

# 平板型多孔质石墨气浮轴承适配厚度研究

## Research on the Adaptive Thickness of Flat Plate Porous Graphite Air Floating Bearings

赵玉民 刘铸

Yumin Zhao Zhu Liu

北京中电科电子装备有限公司 中国·北京 100176

CETC Beijing Electronic Equipment Co., Ltd., Beijing, 100176, China

**摘要:** 多孔质石墨气浮轴承采用气体作为润滑介质, 具有摩擦系数低, 摩擦阻力小, 高速性能好, 避免摩擦、发热等情况下对轴承的损耗, 使用寿命长, 适应性强等优势。本研究基于8英寸晶圆减薄机实际工作条件下, 通过利用给定的进气面积、耗气量等条件, 对多孔石墨气浮轴承适配厚度研究。通过实验和计算, 得出了适配的厚度值, 提高主轴适用性并分析了其对轴承性能的影响机制。

**Abstract:** Porous graphite air bearing uses gas as the lubricating medium, which has advantages such as low friction coefficient, low friction resistance, good high-speed performance, avoiding wear and tear on the bearing under friction, heating, etc., long service life, and strong adaptability. This study is based on the actual working conditions of an 8-inch wafer thinning machine, and investigates the adaptive thickness of porous graphite air bearing by using given conditions such as intake area and air consumption. Through experiments and calculations, the suitable thickness value was obtained to improve the applicability of the spindle and analyze its impact mechanism on bearing performance.

**关键词:** 多孔质石墨; 气浮轴承; 透气系数; 主轴适用性

**Keywords:** porous graphite; air bearing; permeability coefficient; applicability of spindle

**DOI:** 10.12346/etr.v6i3.9259

### 1 引言

多孔质静压气体轴承是目前研究最多、应用最广的多孔质气体轴承, 多孔质石墨轴承是最显著的代表<sup>[1]</sup>, 如图1所示。20世纪六七十年代, 人们利用炭质材料或石墨材料的多孔特点, 制造出了透性石墨设备。多孔石墨最早是由日本 Kaneko 等人于1995年首次制备出来, 他们使用均相缺氧热解法在硬木颗粒表面上生成孔径在0.6~1.0nm的孔道。此后, 许多诸如硬模板法、软模板法、还原法、碳化法、印迹法等多种方式被用于开发制备多孔石墨, 并且制备效果显著。多孔石墨迅速成为轴承、电极材料等专业零部件领域的使用材料之一。

气浮轴承因其无摩擦、无损耗、长寿命等优点在旋转机械领域具有广泛应用, 多孔石墨作为一种高性能碳材料, 其独特的孔隙结构为气浮轴承提供了优秀的承载能力和稳定

性。多孔特性可以确保其承载力均匀, 高速运转下气浮性能更稳定。然而, 如何适配多孔石墨的厚度以实现最佳性能是关键问题。因此, 本研究旨在确定平板型多孔石墨气浮轴承在特定条件下的适配厚度。



图1 多孔石墨轴承

【作者简介】赵玉民(1969-), 男, 中国河北廊坊人, 工程师, 从事集成电路先进封装设备关键技术研究。

## 2 透气系数

多孔质轴承的透气系数是指单位时间内单位面积上空气通过多孔质轴承的体积。其透气性能与多孔质材料的孔隙率、孔径大小、分布情况等因素有关。

研究表明，气体通过多孔质介质的流动遵从达西（DARCY'S）定律<sup>[2]</sup>。“透气参数”是根据达西（Darcy）定律推导出来的一个综合参数，如式（1）；在格雷戈里·米特洛维奇的《气体通过多孔介质的流动》里也提及过透气系数这一概念，如式（2）。对于各向同性均匀孔隙的多孔材质，其各点透气系数看作相等。

平板型多孔质轴承，透气参数  $\varphi$  ( $\text{m}^2$ ) 为：

$$\varphi = -\frac{\mu H p_a Q}{\pi r_s^2 (p_s^2 - p_a^2)} \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{\varepsilon d^2 H}{4\pi(1-\varepsilon)} \quad (2)$$

式中： $\varepsilon$ ——多孔质轴承孔隙率；

$d$ ——多孔质轴承孔径；

$H$ ——多孔质层厚度。

### 2.1 孔隙度

多孔质轴承的多孔性是通过制造过程中加入了特定的孔隙形成的，该类材料的多孔性有助于提高轴承的自润滑性。而多孔质轴承的性能是通过石墨的孔隙度决定的。而石墨的孔隙度是由材料孔隙总容积所占材料的总体积来度量的，用表示。通常情况下孔隙率在 10%~35% 之间。

### 2.2 透气系数计算

实际生产中多孔石墨的孔径大小一般在 0.6~1.0nm，假定一块 10mm 厚的多孔石墨环，可测量其透气系数。

即：

多孔质轴承孔径  $d=0.6\sim 1.0\text{nm}$ ；

多孔质轴承孔隙率  $\varepsilon=10\%\sim 35\%$ ；

多孔质层厚度  $H=10\text{mm}$ 。

由式（2）即可算出该条件下的透气参数： $\varphi$  在  $3.18 \times 10^{-23} \sim 4.28 \times 10^{-22} \text{m}^2$  之间。

## 3 多孔石墨

石墨作为轴承的多孔质材料之一，除其本身存在的各向异性之外，对于机加工和热处理等因素的干扰，使其内部发生孔隙畸变和局部堵塞，使其内部流体流动更加复杂，因此出现以下几种物理模型便于分析。

### 3.1 一维毛细管模型

一维毛细管模型认为其多孔质层存在无数并列分布的毛细管，并且按照同一方向紧密排布，气体流动可以看作一维单向流动，流动方向垂直于多孔石墨轴承表面，模型如图 2 所示。

### 3.2 等价间隙模型

气体通过多孔质层流动，一般为三维流动。等价间隙模型则假定多孔质层内的气体流动只沿着平行于轴承轴面和

垂直轴面的方向进行二维流动。垂直方向的流动遵循达西（DARCY'S）定律，平行表面的流动便假想于存在平行气膜的等价间隙，模型如图 3 所示。

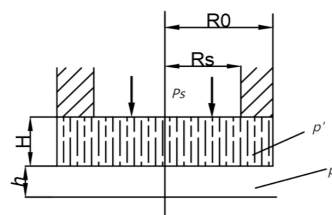


图 2 一维毛细管型流动模型

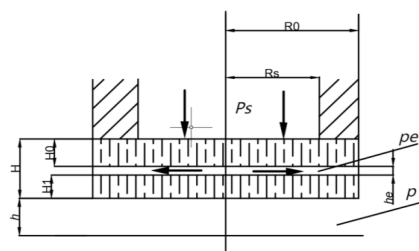


图 3 等价间隙型流动模型

### 3.3 表面小孔模型

由于机加工等原因，多孔石墨表面会形成一层极其薄的致密层，使轴承表面的气孔堵塞，类似于在多孔石墨表面均布一层密集的小孔，在石墨表面形成了无数个小孔节流，多孔石墨表面符合小孔节流的规律，其内部仍符合达西定律。此类模型更接近实际工作时的流动模型，如图 4 所示。

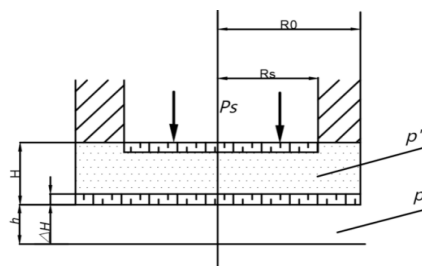


图 4 表面小孔型流动模型

### 3.4 表面毛细管模型

表面毛细管模型与表面小孔模型类似，只是致密层较厚，像无数毛细管集合而成，气体通过致密层时类似于通过毛细管流动，二者相衔接的地方，形成较为复杂，流动模型如图 5 所示。

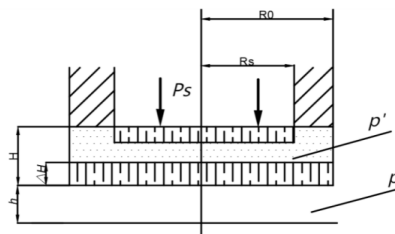


图 5 表面毛细管流动模型

## 4 石墨适配厚度研究

气体既假定为层流流动,便遵循达西(DARCY'S)定律,因此可得:

$$\vec{u} = -\frac{\|\phi\|}{\mu} \text{grad} p' \quad (3)$$

式中 $\vec{u}$ 表示在多孔石墨中的平均速度向量; $p'$ 表示在多孔石墨中的压力函数; $\|\phi\|$ 表示多孔石墨透气系数行列式; $\mu$ 为空气粘度。由公式(3)可以看出,气体通过多孔介质流动时,流速与压降成正比,与空气粘度成反比<sup>[3]</sup>。

流动模型如图6所示。

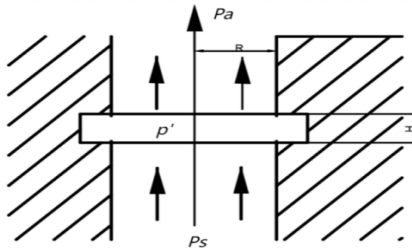


图6 平板型达西定律流动模型

对通过平板型多孔石墨的流动,可得:

$$q_m = -\frac{\rho_a(p_s^2 - p_a^2) S}{2\mu p_a} \frac{S}{H} \varphi \quad (4)$$

式中: $S$ ——通气面积;

$q_m$ ——通过多孔石墨的总质量流量;

$H$ ——石墨厚度。

气浮轴承中多孔石墨的通气面积多为环道,以8寸气浮轴承为例,多孔石墨环槽尺寸为内径 $D_1 = \phi 160\text{mm}$ ,外径 $D_2 = \phi 168\text{mm}$ 。其多孔石墨的通气面积 $S = 2.061 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 。

通过实验对轴承不同压强下的耗气量 $q_v$ 测试得到如表1所示的结果。

表1 8寸多孔石墨耗气测试表

序号	进气压 (MPa)	耗气量 (L/min)
1	0.3	66
2	0.35	82
3	0.4	96
4	0.45	112
5	0.5	130
6	0.55	150
7	0.6	168

减薄机气浮轴承正常3000rpm运行时的进气压力约为0.5~0.55MPa,若给气浮轴承通入0.5MPa的压缩空气,此

时耗气量 $q_v = 130\text{L/min}$ ,根据耗气量求多孔石墨总质量流量可得:

$$q_m = \rho q_v \quad (5)$$

由式(5)可得多孔石墨总质量流量 $q_m = 13.64\text{kg/h}$ 。

减薄机气浮主轴一般情况会在 $20^\circ\text{C}$ 、一个标准大气压的条件下工作,即查表可知此条件下,外界气压 $p_a = 1.0 \times 10^5\text{Pa}$ 、气体动力粘度 $\mu = 18.24 \times 10^{-6}\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\rho_a = 1.2 \times 10^3\text{kg/h}$ 。

由式(4)可得 $H = 1.84 \times 10^{-2}\text{m}$ ,由于气浮轴承是由上下两块多孔石墨以及石墨支撑体组合而成的轴承组合体,即单块石墨厚度约为 $H_1 = 9.2 \times 10^{-3}\text{m} = 9.2\text{mm}$ ,结论符合实际工作条件,如图7所示。



图7 多孔石墨环

## 5 结语

本研究通过实验测量和数据分析,确定了平板型多孔石墨气浮轴承在 $20^\circ\text{C}$ 室温下,0.5MPa压缩空气,耗气量130L/min条件下,其最佳适配厚度。研究表明,适配的厚度可以显著提高多孔石墨气浮轴承的承载能力和稳定性。在实际应用中,选择合适的厚度对于提高旋转机械的性能和延长使用寿命至关重要。

未来研究可以进一步探讨多孔石墨气浮轴承在不同工况下的性能表现。加强多孔石墨气浮轴承的实际应用研究也是十分必要的。

## 参考文献

- [1] 王云飞.多孔质静压轴承静态性能的研究[R].机械部洛阳轴承研究所,1982.
- [2] 王云飞.气体润滑理论与气体轴承设计[R].气体润滑专业委员会,1997.
- [3] 葛载涛.多孔质气体径向轴承结构设计和性能分析[D].天津:天津大学,2020.