排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2020 年 9 月 Sept. 2020
第 38 卷 第 9 期 Vol.38 No.9

考虑温度影响时具有表面纹理唇形油封的密封性能研究


张付英

张付英[1,2]，杨俊梅[1,2*]，水浩澈[1,2]，董城城[1,2]
（1. 天津科技大学机械工程学院，天津 300222；2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室，天津 300222）

摘要：基于弹流润滑理论和旋转轴密封的泵送机理，综合考虑密封唇表面粗糙度和表面纹理的影响，建立了油封密封区域的混合润滑数值模型.模型耦合了流体力学、变形分析、接触力学、温度能量守恒方程和黏温方程，通过迭代求解数值方程，得到不同表面纹理（圆形、正方形、等边三角形）油封唇口的温度分布、不同转速下油封唇口的最高温度，对比分析了表面纹理对油封接触面温度的影响以及温度升高对油封泵汲率、油膜厚度、摩擦扭矩等密封性能的影响.结果表明：随着转速的增大，唇口最高温度线性递增，表面纹理明显提高了油封的唇部温度；油封工作时，摩擦面的温度从两侧向中间急剧递增，纹理区域温度明显升高，但 3 种纹理油封之间差异不具有统计学意义.温度升高导致 3 种纹理油封的泵汲率、油膜厚度、唇口密封压力下降，显著降低了油封的密封性能.

关键词：旋转轴唇形油封；表面纹理；温度；密封性能；数值模型
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2020)09-0915-07
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.19.0055

张付英，杨俊梅，水浩澈，等.考虑温度影响时具有表面纹理唇形油封的密封性能研究[J].排灌机械工程学报，2020，38(9)：915-921.
ZHANG Fuying，YANG Junmei，SHUI Haoche，et al. Investigation into sealing performance of lip seals with surface texture considering temperature effect[J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2020，38(9)：915-921.(in Chinese)

Investigation into sealing performance of lip seals with surface texture considering temperature effect

ZHANG Fuying[1,2]，*YANG Junmei*[1,2*]，*SHUI Haoche*[1,2]，*DONG Chengcheng*[1,2]
(1. College of Mechanical Engineering，Tianjin University of Science & Technology，Tianjin 300222，China；2. Key Laboratory of Integrated Design and on Line Monitoring of Light Industry and Food Engineering Machinery and Equipment in Tianjin，Tianjin 300222，China)

Abstract：Based on elastohydrodynamic lubrication theory and pumping mechanism of rotary shaft seal，a numerical mixed lubrication model of sealing area in an oil seal was established by comprehensively considering the influence of surface roughness and texture of seal lip. In the model，fluid mechanics，deformation analysis，contact mechanics，temperature and energy conservation equation，and viscous-temperature equation were coupled. By solving the numerical equations iteratively，the temperature distributions in oil seal lips with different surface textures (circular，square，equilateral triangle) and the maximum temperatures of oil seal lip under different rotational speeds were obtained. The effects of surface texture on temperature of oil seal contact surfaces and the influences of tempera-

收稿日期：2019-03-26；修回日期：2019-05-15；网络出版时间：2020-07-29
网络出版地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20200728.1350.002.html
基金项目：天津市自然科学基金重点资助项目(17JCZDJC38800)
第一作者简介：张付英(1965—)，女，河北赞皇人，教授(zhfuying@tust.edu.cn)，主要从事产品创新设计和密封设计研究.
通信作者简介：杨俊梅(1994—)，女，山西忻州人，硕士研究生(541478539@qq.com)，主要从事可持续设计与制造研究.

ture rise on the sealing performance of the oil sea such as pumping rate, oil film thickness, friction torque, etc. were compared and analyzed. The results show that with the increase of rotational speed, the maximum lip temperature rises linearly, and the surface texture obviously raises the lip temperature. When the oil seal is working, the temperature of the friction surfaces rises sharply from both sides to the middle, and the temperature in the texture area increases noticeably, but there is no statistics significance between three textures. The temperature rise leads to a decrease in pumping rate, oil film thickness and lip sealing pressure in the oil seals with three textures, and significantly degrades their sealing performance.

Key words: rotary shaft lip seal; surface texture; temperature; sealing performance; numerical model

旋转轴唇形油封是应用最广泛的旋转轴密封之一,具有结构简单、成本低廉、密封性能好等优点[1].静止时,因旋转轴和油封之间的过盈配合,油封唇部紧紧挨着旋转轴,保证了润滑油不泄漏[2];轴旋转时,由于油封的反向泵汲效应,油封唇部和轴接触区域会形成一层很薄的油膜,防止润滑油泄漏并减少接触区域的摩擦生热.因此,泵汲率是衡量油封密封性能的一个重要指标[3].泵送理论认为油封的反向泵汲效应是由粗糙峰产生的,油封唇部系统微观规则的表面织构(即离散的沟槽或纹理)对提高油封的密封性能有重要作用.SHEN 等[4]研究了不同密封表面粗糙度类型的组合对泵汲率的影响.GUO 等[5]通过数值方法研究了轴上三角形、圆形、正方形等微凹坑纹理对油封密封性能的影响,证明三角形纹理能产生更大的泵汲效应.

但表面纹理形貌在改善油封密封性能的同时,也增加了油封接触面间的摩擦.海因茨等[6]认为正常工作的油封产生热量主要来自接触面间的摩擦.文献[7-8]证明了密封环表面加工圆形凹坑织构后增大了摩擦系数.摩擦热会使唇口温度急剧升高,加速唇口部位的老化和变硬,对油封的密封性能和使用寿命都产生很大影响[9].所以,表面纹理在有效改善密封性能的同时也会带来一定的不利影响.

文中基于流量因子统计学方法建立的粗糙油封混合润滑方程与能量方程耦合,通过 Matlab 编程计算唇部具有表面微凹坑纹理油封在接触区域的轴向温度分布情况,研究不同转速下接触区域的最高温度以及温度升高对具有表面纹理的油封密封性能的影响.

1 油封的结构参数和表面纹理模型

1.1 油封的结构参数及模型

旋转轴唇形油封有很多类型,其作用是防止润滑油的泄漏以及排除空气、水、灰尘等污染物[10].文中研究选取的油封为带弹簧的内包金属骨架型,由耐油橡胶、金属骨架、紧固弹簧 3 部分组成,其型号为 60 mm×80 mm×8 mm,油侧唇角为 45°,空气侧唇角为 25°.油封与轴之间为过盈配合,过盈量为 0.3 mm,轴径 d = 60 mm.油封的主体材料是丁腈橡胶(NBR),油封的径向截面图如图 1 所示.

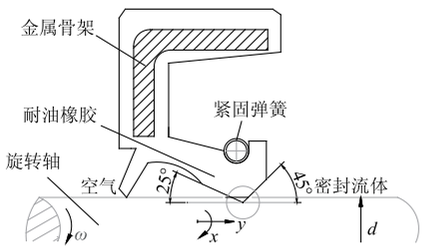


图 1 径向唇形油封示意图
Fig.1 Schematic of radial lip seal

1.2 油封唇口表面织构参数及模型

考虑到油封工作时,轴上设置微织构形貌易引起密封的磨损,表面纹理形貌设置在油封唇部,并且研究了等边三角形、圆形、正方形 3 种表面纹理形貌.由于微凸体表面形貌可能会在油封静置时引发润滑油液的泄漏,因此,采用微凹坑形式的表面纹理.图 2 为油封密封区域的局部放大图,其中 h 为油膜厚度,L_y 为油封与轴的接触宽度,数值从油封的有限元模型中提取.微凹坑纹理设置为绕唇端部平行排列的两行,如图 3 所示.

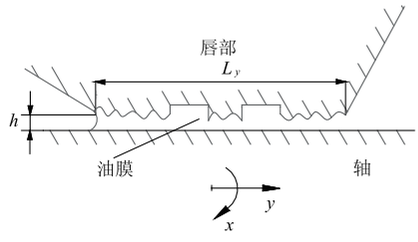


图 2 油封密封区域示意图
Fig.2 Schematic of sealing area

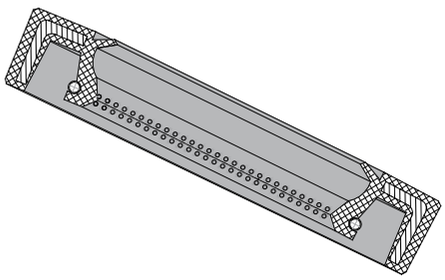


图 3　油封唇部纹理分布图
Fig.3　Texture distribution on oil seal lip

3 种形状的表面纹理在尺寸设计上采用面积相近的原则,3 种表面纹理在唇端部两侧的重心固定,依次整齐排列,如图 4 所示.3 种纹理的具体尺寸如表 1 所示,其中 d_w为深度.因纹理尺寸较小,且其深度与粗糙度值相差较小,所以在运算过程中不考虑唇口变形对纹理的影响. 唇口表面纹理可采用激光微加工技术制造[11].

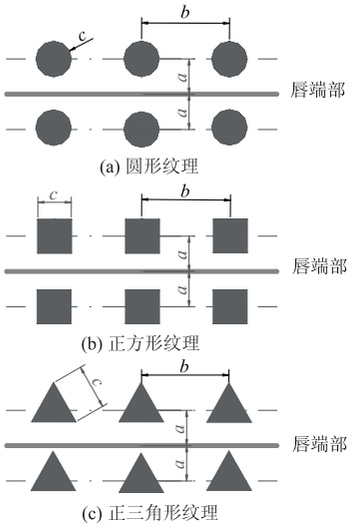


图 4　唇部表面纹理示意图
Fig.4　Schematic of lip surface texture pattern

表 1　表面纹理形状参数
Tab.1　Texture shape parameters　　μm

纹理	d_w	a	b	c
圆形	2	40	94	12
正方形	2	40	94	20
三角形	2	40	94	30

2　油封的数值计算模型

2.1　油封流体力学雷诺方程的建立

雷诺方程是求解流体问题的基本公式,一般弹性流体动力学问题采用一维雷诺方程,而旋转轴密封系统采用二维雷诺方程.油封稳定工作状态时,由于唇口表面粗糙峰产生的流体动压效应而使油封处于全油膜润滑状态,但油膜压力低于溶解气体饱和蒸气压时就会发生空化,所以建立考虑表面粗糙度和混合润滑状态的二维平均雷诺方程[12],计算公式为

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\varphi_x H^3 e^{-\hat{\alpha}F\Phi}\frac{\partial F\Phi}{\partial X}\right)+K^2\frac{\partial}{\partial Y}\left(\varphi_y H^3 e^{-\hat{\alpha}F\Phi}\frac{\partial F\Phi}{\partial Y}\right)=$$

$$6\zeta\left(\frac{\partial}{\partial X}\{[1+(1-F)\Phi]H_T\}+F\frac{\partial\varphi_S}{\partial X}\right),\qquad(1)$$

式中:X 为量纲一周向坐标;Y 为量纲一轴向坐标;φ_x 为圆周方向的压力流量因子;φ_y 为轴向的压力流量因子;φ_S 为剪切流量因素;ζ 为量纲一周向速度;H 为油膜厚度;F 为空化指数;Φ 为量纲一压力 p 的通用变量.

在密封流体区域:$\Phi\geqslant 0, F=1, p=\Phi$;在空穴区域,$\Phi<0, F=0, p=0, \hat{\rho}=1+\Phi$,其中,$\hat{\rho}$ 为量纲一流体密度.

雷诺边界条件:Y 方向,$p_{Y=0}=p_{\text{sealed}}$,$p_{Y=1}=1$;$X$ 方向 p 周期性变化,即 $p_{x=0}=p_{x=1}$,所有节点位置$p\geqslant 0$.

2.2　接触力学分析

接触力学分析即求解油封的接触压力,当密封耦合面流体处于混合润滑状态时,必然存在唇口粗糙峰接触,唇口粗糙峰接触压力的影响不能忽略,文中粗糙峰接触压力的计算公式为

$$p_c=\frac{4}{3}\frac{1}{1-v^2}\sigma^2\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_H^{\infty}(\zeta-H)^{3/2}e^{\frac{-\zeta^2}{2}}\mathrm{d}\zeta,\qquad(2)$$

式中:σ 为粗糙度,取值 1 μm;ζ 为集成的虚拟变量.

2.3　变形力学分析

油封的变形力学分析是利用影响系数法,通过建立油封的有限元模型获取油封受力后的变形影响系数后计算其径向变形,进而求得油封润滑区域的油膜厚度,其计算公式为

$$H_i=H_w+H_s+\sum_{k=1}^{n}(I)_{ik}(p_t-p_{sc})_k,\qquad(3)$$

式中:H_w 为纹理结构参数,是将纹理深度及形状尺寸编辑为 36×36 的矩阵形式代入油封变形公式中;H_s 为静态油膜厚度;$(I)_{ik}$ 为径向变形影响系数矩阵,p_{sc} 为静态接触压力,均由有限元分析获得,有限元建模过程中采用 2 项参数的 Mooney-Rivlin 模型描述橡胶的力学性能,材料常数 $C_{10}=0.738\ 9$,$C_{01}=0.184\ 7$.

划分网格时,各部件都采用 C3D8R 八结点线性六面体单元.由于运行过程中唇部会发生变形,要单独划分极其精密的网格,以保证结果的精确性.

p_t 为总压力,计算公式为

$$p_t=p_c+p_{\text{avg}},\qquad(4)$$

式中:p_{avg}为平均流体压力.

2.4 泵汲率、摩擦扭矩计算

密封区域所产生的泵汲行为可以抵消油液从腔体泄漏的趋势,从而阻止泄漏,所以制造商一般都通过油封的泵汲率来评定其密封性能[11].油封的泵汲率计算公式为

$$Q=\int_0^{2\pi r}-\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial y}\mathrm{d}x\,. \tag{5}$$

衡量油封密封性能的另一个重要指标就是摩擦扭矩,摩擦扭矩可以反映密封表面的磨损程度,同时,摩擦扭矩过大也说明会产生大量的摩擦热[13],摩擦热的集聚会造成密封材料老化,进而影响密封性能.摩擦扭矩计算公式为

$$M=\frac{f_{\mathrm{f}}D}{2}\,, \tag{6}$$

式中:f_{f}为摩擦力;D为轴直径.

2.5 油封唇口温度数值模型建立

流体流动过程中遵循能量守恒定律.根据具体研究问题的不同,针对稳定运行油封唇口温度分布的模拟计算,可对模型进行以下简化[14]:① 润滑油为牛顿流体;② 润滑油的比热容c为常数;③ 忽略油封侧热量的传递.

由此可得,求解油封唇口温度分布的能量守恒方程为

$$\frac{\partial v(T)}{\partial y}=\frac{k}{\rho c}\frac{\partial^2 T}{\partial y\partial y}+\frac{S}{\rho}\,, \tag{7}$$

式中:k为热传导系数;T为温度;S为内热源.

油封接触区域中压力以及温度场的变化导致流体黏度的改变.文中采用黏压-黏温方程[15]计算流体黏度,即

$$\mu=\mu_0\cdot\theta\cdot e^{\{(\ln\mu_0+9.67)[-1+(1+5.1\times10^{-9}\bar{p})^{z_0}(\frac{T-138}{T_0-138})^{-s_0}]\}}\,, \tag{8}$$

式中:μ_0为初始黏度;θ为流体密度与初始密度的比值;T_0为初始温度;z_0,s_0分别为与压力和温度有关的系数.

3 数值计算结果分析

3.1 数值计算基本参数及计算流程

建立的油封模型基本参数如下:油封表面粗糙峰半径$r=1$ μm;黏度$\mu_0=0.043$ Pa·s;环境压力$p_{\mathrm{a}}=0.1$ MPa;接触区域轴向长度$L_y=0.251\,5$ mm;单周期内周向长度$L_x=0.094\,2$ mm;热传导系数$k=5\times10^7$ W/(m²·K);比热容$c=2\,000$ J/(kg·K).

文中建立的油封混合润滑模型耦合了二维雷诺方程、变形力学分析、接触力学分析、温度能量方程及黏度方程,在Matlab中编写程序迭代求解,求解过程中首先输入油封的基本运行参数及结构参数,预设1个油膜厚度及初始温度,求解雷诺方程计算流体压力分布,接着进行变形力学分析,通过反复迭代收敛后将流体压力及油膜厚度带入能量方程中求解温度分布,最后进行泵汲率及摩擦扭矩的计算,具体流程如图5所示.

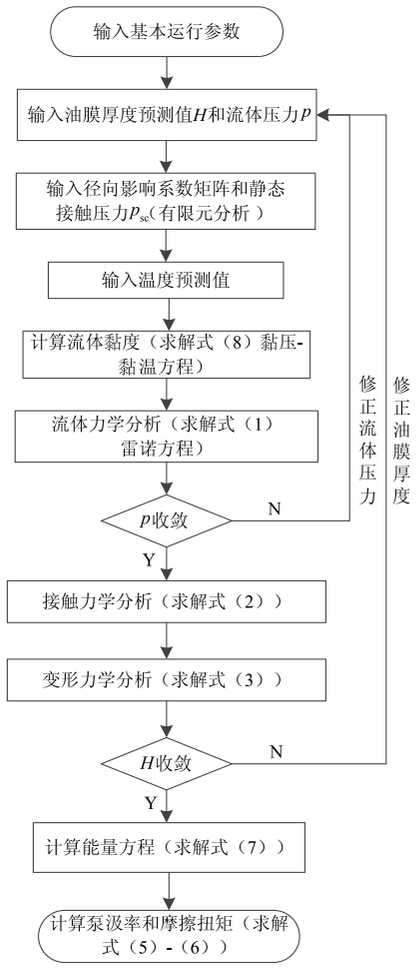


图5 数值计算流程图

Fig.5 Flow chart of numerical computation

3.2 计算结果分析

在油封工作过程中,接触区域的摩擦热会加速橡胶材料的变形和老化,过早导致油封失效.因此,研究密封唇口的最高温度$T_{\max}$进而把温度控制在许用温度范围内,对延长油封的使用寿命具有重要的意义.图6为转速n从400升到1 800 r/min时,油封唇口最高温度的变化情况.显然,随着转速的增加,摩擦生热量增加,唇口最高温度也逐渐增大.在旋转轴运行过程中,密封腔体中润滑油液也随旋转轴运动,靠近旋转轴的润滑油旋转速度较大,而远离旋

转轴的润滑油旋转速度逐渐降低甚至接近于 0,在黏性作用下润滑油整体的旋转速度低于旋转轴,随着旋转速度增加,这一差距增大,导致油封的散热量低于摩擦生热量,摩擦热积聚,温度最大值也逐渐升高[16].具有表面纹理的油封随着转速增大,最高温度值较普通油封高,这是由于油封唇部纹理明显增加了摩擦热.由于 3 种纹理面积近似相同,其最高温度没有明显差异.

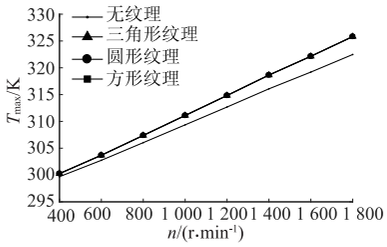


图 6　不同转速下唇口最高温度变化情况
Fig.6　Variation of maximum lip temperature at different rotational speeds

图 7 为旋转轴转速为 1 000 r/min 时油封唇口接触面轴向温度 T_a 分布情况,图中温度值为将密封区域内每个轴向节点所对应的周向节点上的温度值求均值后得到的,摩擦面的温度从两侧向中间急剧递增.这是因为空气以及润滑油的散热作用使两端温度明显降低,轴向节点右侧即润滑油侧温度比空气侧更低,这是因为空气的导热系数远小于润滑油,润滑油侧的散热效果比空气侧好所致.具有表面纹理的油封在纹理区域温度明显比普通油封高,最高温度发生在接触区润滑油侧纹理区域,具有纹理的油封最大温度平均值为 309.7 K,而普通油封的最大温度平均值为 309.3 K,唇部纹理在改善油封密封性能的同时,明显增加了接触面的摩擦.

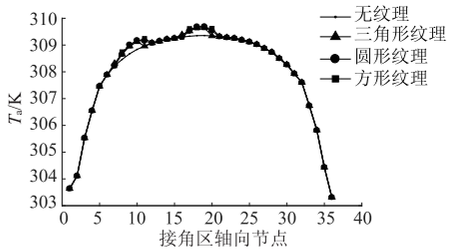


图 7　油封唇口温度分布
Fig.7　Temperature distribution in oil seal lip

图 8-11 所示为旋转轴转速在 1 600 r/min 时,温度升高对具有表面纹理油封密封性能的影响.随着温度升高,油封的泵汲率降低,在温度升高到 320 K时,具有圆形纹理的油封泵汲率 $Q_{吸}$ 最先低于 0,说明油封可能会发生泄漏;且 3 种纹理形状中,具有三角形纹理的油封产生的泵汲率最大,具有圆形纹理的油封产生的泵汲率最小,但均比无纹理油封的泵汲率大,说明表面纹理有效地提高了油封的润滑性能,这一结果与作者前期研究成果相符合.

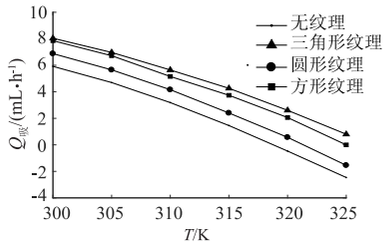


图 8　泵汲率随温度的变化情况
Fig.8　Variation of pumping suction rate with temperature

温度升高,会导致润滑油的黏度下降,从而降低油膜厚度,影响油封的密封性能.当量纲一油膜厚度 $H_{量纲一}$ 大于 3 时,油封处于全油膜流体润滑状态,从图 9 可以看出,温度上升到 325 K 时,量纲一油膜厚度虽然持续减小,但始终大于 3,油封处于全油膜流体润滑状态,但泵汲率的降低,会造成润滑油的泄漏.相比于泵汲率,温度对具有纹理油封的油膜厚度影响较小.图中具有正方形纹理的油封明显比另外 2 种油封的膜厚数值大,说明正方形纹理对油封的润滑性能具有良好的改善作用,同时,唇部表面具有纹理的油封都比普通无纹理油封具有更大的膜厚值,再次说明摩擦面加工出纹理是有利于润滑的.

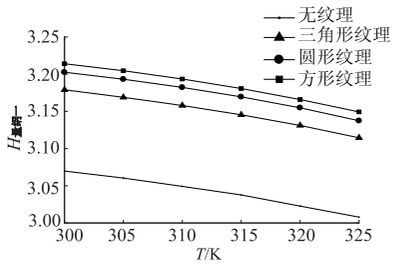


图 9　量纲一油膜厚度随温度的变化情况
Fig.9　Variation of dimensionless oil film thickness with temperature

从图 10 可以看出,随着温度升高,唇口密封压力 p_c 也逐渐下降,同样对油封的密封性能产生负面影响.具有 3 种不同纹理的油封唇口密封压力值没有较大差异,这是由于在油封结构设计过程中,3 种油封的其他结构参数都相同,微凹坑纹理因尺寸较小,故对油封唇口所受径向力影响不大.

油封的摩擦扭矩 M 可以反映其接触面间的摩擦状况,是影响油封寿命的重要参数之一.从图 11

中可以看出,随着温度升高,3种纹理形状的摩擦扭矩都呈现下降趋势.在保证密封性能的前提下,油封的摩擦扭矩降低可以保持唇部与旋转轴之间的良好接触,降低唇口温度,降低密封系统相互之间的磨损,减小发动机启动时的功耗,具有较好的节能性.但温度升高导致泵汲率、油膜厚度、唇口密封压力下降,明显降低了油封的密封性能,所以在油封工作过程中,应尽量降低其接触面间的温度.

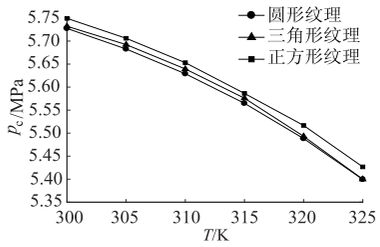


图10 唇口密封压力随温度的变化情况
Fig.10 Variation of lip seal pressure with temperature

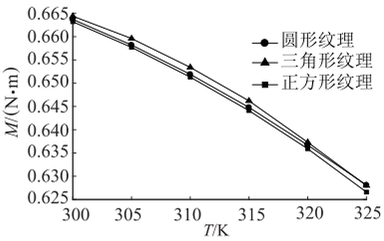


图11 摩擦扭矩随温度的变化情况
Fig.11 Variation of friction torque with temperature

4 结 论

文中综合考虑了密封唇表面粗糙度和表面纹理的影响,建立了油封密封区域的混合润滑数值模型,计算得不同表面纹理油封唇口的温度分布、不同转速下油封唇口的最高温度及温度升高对油封密封性能的影响,所得结论如下:

1)随着转速的增大,摩擦生热量增加,唇口最高温度也逐渐增大,具有表面纹理的油封明显比普通油封产生更高的温度,油封唇部纹理增加了摩擦热.3种纹理油封相对比,最高温度没有明显差异.

2)油封工作时,摩擦面的温度从两侧向中间急剧递增,因为空气及润滑油的散热作用使两端温度明显降低.具有表面纹理的油封在纹理区域温度明显比普通油封高,最高温度发生在接触区润滑油侧纹理区域.

3)温度升高导致泵汲率、油膜厚度、唇口密封压力均下降,明显降低了油封的密封性能.在温度升高到320 K后,3种具有纹理的油封泵汲率相继低于0,油封可能会发生泄漏.在油封工作过程中,为保证其密封性能应尽量降低其接触面区域温度.

参考文献(References)

[1] LIU D, WANG S, ZHANG C. A multiscale wear simulation method for rotary lip seal under mixed lubricating conditions[J]. Tribology international, 2018, 121:190-203.

[2] 康帅. 旋转唇形油封泵汲机理和散热机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

[3] 张付英, 陈建垒, 段晶莹,等. 旋转轴唇形油封泵汲效应[J]. 排灌机械工程学报, 2019,37(11):936-940.
ZHANG Fuying, CHEN Jianlei, DUAN Jingying, et al. Pumping effect for rotary lip seal[J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2019, 37(11): 936-940.(in Chinese)

[4] SHEN D W, SALANT R F. Elastohydrodynamic analysis of the effect of shaft surface finish on rotary lip seal behavior [J]. Tribology transactions, 2003,46(3):391-396.

[5] GUO F, JIA X, WANG L, et al. The effect of axial position of contact zone on the performance of radial lip seals with a texturing shaft surface[J]. Tribology international, 2016, 97:499-508.

[6] 海因茨·K·米勒,伯纳德·S·纳乌. 流体密封技术:原理与应用[M].北京:机械工业出版社,2002.

[7] KLIGERMAN Y, SHINKARENKO A. The effect of tapered edges on lubrication regimes in surface-textured elastomer seals[J]. Tribology international, 2011, 44: 2059-2066.

[8] SHINKARENKO A. The effect of surface texturing in soft elasto-hydrodynamic lubrication [J]. Tribology international, 2009, 42:284-292.

[9] 张付英,陈建垒,宋娜娜,等.基于ABAQUS的旋转轴唇形油封温度场分析[J].润滑与密封,2018,43(3):69-74.
ZHANG Fuying, CHEN Jianlei, SONG Nana, et al. Temperature field analysis of rotary shaft lip seal based on ABAQUS [J]. Lubrication engineering, 2018, 43(3):69-74.(in Chinese)

[10] El GADARI M, FATU A, HAJJAM M. Shaft roughness effect on elasto-hydrodynamic lubrication of rotary lip seals:experimentation and numerical simulation[J]. Tribology international, 2015, 88:218-227.

[11] 董慧芳. 激光加工微凹坑轴表面对唇形密封泵汲效应与摩擦特性的影响[D].合肥:合肥工业大学,

2012.
[12] 王宏浩.基于数值计算的油封增效性能研究[D].天津:天津科技大学,2017.
[13] FRÖLICH D, MAGYAR B, SAUER B. A comprehensive model of wear, friction and contact temperature in radial shaft seals[J]. Wear, 2014, 311(1/2):71-80.
[14] GABELLI A,POLL G. Formation of lubricant film in rotary sealing contacts: part I - lubricant film modeling [J].Transactions of the ASME, 1992, 114 (2): 280-286.
[15] WANG B Q, PENG X D, MENG X K. A thermoelastohydrodynamic lubrication model for hydraulic rod O-ring seals under mixed lubrication conditions[J]. Tribology international,2018,129:S0301679X18304407.
[16] 张佳佳, 赵良举, 杜长春,等. 唇形油封结构参数对摩擦面温度的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(10):1470-1473.
ZHANG Jiajia, ZHAO Liangju, DU Changchun, et al. Influence of structure parameters of lip seal on the temperature of friction area[J].Journal of Hefei University of Technology(natural science), 2011, 34(10):1470-1473.(in Chinese)

(责任编辑　谈国鹏)

(上接第 903 页)

[8] 许洪元,吴玉林,高志强,等.稀相固粒在离心泵轮中的运动试验研究和数值分析[J].水利学报,1997(9):13-19.
XU Hongyuan, WU Yulin, GAO Zhiqiang, et al. Experimental study and numerical analysis of the movement of dilute solids in centrifugal pump wheels[J].Journal of hydraulic engineering,1997(9):13-19. (in Chinese)
[9] FINNIE I, MCFADDEN D H . On the velocity dependence of the erosion of ductile metals by solid particles at low angles of incidence[J]. Wear, 1978, 48(1): 181-190.
[10] 曹卫东, 姜昕, 张骞,等. 半开式切割泵固液两相流动与特性分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 531-537.
CAO Weidong, JIANG Xin, ZHANG Qian, et al. Characteristics analysis of solid-liquid two-phase flow in semi-open cutting pump[J].Journal of Jiangsu University(natural science edition), 2019, 40(5): 531-537. (in Chinese)
[11] WANG Y Q , HUANG L P , LIU W L , et al. The blast erosion behaviour of ultrahigh molecular weight polyethylene[J]. Wear, 1998, 218(1):128-133.
[12] LAKSHMINARAYANA B . Measurement methods in rotating components of turbomachinery[M]. New York, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 1980.
[13] 舒信伟. 基于 CFD 流场分析的多工况多约束条件的叶片优化设计方法与试验研究[D].上海:上海交通大学, 2009.
[14] GUNST R. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments[J]. Technometrics, 1996, 38(3):3.

(责任编辑　陈建华)