

基于阿基米德浮力原理的零速插值法测定颗粒密度

密度是对特定体积内的质量的度量，密度等于物体的质量除以体积，可以用符号 ρ 表示， $\rho = m/V$

对于粉体颗粒来说，上述公式中对应的 V 有三种：

- 真体积 V_t ：无任何空隙的体积（颗粒本身体积）
- 粒体积 V_g ：无颗粒间空隙体积（内空隙+颗粒本身体积）
- 堆积体积 V ：颗粒间空隙+内空隙+颗粒本身体积分别对应的密度也有三种：
 - 真密度
 - 粒密度
 - 堆积密度

本文讨论的密度为粒密度，（当颗粒本身不含内空隙时，粒密度=真密度）

原理

阿基米德浮力原理指出，完全浸在液体中的颗粒所受的浮力等于该颗粒所排开的液体的重量。颗粒在液体中的状态取决于颗粒自身的重力 F_G 和颗粒所受浮力 F_A ，

- 当 $F_G > F_A$ 时，颗粒下沉
- 当 $F_G < F_A$ 时，颗粒上浮
- 当 $F_G = F_A$ 时，颗粒悬浮在液体中，此时我们可以得到等式（1）：

$$F_G = \rho_P \cdot V \cdot g = F_A = \rho_L \cdot V \quad \text{等式（1）}$$

等式中， ρ_P 为颗粒密度， V 为颗粒体积， g 为重力加速度， ρ_L 为液体密度

显然，要保证等式成立，即颗粒悬浮在液体中，颗粒的密度必须和液体的密度相等（ $\rho_P - \rho_L = 0$ ）。需要注意的是，此等式成立和颗粒的尺寸、形状以及液体的动态粘度无关。但是，如果是在多组分分散体系中，只有当所有颗粒密度相同时，才能保证所有颗粒都悬浮在液体中。式(1)和上述考虑同样适用于离心力场中分散的粒子，但是其中 g 必须用离心力加速度 a 代替：

$$a = \omega^2 \cdot X = (2 \cdot \pi \cdot n)^2 \cdot X \quad \text{等式（2）}$$

等式中转子的角速度 ω 为转子的角速度， x 为离子的离心半径， n 为转子的转速

根据等式（1）和等式（2），颗粒分散在不同密度的液态连续相时，颗粒的迁移方向会有所不同，当颗粒密度大于连续相密度时颗粒下沉，当颗粒密度小于连续相密度时颗粒上浮，当二者相等时颗粒悬浮。迁移的动力可以是重力场和离心力场。因此，任何可以检测颗粒迁移的技术都可以采用，例如：

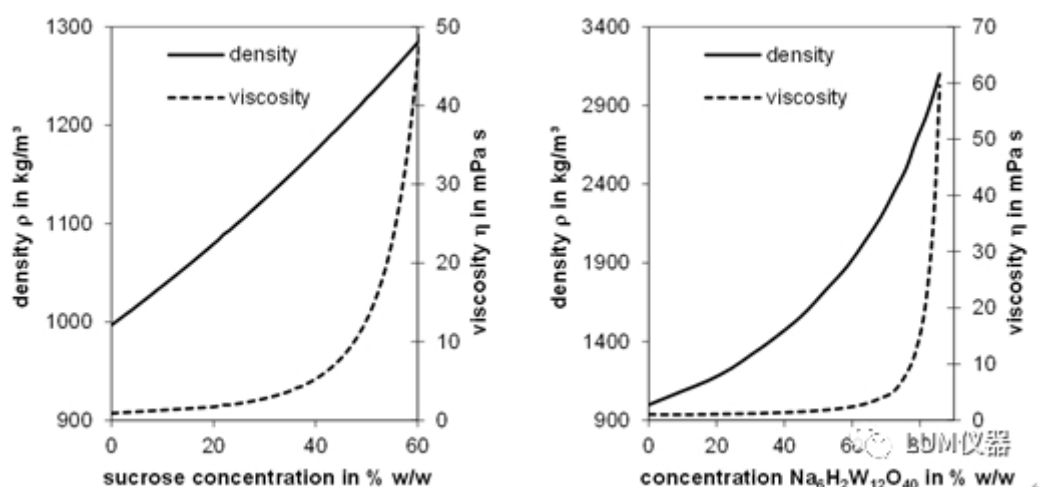
1. 检测适当界面位置的浓度变化，例如半月弯下方位置（分散体系和空气的界面）或样品管底部的上方位置。可以直接检测浓度的变化，也可以检测和浓度相关的信号的变化，例如：电压、电流、透光率、X射线吸收率、电导率等。
2. 检测分散体系中颗粒的迁移速度值，或与之直接相关的测量值

考虑到温度变化对浓度的影响，采用的仪器必须具有温度设置和控制的功能建议采用多通道的仪器，可以增加样品测试数量，同时可以保证样品在同一条件下测量。对于纳米颗粒和高粘度的连续相，因为颗粒迁移速度和方向不易观测，建议采用离心力场加速试验。

制备样品

1. 选择分散介质

选择适当的溶液作为连续相，应该准备密度不同但能覆盖预期颗粒密度范围的溶液。可以从浓缩的溶液开始，不断稀释，直至溶液密度小于颗粒密度。为保证测量的准确性，应制备一系列列 5 到 8 种不同密度的溶液，其中中值密度为预期颗粒密度。下图展示了两种典型的溶液：



2. 分散

按照相关标准，将颗粒均匀分散到连续相中。采用温和的分散程序即可，因为与颗粒的团聚、絮凝等都不会干扰密度测量。另一方面，所有的粒子都必须完全浸湿，以避免由于测试液体中残留的气泡粘附而导致密度偏小。

测量

将颗粒分散到 5~8 种测试液体后，将其装入样品管，并对样品预处理，使其达到相同的测试条件，例如温度等。然后对样品进行测试（浓度变化、迁移速度等）

数据分析

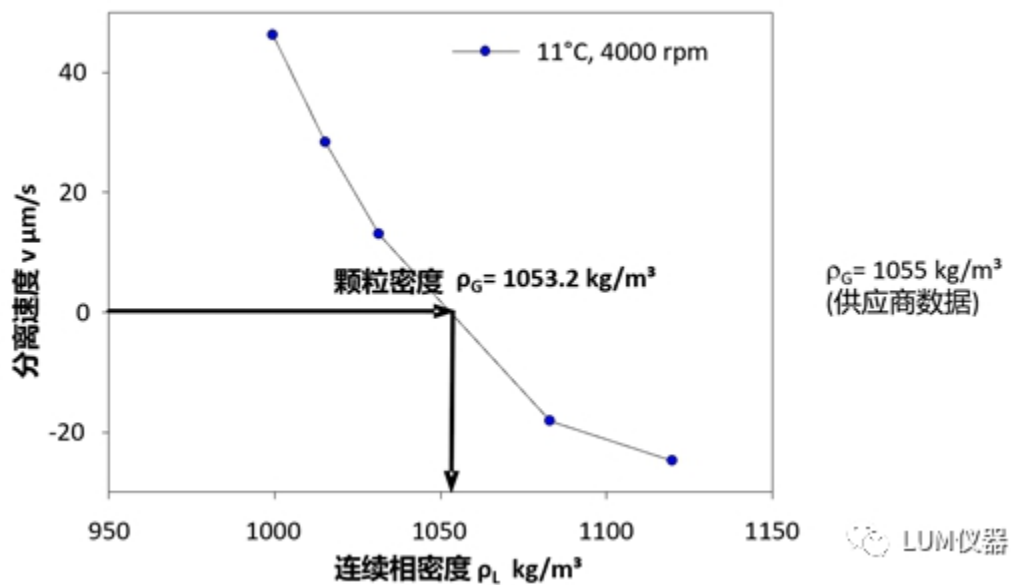
对测量中得到的表征颗粒迁移的定量结果与各自对应的连续相密度进行线性或非线性拟合。

举例

一、

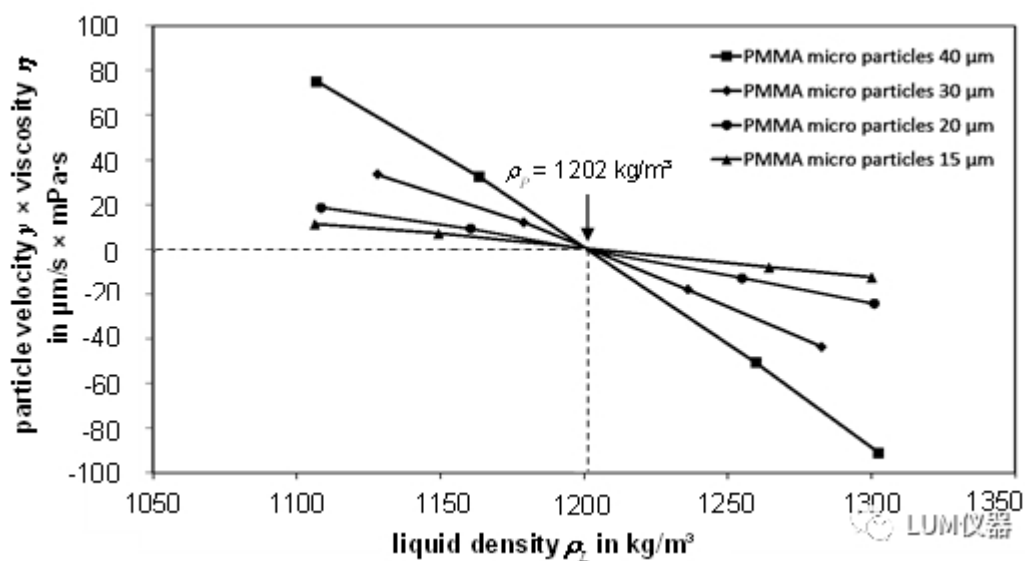
1. 将 $1.1 \mu\text{m}$ 的 polystyrene（聚苯乙烯）颗粒按 (0.03m/m) 分别分散至五种不同浓度的蔗糖溶液（ 0.4% , 1.8% , 3.16% , 5.20% , 6% 和 $28.9\% \text{ m/m}$ ）中。
2. 用 LUM 公司的 LUMiFuge 分散体稳定性分析仪的界面追踪功能（front tracking analysis）测量分离速度，离心转子转速 4000rpm ，温度 11.5°C

3. 下图是将分离速度和连续相密度进行非线性回归后拟合的曲线， $V=0$ 时可以得出颗粒的密度。



二、

1. 将 $15 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 四种不同尺寸 PMMA（聚甲基丙烯酸甲酯）颗粒，分别分散到 5 种不同浓度的 polytungstate（聚钨酸盐）溶液中，制备 4 组样品
2. 用 LUM 公司的 LUMiReader 分散体稳定性分析仪测量颗粒迁移速度，光源波长 870 纳米，温度 30°C
3. 下图是四组样品分别将颗粒迁移速度与对应连续相粘度的乘积和连续相密度非线性回归拟合后的曲线。



由上图可以看出，颗粒的密度和颗粒的尺寸无关。