

文章编号 1004-924X(2016)04-0756-08

塑料光学透镜的磁悬浮检测

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: 考虑传统的塑料透镜检测方法操作繁琐、耗时长, 本文提出了一种针对小型塑料光学透镜的磁悬浮检测理论与方法, 并设计制造出了相关检测装置。该方法利用磁场对顺磁溶液的磁化作用, 将逆磁性被测样品(塑料透镜)在溶液中悬浮起来, 通过观察透镜在装置中的高度、中心位置和平衡状态下与水平面的偏斜程度, 检测透镜是否存在外观不完整和内部存在气泡等不均匀性的缺陷, 并确定出透镜缺陷存在的位置。通过合格透镜、外形不完整透镜、内部存在气泡透镜和功能不合格透镜开展了多项实验研究来验证该方法的可行性与有效性。结果显示, 该方法的检测精度高、灵敏度高、操作简便且适应性广, 在 0.5 mm 的测量误差下, 密度的测量精度高达 0.003 g/cm³; 对直径小于 10 mm 的透镜, 可检测出总体积在 0.017 mm³ 的内部气泡缺陷。提出的方法在塑料光学透镜的检测方面很有应用潜力。

关键词: 塑料光学透镜; 缺陷检测; 磁悬浮检测; 气泡; 密度

中图分类号: TQ320.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0756

Magnetic levitation detection for plastic optical lenses

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

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

* Corresponding author, E-mail: pengzhao@zju.edu.cn

Abstract: Traditional detecting methods for plastic optical lenses are complicated to operate and very time-consuming. Therefore, a new detection method based on the magnetic levitation theory was proposed for a small plastic lens and a corresponding detection device was designed in this paper. With the detection method, the diamagnetic sample (plastic lens) in the magnetic field of paramagnetic solution was levitated by magnetizing the solution. By observing the height, the centre position and the deflection of the lens in the device, the appearance and interior homogeneity like shrinkage and interior porosity of the lens could be detected. Several experiments on the qualified lenses, the lenses with an incomplete appearance or with interior homogeneity and some of disqualified lenses were performed for verifying the feasibility of the proposed method. The experimental results show that the proposed method is precise sensitive, easy to operate and has wider application fields. The detecting accuracy for density reaches to 0.003 g/cm³ under a millimeter scale. Moreover, the method detects the interior porosity of the lens with a diameter less than 10 mm and the sensitivity to the volume of the porosity

收稿日期: 2015-11-27; 修订日期: 2016-01-08.

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)

reaches to 0.017 mm^3 . The proposed method has great potential for plastic optical lens detection.

Key words: plastic optical lens; defect detection; magnetic levitation detection; bubble; density

1 引言

透镜是光学仪器的重要部件之一。塑料光学透镜在使用光的波长范围内具有透光率高、双折射率稳定等特点。塑料透镜最早主要用于消除照相机镜头成像系统的色差;而随着技术的发展,塑料透镜目前广泛应用于电视和摄影机的成像、LED照明、光盘读取等民用领域以及武器火控、制导系统等军用领域。其中,应用于袖珍激光唱片的两面非球面单片塑料物镜,其性能已达到衍射极限的标准^[1]。塑料光学透镜具有附加值高、成型效率高、经济效益显著的特点,所以具有巨大的市场需求和良好的发展前景^[2-3]。

与玻璃光学透镜相比,塑料光学透镜主要存在内部均匀性差、质量检测繁琐等问题。塑料透镜的材料主要有聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)和烯丙基二甘醇聚碳酸酯(CR-39)等5种,成型工艺以注塑成型为主。注塑成型具有成型效率高、成本低的优点,但是由于透镜的中间厚度和边缘厚度相差较大,容易产生流痕、银纹、缩陷、气孔、翘曲等质量缺陷^[4]。这些成型缺陷会改变塑料光学透镜内部的均匀性,从而改变成像区域的折射率、色散系数等参数,极大地影响透镜的使用,甚至会导致透镜报废。传统的塑料透镜不均匀性检测方法需要全面检测透镜的外形尺寸、焦点和透光率等,才能判断透镜的质量,存在操作繁琐、耗费时间长等局限,特别在检测装夹困难的小型塑料透镜时,这些局限的影响更加突出。近年来,多种结合数字化技术的塑料光学透镜检测方法被提出,这些方法有效地提高了检测效率及自动化程度,但整个过程需要多种昂贵的检测仪器^[5-6]。

磁悬浮检测技术是近年来国外兴起的一种新型检测技术。一般而言,在磁场的作用下逆磁性物质会在顺磁性介质中悬浮起来。1998年,《Nature》杂志报道了日本东京大学 Yasuhiro Ikzoe 等人在氧气介质中悬浮起水滴的相关研究^[7]。2003年,该杂志上又报道了美国密歇根大学 A. T. Cathrall 等人在高磁场强度条件下于液

氧介质中悬浮起金块的相关研究^[8]。美国哈佛大学化学与生物化学实验室在磁悬浮检测的应用方面进行了大量的探索与研究^[9-10]。2009年,该实验室的 Katherine A. Mirica 等人提出了基于磁悬浮技术的密度检测方法,该方法可以高精度无损地测量密度介于 $0.8 \sim 3 \text{ g/cm}^3$ 的样品^[11]。由于塑料透镜为逆磁性物质,其内部的不均匀性显然会导致透镜内部密度的波动,因此本文提出了小型塑料光学透镜的磁悬浮检测方法。该方法具有使用经济、操作简单以及易于实现自动化检测等优点。

2 磁悬浮检测方法

磁悬浮检测的原理示意图如图1所示。两块相同的磁铁同极相对布置(如N极相对),控制磁铁的间距 d 以形成均匀稳定的磁场分布。将逆磁性样品置于磁化率较大的顺磁性溶液中,并将它们放在两块磁铁之间,样品会在溶液中悬浮起来并稳定在一个平衡位置。通过测量样品的悬浮高度 h 以及悬浮姿态来检测样品的密度及分布情况。

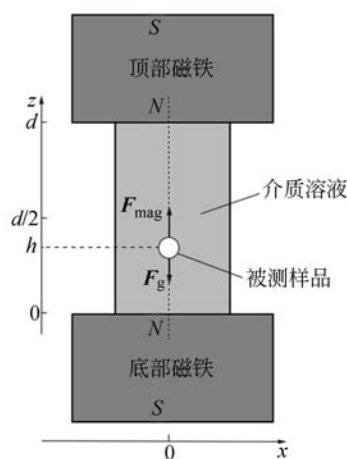


图1 磁悬浮检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of magnetic levitation detection

逆磁性样品在顺磁性溶液中会受到磁力、重力与浮力3个力的综合作用。其中,所受磁力为:

$$\mathbf{F}_{\text{mag}} = \frac{\chi_s - \chi_m}{\mu_0} V (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}, \quad (1)$$

式中: χ_s 与 χ_m 分别为逆磁性样品与顺磁性溶液的磁化率; μ_0 为真空磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7}$; V 为逆磁性样品的体积; ∇ 是向量梯度算子; \mathbf{B} 为被悬浮物所在位置的磁场强度向量^[12]。逆磁性样品所受到的重力与浮力的合力为:

$$\mathbf{F}_g = (\rho_s - \rho_m)V \cdot \mathbf{g}, \quad (2)$$

式中: ρ_s 与 ρ_m 分别为样品与介质溶液的密度, \mathbf{g} 为重力加速度。当逆磁性样品所受的浮力、重力与磁力相平衡时, 样品处于悬浮的平衡状态如式(3)所示:

$$\mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{\text{mag}} = 0. \quad (3)$$

也即为:

$$\frac{\chi_s - \chi_m}{\mu_0} V (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + (\rho_s - \rho_m)V \cdot \mathbf{g} = 0. \quad (4)$$

一般而言, 逆磁性样品的磁化率 χ_s 比顺磁性溶液的磁化率 χ_m 小几个数量级, 因此, χ_s 可以忽略。逆磁性样品的密度 ρ_s 可用式(5)计算。由于塑料光学透镜也为逆磁性物质, 本文将采用磁悬浮技术来检测塑料透镜的不均匀性缺陷。

$$\rho_s = \frac{-\chi_m}{\mu_0 g} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \rho_m. \quad (5)$$

3 实验方案

3.1 实验装置

本文采用 3D 打印技术制作了塑料光学透镜的磁悬浮检测装置, 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 4 个部分。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, 尺寸为 $50.8 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$, 中心表面的磁感应强度为 $(0.370 \pm 0.005) \text{ T}$ 。上下两块磁铁以 N 极

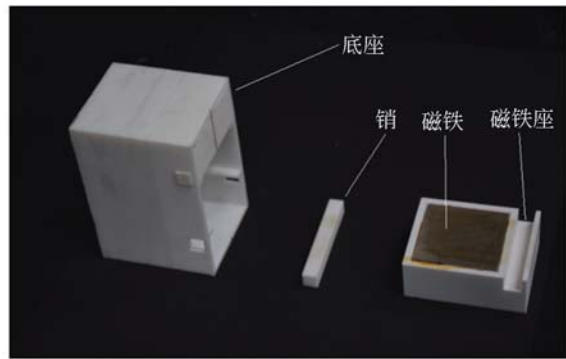


图 2 检测装置的实物图

Fig. 2 Photograph of detection devices

对 N 极的方式布置, 两磁铁间的高度 d 为 45 mm。在两磁铁中心线连线方向, 磁感应强度呈线性变化, 磁场分布为:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{2B_0}{d}z + B_0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 B_0 为磁铁中心表面的磁感应强度。根据磁悬浮理论, 处于磁场中任意位置的被测样品所受到的磁场力在 x, y 轴方向分力的合力指向两磁铁中心线, 被测物体最终的平衡位置将处于两磁铁的中心线上。在平衡状态下, 将式(4)改写为:

$$\frac{\chi_s - \chi_m}{\mu_0} (B_x \frac{\partial B_z}{\partial x} + B_y \frac{\partial B_z}{\partial y} + B_z \frac{\partial B_z}{\partial z}) - (\rho_s - \rho_m)g = 0. \quad (7)$$

考虑到变量 χ_m, ρ_m 并非独立参数, 其值与溶液浓度 c 相关, 式(6)及式(7)中对结果产生影响的独立参数包括 c, h, ρ_s, d, B_0 。

根据误差分析, 每个变量对结果的影响如式(8)所示:

$$\delta \rho_s = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_s}{\partial c} \delta c \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial \chi_s} \delta \chi_s \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial h} \delta h \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial d} \delta d \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_s}{\partial B_0} \delta B_0 \right)^2}. \quad (8)$$

其中, c, ρ_s, d 3 个参数对计算结果的影响可以忽略。给定浓度为 1.5 mol/L 的氯化锰溶液, 在毫米尺测量估读一位数值的前提下, 即 0.5 mm 的误差, 对密度 ρ_s 的检测精度可达 0.003 g/cm^3 。

3.2 实验流程

磁悬浮检测技术的实现流程如图 3 所示, 主

要步骤如下:

步骤 1: 配置顺磁介质溶液。本文选用的介质溶液为 1.5 mol/L 的氯化锰溶液, 溶液密度为 1.148 g/cm^3 , 其磁化率为 -2.771×10^{-4} 。配置好的溶液如图 3(a) 所示。

步骤 2: 将透镜样品放入顺磁介质溶液中。

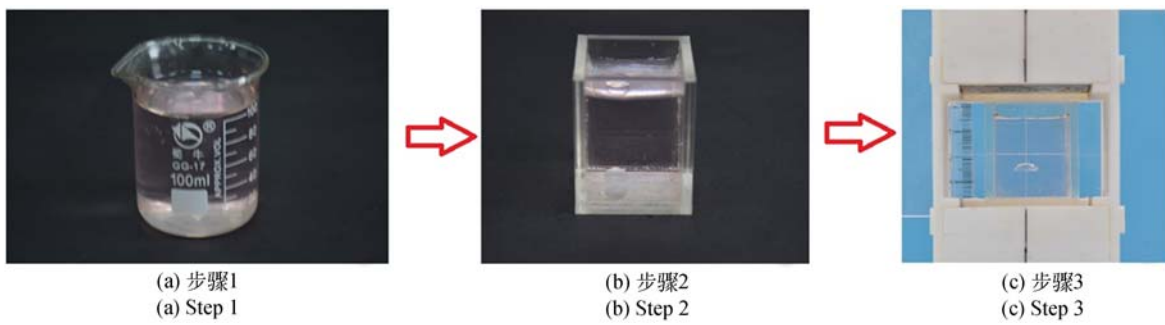


图 3 磁悬浮检测技术的实验流程图

Fig. 3 Procedures of magnetic levitation detection experiment

本文采用的透镜样品为 PMMA 光学透镜,PMMA 材料具有逆磁性,其密度为 1.18 g/cm^3 ,大于溶液密度 1.148 g/cm^3 ,所以 PMMA 光学透镜沉在氯化锰溶液的底部,如图 3(b)所示。此外,为防止观测失真,氯化锰溶液采用方形器皿盛装。

步骤 3:将盛有样品的顺磁介质溶液置入磁悬浮检测装置中。如图 3(c)所示,PMMA 透镜样品在氯化锰溶液中悬浮起来,记录透镜样品的高度 h ,并观察透镜样品在溶液中的悬浮姿态。

4 实验结果与讨论

本文针对合格透镜、外形不完整透镜、内部存在气泡的透镜和功能不合格的透镜开展了实验研究,以验证磁悬浮技术在塑料光学透镜不均匀性检测方面的可行性与有效性。

4.1 合格透镜实验

本文选择了 4 种不同尺寸的合格透镜进行磁悬浮检测,其照片如图 4 所示。其中,1 号、2 号样品分别为 $\Phi 8.5 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$ 、 $\Phi 10 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 的光面平凸透镜;3 号、4 号样品分别为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$ 、 $\Phi 10 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 的双凸透镜。



图 4 合格透镜样品图

Fig. 4 Photograph of non-defective lens samples

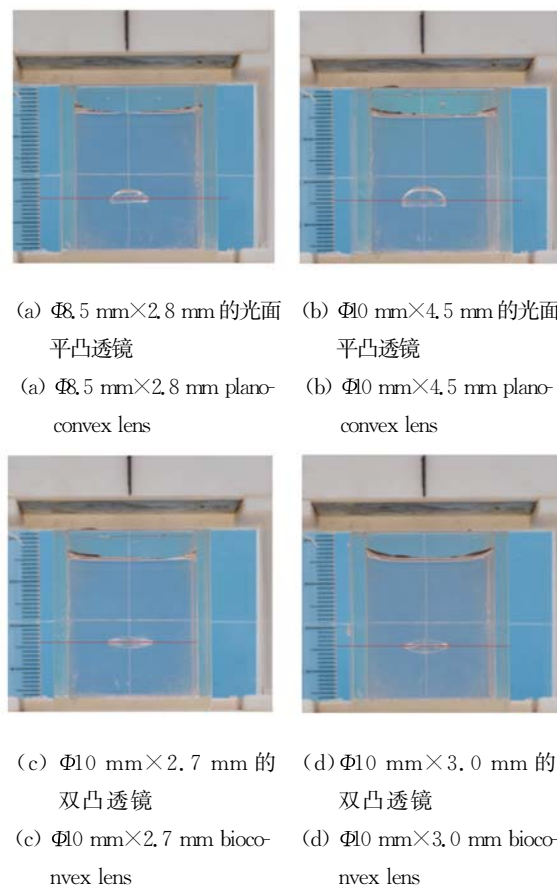


图 5 合格透镜的实验结果

Fig. 5 Experiment results of non-defective lenses

上述 4 种合格透镜的实验结果如图 5 所示。实验结果显示,不同尺寸的合格透镜在检测装置中具有相同的姿态。各个透镜在装置中均保持水平状态,质心位置处于装置上下磁铁中心的连线位置,即图 5 中的垂直线;而且不同透镜的质心高度基本相同,如图 5 中的水平线所示。根据 2.1 节的分析,样品置于该装置中,最后的平衡位置应当位于两磁铁中心的连线上。实际上,由于被测

物体的尺寸跨度较大,其边缘受力已不能简单用中心线的磁场强度描述。对于被检测样品,样品受到的磁场力是样品每个点受到的磁场力的积分,如式(9)所示:

$$\mathbf{F}_{\text{mag}} = \int \frac{\chi_s - \chi_m}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} dV. \quad (9)$$

由于磁场以及透镜的对称性,合格透镜在磁场中不同点的受力会被对称方向点的受力所抵消,而样品所受的重力及浮力的方向始终为垂直方向。因此,无缺陷透镜在磁场中的平衡状态应为水平状态,且透镜中心位置处于磁铁中心的连线上。

4.2 外形不完整透镜实验

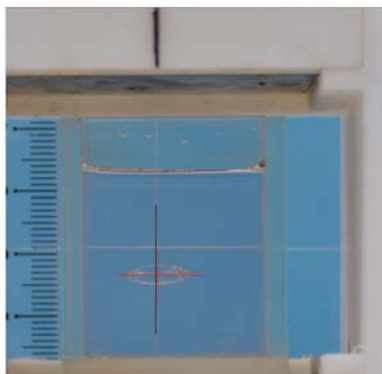
本文对外形不完整的透镜进行了磁悬浮检测。外形不完整的透镜如图 6(a)所示,实验样品尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 的双凸透镜。磁悬浮检测的实验结果如图 6(b)所示,双凸透镜在溶液中位置出现轻微偏斜,质心(红线)离开中心线(黑线)位置向缺陷方向偏移。

由于样品缺陷为透镜外部缺陷,该缺陷虽然



(a) 样品图

(a) Photograph of a sample



(b) 实验结果图

(b) Experiment result

图 6 外形不完整样品的实验图

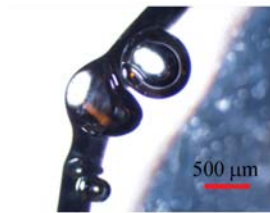
Fig. 6 Experiment result of sample with appearance deflection

破坏了透镜的形状对称性,但并未对透镜的整体密度均匀性以及局部密度均匀性产生影响。当缺陷样品处在正常透镜的平衡位置时,缺陷部分因为材料缺失,无法平衡其对称区域在 XOY 平面上所受的磁场力,样品会被推向外形不完整方向,并最终达到新的平衡位置,表现为样品原中心位置与磁场中心连线出现偏差。而在 Z 轴方向,由于样品的密度均匀性没有产生变化,且最终偏移位置与正常透镜的平衡位置偏差并不是很大,由此产生的 Z 轴磁场力变化所引起的相对于水平面的偏转很小。

4.3 内部存在气泡透镜实验

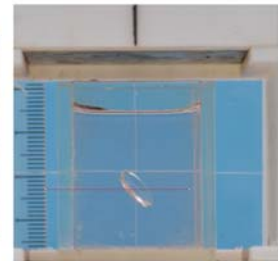
本文对边缘存在气泡的缺陷透镜样品进行了实验。样品有 $\Phi 10 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 和 $\Phi 10 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$ 的双凸透镜两种。 $\Phi 10 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 样品的检测结果如图 7 所示, $\Phi 10 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$ 的检测结果如图 8 所示。

通过分析并计算实验照片, $\Phi 10 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 的透镜缺陷总体积分别约为 0.318,0.043 5,0.03, $\Phi 10 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$ 的透镜缺陷总体积分别约为 0.165,0.017 mm^3 。结果显示,样品在溶液中的状态发生明显偏斜,缺陷发生位置会向上抬起。样品的偏斜角度取决于样品缺陷的大小,缺陷越大的样品偏转角度越大,如图 7 和图 8 所示。



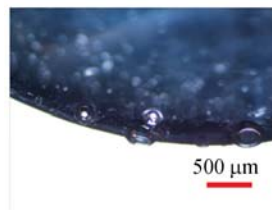
(a) 样品 1 的显微照片

(a) Microscopy of sample 1



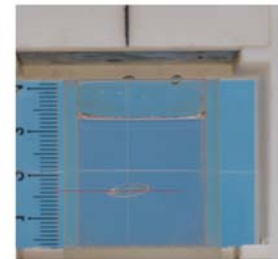
(b) 样品 1 的检测结果

(b) Test result of sample 1



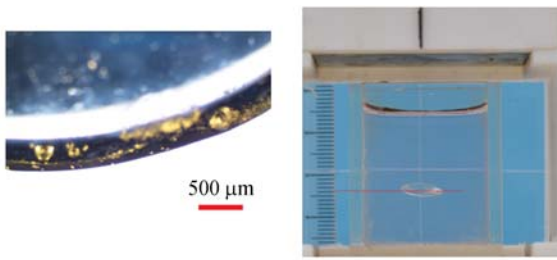
(c) 样品 2 的显微照片

(c) Microscopy of sample 2



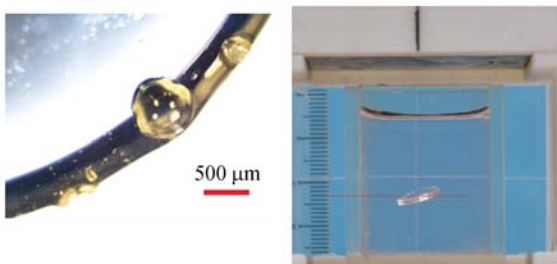
(d) 样品 2 的检测结果

(d) Test result of sample 2

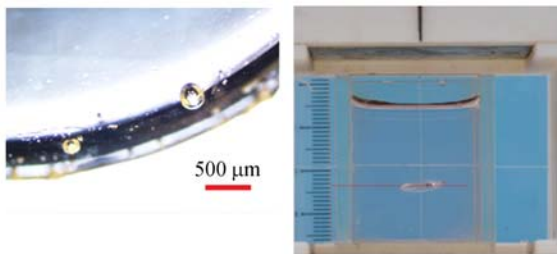


(e) 样品 3 的显微照片 (f) 样品 3 的检测结果
(e) Microscopy of sample 3 (f) Test result of sample 3
图 7 $\Phi 10 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 透镜检测实验

Fig. 7 Experiments of $\Phi 10 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ lens test



(a) 样品 4 的显微照片 (b) 样品 4 的检测结果
(a) Microscopy of sample 4 (b) Test result of sample 4



(c) 样品 5 的显微照片 (d) 样品 5 的检测结果
(c) Microscopy of sample 5 (d) Test result of sample 5
图 8 $\Phi 10 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$ 透镜检测实验

Fig. 8 Experiments of $\Phi 10 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$ lens test

由式(9),式(4)可改写为:

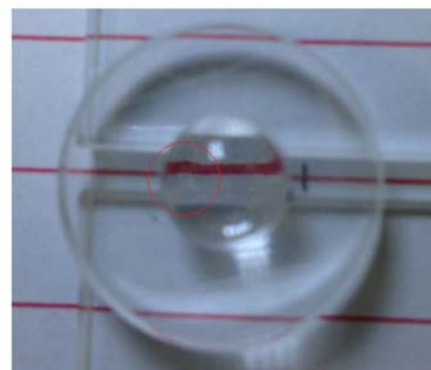
$$\int \frac{\chi_s - \chi_m}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} dV + \int (\rho_s - \rho_m) \mathbf{g} dV = 0, \quad (10)$$

式中 \mathbf{B} 与样品在磁场中所处的位置相关。当透镜内部密度均匀时,式中 ρ_s 为常值,式(10)第二项积分为定值。实验中,样品内部出现气泡,引起气泡出现区域的密度均匀性产生变化。缺陷区域的密度均匀性变化,导致该区域 χ_s 与 ρ_s 的变化。由第 2 节可知, χ_s 的变化对检测结果的影响微乎其微,主要影响为 ρ_s 的变化。缺陷样品处于

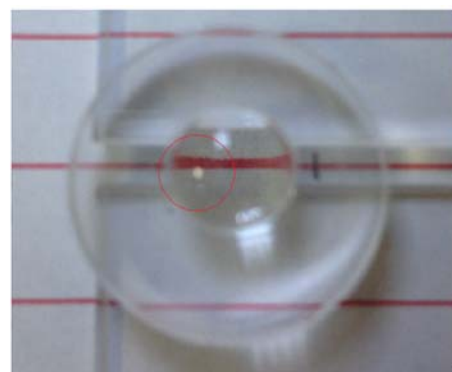
正常样品的平衡位置时,缺陷部分所受浮力和重力的合力由于密度均匀性产生变化。这个变化导致区域内磁场力和重力浮力合力产生的力矩不再平衡,从而导致样品出现偏转。通常情况下,缺陷位置的 ρ_s 变小,因此该区域会出现向上偏转的现象。

4.4 功能不合格透镜实验

本文对功能不合格的 $\Phi 8.5 \text{ mm} \times 2.8 \text{ mm}$ 的光面平凸透镜进行了实验。透镜样品不存在目视可见的明显缺陷,但因为内部不均匀的缺陷对透镜的透光产生了一定的影响。如图 9 所示,功能不合格透镜在放大成像上会发生畸变(图中红圈位置)。该功能不合格透镜的检测结果如图 10 所示,样品在缺陷位置出现偏转。该结果表明,磁悬浮检测方法对目测不明显的透镜不均匀缺陷也有很高的识别灵敏度。



(a) 缺陷透镜
(a) Defective lens



(b) 合格透镜
(b) Non-defective lens

图 9 透镜缺陷位置对比

Fig. 9 Comparison between defective and non-defective lenses

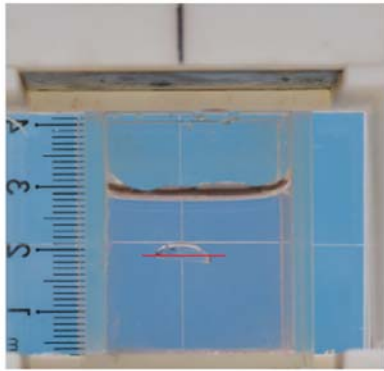


图 10 内部密度不均匀缺陷样品的检测

Fig. 10 Experiment result of sample with invisible interior defect

5 结 论

本文基于磁悬浮检测原理提出了一种检测

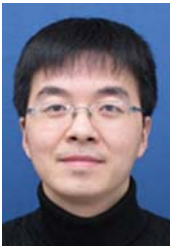
小尺寸塑料光学透镜缺陷的新方法,并通过合格透镜、外形不完整透镜、内部存在气泡透镜和功能不合格透镜对该方法进行了实验验证。该检测装置通过简单的目测观察,即可判断透镜是否具有内部不均匀的缺陷,并可以预测缺陷产生的部位。检测结果主要通过透镜中心与磁铁中心连线的偏移、透镜在装置中与水平面的偏转及透镜在装置中悬浮的高度 3 个方面综合确定。根据本文的实验结果,合格透镜的检测结果应为样品水平悬浮在装置中,透镜中心处于装置上下两磁铁中心线上。外形不完整等表面缺陷会导致透镜中心在装置中的偏移。内部气泡及其他功能性的缺陷会改变透镜内部的均匀性,导致透镜在装置中的最终平衡位置出现相对水平面的偏转。该方法的检测灵敏度可达 0.003 g/cm^3 ,可检测到总体积为 0.017 mm^3 的内部气泡缺陷。

参考文献:

- [1] 陈建勇. 非球面塑料透镜注射压缩模具与成型工艺仿真 [D]. 大连:大连理工大学, 2013.
CHEN J Y. *Molding Process Simulation and Injection Compression Mould of Aspheric Plastic Lenses* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] 孙强, 柳荣, 朴仁官, 等. 塑料非球面透镜在头盔 3D 显示中的应用 [J]. 光学精密工程, 2005, 14(1): 47-52.
SUN Q, LIU R, PIAO R G, *et al.*. Application of plastic aspheric elements in head mounted 3D display [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 14(1): 47-52. (in Chinese)
- [3] 宋满仓, 陈建勇. 基于 MoldFlow 的塑料非球面透镜注压模浇注系统设计 [J]. 模具制造, 2013(5): 52-56.
SONG M C, CHENG J Y. Gating system design of injection compression mold for plastic aspheric lens based on mold flow [J]. *Die & Mould Manufacture*, 2013(5): 52-56. (in Chinese)
- [4] 王晓梅. 非球面塑料透镜模具设计及改进研究 [J]. 模具工业, 2015(2): 1-3, 24.
WANG X M. Design and optimization of mould for plastic aspheric lens [J]. *Die & Mould Industry*, 2015(2): 1-3, 24. (in Chinese)
- [5] 付向文. 基于图像识别的透镜瑕疵检测系统关键技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014.
FU X W. *Research of the Key Technology on Detection System of Lens Defect Based on Image Recognition* [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2014. (in Chinese)
- [6] 陈钦芳, 马臻, 赵蒙, 等. 双胶合透镜法检测大相对孔径凸非球面透镜 [J]. 光子学报, 2014, 43(3): 98-102.
CHEN Q F, MA ZH, ZHAO M, *et al.*. Testing of large NA, convex aspheric lens with doublets [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(3): 98-102. (in Chinese)
- [7] IKEZOE Y, HIROTA N, NAKAGAWA J, *et al.*. Making water levitate [J]. *Nature*, 1998, 393(6687): 749-750.
- [8] CATHERALL A T, EAVES L, KING P J, *et al.*. Magnetic levitation: Floating gold in cryogenic oxygen [J]. *Nature*, 2003, 422(16): 579-579.
- [9] MIRICE K A, PHILLIPS S T, MACE C R. Magnetic levitation in the analysis of foods and water [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(11): 6565-6569.

- [10] HENNEK J W, ALEX N, BALA S A, *et al.*. Using magnetic levitation for non-destructive quality control of plastic parts [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(9):1587-1592.
- [11] 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):10049-10058.
- [12] 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*, 2014, 111(36): 12980-12985.

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,2009年于华中科技大学分别获得学士、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