

文章编号 1004-924X(2025)09-1420-14

基于空心玻璃微珠的多层衍射光波导镜片 高精度装配间隔控制

白家荣^{1,2}, 姚鹏^{1,2*}, 刘凯^{1,2}, 刘祥^{1,2}, 王茜^{1,2}, 李丰国^{1,2,3},
褚东凯^{1,2}, 侯士杰³, 屈硕硕^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院先进射流工程技术研究中心, 山东 济南 250061;

2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

3. 歌尔股份有限公司, 山东 潍坊 261061)

摘要: 针对增强现实光学模组中多层衍射光波导镜片叠合装配的间隔精度控制需求, 提出了一种基于空心玻璃微珠的精密间隔控制方法。通过理论计算与光学模拟仿真, 得出衍射光波导镜片满足成像需求所允许的间隔误差。然后, 设计分选工艺, 自主搭建筛分设备, 获取特定粒径分布的空心玻璃微珠, 并作为超精密间隔标准物质, 用于精密控制衍射光波导镜片的叠合装配间隔。最后, 利用自主研发的高精度衍射光波导镜片叠合系统, 完成了多层衍射光波导镜片的叠合装配实验。实验结果表明: 分选后的空心玻璃微珠形状良好且粒径分布更加集中, 平均粒径为 $38.36\text{ }\mu\text{m}$, 标准偏差为 $1.60\text{ }\mu\text{m}$; 通过50组衍射光波导镜片叠合样本的间隔误差验证, 62%的样本能够满足高质量成像要求, 98%的样本能够满足基本成像要求。该精密间隔控制方法能够满足多层衍射光波导镜片叠合装配的间隔精度以及误差范围, 具有良好的应用前景。

关键词: 衍射光波导镜片; 空心玻璃微珠; 叠合装配; 粒径精度; 间隔误差

中图分类号: TH162 文献标识码: A

doi: 10. 37188/OPE. 20253309. 1420

CSTR: 32169. 14. OPE. 20253309. 1420

High-precision assembly interval control of multilayer diffractive optical waveguide lenses based on hollow glass microspheres

BAI Jiarong^{1,2}, YAO Peng^{1,2*}, LIU Kai^{1,2}, LIU Xiang^{1,2}, WANG Xi^{1,2}, LI Fengguo^{1,2,3},
CHU Dongkai^{1,2}, HOU Shijie³, QU Shuoshuo^{1,2}

(1. Center for Advanced Jet Engineering Technologies (CaJET), School of Mechanical Engineering,
Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of the Ministry of Education,
Jinan 250061, China;

3. GoerTek Inc., Weifang 261061, China)

* Corresponding author, E-mail: yaopeng@sdu.edu.cn

Abstract: To address the need for precise interval control in the stacking assembly of multilayer diffractive

收稿日期: 2025-02-16; 修订日期: 2025-04-02.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2023YFC2413301); 山东省重大科技创新工程项目 (No. 2023CXGC010207)

optical waveguide lenses for augmented reality optical modules, this study proposes a method utilizing hollow glass microspheres. Theoretical calculations and optical simulations are first conducted to determine the permissible interval error for achieving optimal imaging quality, establishing a foundation for practical implementation. Hollow glass microspheres with specific particle size distributions are obtained through an advanced sorting process, employing custom-designed sieving equipment to ensure high precision. These microspheres function as an ultra-precision standard material for interval control during assembly, critically maintaining the required spacing between lenses. A self-developed high-precision stacking system is employed to conduct assembly experiments. The results indicate that the sorted microspheres exhibit uniform morphology and a narrow particle size distribution, with an average diameter of $38.36\text{ }\mu\text{m}$ and a standard deviation of $1.60\text{ }\mu\text{m}$. Interval error verification of 50 stacked samples reveals that 62% meet the criteria for high-quality imaging, while 98% satisfy basic imaging requirements. The proposed precision interval control method effectively ensures the stacking assembly of multilayer diffractive optical waveguide lenses adheres to the specified error range, thereby achieving the desired imaging quality and demonstrating significant potential for practical applications.

Key words: diffractive optical waveguide lens; hollow glass microspheres; stacking assembly; particle size accuracy; interval error

1 引 言

增强现实技术(Augmented Reality, AR)通过移动设备将数字信息叠加到成像系统,实现沉浸式虚拟体验,广泛应用于教育、娱乐、医疗、工业和旅游等领域^[1-5],并成为国内外学者和研究机构的研究热点。衍射光波导镜片是AR光学模组的核心光学元件,多层镜片之间的间隔精度对成像质量至关重要,其装配间隔误差主要表现为衍射光波导镜片对应区域之间的倾斜。黄战华等^[6]通过光线矢量计算分析了波导角度倾斜对成像质量的影响,结果表明波导角度倾斜越大,成像质量越差。Levola^[7]针对波导平行度进行研究,通过理论计算分析出波导倾角对成像色差与失真的影响,提高波导平行度可有效改善色差和失真问题。Ding等^[8]基于提出的双波导架构,分析了纵向和横向波导未对准对光学系统调制传递函数的影响,波导未对准会导致调制传递函数值降低,从而降低成像质量。

目前,对于大多数AR镜头光学模组,衍射光波导镜片的叠合胶层厚度需控制在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以下,以保证系统的成像质量。常用的胶层厚度控制方法包括工装保证法、精密测量法和工装测量结合法^[9]。工装保证法通过设计专用工具或工装控制胶层厚度,能有效减少误差,便于批量生产控

制,但其通用性有限,且设计和制造成本较高^[10];精密测量法通过高精度设备实时监测和调控胶层厚度,精度可达微米甚至纳米级,但其效率难以满足大批量生产需求^[11];工装测量结合法结合了工装的厚度控制和精密测量的准确性,在兼顾生产效率的同时确保质量控制,但也融合了工装和精密测量的缺点^[12]。为满足多层衍射光波导镜片叠合装配的间隔精度,高效高精度的胶层厚度控制仍面临严峻挑战。

衍射光波导镜片叠合装配主要使用紫外光固化胶水(Ultraviolet Curing Adhesive, UV Adhesive),它具有透光率高、固化速度快、收缩率低等优点,易于胶层厚度的控制^[13-14]。空心玻璃微珠(Hollow Glass Microspheres, HGMs)是一种空心结构的无机非金属球状材料,主要成分为硼硅酸盐,具有良好的化学稳定性^[15-17]。在UV胶水中添加空心玻璃微珠,能够有效补偿光固化过程中胶水收缩对衍射光波导镜片间隔的影响,从而确保其间隔精度。刘强等^[18]针对粘接工件,提出了一种通过在胶中添加空心玻璃微珠控制胶厚的方法。根据胶厚理论确定了空心玻璃微珠的适用直径为 $10\sim 30\text{ }\mu\text{m}$,然而,这一粒径范围难以满足高精度装配需求,因此需要对空心玻璃微珠进行分选,以提高粒径精度。Ranjbar等^[19]分析了浮力和时间对空心微珠分选过程的影响,并

通过流体动力重力分离技术有效地将完整空心微珠与破碎微珠分离。Danishr 等^[20]基于粒度和密度差异,介绍了空心玻璃微珠分选中常用的干法和湿法设备。Radko 等^[21]采用具有方形孔径的圆形实验筛组,通过振动筛对微球样品进行筛分与制备,并计算了所选粒径类别微球的含量。何锐等^[22]采用筛网筛分方法,将微珠分选为 4 个粒径级别,并对其粒径分布进行分析。目前,空心玻璃微珠的分选研究主要集中在大范围粒径分选,而针对特定粒径的分选研究较为匮乏,且尚未应用于多层衍射光波导镜片的高精度装配间隔控制。

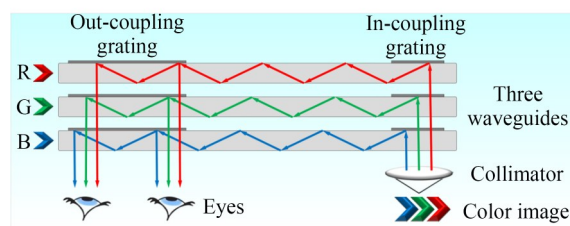
鉴于 AR 镜头光学模组对多层衍射光波导镜片叠合装配的间隔精度要求极高,本文提出了一种基于空心玻璃微珠的精密间隔控制方法。通过光学模拟仿真,确定其叠合装配的间隔精度以及误差范围。采用特定粒径分布的空心玻璃微珠作为超精密间隔标准物质,对叠合装配间隔的胶层厚度进行控制。通过多层衍射光波导镜片的叠合装配实验,验证了该高精度装配间隔控制方法在衍射光波导镜片叠合装配中的可行性。

2 原理与仿真

2.1 多层衍射光波导系统原理

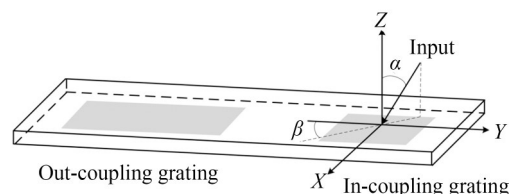
针对光波导式 AR 模组中多层衍射光波导镜片,其基本原理就是光的全反射和衍射。图 1(a) 为多层衍射光波导成像原理,该系统由图像源、光学准直系统、耦入光栅、耦出光栅以及三层衍射光波导构成。首先,图像源发出包含图像信息的三原色光束;经过光学准直系统后,光束被转换为不同角度的平行光,并分别进入对应的光波导,到达耦入光栅;在耦入光栅的衍射作用下,三原色光束在波导内以全反射方式传播;当光束到达耦出光栅时,再次发生衍射并改变传播方向,最终从波导射出并进入人眼。

为了方便分析多层衍射光波导中光线的走向,采用光线的矢量形式进行分析。以单层波导为例,将光线的矢量形式分为 k_x, k_y, k_z 3 个分量,如图 1(b) 所示。光线在衍射光波导中传播,在进入波导和射出波导时发生折射,在波导内传输发生全反射,与光栅结构发生衍射。假设入射光线



(a) 多层衍射光波导成像原理

(a) Multi-layer diffractive optical waveguide imaging principle



(b) 光束矢量示意图

(b) Schematic diagram of beam vector

图 1 多层衍射光波导成像原理及光路传播

Fig. 1 Multilayer diffractive optical waveguide imaging principle and optical path propagation

的矢量形式为 $A(k_{xi}, k_{yi}, k_{zi})$, 出射光线的矢量形式为 $B(k_{xj}, k_{yj}, k_{zj})$, 表面法向量为 $\mathbf{n}$, 折射过程中入射光线与出射光线的关系表达式为^[6]:

$$B = A + \left[\sqrt{n_2^2 - n_1^2 + (\mathbf{A} \cdot \mathbf{n})^2} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}) \right] \cdot \mathbf{n}. \quad (1)$$

反射过程中, 入射光线与出射光线的关系为:

$$B = A - 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}. \quad (2)$$

衍射过程中, 入射光线和出射光线的关系为:

$$k_{xj} = k_{xi} + i \frac{2\pi}{T}, \quad (3)$$

$$k_{yj} = k_{yi}, \quad (4)$$

$$k_{zj} = \begin{cases} + (k_0^2 n_2^2 - k_{xj}^2 - k_{yj}^2)^{1/2} & k_0^2 n_2^2 > k_{xj}^2 + k_{yj}^2 \\ -i (k_{xj}^2 + k_{yj}^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2} & k_0^2 n_2^2 < k_{xj}^2 + k_{yj}^2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为折射前后介质的折射率; $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为入射光线在真空中的波长; T 为光栅周期。

2.2 多层衍射光波导镜片装配间隔误差仿真

为分析多层衍射光波导系统的成像质量,探究叠合精度与成像质量之间的关系,以确定镜片叠合的间隔精度需求,使用 Zemax 光学仿真软件,基于严格耦合波分析法进行了仿真分析。以

某AR模组中多层衍射光波导镜片为例,在Zemax软件的非序列模式下对衍射光波导镜片结构进行建模,其间隔需求在 $38\sim 40\ \mu\text{m}$ 之间,镜片间隔设置为 $39\ \mu\text{m}$ 。而光线的路径仅受耦合入区和耦合出区结构及位置的影响,与波导片的外形尺寸无关,因此,将波导片外形设置为较为基础的矩形,其仿真模型如图2所示。衍射光波导镜片的光学参数根据工件实际参数进行设置,定义系统波长为 $0.55\ \mu\text{m}$,衍射光波导镜片的折射率设置为1.57,光栅的凹槽周期为0.433 6,剖面深度为 $0.2\ \mu\text{m}$,谐波最大级次为5,填充因子为0.5,层级为1,反射和透射的参数相同,耦合光栅和耦合出光栅的参数相同,其他参数按照透镜默认参数设置。

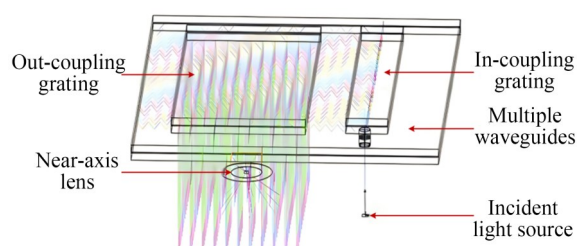


图2 衍射光波导镜片叠合结构的Zemax仿真模型

Fig. 2 Simulation model of diffractive optical waveguide lens stacked structure in Zemax

光学系统性能的常用衡量标准是调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF), MTF同时包含分辨率和对比度两项技术参数,能够反映光学系统分辨图像细节及明暗差异的能力^[23]。在仿真模型中,以 0.002° 为步长,调整多层衍射光波导镜片的相对倾斜角度,获取不同的MTF数值,结果如图3所示。

多层衍射光波导镜片的间隔误差可以通过几何计算转化为镜片之间的倾斜误差。如图4所示,设定衍射光波导镜片之间的相对倾斜角度为 θ ,产品的实际尺寸为 φ ,由此可得,多层衍射光波导镜片之间所允许的间隔误差 δ 为:

$$\delta = \varphi \times \sin \theta. \quad (6)$$

以距近轴透镜中心1 mm处的MTF测量值作为参考标准,对测量结果进行分析。当MTF达到合格范围,即 $\text{MTF} > 60\%$,允许的多层衍射光波导镜片间的相对倾斜角度为 0.008° ,由

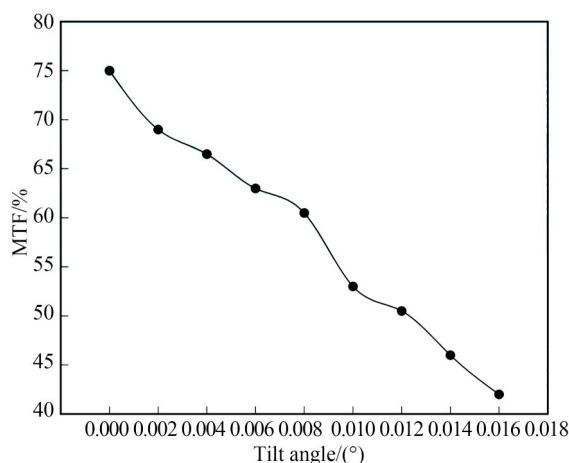


图3 衍射光波导镜片间相对倾角对MTF的影响

Fig. 3 Influence of relative inclination angle between diffractive optical waveguide lenses on MTF

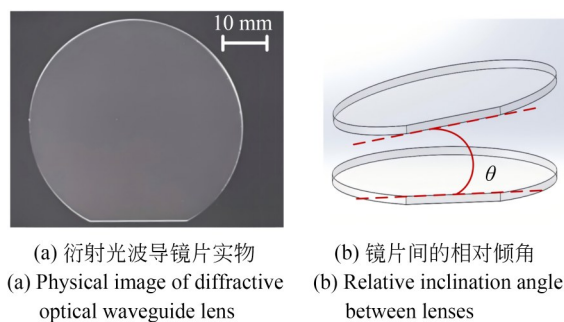


图4 衍射光波导镜片的相关参数

Fig. 4 Related parameters of diffractive optical waveguide lens

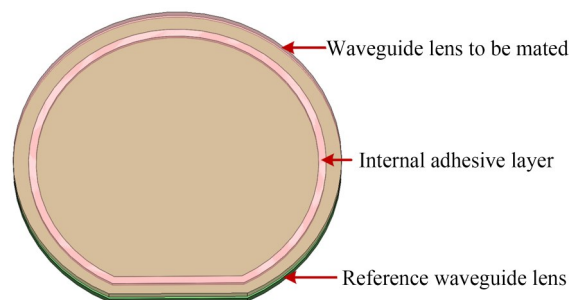
式(6)计算得出,间隔误差为 $2\ \mu\text{m}$ 。为了保证高质量成像效果,对MTF数值增加一定的安全裕量,选取MTF为70%,以多层衍射光波导镜片的相对倾斜角度 0.001° 计算最大间隔误差,由式(6)得出间隔误差为 $1\ \mu\text{m}$ 。

3 间隔控制机理与分选工艺

3.1 基于空心玻璃微珠的间隔控制机理

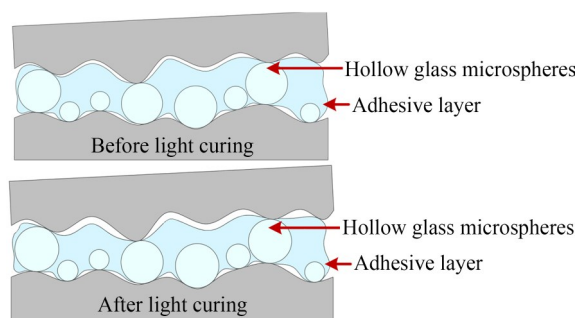
在多层衍射光波导镜片的胶接过程中,特定粒径分布的空心玻璃微珠可作为超精密间隔的标准物质,控制胶层的厚度,达到间隔控制的作用。光波导镜片的胶接结构示意图如图5(a)所示。

如图5(b)所示,在光固化过程中,UV胶水会在胶层厚度方向和平面方向发生收缩,且这一



(a) 镜片胶接结构示意图

(a) Schematic diagram of bonded structure of lens



(b) 空心玻璃微珠与衍射光波导镜片接触状态示意图

(b) Schematic diagram of contact state between hollow glass microspheres and diffractive optical waveguide lens

图 5 空心玻璃微珠的间隔控制机理

Fig. 5 Interval control mechanism of hollow glass microspheres

收缩过程在光固化照射结束后仍会持续数小时^[24]。如果仅使用 UV 胶水进行光波导镜片的胶接,其光固化收缩的影响将无法保证间隔精度。此外,光固化过程会导致温度升高,温差可达几十摄氏度^[25]。由硼硅酸盐材料制成的空心玻璃微珠具有极低的热膨胀率(约 $3 \sim 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)和良好的热稳定性。对于粒径为 $38 \sim 40 \mu\text{m}$ 的空心玻璃微珠,约 50°C 的温差变化对粒径精度产生的影响约为 10 nm 。因此,在光固化过程中,空心玻璃微珠仍能保持其粒径精度,满足装配间隔的要求。在光波导镜片胶接过程中,仅有粒径较大的空心玻璃微珠能够同时接触上下两层光波导镜片,而粒径较小的微珠仅接触到底层光波导镜片,在间隔控制中不起作用。此外,受光波导镜片面形的影响,为满足多层衍射光波导镜片间特定的间隔精度需求,需要对空心玻璃微珠的粒径范围进行控制,减少粒径公差,从而降低装配误差。

3.2 空心玻璃微珠分选工艺

仿真结果表明,在满足高质量成像需求的情况下,衍射光波导镜片间的间隔误差为 $1 \mu\text{m}$ 。目前,大多数空心玻璃微珠产品的尺寸分布范围较大,粒径精度较低。因此,需要采用相关的分选工艺对其尺寸分布进行控制,使粒径主要集中在特定的粒径范围内,如图 6 所示。

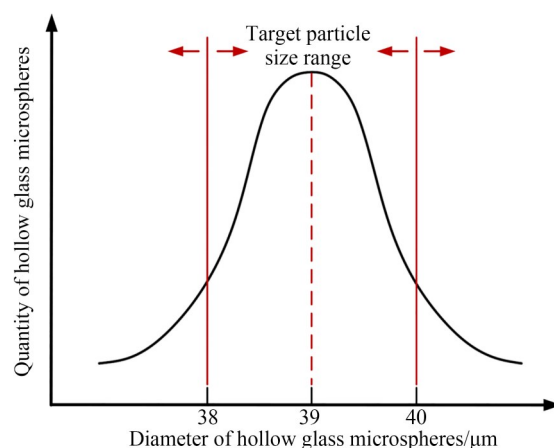
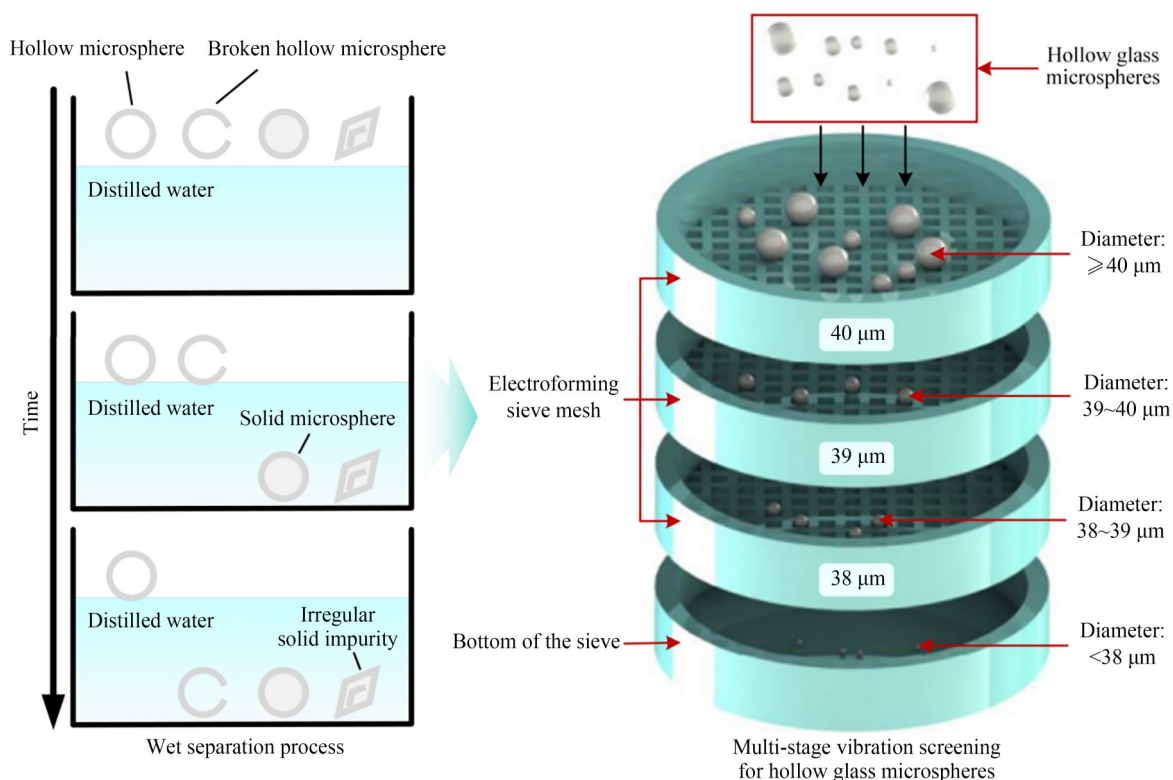


图 6 空心玻璃微珠的粒径分布

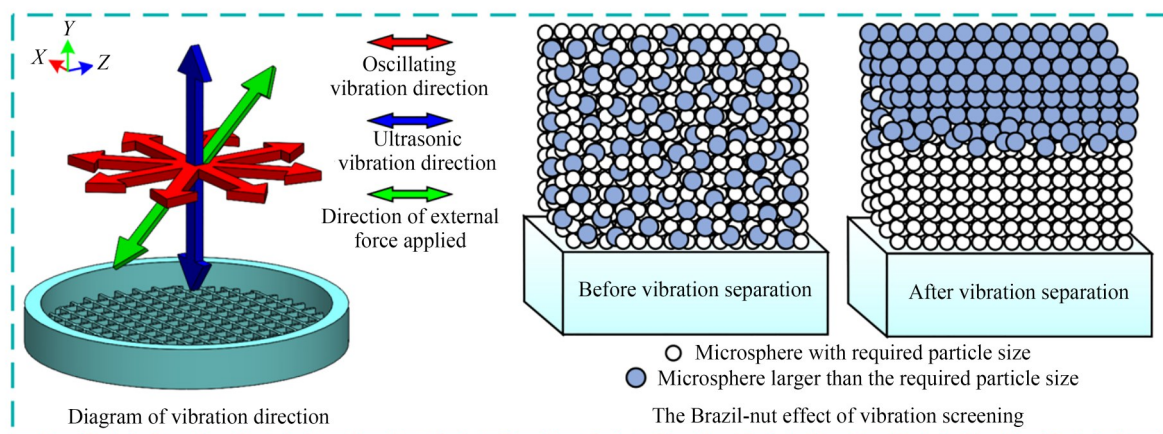
Fig. 6 Particle size distribution of hollow glass microspheres

分选工艺流程如图 7(a)所示,首先要对空心玻璃微珠进行湿法分离^[19],这种分选方法主要是利用物质与液体的密度差异来分选出目标物质。在微珠的湿法分离过程中,采用蒸馏水作为分离介质,其密度为 1 g/cm^3 。空心玻璃微珠的密度为 $0.21 \sim 0.24 \text{ g/cm}^3$,小于蒸馏水的密度,因此会浮在液体表面。而破碎的空心玻璃微珠、实体玻璃微球及其他不规则的玻璃晶体密度均大于蒸馏水,会沉入液体底部。通过此分选方法,可初步获得形状良好的空心玻璃微珠。

在完成湿法分离后,需要对初步获得的空心玻璃微珠进行恒温烘干,烘干温度约为 80°C ^[26]。烘干完成后,采用多级振动筛分对空心玻璃微珠进行筛选,其主要原理如图 7(a)所示。筛选过程中,选用网孔尺寸精度为 $1 \mu\text{m}$ 的超精密电成型筛网作为筛分工具,且三层筛网与筛底依次叠放,每层筛网的网孔尺寸逐级减小 $1 \mu\text{m}$,分别为



(a) 分选工艺流程示意图
(a) Schematic diagram of sorting process



(b) 振动筛分原理
(b) Principle diagram of vibration sieving

图7 空心玻璃微珠的分选工艺

Fig. 7 Sorting process for hollow glass microspheres

40, 39 和 38 μm 。将恒温烘干后的空心玻璃微珠放置于最上层筛网,通过混合振动系统与外力作用的激励使筛网产生振动。利用混合振动系统产生的“巴西果效应”^[27],大粒径的微珠与小粒径的微珠产生分层,大粒径的微珠逐渐集中在物料层的顶部,而小粒径的微珠则逐渐集中在物料层

的底部,如图7(b)所示。当微珠与筛网充分接触,小于筛网网孔尺寸范围的微珠落入下一层筛网,而大于筛网网孔尺寸范围的微珠留在筛网上,完成筛分。最终,分别收集 38 μm 和 39 μm 筛网上的空心玻璃微珠,以获得粒径精度更高的筛分结果。

4 实验结果与讨论

4.1 空心玻璃微珠的分选实验

按照所提出的分选工艺对空心玻璃微珠进行筛选,分选实验流程如图 8 所示。未筛分空心玻璃微珠的性能参数列于表 1,筛网的相关规格数据见表 2。

实验过程中,将已完成烘干但未筛分的空心玻璃微珠以 1 mm 厚度均匀铺开,覆盖筛网面积的四分之三,此添加量更为适宜。随后,采用多级振动筛分装置对微珠进行筛分。将标准实验筛机的计时器设置为 5 min,超声波发生器的工

表 1 空心玻璃微珠的性能参数
Tab.1 Performance parameters of hollow glass microspheres

Performance parameter	Value
Appearance	White and Good fluidity
Specific gravity/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.27—0.30
Bulk density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.11—0.13
Particle size/ μm	≤ 65
Crush strength/psi	4 000
Flotation/%	≥ 95
Coefficient of thermal expansion/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$3\times 10^{-6}-5\times 10^{-6}$

表 2 筛网网孔数据
Tab.2 Mesh data for sieves

Pore size/ μm	Nominal/ μm	Mean/ μm	Maximum value/ μm	Minimum value/ μm	Range/ μm
38	38	37.9	38.3	37.3	1
39	39	39.1	39.7	38.1	1.6
40	40	40.1	40.7	39.7	1

作模式调整为 C3 模式(连续工作模式,超声输出电流峰值为 0.25 A),然后启动标准试验筛机和超声发生器,使两者同时工作。筛分完毕后,对不同筛网上的空心玻璃微珠进行分类收集,将第一次 38 μm 与 39 μm 筛网上收集到的微珠重新添加到最上层的 40 μm 筛网中,保持相同设置再次进行筛分,此过程重复 3~5 次,最终将不同筛网上收集到的空心玻璃微珠进行分类保存。在数显显微镜下,分别对 38 μm 与 39 μm 筛网上最终收集的空心玻璃微珠进行拍照,并使用图像识别法获得其粒径。为保证所得统计结果更接近真实值,拍照的空心玻璃微珠数量应不少于 2 500 个。最后,对所得粒径数据进行统计分析,并按粒径从小到大的顺序排序,以确定粒径分布范围。

未进行分选的空心玻璃微珠的尺寸分布范

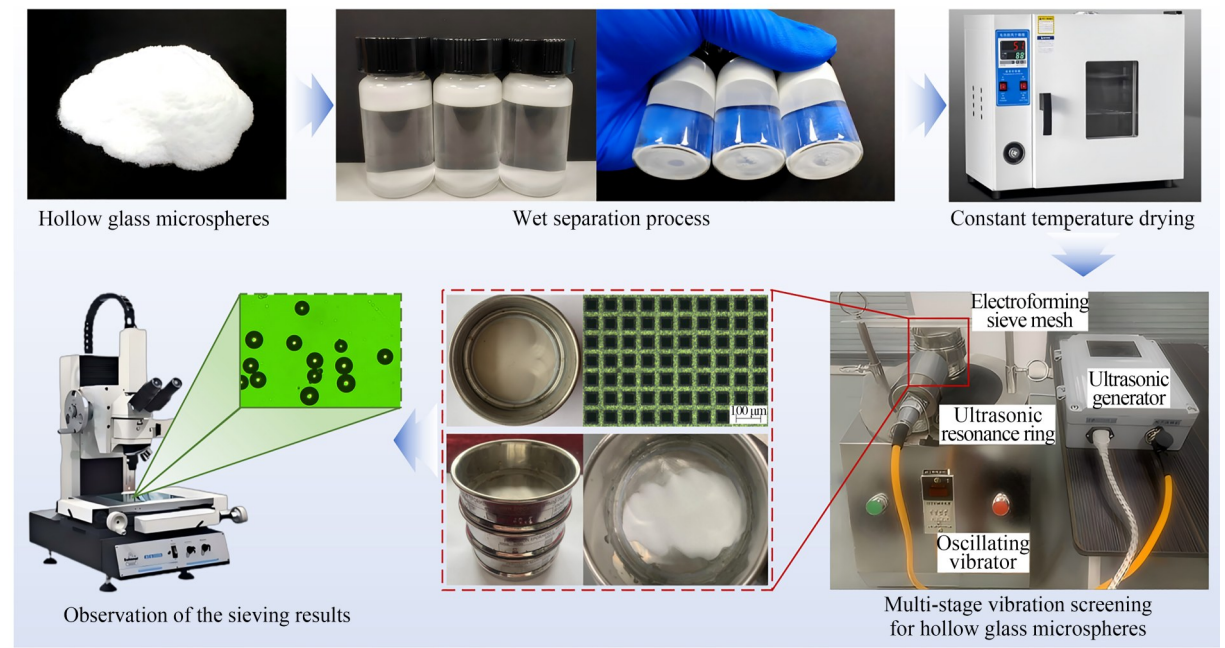


图 8 空心玻璃微珠的分选实验流程

Fig. 8 Flow chart of sorting experiment of hollow glass microspheres

围较大,粒径精度较低,并含有许多杂质,如图9(a)所示。这些杂质包括破碎的空心玻璃微珠、形状畸变的微珠,以及少量不规则玻璃晶体和实

心微珠。经过分选处理后,获取的空心玻璃微珠形状良好且粒径更加均匀,但仍存在一些碎屑残留在微珠表面,如图9(b)所示。

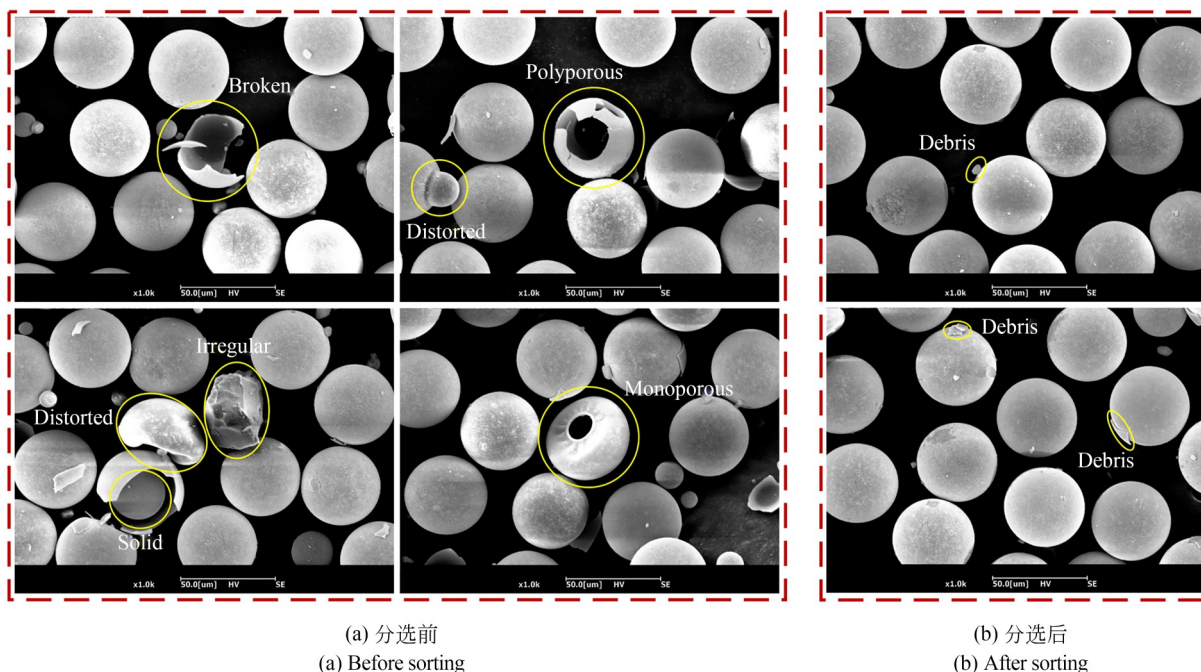


图9 空心玻璃微珠的SEM图

Fig. 9 SEM images of hollow glass microspheres

对分选后 $38\ \mu\text{m}$ 与 $39\ \mu\text{m}$ 筛网上收集的空心玻璃微珠分别进行粒径统计分析,结果如图10所示。分析表明, $38\ \mu\text{m}$ 筛网上空心玻璃微珠的平均粒径为 $38.36\ \mu\text{m}$,标准偏差为 $1.60\ \mu\text{m}$; $39\ \mu\text{m}$ 筛网上空心玻璃微珠的平均粒径为 $39.27\ \mu\text{m}$,标

准偏差为 $1.67\ \mu\text{m}$ 。在实际叠合过程中,大粒径微珠更容易起到间隔控制作用,随着 $40\ \mu\text{m}$ 以上的空心玻璃微珠比例的增加,微珠对间隔精度的控制效果会降低。而 $38\ \mu\text{m}$ 筛网上 $40\ \mu\text{m}$ 以上的微珠比例较低,因此,优先选择 $38\ \mu\text{m}$ 筛网上收

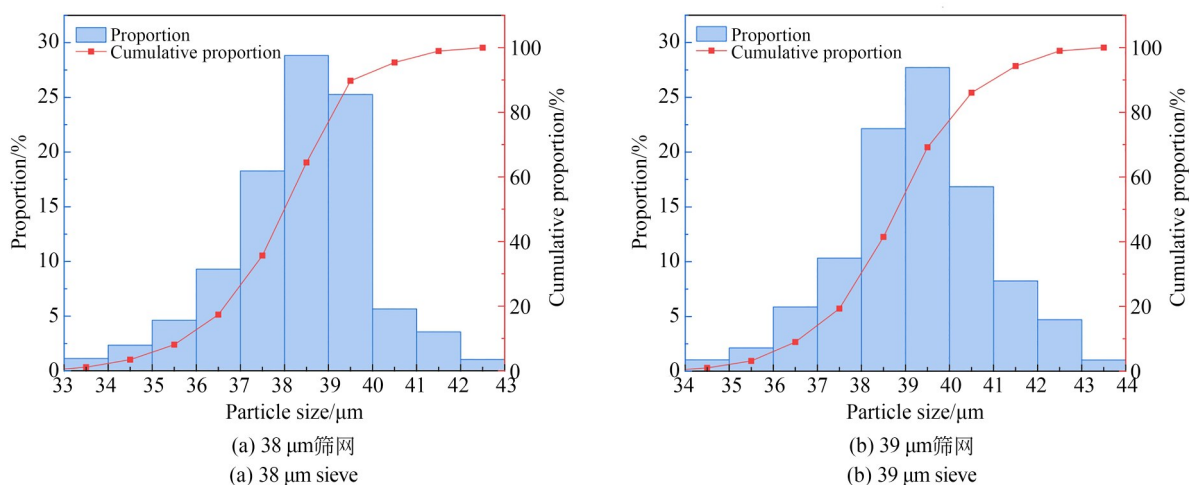


图10 空心玻璃微珠粒径统计结果

Fig. 10 Statistical results of particle size of hollow glass microspheres

集的空心玻璃微珠进行衍射光波导镜片的叠合装配。

4.2 空心玻璃微珠与 UV 胶水的混合实验

完成空心玻璃微珠的分选后,使用真空搅拌脱泡机将分选出的微珠与 UV 胶水按照 1%~

4% 的质量分数进行均匀混合,并通过数显显微镜观察微珠的分散状态,如图 11(a)所示。由观察结果可知,当空心玻璃微珠的质量分数为 3% 时,混合物中微珠的分布较为均匀,分散性良好,堆积现象较轻,表明该混合比例较为合适。

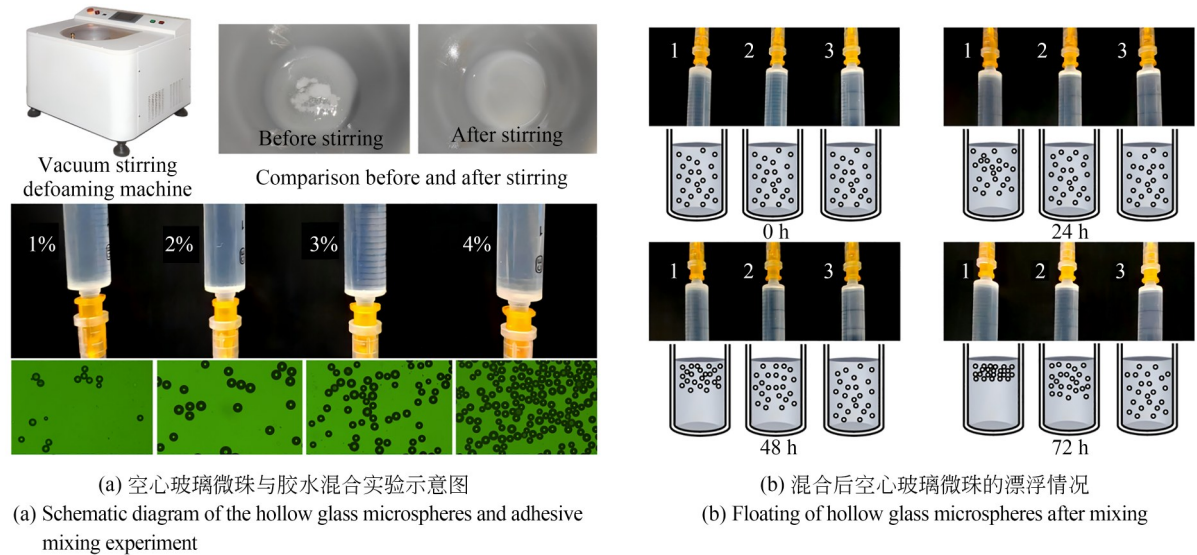


图 11 空心玻璃微珠与 UV 胶水的混合实验结果

Fig. 11 Mixing experiment results of hollow glass microspheres and UV adhesive

由于空心玻璃微珠密度较小,漂浮率较高,因此,需要进一步研究 UV 胶水黏度与微珠漂浮现象的关系,以避免微珠短时间内发生漂浮和堆叠。将质量分数为 3% 的空心玻璃微珠与不同黏度的 UV 胶水进行混合,UV 胶水参数如表 3 所示。混合后,分别在 0, 24, 48 和 72 h 时观察微珠的漂浮情况,如图 11(b)所示。由观察结果可知,0 h 时,3 种 UV 胶水与微珠均匀混合,未出现漂浮现象;24 h 时,1 号 UV 胶水中微珠略有漂浮,而 2 号和 3 号 UV 胶水中微珠无明显漂浮现象;48 h 时,1 号 UV 胶水中微珠漂浮严重,2 号 UV 胶水中微珠略有漂浮,3 号 UV 胶水

中微珠无明显漂浮现象;72 h 时,1 号和 2 号 UV 胶水中微珠漂浮严重,3 号 UV 胶水中微珠无明显漂浮现象。因此,根据存放时间选择不同黏度的 UV 胶水与质量分数为 3% 的空心玻璃微珠进行混合,制备微珠与 UV 胶水的混合物。考虑到微珠与 UV 胶水混合物在实际使用中的存放要求,后续实验中 UV 胶水的黏度选为 20 000~30 000 cP,并与空心玻璃微珠按照 3% 的质量分数均匀混合。

4.3 多层衍射光波导镜片的叠合装配

衍射光波导镜片自身的平面度是影响叠合精度的主要因素,经过超精密加工后,其表面仍存在约 0.3 μm 的平面度误差。在进行叠合装配实验时,应确保每组衍射光波导镜片的配合面平面度误差均 $\leq 0.3 \mu\text{m}$ (即 PV 值 $\leq 0.3 \mu\text{m}$)。自主研发的衍射光波导镜片高精度叠合装配系统如图 12(a)所示,高精度叠合装配流程如图 12(b)所示,利用该系统完成多层衍射光波导镜片的装配,实现高精度的间隔控制。其主要流程包括上料、位姿调整(粗调)、点胶、位姿调整(精调)以及

表 3 UV 胶水参数

Tab. 3 Parameters of UV adhesive

Serial number	Density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Viscosity/cP
1	1.05	10 000
2	1.07	20 000
3	1.06	30 000

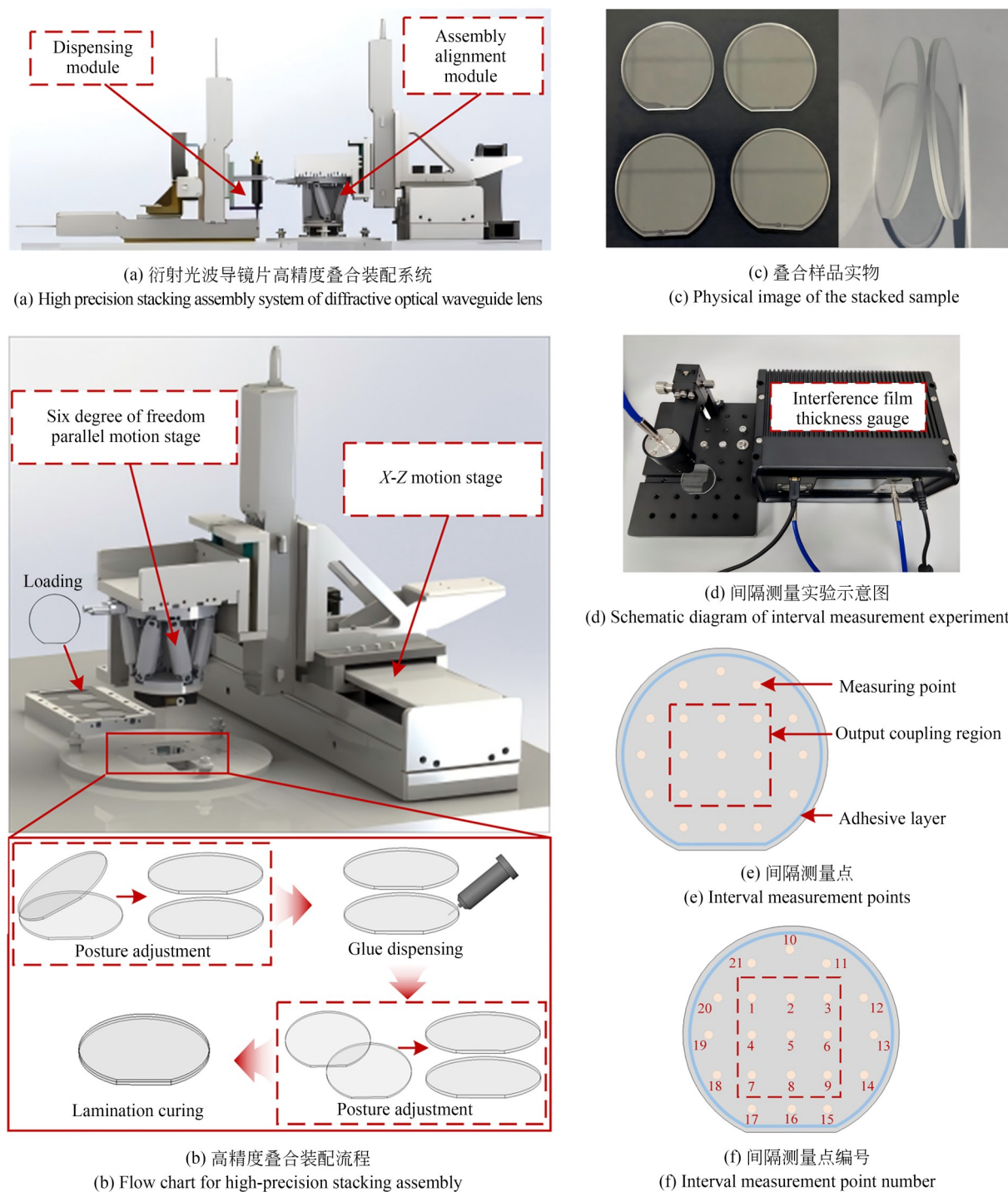


图 12 多层衍射光波导镜片的高精度叠合与间隔测量

Fig. 12 High-precision stacking and interval measurement of multilayer diffractive optical waveguide lenses

叠合固化。首先,将两层波导片分别放入上料盘的指定位置,调用上料轴与负压夹具分别将基准波导片和待配合波导片转移至叠合工位;接着调用装配对位模块,进行位姿调整(粗调),对于水平方向的误差,通过视觉模块识别波导片边缘轮

廓,计算XY方向的水平偏差,并通过相应运动轴进行对准,完成后移走待匹配波导片;然后调用点胶模块,将含有空心玻璃微珠的胶水涂附在两片波导片之间,进行点胶作业,点胶路径为留有1.5 mm开口的切边圆形,胶宽为1 mm;点胶结

束后,再次调用装配对位模块,完成位姿调整(精调);最后,调用运动轴将上下两片波导片贴合,并进行叠合固化,UV胶水的收缩率 $<1\%$,固化过程可控制在10 s内完成,从而实现多层衍射光波导镜片之间的高精度叠合装配。

在使用特定粒径分布的空心玻璃微珠进行间隔控制的基础上,通过自主研发的高精度衍射光波导镜片叠合系统,完成了50组叠合实验,得到的衍射光波导镜片样品如图12(c)所示。完成装配后,使用干涉膜厚仪测量衍射光波导镜片的叠合间隔,其测量精度为 $0.01\text{ }\mu\text{m}$,如图12(d)所示。测量时,在衍射光波导镜片耦出区内侧取9个固定测量点,耦出区外侧取12个固定测量点,分别测量叠合间隔并分析间隔精度,测量点位置如图12(e)所示。

以其中一组叠合实验为例,其间隔测量点的编号如图12(f)所示,分别记录耦出区内以及耦出区外的间隔测量值,如图13所示。耦出区内的测量点中,间隔极大值为 $38.60\text{ }\mu\text{m}$,极小值为 $38.90\text{ }\mu\text{m}$;全平面内的测量点中,间隔极大值为 $38.95\text{ }\mu\text{m}$,极小值为 $38.15\text{ }\mu\text{m}$ 。衍射光波导镜片的间隔误差是指衍射光波导镜片间隙层间的平行度误差。因此,在该组叠合实验中,耦出区内的间隔误差为 $0.30\text{ }\mu\text{m}$,全平面内的间隔误差

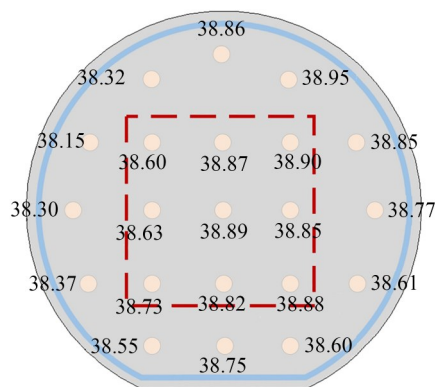


图13 各测量点的间隔测量值

Fig. 13 Interval measurement values of each interval point

为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。

通过50组衍射光波导镜片的叠合装配实验,统计了光波导镜片在耦出区及全平面内的叠合精度,如图14所示,并对结果进行了分析,如表4所示。当间隔取样点覆盖波导片全平面时,50组波导片叠合样本中,间隔误差在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 内的比例为46%,间隔误差在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 内的比例为82%。实际成像时,仅需耦出区内的间隔误差即可,对耦出区数据进行单独分析,间隔误差在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 内的比例可以达到62%,间隔误差在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 内的比例可以达到98%。由此可知,62%的样本能够满足高质量成像要求,98%的样本能够满足基本成像要求。

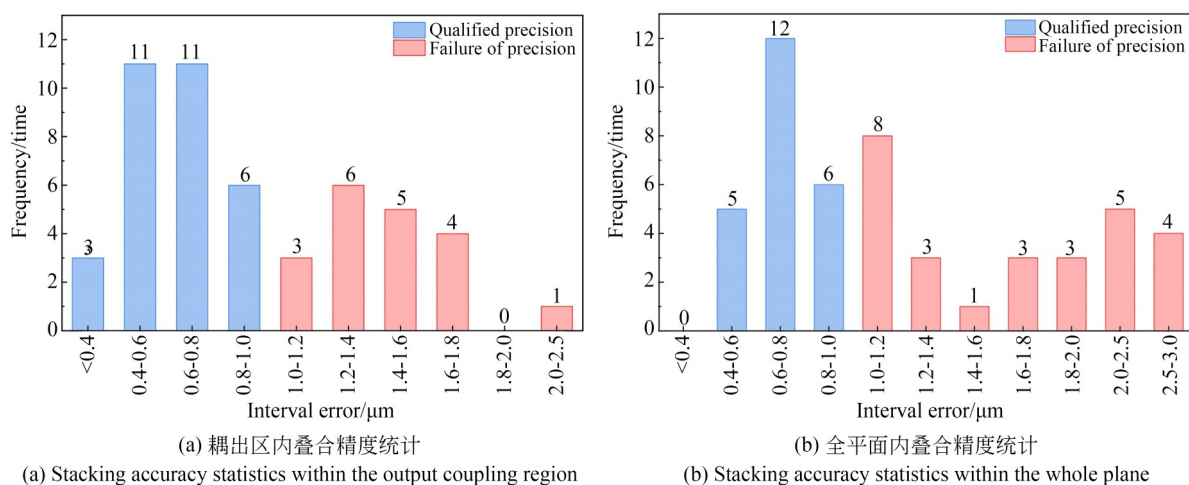


图14 衍射光波导镜片叠合装配实验结果

Fig. 14 Experimental results of stacked assembly of diffractive optical waveguide lenses

表 4 衍射光波导镜片叠合装配实验结果的统计分析
Tab.4 Statistical analysis of experimental results on stacked assembly of diffractive optical waveguide lenses

Detection region	Whole plane	Output coupling region
Total quantity	50 groups	50 groups
Interval error<1 μm	23 groups	31 groups
The proportion of interval error<1 μm	46%	62%
Interval error<1.2 μm	31 groups	34 groups
Interval error<1.4 μm	34 groups	40 groups
Interval error<2 μm	41 groups	49 groups
The proportion of interval error<2 μm	82%	98%

5 结 论

本文针对增强现实光学模组中多层衍射光波导镜片叠合装配的间隔精度需求,提出了一种基于空心玻璃微珠的精密间隔控制方法。首先,通过理论计算与Zemax光学模拟仿真,分析得出衍射光波导镜片满足成像需求所允许的间隔误差。其次,采用空心玻璃微珠作为超精密间隔标准物质,阐述了基于空心玻璃微珠的间隔控制机理,提出了空心玻璃微珠的高精度分选工艺,并通过自主搭建的分选设备,进一步提高了微珠的

粒径精度。然后,将获取的空心玻璃微珠与UV胶水按照质量分数为3%的比例进行混合,胶水的黏度为20 000~30 000 cP。最后,在确保每组衍射光波导镜片的配合面平面度误差均≤0.3 μm的前提下,利用自主研发的高精度衍射光波导镜片叠合系统,完成了多层衍射光波导镜片的叠合装配实验。在空心玻璃微珠的分选实验中,分选后的空心玻璃微珠形状良好且粒径分布更加集中,平均粒径为38.36 μm,标准偏差为1.60 μm;在多层衍射光波导镜片的叠合装配实验中,通过50组衍射光波导镜片叠合样本的间隔误差验证,62%的样本能够满足高质量成像要求,98%的样本能够满足基本成像要求。实验结果表明,该高精度装配间隔控制方法能够满足多层衍射光波导镜片叠合装配的间隔精度以及误差范围,具有良好的应用前景。

作者贡献声明:

- 白家荣:初稿写作,方法验证,可视化呈现;
姚鹏:论文审核与写作指导,提供资源,项目管理;
- 刘凯:仿真模型设计;
刘祥:分选实验设计;
王茜:叠合实验设计;
李丰国:理论指导;
褚东凯、屈硕硕:论文审核与编辑;
侯士杰:论文审核。

参考文献:

[1] ZHANG Y Q, FEIJOO-GARCIA M A, GU Y Y, *et al.* Virtual and augmented reality in science, technology, engineering, and mathematics (STEM) education: an umbrella review [J]. *Information*, 2024, 15(9): 515.

[2] HIDAYAT R, WARDAT Y. A systematic review of augmented reality in science, technology, engineering and mathematics education [J]. *Education and Information Technologies*, 2024, 29(8): 9257-9282.

[3] SUN P, ZHAO Y, MEN J, *et al.* Application of virtual and augmented reality technology in hip surgery: systematic review[J]. *Journal of Medical Internet Research*, 2023, 25: e37599.

[4] BOBOC R G, BĂUTU E, GÎRBACIA F, *et al.* Augmented reality in cultural heritage: an overview of the last decade of applications[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(19): 9859.

[5] SIDANI A, MATOSEIRO DINIS F, DUARTE J, *et al.* Recent tools and techniques of BIM-based augmented reality: a systematic review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 42: 102500.

[6] 黄战华, 芦畅泰, 潘成, 等. 光栅波导增强现实显示系统误差像质分析与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0905003.

HUANG ZH H, LU CH T, PAN CH, *et al.* Error image quality analysis and experiment of augmented reality display system based on grating waveguide

- [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(9): 0905003. (in Chinese)
- [7] LEVOLA T. Diffractive optics for virtual reality displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, 14(5): 467-475.
- [8] DING Y Q, YANG Q, LI Y, *et al.* Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges[J]. *eLight*, 2023, 3(1): 24.
- [9] 张慧锋, 孙建波, 胡彦旭, 等. 光学基准镜粘接精度及胶层量化研究[J]. *航天制造技术*, 2020(1): 17-21, 26.
- ZHANG H F, SUN J B, HU Y X, *et al.* Research on precision and quantitative control of optical reference mirror adhesive layer[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2020(1): 17-21, 26. (in Chinese)
- [10] YANG K, FENG H, LI P Y, *et al.* The effects of environments and adhesive layer thickness on the failure modes of composite material bonded joints[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 22776.
- [11] YOKOZEKI K, VALLÉE T, MOHR F, *et al.* Adhesive layer thickness in hybrid joints[J]. *The Journal of Adhesion*, 2024, 100(15): 1397-1420.
- [12] ZHANG J Y, REN J J, LI L J, *et al.* Terahertz spectroscopy and effective medium theory for thickness measurement of adhesive bonds[J]. *NDT & E International*, 2024, 147: 103216.
- [13] TAKAHASHI A, SEKIGUCHI Y, SATO C. Volume change and viscoelastic properties of UV-curable adhesives for precise positioning during curing process and their formulation[J]. *The Journal of Adhesion*, 2022, 98(13): 2029-2044.
- [14] KUMAR V, OZONO R, KISHIKAWA T, *et al.* Study the shrinkage process of UV-curable adhesive using digital holographic interferometry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 186: 112746.
- [15] 张建峰, 王宁, 刘峰, 等. 空心玻璃微珠制备技术及应用研究进展[J]. *中国粉体技术*, 2023, 29(2): 10-18.
- ZHANG J F, WANG N, LIU F, *et al.* Research progress on preparation technology and application of hollow glass microspheres[J]. *China Powder Science and Technology*, 2023, 29(2): 10-18. (in Chinese)
- [16] WANG X, SHI H, LI Y P, *et al.* Preparation and interfacial properties of multifunctional polypropylene/hollow glass bead composites[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2024, 46: 103921.
- [17] WANG J Z, CUI W C. A probability distribution model for the compressive strength of micro thin-walled hollow glass beads under uniform pressure[J]. *Heliyon*, 2023, 9(11): e21597.
- [18] 刘强, 何欣, 张峰, 等. 反射镜无热装配中胶层厚度的计算及控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2229-2236.
- LIU Q, HE X, ZHANG F, *et al.* Calculation and control of adhesive layer in reflector athermal mount[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2229-2236. (in Chinese)
- [19] RANJBAR N, KUENZEL C. Cenospheres: a review[J]. *Fuel*, 2017, 207: 1-12.
- [20] DANISH A, MOSABERPANAH MALI. Formation mechanism and applications of cenospheres: a review[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(11): 4539-4557.
- [21] RADKO T, WAJDA A, ILUK T, *et al.* Investigation on the correlation between mechanical strength, grain size, and density of fly ash microspheres in the context of refining process[J]. *Materials*, 2024, 17(14): 3459.
- [22] 何锐, 柴华, 安炬峰, 等. 粉煤灰微珠粒径及掺量对灌浆料性能的影响[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2024, 44(4): 15-26.
- HE R, CHAI H, AN J F, *et al.* Influence of particle size and dosing of fly ash microbeads on performance of grout[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2024, 44(4): 15-26. (in Chinese)
- [23] STEINER S, JOTZ M, BACHHUBER F, *et al.* Enabling mass manufacturing of industry-standard optical waveguide combiners[J]. *Journal of Optical Microsystems*, 2023, 3(3): 033502.
- [24] TAKAHASHI A, SEKIGUCHI Y, TAKI N, *et al.* Analyzing deformation of a cationic photopolymerized epoxy adhesive during the curing process in UV irradiation and dark reaction based on finite element method and measurement[J]. *The Journal of Adhesion*, 2024, 100(7): 599-615.
- [25] FURUICHI H. Experimental evaluation method of curing condition and shrinkage for UV curing adhesive[J]. *Transactions of the JSME (in Japanese)*

nese), 2021, 87(897): 20-344-20-00344.

- [26] NI G H, FU Z L, LI Z, *et al.* Performance study of new lightweight cementitious composites with glass beads as filler[J]. *Journal of Building Engi-*

neering, 2024, 90: 109477.

- [27] SHINBROT T. Granular materials: the Brazil nut effect: in reverse[J]. *Nature*, 2004, 429(6990): 352-353.

作者简介:



白家荣(2000—),男,山西晋中人,硕士研究生,2023年于中北大学获得学士学位,主要从事超精密装配技术、超精密运动系统动态特性方面的研究。
E-mail: 18734422844@163.com

通讯作者:



姚鹏(1979—),男,博士,教授,博士生导师,2002年、2005年于东北大学分别获得学士学位和硕士学位,2011年于东北大学(日本)获得博士学位,主要从事磨削与超精密加工技术、多能场复合精密加工技术和智能制造与检测技术等方面的研究。E-mail: yaopeng@sdu.edu.cn