

多孔质石墨静压气体推力轴承静态特性^{*}

冯凯[†], 朱友权, 李文俊, 赵雪源, 张凯

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了研究多孔质石墨静压气体推力轴承的静态特性,建立了相对应的理论计算模型.基于该模型分析了多孔质石墨密度、表面限制层、供气压力以及气体质量流量等因素对多孔质石墨静压气体推力轴承静态特性的影响.理论计算结果表明,轴承承载力与石墨密度成负相关、与供气压力成正相关,并在有表面限制层时较大;气体质量流量与石墨密度成负相关、与供气压力成正相关,并在有表面限制层时较大;轴承的刚度与石墨密度、供气压力成正相关,并在有表面限制层时较大.进一步设计实验台,绘制出多孔质石墨静压气体推力轴承的气膜厚度与承载力的静态特性曲线图.对比发现,实验结果与理论结果吻合较好,从而验证了数值计算方法的可靠性.

关键词:多孔质石墨; 静压气体推力轴承; 静态特性; 密度; 限制层

中图分类号:TH133.35; TH133.36

文献标志码:A

Institute of Static Characteristics of Porous Graphite Aerostatic Thrust Bearings

FENG Kai[†], ZHU Youquan, LI Wenjun, ZHAO Xueyuan, ZHANG Kai

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University,
Changsha 410082, China)

Abstract: A theoretical calculation model was established to study the static characteristics of porous graphite aerostatic thrust bearings. Based on the proposed model, the effect of the related factors, such as porous density, surface-restricted layer, external gas pressure and mass flow rate on the static characteristics of porous aerostatic thrust bearings was analyzed. Theoretical calculation results show that the load-carrying capacity of the bearing is negatively correlated with the graphite density and positively correlated with the gas supply pressure, but it is smaller than that of the surface-restricted layer. Gas mass flow rate is negatively correlated with the graphite density and positively correlated with the gas supply pressure, but it is also smaller than that of the surface-restricted layer. Bearing stiffness is positively correlated with the gas supply pressure and graphite density, but it is smaller than that of the surface-restricted layer. According to the results, corresponding function diagrams were plotted. The test rig was then designed to plot the static characteristic curve of porous aerostatic thrust bearings, including the load-carrying capacity and gas film thickness. The numerical method was eventually verified by the experimental results.

Key words: porous graphite; aerostatic thrust bearings; static characteristics; density; surface-re-

^{*} 收稿日期:2016-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575170), National Natural Science Foundation of China (51575170); 国家科技支撑计划资助项目(2015baf32b01), National Key Technology Support Program of China (2015baf32b01)

作者简介:冯凯(1982—),男,湖北武汉人,湖南大学教授,博士生导师,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: kfeng@hnu.edu.cn

stricted layer

随着社会的日益发展和科技的不断进步,关于空气轴承的技术也在发生着日新月异的变化.与润滑油轴承和常规滚动轴承相比,气体轴承具有精度高、摩擦小和零污染等优点^[1-3],除此之外,相比于电磁轴承,它又具有结构轻便、容易制造和推广性较高的特点.因此,气体轴承已被广泛地应用到电子精密仪器、医疗器械、精密工程和超精密工程、空间技术、微细胞技术以及高精度测量仪器和装置等领域^[4-6].多孔质石墨静压气体推力轴承作为空气轴承的一个重要分支,已逐渐地被国内外学者和工程技术人员所研究并被成功应用于精密超精密仪器、空间技术、医疗器械及微细工程等领域^[7-10],这主要是因为其具有高精度、高阻尼和高刚度的特点.

国外对多孔质石墨静压气体轴承的研究和应用相对较早,1960 年第一个多孔质模型被 Sheinberg 和 Shuster 提出,他们认为流体在多孔质内部的流动可以简化为流体流经一系列平行排列等间距毛细管,在此简化模型中流体只是沿着一个方向流动^[11].随后,Mori 等把多孔质分为两个节流厚度而得到多孔质止推轴承中流体流经多孔质的解^[12],并进一步分析了多孔质内部的三维流动,同时给出了改进的解析方法^[13].对于轴承面积相同的情况,Majudar 和 Schmidt 认为矩形轴承的承载能力要远大于具有相似结构的圆板型多孔质止推轴承.Rao 也得到轴承承受偏移载荷时的解,偏移载荷导致轴承的上表面发生倾斜,这样会大大降低轴承的性能,导致承载能力的下降和流量的增加^[14],其后又给出了多孔质内部流体三维惯性和粘性流动的数值有限差分解法^[15].Howarth^[16]利用油作为润滑介质来研究轴承的性能,因为油的粘度远远大于气体或者其它液体,就应该利用具有更大渗透率的多孔质材料.Kilmister^[17]对渗透性在烧结多孔质中的分布进行了研究,这主要是由于烧结时的压力不同造成的.Capone 等^[18]利用仪器来测量渗透性,这种技术可以被应用于检查渗透率多孔质中的分布.

国内最早对多孔质气体静压轴承性能进行研究的是洛阳轴承研究所,他们采用的材料是多孔质青铜烧结材料^[19].国防科技大学戴一帆等在局部多孔质气体静压轴承动态性能的理论分析和实验研究方面也进行了有益的探索^[20].哈尔滨工业大学卢

泽生等^[21]进行了多孔质石墨渗透率的研究,从多孔质石墨结构形成机理出发,利用分形几何理论,建立了多孔质石墨渗透率与其分形维数之间、宏观参数和微观结构之间的定量关系,并通过模型预测出多孔质石墨的渗透率.哈尔滨工业大学杜金名^[22]把多孔质气体静压轴承应用到三轴转台的设计中,从理论分析和实验验证两方面证明,与传统的小孔节流气体静压轴承相比,多孔质气体静压轴承静态刚度分布范围较广且动态效果要好.

多孔质石墨静压气体推力轴承的承载能力是评价轴承性能的重要指标^[23-24],因此,研究影响其承载能力的因素对于设计和制造多孔质静压气体轴承至关重要.本文建立了多孔质石墨静压气体推力轴承的理论模型,并用有限差分法对其进行离散求解.重点分析了多孔质的材料密度、表面限制层、供气压力、质量流量和气膜厚度等多孔质石墨静压气体推力轴承静态性能的影响关系.进一步搭建实验台,测量出气膜厚度和承载力,并将实验结果与理论结果进行对比分析.

1 数学模型的建立

1.1 多孔质静压气体推力轴承的相关参数

图 1 为多孔质石墨静压气体推力轴承的简单立体几何结构图.其工作原理为:当气源供气时,多孔质轴承的节流效应是以自身对于流体的阻力而获得,因此,在轴承表面与力承载板间形成一层气膜,从而使力承载板悬浮起来.

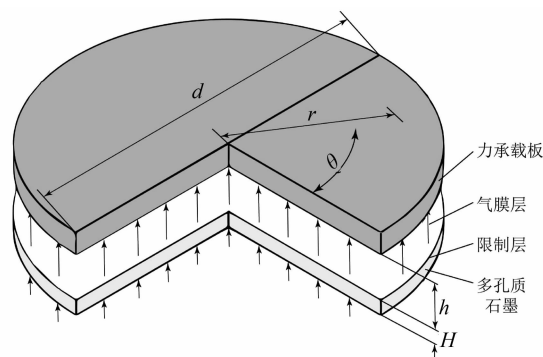


图 1 多孔质石墨静压气体推力轴承立体结构
Fig.1 The three-dimensional structure of porous graphite aerostatic thrust bearing

1.2 理论建模

在数值计算中,首先建立如图 2(a)所示的柱坐标系,利用有限差分法进行离散网格的划分^[25],并按 z 方向(气膜厚度方向)进行分层.在分层处理时,多孔质石墨静压气体推力轴承在 z 方向由三部分组成,分别为多孔质部分、限制层部分和气膜部分,因此,在进行数值计算时也相应地分为三个部分.

根据 Darcy 定律,在 θ, r, z 三个方向的空气质量流量可表示为^[23]:

$$\begin{aligned} m_\theta &= -\rho \frac{k_\theta}{\mu} \frac{\partial p}{r \partial \theta} dr dz \\ m_r &= -\rho \frac{k_r}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} r d\theta dz \\ m_z &= -\rho \frac{k_z}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} r d\theta dz \end{aligned} \quad (1)$$

其中, k_θ, k_r, k_z 分别为多孔质材料在 θ, r, z 三个方向的渗透系数,并假定 $k_\theta = k_r = k_z = k$.采用有限差分法分别对多孔质部分、限制层部分和气膜部分进行网格划分,其各部分的微元体如图 2 所示.恒温条件下,在一个微元体中单位时间的空气质量的变化量为 Δm_t ,可压缩性气体的质量守恒方程为:

$$m_\theta|_{\text{in}} - m_\theta|_{\text{out}} + m_r|_{\text{in}} - m_r|_{\text{out}} + m_z|_{\text{in}} - m_z|_{\text{out}} - \Delta m_t = 0 \quad (2)$$

由于是静态多孔质推力轴承,故

$$\Delta m_t = \eta \frac{\partial p}{\partial t} r d\theta dr dz = 0$$

所以,式(1)可变为:

$$m_\theta|_{\text{in}} - m_\theta|_{\text{out}} + m_r|_{\text{in}} - m_r|_{\text{out}} + m_z|_{\text{in}} - m_z|_{\text{out}} = 0 \quad (3)$$

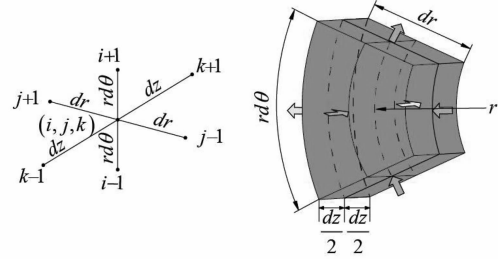
1) 只含有多孔质石墨材料时,如图 2(a).

将式(1)代入式(3)得

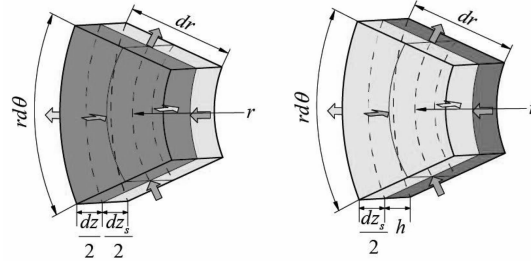
$$\begin{aligned} & -\rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{r \partial \theta} \Big|_{\text{in}} dr dz + \rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{r \partial \theta} \Big|_{\text{out}} dr dz - \\ & \rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{\text{in}} \left(r + \frac{dr}{2}\right) d\theta dz + \rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{\text{out}} \cdot \\ & \left(r - \frac{dr}{2}\right) d\theta dz - \rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{\text{in}} r d\theta dr + \\ & \rho \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{\text{out}} r d\theta dr = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

由状态方程 $\frac{p}{\rho} = \frac{p_a}{\rho_a}$ 得

$$-p \frac{\partial p}{r \partial \theta} \Big|_{\text{in}} dr dz + p \frac{\partial p}{r \partial \theta} \Big|_{\text{out}} dr dz -$$



(a) 多孔质石墨内部的离散单元与分层



(b) 多孔质与限制层边缘处

(c) 限制层与气膜边缘处

图 2 网格划分和微元体结构及其柱坐标系

Fig.2 Mesh and element structure and cylindrical coordinate system

$$\begin{aligned} & p \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{\text{in}} \left(r + \frac{dr}{2}\right) d\theta dz + p \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{\text{out}} \left(r - \frac{dr}{2}\right) d\theta dz - \\ & p \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{\text{in}} r d\theta dr + p \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{\text{out}} r d\theta dr = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

将无量纲化参数($p = p_a P, r = r_0 R, z = r_0 Z, h = h_0 H, k' = k K'$)代入式(5)得

$$\begin{aligned} & -P \frac{\partial P}{R \partial \theta} \Big|_{\text{in}} dR dZ + P \frac{\partial P}{R \partial \theta} \Big|_{\text{out}} dR dZ - \\ & P \frac{\partial P}{\partial R} \Big|_{\text{in}} \left(R + \frac{dR}{2}\right) d\theta dZ + P \frac{\partial P}{\partial R} \Big|_{\text{out}} \cdot \\ & \left(R - \frac{dR}{2}\right) d\theta dZ - P \frac{\partial P}{\partial Z} \Big|_{\text{in}} R d\theta dR + \\ & P \frac{\partial P}{\partial Z} \Big|_{\text{out}} R d\theta dR = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

2) 在多孔质与限制层的边缘处时,如图 2(b).

同理可以得到其对应的无量纲压力分布方程

$$\begin{aligned} & -P \frac{\partial P}{R \partial \theta} \Big|_{\text{in}} dR dZ + P \frac{\partial P}{R \partial \theta} \Big|_{\text{out}} dR dZ - \\ & P \frac{\partial P}{\partial R} \Big|_{\text{in}} \left(R + \frac{dR}{2}\right) d\theta dZ + P \frac{\partial P}{\partial R} \Big|_{\text{out}} \cdot \\ & \left(R - \frac{dR}{2}\right) d\theta dZ - 2P \frac{\partial P}{\partial Z} \Big|_{\text{in}} R d\theta dR + \\ & 2KP \frac{\partial P}{\partial Z} \Big|_{\text{out}} R d\theta dR = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $K = \frac{k'}{k}$, k 为多孔质渗透率, k' 为限制层渗透率.

3) 在限制层与气膜边缘处时,如图 2(c). θ, r 方

向的质量表达式^[23]为

$$m_\theta = -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{r \partial \theta} dr \quad (8)$$

$$m_r = -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial r} r d\theta$$

其对应的无量纲压力分布方程为

$$\begin{aligned} & -P \frac{\partial P}{R \partial \theta} \bigg|_{\text{in}} H^3 h_0^3 dR + P \frac{\partial P}{R \partial \theta} \bigg|_{\text{out}} H^3 h_0^3 dR - \\ & P \frac{\partial P}{\partial R} \bigg|_{\text{in}} \left(R + \frac{dR}{2}\right) H^3 h_0^3 d\theta + P \frac{\partial P}{\partial R} \bigg|_{\text{out}} \cdot \\ & \left(R - \frac{dR}{2}\right) H^3 h_0^3 d\theta - 12k' P \frac{\partial P}{\partial Z} \bigg|_{\text{in}} R r_0 d\theta dR = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

4) 无限制层时, 在多孔质与气膜边缘处其对应的无量纲压力分布方程为

$$\begin{aligned} & -P \frac{\partial P}{R \partial \theta} \bigg|_{\text{in}} H^3 h_0^3 dR - 6kP \frac{\partial P}{R \partial \theta} \bigg|_{\text{in}} r_0 dR dZ \\ & + P \frac{\partial P}{R \partial \theta} \bigg|_{\text{out}} H^3 h_0^3 dR + 6kP \frac{\partial P}{R \partial \theta} \bigg|_{\text{out}} r_0 dR dZ \\ & - P \frac{\partial P}{\partial R} \bigg|_{\text{in}} \left(R + \frac{dR}{2}\right) H^3 h_0^3 d\theta - 6kP \frac{\partial P}{\partial R} \bigg|_{\text{in}} \left(R + \frac{dR}{2}\right) \cdot \\ & d\theta dZ + P \frac{\partial P}{\partial R} \bigg|_{\text{out}} \left(R - \frac{dR}{2}\right) H^3 h_0^3 d\theta + 6kP \frac{\partial P}{\partial R} \bigg|_{\text{out}} r_0 \cdot \\ & \left(R - \frac{dR}{2}\right) d\theta dZ - 12kP \frac{\partial P}{\partial Z} \bigg|_{\text{in}} R r_0 d\theta dR = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

流量计算方法^[26]:

$$G = \iint_A m_z \quad (11)$$

式(11)经过进一步计算, 可以求得流经多孔质石墨静压气体轴承的气体质量流量。

1.3 数值分析

运用有限元差分法进行离散化

$$\begin{aligned} P_{R \partial \theta} \bigg|_{\text{in}} &= \frac{P_{i-1,j,k} + P_{i,j,k}}{2}, P_{R \partial \theta} \bigg|_{\text{out}} = \frac{P_{i,j,k} + P_{i+1,j,k}}{2} \\ P_R \bigg|_{\text{in}} &= \frac{P_{i,j-1,k} + P_{i,j,k}}{2}, P_R \bigg|_{\text{out}} = \frac{P_{i,j,k} + P_{i,j+1,k}}{2} \\ P_Z \bigg|_{\text{in}} &= \frac{P_{i,j,k-1} + P_{i,j,k}}{2}, P_Z \bigg|_{\text{out}} = \frac{P_{i,j,k} + P_{i,j,k+1}}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{R \partial \theta} \bigg|_{\text{in}} &= \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{2}, \frac{\partial P}{R \partial \theta} \bigg|_{\text{out}} = \frac{P_{i+1,j,k} - P_{i,j,k}}{2} \\ \frac{\partial P}{\partial R} \bigg|_{\text{in}} &= \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{2}, \frac{\partial P}{\partial R} \bigg|_{\text{out}} = \frac{P_{i,j+1,k} - P_{i,j,k}}{2} \\ \frac{\partial P}{\partial Z} \bigg|_{\text{in}} &= \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{2}, \frac{\partial P}{\partial Z} \bigg|_{\text{out}} = \frac{P_{i,j,k+1} - P_{i,j,k}}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

将式(12)和式(13)分别代入式(6),(7),(9)和(10), 即可以对不同情况下的压力分布进行离散化, 利用牛顿迭代法, 并进行 Matlab 编程, 从而求得

不同情况下的压力分布值, 进一步计算求得多孔质静压气体轴承的静态刚度和气体质量流量。

2 数值计算结果

多孔质石墨静压气体推力轴承相关尺寸为: 多孔质的直径 $d = 77.8 \text{ mm}$, 多孔质的厚度 $H = 3.5 \text{ mm}$, 几种石墨多孔质的密度分别为 1.70 g/cm^3 , 1.73 g/cm^3 , 1.75 g/cm^3 。

数值分析计算的初始条件为: 常温常压即 $T = 293 \text{ K}$, $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$, 空气粘度系数 $\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

边界条件: $0 \leq \theta \leq 2\pi$, $P_{\theta=0} = P_{\theta=2\pi}$, 径向最外层气压 $P_{r=1} = p_0$, 气膜厚度方向的第一层为供气压力。

通过以上计算出来的各个分层的压力, 进一步计算, 可求出多孔质空气静压推力轴承的承载力和质量流量。在以上初始条件和边界条件下, 分析多孔质的密度、限制层、供气压力和质量流量等对多孔质空气静压推力轴承静态特性的影响。

2.1 原始轴承(无表面限制层)

供气压力为 0.3 MPa 时, 仅改变多孔质石墨的密度, 计算多孔质石墨轴承的承载力、空气质量流量、刚度分别与气膜厚度的影响变化关系, 其相应的数值计算结果分别如图 3 中(a)(b)(c)所示。

从图 3(a)可以得出: 同一供气气压下, 同一密度石墨轴承的承载力随着气膜厚度的增加而减小, 且变化趋势是先缓慢, 再急剧下降, 最后又趋于缓慢变化。这说明多孔质石墨轴承随气膜厚度的变化有一个最佳的刚度值, 而当气膜厚度均相同时, 密度小的, 承载力较大; 气压一定时, 当气膜厚度无限接近于零时, 不同密度的多孔质轴承的最大承载力越接近, 并趋于相等。

从图 3(b)可以得出: 当供气压力一定时, 同一密度的多孔质石墨轴承的质量流量随着气膜厚度的增加而逐渐增大, 最终趋于稳定, 且密度大的多孔质轴承趋于稳定时的气膜间隙较小; 当供气压力一定时, 气膜厚度相同的情况下, 密度大的质量流量小。

从图 3(c)可以得出: 不同密度的多孔质石墨轴承的刚度都随着气膜厚度的增加而呈现出先增大后减小的变化趋势, 且多孔质石墨密度越小, 最大刚度值越小, 1.70 g/cm^3 , 1.73 g/cm^3 , 1.75 g/cm^3 三种密度的多孔质轴承的理论最大刚度值所对应的

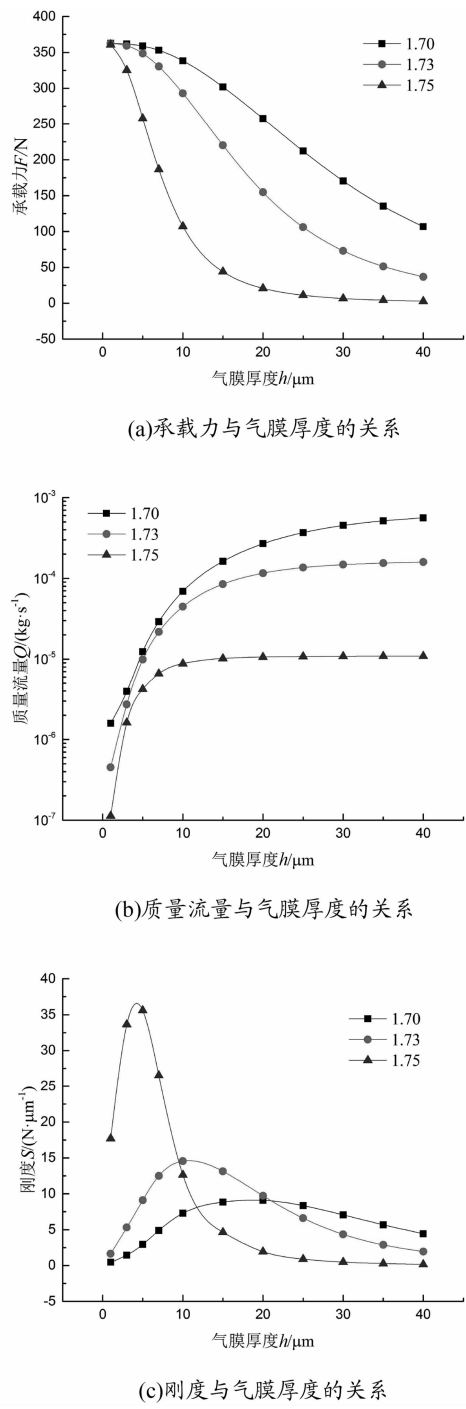


图 3 多孔质石墨轴承密度对轴承承载力、空气质量流量、刚度的影响(0.3 MPa)

Fig.3 Effect of the density of porous graphite bearing on the bearing capacity,air mass flow and stiffness(0.3 MPa)

气膜厚度分别为 16 μm ,10 μm ,5 μm .

2.2 改进轴承(有表面限制层)

为研究表面限制层对多孔质石墨静压气体推力轴承静态特性的影响,特在多孔质石墨表面添加一层渗透率均匀且小于多孔质石墨渗透率的涂层,且其厚度均匀.此时 1.70 g/cm³,1.73 g/cm³,1.75

g/cm³ 三种密度的多孔质轴承所取用的限制层的渗透率分别对应为 $7\times 10^{-15}\text{ m}^2$, $7\times 10^{-16}\text{ m}^2$, $7\times 10^{-17}\text{ m}^2$,厚度均为 10 μm .这些限制层的渗透率是根据实验测得的三种密度的多孔质轴承的渗透率再经过计算优化而得到的.图 4 中(a)(b)(c)分别为 0.3

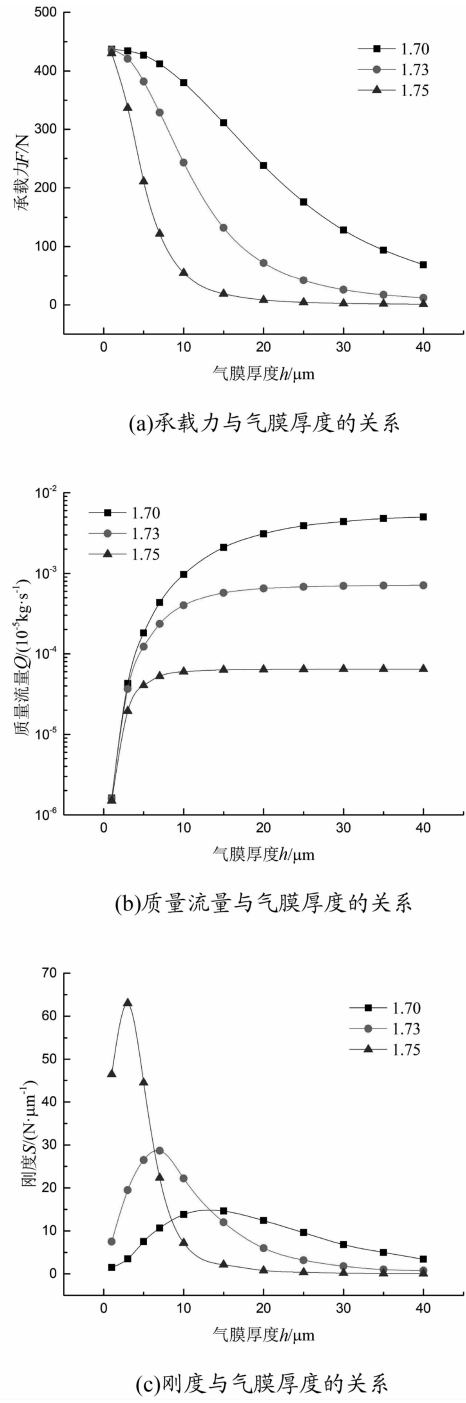


图 4 多孔质石墨轴承密度对轴承承载力、空气质量流量、刚度的影响(0.3 MPa)

Fig.4 Effect of the density of the porous graphite bearing on bearing capacity, air mass flow and stiffness(0.3 MPa)

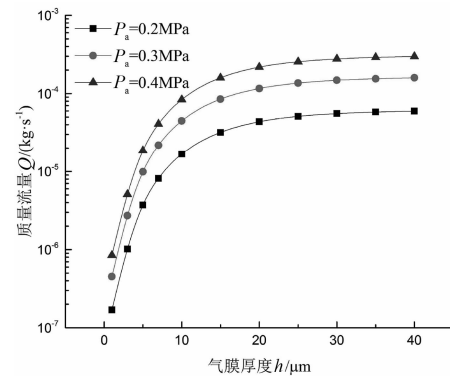
MPa 供气压力下轴承密度对轴承承载力、空气质量和刚度的影响关系图。

从图 4(a)(b)(c)可以得出:同一气压下,不同密度的多孔质静压气体轴承的承载力均随着气膜厚度的增加而减小直至趋于零,并且在中间一段时变化较为剧烈,密度越大,承载力下降的速度越快;质量流量随着气膜厚度的增大而逐渐增加直至趋于稳定值,并且密度越大越快趋于稳定;刚度则是先增大后减小,密度大的最大刚度值较大且达到最大刚度值时的气膜厚度值较小.当气膜厚度一定时,密度越大,轴承承载力越小,质量流量越小.当气膜厚度足够小时,三种密度轴承的承载力和质量流量均几乎相等。

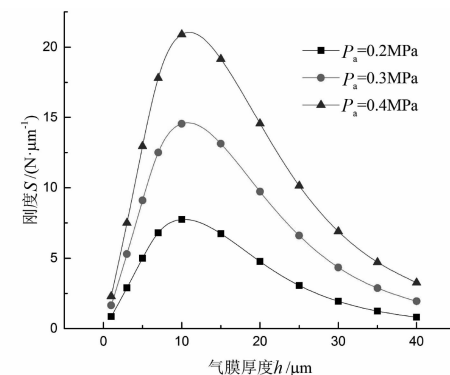
2.3 两者对比

密度为 1.73 g/cm^3 的多孔质石墨静压气体推力轴承,在无表面限制层时,在不同气压下的轴承承载力、气体质量流量和轴承刚度随气膜厚度的变化关系分别如图 5(a)(b)(c)所示;有表面限制层时,在不同气压下的轴承承载力、气体质量流量和轴承刚度随气膜厚度的变化关系分别如图 6(a)(b)(c)所示。

将图 5 无限制层时的(a)(b)(c)分别与图 6 有限制层时的(a)(b)(c)进行对比得出:气膜厚度一定时,无限制层和有限制层的多孔质石墨静压气体推力轴承的承载力、气体质量流量和刚度均随着气压的增大而增大;与无限制层相比,有限制层的多孔质石墨静压气体推力轴承的承载力、气体质量流量、刚度均有不同程度的增大,其中刚度增加较大,承载力和质量流量增加的相对较小;随着气膜厚度的逐渐增大,有限制层比无限制层的承载力、气体质量流量和刚度更先达到稳态;无论是无限制层的还是有限制层的,其达到最大刚度值时所对应的气膜厚度均不随着气压的变化而改变;此外,有限制



(b) 质量流量与气膜厚度的关系

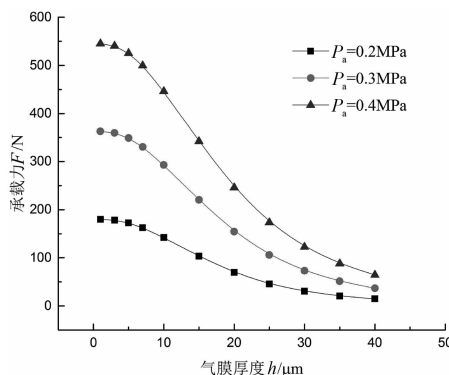


(c) 刚度与气膜厚度的关系

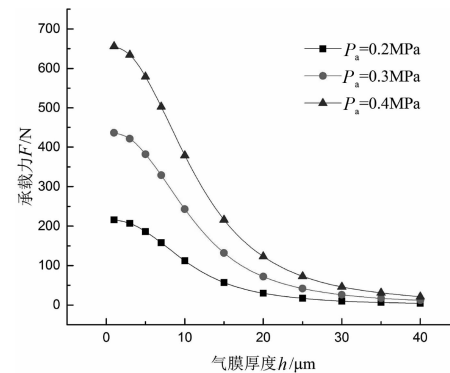
图 5 供气压力对轴承承载力、气体质量流量、轴承刚度的影响(无限制层)

Fig.5 Effect of gas supply pressure on bearing capacity, gas mass flow and bearing stiffness (without a surface-restricted layer)

层和无限限制层的多孔质石墨静压气体推力轴承的刚度值均达到最大值时,有限制层的气膜厚度小于无限限制层的气膜厚度。



(a) 承载力与气膜厚度的关系



(a) 承载力与气膜厚度的关系

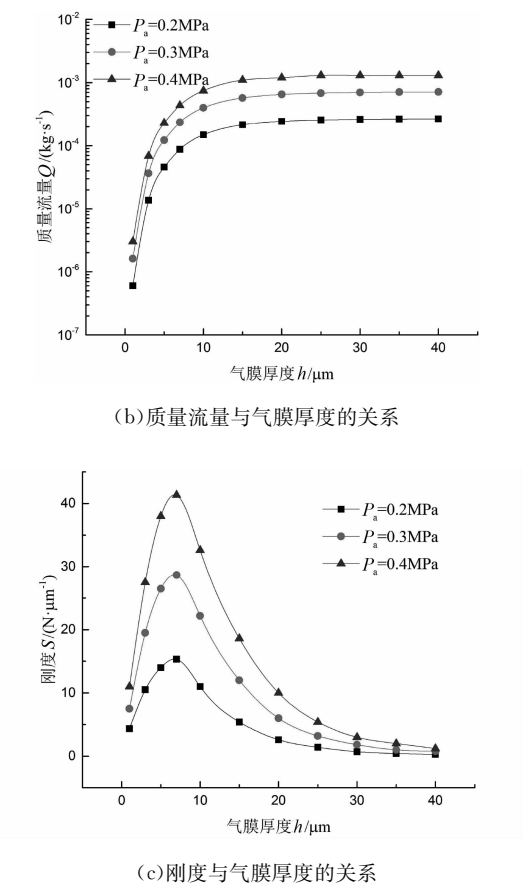


图 6 供气压力对轴承承载力、气体质量流量、轴承刚度的影响(有限层)

Fig.6 Effect of gas supply pressure on bearing capacity,gas mass flow and bearing stiffness (with a surface-restricted layer)

3 实验结果对比

3.1 实验装置

本实验主要是为了测量不同密度的多孔质石墨静压气体推力轴承在不同气压下的气膜厚度与承载力的变化关系,并与理论计算值作对比.图 7(a)(b)分别为实验装置的示意图和实物图,其主要组成部分有空气压缩机、空气过滤器、空气压力调节器、气体压力计、空气体积流量计、多孔质轴承、数据采集装置、电涡流位移传感器、加载板、已知质量的重块和导杆等组成.

实验中,空气压缩机提供气源,经过滤器过滤净化,压力调节器控制供气气压,气体压力计测量供气压力,流量计测量流经轴承的空气流量,并通过传感器和数据采集器将信号传递给 ECU,根据采集到数据即可得到不同气压下、不同密度的多孔质轴承的承载力与气膜厚度的关系图.

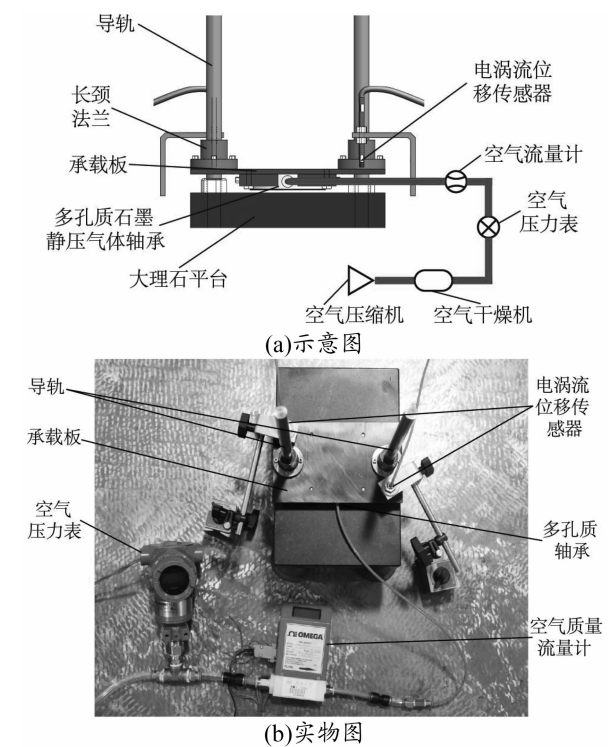


图 7 实验装置示意图和实物图

Fig.7 Schematic diagram and physical diagram of experimental device

3.2 多孔质材料渗透性的测定

多孔质渗透系数计算公式^[27]为:

$$k=\frac{\mu H}{A}\times 10^{-c},C=\frac{\sum \lg \Delta p-\sum \lg Q}{n} \tag{14}$$

式中: A 为多孔质的底面圆面积, m^2 ; Q 为空气体积流量, m^3/s ; C 为系数, n 为采集的供气压力值的个数; p 为前后气体压差, Pa .

实验中,所有多孔质材料的工作面的直径均为 $\phi=77.8\text{ mm}$,石墨多孔质的厚度 $H=4\text{ mm}$,环境温度 $T=293\text{ K}$,大气压力 $p_0=0.1\text{ MPa}$,空气粘度系数 $\mu=1.81\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$.

空载时,取密度 $\rho=1.70\times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$ 的石墨多孔质材料,分别测得不同压力下所对应的空气的体积流量,并绘制成表 1.

表 1 不同压力下的空气体积流量

Tab.1 Air volume flow under different pressures

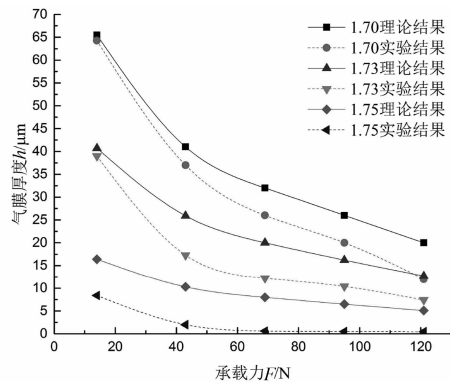
实验次数	1	2	3	4	5	6	7
供气压力 p/MPa	0.137	0.175	0.216	0.255	0.294	0.332	0.370
流量 $Q/(10^{-4}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	1.2	2.4	3.5	4.5	5.5	6.4	7.3

根据式(14)和表 1 中数据即可求得密度 $\rho=1.70\times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$ 的石墨多孔质材料的渗透系数 $k_1=3.86\times 10^{-14}\text{ m}^2$.采用上述方法,依次可求出密度 $\rho=1.73\times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$, $\rho=1.75\times 10^3\text{ kg}/\text{m}^3$ 下的渗

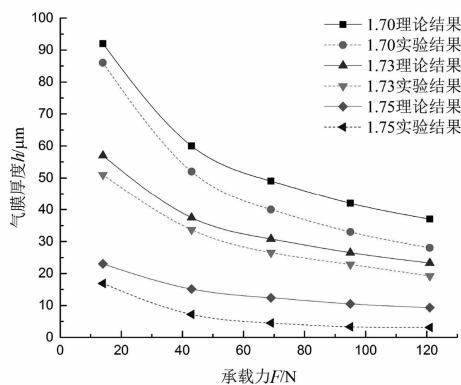
透系数分别为 $k_2 = 9.32 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, $k_3 = 6.06 \times 10^{-16} \text{ m}^2$.

3.3 静态特性实验结果分析与对比

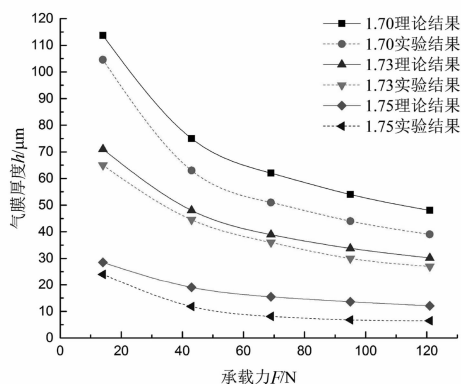
图 8 为无限制层的实验结果与数值计算结果的承载力的对比关系图,从图中可以看出:



(a) 气膜厚度与承载力的关系 (0.2 MPa)



(b) 气膜厚度与承载力的关系 (0.3 MPa)



(c) 气膜厚度与承载力的关系 (0.4 MPa)

图 8 不同气压下的轴承密度对轴承静特性的影响

Fig.8 Effect of bearing density on the static characteristics of the porous bearing under different gas pressures

1) 在三种气压下,三种密度的多孔质石墨轴承

的气膜厚度都随着承载力的增加而逐渐减小,并且承载力在小范围变化时,气膜厚度的值变化较大,而承载力在大范围变化时,气膜厚度的值变化较为缓和.同一密度的多孔质轴承,承载力相同时,随着气压的增大,气膜厚度变大.气压一定、承载力相同时,密度越大,气膜厚度越小.

2) 实验值和理论计算值吻合较好,从而验证了理论模型的正确性.虽然测量值均小于各自对应的理论计算值,但这是由于实验台自身的精确度和实验仪器的测量精度及误差造成的.除此之外,其他不确定性外界条件的干扰,如实验中的电涡流位移传感器容易受到周围磁性材料的干扰而导致测量不精确等都能不同程度地影响实验结果.

4 结 论

本文对不同密度的多孔质石墨静压气体推力轴承静态特性进行了理论分析与实验研究,理论计算结果和实验结果吻合较好,在此基础上得出了以下结论:

1) 通过理论计算结果可以得出 1.70 g/cm^3 , 1.73 g/cm^3 , 1.75 g/cm^3 三种密度的多孔质石墨轴承无表面限制层时的最大轴承静态刚度所对应的气膜厚度分别为 16 μm , 10 μm , 5 μm .

2) 通过实验测得 1.70 g/cm^3 , 1.73 g/cm^3 , 1.75 g/cm^3 三种密度的多孔质轴承的渗透率分别为 $3.86 \times 10^{-14} \text{ m}^2$, $9.32 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, $6.06 \times 10^{-16} \text{ m}^2$, 初步得出多孔质轴承密度越大渗透率越小的规律.

3) 通过对多孔质石墨静压气体轴承有无表面限制层进行理论对比,得出有限制层的轴承的承载力、气体质量流量和静态刚度均大于无限制层轴承.

4) 经过理论计算得出,在同一气压下,同一密度的多孔质石墨轴承随着气膜厚度的增大,承载力逐渐减小,静态刚度先增大后减小,流量逐渐增大直至保持稳定;同一气压下,当气膜厚度相同时,随着密度的增大,承载力逐渐减小,空气质量流量逐渐减小,最大轴承静态刚度逐渐增大.在同一密度下,气膜厚度相同时,随着供气压力的增大,承载力、最大轴承静态刚度、空气质量流量均逐渐增大.

5) 理论承载力与实验承载力对比得出,实验结果与理论结果吻合较好.接下来的工作将会进行有表面限制层的相关实验,进一步完善对多孔质石墨静压气体推力轴承静态特性的研究.本文的研究对多孔质石墨空气静压推力轴承的设计和应用具有

一定指导性意义。

参考文献

- [1] SAWADA K, KAWAI T, EBIHARA K. The laminarization of air bearing in the nano machine FANUC ROBO nano UiA [J]. FANUC Tech Rev, 2003, 16(1): 1—6.
- [2] 王家序, 潘阳, 李俊阳, 等. 纳米坡缕石改进水润滑轴承性能的研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(8): 70—77.
WANG Jiaxu, PAN Yang, LI Junyang, *et al.* Study on nano-palygorskite improving upon performance of water-lubricated bearing [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(8): 70—77. (In Chinese)
- [3] 张华, 郭力, 许怡斌, 等. 隔热涂层对磨床主轴动静压轴承热变形的影响研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(4): 67—74.
ZHANG Hua, GUO Li, XU Yishe, *et al.* Thermal deformation research about applying heat insulation coating on hybrid bearing in spindle of grinder [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(4): 67—74. (In Chinese)
- [4] JIA C, PANG H, MA W, *et al.* Analysis of dynamic characteristics and stability prediction of gas bearings [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2017, 69(2): 123—130.
- [5] KINOSHITA T, KANG D, YOKOTA K, *et al.* 21010 experiment and numerical simulation for porous aerostatic bearing characteristics [J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2015, 2015(21): 21010-1—21010-2.
- [6] CUI H, YUE X, ZHANG L, *et al.* Static and dynamic characteristics of aerostatic bearing based on numerical simulation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(9): 116—121.
- [7] KWAN Y B P, CORBETT J. Porous aerostatic bearing—an updated review [J]. Wear, 1998, 222(2): 69—73.
- [8] HECHUN Y, HUANHUA L, HUIYING Z, *et al.* Research on the static characteristics of circular thrust porous aerostatic bearings [C]// IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2015: 1407—1411.
- [9] SINGH K, RAO N. Static characteristics of aerostatic porous rectangular thrust bearings [J]. Wear, 1982, 77(2): 229—236.
- [10] HOSOKAWA T, SOMAYA K, MIYATAKE M, *et al.* Static characteristics of aerostatic thrust bearings with multiple porous inlet ports [J]. Journal of Tribology, 2015, 137(2): 3698—3703.
- [11] SHEINBERG S A, SHUSTER V G. Resistance to vibrations of a hydrostatic thrust bearing [J]. Machines and Tooling, 1960, 31(11): 24.
- [12] MORI H, YABE H, ONO T. Theory of externally pressurized circular thrust porous gas bearing [J]. Journal of Fluids Engineering, 1965, 87(3): 613—620.
- [13] MORI H, YABE H, SHIBAYAMA T. Theoretical solution as a boundary value problem for externally pressurized porous gas bearings [J]. Journal of Basic Engineering, 1965, 87(3): 622.
- [14] RAO N S. Effect of slip flow in aerostatic porous rectangular thrust bearings [J]. Wear, 1980, 61(1): 77—86.
- [15] RAO N S. Analysis of aerostatic porous rectangular thrust bearings with offset loads [J]. Wear, 1980, 59(2): 333—344.
- [16] HOWARTH R B. Externally pressurized porous thrust bearings [J]. Tribology Transactions, 1976, 19(4): 293—300.
- [17] KILMISTER G T F. The use of porous materials in externally pressurized gas bearings [J]. Powder Metallurgy, 1969, 12(24): 400—409.
- [18] CAPONE A, CAPONE E, D'AGOSTINO V, *et al.* Permeability distribution in sintered bearings [J]. Tribology International, 1978, 11(6): 333—336.
- [19] 王云飞. 气体润滑理论与气体轴承设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
WANG Yunfei. Gas lubricated theory and design manual of gas bearings [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. (In Chinese)
- [20] 王建敏, 戴一帆, 李圣怡. 局部多孔质气浮止推轴承的设计研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(1): 38—43.
WANG Jianmin, DAI Yifan, LI Shengyi. Design of partial porous air thrust bearing [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(1): 38—43. (In Chinese)
- [21] 于雪梅, 卢泽生, 饶河清. 基于分形理论多孔质石墨渗透率的研究 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(s1): 74—77.
YU Xuemei, LU Zesheng, RAO Heqing. Research on the permeability of porous graphite based on the fractal theory [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(s1): 74—77. (In Chinese)
- [22] 杜金名. 多孔质气体静压轴承在三轴转台设计中的应用 [J]. 中国工程科学, 2005, 7(1): 65—68.
DU Jinming. Application of porous aerostatic bearings in three-axis table [J]. Engineering Sciences, 2005, 7(1): 65—68. (In Chinese)
- [23] OTSU Y, MIYATAKE M, YOSHIMOTO S. Dynamic characteristics of aerostatic porous bearings with a surface-restricted layer [J]. Journal of Tribology, 2011, 133(1): 186—192.
- [24] RAPARELLI T, VIKTOROV V, COLOMBO F, *et al.* Aero-static thrust bearings active compensation; Critical review [J]. Precision Engineering, 2016, 44(Supplement C): 1—12.
- [25] FENG K, LI W, DENG Z, *et al.* Thermohydrodynamic analysis and thermal management of spherical spiral groove gas bearings [J]. Tribology Transactions, 2017, 60(4): 629—644.
- [26] RAO N S. Analysis of externally pressurized porous gas bearings; Rectangular thrust bearings [J]. International Journal of Machine Tool Design & Research, 1979, 19(19): 87—93.
- [27] 于雪梅. 局部多孔质气体静压轴承关键技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
YU Xuemei. Research on key technologies of partial porous externally pressurized gas bearing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (In Chinese)