

凹坑型微织构对机械密封摩擦性能的影响

刘 铭

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2024年8月2日; 录用日期: 2024年8月27日; 发布日期: 2024年9月2日

摘 要

针对加工有微织构的机械密封端面, 依据考虑空化效应的流体动压润滑理论, 构建了具有圆柱形、圆台形、正方形和棱台形4种不同形状微织构的密封间隙液膜流体动力学仿真模型, 应用流体动力学求解工具 **Fluent** 研究了转速、微织构深度对机械密封的承载力和摩擦系数的影响规律, 结果表明: 在相同工况条件下, 增大转速可以提高液膜的承载压力以及减小摩擦系数, 从而提升动压效应, 圆台形微织构具有更大的优势; 合理改变微织构深度能够有效提升机械密封承载性能以及降低摩擦系数, 当微织构深度递增时, 液膜压力呈现出先升后降的趋势, 当微织构深度为30 μm 时液膜压力达到峰值, 但圆台形微织构相较于棱台形微织构受深度影响更大。至于摩擦系数则是随着微织构深度的递增呈现出先减小后增大的趋势, 当微织构深度为30 μm 时摩擦系数获得最小值。由仿真结果可知, 最佳微织构深度为30 μm , 此时的密封间隙液膜承载力最强, 摩擦系数最小, 且这一最佳深度与微织构的形状无关。

关键词

机械密封, **Fluent**, 微织构, 流体动压效应, 摩擦系数

The Impact of Concave Micro-Texture on the Frictional Performance of Mechanical Seals

Ming Liu

School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: Aug. 2nd, 2024; accepted: Aug. 27th, 2024; published: Sep. 2nd, 2024

Abstract

For the mechanically sealed surfaces that have been refined with micro-texturing, a hydrodynamic simulation model of the liquid film within the seal clearance, featuring four distinct micro-texturing shapes—cylindrical, circular platform, square, and prismatic platform—has been developed. This model is grounded in the principles of fluid dynamic pressure lubrication theory, which takes into

文章引用: 刘铭. 凹坑型微织构对机械密封摩擦性能的影响[J]. 建模与仿真, 2024, 13(5): 5053-5061.

DOI: 10.12677/mos.2024.135457

account the phenomenon of cavitation. By employing Fluent, a computational fluid dynamics solver, the study investigates how variations in rotational velocity and the depth of the micro-texture affect the mechanical seal's load-carrying capacity and friction coefficient. The findings indicate that, under identical operating conditions, an increase in rotational speed can enhance the load-carrying pressure of the liquid film and decrease the friction coefficient. This, in turn, amplifies the dynamic pressure effect. The simulation outcomes reveal that the circular platform-shaped micro-texture offers a significant advantage. A judicious adjustment in the depth of the micro-texture structure can effectively boost the mechanical seal's bearing capacity and reduce the friction coefficient. The liquid film pressure exhibits a pattern of initial increase followed by a decrease as the depth of the micro-texture structure increases. The pressure reaches its zenith when the micro-texture depth is 30 μm . It is noteworthy that while the liquid film pressure peaks at a micro-texture depth of 30 μm , the circular platform microstructure is more influenced in this regard than the prismatic microstructure. Regarding the friction coefficient, it initially decreases and then increases with the increasing depth of the microstructure. The friction coefficient achieves its minimum at a microstructure depth of 30 μm . The simulation data suggest that an optimal microstructure depth of 30 μm is ideal, as it affords the sealing gap's liquid film the greatest load-carrying capacity and the lowest friction coefficient. This optimal depth is independent of the microstructure's shape, signifying that the circular platform, square, and prismatic platform micro-textures all perform equally well when optimized at a depth of 30 μm .

Keywords

Mechanical Seal, Fluent, Micro-Texture, Fluid Dynamic Pressure Effect, Friction Coefficient

Copyright © 2024 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

机械密封是一种适用于化解旋转轴与机体之间密封难题的装备,广泛运用于泵、压缩机、反应搅拌釜等旋转式流体机械,以及齿轮箱、船舶尾轴等封闭设备。其独特之处在于,通过弹性元件对静、动环端面密封副的预紧和介质压力与弹性元件压力的压紧,从而达到轴向端面密封的效果,因此,又被称为端面密封。密封端面织构化是一种改善机械密封摩擦学性能和密封效率的重要方法。微织构是一种表面处理技术,通过在材料表面制造微小的结构(如凹坑、凸起、沟槽等)来改变其摩擦、磨损和润滑特性。这种技术在机械密封、轴承、液压系统和其他需要精确控制表面摩擦和磨损的应用中尤为重要。织构化表面不仅能够促进流体在密封接触区域形成稳定的润滑膜,增加液膜的刚度,从而提高密封的承载能力。还能够引导流体在密封端面之间形成流体动压效应,有助于密封端面减少直接接触,从而降低摩擦系数。

国内外研究表明,在密封端面加工不同形状微织构对机械密封的摩擦特性具有一定的提升作用[1][2]。牛一旭等[3]借助 UMT-2 型多功能磨擦磨损试验机以球-盘形式对织构化摩擦副和非织构化摩擦副两种试样进行乏油滑动测试,试验结果表明相较于非织构化摩擦副,速度和负载对凹坑型织构化摩擦副的摩擦学性能具有显著的提升,但是当负载过大时摩擦系数有所增加且伴随严重的表面磨损现象。吴元博等[4]针对加载力及速度这两个关键变量探讨 V 字型织构在油液润滑环境中的摩擦特性,结果表明加强油膜稳定性实质上是 V 字型织构在加载力增加时降低摩擦系数的重要机制。陈进等[5]研究了凹坑型微织构的尺寸、面积比以及分布形式对摩擦副摩擦学性能的影响,结果显示设计合理的凹坑型微织构不论在润滑与否的情况下均能产生明显的减摩效果。程香平等[6]利用有限元分析的方法通过精细地调整菱形孔

各种不同的排列形式与结构参数,能够有效提升密封特性,并显著降低泄漏率,进而改善端面间隙的润滑状态。苏峰华等[7]使用计算流体动力学(CFD)计算方法深入挖掘沟槽微织构深度对不锈钢油脂润滑情况下摩擦特征的影响机制,结果显示微织构深度能够显著影响液膜表面摩擦系数,但较深微织构液膜表面并不能获得更好的减摩效果。魏伟等[8]借助有限元数值分析技术,全面探索了三角形-椭圆复合微织构结构参数如织构深度、织构面积率等对机械密封密封性能的影响,指出,复合型微织构在提高承载力、减小泄漏量等方面均比另外两种单一型微织构的作用显著。Wang 等[9]指出微织构存在一个最佳的几何参数(深径比、面积率)和分布范围,在此范围内,承载能力可比无织构表面提高至少一倍。Tang 等[10]建立了多凹痕承载能力的数值模型,研究微织构面积率对液膜承载能力以及摩擦磨损性能的影响,结果显示改变微织构面积率能显著提高液膜的承载能力并降低摩擦磨损,5%的最佳面积率能产生最大的流体动压力,并能降低 38%的摩擦和 72%的磨损。Xie 等[11]研究了圆形微织构和三角形微织构在水润滑条件下的摩擦学性能,研究结果表明,运动表面的滑动方向会影响三角形纹理的摩擦学性能,相反的滑动方向会导致三角形纹理摩擦系数的差异,与圆形纹理相比,三角形纹理具有明显的摩擦学各向异性。Uddin 等[12]设计了一种新型“星状”微织构,这种微织构具有比圆形、人字形等传统形状微织构更低的摩擦系数。

一般而言,表面微织构可以简单地分为凸起型和凹坑型两种形式。相对于凸起型的微织构,凹坑型的微织构设计能够创建一个局部的保持空间,这有助于更好地保存润滑剂以及捕捉磨屑和磨损产生的颗粒,但是这些凹坑区域也可能成为磨屑和磨损颗粒的沉积点,从而在一定程度上降低微织构的功效。相比之下,凸起微织构的表面虽然更有利于润滑剂的流动和清除这些磨屑及磨损产物,但由于凹坑型微织构制造简单的特点和在保存润滑剂及存储磨损颗粒方面所表现出的显著效果,仍然是研究和实际应用中的重点课题。本文将重点讨论以凹坑型微织构为主的织构化密封端面。

2. 模型的建立

2.1. 几何模型

织构化端面机械密封由两个回转轴对称的密封环组成,其中动环表面为光滑密封面,而静环则设置了均匀分布的微织构,其基本结构如图 1 所示。当动环相对静环保持相互平行做绕轴旋转运动时,动环端面与静环端面上的微织构之间会形成一个个的楔形空间,这些空间内的流体会受到动压效应,产生压力,特别是在微织构的上部和周围区域,在每个微织构上形成类似微型动力润滑轴承的效果,从而实现了流体动压润滑。

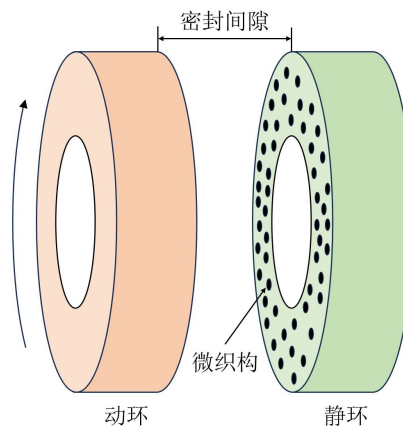


Figure 1. Textured surface mechanical seal model
图 1. 织构化端面机械密封模型

微织构端面通过以下三种方式优化机械密封的摩擦学特性：(1) 在水润滑状态下，微织构内部可能发生局部空化，这一现象有助于形成额外的润滑膜并增强承载能力。如图 2 所示，润滑区域由微织构表面和相对运动的表面共同构成，当液膜厚度在微织构的左侧突然增加并可能发生空化时，单个微织构上的液膜压力分布会出现不对称，从而带来额外的承载力。若无空化发生，压力分布则保持对称。(2) 在混合润滑或边界润滑状态下，微织构可以作为辅助润滑源，有助于润滑剂的渗透。(3) 微织构还有助于收集磨损产生的微小颗粒，从而降低因磨粒而引发的磨损。

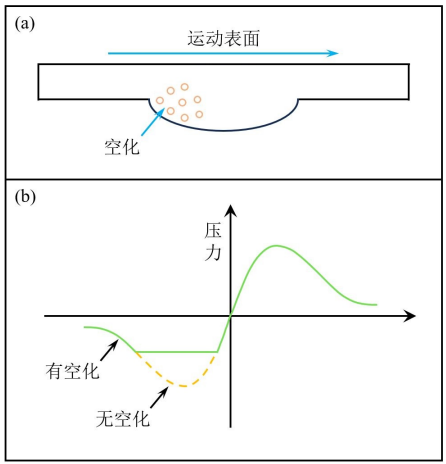


Figure 2. (a) Cavitation representation of surface microstructures; (b) Pressure distribution of the lubricating film on the microtextured surface
图 2. (a) 表面微织构空化表示；(b) 微织构表面润滑液膜压力分布

2.2. 计算模型

针对 4 种不同形状的微织构机械密封摩擦副的润滑液膜区域如图 3 所示。

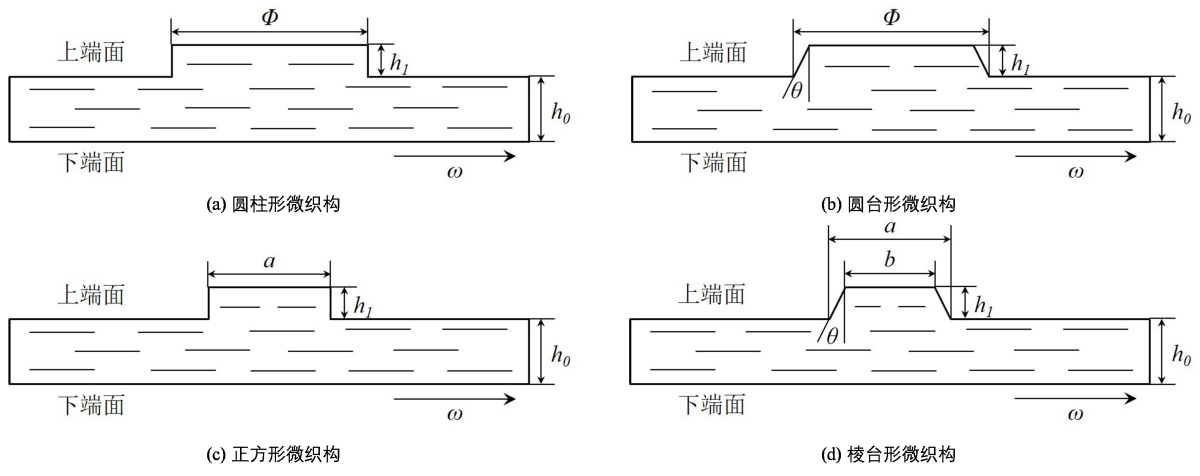


Figure 3. Computational model of friction pairs with microstructures of different shapes
图 3. 具有不同形状微织构摩擦副的计算模型

图 3 中，上下两端面互相平行，上端面固定，角速度为 0；下端面相对上端面做绕轴旋转运动。图

中, h_0 为密封间隙液膜厚度(μm); ω 为下端面相对上端面做绕轴回转运动的角速度(rad/s); h_1 为微结构的高度(μm); Φ 为微结构的直径(μm)。其中, 正方形微结构和棱台形微结构的外接圆直径为 Φ ; θ 为圆台形微结构和棱台形微结构的侧面倾斜角度($^\circ$)。使用 UG 三维建模工具, 分别创建了圆柱形、圆台形、正方形、棱台形 4 个具有不同形态凹坑型微结构密封间隙液膜的三维计算模型, 如图 4 所示。

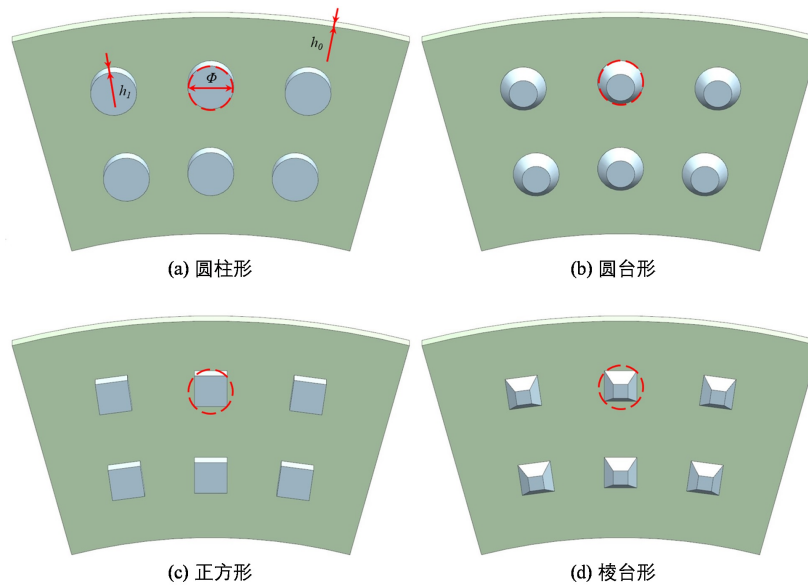


Figure 4. Three-dimensional computational model of the lubricating film
图 4. 液膜三维计算模型

2.3. 网格划分

使用 ANSYS ICEM CFD 软件对 4 种不同形态的凹坑型微结构密封间隙液膜模型执行了网格划分。通过标准的非结构化网格划分方法, 并在特定区域增加网格密度, 经过网格无关性检验, 确定了网格单元数量在 10,000 至 20,000 之间, 确保计算误差控制在 10^{-4} 以下。最终, 得到的网格单元数量分别为: 圆柱形微结构 16,722 个、圆台形微结构 15,893 个、正方形微结构 14,901 个、棱台形微结构 14,302 个。

3. Fluent 仿真模型

3.1. 基本假设和控制方程

在针对具有结构化密封端面的机械密封摩擦副的研究中, 基于纳维·斯托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程构建了润滑性能的数值模拟模型并进行求解。N-S 方程能够考虑微结构区域内液膜的惯性效应, 从而提高模拟精度。在模型构建阶段, 为了简化计算, 做出了以下假设:

- (1) 将微结构机械密封摩擦副密封间隙液膜看作刚体, 表面维持恒定, 不发生任何变形, 假定液膜的厚度在所有位置均一致, 并且液膜的压力在整个厚度方向上保持不变;
- (2) 润滑介质为均质且不可压缩的牛顿流体, 排除密封环端面粗糙度的影响以及忽略体积力和温升对密封环的影响;
- (3) 流体在密封间隙之间的流动为层流流动, 并且端面流体流速与运动速度相同;
- (4) 基于其它 N-S 方程的基本假设。

基于以上假设, 在直角坐标系中, 三维 N-S 方程在 x 与 y 方向上的分量表达式为:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

连续性方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

式中， ρ 为润滑介质密度， kg/m^3 ； t 为时间， s ； u 、 v 分别为通过单位流体域 x 、 y 方向的流速， m/s ； P 为密封间隙液膜压力， Pa ； η 为润滑介质的动力黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

表面作用力 F 是衡量微织构动压效应和润滑效能的关键指标。通过对模拟结果中上端面各点的压力 p 和剪切力 τ 进行积分计算，可以得到流体对上端面产生的总作用力，包括切向的摩擦力 F_x 和法向的承载力 F_y 。 F_x 和 F_y 的计算公式分别为：

$$F_x = \int \tau dx \tag{4}$$

$$F_y = \int p dy \tag{5}$$

使用摩擦系数 f 来评估润滑效果的好坏，其定义公式为：

$$f = \frac{F_x}{F_y} \tag{6}$$

式中， f 为摩擦系数，其值越低，表示微织构带来的润滑效果越佳。

3.2. 边界条件及求解器设置

在模型中，液膜的右端面定义为压力入口边界条件(Pressure-inlet)，记为 p_0 ，而左端面定义为压力出口边界条件(Pressure-outlet)，记为 p_i 。考虑到微织构特征是在静环表面制造的，所以液膜上端面呈现凸起状。液膜的上下端面均按照壁面边界条件(Wall)处理，其中下端面为绕轴旋转壁面，上端面为固定壁面。模型中除了液膜的出入口边界外，其余两侧均采用周期性边界条件(Periodic)进行设置。

在使用 Fluent 进行模拟计算时，选用了分离的隐式求解器，并采用标准压力差值格式，同时应用 SIMPLEC 算法进行压力与速度的耦合，模拟流体为层流状态。动量方程通过二阶迎风离散方法进行求解，并设置默认的收敛标准为低于 10^{-4} 。有关密封环的工况参数见表 1。

Table 1. Operating parameters of the seal ring
表 1. 密封环工况参数

参数名称	参数值
内径 r_i/mm	70
外径 r_o/mm	100
压力入口 p_o/MPa	0.1
压力出口 p_i/MPa	0.1
工作温度 T/K	300
转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3000
介质密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	998
动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.001

续表

密封间隙 $h_0/\mu\text{m}$	10
微结构直径 $\Phi/\mu\text{m}$	300
微结构深度 $h_p/\mu\text{m}$	50
锥度 $\theta/^\circ$	20

4. 结果与讨论

4.1. 转速对液膜压力及摩擦系数的影响

图 5 展示了 4 种不同形状微结构的液膜压力分布情况。从图中可以看出，这些微结构的液膜压力变化趋势大致相同，即液膜压力从外径向内径逐渐降低，且随着端面旋转方向的推进而增加。在微结构的边界区域，液膜压力发生了显著的变化。产生这一现象的原因在于微结构的设计导致了微结构区域与非微结构区域之间形成了交替的收敛与发散区间，液体沿着移动方向在这些区间流动时，会产生一种楔形效应，导致微结构中间截面上的液膜压力会从低压区域转变向高压区域。这种压力上的变化将导致收敛区间上的流体正压力超出发散区间的负压压力，从而产生一个特别的净压力，为实现非接触式机械密封提供了必要的承载力。这一结果进一步证实了微结构在其表面及邻近区域能够产生显著的流体动压效应。

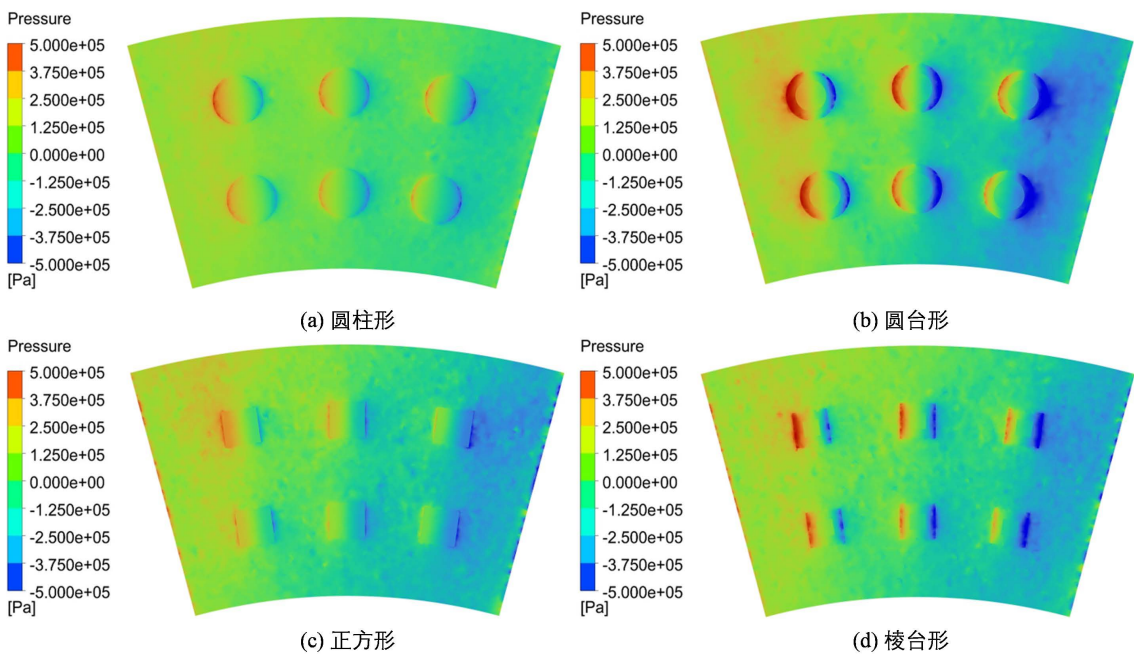


Figure 5. Pressure distribution of the lubricating film for microstructures of different shapes
图 5. 不同形状微结构液膜压力分布

图 6 显示了转速对液膜压力和摩擦系数作用的效果。可以看出，液膜压力随着转速的增加大致呈线性上升的趋势。这一趋势反映了密封环转速的提升导致了流体动压力的增强，进而增加了液膜的承载力。转速提高导致更多流体进入微结构的楔形空间，在承载区形成压力，产生流体动压效应。在此过程中，圆台形微结构随转速增加所产生的液膜压力最为显著。在仅调整转速参数时，观察到不同形状的微结构表面润滑性能随转速提升而降低。转速的提升初期会导致微结构表面的摩擦系数上升，但最终会稳定在一个恒定值。这说明随着密封环转速的增加，微结构的润滑性能会有所下降，而当转速达到一定水平后，

液膜表面的承载力和剪切力的增幅相等,使得对摩擦系数的影响减小。从图中可以发现,尽管各种形状微织构的摩擦系数随转速增加的趋势一致,但圆台形微织构展现出最佳的润滑效果,其余形状的摩擦系数差异不大。综合考虑,最终决定对圆台形微织构和棱台形微织构的结构参数进行进一步优化。

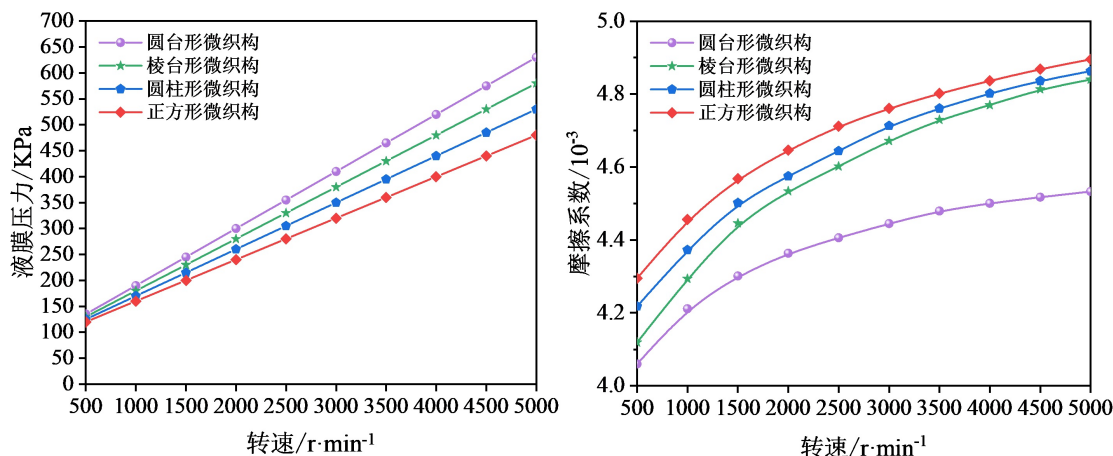


Figure 6. The impact of rotational speed on the pressure of the lubricating film and the friction coefficient

图 6. 转速对液膜压力及摩擦系数的影响

4.2. 微织构深度对液膜压力及摩擦系数的影响

为了探究微织构深度对机械密封液膜压力和摩擦系数的作用,选择了在前一部分中液膜压力提升最显著的圆台形和棱台形微织构,构建了深度范围从 10 μm ~100 μm 的流体域模型。保持其他条件与之前描述的相同,并沿用相同的边界条件。液膜压力和摩擦系数的变化如图 7 所示。结果显示,两种微织构形状在深度变化下,液膜压力和摩擦系数呈现出类似的趋势:随着微织构深度增加,液膜压力先是上升然后下降,在深度达到 30 μm 时达到峰值,之后在 50 μm 深度之后趋于稳定。然而,圆台形微织构对深度变化的敏感度高于棱台形微织构。摩擦系数随着微织构深度的增加,初始下降然后上升,在 50 μm 深度后达到稳定状态。分析表明,最佳的微织构深度为 30 μm ,此时微织构能够提供最高的液膜承载力和最低的摩擦系数,并且这一最佳深度与微织构的具体形状无关。

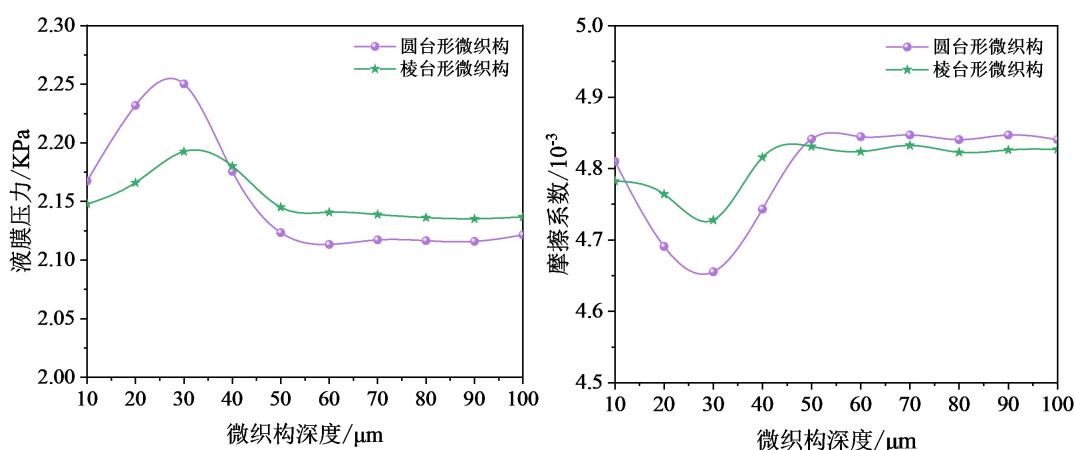


Figure 7. The influence of micro-texture depth on the pressure of the lubricating film and the friction coefficient

图 7. 微织构深度对液膜压力及摩擦系数的影响

5. 结论

本文以凹坑型织构化机械密封为研究对象,建立了圆柱形、圆台形、正方形、棱台形 4 个具有不同形态凹坑型微织构密封间隙液膜的三维计算模型:

(1) 织构化的密封端面能有效带来显著的流体动力效应。诸如旋转速度和微织构的深度等参数会对液膜的压力和摩擦系数产生影响。特别是圆台形状的微织构在提升流体动力效应方面表现最佳,带来更强的液膜承载力以及最小的摩擦系数。

(2) 机械密封的摩擦特性受微织构的结构特征影响,通过适当调整微织构的形状和深度,可以有效地增强其承载能力并减少摩擦。研究表明,不同形状的微织构存在一个共同的最优深度,最优深度为 30 μm 。

参考文献

- [1] Segu, D.Z. and Hwang, P. (2016) Effectiveness of Multi-Shape Laser Surface Texturing in the Reduction of Friction under Lubrication Regime. *Industrial Lubrication and Tribology*, **68**, 116-124. <https://doi.org/10.1108/ilt-03-2015-0041>
- [2] Zhang, H., Hua, M., Dong, G., Zhang, D., Chen, W. and Dong, G. (2017) Optimization of Texture Shape Based on Genetic Algorithm under Unidirectional Sliding. *Tribology International*, **115**, 222-232. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.017>
- [3] 牛一旭, 逢显娟, 李亚军, 等. 速度和载荷对凹坑织构乏油润滑摩擦学性能的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 140-149.
- [4] 吴元博, 杨学锋, 王守仁, 等. V 字型表面织构在油润滑条件下的摩擦学性能[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(2): 401-406.
- [5] 陈进, 郑清春, 胡亚辉, 等. 凹坑微织构对 4Cr13 不锈钢/皮质骨摩擦副摩擦性能的影响[J]. 工具技术, 2019, 53(5): 31-35.
- [6] 程香平, 张友亮, 康林萍, 等. 双向菱形孔织构端面密封性能研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(12): 73-80.
- [7] 苏峰华, 毛川, 李助军. 织构深度对不锈钢表面油润滑条件下摩擦学性能影响的试验和仿真研究[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(2): 181-187.
- [8] 魏伟, 陈思, 章亦聪, 等. 三角形-椭圆复合微孔织构化机械端面密封性能的数值研究[J]. 流体机械, 2020, 48(8): 25-31.
- [9] Wang, X., Kato, K., Adachi, K. and Aizawa, K. (2003) Loads Carrying Capacity Map for the Surface Texture Design of Sic Thrust Bearing Sliding in Water. *Tribology International*, **36**, 189-197. [https://doi.org/10.1016/s0301-679x\(02\)00145-7](https://doi.org/10.1016/s0301-679x(02)00145-7)
- [10] Tang, W., Zhou, Y., Zhu, H. and Yang, H. (2013) The Effect of Surface Texturing on Reducing the Friction and Wear of Steel under Lubricated Sliding Contact. *Applied Surface Science*, **273**, 199-204. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.013>
- [11] Xie, Y., Li, Y., Wang, Y., Suo, S. and Liu, X. (2013) An Experimental Investigation of Tribological Performance of Triangular Textures in Water Lubrication Regime. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, **57**, 273-279. <https://doi.org/10.1007/s11433-013-5254-7>
- [12] Uddin, M.S. and Liu, Y.W. (2016) Design and Optimization of a New Geometric Texture Shape for the Enhancement of Hydrodynamic Lubrication Performance of Parallel Slider Surfaces. *Biosurface and Biotribology*, **2**, 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2016.05.002>