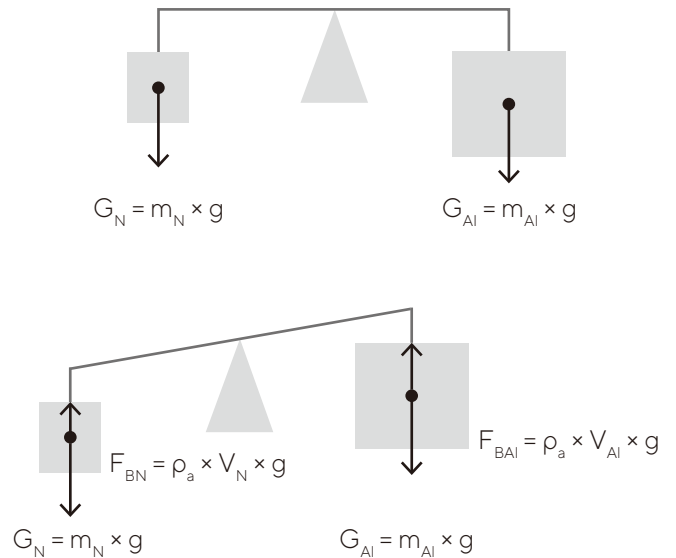


图10：真空（上方）和空气（下方）称重过程中空气浮力的影响

观察空气中相同的装置（图 10，右），铝制圆柱体和普通柱体不再平衡。原因在于浮力不同——由于不同材料的密度不同，故而体积也不同。

为了确定哪种质量 m_N 能够使铝制圆柱体 (m_{Al}) 在密度为 ρ_a 的空气中达到平衡, 所有作用力都被认为处于平衡状态:

等式 15

$$G_N - F_{BN} = G_{ai} - F_{BAi}$$

$$\underbrace{m_N \times g}_{\text{重力}} - \underbrace{\rho_a \times V_N \times g}_{\text{浮力}} = \underbrace{m_{Al} \times g}_{\text{重力}} - \underbrace{\rho_a \times V_{Al} \times g}_{\text{浮力}}$$

转换和带入以下等式后

$$V_N = \frac{m_N}{\rho_N} \quad \text{和} \quad V_{Al} = \frac{m_{Al}}{\rho_{Al}}$$

最终获得

等式 16

$$m_{Al} = m_n \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}$$

m_N 称为重量 W 。重量值通常对应于天平的显示值。

重量值并非恒定值, 而是取决于空气密度——也可以说是取决于天气。

$$W_{Al} = m_{Al} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

此关系式适用于空气密度测定装置的钢制圆柱体:

$$W_{St} = m_{St} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

从这两个方程可以推导出一个关系式, 用于测定空气密度 (见附录第 38 页):

等式 17

$$\rho_a = \frac{\frac{m_{Al} \times W_{St}}{m_{Al} \times W_{St}} - \frac{m_{St} \times W_{Al}}{m_{St} \times W_{Al}}}{\frac{\rho_{Al}}{\rho_{St}} - \frac{\rho_{St}}{\rho_{Al}}}$$

W_{St} 和 W_{Al} 为当前测量的重量值。

m_{St} 和 m_{Al} 是根据常规重量和根据关系式计算的已认证砝码的密度计算的

等式 18

$$m_{St} = M_{St} \times \frac{1 - \frac{1.2 \text{ kg/m}^3}{8000 \text{ kg/m}^3}}{1 - \frac{1.2 \text{ kg/m}^3}{\rho_{St}}}$$

和

$$m_{Al} = M_{Al} \times \frac{1 - \frac{1.2 \text{ kg/m}^3}{8000 \text{ kg/m}^3}}{1 - \frac{1.2 \text{ kg/m}^3}{\rho_{Al}}}$$

一个物体的常规重量 M 不是该物体本身的质量, 但对应于参考砝码 (质量标准) 的质量, 该质量在规定条件下与所考虑的物体保持平衡*。

利用空气密度测定装置中规定的砝码的常规重量值 (称为砝码的特征值)、砝码的材料密度以及当前重量值, 可以计算空气密度 ρ_a 。

计算空气密度的公式, 包括 $\rho_{St}=8.000 \text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_{Al}=2.700 \text{ g/cm}^3$ 的值, 均已导入一些赛多利斯天平的软件中。当前空气密度的值可以进行保存, 然后根据本章开头推导的公式, 将重量值转换为待称重材料的实际质量

$$m = W \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_x}}$$

* 温度 $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时质量标准下的密度: $\rho_N=8000 \text{ kg/m}^3$
 空气密度 $\rho_a=1.2 \text{ kg/m}^3$

使用比重瓶测定密度

比重瓶是具有精确确定体积的玻璃或金属容器，用于通过简单称量确定体积测定液体和分散体的密度，特别是可以用于测定粉末和颗粒的密度。它们还用于测定多孔固体的固体密度，因此必须将材料压碎至一定程度，以便在测定密度之前打开所有孔隙。

目前已有不同形状和标准化的比重瓶用于各个领域。在测量过程中，必须注意确保所有称重均在恒定温度下进行，并且液体中或颗粒之间没有空气。

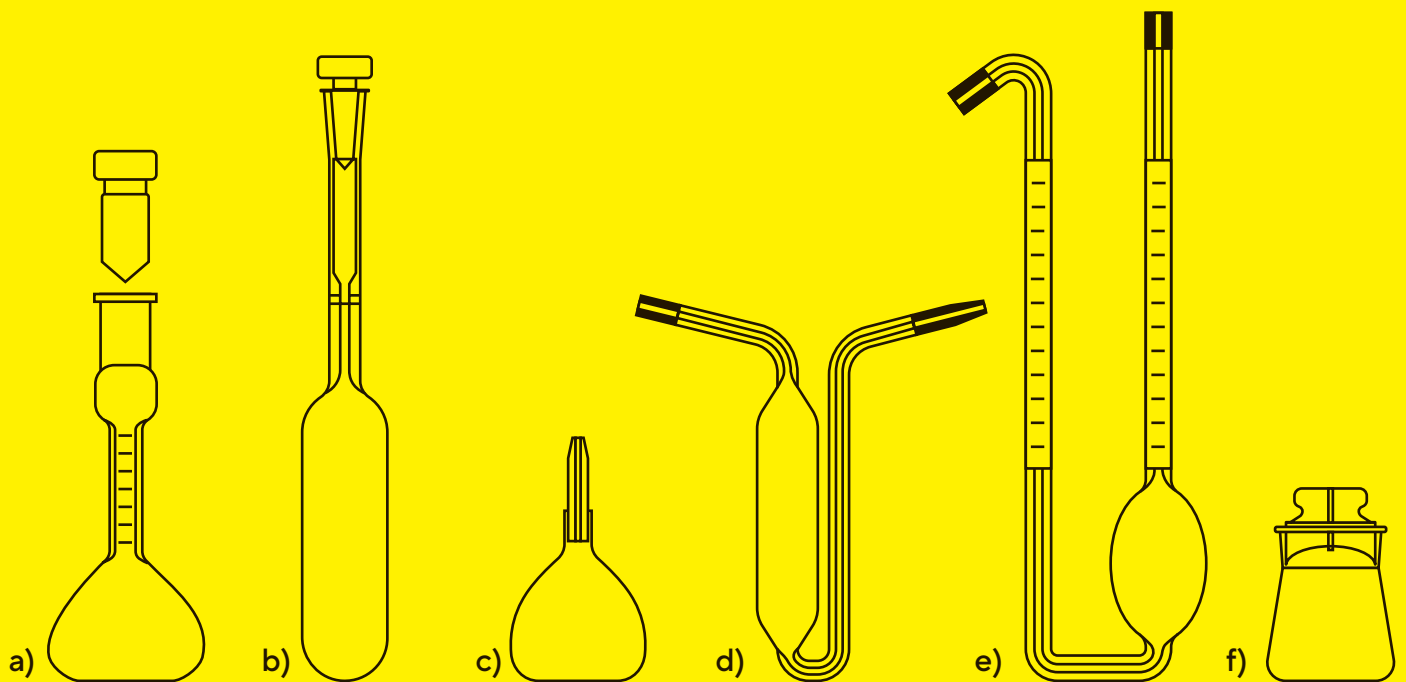


图11：实验室天平密度测定所用普通玻璃比重瓶的示例

注：Gay-Lussac (DIN EN 12797(c)) 和 Hubbard (DIN EN 12806(f)) 比重瓶用于固体密度测定；所示体积适用于塞子插入后的完全填充；Bingham (DIN 12807(b)) 和 Sprengel (ISO 12800(d)) 比重瓶上有一个环形标记，用于表示指示的体积；Reischauer (DIN ISO 3507(a)) 和 Lipkin (DIN ISO 3507(e)) 比重瓶具有用于读取体积的天平。

规定体积称重法（“升重”）

称量具有规定体积的样品量是一种十分简单的测定流动物质（液体、粉末、分散系统）密度的重量分析法。将待测样品装入体积已知的容器中，通过单次称重确定样品的（干燥后）质量。根据 $\rho=m/V$ ，可以轻松计算出密度。

在不同的工业部门，有不同的标准化或规范化容器，例如用于测定陶瓷工业中铸模材料（泥釉）密度的1L锥形容器。在石灰工业中，生石灰颗粒的堆积密度是通过标准化方法测定的。盛装样品材料的容器和填充程序得以准确定义。根据美国和英国标准，圆柱形不锈钢容器，即所谓的比重杯，具有不同的体积和不同的体积公差。

比重瓶法

比重瓶法是一种非常精确的方法，可以用来测定粉末、颗粒和难以流动的分散体的密度。与浮力法和位移法相比，这种方法更加劳动强度更大，而且明显更加耗时。

这里再次出现了精确测定粉末样品体积 V_s （用于固体 ρ_s 的密度测定）的问题。粉末或颗粒的显式体积测定基本上是通过进行三次称重操作和使用已知密度的辅助液体实现的。

等式 19

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

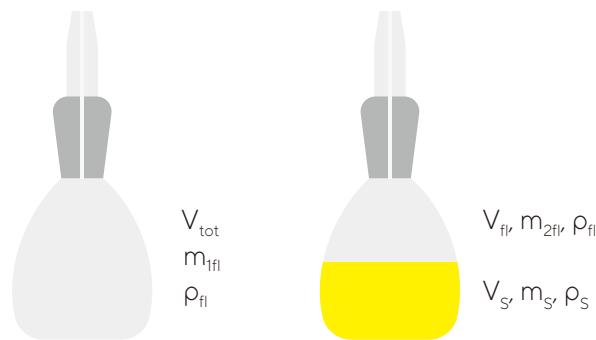


图12：含内容物的比重瓶

只能间接测定固体体积 V_s ：

等式 20

$$V_s = V_{tot} - V_{fl}$$

按步骤进行：

- 首先要测定完全充满液体的比重瓶的液体质量。根据液体密度，可以得到比重瓶的体积 V_{tot} 。

等式 21

$$V_{tot} = \frac{m_{tfl}}{\rho_{fl}}$$

- 随后（清空、清洁、干燥和加温比重瓶后），称重比重瓶（填充样品材料至约 $\frac{2}{3}$ ），从而获得所用粉末的质量 m_s 。

- 接下来，将装有样品材料的比重瓶完全装满液体，并再次称重。测定样品和液体的总质量 $m_{(fl+s)}$ 。

由此，便可计算出液体的质量 m_{2fl}

等式 22

$$m_{2fl} = m_{(fl+s)} - m_s$$

同时也可算出充满样品材料和充满液体比重瓶腔室的液体的体积 V_{fl}

等式 23

$$V_{fl} = \frac{m_{2fl}}{\rho_{fl}} = \frac{m_{(fl+s)} - m_s}{\rho_{fl}}$$

粉末样品的实际体积 V_s 是总体积 V_{tot} 与液体体积 V_{fl} 之间的差值。

$$V_s = V_{tot} - V_{fl}$$

等式 24

$$V_s = \frac{m_{tfl}}{\rho_{fl}} = \frac{m_{(fl+s)} - m_s}{\rho_{fl}}$$

如果将体积 V_s 带入初始等式 $\rho_s = m_s / V_s$ 中，变换后得到如下等式 *

等式 25

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{tfl} - m_{(fl+s)} + m_s} \quad \text{or} \quad \rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_2}{m_1 + m_2 - m_3}$$

$$*\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_s}{\frac{m_{tfl}}{\rho_{fl}} - \frac{m_{(fl+s)}}{\rho_{fl}} - \frac{m_s}{\rho_{fl}}} = \frac{m_s}{\frac{m_{tfl} - (m_{(fl+s)} - m_s)}{\rho_{fl}}} = \frac{\rho \times m_s}{m_{tfl} - (m_{(fl+s)} - m_s)}$$

质量为 m_1 、 m_2 和 m_3 ，按步骤顺序执行：

质量	
m_1	比重瓶中完全充满液体时的液体质量
m_2	样品材料的质量
m_3	比重瓶中填充的样品和液体的质量

这便意味着，借助于该方法，也可以“迂回”地通过多次质量测定替代用于密度测定的体积测量。



其他密度测定方法

还有一些同样以阿基米德原理为基础的其他密度测定方法。可以使用两种密度不同的固体（例如不同金属的两种重量），确定空气的密度。

最后，密度可以通过被调查材料的放射性辐射衰减来确定。

辐射吸收取决于材料的质量吸收系数、层厚和密度。如果已知相应的量和物理关系，就可以计算出物质的密度。如果是磁性样品，还可以利用磁力来确定固体或液体的密度。

U形管振荡法|振荡法

U形管振荡法是一种广泛用于测定均质液体密度的测量方法。这种测量方法不适用于悬浮液或乳状液，因为它们由多个相组成，可能会分离。

待检样品被置于测量装置（通常是弯曲成 U 形的玻璃管）进行机械振荡。振荡的固有频率与填充样品的振荡器（U 形管质量之间的物理关系）可用于计算样品密度。仪器必须使用已知密度和粘度与样品液体相似的液体进行校准。

悬浮法

悬浮法使用了阿基米德原理，即悬浮液和悬浮固体密度相等的特殊情况。

可以通过调整试验液体的密度来测定固体密度，从而使样品达到悬浮状态。可以通过改变温度来调整试验液体的密度，精确了解试验液体密度随温度的变化。液体的密度设置也可以通过混合两种密度不同的液体来确定，然后通过液体的混合比来测定密度，或者必须通过振荡 U 形管法(见第 17 页)或位移法来测定密度。

密度梯度柱

在密度梯度柱中，两种密度不同的液体在玻璃管中层叠在一起，便可通过不断扩散建立垂直密度梯度（密度随梯度柱的高度连续变化）。然后，不同密度的小型固体会漂浮在不同的高度。密度已知的彩色玻璃球可用于校准。

除了小型固体（如纤维、粉末颗粒、箔片）外，还可以分析液滴在密度梯度柱中的密度，但液体应不溶于梯度柱中的液体。

条纹法

如果一根充满液体并在底部水平移动的毛细管放置于另一种液体中，则只有当两种液体的密度相等时，液体才会水平流出毛细管。当流出液体的密度较低时，则会形成条纹并上升。如果流出液体的密度高于周围液体的密度，则会形成向下下沉的条纹。

比重计

比重计，也称为浮秤或液体比重计，是用于测定液体或分散体密度的简易测量仪器。这些是漂浮在表面上的浸没物体，根据液体的密度浸没到不同的深度。液体的密度值可以直接通过比重计天平上的浸入深度（排开液体量的体积）读取。某些应用中也用到了比重计，其天平上不显示密度数值，但直接显示水溶液中糖（糖量计）、酒精（酒精计）、电池酸或防冻液的浓度。

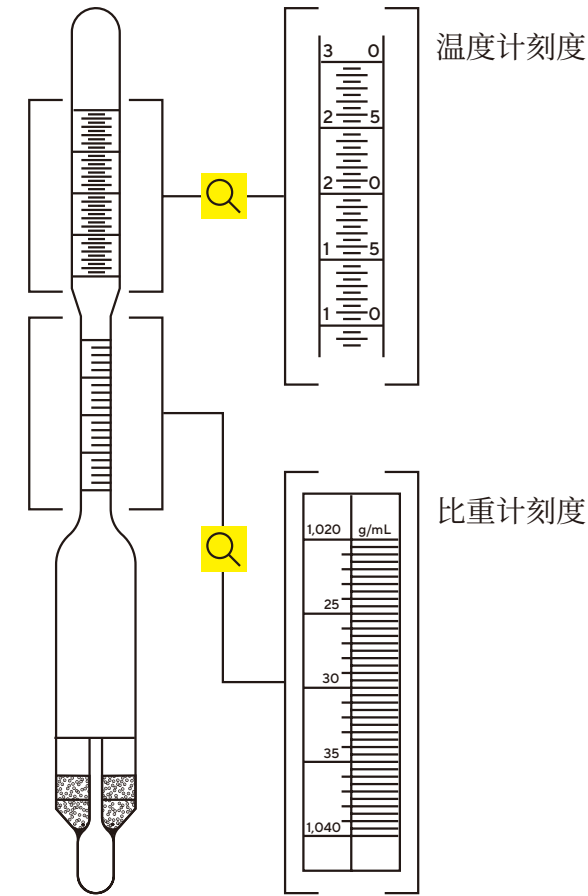


图13：符合DIN 10290标准、用于测定牛奶和脱脂牛奶密度的带集成式温度计的专用比重计——密度取决于牛奶的脂肪含量



应用示例

固体密度的测定

样品的特性

固体在大气压下体积和形状稳定。密度值得关注的固体有金属、玻璃或塑料。这些固体只能由一个或多个固相组成，其中一个固相可以嵌入另一个固相（玻璃纤维增强塑料），或者固相可以彼此牢固“联锁”，例如均质金属材料中的许多小晶体。

在取样进行密度测定时，一定要知道密度是否被确定为材料特性，或者密度测定是否被用作找出材料缺陷（例如材料中的裂纹或空洞）的简单方法。如何选择测量方法也取决于此。

合适的密度测定方法

适用于固体的密度测定方法有基于阿基米德原理的浮力法和位移法，也可以使用悬浮法。若要使用浮力法或位移法，则必须使用浮力液体，因为浮力液体不会与浸没样品发生反应，但会尽可能地浸湿样品。

悬浮工艺广泛应用于玻璃行业，例如：玻璃样品置于有机液体中，在室温下漂浮在有机液体上。由于所用液体密度与温度的相关性约为玻璃密度与温度的相关性的 100 倍，

因此可以通过缓慢提高系统温度使玻璃样品浮起，从而测定玻璃的密度。

使用位移法测定密度

所需工具和设备

- 天平
- 温度计
- 带有样品固定装置的支架
- 装有浮力液体（密度已知）的烧杯——所有不与水反应的材料均使用蒸馏水

样品制备、测试性能和评估

将装有液体的烧杯放在天平上，并将样品的夹持装置浸入液体中，浸入深度与使用样品称重时的深度相同。天平去皮。

- 将试样放在称重盘上烧杯旁边。测定了样品物体在空气中的质量 $m_{(a)}$ 。
- 将样品置于夹持装置中，并浸入液体中。天平直接显示排开液体的质量 m_{fl} 。

根据以下公式计算样品的密度 ρ

$$\rho = \rho_{fl} \frac{m_{(a)}}{m_{(fl)}}$$

多孔固体密度的测定

样品的特性

就多孔材料而言，密度与固体密度和纯密度、堆积密度、总孔隙度、开孔孔隙度或闭孔孔隙度等术语密切相关。

多孔固体由一个或多个固相和孔隙组成。孔隙是指充满空气（或其他气体）的空腔。它们或位于单个固体晶体之间，或在玻璃相（即非晶体刚性熔融相）中封闭为气泡。因此，基本上有两种类型的孔隙：开孔和闭孔。反过来，在开孔中，只有一部分属于所谓的流通孔（另一部分属于可浸渍孔）——对于这些名称，始终需要有关浸渍介质类型和环境条件的附加信息（例如，温度为 22 °C、压力为 2500 Pa 的水）。

孔隙的“直径”在 1nm 到 1mm 的范围内——尺寸大于 1 mm 的称为裂缝或空隙，小于 1nm 的称为晶格空隙。孔隙是许多不同材料结构的重要组成部分；它们的数量、类型、形状、取向、尺寸和尺寸分布对重要材料和最终产品的性能有着重要影响，例如屋面瓦的抗冻性或灰砂砖或加气混凝土的隔热性能。材料中的孔隙也会影响机械强度或耐腐蚀性。



图14：瓷板显微照片，放大倍率约为 80 倍。

注：左图是不同相之间有不规则形状气孔的瓷器，右图是在烧制过程中熔化的釉层，有闭合的球形气孔（气泡），最右边是用于显微制备的合成树脂包埋介质

在测定密度时，必须区分是要测定纯固体的密度，还是要测定固体（包括固体和孔隙）的密度；最后，孔隙度可能也是值得关注的数

- 纯固体密度（并非固体密度）简称为“密度”，以前通常称为“纯密度”： $\rho_t = m/V_{\text{固体}}$ 。因此，孔隙不包括在该密度值中。
- 堆积密度为样品质量和总体积的商： $\rho_b = m/V_b$ 。堆积密度是孔隙中固体和气体密度的平均密度。
- 开孔孔隙度是开孔的体积比与多孔体总体积的体积比： $\pi_a = V_a/V_b$ 。
- 闭孔孔隙度是闭孔的体积比与多孔体总体积的体积比： $\pi_f = V_f/V_b$ 。
- 总孔隙度是所有孔隙体积与材料总体积的百分比： $\pi_t = V_t/V_b$ 。
- 总孔隙度是开孔孔隙度和闭孔孔隙度之和： $\pi_t = \pi_a + \pi_f$ 。

合适的密度测定方法

适用于多孔固体的密度测定方法包括浮力法和位移法。固体的密度在将样品按孔径顺序研磨至平均粒度后，通过比重瓶法测定。

如果要测定多孔固体的堆积密度，有时会用蜡或乳胶护套覆盖试样（例如，参见 DIN EN ISO 2738），以便在试验过程中开孔不能吸收任何液体。随后，可根据浮力法进行密度测定。

使用浮力法测定密度（遵循EN 993-1）

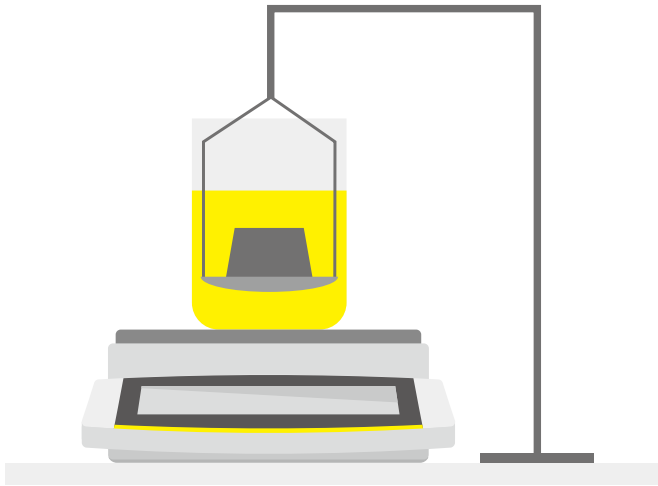


图15：浮力法（使用赛多利斯密度测定装置）测定密度的实验装置

所需工具和设备

- 温度为 $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的干燥箱
- 天平——误差限值为 0.01 g
- 放置在称量盘上的棒材——密度测定装置
- 带减压功能和压力表的真空装置
- 误差限值为 1°C 的温度计
- 浸渍液——所有不与水反应的材料均使用蒸馏水
- 干燥器

样品制备

标准中规定了样品的形状和尺寸（总体积在 50 cm^3 到 200 cm^3 之间）以及待测试样品的数量。

实验性能及评估

首先，将测试样品在干燥箱中干燥至质量恒定，然后在干燥器中冷却至室温，再在空气中称重确定质量。 $\rightarrow m_1$

在精确定义的条件下抽空测试样品，然后（在真空中）用浸渍液浸渍，直到根据试验条件用液体填充开孔。然后用静水压天平测定浸渍样品的表观质量。（或使用密度测定装置）。样品必须完全浸入含有浸渍液作为浮力介质的烧杯中。 $\rightarrow m_2$

必须测定浸渍液的温度。

最后，必须在空气中称重浸渍样品以确定其质量。称重前，必须用湿海绵清除粘附在表面上的任何液体，并且必须快速称重，以排除由于蒸发而造成的任何质量损失。 $\rightarrow m_3$

浸渍液体的密度 ρ_{fl} 必须通过测量确定或根据表中的温度确定。

堆积密度 ρ_b （单位： g/cm^3 ）根据以下公式计算：

等式 26

$$\rho_b = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_{\text{fl}}$$

开孔孔隙度 π_a （体积百分比）计算如下：

等式 27

$$\pi_a = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100$$

总孔隙度 π_t 根据以下值计算得出：

等式 28

$$\pi_t = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} \times 100$$

总孔隙度是开孔孔隙度和闭孔孔隙度之和（ $\pi_t = \pi_a + \pi_f$ ）；由此得出闭孔孔隙度 π_f ：

等式29

$$\pi_f = \pi_t - \pi_a$$

计算多孔样品密度的变量	
m_1	干样品的质量
m_2	液体中称量的浸没样品的表观质量
m_3	在空气中称量的浸没样品的质量
ρ_t	根据EN 993-2测定的纯固体密度 (或根据成分计算)
ρ_{fl}	浮力液体的密度
ρ_b	样品的堆积密度

在陶瓷中，开孔孔隙度不仅可以通过上述数量测量，还可以通过所谓的吸水率进行测量。吸水率（单位：%）是根据浸液样品和干样品的质量差相对于干样品的质量计算得出的。此外，该数值可用作比较值，用于将陶瓷材料分为“致密”和“多孔”类型。

有关孔隙类型和尺寸分布的更多信息，可借助压汞孔隙度计获得。多孔样品可在压力下充满汞，按一定步骤增加压力，便可在每种情况下（取决于孔径），使一定数量的孔隙充满汞。由此，便可得出从外部可进入的开孔的比例和孔径。

测定孔隙度、孔隙形状和大小的另一种方法是图像分析，即在显微镜下对抛光截面（类似于图 14 所示）进行定量统计评估。

粉末和颗粒密度的测定

样品的特性

可以将粉末理解为“通常尺寸小于 1 mm 的颗粒簇”。

颗粒由比粉末更粗的微粒组成，根据其特性，颗粒一词有不同的用法：

- 由凝聚的细粉末颗粒（“初级颗粒”）形成的“次级”颗粒构成的材料，
- 材料——例如，塑料或搪瓷领域的中间产品——从熔融阶段开始快速冷却，可能具有水滴状的形状。

合适的密度测定方法

只有比重瓶法可能用于测定粉末和颗粒的密度。

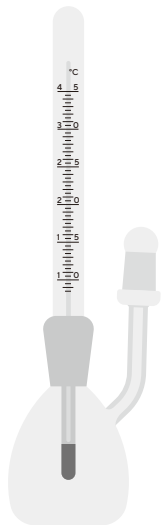


图16：带集成温度计的比重瓶

使用比重瓶法进行密度测定 (根据DIN EN ISO 18753)

所需工具和设备

- 蒸馏水和其他辅助液体，如乙醇
- 带温度计的比重瓶和带磨砂玻璃塞的侧臂
- 水浴锅
- 真空泵
- 误差限值为 0.0001 g 的天平

实验性能及评估

仔细清洁和干燥的比重瓶装满蒸馏水，并在规定条件下排空，然后在水浴中调温至 $\pm 0.1 \text{ K}$ 的精度。接下来便可使用比重瓶测量水的温度。最后，充满比重瓶。根据试验温度下的水的质量，计算比重瓶的体积： $V_{\text{比重计}} = m_{\text{水}} / \rho_{\text{水}}$

再次干燥比重瓶，然后按照上述程序填充乙醇，最后称重。然后，可以使用乙醇的质量和比重瓶的体积准确测定试验温度下乙醇的密度：

$$\rho_{\text{乙醇}} = m_{\text{乙醇}} / V_{\text{比重计}}$$

$$m_{\text{乙醇}} = m_1$$

称量在低于分解温度的 10 K 下干燥的粉末约 10 g（粉末密度在 2.5 g/cm^3 至 4 g/cm^3 之间），放入清洁、干燥的比重瓶 * 中。 $\rightarrow m_2$

在比重瓶中加入一些乙醇，使粉末湿润，然后再次抽空并摇晃，使气泡尽可能逸出。进一步在比重瓶中填充乙醇，使其达到试验温度，然后进行最终填充。测定粉末和乙醇的总质量。 $\rightarrow m_3$

根据公式进行评估

$$\rho = \rho_{\text{Ethanol}} \times \frac{m_2}{m_1 + m_2 - m_3}$$

样品物质的密度精确到 0.001 g/cm^3 。

*使用先进的带有集成软件的赛多利斯天平进行密度测定时，通过使用第二个适用的皮重储罐，可以省去在干燥箱中干燥和随后在干燥器中冷却这一耗时的过程，从而极大简化实验室的工作。

均质液体密度的测定

样品的特性

均质液体是相对简单的系统；与分散体不同，它们一直是单相系统。物质的混合物，例如酒精和水或糖和水，是一种物质在另一种物质中的溶液。实际溶液始终是透明的，溶解物质的颗粒以分子或离子的形式存在于溶剂中。

溶液的密度取决于溶解物质的浓度，即如果关系已知，可以通过密度测定计算浓度数据。

在 20°C 下，大多数液体的密度范围为 600 kg/m³ 至 2000 kg/m³ 或 0.6 g/cm³ 至 2.0 g/cm³。液体密度与温度的相关性比固体密度与温度的相关性更大。这意味着，在进行密度测量时，始终会涉及温度测量和 / 或样品的仔细调温。

合适的密度测定方法

多种方法可适用于测定液体的密度：比重计法、比重瓶法、振动计法、浮力法和位移法。此外，方法的选择取决于所需精度和可用样本量。

使用浮力法测定密度

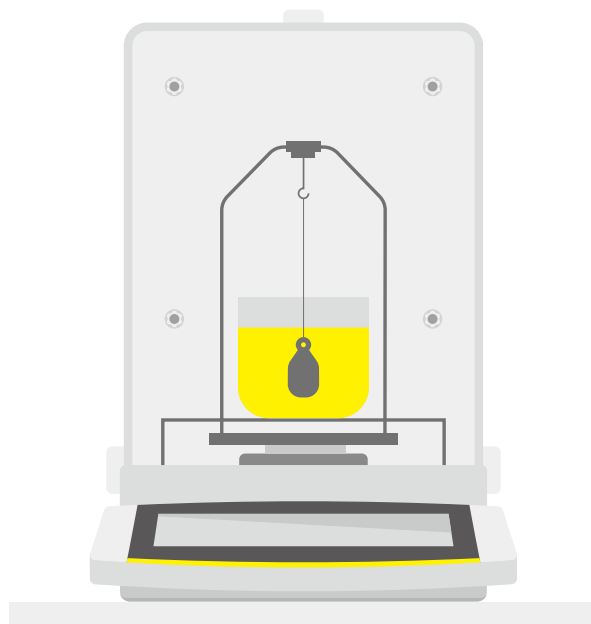


图17：浮力法测定液体密度

所需工具和设备

- 天平
- 密度测定装置
- 已知体积的浸没物体（赛多利斯密度测定装置为 10 cm³，见图 17）
- 温度计
- （可能有）用于恒温样品的水浴

样品制备、测试性能和评估

- 对准桥上的空烧杯，将浸没物体悬挂在密度测定装置的框架上。
- 将浸入水中的物体与天平连接起来。
- 将待测液体倒入烧杯中，直到液位高于玻璃体 10 mm。
- 天平显示的（负）测量值对应于样品液体中玻璃体的浮力。
- 将测量值除以浸没物体的体积，即可得到待测定的密度

$$\rho = \frac{m_{fl}}{V_{TK}}$$

分散体密度的测定

样品的特性

分散体系或分散体是两相或多相的混合物，彼此不相溶。一个相是连续相合的，即所谓的分散剂，另一个相（或其他多个相）以微小的孤立粒子的形式精细地分散在分散剂中。所谓的胶体分散体系的粒径通常在 1µm 到 1nm 之间。当分散粒子的尺寸大于 1µm 时，称之为粗分散体系；当粒子的尺寸小于 1nm 时，称之为分子分散体系。分散体有很多实例，但术语“分散体”是所有体系的总称，与所涉及各相的聚集状态无关。

分散样品类型	
悬浮液	液体中固体颗粒的混合物 示例：“分散体”油漆、陶瓷铸造化合物、去污粉、牙膏、墨水等
乳状液	两种相互不溶的液体的混合物，其中一种以小液滴的形式精细地分布在另一种液体中 示例：奶油、乳液、蛋黄酱、牛奶、经典的油醋沙拉酱等
泡沫	液体（或固体）中小气泡的混合物
薄雾	气相中小液滴的混合物
烟	气相中固体颗粒的混合物

在分散体系中使用术语“稳定性”有些不妥，因为严格来说，这些系统是不稳定的。这反映在它们需要进行分隔。然而，“稳定”悬浮液或乳状液通常用于描述在特定时间段内表现出恒定特性的系统。

合适的密度测定方法

根据样品材料的黏稠度，也可以考虑用于液体或固体的密度测定方法。用振荡 U 形管法测定密度并不太合适，因为许多相的边界会相互干扰，密度测定在这种测量方法中会受到粘度的轻微影响，此外，测量过程中振动容易让各相分离。此方法无法测定整个样品的平均值。

使用液体比重计时（原则上是可行的），必须小心确保悬浮液或乳状液没有任何分离迹象。

与液体或粉末的密度测定相对应，比重瓶也可用于分散体系。根据行业的不同，使用不同的容器，将样品物质填充至容器边缘（或标记位置）并称重。此处，测量过程中可能发生的样品分离不会导致测量误差。对于多种悬浮液和乳状液，浮力法或位移法均适用——必须注意，分散体不会分离，并且由于悬浮液具有流动特性，可以让浸没样品快速浸没。

使用位移法测定密度

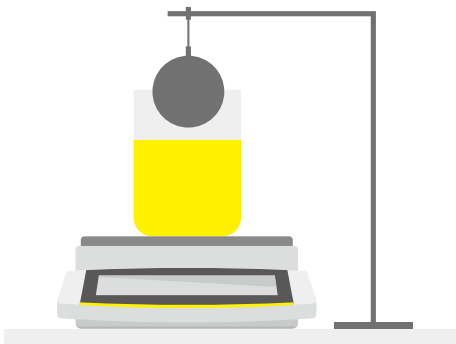


图18：使用伽玛射线球作为浸没物体（悬挂在天平旁边的三脚架上）的位移法密度测定

需工具和设备

- 天平
- 体积已知的浸没物体
- 三脚架
- 温度计
- （可能有）用于恒温样品的水浴

样品制备、测试性能和评估

将（已调温）样品倒入烧杯中。将烧杯放在天平上，并去皮重至零。将悬挂在三脚架上的浸没装置降低到样品物质中，并将其浸没到标记处。天平直接显示排出液体的质量（见第 13 页）。将测量值除以浸没物体的体积，即可得出样品物质的密度

$$\rho = \frac{m_{fl}}{V_{TK}}$$



密度测定的误差和精度

在前两章（浮力法和位移法）中，对两种静水压密度测定方法的基本原理进行了一般性解释，并推导了密度计算公式。

如果对测量精度要求高，则必须考虑实际测量条件。通常，天平并不直接指示样品的质量（如一般公式所示），而是指示样品在空气中的水分值。因此，必须将空气浮力修正后的重量值代入基本方程式中。

此外，使用浮力法时，必须考虑由于样品浸没导致液体上升后，样品支架浸没更深而产生的浮力的影响。

通常，在进行密度测定时，必须十分小心，尤其是要确保试验期间温度保持恒定。

当固体浸没在液体中时，不应该有气泡进入液体中——如果气泡粘附在固体上，则会导致测量值失真。

空气浮力修正

为了更准确地测定密度，必须考虑到天平无法直接测定样品的质量，而是测定其重量值。然而，这取决于压力以及与温度相关的空气密度，必须针对空气中浮力的影响进行校正。

固体 m 的质量与其在空气中的重量 W 之间的关系（即考虑到空气在待称量材料上的浮力），通常如下所示（ ρ_G = 法线密度）

等式 30

$$m = W \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}}$$

位移法试验程序

如果该等式用于根据位移法计算密度的关系式，则考虑到空气浮力，测定固体密度的等式如下（推导见附录，第 39 页）

等式 31

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl}} = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_s}{W_{fl}} + \rho_a$$

这种形式下的密度是在赛多利斯天平的集成软件中计算的。

浮力法

如果代入关系式

$$m = W \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}}$$

计算出使用浮力法测定密度的方程式中的 $m_{(a)}$ 和 $m_{(fl)}$

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{(fl)}}$$

经过数学变换，我们得到以下公式

等式 32

$$\rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_{(a)}}{W_{(a)} - W_{(fl)}} + \rho_a$$

用于计算考虑空气浮力的固体密度。

比重瓶法

考虑到空气浮力修正，密度测定公式如下

等式 33

$$\rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_2}{W_1 + W_2 - W_3} + \rho_a$$

该公式用于评估赛多利斯天平集成软件中的测量值。

样品支架浮力修正

浮力法

除了空气浮力外，精确测量还必须考虑悬浮液的额外升力，这是由于样品浸入后液体的上升会使金属丝比浸入样品之前更加深地浸入液体中。（如果天平与浸没在液体中的支架一起涂焦油，则样品支架的浮力并不包括在密度计算中）

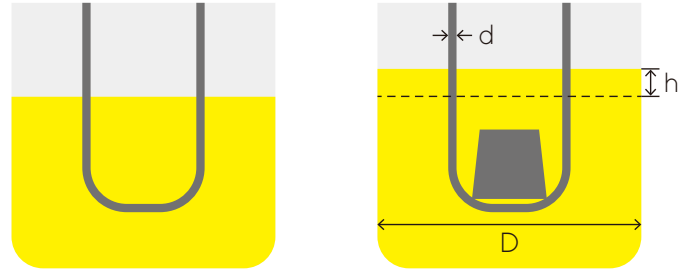


图19：样品浸入浮力液体后液体上升引起的浮力计算示意图

浮力法中密度测定装置的实验安排导致样品架的悬浮金属丝由于容器中液体的上升而比原来下沉得更深。也就是说，随着金属丝下降“更多”，可以计算出额外的浮力，并且在校正结果时必须考虑这些浮力。

容器中液体随直径 D 增加的体积对应于图 19 中的体积 V_{fl}

等式 34

$$V_{fl} = \frac{\pi \times D^2}{4} \times h$$

样品的体积 V_s 为

等式 35

$$V_s = \frac{m_{(a)} - m_{(fl)}}{\rho_{fl}}$$

这两个体积是相同的，即 $V_{fi}=V_s$ 。通过代入上述关系式（ h 表示液体上升高度），可得到

等式 36

$$h = \frac{(m_{(a)} - m_{(fi)}) \times 4}{\rho_{fi} \times \pi \times D^2}$$

作用在液体层 h 中的两条直径为 d 的金属丝上的浮力 F_{BD} 为

等式 37

$$F_{BD} = \rho_{fi} \times V_D \times g = \rho_{fi} \times (2 \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times h) \times g$$

代入 h 后，得到

$$F_{BD} = \rho_{fi} \times 2 \times \frac{\pi \times d^2}{4} \times \frac{(m_{(a)} - m_{(fi)}) \times 4}{\rho_{fi} \times \pi \times D^2} \times g$$

等式 38

$$F_{BD} = \frac{\rho_{fi} \times 2 \times \pi \times d^2 \times (m_{(a)} - m_{(fi)}) \times 4 \times g}{4 \times \rho_{fi} \times \pi \times D^2}$$

$$= 2 \times \frac{d^2}{D^2} \times (m_{(a)} - m_{(fi)}) \times g$$

也就是说，金属丝产生的浮力与金属丝和烧杯的直径比成正比。

除了待测样品的浮力外，测量值还包含“金属丝浮力”的一部分；因此，必须从测量值中减去金属丝浮力，以便仅计算样品的浮力 F_{BS} （校正）：

等式 39

$$F_{BS}(\text{corr}) = \left[(m_{(a)} - m_{(fi)}) - (2 \times \frac{d^2}{D^2} \times (m_{(a)} - m_{(fi)})) \right] \times g$$

$$F_{BS}(\text{corr}) = \underbrace{(1 - 2 \times \frac{d^2}{D^2})}_{\text{Correction factor}} \times (m_{(a)} - m_{(fi)}) \times g$$

如果已知金属丝和烧杯的直径，可以计算出必须与测得的浮力相乘的系数。在赛多利斯密封组件中，金属丝直径为 $d = 0.7 \text{ mm}$ ，烧杯直径为 $D = 7.6 \text{ mm}$ ，样品支架带有 2 根金属丝。

则校正系数为

$$\text{Corr} = 1 - 2 \times \frac{d^2}{D^2} = 1 - 2 \times \frac{0.7^2}{7.6^2} = 0.99983$$

金属丝直径 d 越小，烧杯直径 d 越大，悬浮金属丝数量越少，则校正系数越接近数值 1，即可以忽略校正。在地板下称重操作的密度测定中，可以很容易地考虑到这些条件。

回到使用浮力法测定密度的公式：考虑到金属丝的浮力修正

$$\rho_s = \rho_{fi} \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{(fi)}}$$

$$\rho_s = \rho_{fi} \times \frac{m_{(a)}}{[m_{(a)} - m_{(fi)}] \times \text{Corr}}$$

或在同时考虑空气浮力的情况下：

等式 40

$$\rho_s = (\rho_{fi} - \rho_a) \times \frac{W_{(a)}}{[W_{(a)} - W_{(fi)}] \times \text{Corr}} + \rho_a$$

此密度测定公式用于赛多利斯天平中集成的软件。赛多利斯密度测定装置可以使用 $\rho_a = 0.0012 \text{ g/cm}^3$ 的标准空气密度预设值和 0.99983 的校正系数。或者，可以应用用户计算出的修正值。

位移法

由于样品物体的夹持装置或悬浮液的螺纹或钢丝浸没而产生的额外浮力引起的误差，可以从试验开始时消除，方法是在空载称量或液体容器装料期间，以及随后使用样品称量期间，将其完全浸入液体中。

此外，适当的实验条件也会使校正系数 ≈ 1 （容器直径大，支架直径小，如果可能，仅使用一个支架）。考虑到空气浮力和样品悬浮校正系数，采用位移法计算固体密度的方程式为：

等式 41

$$\rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_{(a)}}{W_{(fl)} \times \text{Corr}} + \rho_a$$

这是赛多利斯天平集成软件中使用的公式。基本设置的校正系数为 1.0，空气密度为 $\rho_a = 0.0012 \text{ g/cm}^3$ 。也可以应用用户计算出的修正值。

当使用位移法测定液体（包括油漆和清漆）的密度时，通常会使用金属浸没球（伽马射线球），其杆上有锥状物（见图 20），直到计算出浸没物体标称体积的中心。已有针对不同数量级的待测液体表面张力的设计。这些涉及都考虑了杆周围形成的液体膨胀的影响。

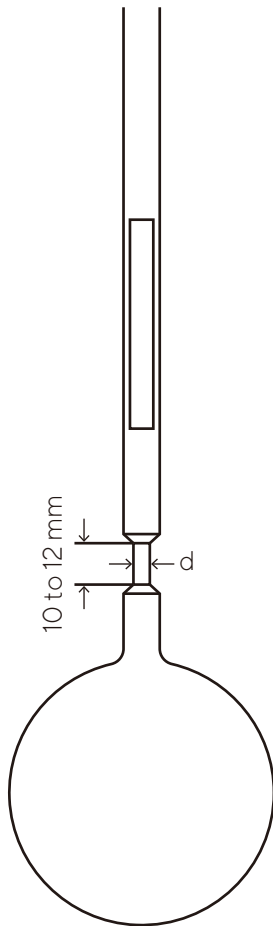


图20：按照DIN EN ISO 2811第3部分的规定，根据位移法测定油漆和清漆密度的浸入球

系统错误的避免

静水压试验程序

为了尽可能降低用各种静水压法测定密度时的误差，应特别注意以下几点：

- 在整个实验过程中，温度必须保持恒定。例如，对于作为浮力介质的水，0.1°C的温度变化会导致乙醇的密度变化0.0002至0.0003 g/cm³，对于乙醇而言，则约为0.0001 g/cm³。
- 天平必须精确放置在中心位置，以尽可能降低角载荷误差。当使用赛多利斯密封装置（样品容器位于框架顶部）在空气中称量时，框架的形状和在框架底板外侧两点处施加的力会导致样品偏离中心时的扭矩大于使用“正常”称量盘并偏离中心相同位置时的扭矩。
- 浸入液体后，样品本身或样品架上不得出现气泡。这些气泡会产生额外的浮力，从而使称重结果失真。为了避免这种情况，可以在实际测量之前在单独的容器中浸湿样品，也可以在超声波水浴中浸湿。
- 在样品架被浸没的情况下进行测量之前，可以通过将天平去皮重，忽略由于液体粘附在样品架金属丝上而导致的误差。
- 空气浮力导致密度误差≈0.0012 g/cm³（对应于正常条件下的空气密度）——因此，计算密度时应使用考虑空气浮力的公式（见第 26 页）。
- 由于将样品浸入容器中，所以液位会上升，样品支架的金属丝产生额外的浮力。根据所用容器的直径和支架金属丝的直径和数量，可以修正此额外的浮力。（见第 26 页）。

比重瓶法

为了尽可能降低比重瓶法测定密度时的误差, 应特别注意以下几点:

- 在整个试验过程中, 温度必须保持恒定, 否则必须对样品进行仔细的恒温处理。例如, 对于作为辅助液体的水, 0.1 °C 的温度变化会导致密度变化 0.00002 至 0.0003 g/cm³, 对于乙醇而言, 则约为 0.0001 g/cm³。
- 辅助液体或样品本身不得有气泡。
- 空气浮力导致密度误差 $\approx 0.0012 \text{ g/cm}^3$ (对应于正常条件下的空气密度)——因此, 计算密度时应使用考虑空气浮力的公式。(“空气浮力修正”见第26页。)

在仔细工作的情况下, 比重瓶法是一种可用于非常准确地测定材料密度的测量方法。

误差计算

若工作仔细且可以避免出现上述系统误差, 可以根据误差传播规律计算密度测定误差。密度误差 $\Delta\rho$ 主要是基于质量测定的测量误差。

对于根据多个测量值计算的量, 测定总误差 ΔF 的一般规则为:

在总和 (和差值) 的情况下, 则为绝对单个误差平方相加:

等式 42

$$\Delta F = \sqrt{\Delta F_1^2 + F_2^2 + \dots}$$

在乘积 (和商) 的情况下, 则为相对的单个误差平方相加。(相对误差是与测量值相关的绝对误差):

等式 43

$$\Delta F = \sqrt{\left[\frac{\Delta F_1}{F_1}\right]^2 + \left[\frac{\Delta F_2}{F_2}\right]^2 + \dots}$$

浮力法

通过浮力法测定固体密度时, 适用于以下关系式:

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_{(a)}}{m_{(a)} - m_{(fl)}}$$

或

$$\rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_{(a)}}{[W_{(a)} - W_{(fl)}] \times \text{Corr}} + \rho_a$$

由于样品架的校正系数和空气密度对密度误差没有明显影响, 因此在误差计算中不需要进行考虑。

应用误差计算的基本规则时, 首先要计算分母的绝对误差 $\Delta[m_{(a)} - m_{(fl)}]$

等式 44

$$\Delta[m_{(a)} - m_{(fl)}] = \sqrt{\Delta m_{(a)}^2 + m_{(fl)}^2}$$

然后计算总相对密度误差 $\Delta\rho/\rho$

等式 45

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left[\frac{\Delta\rho_{fl}}{\rho_{fl}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta m_{(a)}}{m_{(a)}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta m_{(a)} - m_{(fl)}}{m_{(fl)}}\right]^2}$$

在空气中称重的总误差 ($\Delta m_{(a)}$) 是再现性和一位数线性误差的总和, 由于使用了差重称量, 故总误差与天平类型无关。

假设在液体中称重的最大误差 ($\Delta m_{(a)} - \Delta m_{(fl)}$) 比在空气中称重的误差平均大 10 倍——这一假设基于使用浮力法进行密度测定的大量测量结果。

关于液体密度误差, 对于水采用 0.0003 g/cm^3 , 乙醇采用 0.00009 g/cm^3 , 即温度计误读 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 或测量过程中温度变化为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

下图 (见图 21 至图 26) 显示了在水或乙醇作为浮力介质的情况下, 使用浮力法测定的固体密度的相对误差与样品大小和样品密度的关系, 以一些具有不同可读性和范围的赛多利斯天平为例。

结果表明, 密度测定的误差明显取决于样品的密度, 样品密度越小, 最终结果的误差越大。

计算 $\Delta\rho/\rho$ 时

$$m_{(fl)} = m_{(a)} \times \left[1 - \frac{\rho_{fl}}{\rho_s}\right]$$

用于计算 $m_{(fl)}$, 其中 ρ_{fl} 为水的密度 (1.0 g/cm^3), 并假设乙醇的密度为 0.789 g/cm^3 。

另一张图 (见图 27) 显示了使用赛多利斯密度测定装置的玻璃体, 在液体密度为 0.5 和 2.2 g/cm^3 之间时, 通过浮力法测定液体密度的误差。

浸没体的体积为 $(10+0.01) \text{ cm}^3$, 密度为 2.48 g/cm^3 , 且水中浮力公差为 0.5 mg 。同样, 密度误差取决于被测样品的密度值。

天平的可读性: 1 mg

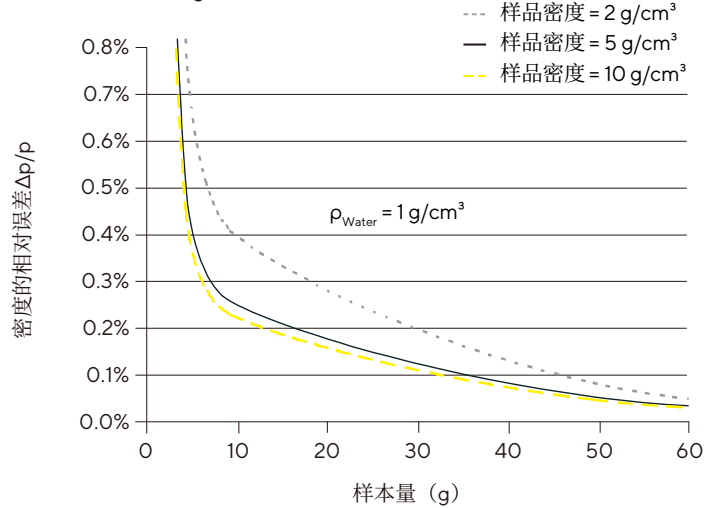


图21: 浮力法测定固体密度——密度的相对误差与样本大小和样本密度的关系

天平的可读性: 0.1 mg

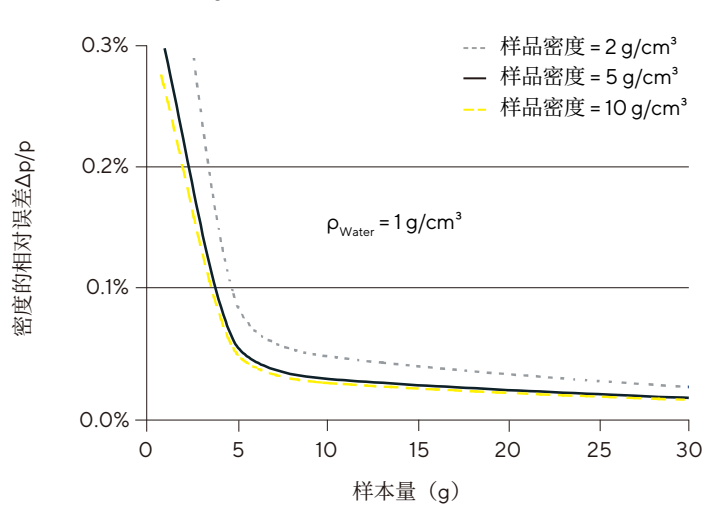


图22: 浮力法测定固体密度——密度的相对误差与样本大小和样本密度的关系

天平的可读性: 0.1 mg

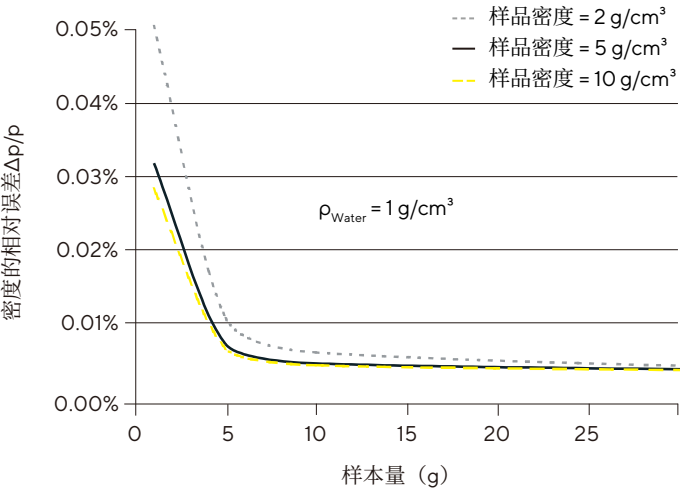


图23: 浮力法测定固体密度——密度的相对误差与样本大小和样本密度的关系

天平的可读性: 0.1 mg

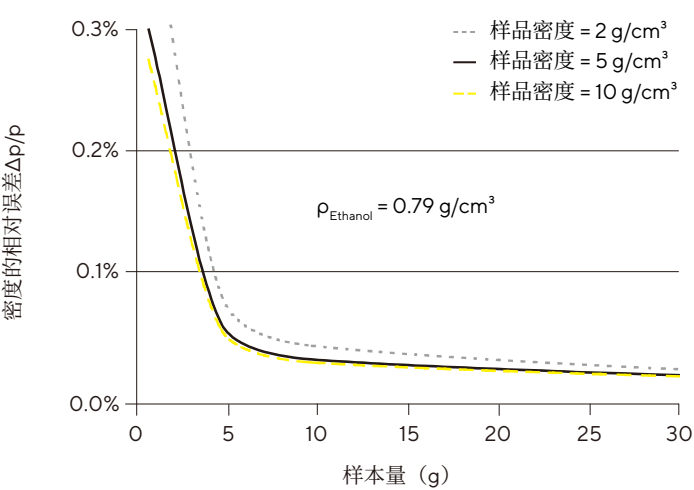


图25: 浮力法测定固体密度——密度的相对误差与样本大小和样本密度的关系

天平的可读性: 1 mg

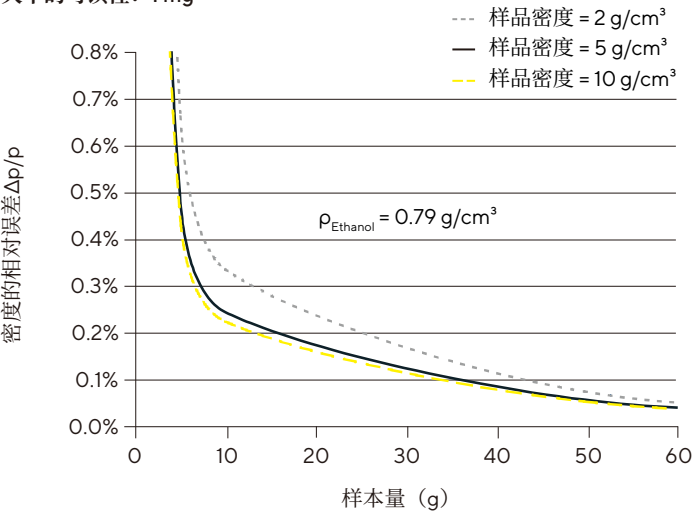


图24: 浮力法测定固体密度——密度的相对误差与样本大小和样本密度的关系

天平的可读性: 1 mg

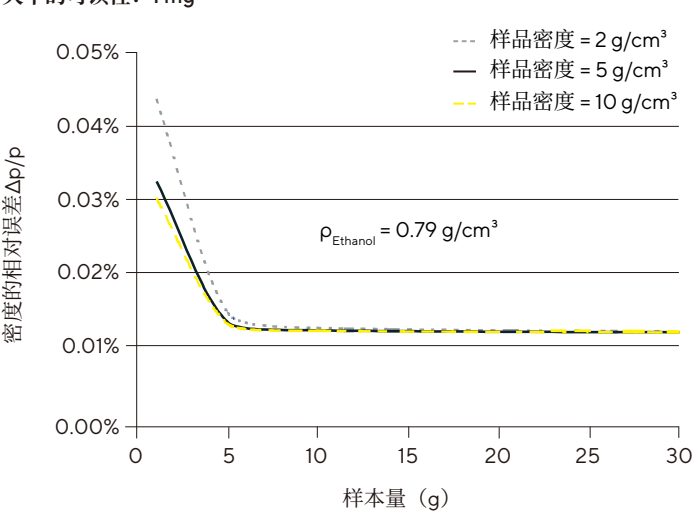


图26: 浮力法测定固体密度——密度的相对误差与样本大小和样本密度的关系

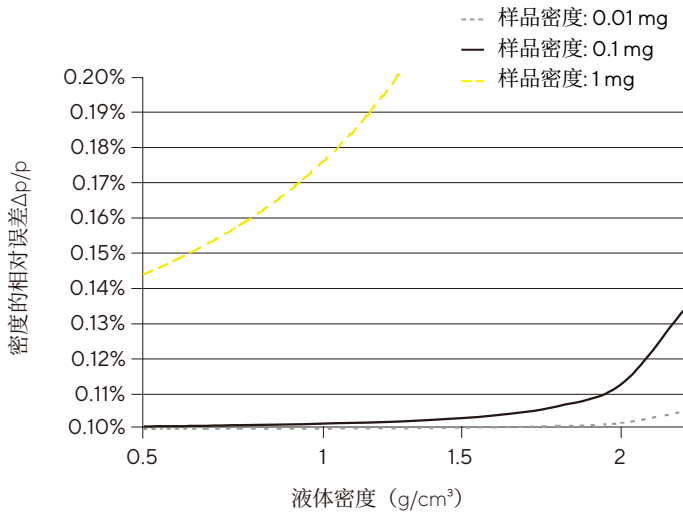


图27：浮力法测定液体密度——密度的相对误差与样品密度的函数关系以及用赛多利斯密度测定装置测定密度的天平的可读性

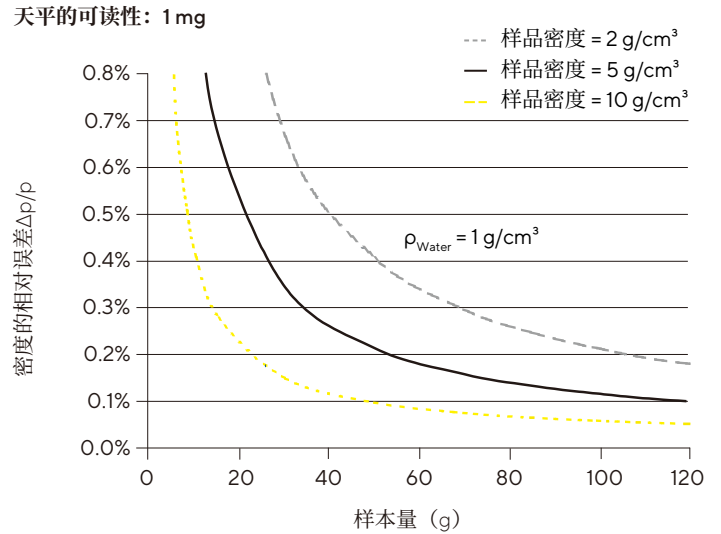


图28：位移法测定固体密度——密度的相对误差与样本大小和样本密度的关系

位移法试验程序

以下关系式适用于通过位移法测定固体密度，其中，假定空气密度 ρ_a 为常数，且不包括在误差计算中。

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl}} = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_s}{W_{fl}} + \rho_a$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left[\frac{\Delta\rho_{fl}}{\rho_{fl}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta m_{(a)}}{m_{(a)}}\right]^2 + \left[\frac{m_{(fl)}}{m_{(fl)}}\right]^2}^*$$

具备

$$*m_{fl} = \frac{\rho_{fl}}{\rho_s} \times m_{(a)}$$

与浮力法相比，值得注意的是（见图 21 至图 26），浮力法测定固体密度的结果显示，与位移法相比，误差较小（见图 28）。同样可以明显看出，在浮力法中，误差随样本密度的增加而减小，而在位移法中，误差随样本密度增加而增大。

比重瓶法

使用比重瓶法测定密度时，适用以下关系式

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_1}{m_1 + m_2 - m_3} \quad \text{or} \quad \rho_s = (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{W_2}{W_1 + W_2 - W_3} + \rho_a$$

空气密度再次忽略不计。重量值的总误差是称重类型的再现性和一位数线性误差的总和。液体密度的误差，采用 0.00003 g/cm³ 的值，即温度计误读 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 或温度变化 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。水作为辅助液体时，液体密度为 1.0 g/cm³。

首先，计算分母 $\Delta[m_1 + m_2 - m_3]$ 的误差

$$\Delta[m_1 + m_2 - m_3] = \sqrt{\Delta m_1^2 + \Delta m_2^2 + \Delta m_3^2}$$

然后计算总相对密度误差 $\Delta\rho/\rho$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \sqrt{\left[\frac{\Delta\rho_{fl}}{\rho_{fl}}\right]^2 + \left[\frac{\Delta m_2}{m_2}\right]^2 + \left[\frac{\Delta(m_1 + m_2 - m_3)}{(m_1 + m_2 - m_3)}\right]^2}$$

对于具有不同可读性和称量范围的天平，以下图表（见图 29 至图 31）显示了密度测定的相对误差随样品数量和样品密度的变化。

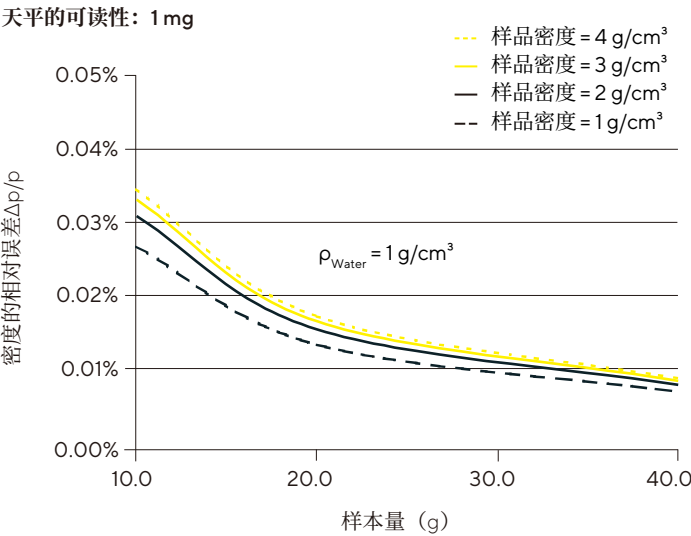


图29: 使用比重瓶法测定密度——密度的相对误差与样品数量和样品密度的关系

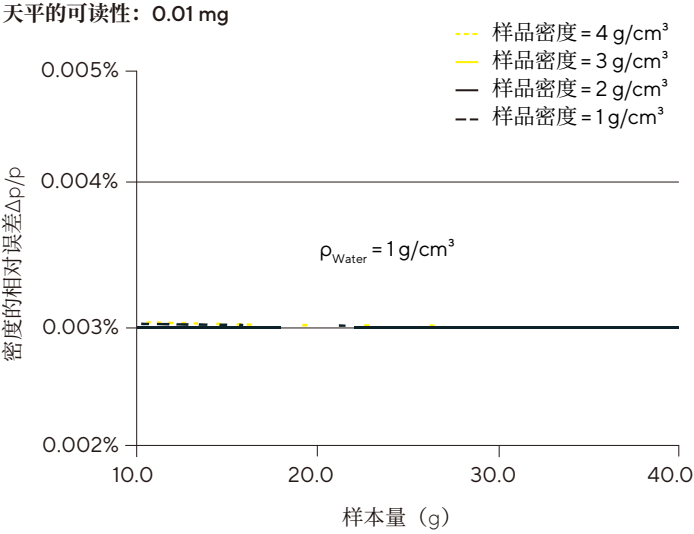


图31: 使用比重瓶法测定密度——密度的相对误差与样品数量和样品密度的关系

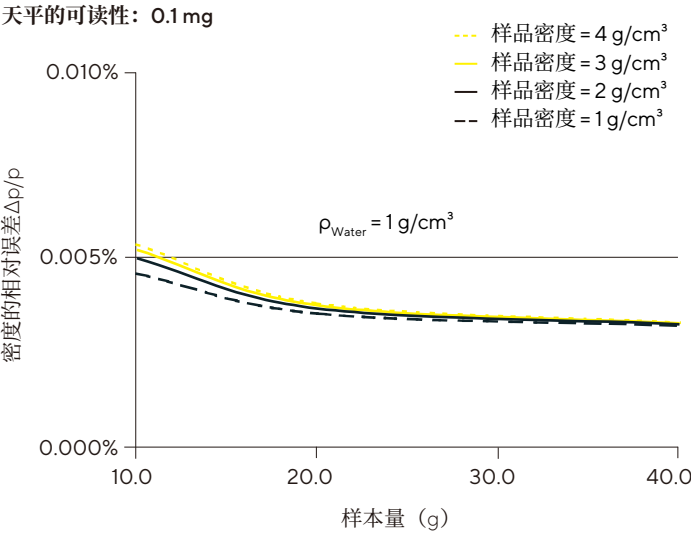


图30: 使用比重瓶法测定密度——密度的相对误差与样品数量和样品密度的关系



不同密度测定方法的比较

在接下来的几页中，将对不同的密度测定方法进行比较，每种方法最重要的优点和缺点一目了然。

	浮力法	位移法	比重瓶法	规定体积称重法
适用于：	■ 固态 ■ 液体 ■ 分散体 ■ 气体	■ 固态 ■ 液体 ■ 分散体	■ 固体 ■ 粉末 ■ 颗粒 ■ 液体 ■ 分散体	■ 粉末（堆积密度） ■ 液体 ■ 分散体
优势	适用于几乎所有样品类型	适用于几乎所有样品类型	适用于几乎所有样品类型	
	样本量灵活	样本量灵活		
	已经可以用天平	已经可以用天平	已经可以用天平	已经可以用天平
	快速执行	快速执行	非常精确的流程	快速执行
	由于天平采用集成软件，并有操作员进行指导和评估，故测试执行十分便捷	由于天平采用集成软件，并有操作员进行指导和评估，故测试执行十分便捷	由于天平采用集成软件，并有操作员进行指导和评估，故测试执行十分便捷	
缺点	固态物体和液体的调温工作繁复	固态物体和液体的调温工作繁复	固态物体和液体的调温工作繁复	
	对于液体密度的测定，需要大量样本！	对于液体密度的测定，需要大量样本！	劳动密集型	
		需注意液体蒸发	时间密集型	
	需注意样品在液体中的浸湿情况	需注意样品在液体中的浸湿情况		
	不能有气泡	不能有气泡	不能有气泡	

	浮力法	位移法	比重瓶法	规定体积称重法
测量不确定度*	取决于使用的天平和样品数量或样品密度	取决于使用的天平和样品数量或样品密度	取决于天平和样品数量	取决于天平和样品数量
可读性 1 mg	固体： m> 10 g时，< 0.4% 液体：** ρ= 1.3 g/cm³时，< 0.20%	固体： m> 50 g（水）时，< 0.2% ρ = 5 g/cm³	m> 20 g时，< 0.02%	液体、分散体 V=100 mL时,<1% V=1000 mL，且ρ<2 g/cm³时，<0.1%
可读性 0.1 mg	固体： m> 5 g时，< 0.1% 液体：** ρ<1.8 g/cm³时，< 0.11%	固体： m> 50 g（水）时，< 0.2% ρ = 5 g/cm³	m> 10 g时，< 0.005%	
可读性 0.01 mg	固体： m> 5 g（水）时，< 0.10% m> 5 g（乙醇）时，< 0.15% 液体：** ρ<1.5 g/cm³，约为 0.1%		m> 10 g时，< 0.003%	

*有关更多详细信息，请参阅“密度测定误差”一章

**使用赛多利斯密度测定装置的浸没物体

	比重计	U形管振荡法	密度梯度柱
适用于：	■ 液体（分散体）	■ （均质）液体	■ 固体（小型试样）（液体） ■ 可以同时测试多个试样
优势	测量简单	约1 mL的小样本量	
	快速执行	快速执行	
	浮体价格低		
缺点	对于分散体：样品分离而导致测量误差	对于分散体：样品分离而导致测量误差	试验准备工作繁重
		由于样品的粘度，密度受到的影响较小	
		必须购买昂贵的设备	
测量不确定度	ρ=0.6至2.0 g/cm³时，测量不确定度为0.1至10 kg/m³或0.0001至0.01 g/cm³	可用不确定度为0.001 g/cm³、0.0001 g/cm³或0.00001 g/cm³的测量装置	密度为0.8至2.0 g/cm³±0.0002 g/cm³的校准后的玻璃对比物体
	液体比重计适用于样品表面张力的某些区域		



附录

密度与温度的相关性

可以使用体积膨胀系数 γ 计算随温度变化的密度。通常，膨胀系数仅针对某一温度范围（例如 20°C 至 100°C）给出，在该温度范围内，可以允许线性近似。不同气体和液体的 γ 数值可在物理化学表中找到。

固体的线性膨胀系数通常为 α 。将线性系数转换为体积膨胀系数时，适用于关系式 $\gamma \approx 3\alpha$ 。

物质在温度 T_2 下的密度可以通过温度 T_1 下的密度和体积膨胀系数进行计算：

$$\rho(T_2) = \frac{\rho(T_1)}{1 + \gamma(T_2 - T_1)}$$

静水密度测定—— 消除密度方程中的体积

通过将固体完全浸入液体中，根据实验安排，固体和液体的体积相等。

然后，可以推导出两种物质的质量与密度之间的关系式，其中不再明确包含体积。

$$\rho_{fl} = \frac{m_{fl}}{V_{fl}} \qquad \rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

转化为：

$$V_{fl} = \frac{m_{fl}}{\rho_{fl}} \qquad V_s = \frac{m_s}{\rho_s}$$

从 $V_{fl} = V_s$

$$\frac{m_{fl}}{\rho_{fl}} = \frac{m_s}{\rho_s}$$

得出：要测定固体密度，请执行以下操作：

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{m_s}{m_{fl}}$$

或用于测定液体密度：

$$\rho_{fl} = \rho_s \times \frac{m_{fl}}{m_s} = \frac{m_{fl}}{V_s}$$

空气密度测定

根据铝和钢的质量与重量值之间的关系式，推导出空气密度测定的关系式：

$$W_{Al} = m_{Al} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}} \quad 1 = \frac{m_{Al}}{W_{Al}} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

$$W_{St} = m_{St} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}} \quad 1 = \frac{m_{St}}{W_{St}} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

将等式标准化为1， 然后进行等价处理， 得到：

$$\frac{m_{St}}{W_{St}} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}} = \frac{m_{Al}}{W_{Al}} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_N}}$$

$$\frac{m_{St}}{W_{St}} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}\right) = \frac{m_{Al}}{W_{Al}} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}\right)$$

$$W_{Al} \times m_{St} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{St}}\right) = W_{St} \times m_{Al} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}\right)$$

$$W_{Al} \times m_{St} - W_{Al} \times m_{St} \times \frac{\rho_a}{\rho_{St}} = W_{St} \times m_{Al} - W_{St} \times m_{Al} \times \frac{\rho_a}{\rho_{Al}}$$

$$W_{St} \times m_{Al} \times \frac{\rho_a}{\rho_{Al}} - W_{Al} \times m_{St} \times \frac{\rho_a}{\rho_{St}} = W_{St} \times m_{Al} - W_{Al} \times m_{St}$$

$$W_{St} \times m_{Al} - W_{Al} \times m_{St} = \left(\frac{W_{St} \times m_{Al}}{\rho_{Al}} - \frac{W_{Al} \times m_{St}}{\rho_{St}} \right)$$

$$\rho_s = \frac{W_{St} \times m_{Al} - W_{Al} \times m_{St}}{\left(\frac{W_{St} \times m_{Al}}{\rho_{Al}} - \frac{W_{Al} \times m_{St}}{\rho_{St}} \right)}$$

密度相关问题

1. 密度是如何定义的?密度的单位是什么?
2. 温度升高时密度如何变化?
3. 为什么身体在水中时比在空气中时显得轻?——描述现象!
4. 身体何时在液体中“漂浮”?对于液体和固体的密度，哪种表述是正确的?
5. 使用浮力法和位移法测定密度的实验装置有何不同，每种情况下的测量值包含哪些?
6. 可以使用哪些方法来测定液体的密度?——为什么要测定液体密度，从测量值中可以得出哪些结论?
7. 什么是分散体，如何测定其密度?
8. 密度（以前称为纯密度）和堆积密度有何区别?如何测定多孔材料的密度?
9. 空气的密度是多少?什么情况下需要知道空气的密度?如何测定空气密度?

空气浮力修正

以位移法测定密度为例，考虑空气浮力，得出计算密度的公式为：

密度可以根据以下公式计算得出

$$\rho_s = \frac{\rho_{fl}}{m_{fl}} \times m_s$$

要计算质量，必须代入以下关系式，该关系式描述了质量与空气密度的相关性：

$$m = W \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho}}$$

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{W_s \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}\right) \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{fl}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \times W_{fl} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_G}\right)}$$

$$\rho_s = \rho_{fl} \times \frac{W_s \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{fl}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}\right) \times W_{fl}}$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times \frac{\rho_{fl} - \rho_a}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}}$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho_s} - \frac{\rho_a}{\rho_s}}$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{1}{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s}}$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a) \times \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_a}$$

$$\rho \times \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s} = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a)$$

$$\rho_s - \rho_a = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a)$$

$$\rho_s = \frac{W_s}{W_{fl}} \times (\rho_{fl} - \rho_a) + \rho_a$$

10. 如何测定粉末的密度？

11. 可以根据密度测量值掌握哪些产品或材料的属性？

12. 密度测定在预包装监管领域有何意义？

13. 决定密度测定精度的因素有哪些？如何计算密度值的误差？

14. 解释以下公式中每个量的含义，其中包括“Corr?”

$$\rho = (W_a \times (\rho_{fl} - L_A)) / ((W_a - W_{fl}) \times \text{Corr}) + L_A$$

$$\rho = (W_a \times (\rho_{fl} - L_A)) / (W_{fl} \times \text{Corr}) + L_A$$

$$\rho = (W_a \times (\rho_{fl} - L_A)) / (W_{fl} + W_a - W_r) + L_A$$

15. 使用比重瓶法测定密度时，赛多利斯天平的“适用皮重存储”有哪些优势？

问题答复

1. 密度 = 质量 / 体积
 $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ g/mL}$
2. 密度减小。
3. 合力 = 重力减去浮力。浮力取决于液体中的重力压力 ($p = \rho \times g \times h$); $F = p \times A = \rho \times g \times h \times A = \rho \times g \times V$ (见第 9 页)
4. 固体和液体的密度相同 (见第 11 页)。
5. 使用位移法时, 装有浮力液体的容器置于称重盘上; 使用浮力法时, 与称重盘无接触。使用位移法时, 测量值对应排出液体的质量, 而使用浮力法时, 测量值对应由于浮力而减少的物体质量 (见第 12 页至第 13 页)。
6. 浮力法、位移法、规定体积称重法、比重计法、U 形管振荡法、悬浮法 (不混溶液体)。关于浓度比 (FPV) 的结论: 使用重量法取代容量法 (见第 24 页和第 35 页及其后的表格)。
7. 由一个连续相 (基质) 和一个或多个细分相 (分散相) 构成的多相系统。(见第 25 页) 根据要求的准确度以及分散体的一致性和流动性选择方法: 液体法或比重瓶法。注意不同方法中分离的影响 (比重瓶法中的分离对结果没有影响)。
8. 对于多孔材料: 堆积密度与包括开孔和闭孔在内的总体积有关——(纯) 密度与纯固体体积有关。多孔样品密度测定方法: 将样品研磨成细粉后, 用浮力法 (见第 21 页) 或比重瓶法测定 (纯) 密度; 比重瓶法的优点: 测量精度可能更高, 现有的闭孔不会“加入”到固体中。
9. $\rho_{\text{空气}} = 0.0012 \text{ g/cm}^3$
对于分析天平和微量天平, 必须校正重量值, 以准确规定质量。可以借助两个密度不同、体积不同、质量大致相同的砝码, 使用微量天平测定空气密度。必须已知砝码的常规称重值和材料密度, 然后才可以根据测得的重量值计算空气密度 (见第 13 页)——在赛多利斯微量天平和超微量天平软件中均由包含。
10. 若要使用比重瓶法, 请参见第 16 页, 相关实验说明见第 23 页。
11. 孔隙度、空隙率、晶体含量 (晶相密度高于非晶玻璃相)、玻璃中的冷却速度、溶液中某一组分的浓度、悬浮液中的固体含量, 见第 6 页。
12. 重量法取代了体积法, 成为一种更精确、更简单的测量方法。质量和体积之间的比例系数为密度。(必须使用经过校准的设备!)
13. 仔细遵守实验条件, 例如调温, 见第 29 页。测量值的误差取决于天平的可读性和再现性。结果的总误差必须根据误差传播规则计算, 见第 30 页。
14. 请参阅 LA 和 FC 天平模型的使用说明书。
通过省略比重瓶的干燥过程, 可以节省时间, 见第 23 页。

索引

A

粘附 29
空气浮力 29、30
空气密度 14

B

堆积密度 6、22、40
浮力 5、10、12、13、21、26、27、39、40
浮力 10、11、12、13
浮力法 30、35、40

C

闭孔 20、40
闭孔孔隙度 20、22
粗分散体系 25
热膨胀系数 7
胶体分散体系 25
常规重量 14
角载荷误差 29
校正系数 28、30

D

密度梯度柱 18、36
溶液密度 24
分散体 25、38、40
位移法 35

E

乳状液 25
误差计算 30、33
误差传播 30、40

F

泡沫 25

G

伽玛射线球 25、29
颗粒 22、35
重力压力 9、40

H

均质液体 24
比重计 18、36
静水压天平 12、21
静水压称重 12

I

浸没物体 12、24、25

L

液体密度 12、13、16
液体 24

M

薄雾 25
莫尔天平 12
分子分散体系 25

O

开孔 20、21、22
开孔孔隙度 20
U 形管振荡法 17、40

P

孔隙 20
孔隙度 2、40
多孔材料 6、20
粉末 35
阿基米德原理 9、13
纯密度 6
比重瓶 16、23、27、30、33、35
比重瓶法 16、20、22、23

R

相对密度 6

S

赛多利斯密度测定装置 24、28、31
烟 25
固体密度 6、12
比重 2、6
浮秤 18
标准密度 6
条纹法 18
表面张力 29、36
悬浮 12、18

T

温度变化 29、30、31
与温度的相关性 7、19、37
总误差 30、31、33
总孔隙度 20、21、22

W

吸水率 22
重量值 3、13、14

销售与服务 联系方式

更多联系信息，请访问

www.sartorius.com.cn

赛多利斯（上海）贸易有限公司

邮箱 lab.cn@sartorius.com

服务热线 400 920 9889 | 800 820 9889

上海

上海市浦东新区盛荣路 388 弄

百佳通产业园 3 号楼, 7-11 层,

200120

电话 +86 21 6066 6100

广州

广州市越秀区水荫路 117 号

1105 单元, 510075

电话 +86 20 3761 7284

成都

成都市上东大街 246 号新良大

厦 2406 室, 610012

电话 +86 28 8666 6877

