

第十四章 密度的测定

§ 1. 序 言

物质的单位体积的质量叫做物质的密度。冶金过程中，炉渣和金属的分离、冰铜和金属的分离，以及非金属夹杂物从液态金属中上浮等等，皆和物质的密度有关。除此外，高温熔体密度在研究熔体结构，以及计算粘度、表面张力的，都是一项必不可少的物理性质。

在高温条件下，测定熔体密度，技术上困难很大，以致不同研究者测定同一物质的密度所得结果，分歧很大。从数据上看，炉渣的基本体系—二元系、硅酸盐的测定结果较为一致。三元系以上的测定结果推差很大。合金系的密度的测定数据差异更为明显。由此看出，高温熔体的密度数据可以依赖的不多。反映出在实验技术上，从提高测量精度上，还大有工作可做。

高温熔体的密度的测量方法有：阿基米得法，最大泡压法，静滴法，悬浮熔炼法。其他还有比重计法，膨胀计法(dilatometric method)和压力计法。一般而言，测定炉渣密度常用阿基米得法和最大泡压法，测定金属密度则常用静滴法和最大泡压法。

§ 2. 密度的测定方法

1. 阿基米得法

此法是以阿基米得原理为基础的方法，通过测定熔体中已知体积的悬锤的浮力来计算密度见图1。这是测定高温熔体密度的最基本的方法。

已知体积(V)的悬锤浸沉到熔体之中，受到浮力。通过天平砝码平衡

悬锤所受的浮力，即悬锤同体积熔体的重量 (B)。利用下式可计算出熔体的密度：

$$\rho = \frac{B}{V}。$$

Bockris 等人曾用此法测定了熔融硅酸盐的密度。装置如图 2 所示。悬锤用白金制成，体积为 1.5 立方厘米，圆柱体但两处理呈锥形。悬挂线用铂-10 铑，直径为 0.4 毫米。

此法简便易行，在室温可得较为精确结果。但在测定高温熔体密度时，熔体表面张力对悬线的作用，熔体的挥发物质在悬线上的沉积，都会使测量结果偏低，炉内上升气流的影响会使结果偏高。解决冷凝物的影响，可以在上部加冷却水套，使冷凝物在水套上冷凝或在坩埚上加带孔（穿过悬线用）的盖以抑制挥发。消除熔体表面张力的影响，则是用二球法进行实验测量。

二球法，即用两个相同材质，体积不等的悬锤，在同一条件下，分别测量两个悬锤的浮力。设实验温度下的表面张力为 σ ，悬线的直径为 $2R$ ，

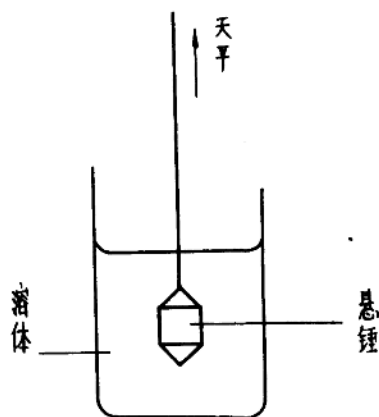


图 1. 阿基米得法

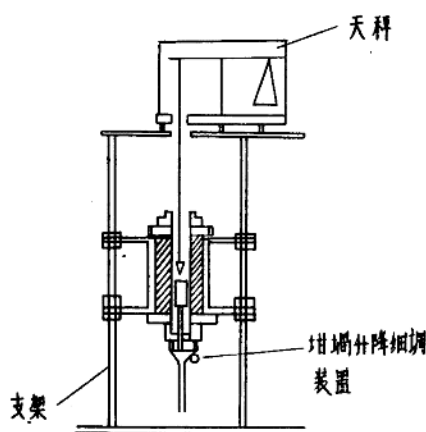


图 2.

悬线和熔体间的接触角为 θ 。对悬锤 I 的浮力 B 应为

$$B_1 = V_1 \rho - 2\pi R \lambda \cos \theta$$

式中 V_1 ——在实验温度时悬锤 I 和在熔体里部分悬线的体积;

ρ ——熔体密度

对悬锤 II, 有

$$B_2 = V_2 \rho - 2\pi R \lambda \cos \theta$$

从上二式得

$$\rho = \frac{B_1 - B_2}{V_1 - V_2}$$

上式中, 除了两个悬锤体积不同外, 其他条件皆相同, 消除了熔体表面张力和挥发物质沉积在悬线上的影响。可使测量, 计算结果符合于实际值。

2. 最大泡压法

此法的原理和设备与测熔体表面张力的气泡最大压力法完全一样。气泡最大压力法的装置可同时用来测量熔体密度。

测量时, 控制相同的物理化学条件, 用同一毛细管, 进行两次插入熔体深度各不相同 (H_1 和 H_2) 的实验, 分别测得相应的最大压力数值 P_1 和 P_2 。熔体密度可按下列公式计算:

$$\rho = \rho_2 \frac{h_1 - h_2}{H_1 - H_2}$$

式中 ρ ——熔体的密度;

ρ_2 ——压力计的工作液体的密度;

h_1 ——第一次实验时毛细管插入深度;

h_2 ——第二次实验时毛细管插入深度;

H_1 ——第一次实验时压力计的最大差;

H_2 ——第二次实验时，压力计的最大高差。

实验技术上应注意的问题与最大气泡压力法测表面张力法完全一样。

3. 静滴法

静滴法测熔体密度，是根据在水平垫片上自然形成的液滴形状，求得液滴的体积，进而计算熔体密度的方法。

与静滴法测定熔体表面张力方法一样，将水平垫片上的对称性很好的液滴，拍摄下来，依据液滴图像，如图3所示，测量有关参数，按下列公式计算液滴体积。

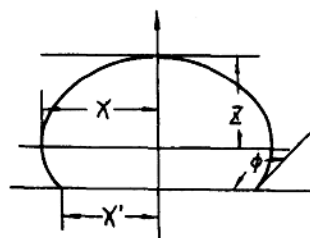


图3 水平垫片上液滴形状

$$V = \frac{\pi(bx')}{\beta} \left\{ \frac{2}{b} - \frac{2 \sin \phi}{x} + \frac{\beta z^2}{b^2} \right\}$$

式中 b ——液滴顶点0处曲率半径；

β ——形状校正因子；

V ——液滴体积，立方厘米；

ϕ ——接触角；

x' ——液滴底部半径，厘米；

x ——液滴的最大水平半径，厘米；

z ——液滴的最大水平半径与顶点的垂直距离厘米。

通过上式，并利用 Barshforth 和 Adams 表可计算出液滴体积。直接测量出液滴重量，就可求得液体密度。

4. 比重计法

此法是将液体注满已知容积的比重计中，待液体凝固后，取出称重，来计算密度的方法。

图4是常用比重计的两种，图(a)是用 Al_2O_3 制造的。经 $1700^\circ C$

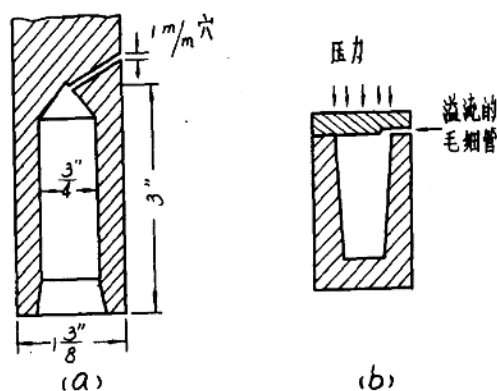


图 4. 比重计

煅烧后，容积稳定性到 $1/4000$ 。用它测定过铁的密度的数值精确度在 $\pm 0.2\%$ 。图 (b) 所示比重计适用于测定挥发性液体的密度。因为液体挥发被限制在溢流孔的微小面积上。Edwards 和 Moorman 用石墨制成的这种比重计，测定了铅在熔点 (660°C) 到 1000°C 条件下的密度，精确度达 $\pm 0.1\%$ 。

应用此法进行实验时，要选择那些化学稳定性好，高温热强度高的物质做比重计的材质同时，加工精度要高。一个比重计可多次使用，但每用过一次都必须经进行修正、重新用水银或蒸馏水校正容积。

5. 悬浮熔炼法测定密度的方法

近年来，悬浮熔炼技术有所发展，在测定熔融金属的密度上，也应用了这种方法。此法是通过实验求出悬浮试料的重量和体积，并由此直接计算出密度的方法。测定对象仅仅限于金属和合金。重量用天秤称重，体积则由悬浮试料形状的摄影结果来求得。因此，用本法进行测定时，适量的试料必须在悬浮可能进行摄影的空间里。体积测定的形状必须处于稳定的悬浮熔炼状态。

对于试样的悬浮熔炼，一般采用频率为 100~450KHz 的高频振荡器。而且悬浮线圈的形状和尺寸，对试料的悬浮状态有很大的影响，所以对此必须予以加以很好的探讨。作为保护性气氛，可以使用 H_2 、 Ar 等惰性气体。另外，拍摄测定体积所用的底片，采用如图 5 所示的设计方案，这种方案可以将熔融试料的底面与侧面的形状，同时摄取到底片上。悬浮试料

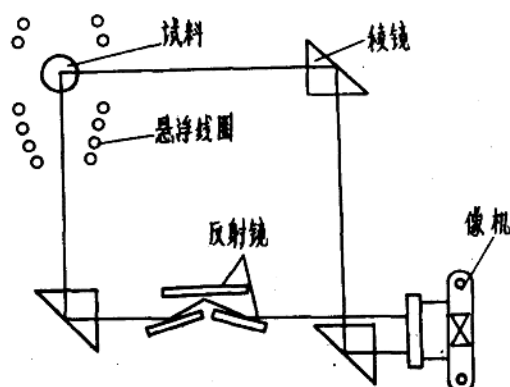


图 5. 悬浮熔炼法测定熔融金属密度的装置

的摄影用备有望远透镜（135 毫米，200 毫米）的照像机，以适当的光闸速度（ $1/125 \sim 1/1000$ 秒）拍摄。选出所拍底片影像接近真正圆形，侧面影像也呈真正圆形或轴对称性好的试料照片，把它放大到印相纸或玻璃干板上去，以便按分区求积法计算出体积。由胶片底板显像于印相纸上时，必须注意避免相纸的膨胀或收缩。在这一点上，使用玻璃干板比印相纸要方便得多。所得分区求积法，就是把悬浮试料看成如图 6 所示那样的，与纵轴直交圆板的堆砌体并按下式算出试料体积即可。

$$V = \frac{\pi \ell}{N} \sum_{i=1}^{N-1} r_i^2$$

式中 V ——试料体积，

ℓ ——回转轴长度,

N ——试料区分数,

r_i —— i 号圆板的半径。

按此方法, 如果以区分数为 80~100 时, 由计算所造成的体积误差仅为 0.01~0.02%。可见此法较为有效。

此密度测定方法的技术问题, 可以举出以下几点:

1) 试料悬浮时的形状, 要受其表面张力的影响, 特别是对于表面张力很底的金属和合金, 难以得到良好的悬浮状态。

2) 对于蒸气压高的金属或合金体系, 在测定技术上是有极大困难的。

3) 悬浮试料的表面与内部的温度有所不同, 因而在热量上难以达到平衡。

而且, 此法在测定精确程度上, 较之其他各种方法是比不上的。但是, 对于在广泛的温度领域里, 用其他方法不可能进行的测定, 它反而有可能进行。在了解密度值所涉及的广大温度范围内的变化倾向时, 可以说, 此法是极为有效的。再一个显而易见的优点是在悬浮熔炼过程中, 试料处于悬浮空间里, 不与任何耐火材料接触, 可以完全避免了坩锅等容器对试料沾污。

除了上述几种方法外, 高温条件下, 测定方法还有: 膨胀计法和压力计法。读者可查阅有关资料, 此书从略。

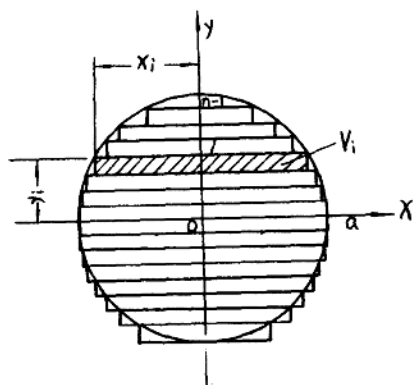


图 6 试料的区分求积法