

空化效应对非对称织构化滑动轴承 摩擦性能的影响

王保民, 王慧心, 钱斯凯, 杜雪兵, 陈欣

(兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: **目的** 通过改变滑动轴承及其表面非对称织构的相关参数, 探究空化效应对非对称织构化滑动轴承摩擦学性能的影响。**方法** 基于 N-S 流体计算方程, 采用 Schnerr-Sauer 空化模型, 建立三角形非对称织构化滑动轴承数值分析模型, 并进行求解, 分析微织构排布位置、非对称性、宽深比及轴承偏心率等不同时, 空化效应对滑动轴承摩擦学性能的影响。**结果** 非对称织构布置在最大油膜压力附近时, 空化效应对滑动轴承承载力和摩擦因数的影响最大; 空化效应对非对称织构化滑动轴承摩擦性能的影响大于对称性织构; 非对称织构的宽深比过大或过小均不利于空化区域的形成, 会降低滑动轴承的空化面积率; 滑动轴承的偏心率越大, 空化面积率越大, 空化效应对非对称织构化滑动轴承摩擦性能的影响程度也随之增大。**结论** 在计入空化效应条件下, 三角形非对称织构化滑动轴承的摩擦力均不同程度地提高, 摩擦因数均不同程度地降低。空化效应对三角形非对称微织构化滑动轴承摩擦性能的提升程度与空化面积率有关, 即空化面积率越大, 空化现象越明显, 提升程度越高。

关键词: 非对称微织构; 滑动轴承; 空化效应; 空化面积率; 摩擦性能

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2025)01-0171-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2025.01.016

Cavitation Effect on Tribological Performance of Journal Bearing with Asymmetric Micro-texture

WANG Baomin, WANG Huixin, QIAN Sikai, DU Xuebing, CHEN Xin

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: At present, the research on textured surfaces of journal bearings mainly focuses on symmetric textures, and existing studies on asymmetric textured surfaces have shown that reasonable changes for the asymmetry of textured cross section can enhance the cavitation effect of textured surface, which can effectively improve the tribological performance of textured surface. The work aims to investigate the degree of cavitation effect on the tribological performance of asymmetric textured journal bearing when relevant parameters of journal bearing and its surface asymmetric textures have a changement. In this study, based on the N-S fluid calculation equation and the Schnerr-Sauer cavitation model, the numerical calculation model of triangular asymmetric micro-textured journal bearing was established and solved. On account of changement about

收稿日期: 2023-12-29; 修订日期: 2024-04-08

Received: 2023-12-29; **Revised:** 2024-04-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51965038)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51965038)

引文格式: 王保民, 王慧心, 钱斯凯, 等. 空化效应对非对称织构化滑动轴承摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2025, 54(1): 171-180.

WANG Baomin, WANG Huixin, QIAN Sikai, et al. Cavitation Effect on Tribological Performance of Journal Bearing with Asymmetric Micro-texture[J]. Surface Technology, 2025, 54(1): 171-180.

arrangement positions, asymmetry, aspect ratios of micro-texture and eccentricity of textured bearing, the cavitation effect on tribological performance of journal bearing with asymmetric micro-texture was analyzed. It was found that the tribological performance of triangular asymmetric textured journal bearings was further improved under the condition of accounting for the cavitation effect. The degree to which the cavitation effect improved tribological performance of triangular asymmetric micro-textured journal bearing was related to cavitation area rate, indicating that the larger the cavitation area rate, the more obvious the cavitation phenomenon, and the higher the degree of improvement. When the triangular asymmetric texture was arranged near the maximum pressure of oil film, the journal bearing had the maximum cavitation area rate. The cavitation effect had the greatest effect on bearing capacity and friction coefficient, which increased the bearing carrying capacity by 2.4% and decreased the friction coefficient by 26.1%, respectively. The cavitation area rate of asymmetric textured journal bearings was significantly higher than that of symmetric textured journal bearings, and the cavitation effect had a larger effect on the tribological performance of asymmetric textured journal bearings than that of symmetric textured journal bearings. When the inlet length of asymmetric texture was smaller than the outlet length and the inlet was relatively smooth, the cavitation effect improved the tribological performance of journal bearing better. If the aspect ratio of asymmetric micro-texture is too large or too small, it is not conducive to the formation of cavitation areas and will reduce cavitation area rate of journal bearing. For several sets of aspect ratios designed in this study, there is the maximum cavitation area rate at $\lambda=5$, while the maximum bearing capacity and the minimum friction coefficient are obtained. Besides, according to the variation tendency of cavitation area rate with the aspect ratio of triangular asymmetric texture, the maximum cavitation area rate of triangular asymmetric textured journal bearings will appear at $\lambda=5$ or other values around $\lambda=5$. The cavitation area rate of journal bearing increases with the increase of eccentricity and the degree of the cavitation effect on bearing capacity of journal bearing also increases with the increase of eccentricity. However, excessive eccentricity leads to an increasing cavitation region of the divergent wedge, which is detrimental to the integrity of oil film. Therefore, it is necessary to choose appropriate eccentricity according to the actual situation to achieve the required tribological performance.

KEY WORDS: asymmetric micro-texture; journal bearing; cavitation effect; cavitation area rate; tribological performance

滑动轴承具有承载力大、抗冲击性强、稳定性高、噪音低、构造简单等优点,广泛应用于高速、高精度及重载的旋转机械中^[1-3]。摩擦磨损^[4]是滑动轴承失效的主要原因,通过改善滑动轴承的摩擦学特性,减少轴承摩擦副表面的摩擦磨损,是滑动轴承及其支承装置稳定运行的关键。表面织构技术作为一种新型的降摩减阻措施,已广泛应用于滑动轴承^[5]。

Hamilton 等^[6]最早提出在摩擦副表面加工微结构,以提高摩擦副润滑性能,受到了国内外学者的广泛关注。He 等^[7]研究发现,微结构能有效提高流体动压,使得承载力增大,同时会减小摩擦副表面摩擦力。Khatir 等^[8]将微结构表面应用于滑动轴承,对比分析了织构化轴承和传统轴承的性能参数,发现织构化轴承的最小油膜厚度和油膜阻尼系数降低,油膜刚度系数有所提高。Tala-Ighil 等^[9-10]探讨了表面织构的排布位置对流体动力滑动轴承性能的影响,研究发现,局部织构化表面的流体动压大于完全织构化表面,同时摩擦因数相应减小。Ramos 等^[11]研究了织构化表面对滑动轴承黏性剪切力的影响,结果表明,织构化表面能够使轴承的黏性剪切力显著降低,减小运行过程中的摩擦生热,从而提高滑动轴承的使用效率。刘腾飞等^[12]建立了不同形状织构的几何特征方程,并分析了织构形状、深度等因素对织构化轴承摩

擦性能的影响。研究发现,通过矩形织构改善轴承润滑性能的效果最好,且织构深度存在最优解,使织构化轴承承载力明显增大,摩擦因数明显减小。赵远方等^[13]设计了3种不同排列形式的织构,通过实验研究它对滑动轴承摩擦磨损特性的影响,发现沿轴向间隔分布的试样的摩擦因数最小,说明合理的织构排列形式能有效减小摩擦和磨损。Han 等^[14]求解了单个非对称微织构滑块的承载能力,结果表明,深度不对称的表面微织构更利于提高滑块的承载能力。朱春霞等^[15]建立了非对称织构平面的表征方程,对比分析了对称织构及正向、反向非对称织构对滑动轴承摩擦性能的影响,发现正向非对称织构具有较优的润滑性能。Jiang 等^[16]为了提高往复运动摩擦副的承载能力,提出了2种不同形式的非对称织构,并对其结构进行了数值优化,研究发现设计良好的非对称织构能够提高摩擦副的整体润滑性能。Zhang 等^[17]研究了织构化轴承表面的润滑油流动状态,结果表明,微织构的存在使得零件表面润滑油的流动状态更为复杂,并在局部压降下,织构化表面的凹坑或凹槽的发散区会出现“空化”现象。王丽丽等^[18]分析了计入空化效应的表面微织构滑动轴承特性,结果表明,计入空化效应下的承载力大于未计入空化效应下的承载力,且微织构在计入与不计入空化效应条件下对轴承特性的影响

不同。方勋等^[19]通过研究微凸体织构与空化效应之间的关系发现, 微凸体织构能够诱导空化效应的产生, 且空化效应的存在可以将流体润滑转变为局部气体润滑, 从而改善轴承的摩擦性能。房立庆等^[20]探究了油膜含气对滑动轴承润滑性能的影响, 通过自主搭建实验台方式对含气状态下的滑动轴承进行了实验研究。结果表明, 随着润滑油中含气率的增大, 轴承的油膜压力和承载力显著增大。胡杨等^[21]针对高速可倾瓦滑动轴承搭建实验平台, 研究了油气两相流对其润滑性能的影响, 实验结果表明, 预设气泡率越高, 则空化效应越明显, 且油膜厚度随着气泡率的增加而降低。

以上研究已深入分析了表面织构形状、织构分布形式、织构几何参数、非对称织构等对滑动轴承摩擦特性的影响, 但针对滑动轴承非对称织构的研究并未考虑空化效应。研究表明^[18-21], 考虑空化效应更符合实际工况。鉴于此, 本文基于 N-S 方程, 采用 Schnerr-Sauer 空化模型建立织构化滑动轴承数值分析模型, 通过数值求解得到三角形非对称织构化滑动轴承的油膜压力分布、承载力、摩擦力和摩擦因数等, 分析三角形非对称微织构的排布位置、非对称性、宽深比及轴承偏心率不同时, 空化效应对非对称织构化滑动轴承摩擦性能的影响。

1 控制方程

1.1 雷诺方程

由于 Reynolds 方程忽略了流体的惯性力, 低估了微织构的压力贡献, 因此采用基于 N-S 方程 (Navier-Stokes equations) 的 CFD (Computational Fluid Dynamics) 方法。将动量方程式 (1) 与连续方程式 (2) 耦合, 采用有限体积法在流体域上进行求解。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho F_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

式中: t 为时间; u 为润滑油的速度; F 为单位质量流体上的质量力; p 为流体压强。

滑动轴承油膜厚度方程见式 (3) ~ (5)。

$$h = c + e \cos \theta \quad (3)$$

$$h_0 = h + h_1 \quad (4)$$

$$h_1 = \begin{cases} 0 & \text{Non-textured areas} \\ h_2 & \text{Textured areas} \end{cases} \quad (5)$$

采用压力耦合方程的改进半隐式 SIMPLEC 算法进行求解, 得到轴承油膜的的压力和切应力。由压力对轴承内壁面积的积分, 求得轴承承载力, 见式 (6)。

$$F_s = \iint p dx dy \quad (6)$$

由切应力对面积的积分, 求得轴承油膜的摩擦力, 见式 (7)。

$$F_f = \iint \tau dx dy \quad (7)$$

摩擦因数即为摩擦力与承载力之比, 见式 (8)。

$$f = F_f / F_s \quad (8)$$

1.2 空化模型

采用 Schnerr-Sauer 空化模型^[22]进行描述, 在该模型中, 将式 (1)、(2) 与描述空化形成及出现稳定气泡后压强关系的式 (9)、(10) 联立, 可以计算出考虑空化效应的滑动轴承压力分布。

$$\frac{\partial(\alpha \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \rho u_i)}{\partial x_i} = \left(\frac{n_0}{1+n_0} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \right) \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \quad (9)$$

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p(R) - p}{\rho}} \quad (10)$$

式中: α 为气相体积分数; n_0 为气泡数密度常数, 计算中使用默认值, $n_0=10^{13}$; R 为气泡半径; $p(R)$ 为润滑流体的饱和蒸气压力。

对于空化过程中气泡的演变过程, 可以通过 Rayleigh-Plesset 方程来描述^[23-24], 该方程考虑了液体黏度及表面张力的作用, 见式 (11)。

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(P_b - P - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \right) \quad (11)$$

式中: \dot{R} 为气泡壁面的运动速度; \ddot{R} 为气泡壁面的运动加速度; P_b 为气泡表面压力; P 为气泡外远场流体压强; σ 为流体表面张力系数。

若忽略表面张力系数和二阶项, 则由式 (11) 得到气泡壁面的速率表达式, 可以从物理学视角导出 Rayleigh-Plesset 气泡运动方程来阐述空化流程。

2 数值计算模型

2.1 几何模型及边界条件

以 HZ040 径向滑动轴承为研究对象, 轴承的基本参数如表 1 所示。织构化滑动轴承的数值计算模型如图 1a 所示, 将织构布置在轴瓦表面, 以最大膜厚

表 1 轴承和润滑油基本参数

Tab.1 Basic parameters of bearing and lubricating oil

Parameters	Numerical value
Diameter of bearing D/mm	40.08
Width of bearing B/mm	40
Diameter of journal d/mm	40
Attitude angle $\varphi/(\circ)$	50
Eccentric distance e/mm	0.024
Eccentricity ε	0.6
Density of lubricating oil $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	840
Viscosity of lubricant oil $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.012 7

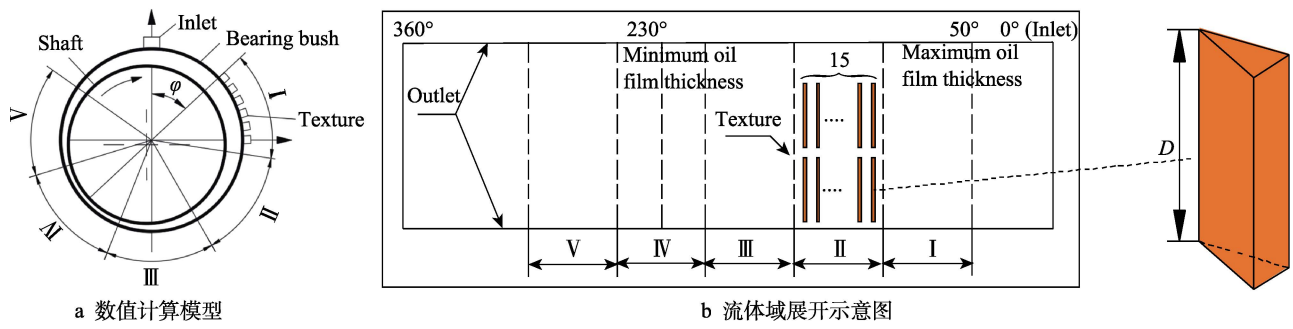


图 1 非对称微织构滑动轴承几何模型

Fig.1 Geometric model of asymmetric micro-textured journal bearing: a) numerical model; b) schematic diagram of fluid domain expansion

处顺时针算起，对轴承腔内的流体域进行等角度划分，将压力上升区划分为 3 个区域，分别为位置 I、II、III，压力最大区为位置IV，压力下降区为位置V。每个位置处织构周向排列 15 组，每组间隔 3.21° 。织构化滑动轴承流体域展开示意图如图 1b 所示。为了便于说明，对织构尺寸进行适当放大。

进油口采用压力入口边界条件，将进油压力设置为 0.2 MPa。轴承腔体两端为出油口，出油口采用压力出口边界条件，压力默认为大气压。将轴承腔内壁面设置为旋转壁面，模拟轴颈的旋转运动。将外壁面设置为固定壁面，轴承转速为 3 000 r/min，沿顺时针方向转动。

2.2 网格无关性及求解器设置

六面体结构化网格具有生成质量好、生成速度快、数据结构简单等优点，因此对轴承模型采用全局六面体结构化网格划分方式，如图 2 所示。为了避免网格数量对计算结果产生影响，且在保证准确性的前提下，尽可能提高计算速度，需进行网格无关性验证。通过对径向网格层数加密，共设置 7 组对照，网格数量如表 2 所示。当径向网格层数大于 7 时，计算误差小于 1%，因此最终选定后续计算中网格数均大于 901 440。

采用 Mixture 模型模拟油气二相流，在文中方程的离散求解采用 SIMPLEC 算法，动量方程采用二阶迎风格式离散，体积分数采用 QUICK 格式离散，计算的收敛精度为 1×10^{-5} 。在求得油膜压力、切应力、速度分布后，通过积分计算可以获得轴承的承载力、摩擦力、摩擦因数等特性参数。

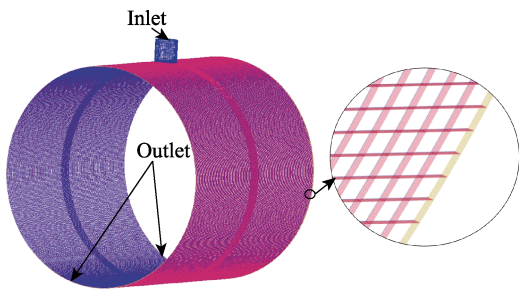


图 2 流体域网格模型

Fig.2 Grid model of fluid domain

表 2 不同网格数目下最大油膜压力

Tab.2 Maximum pressure of oil film under different grid numbers

Total number of grids	Number of radial grid layers	Maximum pressure of oil film/MPa	Error/%
135 920	3	6.040	30.3
244 035	4	4.953	6.83
398 280	5	4.854	4.70
624 125	6	4.780	3.10
901 440	7	4.636	
1 067 760	8	4.641	0.11
1 290 480	9	4.639	0.07

2.3 计算方法有效性验证

将文中提出的计算方法与文献[25]进行比较，结果如图 3 所示。通过仿真模拟得到的压力分布与实验结果基本吻合，尤其是在空化发生区。将文中仿真结果中的油膜空化区域分布情况与文献[26]的实验结果进行对比，计算结果中空化区域的分布形状呈“指状”，与文献实验结果所得的空化区域分布形状基本一致，如图 4 所示。综上可知，本文所提出的计算方法具有较高的可靠性，可以进行后续研究。

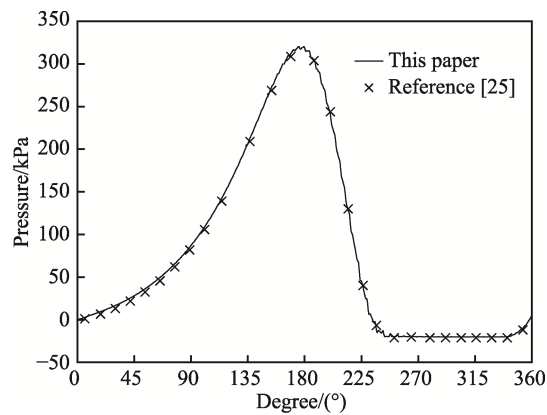


图 3 织构化轴承的仿真压力分布与实验结果的比较

Fig.3 Comparison between simulated pressure distribution and experimental results of textured bearing

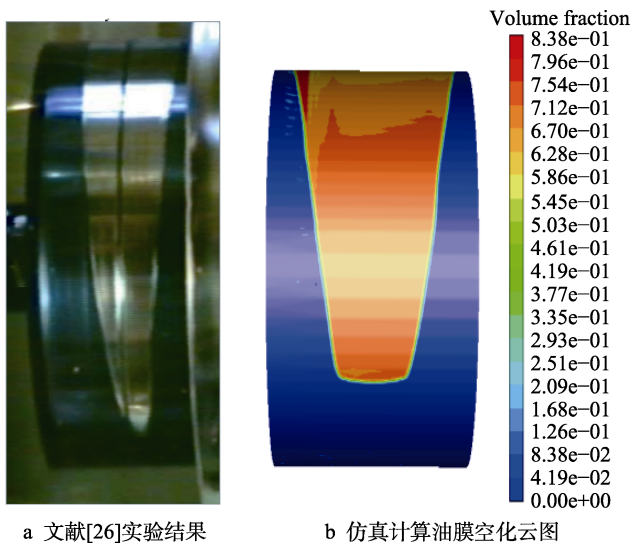


图 4 计入空化条件下空化区域分布云图比较
Fig.4 Comparison of cloud maps about cavitation area distribution under cavitation condition: a) experimental results in reference [26]; b) cloud map of oil film cavitation in simulation calculation

3 结果与讨论

3.1 织构排布在不同位置时空化效应对轴承摩擦性能的影响

对于文中提出的三角形非对称微织构,当织构排布在轴承不同位置时,轴承的空化面积率和计入(或不计入)空化效应时轴承的承载力、摩擦因数变化情况如图 5、6 所示。从图 5 可以看出,织构排布位置会影响轴承的空化面积。将织构布置在位置Ⅳ时,空化面积率最大,为 1.93%。位置Ⅰ至位置Ⅳ的油膜压力逐渐增大,织构的添加使得油膜的厚度增大,因此织构处的油膜压力会降低,从而出现空化现象。越靠近油膜最大压力区处,添加织构造成的压力差越大,空化越易发生,所以当织构从位置Ⅰ向位置Ⅳ排布时,滑动轴承的空化面积率逐渐增大。将织构布置在位置Ⅴ时,空化面积率最小,为 1.72%。位置Ⅴ处于压力下降区,该位置为发生空化的主要区域,织构的添加不会对空化区域的产生提供额外贡献,所以轴承的空化面积率最小。从图 6 可以看出,在计入空化时,轴承的承载力均大于不计入空化条件时,而其摩擦因数均小于未考虑空化时。由于存在空化效应,油膜负压的降低得到抑制,轴承的承载力增大,同时空化使得油膜中部分润滑油发生气化,将摩擦副之间的液体润滑转变为局部的气体润滑,因此降低了摩擦力。将织构布置在位置Ⅳ时,空化效应对承载力和摩擦因数的影响最大,承载力提高了 2.4%,摩擦因数降低了 26.1%。位置Ⅳ位于油膜最薄处,微织构的添加使得油膜的厚度明显增加,最大油膜压力显著降低,油膜整体动压效应大幅下降,因此位置Ⅳ处的承载力

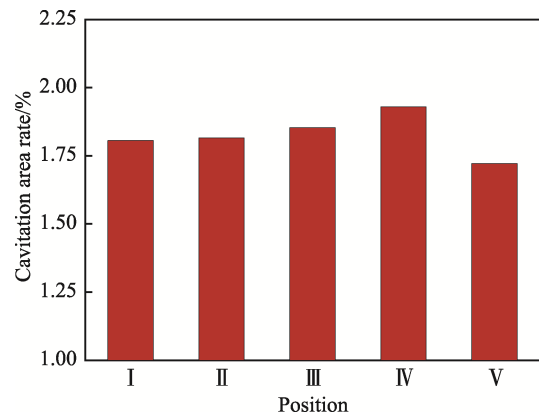


图 5 织构排布位置对滑动轴承空化面积率的影响
Fig.5 Effect of texture arrangement positions on cavitation area rate of journal bearing

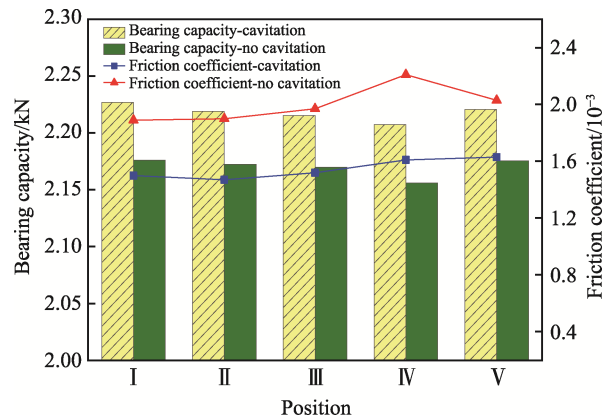


图 6 织构排布位置对滑动轴承摩擦性能的影响
Fig.6 Effect of texture arrangement positions on tribological performance of journal bearing

最小。在计入空化后,该位置的空化面积率最大,空化效应和流体惯性效应的耦合作用最大,使得承载力的上升幅度和摩擦力的下降幅度达到最大值。将织构布置在位置Ⅴ时,空化效应对承载力和摩擦因数的影响最小,承载力提高了 1.7%,摩擦因数降低了 19.7%。位置Ⅴ位于油膜厚度增大处,微织构的添加对油膜厚度的影响较小,因此承载力不会大幅降低。当计入空化后,该位置的空化面积率最小,空化效应和流体惯性效应的耦合作用最小,因此承载力的上升幅度和摩擦力的下降幅度也最小。结合图 5 可以发现,对于排布在不同位置的三角形非对称织构,空化面积率越大,则空化效应对滑动轴承摩擦性能的影响越大。

3.2 织构非对称性不同时空化效应对轴承摩擦性能的影响

采用如图 7 所示的单个微织构流体域模型。其中,1 表示运动表面,2 表示固定表面,两表面间为流体域; h_0 为油膜的厚度, h 为织构的深度, l 为织构横截面的宽度, l_1 、 l_2 分别为微织构截面沿 x 方向的长度, l_1 、 l_2 的不同比值表示织构的非对称性。本

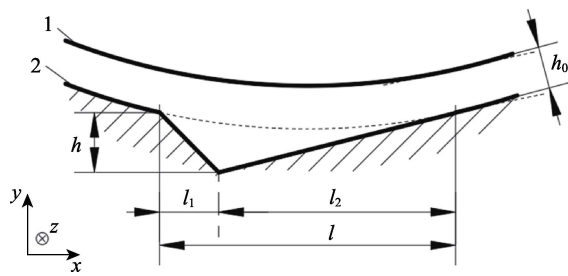


图 7 单个微结构流体域示意图
Fig.7 Schematic diagram of single micro-textured fluid domain

次研究设计了 A01—A05 等 5 种织构(其中 A03 为对称织构), 具体参数如表 3 所示。

如表 3 所示, 将 5 种非对称织构布置在滑动轴承的位置Ⅳ处, 通过改变织构的非对称性, 轴承的空化面积率和计入(或不计入)空化效应时轴承的承载力、摩擦因数的变化情况如图 8、9 所示。从图 8 可以看出, 非对称织构化滑动轴承的空化面积也受到织构非对称性的影响。A03 织构(对称织构)的空化面积率最小, 只有 1.56%, 其他 4 种非对称织构均有效增大了空化区域的面积, 且 A02 织构的空化面积率最大, 其空化面积率达到 2.49%, 因此非对称织构更有利于扩大空化区域的面积。从图 9 可以看出, 相较于对称织构, 非对称织构均可以有效提高承载力, 这与文献[27]得出的结论一致。相较于未计入空化条件时的承载力和摩擦因数, 考虑空化后承载力均不同程度地增大, 摩擦因数均不同程度地减小。对于 A02 型非对称织构, 空化效应对滑动轴承摩擦性能的改善作用最明显, 其承载力提升了 3.6%, 摩擦因数降低了 23.3%。对于 A03 型对称织构, 空化效应对其摩擦性能的改善作用最小, 承载力提升了 0.2%, 摩擦因数降低了 18.8%。结合图 8、9 分析其原因可知, A02 织构的空化面积率最大, 在润滑油流经织构时, 流体的惯性效应与空化效应的耦合作用最大, 因此能够显著增强润滑油的流体动压效应, 从而大大提高轴承的承载力。从图 8、9 可以看出, 当织构的非对称性改变时, 在计入空化条件下滑动轴承承载力的变化趋势与空化面积率的变化趋势相同。

表 3 非对称微织构截面轮廓构型
Tab.3 Cross-sectional profile configuration of asymmetric micro-texture

Designation	$l_1/\mu\text{m}$	$l_2/\mu\text{m}$	Volume/ $(10^7 \mu\text{m}^3)$
A01	0	100	6
A02	20	80	6
A03	50	50	6
A04	80	20	6
A05	100	0	6

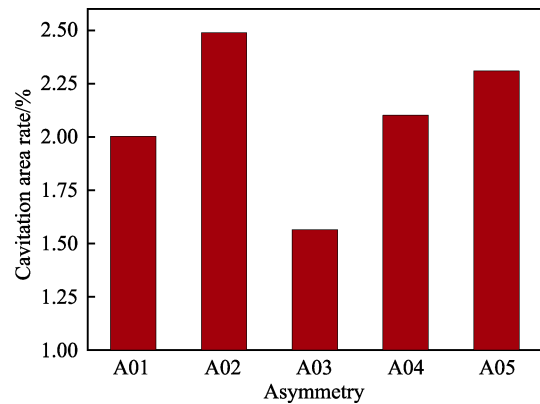


图 8 织构非对称性对滑动轴承空化面积率的影响
Fig.8 Effect of texture asymmetry on cavitation area rate of journal bearing

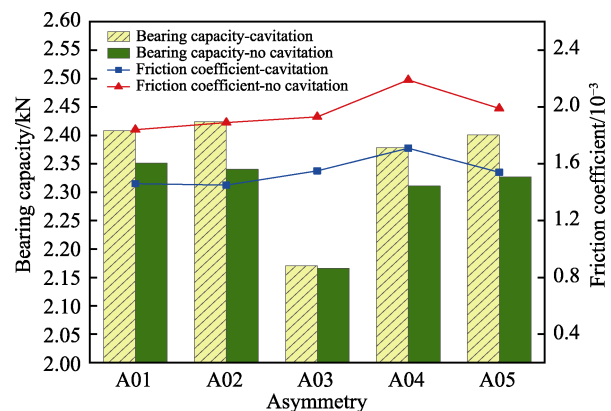


图 9 织构非对称性对滑动轴承摩擦性能的影响
Fig.9 Effect of texture asymmetry on tribological performance of journal bearing

3.3 织构宽深比不同时空化效应对轴承摩擦性能的影响

定义织构的宽深比 λ 为织构宽度 l 与织构深度 h 的比值。固定织构宽度 l 为 $100 \mu\text{m}$, 改变织构的深度, 设置 5 组对照, 滑动轴承空化面积率和计入(或不计入)空化效应时轴承的承载力、摩擦因数的变化情况如图 10、11 所示。从图 10 可以看出, 空化面积率随着 λ 的增大, 呈现先增大再减小的趋势。对于本文设置的 5 组宽深比, 当 $\lambda=5$ 时空化面积率最大。 λ 为 5 与 λ 为 2.5、10 相比, 宽深比数值跨度相对较大, 3 组宽深比对应的空化面积率也相差较大。由此可判断, 对于布置在位置Ⅳ的三角形非对称织构化滑动轴承, 其空化面积率的最大值可能出现在 $\lambda=5$ 或 $\lambda=5$ 附近的其他值。根据图 11 可以看出, 随着 λ 的增大, 承载力呈先增大再减小的趋势, 摩擦因数呈先减小再增大的趋势, 而且承载力降低的程度和摩擦因数增大的程度均较大, 分别为 28.5%、45.2%。在计入空化条件下, 其承载力和摩擦因数均优于未计入空化条件下的承载力和摩擦因数。在 $\lambda=5$ 时, 空化效应对非对称织构化滑动轴承摩擦性能的影响最大, 承载力提高

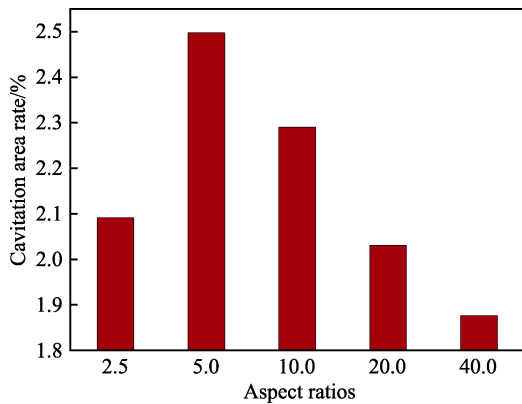


图 10 织构宽深比对滑动轴承空化面积率的影响
Fig.10 Effect of aspect ratios of texture on cavitation area rate of journal bearing

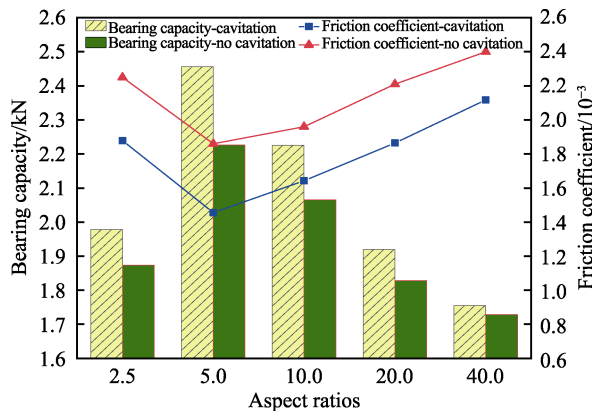


图 11 织构宽深比对滑动轴承摩擦性能的影响
Fig.11 Effect of aspect ratios of texture on tribological performance of journal bearing

了 10.3%，摩擦因数降低了 21.5%。从现有趋势可以看出，继续增大宽深比 λ ，会对滑动轴承摩擦学性能产生不利影响。

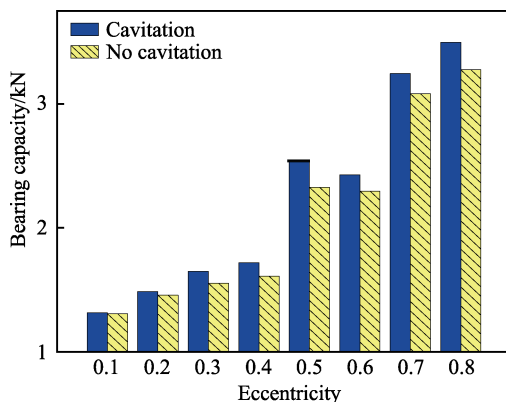
综合分析图 10、11 可知，当微织构宽深比较大时（微织构的宽度远大于其深度），织构近似为平板，所以该轴承可视为传统轴承，织构的添加不仅无法产

生额外的流体动压效应，还会增加油膜的厚度。由于织构的深度较小，润滑油流经织构时会瞬间充满织构，从而难以发生空化，因此阻止了油膜空化区域的进一步扩大，使空化面积率大大降低。当微织构宽深比较小时（微织构宽度远小于其深度），可能只有少量润滑油流入织构凹坑，同样不会对空化区域的产生提供额外贡献。同时，由于织构捕捉润滑油过少而无法达到储油效果，故不能显著改善滑动轴承的摩擦性能。由此可见，需要设计合理的微织构宽深比，空化现象的存在才能大幅提升其承载能力，并降低其摩擦因数，这对滑动轴承摩擦性能的提高具有重要的意义。

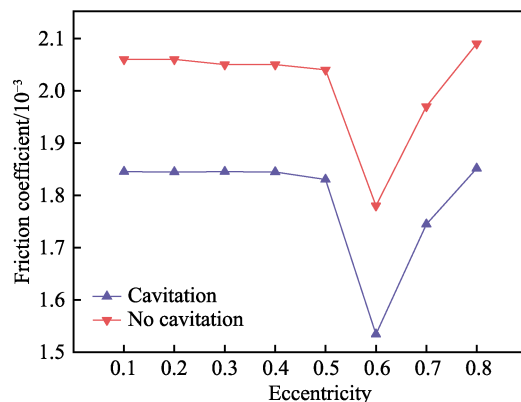
3.4 偏心率不同时空化效应对轴承摩擦性能的影响

为了分析轴承偏心率不同时，空化效应对其摩擦性能的影响，分别在计入或不计入空化条件下建立偏心率 $\varepsilon=0.1$ 、 $\varepsilon=0.2$ 、 $\varepsilon=0.3$ 、 $\varepsilon=0.4$ 、 $\varepsilon=0.5$ 、 $\varepsilon=0.6$ 、 $\varepsilon=0.7$ 、 $\varepsilon=0.8$ 的径向滑动轴承几何模型，得到对应情况下滑动轴承的承载力和摩擦因数，如图 12 所示。从图 12a 中可以看出，无论是否考虑空化，除在 $\varepsilon=0.6$ 处承载力略有下降外，承载力均随着偏心率的增加而增大，且承载能力提升明显，并保持增大趋势。分析其原因可能是当偏心率越大时，最小油膜厚度越小，从而产生的流体动压效应越强。如果持续增大偏心率，则最小油膜的厚度将变得更小，这意味着轴颈和轴瓦可能直接接触。当轴颈与轴瓦之间无间隙时，两者之间的接触强度足够大，那么就认为滑动轴承所能承受的载荷可以无穷大^[28]。在计入空化后，对于三角形非对称织构化轴承，在不同偏心率情况下其承载力均大于未计入空化条件下的承载力，且随着偏心率的增大，空化效应使得承载力增大了 0.6%~9%，增大程度总体呈现逐渐上升的规律。

从图 12b 可以看出，随着偏心率的增大，非对称



a 偏心率对滑动轴承承载力的影响



b 偏心率对滑动轴承摩擦因数的影响

图 12 偏心率对滑动轴承摩擦性能的影响

Fig.12 Effect of eccentricity on tribological performance of journal bearing: a) effect of eccentricity on bearing capacity of journal bearing; b) effect of eccentricity on friction coefficient of journal bearing

织构化轴承的摩擦因数呈现出先减小后增大的趋势；计入空化条件时的摩擦因数均小于未计入空化条件时的摩擦因数；在 $\varepsilon=0.6$ 处摩擦因数最小，且空化效应使得摩擦因数的降低幅度最大，降低了 14%。分析其原因可能是当偏心率为 0.6 时，空化区域的面积达到最佳分布占比，摩擦力显著降低，故摩擦因数大幅下降。从以上分析可以看出，当偏心率发生改变时，空化效应对滑动轴承的摩擦性能具有改善作用，但是需要根据实际情况选择偏心率，从而达到所需的承载力和摩擦因数。

在偏心率 $\varepsilon=0.2$ 、 $\varepsilon=0.4$ 、 $\varepsilon=0.6$ 、 $\varepsilon=0.8$ 时，对织构化滑动轴承空化区域进行分析，得到了不同偏心率下织构化滑动轴承的气相云图，如图 13 所示。主要观察其发散楔的气相变化情况，可以看出，偏心率的变化对空化区域分布范围的影响非常明显。随着偏心率的增大，空化现象越明显，最大气相体积分数区域明显增大，空化区域向滑动轴承轴向两侧的出口位置延伸，扩大了空化面积，所以过大的偏心率将导致发散楔空化区域不断增大，这不利于油膜的完整性，更有可能降低轴承的使用寿命。

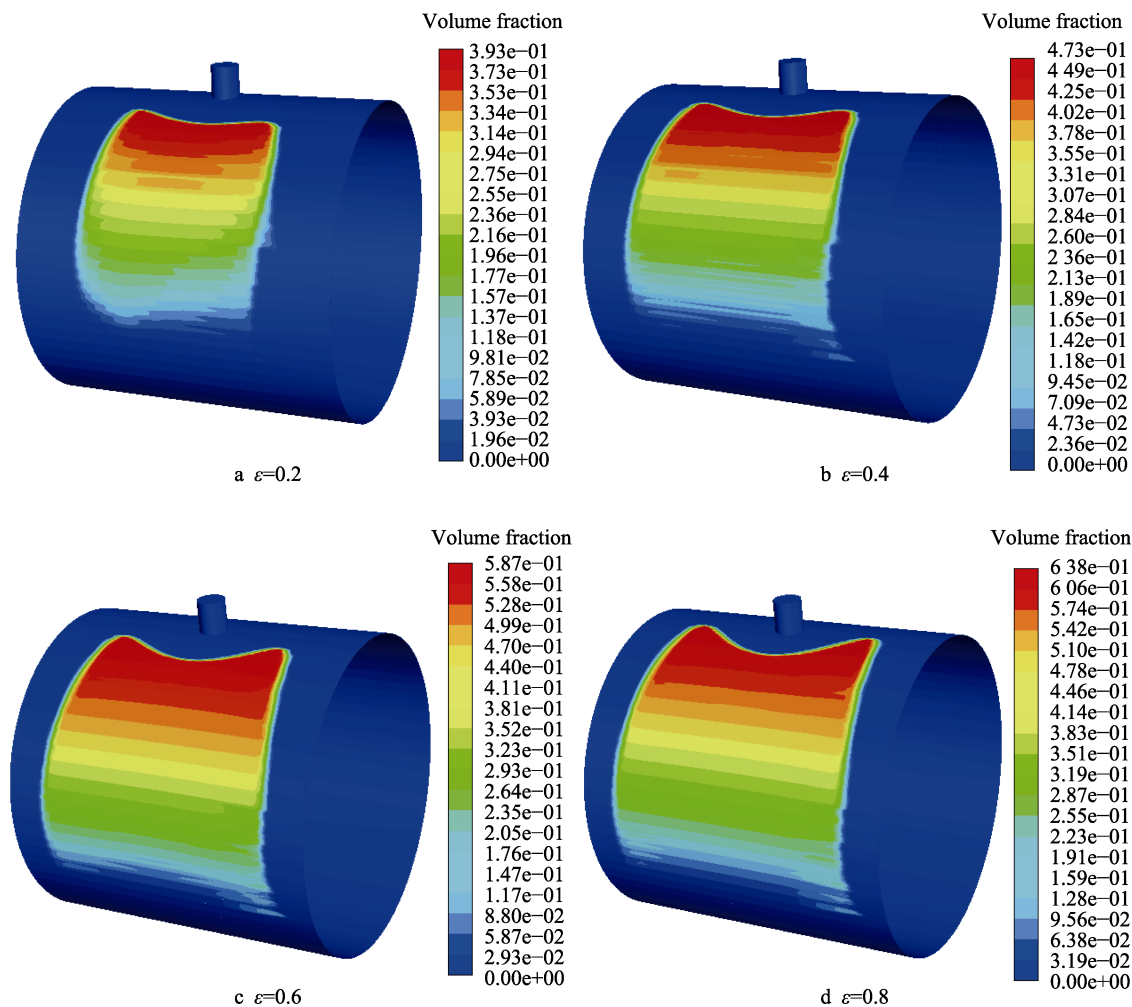


图 13 不同偏心率下的织构化滑动轴承气相云图

Fig.13 Cloud map of gas phase of textured journal bearing under different eccentricities: a) $\varepsilon=0.2$; b) $\varepsilon=0.4$; c) $\varepsilon=0.6$; d) $\varepsilon=0.8$

4 结论

以径向滑动轴承为研究对象，讨论了三角形非对称微结构的排布位置、非对称性、宽深比及轴承偏心率等不同时，空化效应对滑动轴承摩擦性能的影响，得出如下结论。

1) 在计入空化条件下，织构的排布位置会影响轴承空化面积。排布在位置Ⅳ处的织构具有最大的空

化面积率，空化效应对滑动轴承的承载力和摩擦因数的影响最大。排布在位置Ⅴ处的织构具有最小的空化面积率，空化效应对滑动轴承承载力和摩擦因数的影响最小。

2) 非对称性织构能够有效扩大空化区域面积。相较于非对称织构，对称织构的空化面积率最小。空化效应对非对称织构化滑动轴承摩擦性能的改善效果优于对称织构，且在计入空化条件下，不同非对称

织构化滑动轴承承载力的变化趋势与空化面积率的变化趋势相同。

3) 非对称织构的宽深比过大或过小,均不利于空化区域的形成,会使空化面积率大幅降低,从而无法有效提升滑动轴承的承载力。对于本文所设计的几组宽深比,在 $\lambda=5$ 时具有最大的空化面积率,同时获得了最大的承载力和最小的摩擦因数。

4) 随着轴承偏心率的增大,空化面积逐渐扩大,空化效应对承载力的提升程度逐渐增大。然而,过大的偏心率导致发散楔空化区域不断增大,不利于油膜的完整性,更有可能降低轴承的使用寿命。

5) 考虑空化条件下的三角形非对称织构化滑动轴承的摩擦性能明显优于未考虑空化的情况,且空化效应能够较大幅度地提高滑动轴承的承载力,并降低其摩擦因数,前提是设计合理的三角形非对称微织构的相关参数。根据本文的研究结果来看,三角形非对称微织构的入口长度应小于出口长度,入口相对平缓,宽深比应在 $\lambda=5$ 或该值附近,且排布位置在最大油膜压力处或最大油膜压力附近的压力上升区,可以明显改善滑动轴承的摩擦性能。

参考文献:

- [1] 于英华, 杨帅彬, 曹茂林, 等. 滑动轴承表面椭圆偏置类抛物线微织构研究[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 131-140.
YU Y H, YANG S B, CAO M L, et al. Elliptic Bias Parabolic Micro-Texture of Sliding Bearing Surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 131-140.
- [2] 金乐佳, 杨建玺, 李成功. 织构化滑动轴承混合润滑与磨损耦合数值模型[J]. 润滑与密封, 2020, 45(10): 67-74.
JIN L J, YANG J X, LI C G. Numerical Coupled Model of Mixed Lubrication Wear for Textured Journal Bearing[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(10): 67-74.
- [3] 毛亚洲, 杨建玺, 徐文静, 等. 表面织构对动压滑动轴承摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2020, 33(6): 47-57.
MAO Y Z, YANG J X, XU W J, et al. Effects of Surface Texture on Tribological Properties of Hydrodynamic Journal Bearing[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(6): 47-57.
- [4] 董艇舰, 李建强, 杨帆, 等. 不对中径向滑动轴承微凹槽织构数值分析[J]. 润滑与密封, 2022, 47(7): 1-9.
DONG T J, LI J Q, YANG F, et al. Numerical Analysis of Groove Texture for Misaligned Journal Bearing[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(7): 1-9.
- [5] 国增磊, 李敏, 王淑峰, 等. 金属表面减摩方法研究综述[J]. 表面技术, 2023, 52(10): 20-31.
GUO Z L, LI M, WANG S F, et al. Research Review on Surface Antifricition Methods of Metals[J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 20-31.
- [6] HAMILTON D B, WALOWIT J A, ALLEN C M. A Theory of Lubrication by Microirregularities[J]. Journal of Basic Engineering, 1966, 88(1): 177-185.
- [7] HE T, LI J M, DENG H S, et al. Tribological Properties of the QAL9-4 and 17-4PH Textured Friction Pair with Water Lubrication[J]. AIP Advances, 2021, 11(1): 015222.
- [8] KHATRI C B, SHARMA S C. Influence of Textured Surface on the Performance of Non-Recessed Hybrid Journal Bearing Operating with Non-Newtonian Lubricant[J]. Tribology International, 2016, 95: 221-235.
- [9] TALA-IGHIL N, FILLON M, MASPEYROT P. Effect of Textured Area on the Performances of a Hydrodynamic Journal Bearing[J]. Tribology International, 2011, 44(3): 211-219.
- [10] TALA-IGHIL N, FILLON M. A Numerical Investigation of both Thermal and Texturing Surface Effects on the Journal Bearings Static Characteristics[J]. Tribology International, 2015, 90: 228-239.
- [11] RAMOS L I, RAMOS D J, DANIEL G B. Evaluation of Textured Journal Bearings under Dynamic Operating Conditions in Rotating Machinery[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2020, 234(6): 842-857.
- [12] 刘腾飞, 李瑞珍, 张绍林, 等. 织构化动压轴承热流体润滑特性理论与试验研究[J]. 中国表面工程, 2023, 36(1): 156-167.
LIU T F, LI R Z, ZHANG S L, et al. Theoretical and Experimental Study on Thermal Fluid Characteristics of Textured Hydrodynamic Bearing[J]. China Surface Engineering, 2023, 36(1): 156-167.
- [13] 赵远方, 杨建玺, 毛亚洲, 等. 织构排列形式对滑动轴承摩擦磨损特性的影响[J]. 轴承, 2020(9): 33-37.
ZHAO Y F, YANG J X, MAO Y Z, et al. Effect of Texture Arrangement on Friction and Wear Characteristics of Sliding Bearings[J]. Bearing, 2020(9): 33-37.
- [14] HAN J, FANG L, SUN J, et al. Hydrodynamic Lubrication of Surfaces with Asymmetric Microdimple[J]. Tribology Transactions, 2011, 54(4): 607-615.
- [15] 朱春霞, 王德全, 杨晓楠, 等. 非对称表面织构表征及动压润滑效应分析[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 66-75.
ZHU C X, WANG D Q, YANG X N, et al. Characterization of Asymmetric Surface Texture and Analysis of Hydrodynamic Lubrication Effect[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 66-75.

- [16] JIANG S, LIU Q, WANG J, et al. Numerical Optimization of Asymmetric Surface Texturing under Reciprocating Sliding Conditions[J]. Tribology International, 2023, 180: 108310.
- [17] ZHANG J, MENG Y. Direct Observation of Cavitation Phenomenon and Hydrodynamic Lubrication Analysis of Textured Surfaces[J]. Tribology Letters, 2012, 46(2): 147-158.
- [18] 王丽丽, 郭少辉, 尹国校, 等. 计入空化效应的表面微织构滑动轴承特性分析[J]. 润滑与密封, 2018, 43(5): 65-69.
- WANG L L, GUO S H, YIN G X, et al. Research on Micro-Textured Journal Bearing Characteristics Considering the Effect of Cavitation[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(5): 65-69.
- [19] 方勋, 严志军, 王剑豪, 等. 考虑空化效应的表面微凸体织构摩擦副润滑性能研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(12): 32-41.
- FANG X, YAN Z J, WANG J H, et al. Effect of Micro-Convex Texture on Lubrication Performance of Friction Pair Considering Cavitation Phenomenon[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(12): 32-41.
- [20] 房立庆, 贾晓波, 师素双, 等. 油膜含气状态下滑动轴承的静特性研究[J]. 机械设计, 2023, 40(10): 13-18.
- FANG L Q, JIA X B, SHI S S, et al. Study on Static Characteristics of Journal Bearing with Gas-Filled Oil Film[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(10): 13-18.
- [21] 胡杨, 朱礼进, 孟永钢. 两相流中气泡含量对大型可倾瓦径向轴承性能影响的试验研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(11): 220-227.
- HU Y, ZHU L J, MENG Y G. Experimental Study on Influence of Gas Volume Fraction in Two-Phase Flow on Lubrication Performance of Large Tilting Pad Journal Bearing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(11): 220-227.
- [22] DENG L, LONG Y, CHENG H, et al. Some Notes on Numerical Investigation of Three Cavitation Models through a Verification and Validation Procedure[J]. Journal of Hydrodynamics, 2023, 35(1): 185-190.
- [23] STRUTT J W. Scientific Papers: 423. On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse of a Spherical Cavity[J]. 2009: 504-507.
- [24] PLESSET M S, PROSPERETTI A. Bubble Dynamics and Cavitation[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1977, 9: 145-185.
- [25] TAUVIQIRRAHMAN M, PRATAMA A, JAMARI J, et al. Hydrodynamic Lubrication of Textured Journal Bearing Considering Slippage: Two-Dimensional CFD Analysis Using Multiphase Cavitation Model[J]. Tribology in Industry, 2019, 41(3): 401-415.
- [26] ANDRE'S L S, DIAZ S E. Flow Visualization and Forces from a Squeeze Film Damper Operating with Natural Air Entrainment[J]. Journal of Tribology, 2003, 125(2): 325-333.
- [27] 王保民, 南洋. 非对称结构表面织构对滑动轴承摩擦性能的影响[J]. 润滑与密封, 2022, 47(2): 1-7.
- WANG B M, NAN Y. Influence of Asymmetric Surface Texture on Friction Performance of Journal Bearings[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(2): 1-7.
- [28] 纪敬虎, 周莹超, 田朋霖, 等. 局部凹坑织构化径向滑动轴承流体动力润滑数值分析[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 214-220.
- JI J H, ZHOU Y C, TIAN P L, et al. Numerical Analysis of Hydrodynamic Lubrication of Partially Textured Surfaces with Dimples for Journal Bearing[J]. Surface Technology, 2021, 50(10): 214-220.