

# 玻璃基板在多孔质面节流气体支承状态下稳定性实验研究

郝春元, 陆 萌, 董峻廷, 桂博扬, 黄 斌, 杨永跃\*

合肥工业大学, 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥

收稿日期: 2023年8月14日; 录用日期: 2023年9月12日; 发布日期: 2023年9月20日

## 摘 要

气浮支承技术是大型液晶玻璃基板生产和光学自动检测仪器中的关键技术之一。为了适应高清显示技术快速发展的趋势, 本文提出一种用于玻璃基板的新颖多孔质节流面板静压气体支承系统, 建立了多孔质节流面板静压气浮支承系统的物理模型。通过与多孔质节流气体支撑进行对比实验, 验证了多孔质面节流气体支承相对于传统多孔质节流气体支承能够更有效地改善玻璃基板的稳定性。在此基础上, 分别测量了多孔质材料透气率与多孔质材料厚度在不同情况下对多孔质面节流气体支承稳定性的影响, 结果表明在多孔材料渗透率为 $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 且在厚度为3 mm时, 气膜稳定性较好, 玻璃基板振幅可达到0.13  $\mu\text{m}$ 。

## 关键词

多孔质节流面板, 静压气体支承, 玻璃基板, 稳定性

# Experimental Study of the Stability of Glass Substrates in a Porous Textured Surface Throttled Gas Supported State

Chunyu Hao, Meng Lu, Junting Dong, Boyang Gui, Bin Huang, Yongyue Yang\*

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, HFUT, Hefei Anhui

Received: Aug. 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2023; published: Sep. 20<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Gas float support technology is one of the key technologies in the production of large liquid crystal

\*通讯作者。

文章引用: 郝春元, 陆萌, 董峻廷, 桂博扬, 黄斌, 杨永跃. 玻璃基板在多孔质面节流气体支承状态下稳定性实验研究[J]. 材料科学, 2023, 13(9): 833-842. DOI: 10.12677/ms.2023.139092

glass substrates and optical automatic inspection instruments. In order to adapt to the trend of rapid development of high-definition display technology, this paper proposes a new type of porous mass throttled panel hydrostatic gas support system for glass substrates, and establishes a physical model of porous mass throttled panel hydrostatic gas float support system. Through comparison experiments with the porous mass throttling gas support, it is verified that the porous mass face throttling gas support can improve the stability of the glass substrate more effectively compared with the traditional porous mass throttling gas support. On this basis, the effects of porous material permeability and porous material thickness on the stability of the porous surface throttling gas support in different cases were measured, and the results show that the gas film stability is better when the permeability of the porous material is  $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  and at a thickness of 3 mm, the amplitude of the glass substrate can be reached  $0.13 \mu\text{m}$ .

## Keywords

Porous Mass Throttled Panel, Hydrostatic Gas Support, Glass Substrate, Stability

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

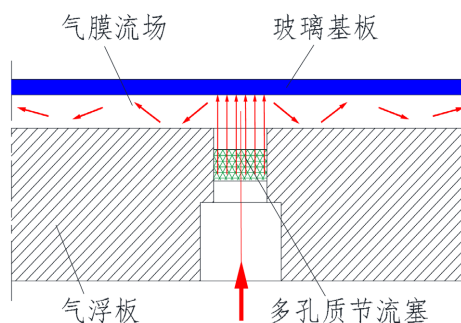
随着液晶显示技术的快速发展,对玻璃基板缺陷光学检测精度的要求越来越高。为了保障光学检测过程中玻璃基板稳定性和不被污染,玻璃基板在生产 and 检测过程中需采用气浮支承与运输。

多孔质节流气体支承系统具有高稳定性、高精度等优势,是玻璃基板气体支承系统的理想选择。国内外有关玻璃基板气体支承技术的研究已经发表了相当多的研究成果,Sheinberg 和 Shuster [1]通过假设气体在多孔材料内部遵循 Darcy 定律、气体在多孔材料内不可压缩且是层流流动,首次对多孔质气体支承的承载能力、气膜的压力分布和流量进行了理论分析计算。Bohle 等[2]在分析多孔材料静压气浮支承中引入了基于 SFM 模型优化改进的 FDL 模型,此模型将气体雷诺方程与达西定律相结合,大幅度提高测量精度。Singh [3]考虑了气体的速度滑移,与传统非滑移条件的解决方案相比,发现速度滑移能够降低负载能力且增加流体质量流量。Naduvanamani 等[4]使用摄动法求解得到稳态条件下的轴承性能和具有扰动特性的雷诺方程。Amano 等[5]设计了用于 TFT-LCD 玻璃基板检测的多孔质垫静压气浮系统。刘浩等[6]分析了多孔介质气浮导轨的相关性能,发现合理的多孔材料的孔隙度与渗透率可以提高气浮导轨的静态特性。卢志伟等[7]研制了一种基于气浮静压润滑的二维运动导轨,并分析出不同节流器对气浮导轨承载性能的影响。张亮等[8]设计了一种梯形均压槽表面气浮支承,建立气浮支承仿真模型数值,分析了梯形均压槽的结构参数对气浮支承系统静特性的影响。Zeng CQ 等[9]通过使用深度学习重建三维多孔模型,从而获得多孔材料内部流体的高精度三维流动状态,从而揭示了多孔材料结构对材料内流体运动的影响。在应用开发方面,日本 SMC 公司研发出由多根气浮传输导轨组成的多孔质气浮传输系统,能够产生稳定的气流使玻璃基板悬浮;美国 New Way Air Bearings 公司[10]等企业成功开发了大型玻璃基板的气浮支承与运输装置。

## 2. 多孔质节流气体支承和多孔质面节流气体支承工作原理

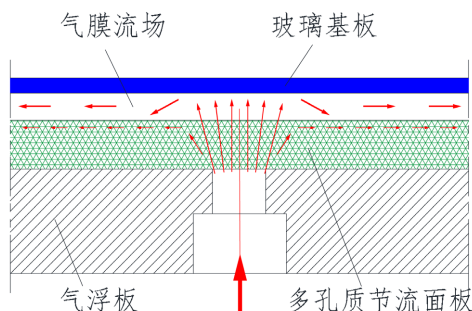
目前玻璃基板气体支承系统主要采用多孔质节流技术,如图 1 所示,具有一定压力的气体经过多孔

质节流塞经过玻璃基板和气浮板之间流出，气体在玻璃基板和气浮板之间形成较为稳定的气膜流场将玻璃基板浮起。



**Figure 1.** Physical model of porous mass throttled gas support  
**图 1.** 多孔质节流气体支承物理模型

随着高清显示技术快速发展，对玻璃基板在生产和检测过程中支承稳定性要求越来越高，为了进一步提升玻璃基板气体支承系统的稳定性，本文提出了一种多孔质节流面板静压气浮支承技术，其结构特点是在气浮板表面增加了一层厚度均匀的多孔材料，将气膜流场边界变为固壁-多孔面结构，通过部分射流在粗糙的表面形成细碎的漫反射和部分射流进入多孔结构中，在隙壁之间碰撞不断消耗能量，形成更加稳定的气膜流场，其物理模型如图 2 所示。



**Figure 2.** Physical model of gas support for porous mass throttled panel  
**图 2.** 多孔质节流面板气体支承物理模型

进一步研究表明，多孔材料的孔隙度对气膜流场稳定性的影响存在最优区间，当孔隙较大时，被表面漫反射的射流流量减少，气体射流较多地进入到孔隙三维联通的多孔材料内部，但进入多孔材料的气体与孔壁发生反复碰撞次数较少，孔壁对于空气的粘滞作用下降，能量损失较少；当孔隙细小时，被表面反射的射流流量较多，进入多孔材料内部的射流流量较少，但进入多孔材料的气流发生多次碰撞的机会增加，能量消耗也增加。由于多孔材料孔隙尺度不规则，目前难以用解析法求取最优孔隙度，只能通过实验确定最佳孔隙度区间。

### 3. 玻璃基板稳定性的实验探究

#### 3.1. 实验装置简介

实验装置原理如图 3 所示，采用激光测振仪测量浮起状态下的玻璃基板，以玻璃基板振幅大小衡量气体支承系统的稳定性。

实验测试装置如图 4 所示，其主要由测试系统与供气系统组成，其中包括供气系统、激光测振仪(型号舜宇 LV-S01)、泡沫铜材料静压气浮支撑面板、隔振平台、大理石气浮平台、压力传感器以及清洁稳定的气源。实验装置固定于隔振平台上，以减小外界环境影响而造成的测量误差。

实验的环境以及测试装置的结构参数如下：

1) 环境参数：室温常温  $t = 26^{\circ}\text{C}$ ，大气压力为  $p_0 = 0.1\text{ MPa}$ ，空气粘度  $\mu = 1.8 \times 10^{-5}\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ，气体常数  $R = 288\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

2) 实验装置结构参数：静压气浮支撑采用 4 孔供气，孔间距为 40 mm，无均压槽。供气孔直径为 6 mm，多孔材料选择泡沫铜，其厚度分别为 1 mm、2 mm、3 mm，泡沫铜渗透率为  $1 \times 10^{-14}\text{ m}^2$ 、 $1.5 \times 10^{-14}\text{ m}^2$ 、 $2 \times 10^{-14}\text{ m}^2$ 、 $2.5 \times 10^{-14}\text{ m}^2$ 、 $3 \times 10^{-14}\text{ m}^2$ ，玻璃基板厚度为 0.2 mm~1 mm，尺寸为 60 mm×60 mm。

实验步骤：安装调试实验设备，激光传感器连接测试系统并测试系统是否正常；接通气源，通过空气过滤装置得到清洁干净的气体，气体通过供气系统改变供气压力后进入大理石气浮平台，气体经过多孔材料泡沫铜进入气膜间隙，使玻璃基板漂浮；激光位移传感器测试初始气膜间隙大小并记录，压力传感器测量供气压力大小并记录，记录玻璃基板的振动情况；测试系统分析并处理实验数据。

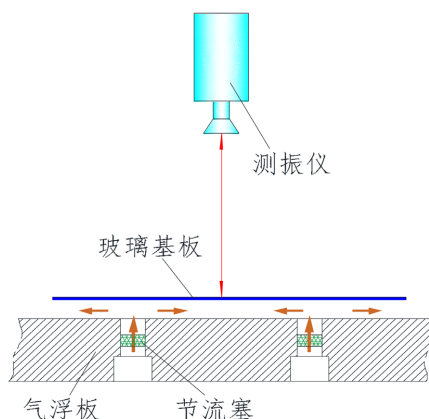


Figure 3. Schematic diagram of the experimental setup  
图 3. 实验装置原理图

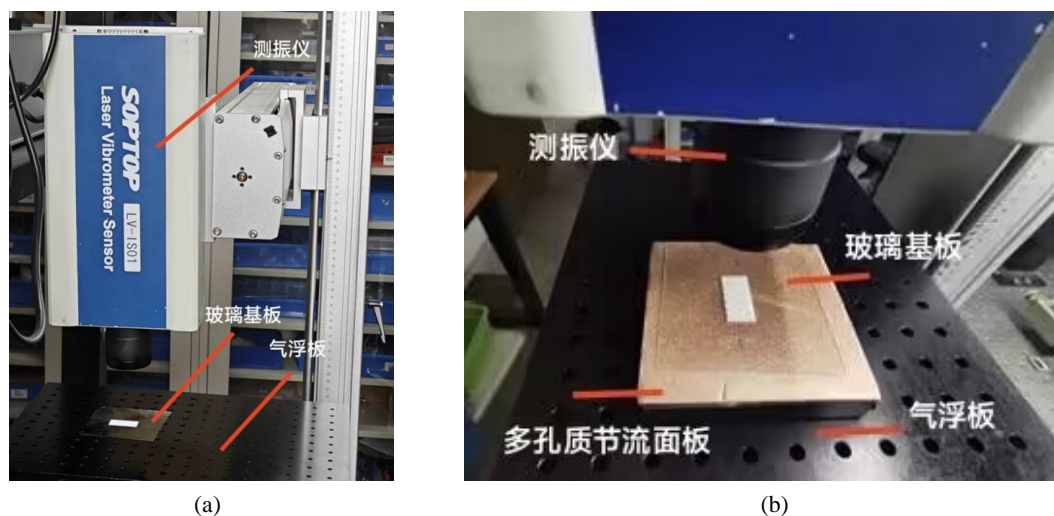


Figure 4. Experimental test setup. (a) Porous throttled gas supports; (b) Porous textured surface throttling support  
图 4. 实验测试装置。(a) 多孔质节流气体支承；(b) 多孔质面节流支承

### 3.2. 实验结果

#### 两种不同气浮支承系统的稳定性对比

使用激光位移传感器测量多孔质面节流气体支承系统、多孔质节流气体支承系统在相同供气条件下的玻璃基板振动情况，做出两种气体支承系统中供气压力与玻璃基板振幅的关系曲线。

图 5 为实验测得的多孔质面节流气体支承、多孔质节流气体支承分别在供气压力 200 Pa、400 Pa、600 Pa、800 Pa、1000 Pa 时玻璃基板的振幅大小，选择泡沫铜多孔材料，渗透率为  $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ ，厚度为 3 mm。

从图 5 中可以看出，在相同供气压力下，多孔质节流面板气浮支承的玻璃基板振幅较小，主要是由于多孔材料抑制了气膜流场中漩涡以及玻璃基板与气膜之间的流固耦合振动，从而改善气膜内气体流动的稳定性。泡沫铜节流面板能够抑制气膜中流场压力的波动，当气膜中局部发生压力变化时，泡沫铜多孔材料能够吸收或补充气膜压力，保证气膜压力处于动态平衡状态，提高了气浮支承系统的稳定性。

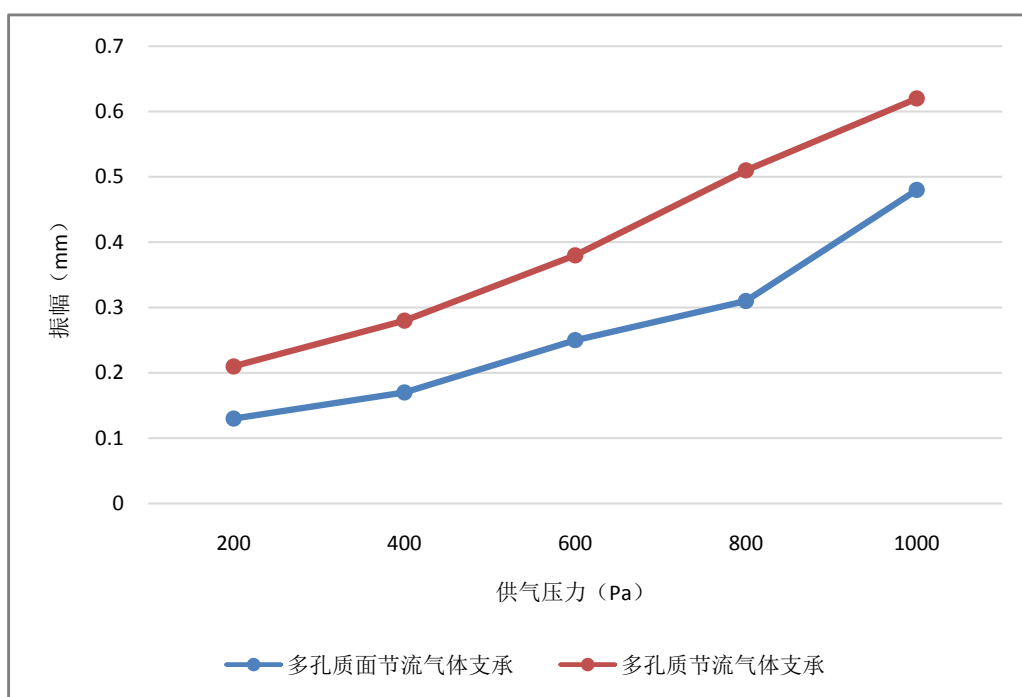


Figure 5. Amplitude curves at different air supply pressures

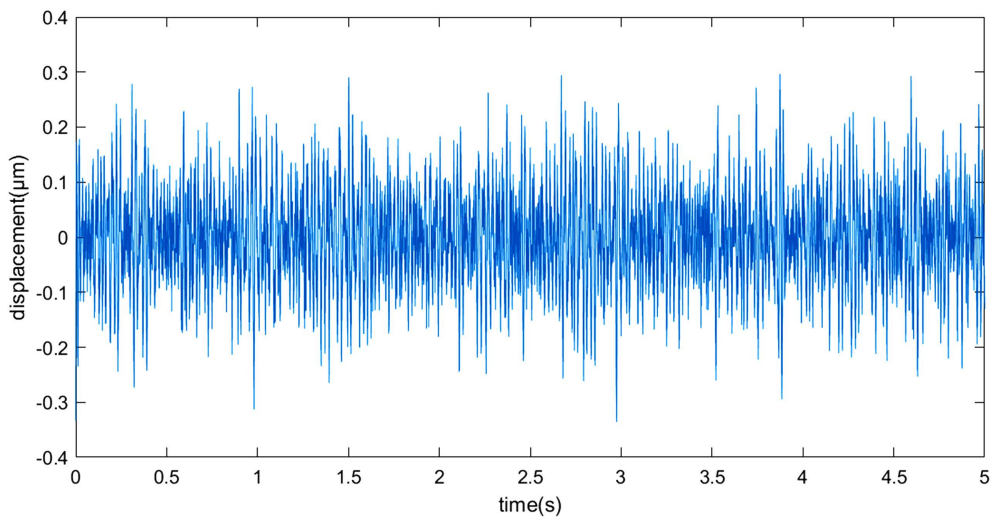
图 5. 不同供气压力下的振幅曲线

#### 3.3. 多孔质材料透气率对多孔质面节流气体支承稳定性的影响

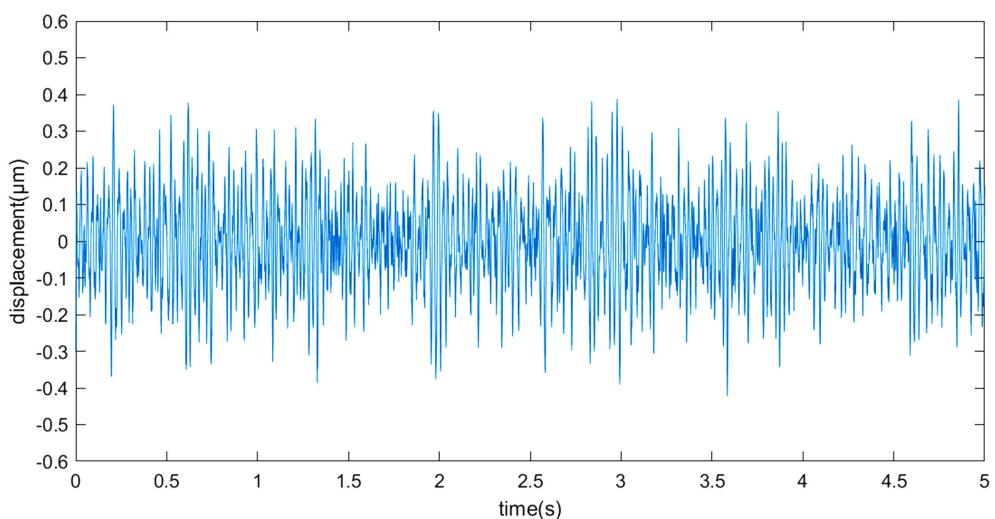
使用激光位移传感器分别测量多孔材料渗透率在  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、 $1.5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、 $2 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、 $2.5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、 $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  时，3 mm 厚度的玻璃基板振动情况；做出多孔材料渗透率与玻璃基板最大振幅之间的关系曲线。

图 6 和图 7 所示为实验测得的不同多孔材料渗透率下的玻璃基板时域振动情况，从图中可以看出在多孔材料渗透率  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  至  $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  的区间内，玻璃基板振幅随着多孔材料渗透率的增大而减小，其振幅由渗透率  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  时的  $0.26 \mu\text{m}$  减小至渗透率  $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  时的  $0.13 \mu\text{m}$ 。这表明在实验数据范围内，渗透率越高振幅越小。

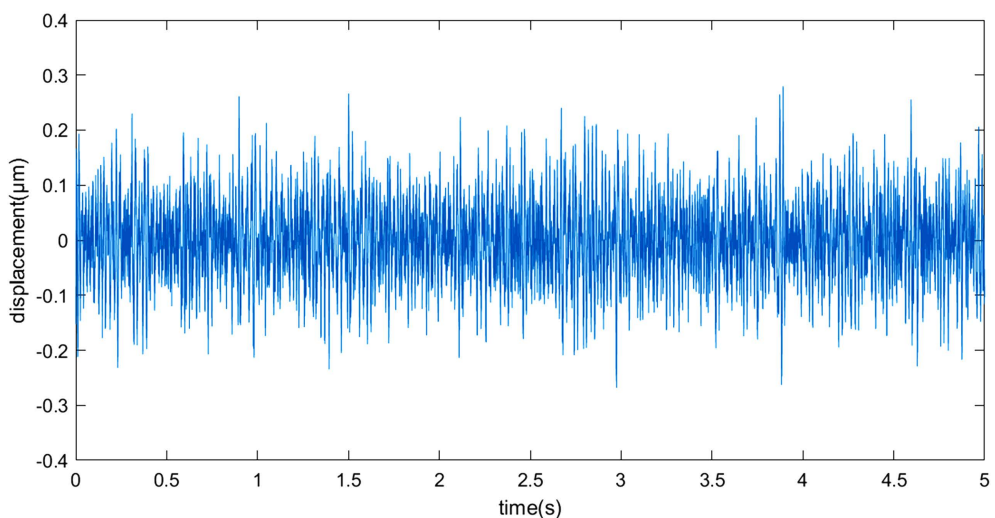




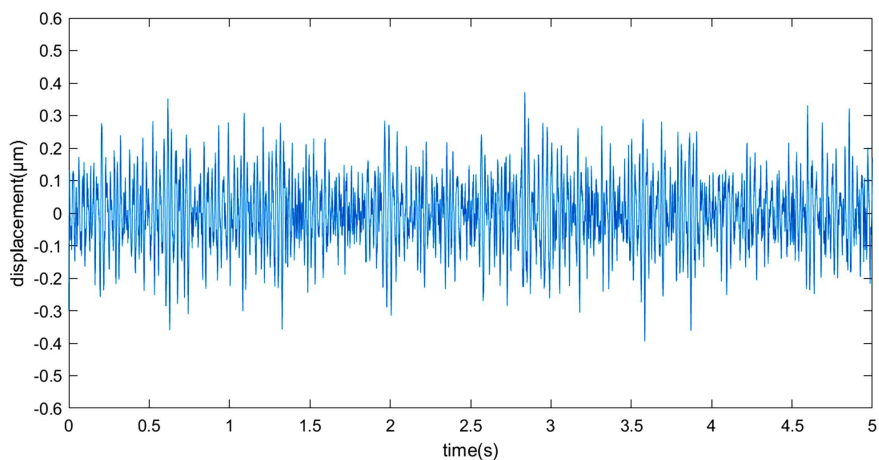
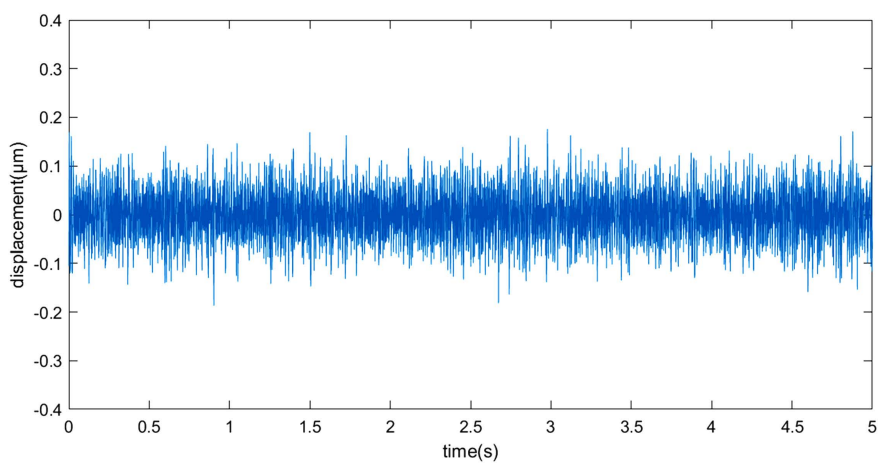
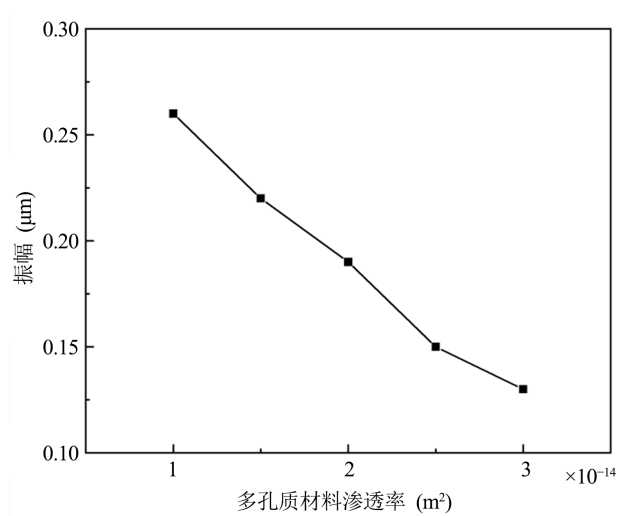
(a) 渗透率  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$



(b) 渗透率  $1.5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$

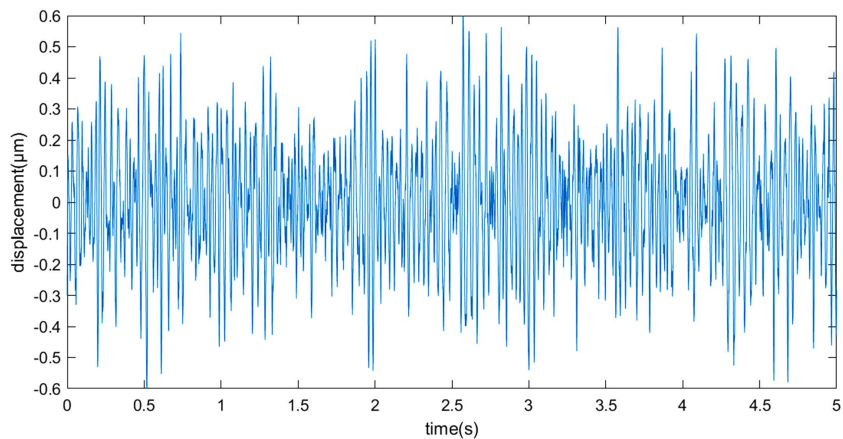


(c) 渗透率  $2 \times 10^{-14} \text{ m}^2$

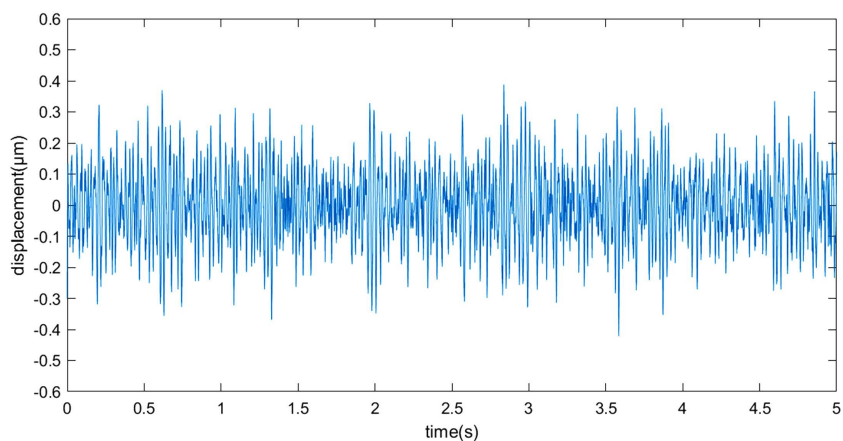
(d) 渗透率  $2.5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ (e) 渗透率  $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ **Figure 6.** Vibration time-domain plots for different permeabilities of porous materials**图 6.** 不同多孔材料渗透率下的振动时域图**Figure 7.** Amplitude curves for different porous material permeabilities**图 7.** 不同多孔材料渗透率的振幅曲线

### 3.4. 多孔质材料厚度对多孔质面节流气体支承稳定性的影响

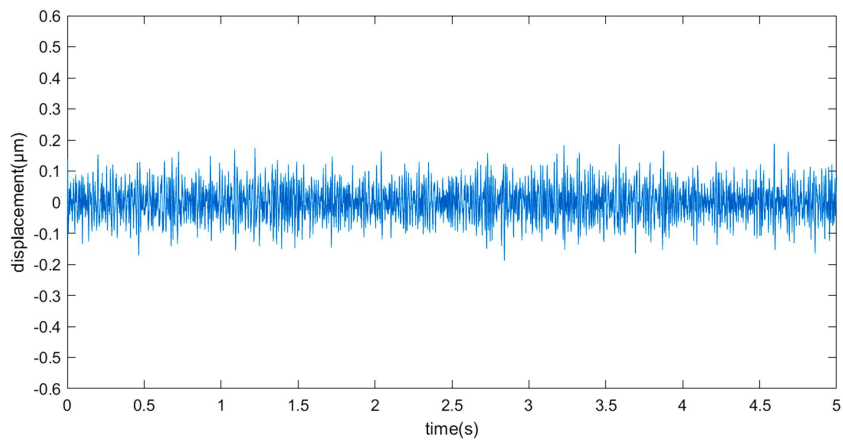
使用激光位移传感器分别测量玻璃基板的振动情况：多孔材料渗透率为 $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ ，厚度选择常用的1 mm、2 mm、3 mm；做出多孔材料厚度与玻璃基板振幅的关系曲线。



(a) 厚度 1 mm



(b) 厚度 2 mm

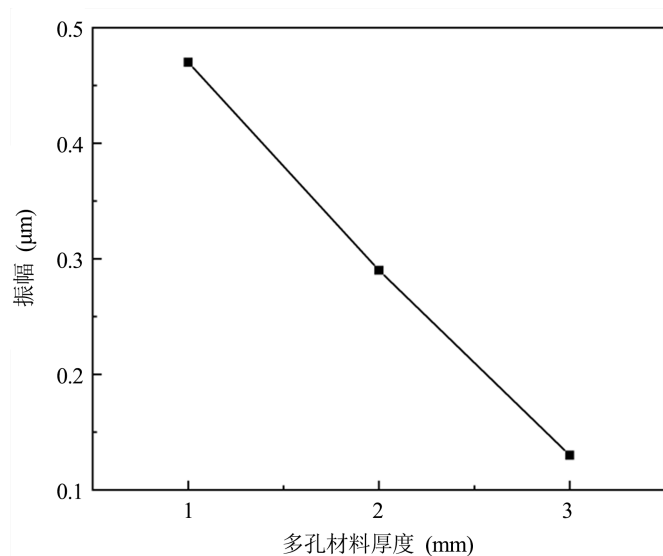


(c) 厚度 3 mm

**Figure 8.** Vibration time domain plots for different porous material thicknesses

**图 8.** 不同多孔材料厚度下的振动时域图





**Figure 9.** Amplitude profiles for different porous material thicknesses  
**图 9.** 不同多孔材料厚度的振幅曲线

图 8 和图 9 所示为实验测得的不同多孔材料厚度下的玻璃基板时域振动情况，从图中可以看出玻璃基板振幅随着多孔材料厚度的增大而减小，其振幅由厚度 1 mm 时的 0.46  $\mu\text{m}$  减小至厚度 3 mm 时的 0.13  $\mu\text{m}$ 。这表明在多孔材料厚度为 3 mm 时，玻璃基板振动最小，气膜稳定性更好，此时的振幅已显著优于一般工程要求的小于 1  $\mu\text{m}$  要求。

#### 4. 结论

本文基于多孔质节流气体支承提出了一种新颖有效的改善玻璃基板稳定性的方法，为多孔质面节流气体支承的设计和优化提供了依据和实验数据，得出的结论如下：

- 1) 多孔质面节流玻璃基板气体支承系统相对于传统的多孔质节流玻璃基板气体支承系统具有更好的稳定性。
- 2) 在多孔材料渗透率  $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  至  $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  的区间内，玻璃基板振幅随着多孔材料渗透率的增大而减小；在实验数据范围内，渗透率越高振幅越小。
- 3) 玻璃基板振幅随着多孔材料厚度的增大而减小，当多孔材料渗透率为  $3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、厚度为 3 mm 时，玻璃基板振幅可达到 0.13  $\mu\text{m}$ 。

#### 基金项目

国家自然科学基金面上项目“气浮传输过程中弹性薄板的流固耦合振动研究(编号：51975178)”；合肥工业大学大学生创新训练项目“基于泡沫铜节流的气浮支撑系统研究”。

#### 参考文献

- [1] Sheinberg, S. and Shuster, V.G. (1960) Resistance to Vibration of a Hydrostatic Thrust Bearing.
- [2] Bohle, M., Gu, Y. and Schimpf, A. (2019) Two Flow Models for Designing Hydrostatic Bearings with Porous Material. <https://doi.org/10.1115/AJKFluids2019-4657>
- [3] Singh, K.C., Rao, N.S. and Majumdar, B.C. (1984) Effects of Velocity Slip, Anisotropy and Tilt on the Steady State Performance of Aerostatic Porous Annular Thrust Bearings. *Wear*, **97**, 51-63. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90081-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90081-4)

- [4] Naduvnamani, N.B. and Angadi, A. (2022) On the Dynamic Characteristics of Rough Porous Inclined Slider Bearing Lubricated with Micropolar Fluid. *Tribology Online*, **17**, 59-70. <https://doi.org/10.2474/trol.17.59>
- [5] Amano, K., Yoshimoto, S., Miyatake, M. and Hirayama, T. (2011) Basic Investigation of Noncontact Transportation System for Large TFT-LCD Glass Sheet Used in CCD Inspection Section. *Precision Engineering*, **35**, 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.08.010>
- [6] 刘浩, 须颖, 王本明, 等. 多孔介质空气轴承静态特性仿真分析[J]. 液压与气动, 2021, 45(11): 39-46.
- [7] 卢志伟, 刘锡尧, 鹿菡, 等. 二维运动平台气浮静压导轨承载性能计算与研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(23): 240-250.
- [8] 张亮, 李佳, 刘怀广. 梯形均压槽对气浮支承静承载特性的影响研究[J]. 液压与气动, 2020(6): 22-28.
- [9] Zeng, C.Q., Wang, W., Cheng, X.H., *et al.* (2021) Three-Dimensional Flow State Analysis of Microstructures of Porous Graphite Restrictor in Aerostatic Bearings. *Tribology International*, **159**, Article ID: 106955. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106955>
- [10] Devitt, D. (2009) The Physics of Glass Flotation. *Semiconductor International*, **5**, 20-25.