

混合润滑共形接触表面摩擦学特性演变的加速试验方法

张梓洋 龚雅婧 王悦昶*

哈尔滨工业大学(深圳)机器人与先进制造学院,深圳,518055

摘要:提出一种混合润滑共形接触表面摩擦学特性演变加速试验设计方法。该方法基于“降黏加速”思想,保持粗糙峰接触状态不变,仅通过增加粗糙峰相互作用频率实现摩擦学性能的加速演化。在Plint TE-92摩擦磨损试验机上对所提加速试验设计方法进行了验证。实验显示常速工况(速度0.2 m/s,温度25 °C,试验时长20 min)与加速后工况(速度0.4 m/s,温度47 °C,试验时长10 min)的摩擦因数、三维形貌参数 Sq 与 Ssk 吻合较好,这表明加速试验10 min与未加速试验20 min的磨损效果相同。

关键词:加速试验;共形接触;混合润滑;摩擦学特性;粗糙峰接触

中图分类号:TH117.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.01.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Method for Accelerated Tribological Property Evolution Experiments of Conformal Contact Surfaces in Mixed Lubrication Regime

ZHANG Ziyang GONG Yajing WANG Yuechang*

School of Robotics and Advanced Manufacture, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong, 518055

Abstract: An acceleration experimental design method for hybrid-lubrication conformal-contact surface tribological evolution was proposed. The method was based on the concept of “viscosity-reduction acceleration”, where the asperity contact states were preserved while the evolution of tribological behavior was accelerated by increasing the interaction frequency between surface asperities. The approach was validated by Plint TE-92 friction and wear tester. The results show that at the non-accelerated condition (sliding speed is as 0.2 m/s, temperature is as 25 °C, duration is as 20 min) and the corresponding accelerated condition (sliding speed is as 0.4 m/s, temperature is as 47 °C, duration is as 10 min) share the highly consistent values of friction coefficient, and 3D surface parameters Sq and Ssk . It indicates that the wear effect of 10-minute in test with accelerated parameters is equivalent to that of 20-minute in test with non-accelerated parameters.

Key words: accelerated experiment; conformal contact; mixed lubrication; tribological property; asperity peak contact

0 引言

以机械密封、滑动轴承为代表的共形接触基础件广泛用于航空航天、能源动力等领域的高端装备,如航空发动机、核反应堆主冷却剂泵、高压柱塞泵等^[1-3]。随着对主机性能、寿命和可靠性要求的不断提高,主机配套的关键基础件也普遍面临工作参数提升、寿命延长、可靠性提高的挑战,因此需掌握其长使役期内的性能演变规律。对此类基础件而言,混合润滑状态下发生的表面磨损

是导致其性能演变的关键因素之一,有必要开展针对性研究。

现有的混合润滑与磨损耦合研究主要有两种思路:以理论模型为主和以磨损实验为主^[4-8]。理论模型又可分为解析模型、多场耦合数值模型、数据驱动模型。解析模型通过建立的数学公式直接描述磨损过程,当前用于磨损预测的方程已经超过182个^[9]。磨损是多因素耦合作用的复杂过程^[10],且磨损的随机性给磨损预测带来较大困难,这导致现有的解析模型预测结果精度较差、可预测的时间较短。多场耦合数值模型考虑了相关场变量之间的固有耦合机制,通过数值方法模拟磨损过程,但计算复杂度较高、仿真时间较长且对边界条件较为敏感,也存在精度不足和预测时间短

收稿日期:2025-05-14

基金项目:国家自然科学基金(51975315,52505174);深圳市科技计划(JCYJ20240813105124033);深圳市高等院校稳定支持计划(GXWD20231129144211001)

的问题。随着机器学习方法的发展,数据驱动模型逐渐成为研究热点。这类模型通过数据集训练揭示混合润滑与磨损耦合的复杂关系^[11]。数据驱动模型的可靠性高度依赖实验数据的数量和质量^[12-13],因此构建有效的数据驱动模型需以大量可靠的磨损实验为基础。

当前针对磨损问题开展的实验研究多数在摩擦磨损试验机(如球-盘式、销-盘式等)上进行“常速”磨损实验,存在显著的局限性。对于“常速”共形接触表面磨损实验,摩擦磨损试验机上持续运行较长时间才能产生显著的磨损效果,这意味着对共形接触表面开展全寿命的磨损实验研究需耗费大量的时间、人力及物力^[14]。目前,关于磨损实验的多数研究都存在实验时长不足,不能体现磨损过程中摩擦界面性能演变过程的问题^[15-19],缺乏对全寿命周期内性能演变的观测能力。实际工程应用中,船舶轴承的使用寿命需达20 000 h,航空轴承的使用寿命需达到3000 h,航天轴承的使用寿命需达到8~15年^[20],这导致难以通过“常速”磨损实验来检验轴承的可靠性。因此,有必要设计加速试验来研究共形接触表面混合润滑性能的演变过程。

加速试验是一种通过提高应力水平(如温度、载荷、速度等),在较短的时间内获得产品在常规应力水平下的寿命及可靠性的技术^[21],其理论基础在于保持失效的一致性,即高应力水平下的失效应与常规应力水平下的失效相同^[22]。高应力水平下的加速试验不仅缩短了实验时间,提高了实验效率,还降低了实验成本,并使高可靠长寿命产品的可靠性评定成为可能^[23]。一些学者已将加速试验应用于磨损寿命的分析预测。YU等^[24]提出两种加速寿命试验方法获取齿轮退化数据,并将其用于剩余寿命的预测。LI等^[25]将提高转速、增加载荷、保持微凸体承担载荷作为加速寿命实验准则,针对谐波减速器磨损寿命设计了加速磨损实验。JEON等^[26]基于磨损预测,为工程设备套筒轴承的加速寿命试验设计了一套系统方法,通过调整载荷和速度来提高应力水平,同时结合三维公差分析确定磨损极限,实现了加速因子的量化设计。然而,多数研究都基于特定对象,因此这些加速试验的设计方法和加速因子的选取不具备较好的普适性,更换研究对象后,则需重新选择合适的加速因子并调整方法。

因此,本文针对上述问题提出一种针对共形接触表面混合润滑性能演变的加速试验设计方

法。该方法基于“降黏加速”的思路,使摩擦副在高转速下加速性能演变过程,仅确定加速目标、润滑剂及其黏温特性、未加速工况即可完成加速试验设计,具有较好的普适性。本文给出了确保加速磨损试验设计前后失效机理一致的判定依据,并提出一套完整的共形接触表面混合润滑性能演变加速试验设计流程。首先基于仿真计算验证加速试验设计的正确性,随后采用PLint TE-92摩擦磨损试验机实施了设计的加速试验,验证加速试验设计方法的可行性和准确性。

1 加速试验

1.1 理论设计

摩擦副在混合润滑状态下的性能演变主要由表面磨损导致。加速摩擦副在混合润滑状态下的性能演变过程关键是加速表面磨损。表面磨损的主要形式是黏着磨损。黏着磨损的磨损量主要与载荷、滑动距离、摩擦副材料性能等因素有关。常用的Archard黏着磨损公式为^[5]

$$W=KNL/H \quad (1)$$

式中: W 为磨损体积, mm^3 ; K 为磨损系数, $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$; N 为法向载荷, N ; L 为滑动距离, m ; H 为材料的硬度。

由式(1)可知,摩擦副的材料确定且在有限的载荷范围内时,磨损量与法向载荷、滑动距离成正比,即表面磨损量主要受粗糙峰接触状态和粗糙峰之间相互作用次数影响。设计加速试验时,需在保持失效机理条件不变的前提下促使受试产品加速失效。因此,需保持粗糙峰接触状态不变,仅通过增加粗糙峰之间的相互作用次数实现摩擦副在混合润滑状态下的性能演变加速。

增加粗糙峰之间的相互作用次数可通过提高摩擦副的相对运动速度实现。仅提高摩擦副的相对运动速度会增大摩擦副界面间的油膜厚度,改变粗糙峰接触状态,如图1所示,相对运动速度提高时流体润滑区增大,粗糙峰接触区域减小。因此,要保持粗糙峰接触状态不变,须在提高摩擦副相对运动速度的同时降低润滑剂黏度。本文以“降黏加速”的思路设计加速试验。

多数润滑剂的黏度随温度升高而降低,因此本文以升高温度的方式降低润滑剂黏度。需要指出的是,加速试验的关键在于将速度作为影响混合润滑状态的单因素变量,仅通过提高速度来增加粗糙峰相互作用次数以实现加速试验,因此该方法不仅适用于黏着磨损,同样适用于其他磨损形式(只需根据磨损形式控制相应变量即可)。

图2所示为加速试验设计流程。实验时,需

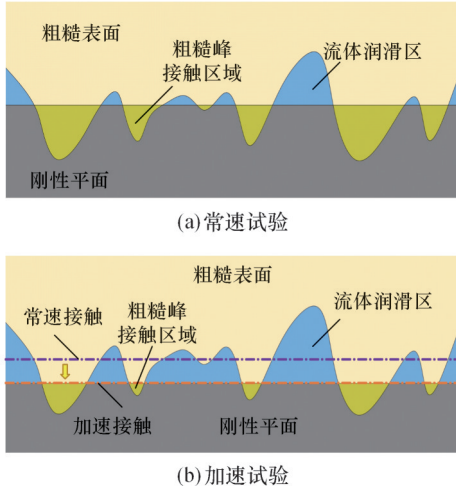


图1 粗糙峰接触状态改变示意图

Fig.1 The schematic diagram of change of asperity contact state

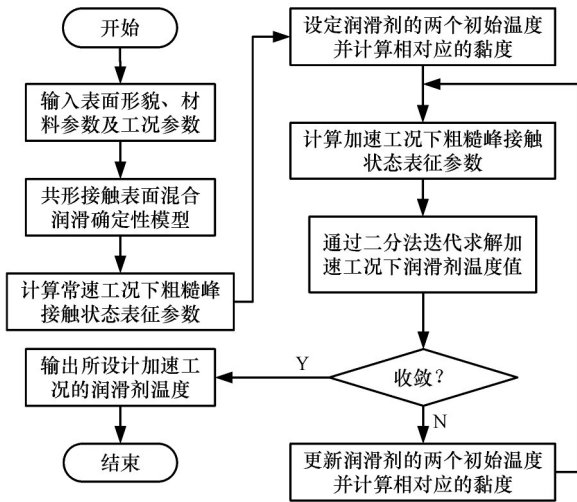


图2 加速试验设计流程图

Fig.2 The flowchart of designing accelerated experiment

升高并维持润滑剂温度,以保持粗糙峰接触状态不变,因此优先选用黏度较低的润滑剂,以防止产生过多的热量而影响润滑剂黏度、改变粗糙峰的接触状态。

确定加速后能保持粗糙峰接触状态不变的润滑剂黏度,并根据润滑剂的黏温曲线确定加速试验的温度。粗糙峰接触状态采用粗糙峰接触面积比、承载力比、摩擦因数表征。等温条件下,混合润滑确定性模型的控制方程如下^[27]:

1) 流体润滑及接触区方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{u_1 + u_2}{2} \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (2)$$

式中: x 为 X 向(配副表面相对运动方向)的位移; y 为 Y 向(垂直于 X 轴)的位移; p 为压力; η 为润滑剂黏度; ρ 为润滑剂密度; h 为配副表面膜厚; u_1 、 u_2 分别为配副表面 X 向和

Y 向的运动速度。

2) 膜厚方程为

$$h(x, y, t) = h_0(t) + \delta_1(x, y, t) + \delta_2(x, y, t) + v(x, y, t) \quad (3)$$

式中: $h_0(t)$ 为界面刚性距离; $\delta_1(x, y, t)$ 、 $\delta_2(x, y, t)$ 分别为表面1和表面2的表面粗糙度; $v(x, y, t)$ 为表面弹性变形。

3) 润滑剂黏度 η 采用Barus黏度压力方程描述,即

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p) \quad (4)$$

式中: η_0 为常压下的润滑剂黏度; α 为黏压系数。

密度 ρ 采用Dowson-Higgins密度压力方程描述,即

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{0.6p}{1 + 1.7p} \quad (5)$$

式中: ρ_0 为常压下的润滑剂密度。

4) 弹性变形方程为

$$v(x, y, t) = \frac{2}{\pi E'} \iint_a \frac{p(\xi, \zeta)}{\sqrt{(x-\xi)^2 - (y-\zeta)^2}} d\xi d\zeta \quad (6)$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (7)$$

式中: E' 为等效弹性模量; E_1 、 E_2 分别为两种配副材料的弹性模量; ν_1 、 ν_2 分别为两种配副材料的泊松比。

5) 由流体区和接触区提供的承载力与外部施加的载荷平衡得载荷平衡方程:

$$w(t) = \iint_a p(x, y, t) dx dy \quad (8)$$

式中: $w(t)$ 为外部施加载荷; $p(x, y, t)$ 为压力。

通过上述模型可得摩擦副粗糙峰接触区面积及对应的接触压力分布,以及流体润滑区面积及对应的流体压力分布,进而计算出粗糙峰接触面积比、承载力比。

共形接触表面混合润滑状态下的摩擦副摩擦因数为

$$\mu = \frac{F_c + F_h}{w} \quad (9)$$

式中: F_c 、 F_h 分别为接触区的摩擦力和流体区的摩擦力; w 为接触区和流体区提供的总承载力。

假设接触区摩擦因数 μ_c 为常数,则接触区的摩擦力为

$$F_c = \mu_c w_c \quad (10)$$

式中: w_c 为粗糙峰接触区的总承载力。

流体区的摩擦力采用液膜剪切力计算:

$$F_h = \iint_a \tau dx dy \quad (11)$$

$$\tau = \tau_L (1 - \exp(-\eta\gamma/\tau_L))$$

$$\tau_L = \tau_{L0} + \gamma_L p_h$$

式中: τ_L 为润滑剂极限剪切应力; γ 为剪切率; τ_{L0} 为润滑剂初始剪切应力, $\tau_{L0} = 2 \text{ MPa}$; γ_L 为压力系数, $\gamma_L = 0.05$; p_h 为流体区压力。

上述模型计算可得粗糙峰接触状态表征参数值,根据加速前后粗糙峰接触状态的表征参数,采用二分法迭代计算加速工况的温度。

1.2 实验方法及条件

动环的材料为GCr15轴承钢,静环的材料为WC-Ni硬质合金,材料的性能参数如表1所示。润滑剂选用聚 α 烯烃PAO2基础油。PAO2基础油的黏度受温度变化影响较大,为避免摩擦引起的额外温升改变粗糙峰接触状态,改变标准动环形状。如图3所示,将标准试样的环形接触面改为类平端面推力轴承结构,使产热面积减小、换热面积增大,减小润滑剂温升 ΔT 。采用改造后的动环在Plint TE-92摩擦磨损试验机上进行阶梯加速试验。实验载荷为100 N,主轴转速阶梯式变化,在每一转速下测试10 min后停止,随后加速至下一转速,不同转速对应的摩擦副表面间相对运动速度为0.11~2.89 m/s。

表1 配副材料性能参数

Tab.1 The performance parameters of matching materials

材料	弹性模量/GPa	泊松比	硬度	密度/(g·cm ⁻³)
WC-Ni	550	0.22	1500 HV	15
GCr15	208	0.3	215 HV	7.8

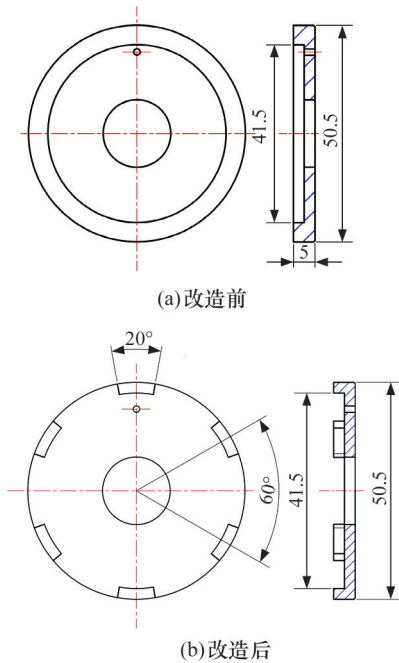


图3 动环结构及尺寸

Fig.3 The structure and dimension of rotating ring

摩擦磨损实验前,对实验件的配副表面进行研磨、抛光。WC-Ni实验件(静环)先使用铸铁盘研磨机在转速20 r/min下粗磨20 min,研磨剂由碳化硼粉末(粒度为W20)与机油制成;再使用黄铜盘研磨机在转速9 r/min下精磨15 min,研磨剂

由粒度W3.5的水基人工金刚石研磨膏稀释而成(每5 g研磨膏兑1000 mL水);最后使用尼龙抛光布抛光机在转速35 r/min下抛光7 min,抛光液为粒度W7的水基人工金刚石研磨膏稀释而成(每5 g研磨膏兑800 mL水)。GCr15实验件(动环)先使用铸铁盘研磨机粗磨15 min,再使用尼龙抛光布抛光机抛光7 min。粗磨和抛光的加工参数以及研磨剂和抛光液的配比与WC-Ni加工相同。

如图4所示,在Plint TE-92摩擦磨损试验机上进行实验。为使实验中摩擦副相对运动的距离相同,做如下设置:未加速试验中,载荷100 N,速度0.2 m/s(主轴转速80 r/min),实验温度25℃,实验时长20 min;加速试验中,载荷100 N,速度0.4 m/s(主轴转速160 r/min),实验温度47℃,实验时长10 min。其中,速度为接触区平均直径处的线速度,由图3所示实验件几何参数可知,接触区平均直径为48 mm。

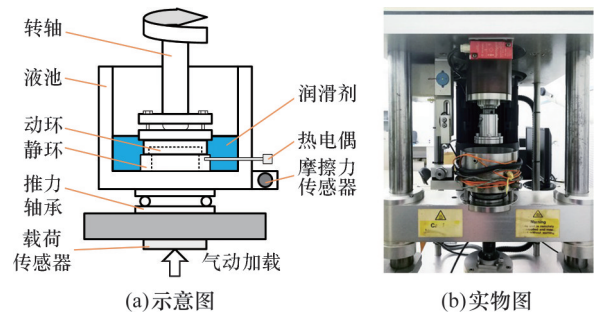


图4 Plint TE-92摩擦磨损试验机

Fig.4 Plint TE-92

GCr15轴承钢的硬度小于WC-Ni硬质合金,因此磨损主要发生在动环上。实验后使用三维白光干涉形貌仪测量动环的表面形貌,采用三维形貌参数即均方根高度 S_q 、偏度 S_{sk} 、峰度 S_{ku} 比较实验后的表面形貌。共进行两组实验,每组实验中,加速试验和未加速试验各进行一次。

2 结果与讨论

2.1 设计示例

针对速度0.2 m/s、温度25℃、载荷60 N的摩擦副性能演变过程设计加速试验,加速的目标为将相对速度提高至0.4 m/s。根据实测黏度拟合PAO2黏度-温度曲线。如图5所示,25~100℃的黏度计算拟合公式为

$$y = 23.45807 \exp(-x/24.44134) + 1.52408 \quad (12)$$

测量8对实验件的表面形貌,每个实验件选取2个采样点,GCr15实验件和WC-Ni实验件的表面形貌参数取均值(表2)。基于这些参数,采用数值重构算法获取相应实验件的表面形貌数据集^[28]。

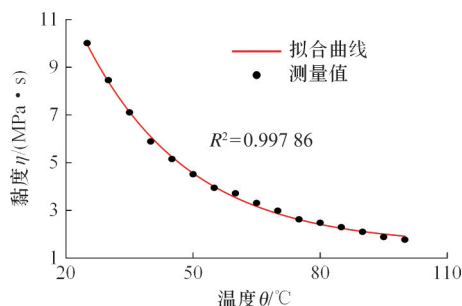


图5 PAO2基础油黏度-温度拟合曲线

Fig.5 The viscosity-temperature fitting curve of PAO2 base oil

表2 GCr15和 WC-Ni实验件表面形貌参数

Tab.2 The surface morphology parameters of GCr15 and WC-Ni experiment parts

	$Sq/\mu\text{m}$	Ssk	Sku	$Sal/\mu\text{m}$	Str
GCr15	0.493 ± 0.0088	-0.63 ± 0.0866	4.56 ± 0.1122	7.451 ± 0.1999	0.94 ± 0.0451
WC-Ni	0.215 ± 0.0048	-0.46 ± 0.0687	4.10 ± 0.1087	6.098 ± 0.1126	0.93 ± 0.0385

注: Sal 为粗糙表面的自相关长度, Str 为表示性状的高宽比。

采用二分法迭代计算加速试验的温度,使用表2所示的形貌参数重构表面,计算摩擦因数、粗糙峰承载力比、接触面积比。计算相对速度0.4 m/s时不同温度对应的粗糙峰接触状态表征参数,并将其与25 °C、0.2 m/s的粗糙峰接触状态表征参数进行对比,粗糙峰接触状态表征参数值相等时,0.4 m/s对应的温度即为加速试验应设定的温度。60 N载荷非高斯面条件下的加速试验设计结果如图6所示,实验温度为47 °C时,加速工况与未加速工况的粗糙峰接触状态表征参数可保持一致,相对误差均小于0.5%,表明设计的加速试验温度应为47 °C。

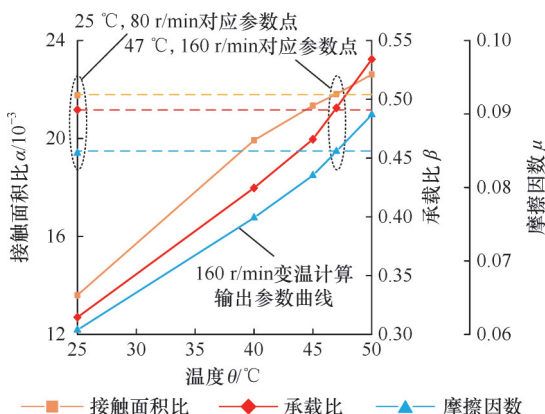


图6 60 N非高斯表面条件下的设计结果

Fig.6 The design results of accelerated experiment under 60 N and non-Gaussian surface conditions

加速试验的温度是在特定载荷和表面形貌参数条件下,将根据速度0.2 m/s与0.4 m/s计算得到的,因此还需确定载荷和表面形貌参数对加速

试验温度的影响。为此,在60 N高斯表面、50 N非高斯表面条件下,计算加速和常速工况对应的粗糙峰接触面积比、承载力比和摩擦因数,计算结果如表3所示。3个表征参数在两种条件下的均值接近。这说明改变载荷或表面形貌参数只会改变粗糙峰接触状态表征参数的大小,但对于相同的载荷和表面形貌条件,加速前后的粗糙峰接触状态不变。因此,加速试验设定的温度仅与所用润滑剂的黏温特性、原始工况和加速试验中的速度有关。

表3 不同工况下加速试验与未加速试验的仿真结果

Tab.3 The simulation results of accelerated experiments and normal experiments in different operating conditions

	接触面积比 α	承载力比 β	摩擦因数 μ
60 N高斯面 常速工况	0.00714 ± 0.00174	0.32497 ± 0.09723	0.05971 ± 0.01251
60 N高斯面 加速工况	0.00752 ± 0.0015	0.32551 ± 0.09768	0.05911 ± 0.01282
50 N非高斯面 常速工况	0.019009 ± 0.004029	0.439427 ± 0.082906	0.078246 ± 0.009676
50 N非高斯面 加速工况	0.01891 ± 0.003994	0.443031 ± 0.08485	0.078721 ± 0.00988

产生这一现象的原因在于“降黏加速”的设计思路核心为保持摩擦副粗糙峰接触状态不变,同时实现加速。粗糙峰接触状态受混合润滑油膜厚度控制,而混合润滑油膜厚度与相对运动速度、润滑剂黏度、载荷、表面形貌参数有关。改变载荷和表面形貌参数会改变粗糙峰接触状态,但在同一组加速和未加速试验中,载荷和表面形貌参数相同,故对于同一组实验而言,加速前后粗糙峰接触状态仅受摩擦副相对运动速度、润滑剂黏度的影响,即载荷和表面形貌的改变不会影响加速试验温度的选取。因此,在润滑剂及其黏温特性、未加速试验和加速试验的速度均确定的情况下,无需额外测量形貌参数、设定载荷大小即可设计性能演变加速试验。

2.2 混合润滑性能演变模型仿真验证

使用混合润滑性能演变模型计算加速与非加速工况下摩擦副的摩擦因数、表面形貌参数。混合润滑性能演变模型是在共形接触表面混合润滑确定性模型中耦合微观形式的Archard模型得到的,能分析磨损表面在混合润滑工况下的性能演变。

为分析具有时变特性的混合润滑性能演变过程,需将宏观形式的Archard磨损模型转化为微观形式。在受到的压力为 p 、面积为 A_i 的润滑剂

算区域网格划分微元上的磨损量为

$$W = KpA_i l/H \quad (13)$$

式中: A_i 为第 i 个微元面积; l 为界面微元的相对运动距离; K 为磨损系数; H 为材料的硬度。

将式(13)进行变换即可得到单位微元上的磨损高度

$$h_i = W/A_i = Kpl/H \quad (14)$$

因此,可通过式(14)计算摩擦副表面的局部磨损深度。根据共形接触表面混合润滑确定性模型确定摩擦副界面粗糙峰接触区及接触压力。选定合适的时间步长后,可将表面磨损和混合润滑计算结合,得到混合润滑性能演变模型。考虑时间步长的表面磨损计算离散方程为

$$\Delta h = Kpv\Delta t/H \quad (15)$$

式中: v 为摩擦副相对运动速度; Δt 为时间步长。

混合润滑状态下,摩擦副界面经历持续或周期性磨损。为使仿真结果更加符合实际情况,在摩擦副相对运动方向设置表面形貌的周期性边界条件,因此时间步长设为表面形貌矩阵循环一个周期所需时间的整数倍:

$$\Delta t = nl_{\text{calc}}/v = 50l_{\text{calc}}/v \quad (16)$$

式中: l_{calc} 为计算域长度, m。

采用混合润滑性能演变模型对所设计的加速试验进行仿真验证。需要说明的是,仿真计算只为验证加速试验方法的准确性。考虑到仿真步长和计算量的限制,选择较短时长进行演示。非加速工况参数为温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 速度 0.2 m/s , 载荷 60 N , 工作时长 25 s ; 加速工况参数为温度 $47\text{ }^\circ\text{C}$, 速度 0.4 m/s , 载荷 60 N , 工作时长 12.5 s 。表面形貌采用非高斯表面。图 7a 显示, 在较短的仿真时长内, 加速和未加速的摩擦因数变化规律和数值基本相同。由图 7b~图 7d 可知, 加速试验能在更短的时间内得到与未加速试验相同的形貌参数变化效果。

2.3 实验结果与讨论

如图 8 所示, 改造后的动环在整个阶梯加速试验周期内的温升约为 $3\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此, 可认为改造后的动环在加速试验过程中不会产生额外温升, 润滑介质温度保持不变, 润滑剂黏度基本不变, 满足混合润滑状态改变主要由速度变化实现的要求。

如图 9 所示, 加速和未加速的摩擦因数变化趋势基本一致。在摩擦磨损实验的开始阶段, 加速工况比未加速工况的摩擦因数减小慢, 这与理论分析结果相反, 产生该现象的主要原因可能是实验件表面形貌参数不一致、实验件装配误差、磨

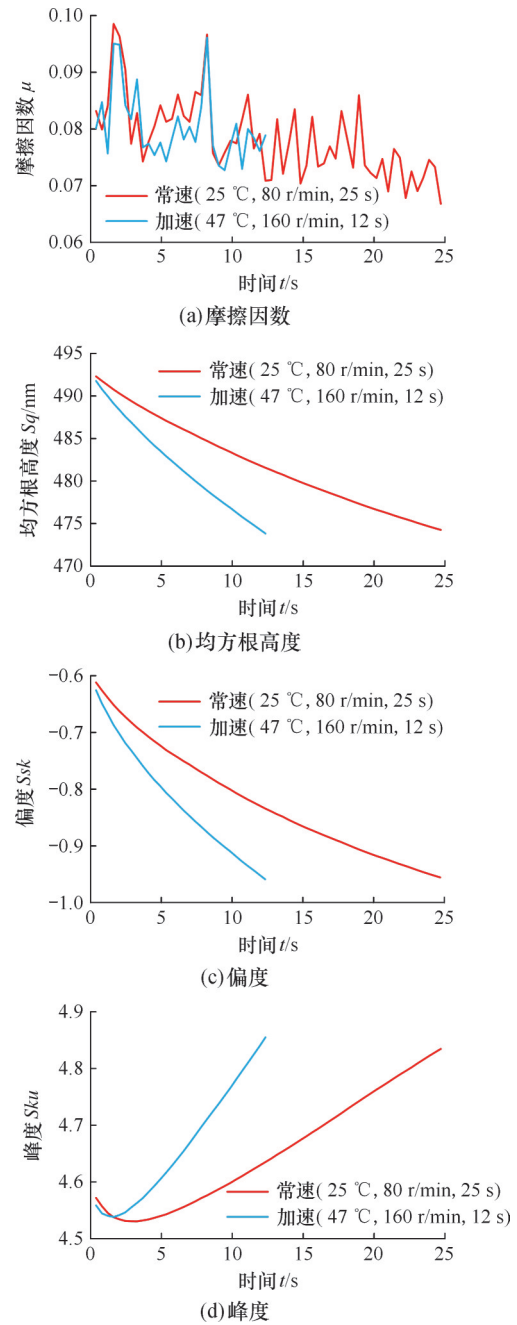


图 7 60 N 非高斯表面条件下加速试验的仿真结果
Fig.7 The simulation results of accelerated experiment under 60 N and non-Gaussian surface conditions

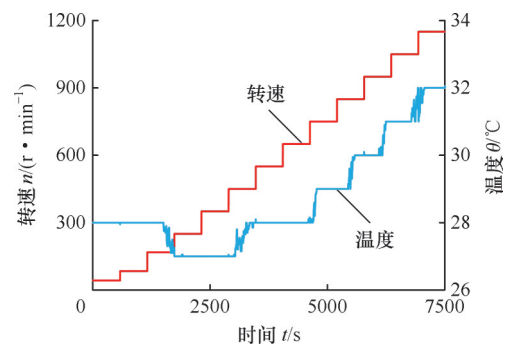


图 8 改造后动环实验过程温升情况
Fig.8 Temperature rise during experiments process after modifying rotating ring

粒磨损的影响。随着摩擦磨损过程的进行,加速工况下摩擦因数的下降速度快于未加速工况,且在10 min时基本进入稳定摩擦阶段,实验组1加速工况的稳定摩擦因数保持在0.030左右,实验组2加速工况的稳定摩擦因数保持在0.015左右。未加速工况在20 min时进入稳定摩擦阶段,2个实验组中未加速工况的稳定摩擦因数与对应加速工况的稳定摩擦因数相近。

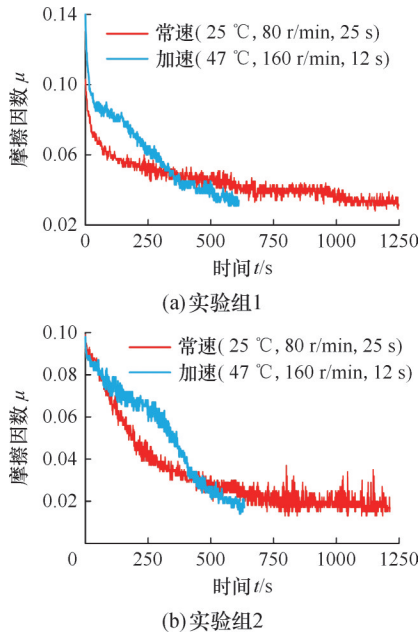


图9 加速试验与未加速试验摩擦因数比较
Fig.9 The comparison of friction coefficient of accelerated experiments and normal experiments

用白光干涉仪分析摩擦实验后样品的表面形貌,如表4所示,加速前后 Sq 、 Ssk 和 Sku 在都具有一定的差距,其中, Sq 、 Ssk 、 Sku 分别为表面高度数据点云的二阶中心距、三阶中心距和四阶中心距:

$$Sq = \sigma = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (17)$$

$$Ssk = \frac{1}{\sigma^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (18)$$

$$Sku = \frac{1}{\sigma^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (19)$$

式中: $z(x, y)$ 为三维表面均值归零化处理后位置 (x, y) 的表面高度; A 为评价区域面积。

由于 Sq 、 Ssk 、 Sku 都是表面高度测量数据的统计结果,因此随着阶数的增大,计算结果对数据离散值的敏感性增强,导致加速前后磨损后表面的 Sq 、 Ssk 、 Sku 都存在一定的差距。这种差距在微观形貌测量领域是可以接受的,可认为加速前后的磨损后表面形貌具备统计相似性。若磨损后的表面形貌不具备统计相似性,则加速前后 Sq 、

Ssk 、 Sku 的差异性会远大于表4所示数据。因此根据表4中的结果可以认为本文加速前后这三个表面形貌参数吻合较好。

表4 加速试验与未加速试验的表面形貌参数

Tab.4 The surface morphology parameters of accelerated experiments and normal experiments

工况	$Sq/\mu\text{m}$	Ssk	Sku
实验组1 加速工况	0.083 67± 0.01382	-7.956 67± 2.037 36	116.51± 69.920 18
实验组1 常速工况	0.072± 0.011 43	-8.47± 1.727 25	218.513 33± 87.034 91
实验组2 加速工况	0.063 67± 0.008 65	-7.543 33± 0.830 03	137.213 33± 28.471 58
实验组2 常速工况	0.083± 0.008 52	-6.3± 0.396 74	84.78± 30.516 05

加速和常速工况下的摩擦因数和表面形貌参数的对比说明了加速试验下10 min的磨损效果可等效常速实验下20 min的磨损效果,验证了本文加速试验设计方法的有效性。

3 结论

1) 提出一种用于共形接触表面混合润滑性能演变过程的加速试验设计方法。该方法针对黏着磨损,通过提高转速、降低润滑剂黏度来保持混合润滑状态下摩擦副粗糙峰的接触状态不变。采用粗糙峰接触面积比、承载力比、摩擦因数表征粗糙峰接触状态,通过混合润滑确定性模型计算润滑剂降低后的黏度。

2) 采用表面形貌参数 Sq 、 Ssk 、 Sku , 以及摩擦因数表征摩擦副表面的磨损效果。研究发现,速度增加一倍时,加速试验下10 min的磨损效果可等效实现常速实验下20 min的磨损效果。

3) 所提加速试验方法不受载荷与原始形貌参数影响,只需确定加速目标、润滑剂及其黏温特性、未加速工况即可设计加速试验。

参考文献:

[1] SONG Yifan, YAN Pei, JIAO Li, et al. Numerical Simulation of the Effect of Surface Microgeometry and Residual Stress on Conformal Contact Fretting Fatigue Crack Initiation Behavior[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2023, 46(8): 2798-2815.

[2] YANG Zhefu, HONG Jie, WANG Dong, et al. Vibration Analysis of Rotor Systems with Bearing Clearance Using a Novel Conformal Contact Model[J]. Nonlinear Dynamics, 2024, 112(10): 7951-7976. [LinkOut]

[3] 朱佩元. 圆柱直齿轮沟槽微织构摩擦性能研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2021. Zhu Peiyuan. Research on Friction Performance of Cylindrical Spur Gear with Grooved Micro-texture[D]. Xiamen: Xiamen University of Technology, 2021.

[4] LI Hongju, LIU Ying, LIAO Haoran, et al. Accelerated

- Wear Test Design Based on Dissipation Wear Model Entropy Analysis under Mixed Lubrication [J]. *Lubricants*, 2022, 10(4): 71.
- [5] SPRINGIS G, BOIKO I. Comparative Analysis of Wear Models for Accurate Wear Predictions [J]. *Lubricants*, 2025, 13(3): 100.
- [6] GU Congcong, LIU Songyong, CHEN Haibin, et al. Design of Disc Cutter Wear Test System and Research on Wear Law Based on Eddy Current Testing Technology [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025, 58(2): 2071-2088.
- [7] SHIVARAMU H T, VIGNESH NAYAK U, K S U. Wear Debris Analysis of Al-Si/MWCNT Nanocomposite during Dry Sliding Wear Tests [J]. *Engineering Research Express*, 2024, 6(2): 025546.
- [8] GORYACHEVA I G, STEPANOV F I, TORSKAYA E V. Fatigue Wear Modeling of Elastomers [J]. *Physical Mesomechanics*, 2019, 22(1): 65-72.
- [9] ZHANG Haibo, GOLTSBERG R, ETSION I. Modeling Adhesive Wear in Asperity and Rough Surface Contacts: a Review [J]. *Materials*, 2022, 15(19): 6855. [LinkOut]
- [10] 朱科浩. 纳米晶体锆摩擦行为的分子动力学模拟 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- ZHU Kehao. Molecular Dynamics Simulations of Friction Behaviors of Nanocrystalline Zirconium [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [11] PATURI U M R, PALAKURTHY S T, REDDY N S. The Role of Machine Learning in Tribology: a Systematic Review [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2023, 30(2): 1345-1397.
- [12] TREMMEL S, MARIAN M. Machine Learning in Tribology—More than Buzzwords? [J]. *Lubricants*, 2022, 10(4): 68.
- [13] CHENG Minghui, JIAO Li, YAN Pei, et al. Intelligent Tool Wear Monitoring and Multi-step Prediction Based on Deep Learning Model [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 62: 286-300.
- [14] 李鸿举, 刘莹, 廖浩然, 等. 基于耗散磨损模型的典型机械密封副混合润滑磨损加速试验研究 [J]. *摩擦学学报*, 2023, 43(3): 293-302.
- LI Hongju, LIU Ying, LIAO Haoran, et al. Accelerate Wear Test under Mixed Lubrication Condition Based on Dissipation Wear Model for Typical Mechanical Seal Pair [J]. *Tribology*, 2023, 43(3): 293-302.
- [15] ZHOU Zhenyu, JIANG Zhiguo, ZHENG Qiuyang, et al. Research on the Construction of Gradient Nanostructure and Anti-tribocorrosion Behavior of Aluminum Alloy Surface [J]. *Tribology International*, 2024, 194: 109448.
- [16] ZHOU Zhenyu, ZHENG Qiuyang, LI Yu, et al. Research on the Mechanism of the Two-dimensional Ultrasonic Surface Burnishing Process to Enhance the Wear Resistance for Aluminum Alloy [J]. *Friction*, 2024, 12(3): 490-509.
- [17] BOUGOFFA M S E, BENCHAA S, BENKRIMA Y, et al. An Innovative Evaluation of the Friction and Wear Behavior of Ferrous and Non-ferrous Metals under Lab and Lathe Wear Tests [J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 2024: s40033-024-00820-7.
- [18] MIAO Junwei, LIANG Hui, ZHANG Aijun, et al. Tribological Behavior of an AlCoCrFeNi_{2.1} Eutectic High Entropy Alloy Sliding Against Different Counterfaces [J]. *Tribology International*, 2021, 153: 106599.
- [19] CUI Xiaohan, JIANG Pengfei, NIE Minghao, et al. Microstructure and Wear Behavior of Laser Cladding Fe-CoCrNiMo Coating with Gradient Transition Entropy Interlayer [J]. *Tribology International*, 2024, 198: 109913.
- [20] 郭谨铭. 面向高纯8Cr4Mo4V的航空轴承寿命修正及加速试验方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- GuoJinming. Research on Life Modification and Accelerated Test Method of Aviation Bearing for High Purity 8Cr4Mo4V [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [21] 袁凯, 刘杰, 胡靖涵, 等. 可靠性加速试验技术研究 [J]. *自动化仪表*, 2024, 45(5): 19-24.
- YUAN Kai, LIU Jie, HU Jinghan, et al. Research on Reliability Accelerated Test Technique [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2024, 45(5): 19-24.
- [22] CHEN Wenhua, GAO Liang, PAN Jun, et al. Design of Accelerated Life Test Plans—Overview and Prospect [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 31(1): 13.
- [23] WANG Yashun, FANG Xin, ZHANG Chunhua, et al. Lifetime Prediction of Self-lubricating Spherical Plain Bearings Based on Physics-of-failure Model and Accelerated Degradation Test [J]. *Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2016, 18(4): 528-538.
- [24] YU Rui, HE Bin, QIAN Shusheng. Prediction of Gear Degradation Trend under Failure Modes Based on Accelerated Life Test [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 170: 109290.
- [25] LI Junyang, WANG Jiaxu, ZHOU Guangwu, et al. Accelerated Life Testing of Harmonic Driver in Space Lubrication [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2015, 229(12): 1491-1502.
- [26] JEON Hong-Gyu, YOO Jae-Hyeong, LEE Young-Ze. Design of Accelerated Life Test for Sleeve Bearing of Construction Equipment Based on Wear Prediction [J]. *Tribology Transactions*, 2019, 62(3): 419-427.
- [27] WANG Yuechang, AZAM A, ZHANG Gaolong, et al. Understanding the Mechanism of Load-carrying Capacity between Parallel Rough Surfaces through a Deterministic Mixed Lubrication Model [J]. *Lubricants*, 2022, 10(1): 12.
- [28] WANG Yuechang, LIU Ying, ZHANG Gaolong, et al. A Simulation Method for Non-Gaussian Rough Surfaces Using Fast Fourier Transform and Translation Process Theory [J]. *Journal of Tribology*, 2018, 140(2): 021403.

(编辑 张洋)

作者简介: 张梓洋, 男, 2000年生, 硕士研究生。研究方向为摩擦化学。Email: 23S153078@stu.hit.edu.cn。王悦昶(通信作者), 男, 1993年生, 博士。研究方向为密封技术、基础零部件摩擦学。发表论文37篇。Email: wangyuechang@hit.edu.cn。

本文引用格式:

张梓洋, 龚雅婧, 王悦昶. 混合润滑共形接触表面摩擦学特性演变的加速试验方法 [J]. *中国机械工程*, 2026, 37(1): 22-29.

ZHANG Ziyang, GONG Yajing, WANG Yuechang. Method for Accelerated Tribological Property Evolution Experiments of Conformal Contact Surfaces in Mixed Lubrication Regime [J]. *China Mechanical Engineering*, 2026, 37(1): 22-29.