

文章编号:1674-8190(2020)05-738-08

# 表面粗糙度对航空液压作动器密封性能的影响

闫晓亮,杜晓琼,常凯,李梦晨

(航空工业庆安集团有限公司 航空设备研究所,西安 710077)

**摘要:** 航空液压作动器普遍应用在飞机机翼、舱门、起落架等部位,往复密封为其典型密封形式,密封失效会严重影响飞机任务的执行和飞行安全。密封副表面粗糙度是重要的工程可控参数且对于密封性能的影响很大,因此分析表面粗糙度对作动器密封性能的影响具有重要的理论和实际意义。建立适用于往复组合密封的确定性混合润滑数值仿真模型,并与有限元分析方法结合计算膜厚度,分析密封圈表面粗糙的幅值和波长变化以及运动速度和液压油黏度变化对密封圈润滑性能和密封性能的影响。结果表明:正弦粗糙表面的幅值和波长增大,会引起油膜压力和油膜厚度波动的幅值增大,但会减小摩擦系数;正弦粗糙表面的幅值增大,有利于减小密封间隙的最小膜厚和泄漏量,但是波长变化的影响作用不大;液压油黏度和活塞运动速度增大,有利于增大密封间隙油膜厚度,但会增大泄漏量和摩擦系数。

**关键词:** 航空液压作动器;组合密封;流固耦合;表面粗糙度

中图分类号: V233.91; TH137

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.05.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Influence of Surface Roughness on Seal Property of Aircraft Actuator

YAN Xiaoliang, DU Xiaoqiong, CHANG Kai, LI Mengchen

(Institute of Aeronautical Equipment, AVIC Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Aviation hydraulic actuator is widely used in many parts of an aircraft, such as aircraft wing, landing gear, hatch door. The typical seal form is reciprocating seal, and the failure of seal will seriously affect the execution of flight mission and even flight safety. The surface roughness of sealing pair as an important engineering controllable parameter is of great influence on the sealing performance. Therefore, it is of great theoretical and practical significance to analyze the influence of surface roughness on the sealing performance of actuator. A deterministic mixed lubrication numerical model for reciprocating combined seal is established, and the finite element method (FEM) is combined to calculate the film thickness. The effects of surface roughness and operating conditions on lubrication and sealing performance are analyzed. The results show that increase of roughness and wavelength of three-dimensional sinusoidal rough surface can contribute to the increase of fluctuation amplitude of film thickness and pressure, and the reduction of friction coefficient. Increase of amplitude of the sinusoidal rough surface is beneficial to the reduction of the minimum film thickness and leakage rate. However, the wavelength change has little effect on the minimum film thickness. The increase of viscosity of hydraulic fluid and kinematic velocity of piston is benefit to the increase of oil film thickness of sealing clearance, but is bad for leakage rate and friction coefficient.

**Key words:** aviation hydraulic actuator; combined seal; fluid-solid coupling; surface roughness

收稿日期:2019-11-18; 修回日期:2020-01-01

基金项目:工信部民用飞机专项科研资助(MJZ-2017-S-53)

通信作者:闫晓亮, yanxiaoliang111@126.com

引用格式:闫晓亮,杜晓琼,常凯,等. 表面粗糙度对航空液压作动器密封性能的影响[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 738-745.

YAN Xiaoliang, DU Xiaoqiong, CHANG Kai, et al. Influence of surface roughness on seal property of aircraft actuator[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 738-745. (in Chinese)

## 0 引言

目前,飞机液压系统的压力向着高压化方向发展,已经有越来越多的先进飞机采用 35 MPa 压力体系<sup>[1]</sup>。作为单独或者集成于电静液作动器中的执行元件,液压作动器一旦发生泄漏,轻则引起环境污染,降低系统传动效率,重则影响飞机任务的执行甚至威胁飞行安全。液压作动器在工作中会受到温度、压力、振动、密封材料性能及作动速度等因素的明显影响,其密封性能受流固与热相互耦合作用影响。

目前,国内对航空液压往复密封的理论研究较为缺乏,没有完善的理论指导,密封设计大多基于工程经验和仿制国外先进密封结构。受实验手段的限制,当前的实验研究也无法真实描述密封机理。

随着计算科学的飞速发展,仿真技术成为科研人员探索工程问题的重要手段,通常采用数值方法研究往复密封规律。国外,G. K. Nikas 等<sup>[2-3]</sup>针对做往复运动的矩形密封圈建立了数值仿真模型,并进行了一系列数值仿真研究;M. Scaraggi 等<sup>[4]</sup>将软弹性体密封的平均流量模型进行了理论扩展,模拟实际加工表面粗糙度对密封的影响;M. Crudu 等<sup>[5]</sup>将试验和数值方法结合,考察了表面粗糙效应对做往复运动的活塞杆密封性能的影响;S. Bhau-mik 等<sup>[6]</sup>进一步将磨损仿真应用到表面粗糙度对往复密封的影响分析。国内,张延良等<sup>[7]</sup>、董峰<sup>[8]</sup>采用数值方法研究了组合密封滑环表面粗糙度对往复密封性能的影响;欧阳小平等<sup>[9]</sup>建立了基于混合润滑理论的多场耦合模型,研究了典型航空高压往复密封问题,考察了高压、高温及速度的影响;Xiang Chong 等<sup>[10]</sup>基于平均流量模型开发出更加高效的针对往复密封的流-固耦合算法。

上述研究大多数建立的是往复密封的统计性模型,无法考察实际密封副表面粗糙形貌的影响,而为数不多的文献采用确定性模型的研究,也无法考虑混合润滑状态下的密封问题。

本文针对做往复运动的液压作动器建立组合密封的流-固耦合确定性仿真分析模型,考察密封副的表面粗糙度及使用工况参数对密封性能的影响规律,以期对密封圈的结构设计和使用提供理论

指导。

## 1 往复密封的求解模型

由于橡胶材料具有摩擦系数大、不耐磨、抗挤出能力差的缺点,在高压、长行程、长寿命的往复密封场合,普遍采用橡胶圈和塑料滑环组成的组合密封形式,其中橡胶圈提供初始变形的弹力,塑料滑环与轴或者塑料滑环与衬套组成滑动副,一方面可以减小摩擦,另一方面具有较好的耐磨性。塑料滑环通常由添加了增强添加剂和减摩添加剂的改性 PTFE 材料制成。

由于密封圈具有轴对称性,忽略结构偏心和轴的偏斜,则可简化为二维线接触模型,因此可以对上述接触副开展结构强度分析、流体力学分析,求解得到密封接触副的压力分布和膜厚分布,进而预测密封副的密封性能。

在对组合密封圈进行有限元强度分析时,由于密封采用 O 型的橡胶材料属于超弹性材料,具有材料非线性、几何非线性、接触非线性的特点,可以用超弹性本构模型通过应变能密度函数来定义。本文用两参数 Mooney-Rivlin 模型来定义其本构模型<sup>[11]</sup>,其表达式为

$$\omega = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中: $\omega$  为应变能密度; $C_{10}$  和  $C_{01}$  为橡胶材料常数,本文取橡胶材料的 Mooney-Rivlin 常数  $C_{10} = 1.9461$ ,  $C_{01} = 0.4619$ <sup>[12]</sup>;  $I_1$  和  $I_2$  为 Green 应变不变量。

对密封系统进行流体力学求解是为了获得密封间隙的流体压力分布、流体膜厚分布,并在此基础上计算泄漏率和摩擦力。密封面的润滑油膜控制模型为雷诺方程和密封变形模型,数值求解方法有逆解法、直接迭代法和复合直接迭代法等。

由于密封间隙往往是沿圆周方向对称的,因此忽略沿圆周方向上参数的变化,将三维密封问题简化为二维密封问题,且本文分析的活塞杆密封为二维稳态问题,其流体控制方程为

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{dp}{dx} \right) = v_e \frac{d}{dx} (\rho h) \quad (2)$$

式中: $v_e$  为平均速度,  $v_e = (v_1 + v_2)/2$ ;  $h$ 、 $\eta$ 、 $\rho$  均为  $x$  的函数,边界条件可采用雷诺边界条件。

在任意点  $x$  处的油膜厚度为

$$h(x) = h_c + S(x) + \sigma(x) + \delta(x) \quad (3)$$

式中： $h_c$  为没有变形时的中心膜厚； $S(x)$  为由于表面几何尺寸变化引起的油膜厚度变化； $\sigma(x)$  为由于表面粗糙形貌引起的油膜厚度变化； $\delta(x)$  为由于压力分布在各点产生的弹性变形。

假设粗糙表面处在静止表面，且服从正弦分布，则可对表面形貌进行确定性的描述和分析，其二维正弦粗糙表面的表达式为

$$\sigma(x) = A_s \cos\left[\frac{2\pi(x - x_s)}{\omega_x}\right] \quad (4)$$

式中： $A_s$  为正弦波的幅值； $\omega_x$  为  $x$  方向的波长； $x_s$  为正弦波表面中心的位置。

采用式(4)描述正弦粗糙表面，来考察正弦粗糙表面形貌对往复密封性能的影响。

表面弹性变形可通过 Boussinesq 积分式来计算：

$$\delta(x) = -\frac{2}{\pi E'} \int_{s_1}^{s_2} [p(x) - p_{sc}(x)] \ln(s - x)^2 ds + c \quad (5)$$

式中： $p(x)$  为流体压力； $p_{sc}(x)$  为静态接触压力； $s_1, s_2$  分别为载荷的起点和终点坐标； $E'$  为等效弹性模量。

当发生粗糙接触时，油膜厚度变成 0，传统的 Reynolds 方程变成如下特殊形式<sup>[13]</sup>：

$$v_c \frac{d}{dx}(\rho h) = 0 \quad (h \leq \epsilon_h) \quad (6)$$

式中： $\epsilon_h$  为用来判断是否关闭压力流动项的预设值，本文选取  $\epsilon_h$  值为 10 nm。

式(6)为式(2)的特殊形式，在流体润滑区和粗糙接触区的边界，可自动满足压力连续条件。由此在一个迭代循环中可以同时求解流体压力和粗糙接触压力。

粘-压关系式采用 Roelands 粘压公式

$$\begin{cases} \eta = \eta_0 \exp\{(\ln \eta_0 + 9.67)[(1 + 5.1 \times 10^{-9} p)^z - 1]\} \\ z = \frac{\alpha}{5.1 \times 10^{-9} (\ln \eta_0 + 9.67)} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\alpha$  为润滑油的黏-压系数， $\text{Pa}^{-1}$ ； $\eta_0$  为液压油的环境黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

密-压关系采用 Dowson-Higginson 公式来计算：

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{0.6 \times 10^{-9} p}{1 + 1.7 \times 10^{-9} p}\right) \quad (8)$$

式中： $\rho_0$  为液压油的环境密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## 2 往复密封的流固耦合数值求解方法

数值迭代求解过程如图 1 所示。在求解往复密封的润滑问题时，首先根据给定的密封几何尺寸、材料参数和安装参数，借助有限元软件计算密封接触副的静态接触压力和结构变形，然后连同润滑油参数、工况参数、初始油膜厚度作为流固耦合求解的输入条件开展耦合求解。每次在修正完流体压力后，根据弹性变形方程更新膜厚，并计算新的润滑油黏度和密度。当压力求解收敛后，再判断膜厚是否收敛，如不收敛，则修正油膜厚度。为了加快计算速度，采用基于离散卷积和快速傅里叶变换法的弹性变形计算法<sup>[14]</sup>。

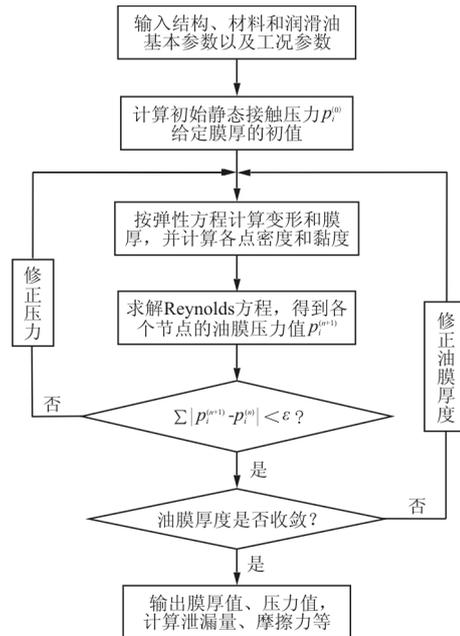


图 1 数值迭代求解流程图

Fig. 1 The flow chart of the numerical solution

## 3 计算结果及影响分析

以 Greene Tweed 公司的 ACGT 型密封圈为例进行计算。ACGT 型密封圈由 4 部分组成，左、右两侧为挡圈结构，截面呈 T 型结构的部分由橡胶材料制成，起减摩和密封作用的滑环由改性 PTFE 材料制成。该型密封圈的优点是呈 T 型截面

的弹性体能够很好地避免往复运动中的扭转,滑环做的很薄能够及时对磨损进行补偿,径向尺寸小、密封性能好,在航空液压作动器上得到了广泛的应用。密封圈安装后的有限元网格模型如图 2 所示,该密封圈内径为 46.83 mm。由于结构和所受工况的对称性,对 ACGT 型密封结构进行有限元分析时,将其简化成二维轴对称模型,其中  $y$  轴为对称轴。

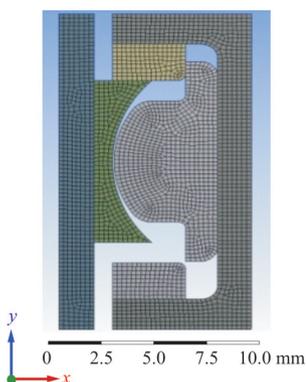
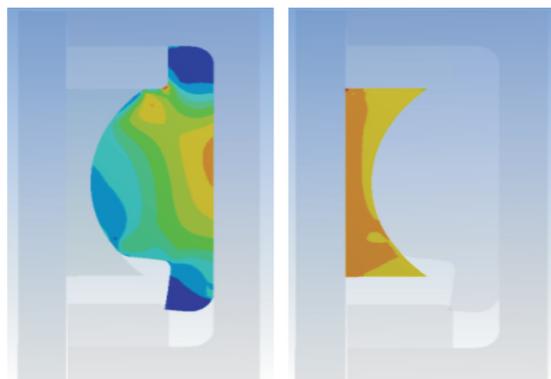


图 2 ACGT 型密封圈的有限元网格模型

Fig. 2 The finite element mesh model of the ACGT seal

密封压力为 28 MPa,安装后由有限元软件求解得到的 ACGT 型密封圈的 T 型橡胶密封圈和滑环的应力分布云图为图 3 所示,可以看出:在油压作用下密封圈所受的最大接触压力靠近出口侧。



(a) T 型密封圈

(b) 滑环

图 3 ACGT 型密封圈的接触压应力云图

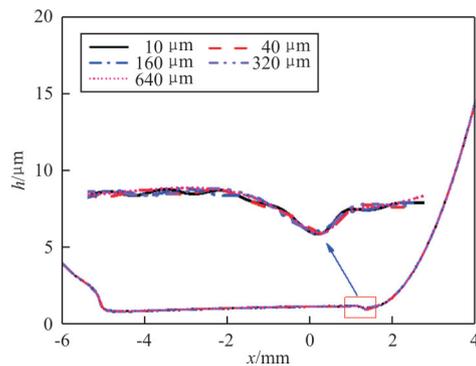
Fig. 3 The contact pressure distribution of the ACGT seal

在得到密封圈的接触压应力后,将其作为初始值开展双向流固耦合数值分析,用以得到密封区域的油膜厚度和油膜压力分布,并可在此基础上预测泄漏量和摩擦力。

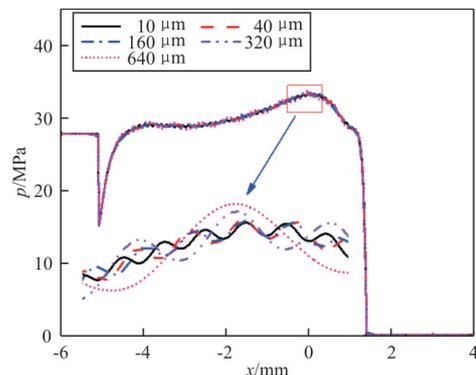
### 3.1 正弦粗糙表面波长和幅值对油膜厚度和压力的影响

在算例中,共同的输入参数包括:轴的弹性模量  $E=210$  GPa,泊松比  $\nu=0.3$ ,密封压力  $p_{\text{seal}}=28$  MPa,出口压力  $p_{\text{out}}=0.1$  MPa,液压油的环境密度  $\rho_0=800$  kg/m<sup>3</sup>。

活塞杆运动速度  $v=0.1$  m/s,润滑油动力黏度  $\eta_0=0.01$  Pa·s,正弦粗糙幅值  $R_a=0.1$  μm,正弦粗糙表面的波长  $\omega$  分别取为 10、40、160、320、640 μm 时,对应的密封区域油膜压力分布和油膜厚度分布及压力和膜厚的局部放大图如图 4 所示。



(a) 膜厚分布



(b) 压力分布

图 4 不同正弦波长对应的膜厚和压力分布( $R_a=0.1$  μm)

Fig. 4 Distributions of film thickness and pressure for different wavelength of sinusoidal roughness ( $R_a=0.1$  μm)

从图 4(a)可以看出:虽然油膜分布适应表面形貌发生变化,但是在此工况下,正弦粗糙表面的波长变化对密封区域油膜厚度的影响很小。从图 4(b)可以看出:随着正弦波长增大,压力的波动减

弱,这是与表面形貌变化相一致的;但是正弦波长增大引起油膜压力幅值增大,且波长越大对应的油膜压力的幅值越大。

活塞运动速度  $v=0.1\text{ m/s}$ , 润滑油动力黏度  $\eta_0=0.01\text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 正弦粗糙表面的波长  $\omega$  分别为  $10, 40, 160, 320, 640\ \mu\text{m}$ , 正弦粗糙幅值增大为  $R_a=0.6\ \mu\text{m}$  时, 对应的密封区域油膜压力分布和油膜厚度分布及局部放大图如图 5 所示。

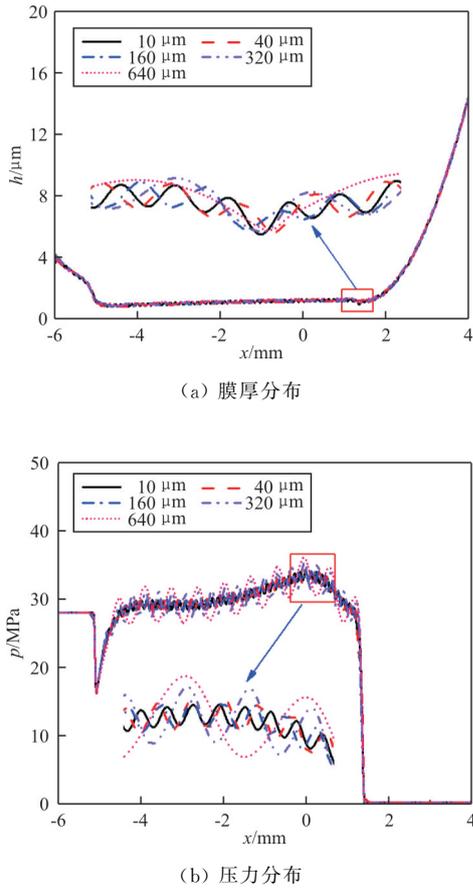


图 5 不同正弦波长对应的膜厚和压力分布 ( $R_a=0.6\ \mu\text{m}$ )

Fig. 5 Distributions of film thickness and pressure for different wavelength of sinusoidal roughness ( $R_a=0.6\ \mu\text{m}$ )

从图 4~图 5 可以看出: 正弦粗糙表面的幅值增大, 导致油膜厚度和油膜压力的波动幅值增大。从图 5(a) 可以看出: 存在显著的油膜波动, 油膜波动与正弦表面的波形是适应的, 波长越小波动越剧烈。从图 5(b) 可以看出: 即使没有局部放大图, 也可以观察到明显的由于表面粗糙形貌引起的压力波动, 且比图 4(b) 中  $R_a=0.1\ \mu\text{m}$  时的压力波动要

显著的多。因此得出: 正弦幅值和波长越大, 油膜压力波动的幅值越大。

### 3.2 正弦粗糙表面波长对密封区域最小油膜厚度的影响

三个不同运动速度  $v$  分别取  $0.04, 0.1, 0.2\text{ m/s}$ , 以及三个不同正弦粗糙表面幅值 ( $R_a$  分别为  $0.1, 0.3, 0.6\ \mu\text{m}$ ) 对应的最小油膜厚度如图 6 所示, 可以看出: 总体来说, 密封间隙最小膜厚随正弦粗糙表面波长变化而幅度变化较小, 最小膜厚没有随着正弦粗糙表面波长变化呈现单调变化或者出现显著的趋势性变化。这说明正弦粗糙表面波长  $\omega_x$  对密封间隙最小膜厚的影响作用较弱。

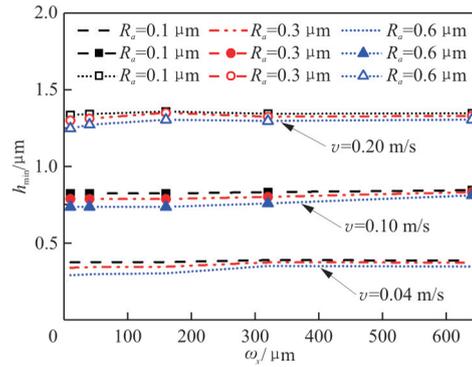
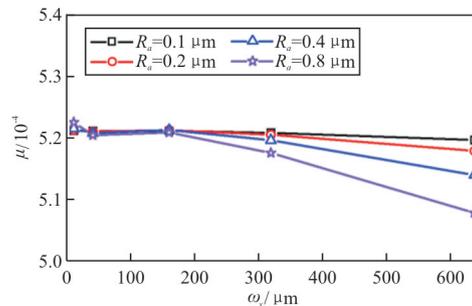
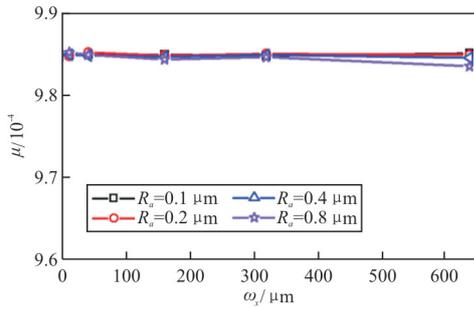


图 6 正弦波长变化对最小膜厚的影响  
Fig. 6 Influence of wavelength on the minimum film thickness

正弦粗糙表面波长变化对摩擦系数的影响如图 7 所示, 可以看出: 随着正弦粗糙表面波长的增大, 摩擦系数呈现单调减小的趋势, 且正弦粗糙表面幅值大 (如  $R_a=0.8\ \mu\text{m}$ ) 时对应的摩擦系数受波长变化的影响要更大一些; 活塞运动速度增大时, 波长对摩擦系数的影响作用减弱。



(a) 速度  $v=0.04\text{ m/s}$

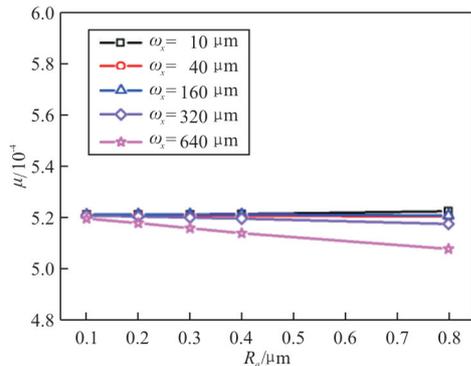


(b) 速度  $v=0.2 \text{ m/s}$

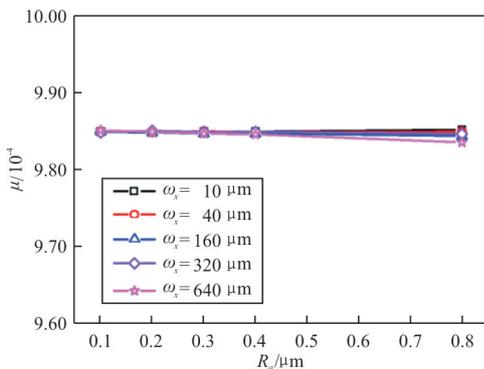
图 7 正弦粗糙表面波长变化对摩擦系数的影响

Fig. 7 Influence of wavelength on the friction coefficient

不同正弦粗糙表面波长下,摩擦系数随粗糙表面幅值的变化如图 8 所示,可以看出:正弦粗糙表面幅值增大有利于摩擦系数的减小;波长增大有利于减小摩擦系数,且速度增大时正弦粗糙表面幅值变化对摩擦系数的影响作用减弱。



(a) 速度  $v=0.04 \text{ m/s}$



(b) 速度  $v=0.2 \text{ m/s}$

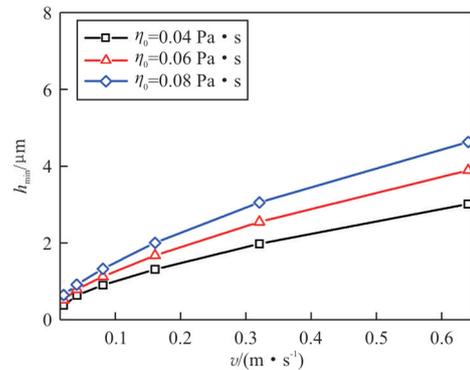
图 8 正弦粗糙表面幅值变化对摩擦系数的影响

Fig. 8 Influence of amplitude of sinusoidal roughness on the friction coefficient

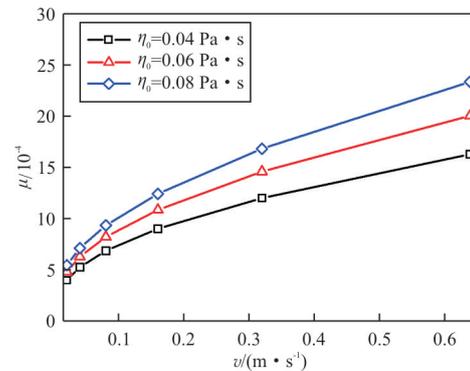
### 3.3 活塞运动速度和液压油黏度变化对密封间隙最小油膜厚度、摩擦系数和泄漏量的影响

在分析运动速度的影响时,取三个不同的液压油黏度进行计算。

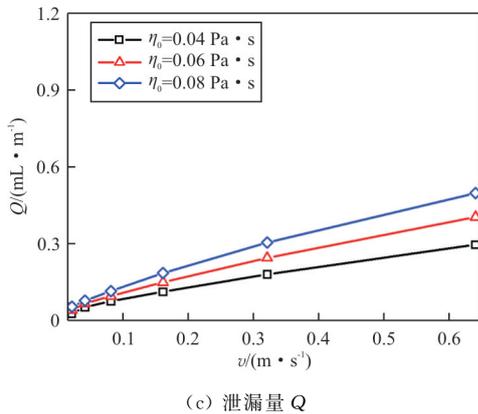
正弦粗糙幅值  $R_s=0.2 \mu\text{m}$ ,波长  $\omega_s=160 \mu\text{m}$  时,三个不同液压油黏度  $\eta_0$  下,活塞运动速度  $v$  对密封间隙最小膜厚  $h_{\min}$ 、泄漏量  $Q$  和摩擦系数  $\mu$  的影响如图 9 所示,可以看出:密封间隙最小膜厚  $h_{\min}$ 、泄漏量  $Q$  均随着活塞运动速度  $v$  增大而单调增大,这是由于活塞运动速度  $v$  增大,增强了对油液的卷吸效应,有利于油膜厚度的增大;全膜润滑的摩擦系数也相应增大,摩擦系数随着运动速度  $v$  增大的原因主要是剪切效应增大导致的。



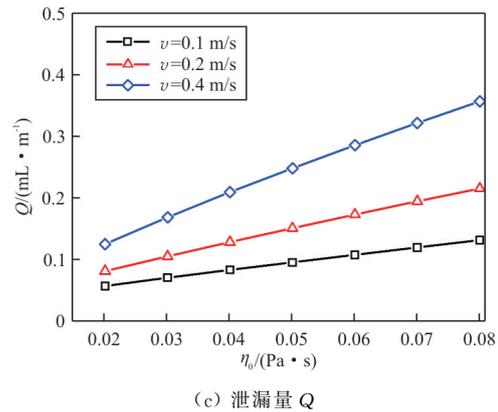
(a) 最小膜厚  $h_{\min}$



(b) 摩擦系数  $\mu$

图 9 活塞运动速度  $v$  变化的影响Fig. 9 Effects of the velocity  $v$  of piston

正弦粗糙幅值  $R_a = 0.2 \mu\text{m}$ , 波长  $\omega_x = 160 \mu\text{m}$  时, 三个不同活塞运动速度  $v$  下, 液压油黏度  $\eta_0$  对密封间隙最小膜厚  $h_{\min}$ 、摩擦系数  $\mu$  和泄漏量  $Q$  的影响如图 10 所示, 可以看出: 液压油黏度  $\eta_0$  对密封间隙最小膜厚  $h_{\min}$ 、摩擦系数  $\mu$  和泄漏量  $Q$  的影响作用与运动速度  $v$  的影响作用类似, 液压油黏度  $\eta_0$  增大引起最小膜厚  $h_{\min}$ 、摩擦系数  $\mu$  和泄漏量  $Q$  的单调增大。

图 10 液压油黏度  $\eta_0$  变化的影响Fig. 10 Effects of the viscosity  $\eta_0$  of lubricant

对于表面不可避免地存在粗糙度的密封圈来说, 增大液压油的黏度或活塞杆的运动速度, 有利于增大密封间隙油膜厚度, 对密封圈的润滑是有利的; 但同时会导致泄漏量和流体润滑摩擦系数的增大。液压油黏度的主要影响因素是油液本身的品质和环境温度, 对于特定的航空润滑油来说, 想要达到低泄漏率和长寿命, 采用的措施是控制作动器的运行温度在合理范围内。

## 4 结 论

(1) 正弦粗糙表面的幅值和波长增大, 引起油膜厚度和油膜压力的波动幅值增大, 但摩擦系数减小。

(2) 正弦粗糙表面的幅值增大, 引起密封间隙最小膜厚的减小, 而波长对最小膜厚的影响作用不大。

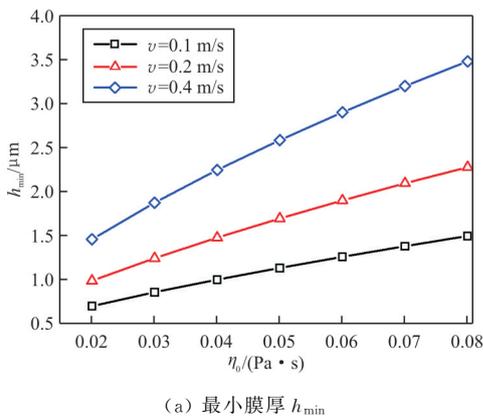
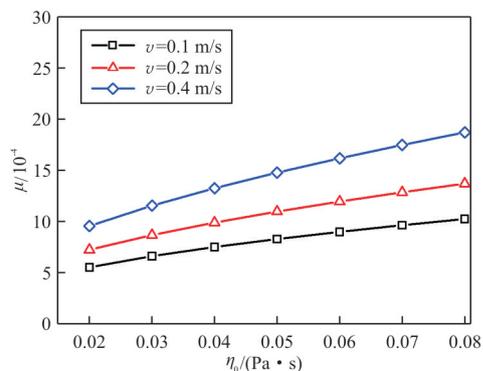
(3) 随着速度增大, 正弦粗糙表面的幅值和波长变化对摩擦系数的影响作用减弱。

(4) 液压油黏度和活塞杆运动速度的增大有利于密封圈的润滑, 但同时会导致泄漏量和流体润滑摩擦系数的增大, 在实际使用时需要综合考虑二者对密封性能和长期使用寿命的影响。

## 参考文献

- [1] 王宽, 黄喜平, 王鸿鑫. 基于 AMESim 的大型飞机液压能源系统热特性仿真分析方法[J]. 流体传动与控制, 2016 (3): 23-27.

WANG Kuan, HUANG Xiping, WANG Hongxin. Thermal-hydraulic system modeling and simulation of large aircraft hydraulic systems based on AMESim[J]. Fluid Power

(a) 最小膜厚  $h_{\min}$ (b) 摩擦系数  $\mu$

- Transmission and Control, 2016(3): 23-27. (in Chinese)
- [2] NIKAS G K, SAYLES R S. Computational model of tandem rectangular elastomeric seals for reciprocating motion [J]. Tribology International, 2006, 39(7): 622-634.
- [3] NIKAS G K. Fast performance-analysis of rectangular-rounded hydraulic reciprocating seals; mathematical model and experimental validation at temperatures between  $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $+135\text{ }^{\circ}\text{C}$  [J]. Tribology International, 2018, 128: 34-51.
- [4] SCARAGGI M, ANGERHAUSEN J, DOROGIN L, et al. Influence of anisotropic surface roughness on lubricated rubber friction: extended theory and an application to hydraulic seals[J]. Wear, 2018, 410: 43-62.
- [5] CRUDU M, FATU A, HAJJAM M, et al. Numerical and experimental study of reciprocating rod seals including surface roughness effects[J]. Sealing Technology, 2013(6): 8-11.
- [6] BHAUMIK S, KUMARASWAMY A, GURUPRASAD S et al. Study of effect of seal profile on tribological characteristics of reciprocating hydraulic seals[J]. Tribology in Industry, 2015, 37(2): 264-274.
- [7] 张延良, 周军, 邓建新, 等. 偶件表面粗糙度对 PTFE 密封材料摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2011, 36(6): 69-72.  
ZHANG Yanliang, ZHOU Jun, DENG Jianxin, et al. Effect of the surface roughness of matching materials on the friction and wear behavior of PTFE[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(6): 69-72. (in Chinese)
- [8] 董峰. 配副表面粗糙纹理对橡胶密封圈摩擦学性能影响研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.  
DONG Feng. Study on effect of surface rough texture of counterpart on tribological characteristics of rubber seal[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] 欧阳小平, 薛志全, 彭超, 等. 基于混合润滑理论的航空作动器密封性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(2): 251-257.  
OUYANG Xiaoping, XUE Zhiquan, PENG Chao, et al. Analysis on aircraft cylinder seal property based on mixed lubrication theory [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(2): 251-257. (in Chinese)
- [10] XIANG Chong, GUO Fei, LIU Xiang, et al. Numerical algorithm for fluid-solid coupling in reciprocating rod seals[J]. Tribology International, 2020, 143: 1078.
- [11] 李晓芳, 杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 弹性体, 2005, 15(1): 50-58.  
LI Xiaofang, YANG Xiaoxiang. A review of elastic constitutive model for rubber materials[J]. China Elastomerics, 2005, 15(1): 50-58. (in Chinese)
- [12] 胡琦. 液压伺服作动器 O 形密封圈实验研究与有限元分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
HU Qi. Hydraulic servo actuator O-ring test and finite element analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] HU Y Z, ZHU D. A full numerical solution to the mixed lubrication in point contacts [J]. Journal of Tribology, 2000, 122(1): 1-9.
- [14] LIU S B, WANG Q, LIU G. A versatile method of discrete convolution and FFT (DC-FFT) for contact analyses [J]. Wear, 2000, 243: 101-111.

### 作者简介:

闫晓亮(1985—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:高压长寿命航空密封技术、减摩抗磨损技术、流体润滑技术。

杜晓琼(1990—),女,硕士,工程师。主要研究方向:结构力学、结构优化设计技术、高压长寿命航空密封技术。

常凯(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:减摩抗磨损技术、高压长寿命航空密封技术。

李梦晨(1991—),女,硕士,工程师。主要研究方向:高压气动密封技术、液气气动作动技术。

(编辑:丛艳娟)