

# 表面微织构椭圆轴承的热效应分析

王丽丽, 何梦雪, 张伟, 葛雪, 段敬东

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:** **目的** 提高摩擦副润滑性能, 从而研究表面微织构不同参数对椭圆轴承热效应的影响, 同时采用试验方法进一步说明微织构的减摩作用机理。 **方法** 建立表面微织构椭圆轴承仿真模型、编写 UDF 程序定义黏度, 同时采用面-面接触形式的摩擦磨损试验, 从理论和试验两个方面研究不同微沟槽宽度和微沟槽轴向分布率的椭圆轴承的热效应变化规律。 **结果** 表面微织构能够有效改善摩擦副表面的摩擦学性能, 沟槽状微织构椭圆轴承较光滑椭圆轴承温度均有所降低, 主要承载区出现轴向呈条状的低温区域, 出现位置大致与沟槽分布位置一致。随着微沟槽轴向分布率的增大, 微沟槽降温效果增强, 轴承承载力先升高后降低, 摩擦力先降低后升高, 端泄量先减小后增大, 沟槽轴向分布率取 0.6 较为合适。随着微沟槽宽度的增大, 轴承承载力呈先升高后降低的变化趋势, 摩擦力呈先降低后升高的变化趋势, 当宽度在 0.6~0.8 mm 时, 椭圆轴承有较优的润滑性能。 **结论** 理论分析和试验研究均表明, 表面微织构椭圆轴承的摩擦力随着微沟槽宽度的增大先降低后升高, 合适的微织构参数才能最大程度地发挥其减摩作用, 从而实现提升轴承润滑性能, 降低轴承温升的目的。

**关键词:** 椭圆轴承; 微织构; 热效应; 微沟槽宽度; 微沟槽轴向分布率; 试验研究

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)08-0291-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.08.025

## Thermal Effect Analysis of Surface Micro-textured Elliptical Bearing

WANG Li-li, HE Meng-xue, ZHANG Wei, GE Xue, DUAN Jing-dong

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China)

**ABSTRACT:** This study aims to improve the lubrication performance of friction pair, and study the influence of different surface micro-texture parameters on the thermal effect of elliptical bearings. At the same time, experiments is used to further illustrate the anti-friction mechanism of the micro-texture. A simulation model of surface micro-textured elliptical bearings by Gambit was established, viscosity was defined by writing UDF program, and wear experiments by surface-to-surface contact friction were taken. The thermal effect of elliptical bearings under different micro-groove widths and axial distribution rate of micro-grooves was analyzed by theory and experiment. The results show that surface micro-texture can improve effectively the tribological properties of friction pair. The groove-shaped micro-texture has the lower temperature than smooth elliptical

收稿日期: 2021-08-14; 修订日期: 2022-01-24

Received: 2021-08-14; Revised: 2022-01-24

基金项目: 山东省博士后创新项目专项资金 (201701016); 青岛市博士后研究人员应用研究项目

Fund: Special Fund for Post Doctoral Innovation Projects of Shandong Province (201701016); Application Research Project for Post Doctoral Researcher of Qingdao City

作者简介: 王丽丽 (1979—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为摩擦学。

Biography: WANG Li-li (1979-), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: tribology.

引文格式: 王丽丽, 何梦雪, 张伟, 等. 表面微织构椭圆轴承的热效应分析[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 291-297.

WANG Li-li, HE Meng-xue, ZHANG Wei, et al. Thermal Effect Analysis of Surface Micro-textured Elliptical Bearing[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 291-297.

bearing, the main bearing area has a strip-shaped low temperature area in the axial direction, and the appearance position is consistent with the groove distribution position. With the increase of the axial distribution rate of micro-groove, the cooling effect of micro-groove is enhanced, bearing capacity first increases and then decreases, friction force first decreases and then increases, end discharge first decreases and then increases, and the axial distribution rate of micro-grooves is 0.6. As the micro-groove width increases, the bearing capacity first increases and then decreases, the friction force of the bearing first decreases and then increases, the elliptical bearing has better lubrication performance when the micro-groove width is between 0.6 and 0.8 mm. Both theoretical analysis and experimental research show that the friction force of surface micro-textured elliptical bearing first decreases and then increases with the increase of micro-groove width. Appropriate micro-texture parameters can maximize its anti-friction effect, the purpose of improving bearing lubrication performance and reducing bearing temperature rise can be achieved.

**KEY WORDS:** elliptical bearing; micro-texture; thermal effect; micro-groove width; axial distribution rate of micro-groove; experimental study

动压轴承工作时, 由于润滑油具有黏度, 油质点在运动过程中不断消耗由轴径供给的机械功, 摩擦功耗转变为热, 使得润滑油温度升高, 油膜中形成不规则的温度场和黏度场。在过高的油温下, 润滑油的黏度也会降低, 导致油膜被部分破坏, 进而降低轴承承载力; 同时, 油温过高易造成轴承表面烧伤, 甚至引发轴承失效, 大大影响其使用可靠性。

郭红等<sup>[1]</sup>建立了具有深浅腔结构的圆锥动静压轴承的 Reynolds 方程、能量方程、深腔流量平衡方程及相关控制方程, 采用有限元法和有限差分法联立求解, 得到了油膜的压力分布与温度分布。Roy<sup>[2]</sup>研究了带沟槽的圆柱轴承的热流润滑特性, 结果表明, 当槽角度为 12° 时, 轴承温度最低。Mehta 等<sup>[3]</sup>计算得出了四油叶压力坝轴承油膜温度分布。Van Ostayen 等<sup>[4]</sup>通过联立能量方程, 模拟得出了动压轴承温度场。王迎佳等<sup>[5]</sup>基于层流和紊流流态, 建立了混合流态下动压轴承分析模型, 并研究了其热润滑性能。张振山等<sup>[6]</sup>建立了径向轴承三维热流润滑模型, 研究了热边界条件对轴承润滑特性的影响。Tala-ighil 等<sup>[7]</sup>、Meng 等<sup>[8]</sup>和 Bhasker 等<sup>[9]</sup>研究了光滑轴承和微织构轴承的热效应, 通过合适的表面微织构几何形状和轴承表面上的正确织构分布形式来改善摩擦扭矩和噪声。Suh 等<sup>[10]</sup>、Plantegenet 等<sup>[11]</sup>和 Jin 等<sup>[12]</sup>研究了热边界条件、热不平衡效应以及湍流效应对可倾瓦滑动轴承性能的影响。Wu 等<sup>[13]</sup>以深浅腔圆锥轴承为研究对象, 研究了热效应对轴承性能的影响, 结果表明, 考虑热效应后, 轴承系统稳定性大大降低, 最小油膜厚度减小。张同钢等<sup>[14]</sup>研究了不同温度边界条件下 3 种轴瓦材料的水润滑动静压滑动轴承润滑膜的温度变化。Zhu 等<sup>[15]</sup>和 Li 等<sup>[16]</sup>研究了考虑轴颈倾斜时热流体的润滑性能。

针对椭圆轴承的温升问题, 学者们展开了有关研究。Mishra<sup>[17-18]</sup>采用抛物线温度分布近似法, 通过求解能量方程, 对椭圆轴承热效应进行了研究, 同时研究了轴径倾斜对椭圆轴承热效应的影响。方静辉等<sup>[19]</sup>

以卧式水电机组用椭圆轴承为研究对象, 获得了轴承的热流润滑特性, 研究表明, 其具有较大的动压承载区域、较小的油膜压力梯度以及较低的油膜温升, 可以大幅度提高轴承的承载能力。Van Ostayen 等<sup>[4]</sup>运用质量守恒空化算法来计算润滑膜中的压力和质量分数分布, 并且准确地描述了空穴区域中的热流动。Sahu 等<sup>[20]</sup>和 Kushare 等<sup>[21]</sup>运用有限元方法进行了考虑热效应的磁流变液润滑和节流孔补偿的椭圆轴承性能研究。Singla 等<sup>[22]</sup>和 Chauhan 等<sup>[23-24]</sup>进行了椭圆轴承油膜压力和温度的试验研究, 并从理论和试验上研究了 3 种不同等级润滑油的椭圆轴承的热动力学性能。

椭圆轴承的双油楔结构除了能保持轴承稳定性外, 还使得轴承拥有更大的侧隙、更多的润滑油流量, 从而具有良好的散热性; 微织构表面相比于光滑表面能表现出更好的摩擦学特性, 选择恰当的微织构参数能实现优化摩擦副润滑性能的目的。目前对于微织构椭圆轴承热效应的分析较少, 本文采用 CFD 方法, 编写 UDF 程序定义黏度, 关联温度与黏度, 对表面微织构椭圆轴承进行仿真分析, 研究表面微织构不同参数对椭圆轴承热效应的影响; 同时采用摩擦磨损试验进一步说明微织构的减摩作用机理。

## 1 CFD 仿真模型建立

### 1.1 能量守恒方程

控制体内的净热流量、控制体表面力和体积力对控制体做功的多少与其内部热能增加率相等, 得到能量守恒方程如下。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right) + S_h \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$ ;  $k_{\text{eff}}$  为有

效热传导数,  $k_{\text{eff}}=k+k_i$ ,  $k_i$  为热传导数;  $J_j$  为组分  $j$  的扩散流量;  $S_h$  为自定义的其他热源项; 等号右边 3 项分别代表热传导、组分扩散和粘性耗散过程中的能量变化。

## 1.2 粘温方程

润滑油温度升高, 带动润滑油分子更快地运动, 分子内部的聚合力减小, 从而降低了润滑油的黏度。基于雷诺黏温方程<sup>[1]</sup>编制 UDF 程序。

$$\eta = \eta_0 e^{-\beta(T-T_0)} \quad (2)$$

式中:  $T$  为温度;  $T_0$  为参考温度, K;  $\eta_0$  为温度  $T_0$  时的润滑油黏度;  $\beta$  为黏温指数。

将编写的黏温方程通过 Fluent 中的自定义函数接口导入, 进行求解。程序的主体部分如下:

```
DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity,c,t)
{
    real mu_lam;
    real T_emp=C_T(c,t);//提取流场温度
    if(T_emp<298)
        mu_lam=0.02;
    else
        mu_lam=0.02*(pow(2.71828,0.034*(-(T_emp-310)))));//计算黏度
    return mu_lam;
}
```

其中: DEFINE\_PROPERTY 是用来修改物质物理性质的宏;  $c$  为扫描网格;  $t$  为扫描网格线; 返回为实型值。

## 1.3 微织构椭圆轴承模型建立及边界条件设定

表面微织构椭圆轴承模型放大图如图 1 所示。椭圆轴承宽度  $L=324$  mm, 直径  $D=450$  mm, 偏心率  $\varepsilon=0.6$ , 椭圆度  $m=0.5$ 。微织构位于椭圆轴承下瓦升压区, 覆盖区域为  $45^\circ$ , 微织构数量为  $13 \times 8$ , 每列微织构之间的间距为  $5.6^\circ$ 。轴承材料为 45#钢。润滑油黏度为  $0.02$  Pa·s, 密度为  $890$  kg/m<sup>3</sup>, 比热为  $2\,000$  J/(kg·K)。轴承转速为  $6\,000$  r/min。

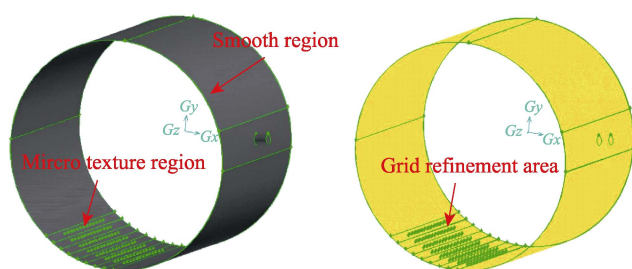


图 1 微织构椭圆轴承油膜三维图

Fig.1 3D diagram of oil film of micro-textured elliptical bearing

设置轴承进油孔处为压力入口, 油膜两端为压力出口, 油膜内壁面定义为转动面, 油膜外壁面为静止

面, 微织构位于轴瓦表面。网格划分采用先分块后局部加密的形式, 本文将计算模型分为光滑区域和微织构区域两部分, 将光滑区域分为 5 部分, 采取较大网格尺寸划分; 微织构区域按其周向列数划分, 因微织构计算区域精度较光滑区域高, 需进行加密处理, 采用较小网格尺寸进行划分。

## 2 计算结果与讨论

### 2.1 微沟槽轴向分布率对椭圆轴承热效应的影响

微沟槽沿轴承轴向对称分布, 沟槽轴向分布率  $l/L$  为沟槽长度与轴承宽度的比值。选取矩形截面微沟槽, 设置沟槽宽度为  $0.8$  mm、深度为  $0.1$  mm, 通过改变沟槽长度, 得到轴向分布率分别为  $0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8$  和  $1$  时微沟槽椭圆轴承油膜温度分布云图, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 由于微沟槽的存在, 椭圆轴承主要承载区出现轴向呈条状的低温区域, 出现位置大致与沟槽分布位置一致, 这是由于每一个微沟槽都相当于一个小的楔形空间, 在流体动压润滑过程中都会产生微动压效应, 微动压效应增强, 进而提升了轴承整体的动压效应, 因此, 4 种不同轴向分布率的微沟槽椭圆轴承温度较光滑椭圆轴承均有所降低。随着沟槽轴向分布率的增大, 椭圆轴承主要承载区的低温区域也逐渐增大, 低温区域沿轴向向轴承两端扩展。

图 3 为椭圆轴承在不同微沟槽轴向分布率下的润滑特性变化。从图 3a 中可以看出, 轴承最高温度随着微沟槽轴向分布率的增大呈先降低后升高的趋势, 其中, 当轴向分布率为  $1$  时, 轴承温度有较大幅度的下降。从图 3b 中可以看出, 轴承承载力随着微沟槽轴向分布率的增大呈先升高后降低的变化趋势, 当轴向分布率为  $1$  时, 微织构轴承承载力低于光滑轴承。从图 3c 中可以看出, 轴承摩擦力呈先降低后升高的变化趋势, 与承载力相反。从图 3d 中可以看出, 随着微沟槽轴向分布率的增大, 轴承端泄量呈先降低后升高的趋势, 当沟槽轴向分布率在  $0.4 \sim 0.8$  之间时, 微织构轴承端泄量小于光滑轴承; 当沟槽轴向分布率为  $1$  时, 轴承端泄量急剧增加。这主要是由于随着微沟槽轴向分布率的增大, 微沟槽长度增加, 增强了微织构的储油能力, 轴承端泄量减小, 同时微织构动压效应得以增强, 因而轴承承载力得以提升, 摩擦力减小, 温度有一定程度的下降; 随着微沟槽长度进一步增加, 当轴向分布率为  $1$  时, 微沟槽长度与轴承宽度相等, 有大量润滑油沿沟槽流出轴承端部, 高温油也随之流出, 因而轴承温度降低, 同时, 沟槽长度的增加减小了轴承的有效接触面积, 降低了轴承承载力, 增加了摩擦。综合分析可知, 当沟槽轴向分布率  $l/L=0.6$  时, 轴承润滑性能最佳。

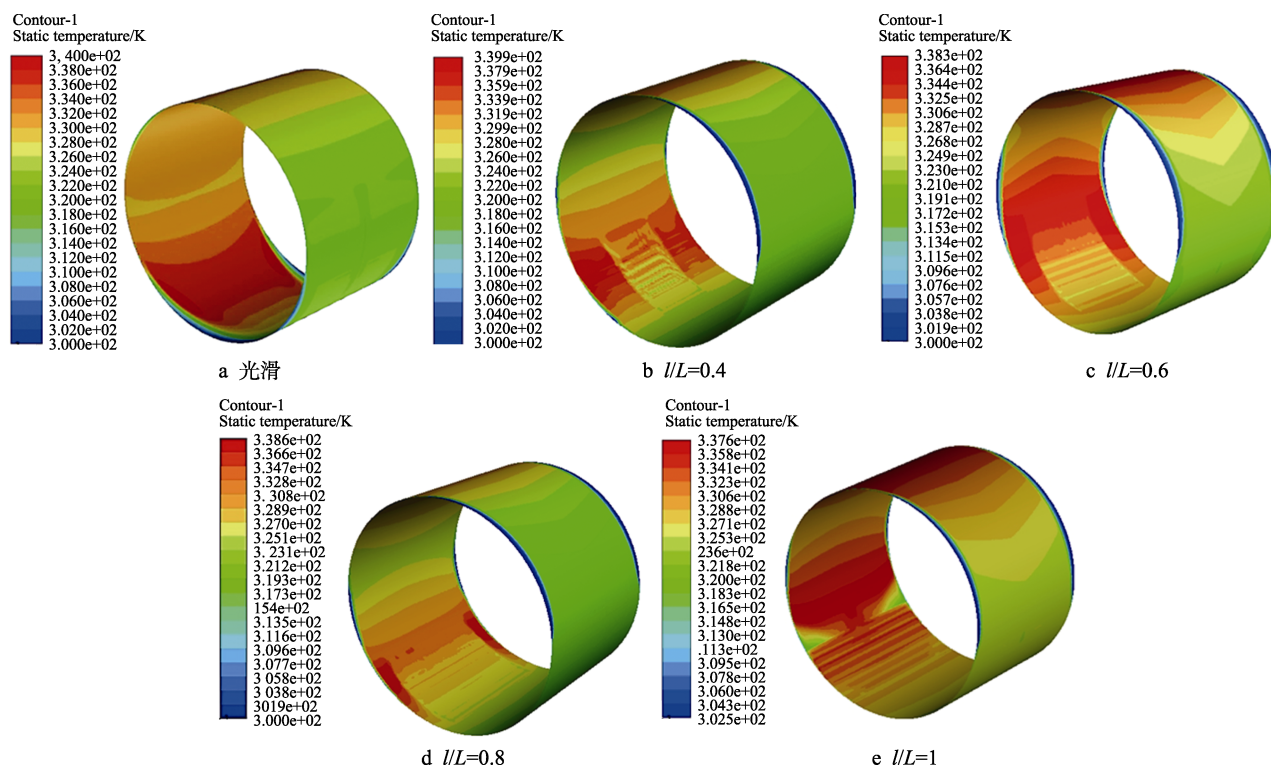


图2 微沟槽轴向分布率对椭圆轴承温度分布的影响

Fig.2 Temperature field of elliptical bearing with different axial distribution rate of micro-grooves:

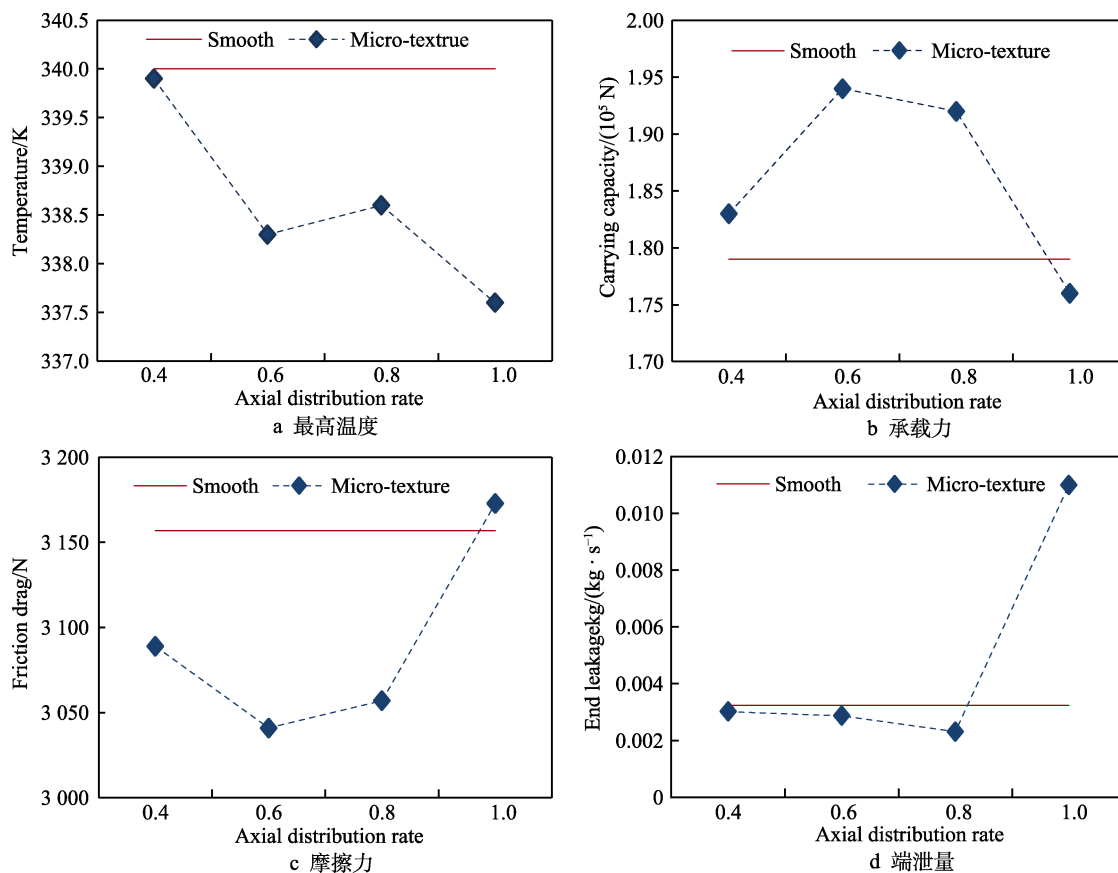
a) smooth; b)  $l/L=0.4$ ; c)  $l/L=0.6$ ; d)  $l/L=0.8$ ; e)  $l/L=1$ 

图3 不同微沟槽轴向分布率下轴承润滑特性参数变化规律

Fig.3 Variation law of lubrication characteristic parameters with different micro-groove axial distribution rate: a) maximum temperature; b) carrying capacity; c) friction drag; d) end leakage



## 2.2 微沟槽宽度对椭圆轴承热效应的影响

取微沟槽轴向分布率  $l/L=0.6$ , 深度为  $0.1\text{ mm}$ , 研究微沟槽宽度  $b=0.4\sim 1.5\text{ mm}$  时对椭圆轴承温度场分布的影响, 温度分布云图如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 微沟槽区域温度相比其轴向两端有所降低, 随着沟槽宽度的增大, 轴承温度云图阶梯状界线也更明显。当微沟槽宽度为  $0.4\text{ mm}$  时, 降温作用不大; 当宽度为  $0.6$  和  $0.8\text{ mm}$  时, 沟槽降温效果最为明显。

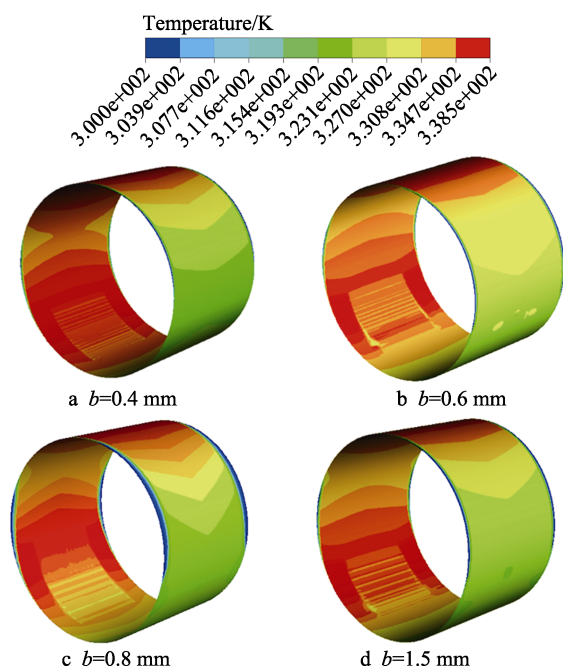


图 4 微沟槽宽度对椭圆轴承温度分布的影响  
Fig.4 Influence of micro-groove width on temperature distribution of elliptic bearing: a)  $b=0.4\text{ mm}$ ; b)  $b=0.6\text{ mm}$ ; c)  $b=0.8\text{ mm}$ ; d)  $b=1.5\text{ mm}$

图 5 显示了微沟槽宽度不同时油膜承载力和摩擦力的变化规律。从图 5 中可知, 随着微沟槽宽度的增大 (微织构密度增大), 轴承承载力呈先升高后降低的变化趋势, 摩擦力呈先降低后升高的变化趋势,

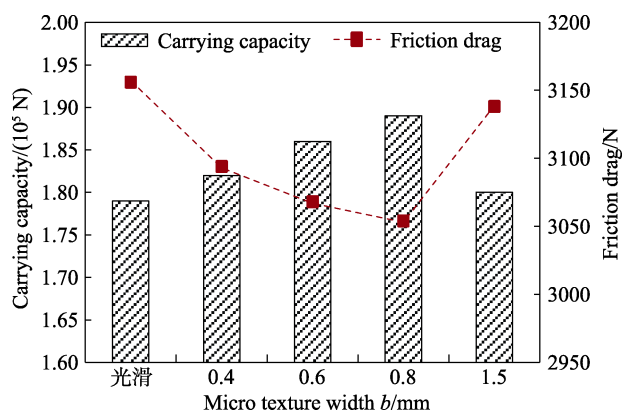


图 5 微沟槽宽度不同时油膜承载力和摩擦力变化规律  
Fig.5 Variation law of bearing capacity and friction force of oil film with different micro-groove width

当宽度在  $0.6\sim 0.8\text{ mm}$  时, 轴承有较优的润滑性能。分析原因: 当微织构宽度较小时, 不易产生动压效应; 随着沟槽宽度的增大, 微织构储油量增加, 动压效应增强, 能够提升轴承的承载能力和润滑性能; 当微沟槽宽度进一步增加到  $1.5\text{ mm}$  时, 由于此时沟槽宽度较大, 减小了轴承的有效承载面积, 虽然微织构能产生动压效应, 但轴承整体承载能力下降。

综上所述, 微沟槽轴向分布率和微沟槽宽度对轴承润滑性能有很大影响, 各参数都有一个最优区间, 只有选择合适的微织构参数、合理匹配各参数才能最大程度地发挥微织构的减摩作用, 从而实现提升轴承润滑性能, 降低轴承温升的目的。

## 3 试验结果及分析

为了更好地接近椭圆轴承接触形式, 使试验结果更具有说服力, 采用面-面接触形式的摩擦副来进行摩擦磨损试验, 如图 6 所示。上试件为圆柱形摩擦头, 安装于上试件夹头座中; 下试件为光洁圆形平面, 通过螺钉固定于下试件座中。上下两试件的材料均采用 45#钢, 表面粗糙度为  $0.8\text{ }\mu\text{m}$ , 材料硬度在 HRC55~58 之间, 极限值可达 HRC62。下试件静止不动, 厚度为  $3\text{ mm}$ , 直径为  $67\text{ mm}$ ; 上试件的运动方式是往复运动, 厚度为  $10\text{ mm}$ , 直径为  $6\text{ mm}$ 。试验过程中采用的试验载荷为  $80\text{ N}$ , 磨损频率为  $4\text{ Hz}$ , 从而研究不同微织构参数对试件摩擦磨损性能的影响。

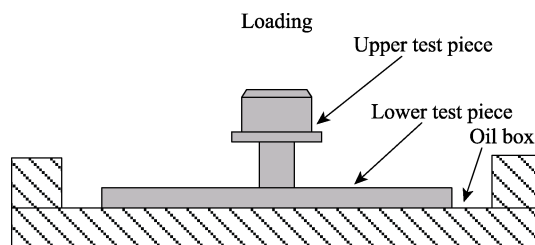


图 6 试验装置中摩擦副接触示意图  
Fig.6 Contact diagram of friction pair in experimental device

采用减摩率  $\sigma$  表明微织构的减摩效果, 通过实时测得的摩擦系数计算出摩擦系数平均值, 从而计算减摩率。

$$\sigma = \frac{\mu_0 - \mu_w}{\mu_0} \quad (3)$$

式中:  $\mu_0$  为光滑无微织构表面摩擦系数平均值;  $\mu_w$  为微织构表面摩擦系数平均值;  $\sigma$  为减摩率,  $\sigma > 0$  表示具有减摩效应。

在圆形下试件平面内, 选取长×宽为  $30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  的矩形区域作为摩擦磨损工作区, 并采用激光加工的方法在此矩形工作区内加工若干微织构, 试验使用的光纤激光打标机激光波长为  $1\ 064\text{ nm}$ , 功率在  $30\text{ W}$  以内。每个矩形工作区内所有微织构面积之和

与矩形工作区面积的比值为微织构分布密度,通过改变微织构的个数和间距来改变微织构分布密度,分别选取微织构分布密度为5%、10%、15%、20%,以研究摩擦副润滑性能。

从图7中可以看出,微织构密度为15%的摩擦副表面摩擦系数最小,随着试验的进行,其摩擦系数下降较缓,最终趋于稳定;微织构密度为10%的摩擦副表面摩擦系数与光滑摩擦副相差不大;微织构密度为5%和20%的摩擦副摩擦系数波动较明显,摩擦系数数值均大于光滑摩擦副。

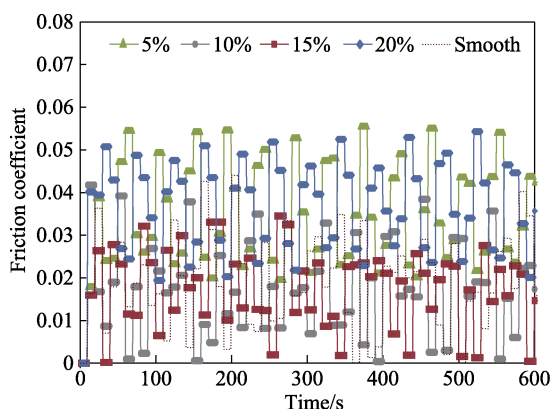


图7 不同微织构密度下摩擦系数变化曲线  
Fig.7 Change curve of friction coefficient with different micro texture density

从图8中可以看出,随着微织构密度的增大,摩擦副摩擦系数呈先减小后增大的趋势。当微织构密度为10%和15%时,减摩率 $\sigma > 0$ ,具备减摩效应,且密度为15%时减摩效果最好;当微织构密度为5%和20%时,减摩率 $\sigma < 0$ ,不具备减摩效应。这是因为当微织构密度较小,为5%时,微织构能储存的润滑油量较少,由微织构产生的动压效应很微弱,无法提高摩擦副润滑性能,此时微织构的存在只起到增加摩擦副表面粗糙度的作用。当微织构密度较大,为20%时,摩擦副表面非凹坑面积减小,摩擦副接触时的承

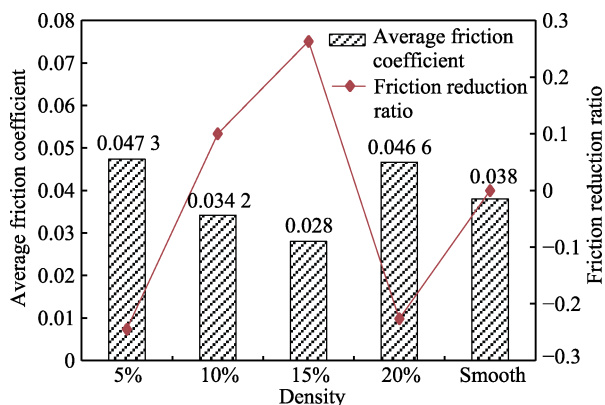


图8 不同微织构密度下摩擦系数平均值和减摩率  
Fig.8 Average friction coefficient and friction reduction ratio with different micro-texture density

载面积减小,从而使接触面所受应力增大,接触面磨损增加,摩擦系数增大;同时,微织构密度较大,各个微织构间距过小,由激光加工产生的微织构边缘熔体也会导致应力集中,增大摩擦系数。当微织构密度为10%和15%时,微织构内可以储存一定的润滑油,同时又保证了摩擦副表面的接触面积,因而有较优的润滑效果。这与前文中表面微织构椭圆轴承的摩擦力随着微沟槽宽度的增大(微织构密度增大)先降低后升高的趋势和原因相一致。

## 4 结论

本文通过 Gambit 建立表面微织构椭圆轴承仿真模型,编写 UDF 程序定义黏度,利用 Fluent 计算得到不同微织构参数对椭圆轴承热效应的影响,采用摩擦磨损试验进一步说明微织构的减摩作用机理,具体结论如下。

1) 理论分析和试验研究均表明,合适的微织构参数才能最大程度地发挥微织构的减摩作用,从而实现提升轴承润滑性能,降低轴承温升的目的。

2) 当微沟槽轴向分布率较小时,表面微织构椭圆轴承温度较光滑轴承降低不明显,随着微沟槽轴向分布率的增大,微沟槽降温效果增强,轴承承载力先升高后降低,摩擦力先降低后升高,端泄量先减少后增大,沟槽轴向分布率取0.6较为合适。

3) 随着微沟槽宽度的增加,轴承承载力呈先升高后降低的变化趋势,摩擦力呈先降低后升高的变化趋势,当宽度在0.6~0.8 mm之间时,椭圆轴承具有较优的润滑性能。

## 参考文献:

- [1] 郭红,武宁宁,杨帅,等.热效应对高速圆锥动静压轴承静特性的影响[J].润滑与密封,2020,45(6):15-21.  
GUO Hong, WU Ning-ning, YANG Shuai, et al. Influence of Thermal Effect on Static Characteristics of High-Speed Conical Hybrid Bearing[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(6): 15-21.
- [2] ROY L. Thermo-Hydrodynamic Performance of Grooved Oil Journal Bearing[J]. Tribology International, 2009, 42(8): 1187-1198.
- [3] MEHTA N P, RATTAN S S, BHUSHAR G. Static and Dynamic Characteristics of Four-Lobe Pressure-dam Bearings[J]. Tribology Letters, 2003, 15(4): 415-420.
- [4] VAN OSTAYEN R A J, VAN BEEK A. Thermal Modelling of the Lemon-Bore Hydrodynamic Bearing[J]. Tribology International, 2009, 42(1): 23-32.
- [5] 王迎佳,魏涛,岑少起,等.混合流态下高速动压滑动轴承热润滑性能[J].河南科技大学学报(自然科学版),2014,35(3):8-12,17,4.

- WANG Ying-jia, WEI Tao, CEN Shao-qi, et al. Thermal Hydrodynamic Lubrication Properties of High-Speed Journal Bearing Under Coexistence Fluid State[J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2014, 35(3): 8-12, 17, 4.
- [6] 张振山, 杨玉敏, 戴旭东, 等. 热边界条件对径向轴承的热流体动力润滑分析的影响[J]. 中国机械工程, 2014, 25(11): 1427-1432.
- ZHANG Zhen-shan, YANG Yu-min, DAI Xu-dong, et al. Effects of Thermal Boundary Conditions on Thermohydrodynamic Lubrication Analysis of Plain Journal Bearing[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(11): 1427-1432.
- [7] 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.
- [8] MENG Fan-ming, SHU Rui-hong, CHEN Lin. Influences of Operation Parameters on Noise of Journal Bearing with Compound Texture Considering Lubricant Thermal Effect[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2020, 234(7): 991-1006.
- [9] BHASKER B, SEETHARAMAIAH N, RAMESH BABU P. Influence of Thermal Pressure and Temperature Profile Approximations in Thermohydrodynamic Analysis of Surface-Textured Noncircular Journal Bearing[J]. Heat Transfer, 2021, 50(2): 1095-1112.
- [10] SUH J, KIM C, HAN J H. Effect of Thermal Boundary Condition on Tilting Pad Journal Bearing Behavior[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7540.
- [11] PLANTEGENET T, ARGHIR M, JOLLY P. Experimental Analysis of the Thermal Unbalance Effect of a Flexible Rotor Supported by a Flexure Pivot Tilting Pad Bearing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145: 106953.
- [12] JIN Ying-ze, SHI Zhao-yang, ZHANG Xiao-jing, et al. Rapid Solution for Analysis of Nonlinear Fluid Film Force and Dynamic Behavior of a Tilting-Pad Journal Bearing-Rotor System with Turbulent and Thermal Effects[J]. Friction, 2020, 8(2): 343-359.
- [13] WU Ning-ning, GUO Hong, YANG Shuai, et al. Thermal Effect on Stability and Minimum Oil Film Thickness of a Deep/Shallow Pockets Conical Bearing[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2020, 72(10): 1251-1257.
- [14] 张同钢, 王优强, 徐彩虹, 等. 环境温度变化对水润滑动静压轴承的热弹流影响[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 69-76.
- ZHANG Tong-gang, WANG You-qiang, XU Cai-hong, et al. Effects of Ambient Temperature Variation on Thermal Elastohydrodynamic Lubrication of Water-Lubricated Hybrid Journal Bearings[J]. Surface Technology, 2017, 46(6): 69-76.
- [15] ZHU Shao-yu, SUN Jun, LI Biao, et al. Thermal Turbulent Lubrication Analysis of Rough Surface Journal Bearing with Journal Misalignment[J]. Tribology International, 2020, 144: 106109.
- [16] LI Biao, SUN Jun, ZHU Shao-yu. Thermohydrodynamic Lubrication Analysis of Misaligned Journal Bearing Considering the Axial Movement of Journal[J]. Tribology International, 2019, 135: 397-407.
- [17] MISHRA P C. Thermal Analysis of Elliptic Bore Journal Bearing Considering the Effect of Shaft-Misalignment[J]. Tribology Online, 2011, 6(5): 239-246.
- [18] MISHRA P C. Mathematical Modeling of Stability in Rough Elliptic Bore Misaligned Journal Bearing Considering Thermal and Non-Newtonian Effects[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(8): 5896-5912.
- [19] 方静辉, 李冬翠, 汪久根. 卧式水电机组局部多油楔径向滑动轴承研究[J]. 润滑与密封, 2012, 37(6): 74-77, 90.
- FANG Jing-hui, LI Dong-cui, WANG Jiu-gen. Research of Locally Multi-Oil Wedge Journal Bearing for Bulb Type Hydraulic Power Units[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(6): 74-77, 90.
- [20] SAHU K, SHARMA S C. Magneto-Rheological Fluid Slot-entry Journal Bearing Considering Thermal Effects[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(18-19): 2831-2852.
- [21] KUSHARE P B, SHARMA S C. A Study of 2-Lobe Symmetric Hole Entry Hybrid Journal Bearing Operating with Non-Newtonian Lubricant Considering Thermal Effects [J]. Tribology International, 2015, 92: 567-576.
- [22] SINGLA A, CHAUHAN A. Evaluation of Oil Film Pressure and Temperature of an Elliptical Journal Bearing-An Experimental Study[J]. Tribology in Industry, 2016, 38(1): 74-82.
- [23] CHAUHAN A, SEHGAL R, SHARMA R K. Thermohydrodynamic Analysis of Elliptical Journal Bearing with Different Grade Oils[J]. Tribology International, 2010, 43(11): 1970-1977.
- [24] CHAUHAN A, SEHGAL R, SHARMA R K. Investigations on the Thermal Effects in Non-Circular Journal Bearings[J]. Tribology International, 2011, 44(12): 1765-1773.