

磁流变液环境下密封副非线性磨损行为研究

李姗姗¹ 孙兴伟^{1*} 杨恒² 乔赫廷¹

1. 沈阳工业大学机械工程学院, 沈阳, 110870

2. 沈阳工业大学信息科学与工程学院, 沈阳, 110870

摘要:为研究磁流变液摩擦动力学行为对密封副磨损机理的影响,建立表面粗糙度与铁粉耦合效应下的动态密封磨损模型,利用ANSYS对其进行微观接触力学仿真分析,并通过自制往复动态密封磨损试验装置测试不同表面粗糙度活塞杆样本在两种介质下的摩擦磨损性能。结果表明,粗糙纹理与铁粉瞬时接触不仅能够缓解O形圈在微凸体交变剪切作用下表面出现的疲劳裂纹,还有助于削弱铁粉对活塞杆产生的微切割效应,使密封副在磁流变液工况下展现出良好的摩擦学性能;铁粉介于抛光样本与O形圈之间长期承受微观纹理施加的横向剪切力及纵向挤压力,迫使大量铁粉嵌入O形圈内部,并在往复运动的活塞杆表面产生明显的犁沟式磨痕,导致系统因两体磨粒磨损而过早引发密封失效。

关键词:磁流变液;表面粗糙度;磨损特性;摩擦动力学行为;磨粒磨损

中图分类号:TH117

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Nonlinear Wear Behavior of Sealing Pairs in Magnetorheological Fluid Environment

LI Shanshan¹ SUN Xingwei^{1*} YANG Heng² QIAO Heting¹

1.School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870

2.School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870

Abstract: To investigate the effects of tribodynamics behavior in MRF on the wear mechanism of sealing pairs, the dynamic sealing wear model was established considering coupling effects of surface roughness and iron particles, with ANSYS employed for microscopic contact mechanics simulation. Additionally, the friction and wear performance of piston rods with different surface roughnesses in two media was evaluated by self-developed reciprocating dynamic seal wear test device. The results demonstrate that the instantaneous contact between rough texture and iron particles in sealing interfaces alleviates fatigue cracks on O-ring surfaces under alternating shearing actions of asperities, and help to avoid the micro-cutting effects of iron particles on the surface piston rods. As a result, the sealing pairs exhibit good tribological performance in MRF environment. However, iron particles situated between polished sample and O-ring are continuously subjected to the transverse shear forces and longitudinal extrusion pressures by micro-texture. Consequently, numerous iron particles are forced to embed in the O-rings, and obvious furrow-like wear marks are produced on the surfaces of reciprocating piston rods, causing premature sealing failure due to the two-body abrasive wear.

Key words: magnetorheological fluid(MRF); surface roughness; wear characteristics; tribodynamics behavior; abrasive wear

0 引言

磁流变液(magnetorheological fluid, MRF)因具有表观黏度随磁场实时变化的流变特性被广泛应用于阻尼控制、柔性驱动等领域以提供精确阻尼及运动控制^[1]。其中,磁流变阻尼器是典型

的动态响应控制装置,活塞杆在外部激励(如冲击、振动)作用下的往复运动迫使悬浮铁粉被夹带进入密封界面,导致密封失效风险增大,进而削弱其在机械系统中产生预期的阻尼性能^[2]。因此,研究密封副在磁流变液环境下的非线性磨损行为,揭示磨粒磨损机制,对延长密封副服役寿命、提升磁流变阻尼器工作性能具有重要的工程意义。

表面粗糙度是决定密封副间润滑机制与接触状态的关键性因素^[3],恰当的润滑机制有助于改

收稿日期:2024-08-30

基金项目:国家自然科学基金(52005346, 51505298);辽宁省教育厅青年项目(LJ212410142021);辽宁省科技厅联合基金(2024MSLH359);辽宁省教育厅面上项目(JYTMS20231191)

善 O 形圈表面因微观纹理往复剪切、挤压作用引起的疲劳磨损^[4],而优化的接触状态能够有效减小摩擦热、避免早期形成转移膜导致的密封失效^[5]。鉴于此,PERSSON^[6]建立了弹塑性接触力学理论模型,通过综合考虑配副表面粗糙度、橡胶分子间作用力以及非线性特性等因素,分析密封界面内的摩擦响应机制。SCARAGGI 等^[7]基于多尺度平均场模型,开展了密封界面内表面粗糙度对接触力学行为影响的研究工作,从理论上揭示了摩擦磨损的形成机理及其演变过程。SILVA 等^[8]使用机器学习技术优化配副表面微观纹理,并利用深度神经网络预测其在润滑条件下的 Stribeck 曲线,以实现密封副间摩擦磨损的有效控制。AYMARD 等^[9]提出了一种通用的元界面设计策略,以制备具有特定法向力和摩擦力关系的摩擦界面,使密封副在往复动态密封过程中展现出良好的摩擦学性能。

上述研究表明配副表面微观纹理在提高密封副抗磨损疲劳特性方面已取得了诸多进展,但面对磁流变液内部悬浮铁粉在密封间隙内滞留、聚集及团簇的问题,还需综合考虑铁粉摩擦动力学行为引起的密封性能退化及失效。PEÑA-PARÁS 等^[10]利用分子动力学(MD)模拟分析和摩擦学试验验证相结合的方式,从微观尺度深入研究接触界面内磨粒粒度与运动模式之间的关系,以及其对摩擦行为、磨损特性的影响。李星亮等^[11]在此基础上开展了微织构钛合金在不同磨粒粒度下的摩擦磨损试验研究,发现磨料粒度与微观纹理的匹配性显著改善了材料减摩擦抗磨性能。类似的结果在沈明学等^[12]和 SONG 等^[13]的研究中得到了证实,并提出密封间隙内微米尺度铁粉在纵向挤压力的作用下易嵌入 O 形圈内部,间接保护其免受微凸体往复耕犁磨损效应的同时,迫使磨粒在配副表面形成明显的“微切割”痕迹。此外,在磁流变液摩擦学性能研究中,SHAHRIVAR 等^[14]还发现纳米铁粉在边界润滑接触区域展现出比微米级铁粉更好的填充效果,从而避免了接触副因局部应力集中、磨粒磨损导致的疲劳损伤。这表明微观纹理往复运动引起悬浮铁粉在接触界面内接触状态、运动模式(滚动和/或滑动)的变化是造成磨损机制发生转变的主要原因。

本文基于 Persson 接触力学理论建立密封副磨粒磨损力学模型,对有、无铁粉工况下具有不同表面粗糙度的活塞杆样本与 O 形圈之间的非线性磨损行为开展模拟分析及试验研究,探讨微观

纹理与铁粉耦合效应对密封副摩擦学性能的影响并解析其内在磨损机理。

1 密封副磨粒磨损力学模型

1.1 表面粗糙度功率谱密度函数

考虑到微观纹理对 O 形圈表面产生的黏附、耕犁效应主要由粗糙度功率谱密度函数 $C(q)$ 决定,本文利用自相关函数 $R(x, y)$ 来分析表面轮廓间的相关性,量化表面粗糙度的纹理属性及特征,以预测功率谱密度函数在不同频域 q 范围内密封副间摩擦学行为及磨损特性^[15]。

图 1 展示了基体局部表面微观纹理相对于参考平面的高度分布 $z(x_0, y_0)$,其中参考平面位于轮廓的平均高度处, (x_0, y_0) 代表参考平面在笛卡尔坐标系中的坐标。假定基体表面是均匀的(即其统计特性平移不变),则轮廓间的相关性仅由波数 $k = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 决定而与极角 $\phi = \arctan(y/x)$ 的方向无关,基体表面纹理间的自相关函数可表示为

$$R(x, y) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L^2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-L/2}^{L/2} z(x + x_0, y + y_0) \cdot z(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \quad (1)$$

基于 Wiener-Khinchin 定理,将自相关函数进行傅里叶变换,根据其幅度的平方可得到基体表面粗糙度功率谱密度函数 $C(q)$ 的表达式:

$$C(q) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) \exp(-i(xq_x + yq_y)) dx dy \quad (2)$$

式中:二维波矢量 $q = (q_x, q_y)$ 代表了轮廓在 x, y 方向上的空间频率向量。

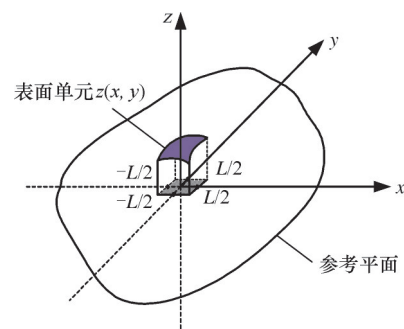


图 1 基体表面微观纹理相对于参考平面的高度分布
Fig.1 The height distribution of microscopic texture on substrate surface relative to the reference plane

基于 MRF-J25T 型磁流变液的技术参数,在磨粒磨损力学模型中假设铁粉颗粒为球形,粒径 φ 范围为 $1 \sim 5 \mu\text{m}$,且 $\varphi \sim N(\mu, s^2)$,则其粒径分布函数 $f(\varphi)$ 可表示为

$$f(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} \exp\left(-\frac{(\varphi - \mu)^2}{2s^2}\right) \quad (3)$$

式中： μ 为均值； s 为标准差。

基于统计卷积法推导耦合功率谱密度函数 $C'(q)$ ，以描述铁粉颗粒在不同粒径下与表面纹理的耦合作用：

$$C'(q) = \int_1^5 C(q) f(\varphi) \exp\left(-\alpha\left(q - \frac{1}{\varphi}\right)^2\right) d\varphi \quad (4)$$

$$q = |q|$$

式中： α 为控制参数，用于调整铁粉粒径与表面空间频率的匹配程度。

1.2 动态密封磨损分析

微观纹理往复运动诱发 O 形圈表面材料迁移，形成一系列垂直于滑动方向的平行脊线，即“Schallamach 波纹”，如图 2 所示，致使 O 形圈在交变应力的作用下出现表面改性、分层及剥离的疲劳裂纹。这将破坏密封界面内稳定的接触状态，加剧密封副间摩擦磨损，导致密封性能下降，同时引起磁流变阻尼器可靠性降低、阻尼可调范围缩短、响应时间延长、能耗增大等问题。

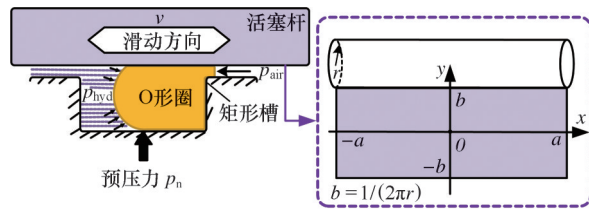


图 2 动态密封接触及坐标系转换示意图

Fig.2 Schematic diagram of dynamic sealing contact and coordinate system transformation

通过求解 Archard 磨损方程^[16]获得密封界面内接触点 m 在第 n 次（即 t_n 时刻）产生的磨损深度 $d_{m,n}$ ，其表达式为

$$d_{m,n} = d_{m,n-1} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} K_h p_{m,n}(t) v dt \quad (5)$$

$$D = \sum_{n=1}^N d_{m,n}$$

式中： K_h 为磨损系数； v 为活塞杆往复运动速度； $p_{m,n}(t)$ 为接触点 m 处随时间变化的压力； D 为密封界面累积磨损量； t 为磨损深度积累的时间变量。

式(5)显示磨损深度 $d_{m,n}$ 随时间的非线性变化与接触点处的压力 $p_{m,n}(t)$ 密切相关，故减小 $p_{m,n}(t)$ 对提高密封副耐磨性至关重要。为此，应用 Hertz 接触理论分析活塞杆表面微凸体产生的接触压力：

$$p_{m,n}(t) = \frac{4}{3} E^* r^{\frac{1}{2}} \epsilon_{m,n}^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

$$E^* = \frac{E}{1 - \nu^2}$$

式中： E 、 ν 分别为 O 形圈的弹性模量和泊松比； r 为微凸体

半径； E^* 为等效弹性模量，其表达式适用于接触副两者之间弹性模量相差较大的情况。

式(6)揭示了微观纹理往复运动所引起的 O 形圈法向应变 $\epsilon_{m,n}$ 是导致疲劳裂纹萌生及扩展的主要原因。

图 3a 展示了相同尺度下，不同波长 λ 、振幅 A 的表面微观纹理在密封界面内产生的接触压力及法向应变。由图可发现，粗糙表面微凸体与 O 形圈的接触频率远小于光滑表面，导致 O 形圈承受较高的接触压力（即 $p_{m,n} > p_{s,m}$ ）和法向应变（即 $\epsilon_{m,n} > \epsilon_{s,m}$ ）。而当悬浮铁粉被夹带进入密封间隙与粗糙纹理瞬时接触时，活塞杆表面粗糙度上的最小波矢量 q_0 将由堆积的铁粉形貌决定，如图 3b 所示。这在一定程度上削弱了微凸体在 O 形圈内部产生的法向应变 $\epsilon'_{m,n}$ ，致使接触压力 $p'_{m,n}$ 及能量损耗 $\Delta E'_{el}$ 减小（即 $\epsilon_{m,n} > \epsilon'_{m,n}$ ）；且球形铁粉在接触间隙内的摩擦动力学行为更倾向于以滚动模式为主，从而有效增强了铁粉作为固体润滑的减摩效应。综上可推测出，密封副在磁流变液工况下的非线性磨损行为异于常规介质，应更多地考虑微观纹理与铁粉的有效耦合在改善密封副磨损特性中的作用。

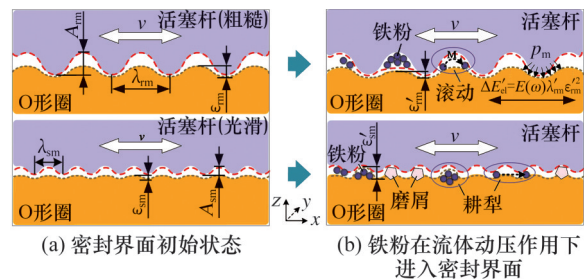


图 3 磁流变液内部悬浮铁粉引起密封磨损示意图

Fig.3 Schematic diagram of sealing wear caused by suspended iron powder in MRF

1.3 磨粒磨损力学特性数值计算

假定 O 形圈的材质是丁腈橡胶，它在长波长变形下具有均匀、各向同性的特性^[17]。基于弹性理论，可计算应力分布 $\sigma_i = \sigma_{3i}$ 在 $Z=0$ 面上产生的位移响应 $u_i(x, t)$ 。这里， σ_{3i} 表示位于 $Z=0$ 面上的应力张量分量， i 为 1、2、3 分别对应 x 、 y 、 z 方向的应力分量。 $u_i(q, \omega)$ 为 $u_i(x, t)$ 关于二维矢量 $x = (x, y)$ 和时间 t 的傅里叶变换结果，即波矢 - 频率域 (q, ω) 下的位移场第 i 分量：

$$u_i(q, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \int_0^\infty u_i(x, t) dx dy \exp(-i(q \cdot x - \omega t)) dt \quad (7)$$

式中： ω 为扰动角频率。

$\sigma_i(q, \omega)$ 与 $u_i(q, \omega)$ 的傅里叶变换相似，此处

不再赘述。

假设表面应力 $\sigma_z(\mathbf{q}, \omega)$ 仅作用于 z 向, 且界面微观轮廓的梯度 $|\nabla A'(\mathbf{x})| < 1$, 其中 $A'(\mathbf{x})$ 表示微观尺度下表面纹理与铁粉协同作用形成的等效表面轮廓高度。据此, O形圈表面应力-应变关系可表示为

$$\begin{aligned} \sigma_z(\mathbf{q}, \omega) &= M_{zz}^{-1}(\mathbf{q}, \omega) u_z(\mathbf{q}, \omega) \\ M_{zz}^{-1}(\mathbf{q}, \omega) &= -\frac{2qE(1-\nu)}{(1+\nu)(3-4\nu)} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $E(\omega), \nu(\omega)$ 分别为 O形圈复弹性模量及泊松比; $M_{zz}^{-1}(\mathbf{q}, \omega)$ 表示在波矢 \mathbf{q} 和频率 ω 域下 O形圈表面法向应力与法向位移之间的比例关系, 即频域法向动力学刚度或阻抗。

动态密封环境下, O形圈在法向预压缩作用下实现自密封, 随后在周期性外部扰动下其表面沿 x 方向发生微小周期位移。此时, 因活塞杆表面粗糙度诱发的 O形圈表面位移场可表示为

$$\begin{aligned} u_z(\mathbf{x}, t) &= u_z(\mathbf{x} - \mathbf{r}(t)) \\ \mathbf{r}(t) &= x_0(t) \hat{\mathbf{x}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{r}(t)$ 为 O形圈在周期扰动下沿 x 方向的位移矢量; $x_0(t)$ 为随时间变化的幅值函数; $\hat{\mathbf{x}}$ 为 x 方向的单位矢量。

对式(7)进行傅里叶逆变换得

$$u_z(\mathbf{x}, t) = \int_{q_0}^{q_1} \int_{q_0}^{q_1} \int_{\omega_0}^{\omega} u_z(\mathbf{q}, \omega) dq_x dq_y \exp(i(\mathbf{q} \cdot \mathbf{x} - \omega t)) d\omega \quad (10)$$

式中: q_0 与 q_1 分别为长距离截断波矢及短距离截断波矢; ω_0 为 O形圈的最小基频, 当 $\omega \geq \bar{\omega}$ 时 O形圈被认为发生高频振动(即 $\bar{\omega} = 1000$ Hz)。

联立式(9)、式(10)得

$$u_z(\mathbf{q}, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \int_0^\infty dx dy u_z(\mathbf{x}, t) \exp(-i(\mathbf{q} \cdot (\mathbf{x} + \mathbf{r}(t)) - \omega t)) dt \quad (11)$$

令 $u_z(\mathbf{q}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-a}^a \int_{-b}^b u_z(\mathbf{x}, t) \exp(-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{x}) dx dy$, 可得

$$\begin{aligned} u_z(\mathbf{q}, \omega) &= f(\mathbf{q}, \omega) u_z(\mathbf{q}) \\ f(\mathbf{q}, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \exp(-i(\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}(t) - \omega t)) dt \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $u_z(\mathbf{q})$ 为 O形圈表面法向位移 $u_z(\mathbf{x}, t)$ 关于二维矢量 \mathbf{x} 的傅里叶变换结果, 描述了位移场在波矢 \mathbf{q} 域中的分布。

假设摩擦剪应力 σ_t 的功耗主要源自微凸体法向加载过程中的瞬时能量耗散 $\sigma_t S_0 \dot{x}_0(t)$:

$$\sigma_t S_0 \dot{x}_0(t) \approx \int_{-a}^a \int_{-b}^b \dot{u}_z(\mathbf{x}, t) \cdot \sigma_z(\mathbf{x}, t) dx dy \quad (13)$$

式中: S_0 为实际接触面积; $\dot{x}_0(t)$ 为切向滑移速度; $\sigma_z(\mathbf{x}, t)$ 为 t 时刻密封界面在空间点 \mathbf{x} 处的法向应力分布。

将式(9)代入式(13)得

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}_z(\mathbf{x}, t) &= -\dot{x}_0(t) \frac{\partial}{\partial x} u_z(\mathbf{x} - \mathbf{r}(t)) \\ \sigma_t(t) &= \frac{1}{S_0} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{\partial}{\partial x} \dot{u}_z(\mathbf{x}, t) \cdot \sigma_z(\mathbf{x}, t) dx dy \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将式(8)代入式(14), 并与式(11)联立得

$$\begin{aligned} \sigma_t(t) &= \frac{(2\pi)^2}{S_0} \int_{q_0}^{q_1} \int_{q_0}^{q_1} (-iq_x) M_{zz}^{-1}(-\mathbf{q}, -\omega) \cdot \\ &\quad \langle u_z(\mathbf{q}) u_z(-\mathbf{q}) \rangle dq_x dq_y \end{aligned} \quad (15)$$

由于 $u_z(\mathbf{x}, t) \approx A'(\mathbf{x})$, 密封副因磨粒磨损产生的摩擦剪应力可表示为

$$\begin{aligned} \sigma_t &= -i \frac{(2\pi)^2}{S_0} \int_{q_0}^{q_1} \int_{q_0}^{q_1} q_x \langle A'(\mathbf{q}) A'(-\mathbf{q}) \rangle \cdot \\ &\quad M_{zz}^{-1}(-\mathbf{q}, -q_x \nu) dq_x dq_y \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $A'(\mathbf{q})$ 为 $A'(\mathbf{x})$ 关于空间变量 \mathbf{x} 的傅里叶变换, 反映界面粗糙度梯度在 \mathbf{q} 域上的分布特性; $\langle A'(\mathbf{q}) A'(-\mathbf{q}) \rangle$ 为 $A'(\mathbf{x})$ 在 \mathbf{q} 和 $-\mathbf{q}$ 处傅里叶分量的自相关函数, 用于表征界面梯度场的功率谱密度。

令 $\langle A' \rangle = 0$, 得

$$\begin{aligned} \langle A'(\mathbf{q}) A'(-\mathbf{q}) \rangle &= \\ \frac{S_0}{(2\pi)^4} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \langle A'(\mathbf{x}) A'(0) \rangle \exp(-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{x}) dx dy &= \\ \frac{S_0}{(2\pi)^2} C'(\mathbf{q}) \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\langle A' \rangle$ 为 $A'(\mathbf{x})$ 的统计平均值; $A'(0)$ 为 $A'(\mathbf{x})$ 关于空间变量 \mathbf{x} 进行傅里叶变换后在零波矢处的分量。

将式(17)代入式(16)中, 并与式(8)联立得

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \int_{q_0}^{q_1} \int_{q_0}^{q_1} q^2 C'(\mathbf{q}) dq_x dq_y \int_0^{2\pi} d\psi \cos \psi \operatorname{Im} \frac{E(q\nu \cos \psi)}{1 - \nu^2} \quad (18)$$

式中: 极角 ψ 为 O形圈表面波动与微观纹理往复运动方向间的夹角。

将式(18)两端同除以接触压力 p 得

$$f = \frac{1}{2} \int_{q_0}^{q_1} \int_{q_0}^{q_1} q^3 C'(\mathbf{q}) dq_x dq_y \int_0^{2\pi} d\psi \cos \psi \operatorname{Im} \frac{E(q\nu \cos \psi)}{(1 - \nu^2) p} \quad (19)$$

式中: f 为摩擦因数, 其表达式反映了忽略闪温影响下与功率谱密度函数 $C'(\mathbf{q})$ 、O形圈弹性模量 $E(\omega)$ 等变量之间的内在关系。

2 密封副磨粒磨损特性有限元分析

2.1 有限元接触几何模型

基于试验装置的内部结构按 1:1 比例构建密封界面内有、无铁粉工况下的有限元接触模型, 通过接触副材料力学性能(表 1)、网格划分、接触属性、加载与边界条件等方面的设置, 模拟分析 O形圈在约束载荷作用下的密封性能及其在微观纹理往复运动下产生的应力分布。

模型采用四边形单元 PLANE182 进行网格划分, 并通过密封区域网格细化的方式捕捉因磨

表1 接触副材料力学性能

Tab.1 Mechanical properties of materials of contact pairs

接触副	弹性模量/ MPa	材质	泊松比	屈服应力/ MPa	硬度
O形圈	37.98	NBR	0.49	20.76	70 HA
活塞杆	193 000	316L	0.31	200	180 HA
铁粉	210 000	Fe(OH) ₃	0.28	175	279 HA

损引起的接触位置随时间变化的瞬态响应。根据接触区域尺寸、活塞杆运动速度,设置模拟时间步长 $\Delta t = 6.7 \text{ ms}$, 每步迭代次数 $n = 600$ 。经网格收敛性分析发现,网格尺寸小于 $2 \mu\text{m}$ 时模拟结果趋于一致,故选 $2 \mu\text{m}$ 作为网格尺寸进行后续计算。此外,为更好地预测密封副在磁流变液工况下的非线性磨损行为,应用 Umeshmotion 用户子程序与 ALE 自适应网格技术,实现模型网格的自动更新,避免因材料移除而导致的网格畸变。

接触分析设置中,依据密封磨损试验结果定义接触副间摩擦因数,选择“Augmented Lagrange”算法防止接触面间出现相互渗透的现象,提高计算的收敛性。并通过“Nodal-Projected Normal from Contact”接触检测方式来准确计算密封界面内接触节点 m 处的应力分布及磨损。

载荷及边界条件设置上保证与试验一致,操作步骤如下:①活塞杆右端面施加位移约束 ($\epsilon_x = 0, \epsilon_y = 0, \epsilon_z = 0.73 \text{ mm}$),并对模型对称面施加 x 方向对称约束,以实现活塞杆-O形圈之间的法向预压缩接触;②采用 APDL 命令流的方式在 O 形圈两端施加流体压力渗透载荷 $p_{\text{air}} = 0$ 及 $p_{\text{MRF}} = 3 \text{ MPa}$,得到图 4 所示的有限元接触压力云图,可以发现 O 形圈通过改变接触形貌实现了“自密封”功能,且在流体动压作用下具有良好的密封可靠性^[18];③从此至循环结束,定义活塞杆往复运动速度及方向, $v_x = 0.15 \text{ m/s}, v_z = 0$,通过迭代算法分析求解活塞杆在不同表面粗糙度下密封副磨粒磨损行为及磨销量。具体模拟流程见图 5。

2.2 接触力学行为分析结果与讨论

磁流变液工况下的动态密封磨损是一个复杂的多因素耦合过程,不仅需要考虑到 O 形圈在微观纹理往复交变应力作用下其表面形成的“Schallamach 波纹”易导致疲劳裂纹的形成及扩展,更需要关注铁粉在密封间隙内摩擦动力学行为引起的密封性能退化及失效。为此,本节通过改变活塞杆表面粗糙度 ($3.2 \mu\text{m}, 1.6 \mu\text{m}, 0.5 \mu\text{m}, 0.18 \mu\text{m}$ 分别对应标记为 T01~T04),对比分析密封界面内有、无铁粉工况下 O 形圈表面能量损耗 E_{el} 、接

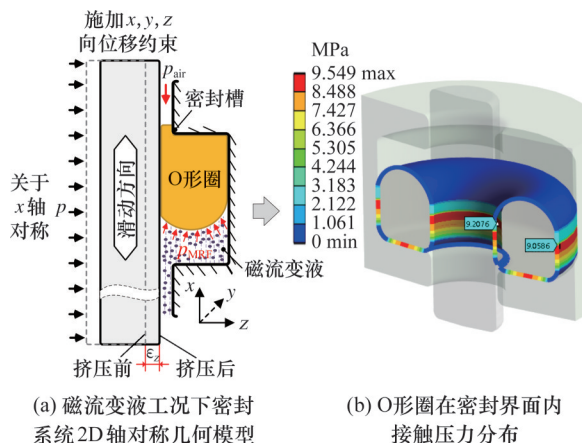


图4 接触压力分布

Fig.4 Contact pressure distribution

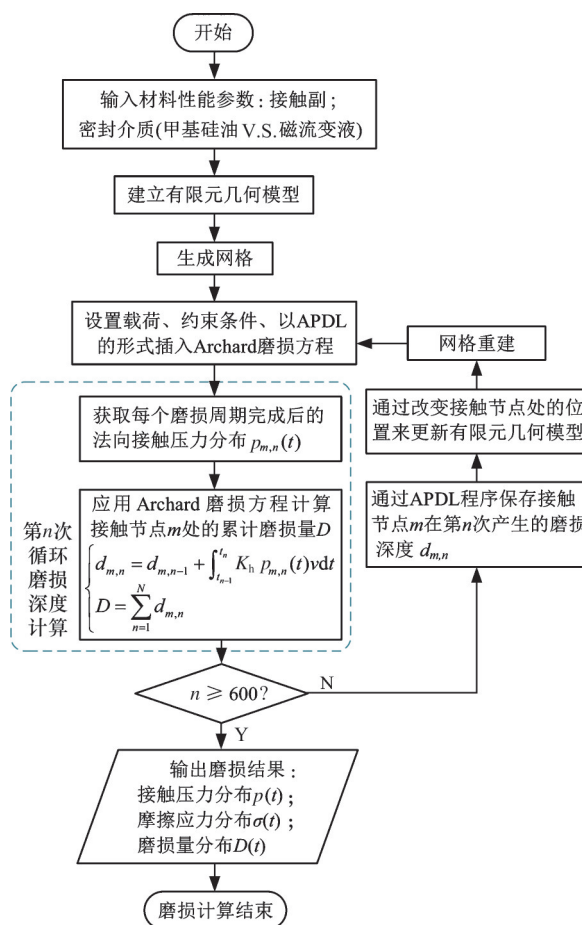


图5 密封副磨粒磨损模拟流程图

Fig.5 Flowchart of abrasive wear simulation for sealing pairs

触压应力 $p(t)$ 及摩擦应力 σ_f 的分布特性。

2.2.1 能量损耗分布

图 6 为密封界面内有、无铁粉工况下 O 形圈表面能量损耗分布云图。由图 6a 可知,动态密封过程中 O 形圈表现出在微凸体顶端被压缩、底端被拉伸的接触状态,且随着活塞杆表面粗糙度的增大, O 形圈内部能量损耗逐渐增大。这表明在无铁粉工况下,微观纹理往复运动引起的 O 形圈

表面形变与回弹使得黏附摩擦力、滞后摩擦力在摩擦学行为中的主导地位与基体表面粗糙度密切相关;样本 T01 在所有样本中黏弹性能量耗散最为显著,揭示了粗糙纹理持续性耕犁效应加快了接触区域局部温度升高的速度,导致密封副间动力学行为加剧,同时增大了接触疲劳、密封失效的风险。

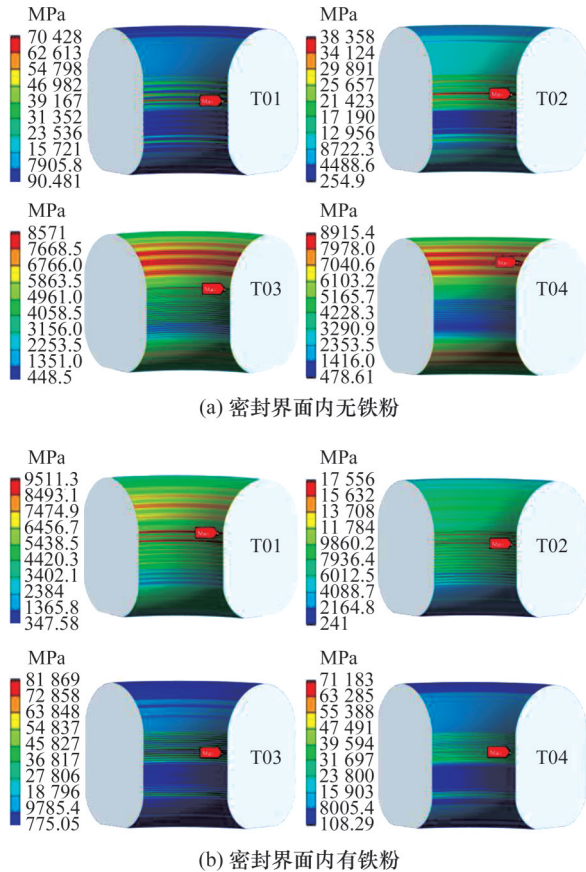


图6 密封界面内有、无铁粉工况下 O 形圈表面能量损耗分布

Fig.6 Energy consumption distributions of O-ring with and without particles in sealing interface

相同约束条件下,密封间隙内铁粉的存在使得微观纹理在 O 形圈表面产生的能量损耗 E_{el} 呈现截然相反的趋势变化,如图 6b 所示。具体表现为:粗糙样本 T01 与铁粉相互作用在 O 形圈内部产生的能量损耗比无铁粉工况的能量损耗减小 56%,说明铁粉介于密封间隙内可在一定程度上使基体表面平滑,从而有效抑制 O 形圈被挤压进入微观纹理内部造成能量损耗,改善密封磨损性能;对于抛光样本 T04,铁粉在密封界面内的存在、聚集迫使 O 形圈在局部承受较高的接触压力,并形成较明显的弹塑性变形,此现象产生的能量损耗相较于无铁粉环境的能量损耗增大 62%,意味着抛光样本长期处于磁流变液工况下将导致橡胶分子链断裂风险显著增大,极大地影

响密封可靠性。

2.2.2 接触压应力分布

接触压应力分布云图(图 7)反映出与能量损耗相似的趋势变化,进一步证明了铁粉的存在改变了 O 形圈与微观纹理之间的接触状态及相互作用模式,导致密封副在磁流变液工况下的非线性磨损行为异于常规介质。

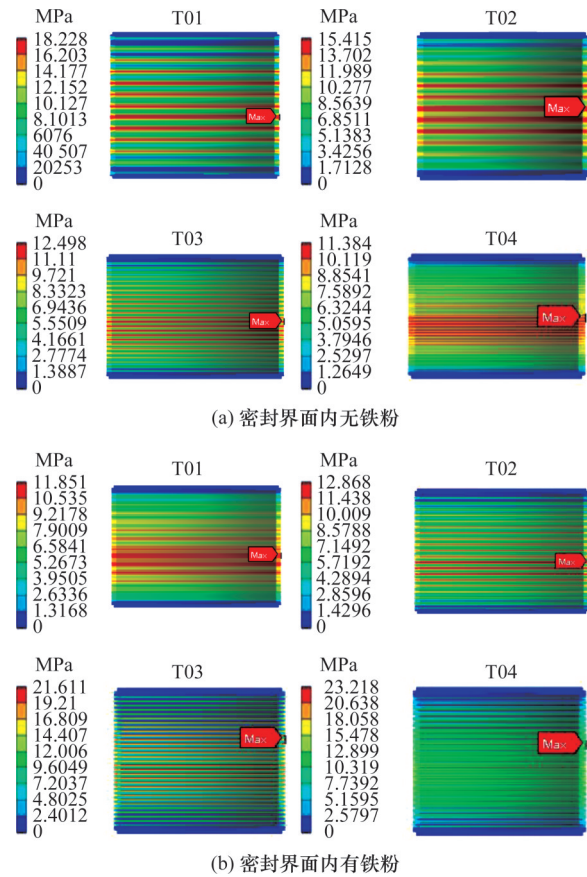


图7 密封界面内有、无铁粉工况下 O 形圈表面接触压应力分布

Fig.7 Contact pressure stress distributions of O-ring with and without particles in sealing interface

由图 7a 可以发现,铁粉与粗糙纹理之间瞬时接触的过程在 O 形圈表面产生的最大接触压应力 $p_{MRP}^{T01} = 11.851 \text{ MPa}$,明显低于密封副间相互作用产生的压应力 $p_{Oil}^{T01} = 18.228 \text{ MPa}$,表明密封界面内铁粉的存在能够缓解活塞杆 T01 表面微凸体在 O 形圈表面产生局部应力集中的现象,改善因摩擦热效应引起的 O 形圈材料软化问题,进而增强其抵抗疲劳裂纹形成的能力。

当活塞杆 T04 作为配副样本时,铁粉介于密封间隙内迫使 O 形圈表面产生的最大接触压应力 $p_{MRP}^{T04} = 23.218 \text{ MPa}$,不仅明显高于无铁粉工况下的压应力 $p_{MRP}^{T04} = 11.384 \text{ MPa}$,而且高于 O 形圈材质本身的极限应力 $\sigma_{lim} = 20.76 \text{ MPa}$ (σ_{lim} 的取值

依据O形圈应力-应变拟合曲线计算得出),如图7d所示。可以推断,磁流变液环境下铁粉易在交变载荷作用下嵌入O形圈内部,从而间接地保护O形圈免受黏附磨损影响,同时加剧铁粉与抛光纹理间磨粒磨损,导致密封泄漏风险的增大^[19]。

2.2.3 摩擦剪应力分布

密封界面内有、无铁粉两种工况下O形圈表面摩擦剪应力分布如图8所示。图中,微观纹理与铁粉相互作用在O形圈表面产生的摩擦剪应力 σ 随着活塞杆表面粗糙度的减小而增大,且该趋势与无铁粉状态下的模拟结果形成了鲜明对比。结合能量损耗及接触压应力云图分析结果可以推断,活塞杆表面粗糙度对铁粉在密封间隙内摩擦动力学行为的影响是导致摩擦剪应力趋势变化差异的主要原因。

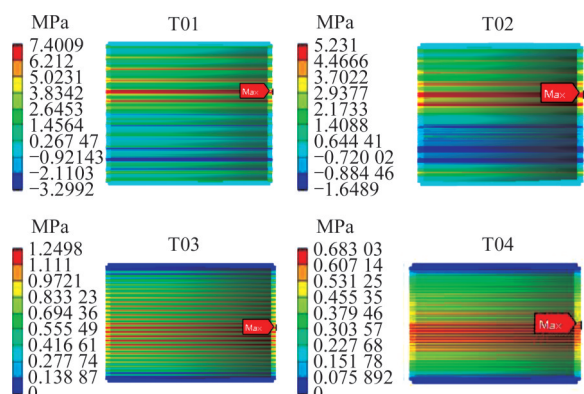
由图8a可知,密封界面内的铁粉使得微观纹理在O形圈表面产生的最大剪应力($\sigma_{MRF}^{T01} = 1.896 \text{ MPa}$)相较于密封副间相互作用产生的剪应力($\sigma_{Oil}^{T01} = 7.401 \text{ MPa}$)明显更低。此现象揭示了粗糙纹理T01与铁粉耦合效应有助于削弱微凸体在O形圈表面产生的犁型效应,促使铁粉作为

滚动载体呈现类似润滑膜的特性,改善密封副在磁流变液工况下的摩擦学性能。

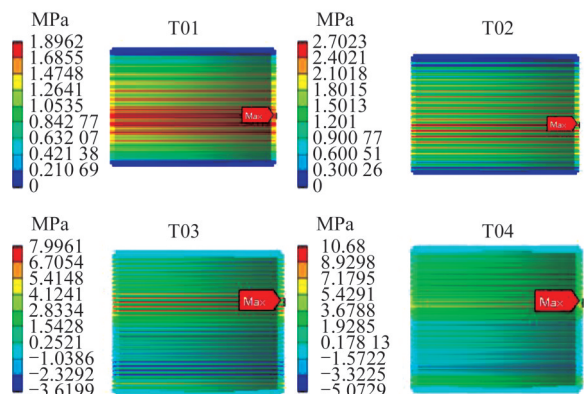
抛光样本T04迫使铁粉在O形圈表面产生的最大摩擦剪应力($\sigma_{MRF}^{T04} = 10.68 \text{ MPa}$)远高于无铁粉工况下的模拟结果($\sigma_{Oil}^{T04} = 0.683 \text{ MPa}$),如图8b所示。这表明介于密封间隙内的铁粉不仅长期承受配副表面微观纹理施加的横向剪应力、纵向压应力,同时O形圈也受铁粉施加的局部压缩、拉伸、剪切作用,导致密封副因磨粒磨损而过早引发密封失效。

2.2.4 累积磨损量

考虑到磨损时间 t 与循环次数 N 存在线性关系(即 $t = 2NL/v$),故在图9中应用累积磨损量 D 随往复循环次数 N 的变化曲线来分析具有不同表面形貌特征的微观纹理与铁粉相互作用对密封副磨损性能的影响。通过对比分析发现,活塞杆T01磨损量曲线变化趋势相对平稳,且产生的平均磨损量是所有样本中最小的,表明活塞杆往复运动过程中铁粉介于粗糙纹理与O形圈之间容易形成一对趋于旋转的力矩 M ,促使铁粉在密封间隙内的运动模式以滚动、翻滚为主,这不仅有效增强了铁粉作为固体润滑的减摩效应,还削弱了微凸体在O形圈表面产生的交变剪切作用,此工况下密封副的服役寿命得到了显著提高,其磨损机制主要表现为三体磨粒磨损。



(a) 密封界面内无铁粉



(b) 密封界面内有铁粉

图8 密封界面内有、无铁粉工况下O形圈表面摩擦剪应力分布

Fig.8 Frictional shearing stress distributions of O-ring with and without particles in sealing interface

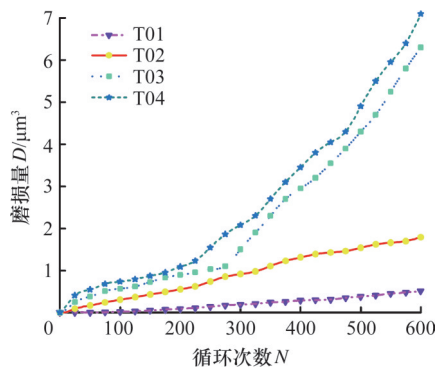


图9 不同表面粗糙度下活塞杆表面磨损量随循环次数的变化曲线

Fig.9 Wear loss as a function of cycles number for piston rod with different surface roughness

活塞杆T03、T04对应的磨损量曲线波动剧烈且磨损严重,意味着铁粉在密封间隙内的运动模式以挤压、犁型为主,主要原因有以下两个方面。①O形圈由丁腈橡胶制成,相较于活塞杆的不锈钢材质,它具有较低的弹性模量,这使得铁粉与密封副间的接触方式存在很大差异性,即铁粉与O形圈之间为曲面接触,而与活塞杆之间则为点接触;②橡胶作为一种聚合物,它在接触过程中

形成的范德华力能够进一步促进铁粉与O形圈之间的接触稳定性。由此可推测,密封间隙内的铁粉在 $p_{MRF}^{T04}(t)$ 的作用下与O形圈呈相对稳定的接触状态,并在往复运动的抛光纹理表面产生“微切割”作用,导致密封副在磁流变液工况下的密封性能显著降低,密封副磨损机制为两体磨粒磨损。

综上,活塞杆表面粗糙度所引起的铁粉在密封间隙内接触状态、运动模式的变化是导致密封副磨损机理发生转变的主要原因^[20],通过微观纹理与铁粉有效耦合能够显著增强密封副在磁流变液环境下抗磨损疲劳特性。

3 密封副磨粒磨损试验分析

3.1 试件制备及试验方法

制备4组具有不同表面形貌特征的活塞杆样本,其主要表面粗糙度参数值如表2所示。其中,样本T01、T02选择粗车加工以突出微观纹理对铁粉的导向性作用,而T03、T04采用磨削的方式是为了证明常规液压系统推荐的表面粗糙度参考范围(Ra 为 $0.16 \sim 0.63 \mu\text{m}$)^[21]已不再适用于磁流变液工况,粗糙度与铁粉耦合效应有助于改善密封磨损性能。

表2 样本表面粗糙度参数对照表及加工方式

Tab.2 Parameters of surface roughness and machining processes of specimens

样本	T01	T02	T03	T04
制备方式	车削	车削	磨削	磨削
表面粗糙度(μm)	3.2	1.6	0.5	0.18

考虑到配合副O形圈的材质为丁腈橡胶,其力学性能需要通过二参数 Mooney-Rivlin 模型来描述,故利用万能试验机对所选用的O形圈进行拉伸试验,得到图10所示的应力-应变拟合曲线。可以发现,O形圈的极限应力为 $\sigma_{im}=20.76 \text{ MPa}$,基于拟合曲线计算得到 Mooney-Rivlin 模型中的应变参数值 $C_{01}=2.55 \text{ MPa}$, $C_{10}=10.2 \text{ MPa}$ 。

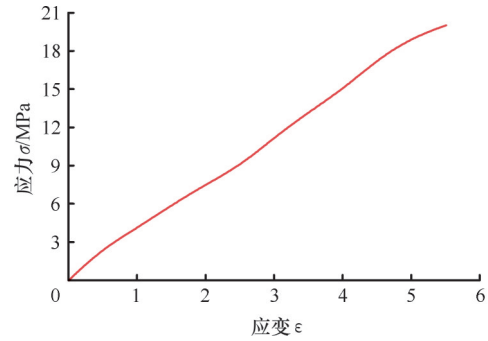


图10 O形圈应力-应变拟合曲线

Fig.10 O-ring stress-strain fitting curve

此外,试验选用MRF-J25T型商用磁流变液(技术参数见表3)、甲基硅油MSO作为试验介质,通过对比分析密封副在两种介质下的摩擦因数时变曲线及磨损形貌,进一步探究密封副在磁流变液工况下的磨损机理。甲基硅油是MRF-J25T的载液,内部不含任何粒子,与磁流变液内部悬浮铁粉作对比^[22]。

表3 磁流变液MRF-J25T技术参数

Tab.3 Technical parameters of MRF-J25T

参数	数值
载液	甲基硅油
铁粉体积分数/%	25
铁粉粒度/ μm	1~5
粒度分布	正态分布
表观黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.5
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	2.65
最大屈服应力/kPa	75

基于试验需要,研制一款测量往复动态密封磨损的试验装置,如图11所示。装置内部密封系统的设计依据美国洛德(Lord)公司生产的RD-8041-1型磁流变阻尼器^[23]。通过与HSR-2M高速往复摩擦磨损试验机配合使用(图11b),实时监测、记录密封副在两种试验介质下产生的摩擦因数(COF)曲线趋势的变化。由图11a可知,上试样316L不锈钢活塞杆通过上夹具与试验机中

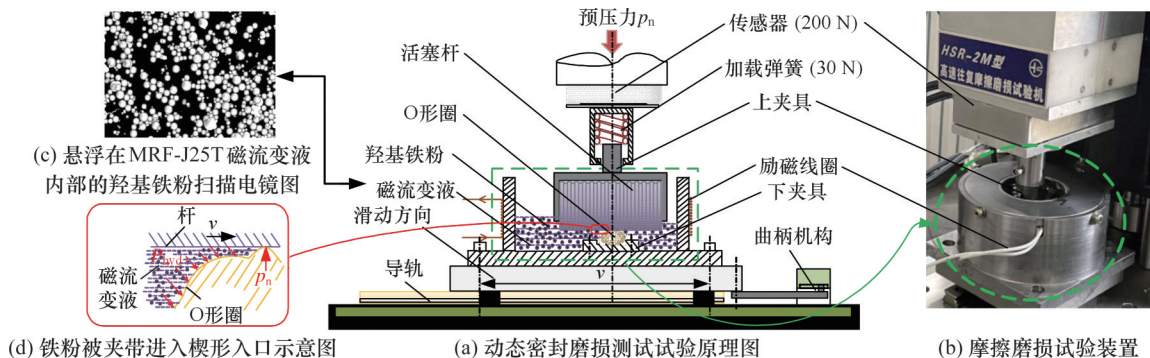


图11 试验装置示意图

Fig.11 Schematic diagram of test setup

的加载弹簧相接触,下试样O形圈安装于下夹具矩形密封槽中,利用试验机主轴上的传感器自动调节密封副间接触载荷,使O形圈实现15%的法向预压缩(即 $F_n = 10\text{ N}$)。

试验过程中,活塞杆以速度 $v = 0.15\text{ m/s}$ 、位移幅值 $L = 7\text{ mm}$ 在O形圈表面进行往复摩擦磨损试验;每次试验往复循环次数 $N = 45\ 000$ (对应磨损时长1 h),每组试验重复3次,以减小试验误差、消除初始阶段不稳定因素对密封磨损试验结果的影响。试验结束后,利用ZEISS SUPRA35扫描电子显微镜、Leica DVM6超景深显微镜分别对O形圈/活塞杆表面磨损形貌进行分析及观察。

3.2 摩擦因数时变性分析

图12展示了4组活塞杆样本在磁流变液、甲基硅油两种介质下形成的摩擦因数时变曲线。可以发现,表面粗糙度对摩擦因数 f_{MRF} 波动影响明显,且在两种介质下 f_{MRF} 波动程度呈现截然相反的趋势变化。这意味着磁流变液内部悬浮铁粉在流体动压力、剪切力共同作用下进入密封界面(图11d),改变了O形圈-活塞杆之间的接触状态及力学特性,致使密封副非线性磨损行为异于常规介质。具体地说:粗糙纹理T01、T02与铁粉耦合效应有助于降低活塞杆表面微凸体在O形圈内部产生的能量损耗(图6)及接触压应力(图7),从而有效缓解O形圈在往复交变载荷作用下产生的高摩擦磨损,如图12a、图12b所示。

相较于活塞杆样本T03、T04在甲基硅油环境所展现出的较低摩擦因数和良好摩擦学性能,密封副在磁流变液工况下磨损严重且无规律性(图12c、图12d)的原因与铁粉摩擦动力学行为密切相关,即抛光纹理迫使铁粉在密封间隙内滞留、聚集的位置出现局部应力集中,导致铁粉在横向剪切应力(图8)及纵向挤压应力(图7)的作用下对活塞杆产生“微切割”效应,进而对其表面犁沟磨痕的萌生产生极大影响。

3.3 密封副磨损表面形貌机理分析

利用2206B型表面粗糙度测量仪对活塞杆磨损表面进行测量,结果如图13所示。对比发现,活塞杆样本T01、T02在试验前后的表面粗糙度值没有明显改变,表明粗糙纹理往复运动的过程中被夹带进入密封间隙的铁粉更倾向以滚动的方式运动。这使得铁粉作为减摩载体呈现类似油膜的特性,延缓密封副间摩擦磨损的同时,避免样本表面形成明显的微切割痕迹,其磨损机制以三体

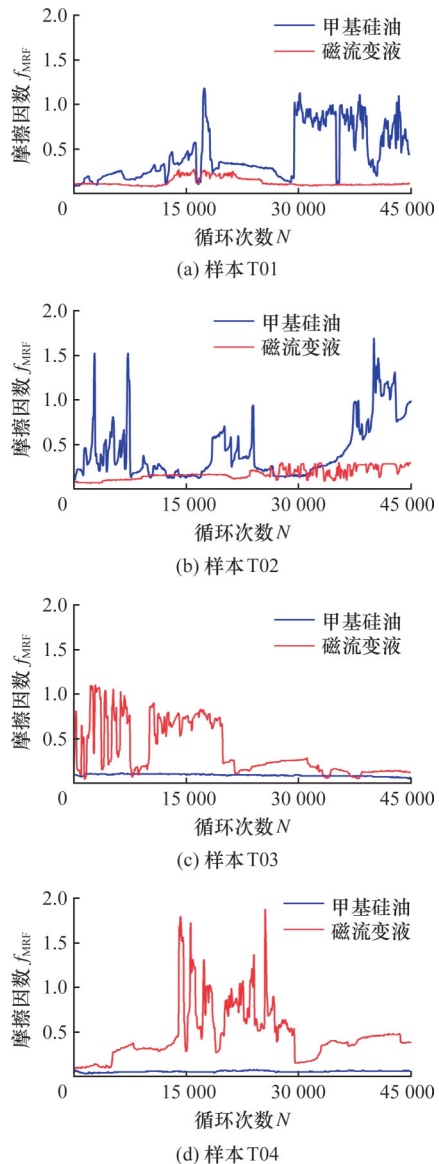


图12 活塞杆样本在两种试验介质下的摩擦因数
Fig.12 Friction coefficients of piston rod in two test media

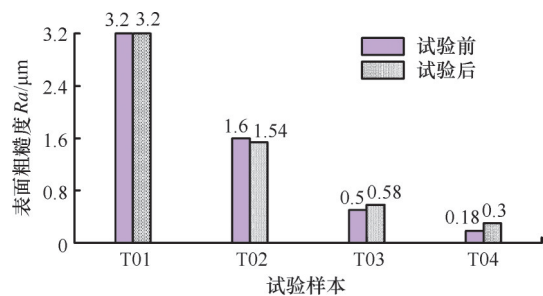


图13 磁流变液工况下活塞杆磨损前后表面粗糙度
Fig.13 Piston rod surface roughness before and after wear under MRF condition

磨粒磨损为主。而样本T03、T04的表面粗糙度相比原始样本分别增大了13%和40%,揭示了磁流变液内部悬浮铁粉被夹带进入密封间隙与活塞杆之间相互作用形成了明显的犁沟磨痕或沟槽。结合图9、图12所示的磨损量及摩擦因数随时间

演变曲线,可推测铁粉在抛光纹理持续剪切、挤压下嵌入O形圈内部,并在往复运动的活塞杆表面产生强烈且持久的摩擦磨损,造成密封副两体磨粒磨损。

图14所示为试验后具有不同表面形貌特征的活塞杆样本在超景深显微镜下的表面微观形貌。分析发现,随着粗糙度的减小,悬浮铁粉在活塞杆表面产生的半球形压痕消失,而平行于滑动方向的划痕却逐渐变得清晰、密集且变宽,揭示了磁流变液摩擦动力学行为显著影响磨痕形貌的演变过程。此外,上述现象与图13活塞杆表面粗糙度定量分析结果相吻合,验证了前期对密封副磨损机制分析的合理性,同时也进一步证明活塞杆表面抛光处理并没有对密封副起到减摩效果,反而增大了磨粒磨损的风险,导致样本表面产生塑性流动,形成大量滑动磨痕。综上,磁流变液环境下应更多考虑粗糙纹理与铁粉耦合效应在提高密

封副耐磨性中的作用,预防两体磨粒磨损引发的系统过早密封失效。

图15展示了O形圈在两种试验介质下的磨损形貌。对比分析发现,其表面磨痕在方向及形成机理上均发生了本质改变。甲基硅油环境下,O形圈表面磨损严重并形成与滑动方向相垂直的疲劳裂纹(图15a),表明O形圈在粗糙纹理T01、T02的微观切削效应下其表面形成“Schallmach波纹”,导致在波纹顶部、波谷应力集中位置出现局部塑性变形,使得橡胶分子链在反复疲劳交变应力作用下发生断裂,造成裂纹的萌生、扩展。而O形圈在磁流变液工况并未发现活塞杆表面微观纹理耕犁的痕迹,却清晰可见平行于滑动方向的侵蚀磨痕及未变形的(球形)铁粉(图15b)。这表明粗糙纹理与悬浮铁粉瞬时接触的过程不仅削弱了O形圈在动态载荷作用下的能量损耗,还降低了配副表面微凸体产生的滞后摩擦力,从而避免因过度伸展或局部扭曲所导致的橡胶分子链断裂现象发生。EDS能谱分析结果所展示的O形圈磨损表面铁元素(Fe)含量较少且主要分布在平行于滑动方向的磨痕中,证明了磁流变液内部悬浮铁粉在流体动压力、剪切力的共同作用下进入密封间隙,并随着粗糙纹理的往复运动以滚动、翻滚的运动模式对O形圈表面产生明显的侵蚀作用。

图16为磁流变液环境下O形圈受活塞杆T03、T04频繁往复作用产生的磨损形貌及EDS能谱分析图,可以明显地观察到磨损表面含有大量分布不均匀的铁元素(Fe),以及与图15b相比浅且窄的侵蚀性磨痕。结合图7模拟分析结果可推测,抛光纹理不仅减弱了磁流变液在密封界面内的侵蚀效应,还迫使滞留铁粉在其聚集、团簇位置产生应力集中,导致局部接触压应力超过O形

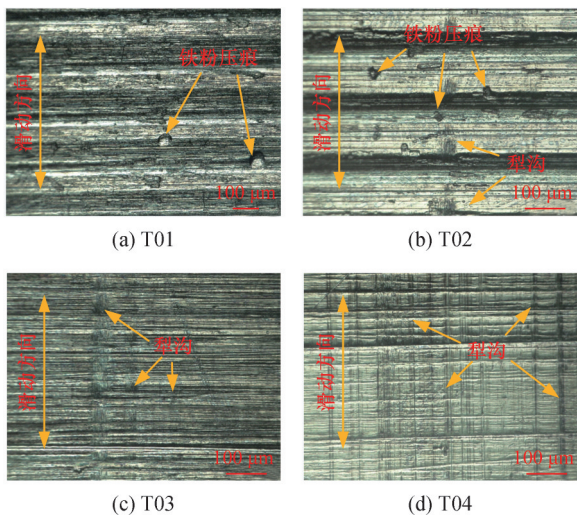


图14 磁流变液工况下活塞杆表面磨损形貌
Fig.14 Piston rod surface wear morphology under MRF conditions

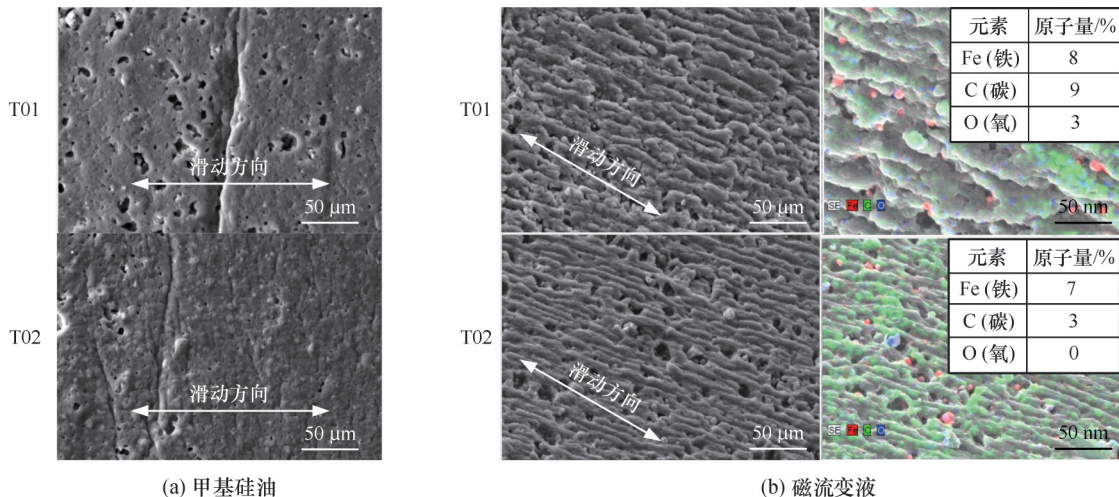


图15 两种试验介质下配副T01、T02对应的O形圈表面磨损形貌及EDS能谱分析
Fig.15 Surface wear morphology and EDS spectrum analysis of O-ring corresponding to T01 and T02 in two test media

图材质本身的极限应力,造成铁粉嵌入现象的发生。此过程也因铁粉的介入间接地保护O形圈免受黏附磨损影响的同时,在往复运动的活塞杆表面产生剧烈摩擦、磨损,形成明显的犁沟式摩擦带(图14c、图14d)。

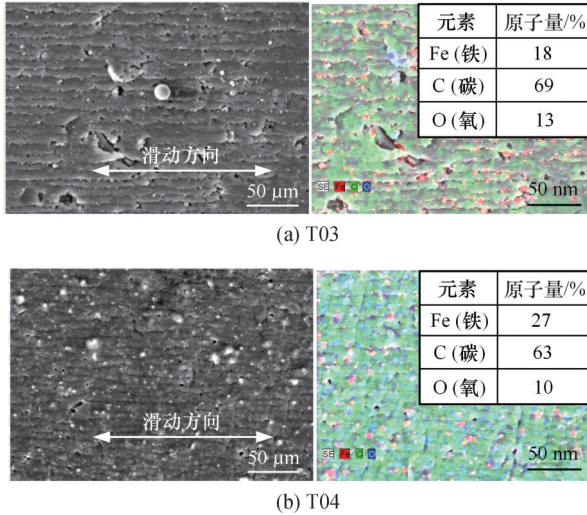


图16 磁流变液工况下配副T03、T04对应的O形圈表面磨损形貌及EDS能谱分析

Fig.16 Surface wear morphology and EDS spectrum analysis of O-ring corresponding to T03 and T04 under MRF condition

4 结论

1)建立了表面粗糙度与铁粉耦合效应下的动态密封磨损模型,采用解析算法与有限元仿真相结合的方式模拟分析有、无铁粉工况下密封副间接接触状态及力学行为。结果表明,粗糙纹理与悬浮铁粉瞬时接触的过程不仅有助于降低微凸体在O形圈表面接触点处产生的能量损耗、接触压应力及摩擦剪应力,还能有效缓解铁粉在活塞杆表面产生的“微切割”作用,避免抛光纹理因两体磨粒磨损所造成的过早密封失效。

2)利用自制试验装置开展了密封副在两种介质下的非线性磨损行为研究。结果表明:随着粗糙度的增大,密封副在磁流变液环境下形成的摩擦因数时变曲线展现出与参考介质甲基硅油工况截然相反的变化趋势。这与模拟分析结果相吻合,验证了分析思路的合理性,揭示了工程中推荐的表面粗糙度参考范围(0.16~0.63 μm)已不再适用于磁流变液密封系统,应更多考虑微观纹理与铁粉有效耦合在提高密封副抗磨损疲劳特性中的作用。

3)通过密封副磨损表面微观形貌及EDS能谱分析,证实了配副表面微观纹理往复运动所引

起的磁流变液在密封间隙内摩擦动力学行为变化是导致密封副磨损机制转变的主要原因。具体地说,悬浮铁粉在流体动压力、剪切力共同作用下进入密封界面,以滚动摩擦的运动方式与粗糙纹理相接触,避免铁粉在活塞杆表面产生微切削效应的同时,抑制O形圈在交变载荷下所引起的疲劳裂纹形成及扩展。对于抛光样本,被夹带进入密封界面的铁粉在微观纹理持续剪切、挤压下嵌入O形圈内部,导致活塞杆表面形成大量犁沟式磨损,显著增大了密封副发生磨粒磨损的风险。

参考文献:

- [1] ESHGARF H, AHMADI NADOOSHAN A, RAISI A. An Overview on Properties and Applications of Magnetorheological Fluids: Dampers, Batteries, Valves and Brakes[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50:104648.
- [2] 杨三锋, 黄向明, 明阳, 等. 新型磁流变-剪切增稠阻尼器的力学模型及试验研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(16):418-426.
YANG Sanfeng, HUANG Xiangming, MING Yang, et al. Mechanical Model and Experimental Study of a Novel Magnetorheological Shear Thickening Damper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(16):418-426.
- [3] 孟凡杰, 王仲楠, 常秋英, 等. 一种可实现超滑的混合溶液的摩擦学研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(11):210-219.
MENG Fanjie, WANG Zhongnan, CHANG Qiuying, et al. Tribological Investigation of a Mixed Solution with Superlubricity Achieved[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(11):210-219.
- [4] ZHU Juanjuan, LI Xiangwei, BEAMISH S, et al. An Ultrasonic Method for Measurement of Oil Films in Reciprocating Rubber O-ring Seals[J]. Tribology International, 2022, 167:107407.
- [5] 沈明学, 董峰, 彭旭东, 等. 配副金属表面粗糙度对丁腈橡胶O型圈摩擦学特性的影响[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(3):320-325.
SHEN Mingxue, DONG Feng, PENG Xudong, et al. Effect of Surface Roughness of Metallic Counterpart on Tribological Characteristics of NBR O-ring[J]. Tribology, 2016, 36(3):320-325.
- [6] PERSSON B N J. Theory of Rubber Friction and Contact Mechanics [J]. The Journal of Chemical Physics, 2001, 115(8):3840-3861.
- [7] 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.
- [8] SILVA A, LENZI V, PYRLIN S, et al. Deep Learning Approach to the Texture Optimization Problem for Friction Control in Lubricated Contacts [J]. *Physical Review Applied*, 2023, 19(5): 054078.
- [9] AYMARD A, DELPLANQUE E, DALMAS D, et al. Designing Metainterfaces with Specified Friction Laws[J]. *Science*, 2024, 383(6679):200-204.
- [10] PEÑA-PARÁS L, GAO Hongyu, MALDONADO-CORTÉS D, et al. Effects of Substrate Surface Roughness and Nano/Micro Particle Additive Size on Friction and Wear in Lubricated Sliding[J]. *Tribology International*, 2018, 119:88-98.
- [11] 李星亮, 岳文, 黄飞, 等. 磨料粒度对表面微织构纯钛干摩擦性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(24):25-33.
- LI Xingliang, YUE Wen, HUANG Fei, et al. Effect of Wear Particle Size on Dry Tribological Properties of Surface Texturing Titanium [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(24):25-33.
- [12] 沈明学, 李波, 容康杰, 等. 水润滑条件下磨粒尺寸对橡胶密封副摩擦学行为的影响[J]. *摩擦学报*, 2020, 40(2):252-259.
- SHEN Mingxue, LI Bo, RONG Kangjie, et al. Effect of Abrasive Size on Tribological Behavior of Rubber Sealing Pair under Water-lubricated Conditions[J]. *Tribology*, 2020, 40(2):252-259.
- [13] SONG Wanli, PENG Zhen, ZHANG Jintao, et al. Effects of Micron-sized Iron Particles on Friction and Wear Behaviors of Seals Used in a Magnetorheological Damper: Analysis and Experiment[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(9):095019.
- [14] SHAHRIVAR K, ORTIZ A L, de VICENTE J. A Comparative Study of the Tribological Performance of Ferrofluids and Magnetorheological Fluids within Steel-Steel Point Contacts[J]. *Tribology International*, 2014, 78:125-133.
- [15] 候丽霞, 刘小君, 张彤, 等. 表面微凹坑和纹理方向对界面摩擦的耦合影响[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(11):1279-1286.
- HOU Lixia, LIU Xiaojun, ZHANG Tong, et al. Coupling Effects of Surface Micro-cavity and Textural Directionality on Interface Frictions[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(11):1279-1286.
- [16] 陈雪辉, 李威, 刘伟, 等. 基于动力学特性的挖掘机工作装置端面摩擦副间隙磨损机理研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(19):191-205.
- CHEN Xuehui, LI Wei, LIU Wei, et al. Excavator Working Device Based on Dynamic Characteristics Analysis of Clearance Wear Mechanism of End Face Friction Pair[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(19):191-205.
- [17] LORENZ B, OH Y R, NAM S K, et al. Rubber Friction on Road Surfaces: Experiment and Theory for Low Sliding Speeds [J]. *Journal of Chemical Physics*, 2015, 142(19):194701.
- [18] 王祺德, 刘达新, 刘振宇, 等. 基于复合泄漏通道模型的O型圈密封泄漏率计算方法研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(11):232-241.
- WANG Qide, LIU Daxin, LIU Zhenyu, et al. A Leakage Rate Calculation Method for O-ring Seal Based on Compound Leakage Channel Model [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(11): 232-241.
- [19] FARFÁN-CABRERA L I, GALLARDO-HERNÁNDEZ E A, deLa ROSA C S, et al. Micro-scale Abrasive Wear of Some Sealing Elastomers[J]. *Wear*, 2017, 376:1347-1355.
- [20] Da SILVA W M, COSTA H L, de MELLO J D B. Transitions in Abrasive Wear Mechanisms: Effect of the Superimposition of Interactions [J]. *Wear*, 2011, 271(5/6):977-986.
- [21] FLITNEY R. *Seals and Sealing Handbook* [M]. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [22] LI Shanshan, XIU Shichao, SONG Wanli, et al. Experimental Study of Surface Roughness on Improving the Tribological Performance of Sealing Pairs in Magnetorheological Damper[J]. *Smart Materials and Structures*, 2022, 31(7):075021.
- [23] JAMADAR M E H, DESAI R M, SAINI R S T, et al. Dynamic Analysis of a Quarter Car Model with Semi-active Seat Suspension Using a Novel Model for Magneto-rheological (MR) Damper[J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2021, 9(1):161-176.

(编辑 王昱玥)

作者简介:李姗姗,女,1986年生,博士研究生。研究方向为机械摩擦学与表面技术、智能与仿生材料。E-mail:sgdlls@sut.edu.cn。孙兴伟*(通信作者),女,1970年生,教授、博士研究生导师。研究方向为复杂曲面测量与数控加工轨迹优化、数控技术与智能制造。E-mail:dlwldks@163.com。

本文引用格式:

李姗姗,孙兴伟,杨恒,等. 磁流变液环境下密封副非线性磨损行为研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(9):1968-1979.

LI Shanshan, SUN Xingwei, YANG Heng, et al. Research on Non-linear Wear Behavior of Sealing Pairs in Magnetorheological Fluid Environment[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(9):1968-1979.