

文章编号 1004-924X(2016)增-0387-07

## 抗磁性物质密度的精确测量方法

赵朋\*, 颀俊, 傅建中, 陈子辰

(浙江大学机械工程学院 浙江省三维打印工艺与装备重点实验室, 浙江 杭州 310007)

**摘要:**针对现有的密度检测方法存在的精度低或操作计算过程繁琐的缺点,结合磁-阿基米德悬浮技术,提出了一种抗磁性物质密度的精确测量方法。该方法应用的磁悬浮测量装置可以保证被测样品在装置中达到稳定悬浮,并且在其他实验条件一定的情况下,样品悬浮高度仅与样品本身密度相关。建立了样品悬浮高度与样品密度的关系函数,可以由样品在装置中悬浮高度算出样品密度。通过拟合一组标准密度球在给定实验条件下的悬浮高度,得出了可在任意条件下根据样品悬浮高度进行密度计算的计算公式,并通过多组实验对公式的准确性进行了验证。还通过对几种高分子材料的实验,与传统浮力法进行了比对。实验及分析结果显示,该测量装置操作简便,具有很高的测量精度,可以达到 $0.0025\text{ g/cm}^3$ ,有很大的应用发展空间。相较于传统方法,该方法对小尺寸样品密度测量具有更高的测量精度。

**关键词:** 抗磁性物质;密度测量;精确测量;磁-阿基米德悬浮;拟合公式

**中图分类号:** TQ320 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0387

## Accurate measurement method for density of diamagnetic material

ZHAO Peng\*, XIE Jun, FU Jian-zhong, CHEN Zi-chen

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Key Laboratory of 3D Printing Process and Equipment of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

\* Corresponding author, Email: pengzhao@zju.edu.cn

**Abstract:** Aiming at disadvantages of low accuracy or complicated operation calculation process of the existing density detection method, and combined with technology of magnetism-Archimedes suspension, a kind of accurate measurement method for density of diamagnetic material has been proposed. Measuring equipment for magnetic suspension used by this method may guarantee that sample tested could reach stable suspension, and the suspension height of sample has correlation with density of sample itself under the condition where other experimental conditions are certain. The relation function between suspension height of sample and density of sample has been established, and the density of sample may be calculated through suspension height of sample in the equipment. By fitting a set of suspension height of standard density sphere under experimental conditions given, the calculation formula has been obtained, in which density could be calculated under arbitrary conditions according to suspension height of sample, and the accuracy of formula has been verified through many experiments. In addition, experiments with several kinds of high polymer materials are contrasted with traditional buoyancy methods. Experiment and analysis results show that: this measuring equipment has easy and simple operation, relatively high measurement accuracy (reaching  $0.0025\text{g/cm}^3$ ) and great

收稿日期:2016-04-10;修订日期:2016-05-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51475420);浙江省自然科学基金资助项目(No. LY14E050017);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2015QNA4001)

application and development space. Compared with traditional method, this method has higher measurement accuracy for density measurement of sample with small size.

**Key words:** diamagnetic material; density measurement; accurate measurement; magnetism - Archimedes suspension; fitting formula

## 1 引言

密度的测量在科研、生产过程和生活中均具有重要的意义。2 200 年前阿基米德发现的浮力原理是密度检测应用最广的方法,其衍生方法包括:浸渍法、比重瓶法、浮沉法、密度梯度柱法和密度计法<sup>[1]</sup>。近年来,开发出气体压差方法<sup>[2]</sup>、超声波法<sup>[3-4]</sup>、理想气体状态方程法<sup>[5]</sup>等,用于测量不同状态的物质的密度,精度最高可以达到  $0.007 \text{ g/cm}^3$ 。

磁性也是物质所具有的基本物理特征之一。任何物质在磁场中均会被磁化。根据磁化产生的附加磁场方向,物质分为顺磁性物质与抗磁性物质。其中顺磁性物质的附加磁场与激励磁场方向相同,反之,抗磁性物质产生的附加磁场与激励磁场相反。基于物质的磁性,国外近年来对磁悬浮(Magnetic Levitation, ML)检测技术进行了很多研究。1998 年《Nature》杂志上发表了日本东京大学的 Yasuhiro Ikzoe 等人所做的在氧气介质中悬浮起水滴的相关研究<sup>[6]</sup>。其所在的先进材料科学实验室后续应用磁悬浮技术进行了分离有机材料和生物材料的相关研究<sup>[7-8]</sup>。美国哈佛大学的化学与生物化学实验室在磁悬浮检测的应用方面进行了较多的探索与研究。Katherine A. Mirica 等人于 2009 年提出的基于磁悬浮的密度检测方法可以高精度得测量密度介于  $0.8 \sim 3.0 \text{ g/cm}^3$  的样品<sup>[9]</sup>。基于这种测量方法,该实验室后续对食品、法医证据以及结晶聚合物的检测和分离进行了相关研究<sup>[10-12]</sup>。同时,还研究了非球形样品在磁悬浮检测装置中姿态和指向的相关研究<sup>[13]</sup>。其最近的研究将检测装置倾斜从而扩大了该方法的密度测量范围,使该方法的测量范围覆盖了大部分常见物质,相关研究成果发表在 JACS<sup>[14]</sup>。浙江大学三维打印工艺与装备重点实验室同样对磁悬浮的应用进行了探索,研究了磁悬浮检测方法在光学塑料透镜检测方面的应用<sup>[15]</sup>。

现有的密度检测方法,若要达到高精度的测

量,通常需要使用昂贵的测量设备,经过繁琐的操作和分析过程得到。并且,对于小尺寸样品的测量会存在较大误差。本文结合磁悬浮方法提出了一种对抗磁性物质密度的测量方法。通过对实验结果进行拟合,给出了基于悬浮高度,计算被测抗磁性样品密度的计算公式,并通过标准密度球以及塑料样品对计算公式进行了验证实验。该方法具有装置简单,操作简便,且对于小尺寸样品有很高的检测精度等优点。

## 2 磁悬浮理论和方法

抗磁性物质密度的精确测量方法主要基于磁-阿基米德悬浮原理,其原理如图 1 所示。两块磁铁同极相对放置,距离为  $d$ ,其中间区域会产生梯度变化的磁场。将抗磁样品浸入两磁铁中间的顺磁介质溶液中,样品在溶液浮力和磁场产生力的作用下,会悬浮起一定高度  $h$ 。

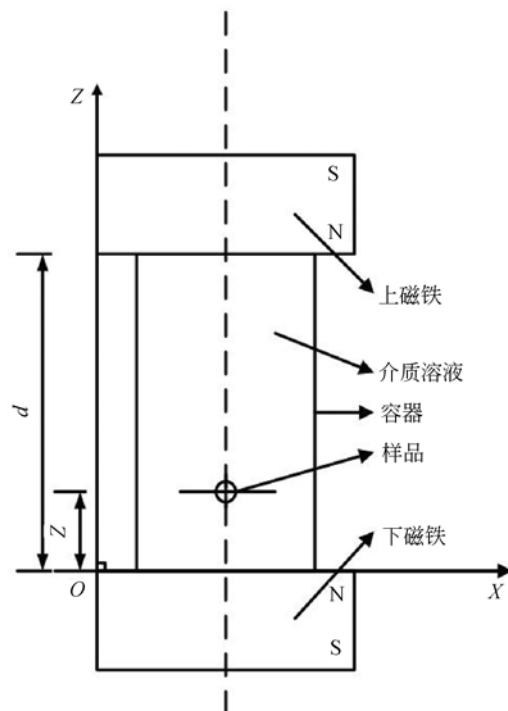


图 1 磁悬浮检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetic levitation detection

逆磁性样品在顺磁性溶液中会受到重力、浮力和磁场作用力的综合作用。当 3 个力达到平衡时,样品悬浮达到稳定状态。平衡受力公式为:

$$\mathbf{F}_G + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_{\text{mag}} = 0, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{F}_G$  为重力,  $\mathbf{F}_f$  为浮力,  $\mathbf{F}_{\text{mag}}$  为磁场对样品产生的作用力。  $\mathbf{F}_G$  和  $\mathbf{F}_f$  表达式为:

$$\mathbf{F}_G = \rho_s \mathbf{g}V, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_f = -\rho_m \mathbf{g}V, \quad (3)$$

$\mathbf{F}_{\text{mag}}$  包括两个部分: 磁场对抗磁性物质样品产生的斥力和磁场对顺磁介质溶液产生的引力而对样品产生的附加浮力:

$$\mathbf{F}_{\text{mag}} = \frac{\chi_s - \chi_m}{\mu_0} V(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}. \quad (4)$$

式中:  $\chi$  表示磁化率,  $\rho$  表示密度, 下标  $s$  与  $m$  分别代表样品与介质溶液;  $V$  为被测样品体积;  $\mathbf{B}$  为磁感应强度;  $\nabla$  为向量梯度算子;  $\mathbf{g}$  为重力加速度;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$  为真空磁导率。

若样品保持稳定悬浮, 则  $(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$  在  $x$  轴与  $y$  轴分量必须为 0。当样品可以保持稳定悬浮时, 由式(1)~(4), 整理后可以得到:

$$\rho_s = \frac{\chi_s - \chi_m}{\mu_0 g} \left[ B_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \right] + \rho_m. \quad (5)$$

由于平常所遇到的大部分物质, 如塑料、玻璃、食品等均为抗磁性物质, 且抗磁性大小较顺磁介质溶液顺磁性小几个数量级, 因此式(5)中  $\chi_s$  可以被忽略, 式(5)可简化为:

$$\rho_s = \rho_m - \frac{\chi_m}{\mu_0 g} \left[ B_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \right]. \quad (6)$$

可以看出, 当给定顺磁介质溶液和磁铁, 则被测样品密度  $\rho_s$  为悬浮高度  $z$  的函数, 由此可以计算得到被测样品的密度。

## 2 实验方案

### 2.1 实验装置

采用 3D 打印技术制作了抗磁性物质密度的高精度测量装置, 装置结构图如图 2 所示, 该实验装置主要包括底座, 磁铁座, 磁铁和将磁铁座固定在底座上的销。磁铁选用北京久久高科磁性材料有限公司生产的 N45 牌号钕磁铁, 尺寸大小为  $50.8 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ , 中心表面磁感应强度为  $0.425 \pm 0.005 \text{ T}$ 。磁铁上下各一块, 两

块磁铁以 N 极对 N 极的方式布置, 两磁铁间高度  $d$  为  $60 \text{ mm}$ 。

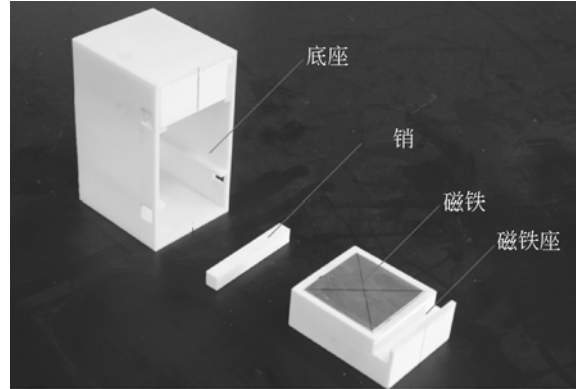


图 2 抗磁性物质密度的高精度测量装置结构图  
Fig. 2 Structure figure of device for the measurement of density of paramagnetic materials

通过 Matlab 对两磁铁间  $(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$  在  $x$  轴方向的分量进行模拟, 得到的  $(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$  分布如图 3 所示。在两块磁铁中间大部分区域, 样品受到的磁场作用力在  $x$  轴的分量指向两磁铁的中心连线。根据对称性, 样品受到的磁场作用力在  $y$  轴的分量同样指向两磁铁中心连线。因此, 样品在装置中可以在两磁铁中心连线上可以达到稳定悬浮。由于磁场的空间分布计算公式复杂, 直接推导难

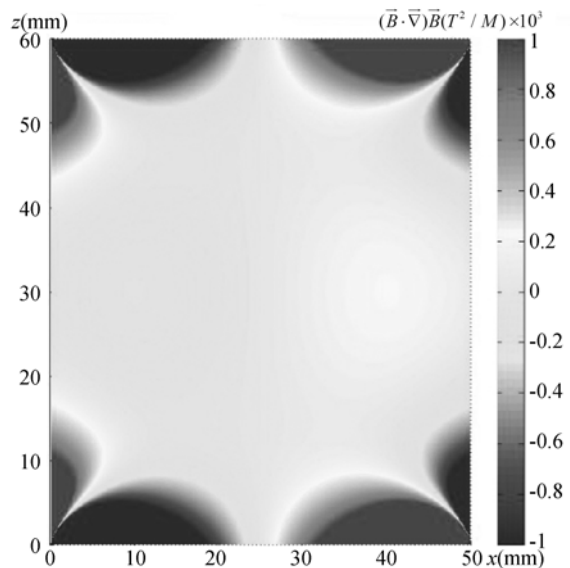


图 3 两块磁铁间  $(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$  沿  $x$  轴分量分布云图  
Fig. 3 Cloud of components of  $(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$  along  $x$ -axis between the two magnets of device

以计算,通过给定溶液密度和磁铁,用标准密度球(American Density Materials, Inc.)标定对应高度,通过多项式拟合的方法,推导出 $(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$ 在两磁铁中心连线上的拟合公式。

## 2.2 实验流程

抗磁性物质密度的高精度测量方法的实现流程如图 3 所示,主要分为 3 个步骤:

(1)配置顺磁介质溶液。介质溶液应选用高磁化率盐作为溶质。所用溶质均为  $\text{MnCl}_2$ 。

(2)将被测样品放入顺磁介质溶液中,拟合标定用到的标准密度球以及验证实验中高分子材料均为抗磁性物质。为使样品完全浸入介质溶液中,将试管中盛满介质溶液并用盖玻片封口。

(3)将盛有样品的顺磁介质溶液置入磁悬浮检测装置中,调整位置,保持样品在中心线悬浮并静置一段时间,使样品达到稳定悬浮状态。样品在溶液中悬浮并保持在一定高度,读取悬浮高度值  $z$ 。

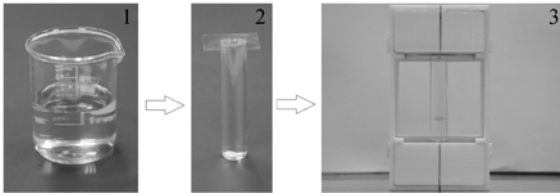


图 4 实验步骤

Fig. 4 Experimental processes

## 3 实验结果与讨论

用标准密度球在不同浓度  $\text{MnCl}_2$  溶液中进行多组实验,对其中一组实验通过多项式拟合的方法得到 $(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$ 的拟合公式,并用其他组实验对比验证拟合公式的准确性。为验证本文测量方法的适用性与精度,对多种聚合物材料进行了测量实验,并与浮力法密度计的测量结果进行对比。

### 3.1 $(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$ 的多项式拟合实验

实验选用的密度球密度为  $1.08 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ ,密度间隔为  $0.01 \text{ g/cm}^3$ 。溶液选用  $2.0 \text{ mol/L}$  的  $\text{MnCl}_2$ ,经测量,溶液参数: $\chi_m = 3.79 \times 10^{-4}$ , $\rho_m = 1.192 \text{ g/cm}^3$ 。实验室温度控制在  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。实验通过相机记录结果,通过分析像素个数读取样品悬浮高度。

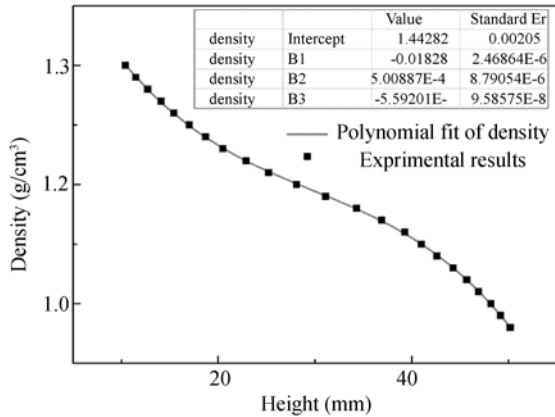


图 5 介质溶液为  $2.0 \text{ mol/L}$   $\text{MnCl}_2$  溶液的标准密度球实验结果及其拟合结果

Fig. 5 Experiment results of standard density beads in  $2.0 \text{ mol/L}$   $\text{MnCl}_2$  aqueous solution and the fitted curve of the results

实验结果如图 5 中散点所示,散点呈 S 状分布。根据散点趋势,选用三次多项式对散点进行拟合,拟合结果为图 5 中的曲线。计算得到的散点拟合曲线为:

$$\rho_s = 1.4428 - 0.01828 z^2 + 5.00887 \times 10^{-4} z^2 - 5.59201 \times 10^{-6} z^3. \quad (7)$$

实验值与拟合曲线的最大偏差为  $0.00127 \text{ g/cm}^3$ ,曲线  $R^2 = 0.99991$ 。拟合结果与实验结果有很高的拟合度,可以认为,在顺磁介质为  $2.0 \text{ mol/L}$  的  $\text{MnCl}_2$  溶液中,密度的计算公式为式(7)。比较式(6)与式(7),结合  $2.0 \text{ mol/L}$  的  $\text{MnCl}_2$  溶液的密度和磁化率参数,式(6)可改写为式(8)。式(8)即作为抗磁性物质密度的高精度测量方法的计算公式:

$$\rho_s = \rho_m - (660.739 - 48.232x + 1.322x^2 - 1.475 \times 10^{-2} x^3) x_m. \quad (8)$$

### 3.2 密度计算公式验证试验

为验证计算公式的准确性,进行了标准密度球在不同浓度  $\text{MnCl}_2$  溶液中的测量试验,并将试验计算结果与标准密度球标定密度进行比对。试验分别用  $1.5 \text{ mol/L}$  与  $2.5 \text{ mol/L}$  的  $\text{MnCl}_2$  作为介质溶液,每种浓度溶液用标准密度球进行一组试验。不同密度的标准密度球的悬浮高度在图 6 中以散点显示。不同浓度介质溶液条件下的计算结果在图 6 中以曲线形式显示。其中,  $1.5 \text{ mol/L}$  的  $\text{MnCl}_2$  溶液,  $\chi_m = 2.77 \times 10^{-4}$ ,  $\rho_m = 1.146 \text{ g/}$

$\text{cm}^3$ ; 2.5 mol/L 的  $\text{MnCl}_2$  溶液,  $\chi_m = 4.74 \times 10^{-4}$ ,  $\rho_m = 1.1241 \text{ g/cm}^3$ 。

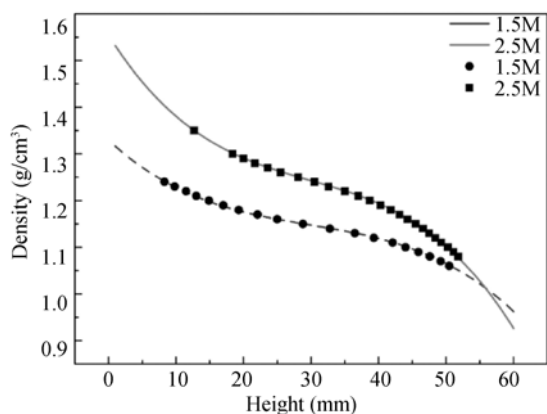


图 6 介质溶液为 1.5 mol/L 与 2.5 mol/L  $\text{MnCl}_2$  溶液的计算结果与标准密度球的实验结果

Fig. 6 Calculating results of 1.5 mol/L and 2.5 mol/L  $\text{MnCl}_2$  aqueous solutions as medium and the experiment results of standard density beads

从图 6 中可以看出,散点的分布与计算曲线的吻合度较高。分别对每组数据的散点与曲线进行对比分析,标准密度球在 1.5 mol/L 的  $\text{MnCl}_2$  中的实验计算结果与密度球的标定密度最大偏差为  $0.0022 \text{ g/cm}^3$ ,实验的 19 个结果的标准差为  $0.0013 \text{ g/cm}^3$ 。同样的,对 2.5 mol/L 的  $\text{MnCl}_2$ ,实验计算结果与标准密度的最大偏差为  $0.0021 \text{ g/cm}^3$ ,实验的 24 个结果的标准差为  $0.0012 \text{ g/cm}^3$ 。考虑到高度测量读数存在的误差,实验计算结果与标定的标准之间的误差足够小,通过计算得到的密度值精度可达到  $0.0022 \text{ g/cm}^3$ ,显示了该方法在测量密度方面的简便性与高精度。

### 3.3 高分子聚合物样品的密度测量试验

为验证测量方法在实际应用过程中的可行性,分别对 PLA(聚乳酸)、PCL(聚己内酯)两种样品进行了密度检测。实验的对比组实验是通过传统的浮力法测得样品的密度,与本文方法进行对比。对比组实验使用精密密度仪(达宏美拓 DH-300)进行测量。受限于密度仪的灵敏度,密度仪无法对单个小尺寸样品进行单独测量。因此,选择对一批相同材料样品进行实验,测量出该批样品的平均密度。从该批样品中抽 5 个样本进

行磁悬浮检测实验,并根据高度计算 5 个样本各自的密度。最后将两种测量方法获得的结果进行比对。根据每种材料大致的密度范围,PLA 的实验选用 2.0 mol/L 的  $\text{MnCl}_2$  溶液,PCL 选用 1.5 mol/L 的  $\text{MnCl}_2$  溶液。

两种材料的实验结果如图 7 所示。根据实验结果计算出的样本的密度与浮力法测量出的样品平均密度如表 1 所示。通过对表 1 中数据进行比对分析,两种测量方法算出的该批样品的平均密度差别小于  $0.002 \text{ g/cm}^3$ 。可以看出,本文方法与传统浮力法的测量吻合度很高,说明本文方法在实际应用中拥有很高的可行性。另外,从实验结果可以看出,本文的测量方法具有很高的测量灵敏度,可以灵敏分辨不同样品间微小的密度差异。验证了本文方法的正确性的同时,体现了本文的测量方法对小尺寸样品密度测量的高适应性,可以达到精确测量小尺寸样品密度的要求。

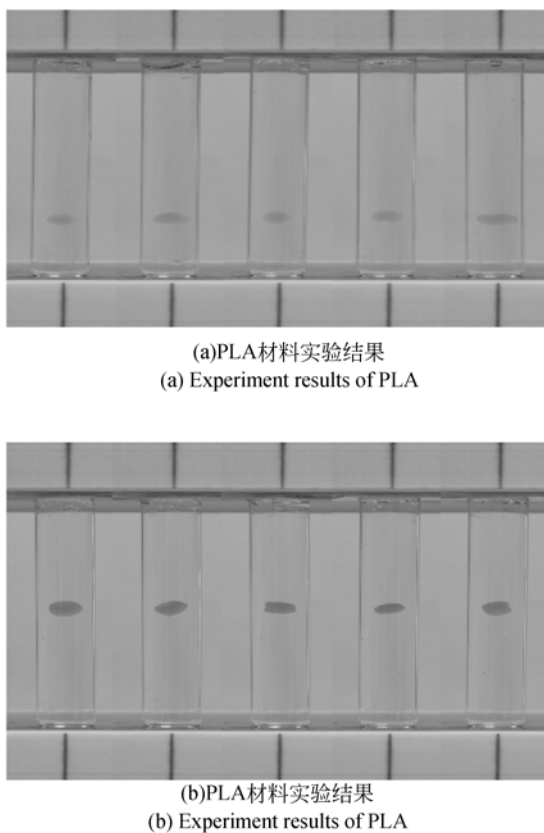


图 7 PLA 材料与 PCL 材料的实验结果图

Fig. 7 Figures of experiment results in measuring PLA and PCL particles

表 1 PLA 材料与 PCL 材料不同测量方法结果对比  
Tab. 1 Comparison result of different measuring method for PLA and PCL

材料	悬浮高度 (mm)	计算密度 (g/cm <sup>3</sup> )	均值 (g/cm <sup>3</sup> )	浮力法测量 结果(g/cm <sup>3</sup> )
PLA	15.8	1.256 98	1.256	1.258
	16.1	1.255 01		
	16.5	1.252 44		
	16.6	1.251 81		
	15.9	1.256 31		
PCL	31.1	1.144 54	1.145	1.144
	31.1	1.144 79		
	31.2	1.144 79		
	31.0	1.144 54		
	30.9	1.145 03		

### 3.4 误差分析

对于拟合给出的计算公式,对结果有影响的参数包括  $\chi_m$ ,  $\rho_m$ ,  $z$ 。其中  $\chi_m$ ,  $\rho_m$  并不相互独立,这两个参数均与介质溶液浓度  $c$ (mol/L)和实验温度  $T$ (°C)相关。 $\chi_m$  与  $\rho_m$  与浓度的关系分别为:

$$\chi_m = \frac{C_{cw}}{T - \theta + 273.15} c - 9 \times 10^{-6}, \quad (9)$$

$$\rho_m(T, c) = W_0 + W_1 T + W_2 T^{3/2} + Ac + BcT + Cc, \quad (10)$$

式中:  $C_{cw}$  为溶质的距离常数,  $\theta$  为维斯常数;对于纯水  $W_0 = 0.999 65$ ,  $W_1 = 2.043 8 \times 10^{-4}$ ,  $W_2 = -6.174 4 \times 10^{-7}$ ;对于  $MnCl_2$ ,  $A = 0.102 2$ ,  $B = 4.966 \times 10^{-4}$ ,  $C = -1.307 \times 10^{-5}$ ,  $D = -3.659 \times 10^{-3}$ ,  $E = -1.631 \times 10^{-4}$ ,  $F = 4.774 \times 10^{-6}$ 。因此,参数均转换为相互独立的参数,公式的综合误差为:

$$\delta\rho_s = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho_s}{\partial T}\delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho_s}{\partial c}\delta c\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho_s}{\partial z}\delta z\right)^2}. \quad (11)$$

### 参考文献:

- [1] 王哲,陈莉津,肖爱玲,等. 塑料密度的测定——理想气体状态方程法[J]. 塑料工业, 2006, 34(B05): 247-248.  
WANG ZH, CHEN L J, XIAO A L, *et al.*. Determination of density of plastics-equation law of ideal gas state[J]. *China Plastics Industry*, 2006.

三个参数的测量误差  $\delta T = \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $\delta c = \pm 0.002 \text{ mol/L}$ ,  $\delta z = \pm 0.2 \text{ mm}$ 。则这三个参数对实验结果造成的误差分别为:  $0.000 81 \text{ g/cm}^3$ ,  $0.001 08 \text{ g/cm}^3$ ,  $0.002 04 \text{ g/m}^3$ 。因此,可以得到  $\delta\rho_s = 0.002 5/\text{cm}^3$ 。

从误差分析可以看出,本文的测量方法具有很高的测量精度。而从三个独立参数对实验结果的影响来看,悬浮高度  $z$  对实验结果影响最大,而悬浮高度的测量仍具有很大的提升空间,精确的测量高度的方法的引入仍可以提高本方法的测量精度。

## 4 结 论

本文结合磁-阿基米德悬浮原理,提出了一种抗磁性物质密度的高精度测量方法,并设计了相关的实验装置。该方法通过对标准密度球实验的结果进行拟合,得出用于密度测量的计算公式。这种测量方法,通过读取样品在装置中的悬浮高度,通过计算公式即可方便快捷地获得样品的高精度的密度测量结果。分析结果显示,本文提出的测量方法,测量精度可以达到  $0.002 5/\text{cm}^3$ 。同时,实验结果显示这种测量方法对样品的微小密度差异以及小尺寸样品具有很高的灵敏度。而对于悬浮高度的测量方法的改进使本方法的测量精度仍有提升的空间。另外,用更多实验结果覆盖更大的测量空间来对曲线进行拟合,可以得到更精确的拟合曲线,提升拟合曲线的精确度。由于这种方法具有装置简单易于制作、操作简单、对小尺寸样品灵敏度高和测量精度高的优点,使得该方法易于实现自动化且在材料分离、精密检测方面具有很大的应用前景。

(in Chinese)

- [2] 王君,张景元,章广帅,等. 实心固体物质密度测量方法研究[J]. 吉林大学学报:信息科学版, 2015, 33(2):173-177.  
WANG J, ZHANG J Y, ZHANG G SH, *et al.*. Research on density measuring method for solids [J]. *Journal of Jilin University*, 2015, 33(2): 173-177. (in Chinese)

- [3] 金艳, 吴大鸣, 何亚东, 等. 超声波测量聚合物熔体密度[J]. 塑料, 2011, 40(5):102-105.  
JIN Y, WU D M, HE Y D, *et al.*. Ultrasonic measurement of polymer melt density[J]. *Plastics*, 2011, 40(5):102-105. (in Chinese)
- [4] 许红, 吴大鸣, 刘颖, 等. 聚合物熔体密度在线测量在精密注射成型中的应用[J]. 化工学报, 2012, 63(1):325-330.  
XU H, WU D M, LIU Y, *et al.*. Application of online measurement of melt density in polymer precise injection molding[J]. *Ciesc Journal*, 2012, 63(1):325-330. (in Chinese)
- [5] Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement[J]. *Astm*.
- [6] IKEZOE Y, HIROTA N, NAKAGAWA&AMP J, *et al.*. Making water levitate[J]. *Nature*, 1998, 393(6687):749-750.
- [7] HIROTA N, KURASHIGE M, IWASAKA M, *et al.*. Magneto-Archimedes separation and its application to the separation of biological materials[J]. *Physica B Condensed Matter*, 2004, 346:267-271.
- [8] ANDO T, HIROTA N, MAIE M. Development of recovery device for particulates in fluid by magneto-Archimedes separation [J]. *Separation & Purification Technology*, 2015, 149:197-207.
- [9] MIRICA K A, SHEVKOPLYAS S S, PHILLIPS S T, *et al.*. Measuring densities of solids and liquids using magnetic levitation: fundamentals[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(29):10049-58.
- [10] MIRICA K A, PHILLIPS S T, MACE C R, *et al.*. Magnetic levitation in the analysis of foods and water. [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2010, 58(11):6565-6569.
- [11] LOCKETT M R, MIRICA K A, MACE C R, *et al.*. Analyzing forensic evidence based on density with magnetic levitation [J]. *Journal of Forensic Sciences*, 2013, 58(1):40-45.
- [12] ATKINSON M B J, BWAMBOK D K, CHEN J, *et al.*. Using magnetic levitation to separate mixtures of crystal polymorphs [J]. *Chemical & Petroleum Engineering*, 1995, 31(8):411-416.
- [13] SUBRAMANIAM A B, YANG D, YU H D, *et al.*. Noncontact orientation of objects in three-dimensional space using magnetic levitation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(36):12980-12985.
- [14] NEMIROSKI A, SOH S, KWOK S W, *et al.*. Tilted magnetic levitation enables measurement of the complete range of densities of materials with low magnetic permeability [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(4):1252-1257.
- [15] 赵朋, 颀俊, 傅建中, 等. 塑料光学透镜的磁悬浮检测[J]. 光学精密工程, 2016, 23(4):756-763.  
ZHAO P, XIE J, FU J ZH, *et al.*. The theory and method of magnetic levitation detection for plastic lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 23(4):756-763. (in Chinese)

#### 作者简介:



赵 朋(1983—),男,湖北英山人,博士,副教授,博士生导师,2004年于华中科技大学获得学士学位,2009年于华中科技大学获得博士学位,2012年于浙江大学机械工程博士后流动站出站。主要从事材料成形加工的数字化与智能化,聚合物微观结构形态的表征与调控,特殊功能高分子器件的设计与制造等方面的研究。E-mail: pengzhao@zju.edu.cn



颀 俊(1991—),男,宁夏银川人,硕士研究生,2013年于浙江大学获得学士学位,主要从事聚合物微观结构形态的表征与调控方面的研究。E-mail: 21425209@zju.edu.cn