

邱浩, 沈瑞, 戴庆文, 黄巍, 王晓雷. 温度-速度场下摩擦副界面油液热驱蠕爬与润滑特性研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2025, 45(1): 67–80. QIU Hao, SHEN Rui, DAI Qingwen, HUANG Wei, WANG Xiaolei. Migration-Lubrication Performance at Friction Pair Interfaces under Temperature-Velocity Fields[J]. Tribology, 2025, 45(1): 67–80. DOI: 10.16078/j.tribology.2024302

温度-速度场下摩擦副界面油液热驱蠕爬与润滑特性研究

邱浩¹, 沈瑞², 戴庆文^{1*}, 黄巍¹, 王晓雷¹

(1. 南京航空航天大学 直升机动力学全国重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 热驱蠕爬(也称蠕爬, Migration)是指摩擦副界面油液不受外力作用, 从高温区向低温区定向铺展的行为. 在空间机构及精密仪器的滚动轴承中, 润滑油蠕爬流失将导致摩擦阻力增大, 进而影响机构的运行精度. 由于摩擦和磨损在机械运动中是无法避免的, 同时会伴随摩擦生热, 而摩擦生热会引起摩擦副表面产生温度梯度, 而运动副在空间极端工况下, 液体润滑剂易受表面张力的影响, 极小的温度梯度就会引起润滑剂的蠕爬流失. 在现代机械工业领域, 油液蠕爬流失问题常见于轴承中, 工作时轴承滚道的温度较高, 导致润滑剂向温度较低的滚道外围区域蠕爬流失, 大大缩减了轴承寿命, 导致机械设备润滑故障, 降低了生产效率. 对此, 本文中以GCr15和Si₃N₄等典型滚动轴承球与304不锈钢平面构成的点-面接触摩擦副为研究对象, 探索了温度梯度和界面运动协同作用下油液热驱蠕爬行为与润滑特性, 研究了水平和竖直温度梯度作用下, 干摩擦、硅油润滑以及引入不同方向温度梯度后摩擦力的变化规律, 分析了滚子直径、滚子材料以及温度梯度方向对摩擦润滑性能的影响. 引入了重力因素, 探究了重力方向与温度梯度方向相同/相反条件下摩擦力的变化规律并观测了摩擦运动过程中接触角的变化规律. 研究结果表明: 在相同的试验条件下, 不同直径的球摩擦力变化规律一致; 当温度梯度垂直/平行于运动方向以及竖直时, 会导致往返运动过程中摩擦力变化不一致, 出现“对称”与“不对称”现象; 当温度梯度方向与重力方向相同时, 会加速硅油的热驱蠕爬; 而当温度梯度方向与重力方向相反时, 会对硅油的热驱蠕爬起到一定的抑制作用, 进一步分析了热驱蠕爬方向对摩擦力的影响规律和接触角的变化规律. 揭示了温度-速度场协同作用下界面热驱蠕爬与摩擦学行为差异产生的机制. 论文的研究成果有望为空间机构和精密仪器等特殊工况下的持久定区域润滑设计提供参考, 有望为复杂机械设备实现小型化、高效化以及提高设备可靠性等方面提供重要支撑, 对提升航空航天高端装备设计水平有一定的借鉴意义.

关键词: 温度梯度; 热驱蠕爬; 界面运动; 润滑; 接触角

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2025)01-0067-14

Migration-Lubrication Performance at Friction Pair Interfaces under Temperature-Velocity Fields

QIU Hao¹, SHEN Rui², DAI Qingwen^{1*}, HUANG Wei¹, WANG Xiaolei¹

(1. National Key Laboratory of Helicopter Aeromechanics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China;

Received 9 October 2024, revised 6 December 2024, accepted 12 December 2024, available online 28 January 2025.

*Corresponding author. E-mail: daiqingwen@nuaa.edu.cn, Tel: +86-19951655663.

This project was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3082023NS2023025), and the National Natural Science Foundation of China (51805252, 52175172).

中央高校基本科研业务费专项资金(3082023NS2023025)和国家自然科学基金项目(51805252, 52175172)资助.

2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Hunan Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Thermally driven creeping (also known as creeping or migration) refers to the behavior in which lubricant spreads directionally from a high-temperature area to a low-temperature area at the friction interface without external forces. In the rolling bearings of space mechanisms and precision instruments, lubricant creeping and loss increase frictional resistance, which in turn affects the operational accuracy of the system. Friction and wear are inevitable in mechanical motion, and the heat generated by friction leads to the formation of a temperature gradient on the surface of the friction pair. In extreme operating conditions, liquid lubricants are easily affected by surface tension, and even a small temperature gradient can cause lubricant to creep and migrate. In modern mechanical industries, the problem of lubricant creeping loss is common in bearings. During operation, the high temperature of the bearing raceway causes the lubricant to creep and migrate to the lower-temperature outer regions of the raceway, significantly reducing the bearing's lifespan, leading to lubrication failures in mechanical equipment, and lowering production efficiency. This study used point-to-surface contact friction pairs consisting of typical rolling bearing balls made of GCr15 and Si_3N_4 and a 304 stainless steel flat surface, exploring the thermally driven creeping behavior and lubrication characteristics of lubricants under the combined effects of temperature gradients and interface motion. The study examined the changes in friction force under horizontal and vertical temperature gradients, including dry friction, silicone oil lubrication and different temperature gradient directions. The impact of roller diameter, roller material, and temperature gradient direction on friction and lubrication performance was also analyzed. The study introduced gravity as a factor and investigated how friction force changed when the gravity direction aligned or opposed the temperature gradient direction. It also observed the variation in contact angle during friction motion. The results showed that under the same experimental conditions, the friction force variation pattern was consistent for balls of different diameters. When the temperature gradient was perpendicular or parallel to the motion direction or vertical, the friction force changed inconsistently during reciprocating motion, exhibiting "symmetric" and "asymmetric" phenomena. When the temperature gradient direction was the same as the gravity direction, it accelerated the thermally driven creeping of silicone oil. However, when the temperature gradient direction opposed the gravity direction, it inhibited the thermally driven creeping of silicone oil. Further analysis revealed the effect of the creeping direction on friction force and contact angle variation. This research uncovered the mechanisms behind the differences in interfacial thermally driven creeping and tribological behavior under the synergistic effects of temperature and velocity fields. The findings were expected to provide valuable insights for designing durable localized lubrication in special operating conditions for space mechanisms and precision instruments. Additionally, it was expected to support the miniaturization, efficiency improvement and reliability enhancement of complex mechanical equipment, offering important guidance for advancing the design standards of high-end aerospace equipment.

Key words: thermal gradient; thermal capillary migration; interface motion; lubrication; contact angle

热驱蠕爬(也称蠕爬、Migration)是指摩擦副界面油液不受外力作用,从高温区向低温区定向铺展的行为^[1-2]。由于液体的表面张力会随温度升高而降低^[3],而液体的表面张力与温度成反比,在温度梯度作用下,液体表层分子冷热端三相界面处受力不再平衡,液-气界面形成了表面张力梯度,高表面张力将拖拽低表面张力液体流动,即热驱蠕爬。欧洲空间摩擦实验室Roberts等^[4]指出,除了温度场,广义上的油液蠕爬还包含了由液体浓度变化、固体表面微结构及固-液界面张力不同等因素引发的表/界面流动。

随着航空航天领域高端装备的飞速发展,润滑剂蠕爬带来的问题逐渐引起了科研工作者的关注。据美国NASA报道,机械润滑不当是造成空间机械部件失效的重要原因之一^[5];国内也有报告表明,多起空间机

构的失效事件均与润滑失效有关,尤其是运动副之间的高温导致润滑剂流失严重,加剧了构件的磨损^[6]。润滑失效将严重影响航天器在轨服役寿命,如何抑制润滑剂的热驱蠕爬是摩擦学领域研究的热点。

早期,Fote等^[7]和Kannel等^[8]研究了温度梯度作用下超精炼矿物油KG-80的流动行为,试验证实了 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ 的温度梯度就可以驱动润滑油从高温向低温区定向流动。此后,国内外研究人员对温度梯度下润滑油蠕爬的研究展开了大量研究。在液相方面,Liu等^[9]研制的离子液体润滑剂因具备较强的界面吸附性,防蠕爬性能优异;孟永钢等^[10]指出,提高润滑油粘度可以在一定程度上减缓油液蠕爬流失;近期,Cai等^[11]研制的PFPE(全氟聚醚)凝胶和Li等^[12]研制的1,3-Diketone等高表面能润滑油均表现出较好的防爬性能;此外,通

过外加磁场设计, 磁性流体功能润滑剂也具备优异的防爬特性^[13]. 而在固相方面, Klien等^[14]研究了喷丸加工粗糙表面对润滑油热驱蠕爬行为的影响, 指出粗糙度与蠕爬速度正相关; 戴庆文等^[15-16]探索了界面液滴调控的基本原理和微凹坑型表面织构对润滑油热驱蠕爬的影响规律, 并获得了基于表面织构设计的蠕爬调控策略; Grützmacher等^[17-18]研究了规则表面微沟槽阵列引导润滑剂热驱蠕爬的能力和温度梯度下润滑油在结构阵列表面的扩散动态; 西安交通大学张辉等^[19]提出了1种具有三维精细尺度结构的表面纹理仿生织构可以在温度升高时起到减摩作用; 浙江工业大学白少先等^[20]探究了温度梯度对油滴扩散的影响; 青岛理工大学栗心明等^[21]对温度梯度下润滑油的迁移速度及接触角等参数做了研究.

可以看出, 当前研究人员针对油液热驱蠕爬展开了大量研究工作, 为理解油液热驱蠕爬机理与调控手段提供了丰富的参考. 值得注意的是, 目前的研究工作主要集中在固体表面润滑油蠕爬行为量化分析, 但球-面(点-面)真实摩擦副界面的油液热驱蠕爬受到界面温度、相对运动和摩擦副材料等诸多因素的影响, 上述因素共同作用下, 界面润滑特性的特性如何不得而知. 鉴于此, 本文中拟展开温度-速度场下摩擦副界面油液热驱蠕爬和摩擦润滑特性研究, 以典型的球-面接触副为研究对象, 研究水平方向(温度梯度方向

和摩擦移动方向平行/垂直)和竖直方向(温度梯度方向与重力方向相同/相反)下温度梯度对摩擦力和接触角变化规律的影响, 揭示温度-速度场协同作用下界面热驱蠕爬与润滑耦合机制, 以期为空间机构和精密仪器等特殊工况下的持久定区域润滑设计提供参考.

1 试验部分

1.1 试验材料

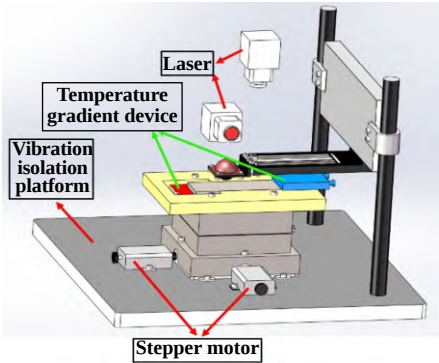
试验中以点-面接触摩擦副为对象, 上试样选用直径为10和5 mm的氮化硅球(Si_3N_4 , NSK, 中国)以及直径为10 mm的滚动轴承钢球(GCr15, NSK, 中国), 下试样采用304不锈钢板(70 mm×20 mm×3 mm, 南京钢铁集团有限公司, 中国). 其中 Si_3N_4 具有温升小和摩擦性能优异的特点^[22-23]. 硅油因具有良好的理化性质和热稳定性在航空航天等领域得到广泛应用, 采用黏度为48.15 mPa·s的硅油作为润滑剂(密度: 963 kg/m³, 表面张力: 21±0.1 mN/m, 阿拉丁, 中国). 详细试验材料参数列于表1中.

1.2 试验装置

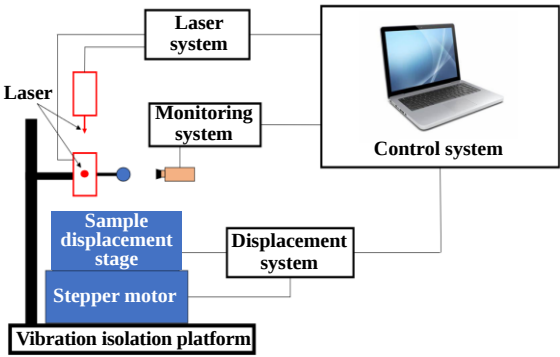
试验装置为自主设计的蠕爬试验平台, 如图1(a)所示, 其能够产生水平方向和竖直方向的温度梯度, 可用来探究不同方向下温度梯度对润滑油的蠕爬影响, 其基本原理是利用加热和制冷部件, 使其在固体表面产生温度梯度, 模拟温度场下润滑油的蠕爬过

表 1 试验试样参数表
Table 1 Experiments conditions

Samples	Parameters	Surface roughness, R_a
Si_3N_4 ball	Radius (R): 2.5 and 5.0 mm	20~50 nm
GCr15 ball	Radius (R): 5 mm	30~100 nm
304 stainless steel plate	Length×width×height: 70 mm×20 mm×3 mm	50~100 nm



(a) Diagram



(b) System composition

Fig. 1 Experimental setup of thermal capillary migration-lubrication

图 1 热驱蠕爬-润滑试验台装置

程,采用相机记录热驱蠕爬过程,激光测距仪和四边形悬臂梁测量摩擦力,进而分析摩擦过程中摩擦力的变化规律和运动两侧接触角的变化规律。

试验台装置工作系统组成如图1(b)所示,装置采用激光测距仪(上海联谊光纤激光器械有限公司)和由双层弹簧片组成的弹性梁来进行摩擦力测量,可以实现接触过程毫牛级力精确测量。加热装置用MCH高温陶瓷加热片(24 V和40 W),表面温度可达170 °C,同时搭配K型高精度热电偶(-40~260 °C)对温度进行反馈,并通过REX-C100万能数显温控器(YTG-850 W)进行温度调节;冷端采用循环水冷制冷器连接铜质水冷头,并使水冷头紧贴下试样,最低制冷温度可维持0.5 °C。

1.3 试验步骤

水平放置(无重力影响):为了探索不同条件参数下摩擦力的变化规律,试验中选用黏度为48.15 mPa·s的硅油作为润滑介质,设定预载荷为50 mN,以保证上下试样能够有效接触。下试样为304不锈钢板,安装在载物位移平台中,随载物位移平台一起以50 μm/s的速度进行往复摩擦移动,移动距离为9 mm。上试样分别采用了直径为10 mm的Si₃N₄球、直径为5 mm的Si₃N₄球以及直径为10 mm的GCr15球,依次在干摩擦、硅油润滑、引入与移动方向平行的温度梯度下和与移动方向垂直的温度梯度下进行摩擦试验,热端温度稳定为135 °C,冷端温度稳定为5 °C,置于温度差中的304不锈钢板直径为50 mm,即形成2.6 °C/mm的温度梯度。其中,直径为10 mm的Si₃N₄球和直径为10 mm的GCr15球硅油用量为3 μL,直径为5 mm的Si₃N₄球硅油用量减小到1.5 μL,以防止油液浸润到夹具的缝隙中对试验结果造成影响,以此来探究摩擦力的变化规律,试验原理图如图2(a)所示。

随后对中心加热条件下的变化规律进行探索,润滑介质不变,上试样只采用直径为10 mm的Si₃N₄球和直径为10 mm的GCr15球,依次在干摩擦、硅油润滑、中心加热80 °C和中心加热120 °C的条件下进行摩擦试验。本次试验中将加热片放置油液正下方304不锈钢板的下面,不再另设制冷装置,使其与四周方向和小球竖直方向形成自然温度梯度。油量为3 μL,摩擦移动速度、移动距离以及预载荷等其他试验条件均与上述试验相同。探究摩擦力的变化规律并观测硅油是否具有向上蠕爬的趋势,试验原理如图2(b)所示。

垂直放置(有重力影响):在上述试验的基础上,进一步探究考虑重力情况下对摩擦力规律变化的影响。本次试验将下试样304不锈钢板改为竖直方向并将小球旋转90°与之接触,小球采用直径为10 mm的Si₃N₄球和10 mm的GCr15球分别在干摩擦、硅油润滑以及引入2.6 °C/mm(热端温度稳定为135 °C,冷端温度稳定为5 °C,置于温度差中的304不锈钢板长度为50 mm)竖直温度梯度(温度梯度方向与油液重力方向相同/相反)并在4种试验条件下进行摩擦试验。为保证弹簧片的相对稳定减小其波动幅度,将预载荷增大到250 mN,硅油用量为3 μL,摩擦移动速度以及移动距离等试验条件依旧保持不变,观测摩擦力的变化规律。其试验原理图如图3(a)和(b)所示,试验条件参数列于表2中。

2 试验结果与分析

2.1 典型条件下油液热驱蠕爬特性

水平放置(无重力影响)情况下,探究水平温度梯度下摩擦力规律变化试验前,首先进行3组热驱蠕爬试验,第1组为水平方向热驱蠕爬试验,在304不锈钢板上加入与上述1.3水平试验一致的温度梯度和硅油

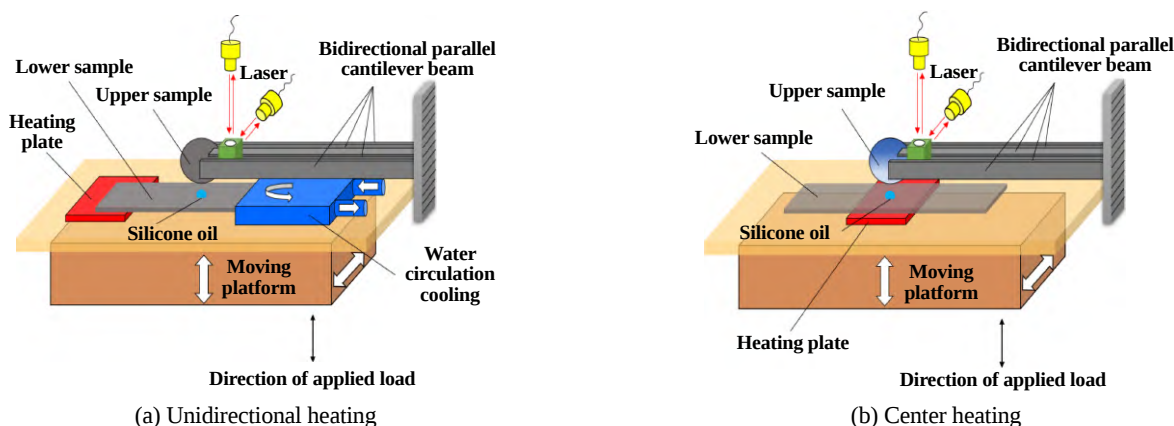


Fig. 2 Experimental schematic

图 2 试验原理图

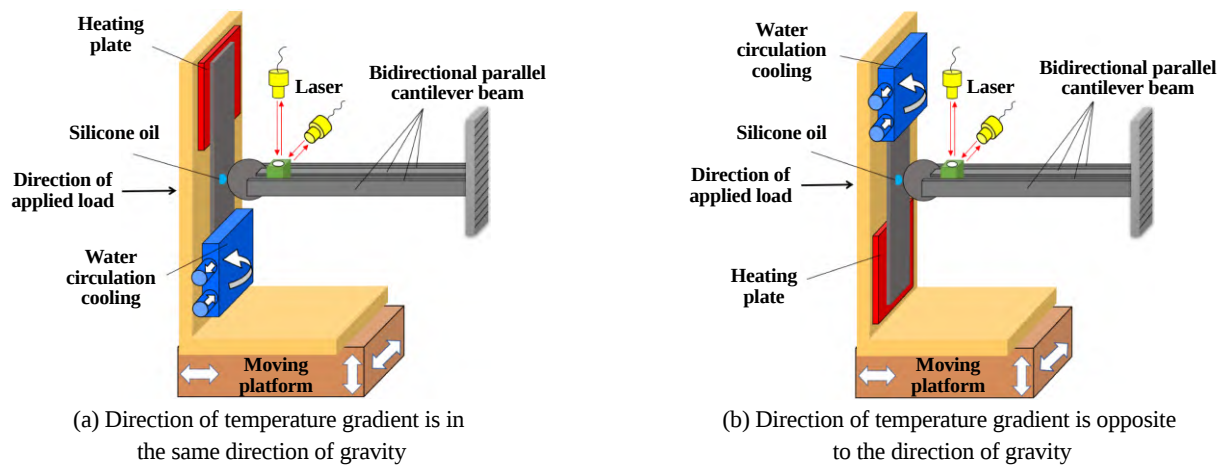


Fig. 3 Schematic of the experiment in the vertical temperature gradient direction

图 3 竖直温度梯度方向试验原理图

表 2 试验条件参数
Table 2 Test parameters

Parameters	Horizontal direction		Vertical direction	
Gravity, G				
Orientation				
Thermal gradient, ΔT	2.6 °C/mm (hot 135 °C, cold 5 °C)		2.6 °C/mm (hot 135 °C, cold 5 °C)	
Moving velocity, V	50 μm/s		50 μm/s	
Moving distance	9 mm		9 mm	
Lubrication conditions	Dry		Dry	
Upper sample	Silicone oil (1.5 μL, 3 μL) Si_3N_4 (Φ5 mm, Φ10 mm) GCr15 (Φ10 mm)		Silicone oil (3 μL) Si_3N_4 (Φ10 mm) GCr15 (Φ10 mm)	
Lower sample	304 stainless steel plate		304 stainless steel plate	
Preload	50 mN		250 mN	

用量, 观察其蠕爬情况, 如图4所示. 由图4可知, 硅油会在温度梯度影响下在304不锈钢板上蠕爬, 蠕爬时间约为330 s, 蠕爬距离约为35 mm.

第2组试验为水平方向由中心向四周热驱蠕爬试验, 将加热装置置于304不锈钢板的下方, 试验条件与上述1.3中心加热试验一致, 观察对比不同温度下热驱蠕爬情况, 如图5(a)和(b)所示. 通过对比上述2组结果可知, 中心加热与周围自然温度也可形成温度梯度, 且温度越高, 油液铺展得越快, 即硅油蠕爬越快.

竖直放置(有重力影响)情况下, 第3组试验为竖直方向(考虑重力)热驱蠕爬试验, 将硅油用蓝色色素进行染色, 以便于观测. 试验分3次进行, 第1次不引入温度梯度, 使硅油仅在重力作用下在304不锈钢板上自上而下运动, 第2次在竖直方向引入与重力方向一致

的温度梯度, 第3次在竖直方向引入与重力方向相反的温度梯度. 其余试验条件与上述1.3竖直方向试验条件一致, 3次运动情况如图6(a)、(b)和(c)所示. 第3组试验通过对比以上3种不同条件下硅油的运动情况, 在相同时间内, 当温度梯度方向与油液重力方向一致时, 油液的运动距离会大于无温度梯度的情况; 而当温度梯度方向与油液重力方向相反时, 油液的运动距离会小于无温度梯度的情况. 说明温度梯度的方向会在竖直方向对硅油运动产生影响, 并且可以加剧或者抵消一部分重力的影响.

2.2 热驱蠕爬对润滑性能的影响

2.2.1 水平温度梯度下的润滑特性

图7所示为水平方向温度梯度(摩擦移动方向与温度梯度方向平行/垂直)不同条件参数下摩擦力的变化

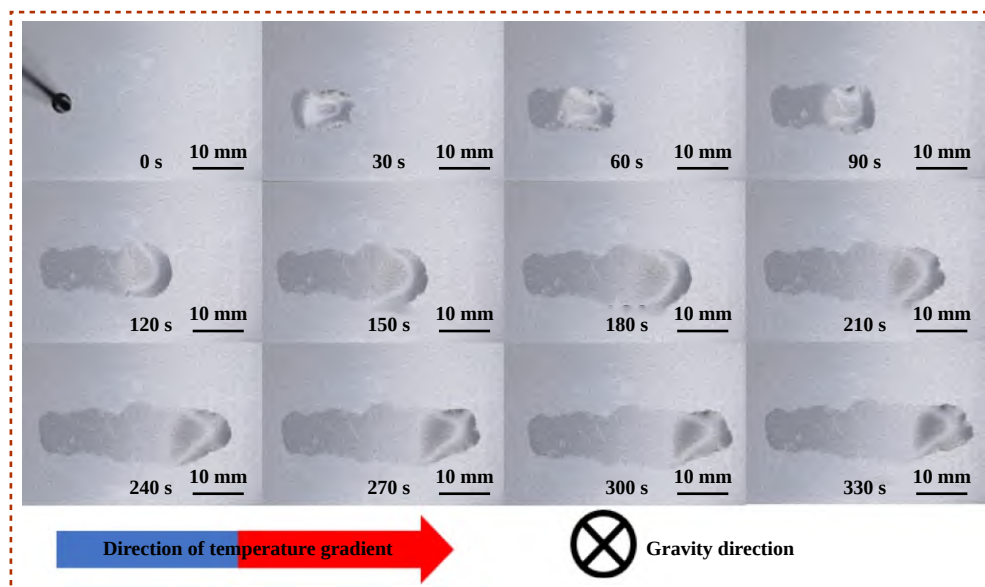


Fig. 4 Thermal capillary migration of silicone oil under a horizontal thermal gradient of 2.6 °C/mm

图 4 水平方向温度梯度(2.6 °C/mm)下硅油热驱蠕爬结果

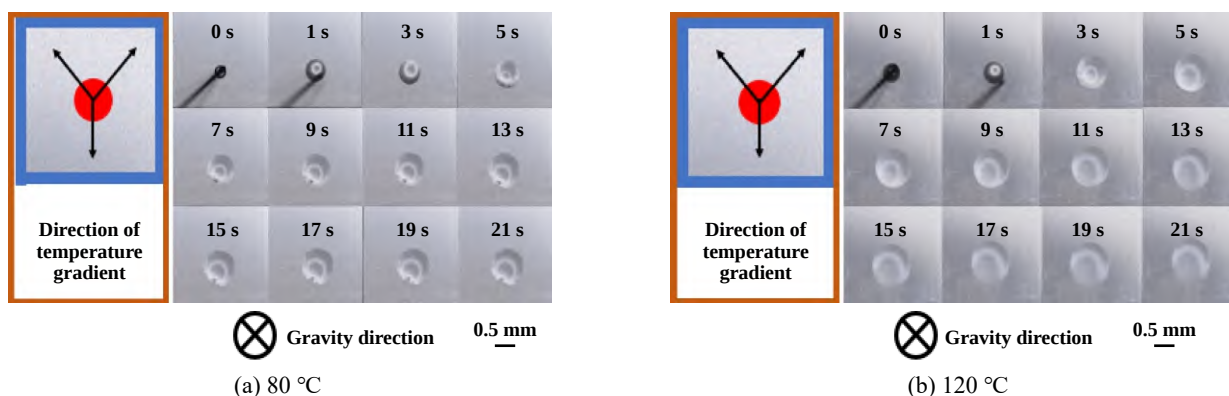


Fig. 5 Thermal capillary migration of silicone oil under a heated point at the center

图 5 中心加热温度梯度作用下硅油热驱蠕爬结果

规律,由图7可知,不同材料的小球(Si_3N_4 和GCr15)会因材料摩擦系数不同导致摩擦力大小不一,并且不同参数的小球在干摩擦的工况下都能保持摩擦力的相对稳定,当加入硅油时,能起到很好的润滑作用,使得摩擦力相对于干摩擦的工况有所降低.但是随着往复摩擦的进行,接触点处的硅油也会随之减少,从而导致摩擦力会逐渐增大,逐渐接近干摩擦的工况.并且当引入温度梯度后,在前60 s的稳定过程中,硅油会有所扩散,使得摩擦力在开始的时候相对于硅油润滑的工况会略有降低.但受温度梯度的影响,导致接触点处的硅油流失更快,从而导致摩擦力在往复摩擦过程中会更快地接近干摩擦的工况.另外,引入不同方向的温度梯度时,往复摩擦运动过程中摩擦力会出现“对称”与“不对称”的规律.进一步观测运动方向两侧接

触角变化情况,如图8所示.当施加与摩擦移动方向平行的温度梯度时,硅油的蠕爬方向会在一定时间内与摩擦运动方向相反,导致硅油在接触点的热端堆积,使得热端的接触角增大,如图8(a)、(c)和(e)所示,与冷端有较大的差值,阻碍摩擦运动,导致摩擦力增大,出现“不对称”现象.同时,随着往复摩擦的进行,硅油逐渐流失,蠕爬现象减弱,两侧接触角又逐渐恢复到相同的数值,差值减小,“不对称”现象逐渐消失.当施加与摩擦移动方向垂直的温度梯度时,在移动方向两侧接触角几乎相同,没有较大的差异,如图8(b)、(d)和(f)所示,因而摩擦力在往复运动过程中会始终“对称”.

2.2.2 中心加热四周辐射温度梯度下的润滑特性

将加热片放置于油液正下方探究其摩擦规律,其试验结果如图9(a)和(b)所示,摩擦规律跟上述试验中

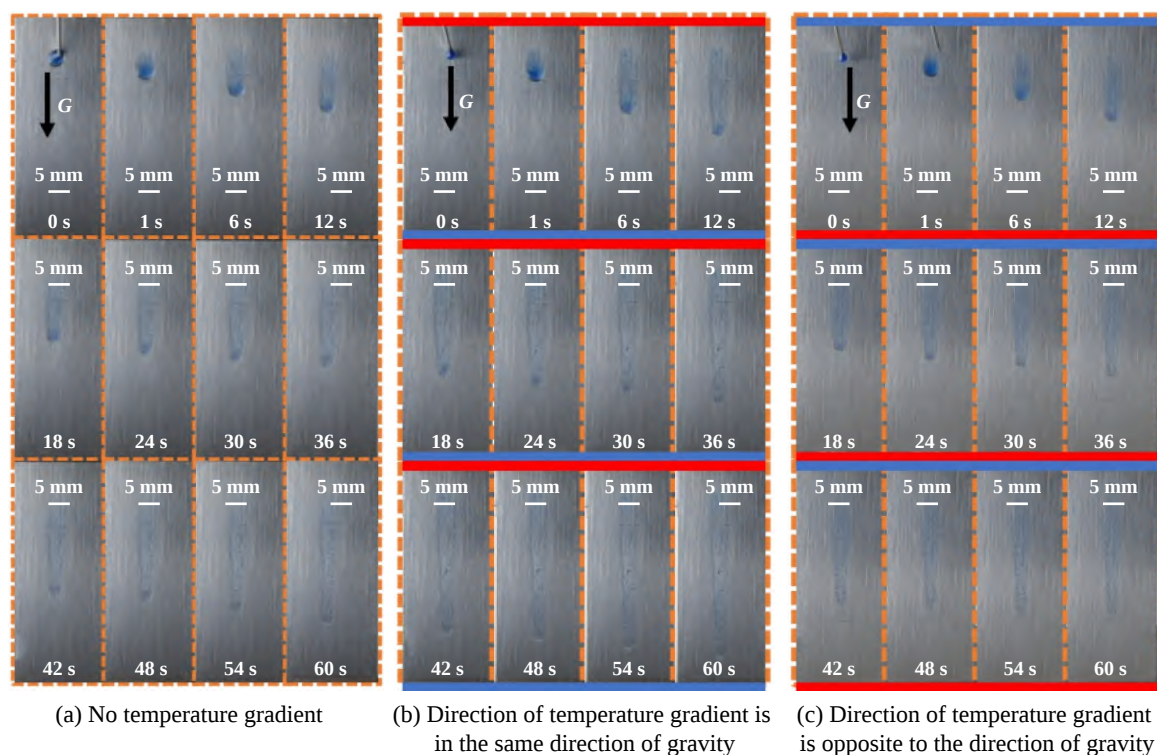


Fig. 6 Thermal capillary migration of silicone oil under a vertical thermal gradient

图6 竖直方向热驱蠕爬预试验硅油运动情况

一致. 另外, 观测其上侧油液与小球的接触角的变化规律可以发现, 当对油液中心施加一定的温度后, 下试样304不锈钢板会与上试样小球在竖直方向形成一定的温度梯度, 使得一部分硅油会在此温度梯度的驱使下向上运动, 沿小球向上蠕爬, 导致上部接触角变小. 并且随着温度在一定范围内升高, 此现象会更加明显. 随着往复摩擦的进行, 温度差逐渐缩小, 温度梯度随之减小, 油液热驱蠕爬现象也会逐渐弱化, 甚至消失, 再加上硅油在摩擦运动过程中的流失, 上侧油液会减少堆积, 上侧接触角随之逐渐增大, 如图10所示.

2.2.3 竖直方向温度梯度下的润滑特性

将下试样304不锈钢板竖直放置后, 在考虑重力的情况下, 其摩擦规律变化情况如图11所示. 试验结果表明, 除存在上述试验的摩擦规律外, 当施加不同方向的温度梯度, 摩擦规律也会有所差异. 从图11的图像可知, 当施加与重力相反的温度梯度时, 硅油的热驱蠕爬会抵消一部分重力的影响, 减小接触点处硅油流失, 使得摩擦力上升的速度便缓慢. 与之相反, 当施加与重力方向相同的温度梯度时, 硅油的热驱蠕爬会加速重力的作用, 加速接触点处硅油的流失, 导致摩擦力上升迅速, 更快地接近干摩擦工况. 同时, 通过观察不同试验条件下摩擦运动过程中运动方向两侧摩擦角的变化规律可知, 在重力作用下硅油会向下流

动, 在小球下方堆积, 从而导致小球下侧的接触角略大于上侧, 如图12(a)所示. 当施加与重力相反的温度梯度时, 下侧接触角会小于不加温度梯度工况, 并且两侧接触角的差值也更小, 如图12(b)所示. 而当施加与重力方向相同的温度梯度时, 下侧接触角会明显大于不加温度梯度工况, 并且两侧接触角的差值也更大, 如图12(c)所示.

总的来说, 硅油作为润滑剂能够起到很好的润滑效果, 以达到减小摩擦降低能量损耗的目的. 但是由于会受到包括自身重力在内的各种外力的影响以及温度差带来的热驱蠕爬的影响, 也会使得硅油无法充分发挥其良好的润滑作用, 甚至带来一定的阻力造成负面影响. 因此根据不同工况设计不同的温度梯度调控策略可以使得润滑油能够发挥更好作用.

2.3 试验结果分析

根据已有研究表明, 油液对于微动摩擦特性影响重大^[24]. 本研究上试样表面为球面, 下试样表面为平面, 其间存在一定量的可润湿上下固体试样的硅油液体, 则它们可以构成1个液桥系统. 其液桥力也将由作用于润湿面上的负压压力以及作用于三相线上的表面张力组成. 设上试样固体的球面半径为 R , 液体弯月形侧表面的2个主曲率半径分别为 r 和 r^* , 液体与上固体球面的接触角为 θ_t , 液体与下固体平面的接触角为

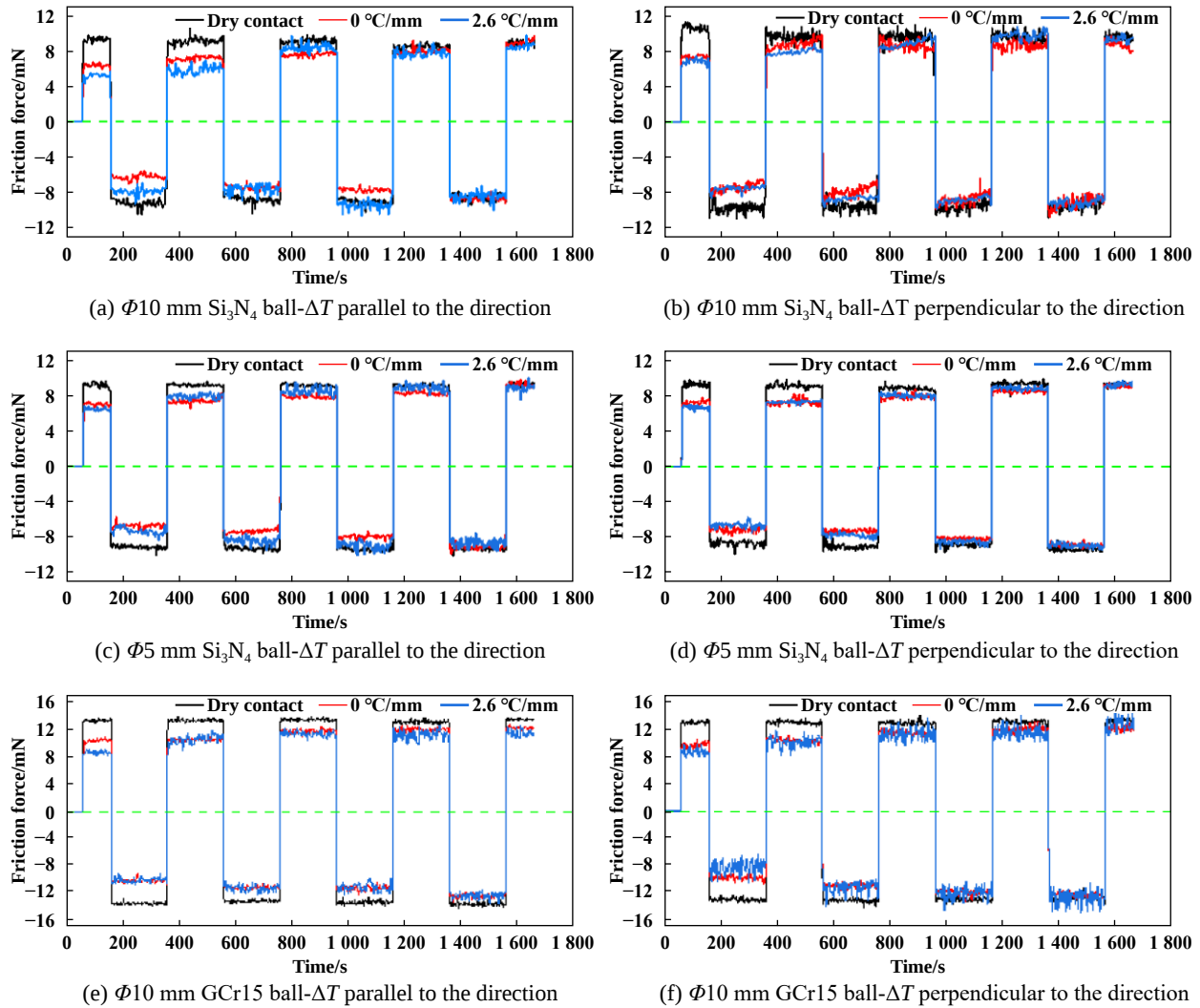


Fig. 7 Friction force variation diagram under various friction parameters in the horizontal direction

图 7 水平方向各擦参数下摩擦力变化规律图

θ_b , 液体的表面张力为 γ , 液体与球面润湿三相线在球上的位置夹角为 φ , 球面底端与底平面的间距为 d , 则由Young-Laplace方程可知^[25], 液体弯月形侧面的表面内外压力差为

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r^*} \right) \quad (1)$$

当球相相对于液体尺寸很大时, 即 $R \gg r$ 时, 有 $r^* \gg r$, 从而可以将该曲率半径的影响忽略, 则上述的压力差方程可以化为

$$\Delta p = \frac{\gamma}{r} \quad (2)$$

利用几何关系可知

$$R(1 - \cos\varphi) + d = r [\cos\theta_b + \cos(\theta_t + \varphi)] \quad (3)$$

即

$$\frac{1}{r} = \frac{\cos\theta_b + \cos(\theta_t + \varphi)}{R(1 - \cos\varphi) + d} \quad (4)$$

将其代入到压力差方程中得到

$$\Delta p = \frac{\gamma [\cos\theta_b + \cos(\theta_t + \varphi)]}{R(1 - \cos\varphi) + d} \quad (5)$$

该负压力乘上球表面上润湿区域在垂直于底平面方向投影的面积, 得到沿液桥轴线方向的液桥压力为

$$f_1 = \Delta p \pi R^2 \sin^2\varphi = \frac{\pi R^2 \sin^2\varphi \gamma [\cos\theta_b + \cos(\theta_t + \varphi)]}{R(1 - \cos\varphi) + d} \quad (6)$$

这是液桥力的一部分, 另一部分液桥力由作用于三相线上的侧表面张力沿垂直于底平面方向的分量组成. 有几何关系可知, 表面张力沿液桥轴线方向的分量为 $\gamma \sin(\theta_t + \varphi)$, 三相线的周长为 $2\pi R \sin\varphi$, 则该部分产生的液桥力为

$$f_2 = 2\pi R \gamma \sin\varphi \sin(\theta_t + \varphi) \quad (7)$$

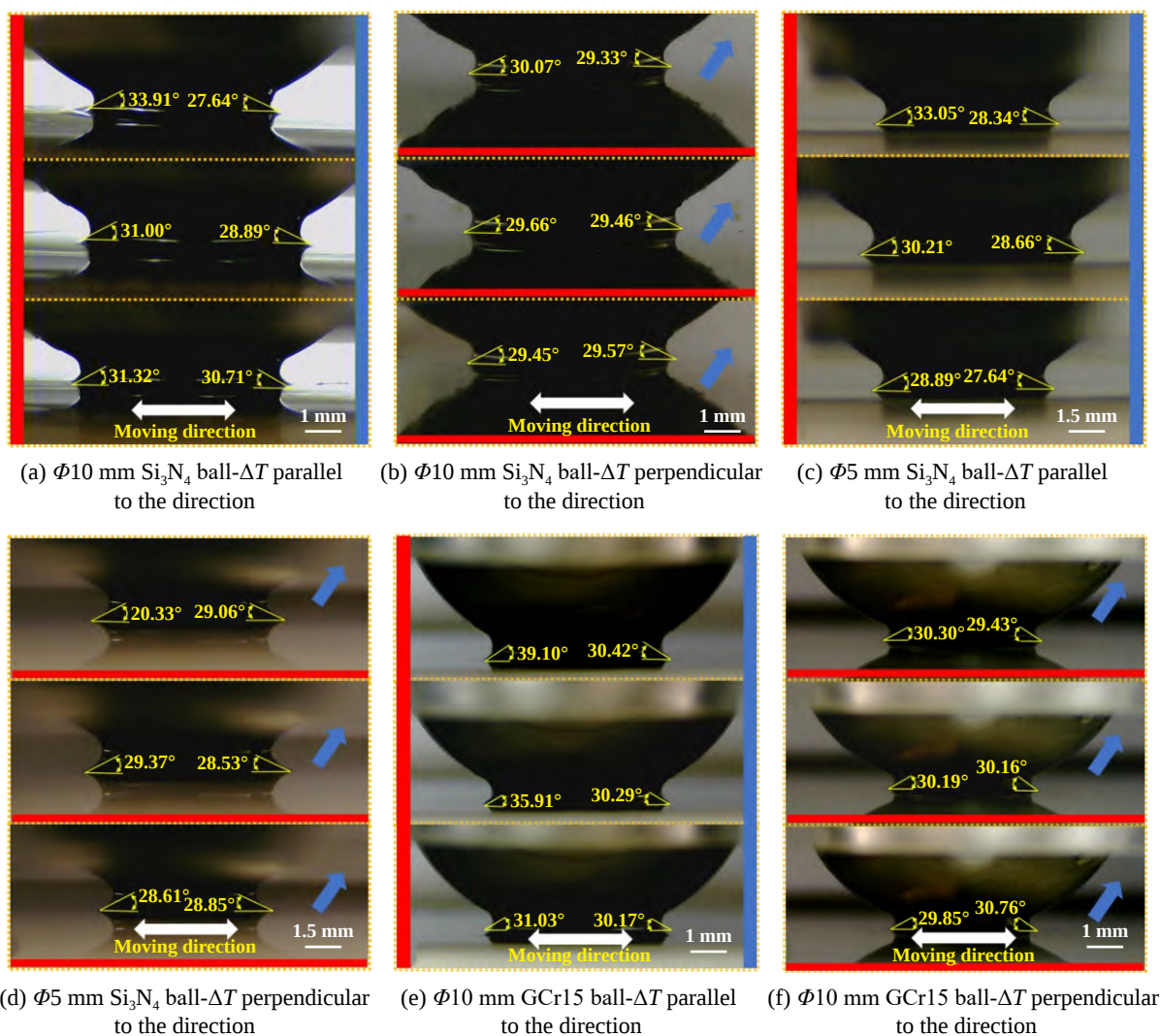


Fig. 8 Contact angle variation diagram on both sides of the moving direction under 2.6 °C/mm

图 8 2.6 °C/mm温度梯度下运动方向两侧接触角变化规律图

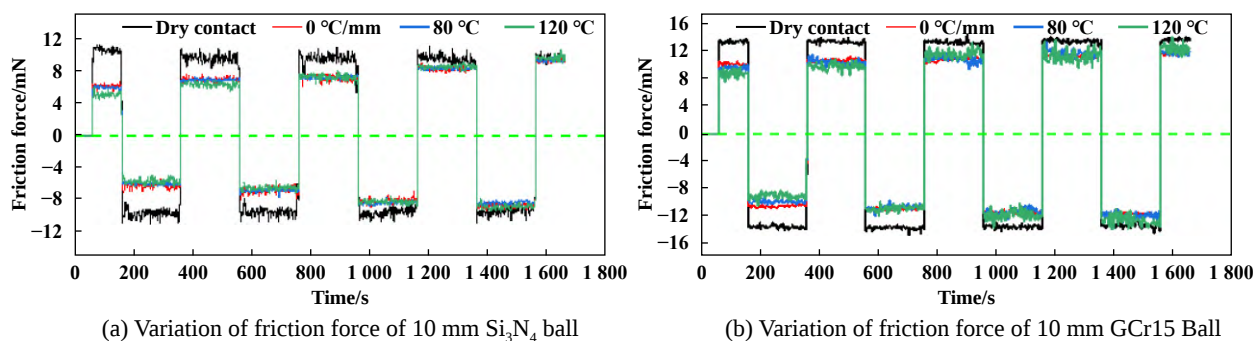


Fig. 9 Friction force variation diagram

图 9 摩擦力变化规律图

总的液桥力为

$$f = f_1 + f_2 = \frac{\pi R^2 \sin^2 \varphi \gamma [\cos \theta_b + \cos (\theta_l + \varphi)]}{R(1 - \cos \varphi) + d} + 2\pi R \gamma \sin \varphi \sin (\theta_l + \varphi) \quad (8)$$

当球很大时, 即 $R \gg r$ 时, $\varphi \rightarrow 0$, 同时若球与低平面为同一材料, 并且相互接触时, 有 $d = 0$ 和 $\theta_l = \theta_b = \theta$, 从而得

$$f = 4\pi R \gamma \sin \theta \quad (9)$$

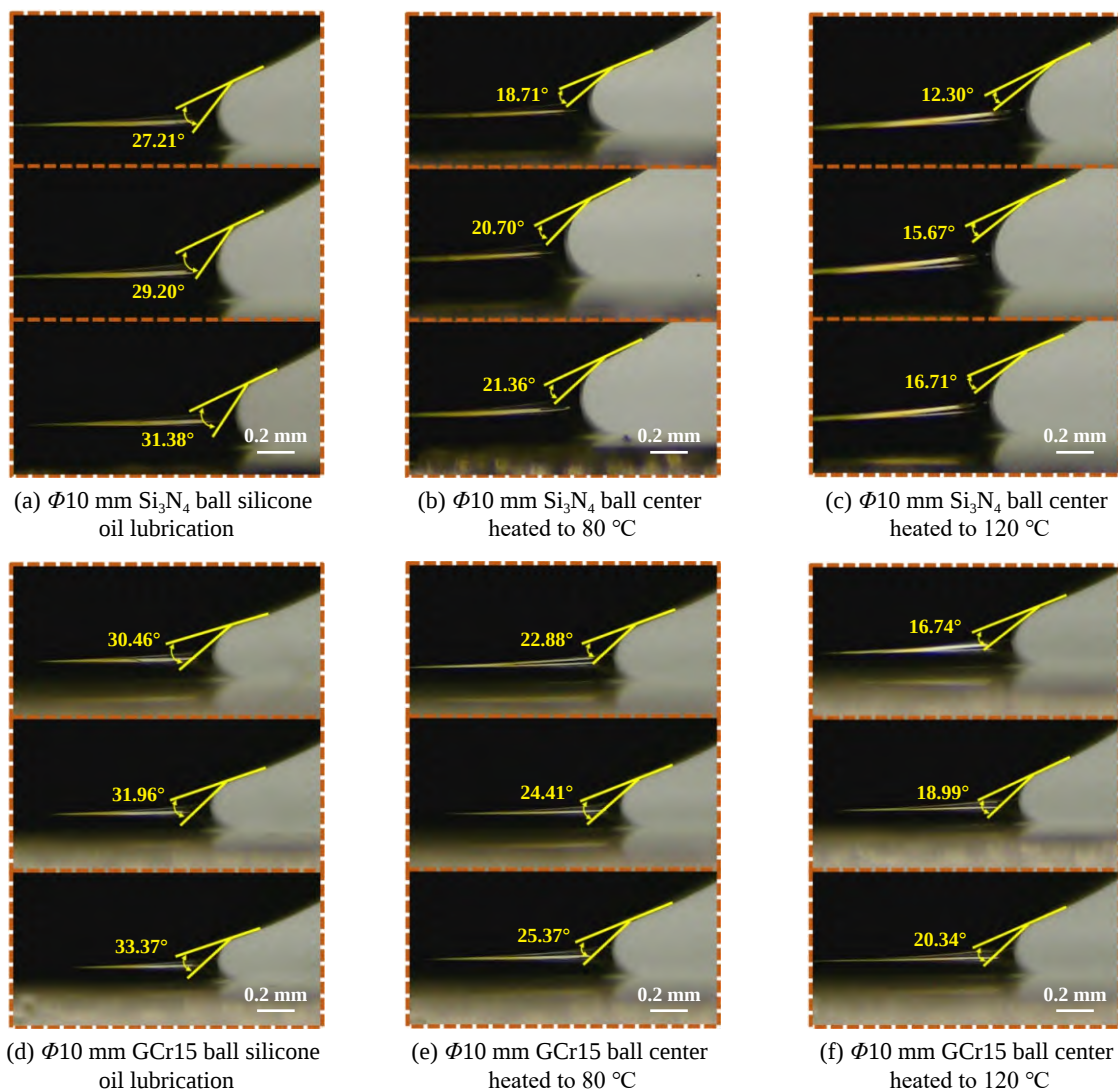
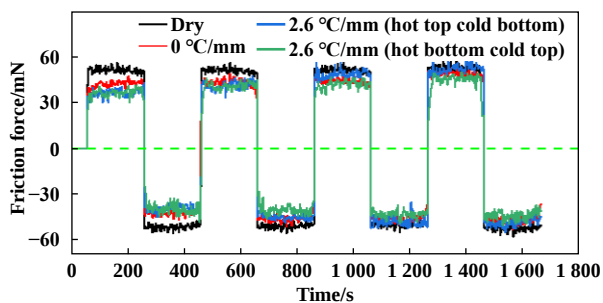


Fig. 10 Variation of the contact angle on the upper side

图 10 上侧接触角变化规律

Fig. 11 Friction force variation curve of 10 mm Si_3N_4 ball图 11 $\Phi 10$ mm Si_3N_4 球摩擦力变化曲线

在本试验中, 上试样球表面与下试样平面间是接触的, 故 $d = 0$, 且上试样与下试样的材料不同, 故液体与上固体球面的接触角 θ_l 不能直接等效成液体与下固体的接触角 θ_b . 以水平方向为例, 当施加水平方向温度梯度时, 每个循环取开始、中间和末尾 3 个点组成

摩擦力差 ΔF 离散点, 并绘制拟合曲线, 如图 13(a~f) 所示, 随后计算并分析运动两侧下端接触角 θ_b 和产生的轴向液桥力 f_l 的变化趋势, 其结果如图 14(a~f) 所示.

由图 13 可知, 不同条件下的摩擦力差值均会随着往复次数的增多而减少, 而运动方向两侧接触角在温度梯度方向与摩擦运动方向平行时会有较大的差异, 随着往复摩擦的进行, 差异随之减小, 拟合曲线逐渐收敛, 其产生的轴向液桥力与之变化规律一致, 由此产生“不对称”现象. 当温度梯度方向与摩擦运动方向垂直时, 接触角并没有很大的差别, 产生的轴线液桥力两侧接近且几乎没有变化, 由此产生“对称”现象, 此分析结果也与观测现象相吻合.

3 结果与讨论

本试验中探究了点-面接触的摩擦副中温度梯度

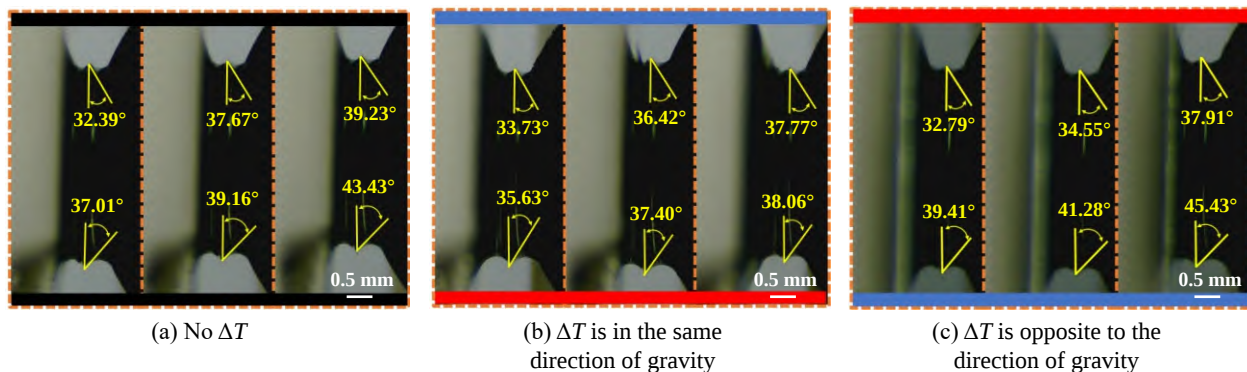


Fig. 12 Variation diagram of contact angles on the upper and lower sides under different conditions

图 12 不同条件下上下两侧接触角的变化规律图

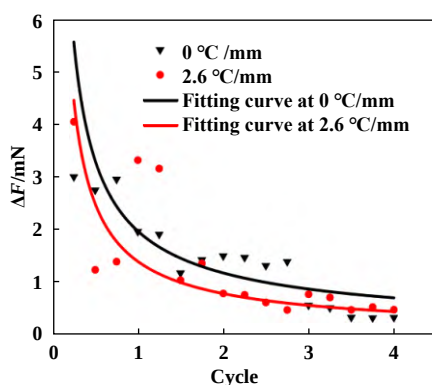
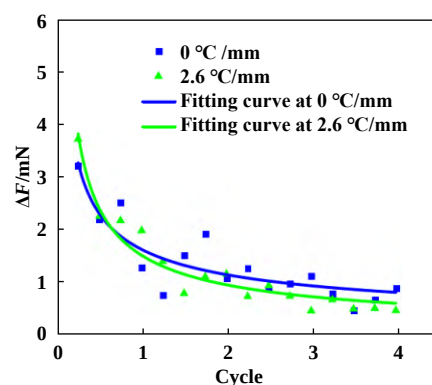
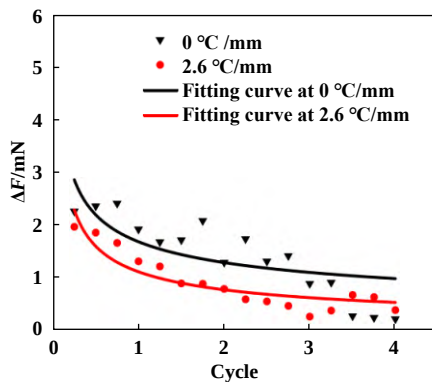
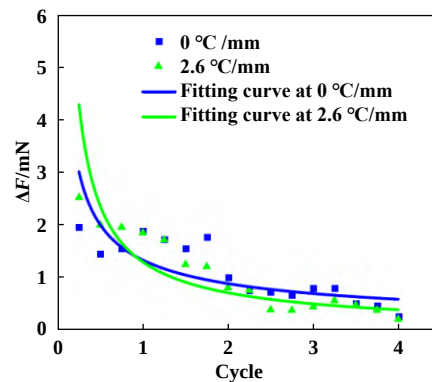
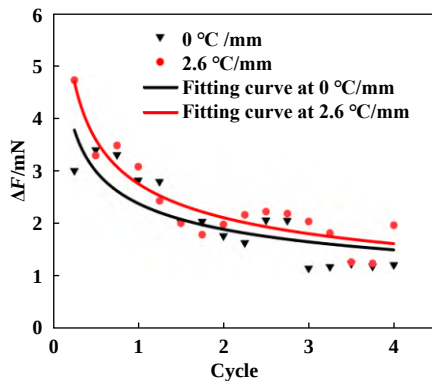
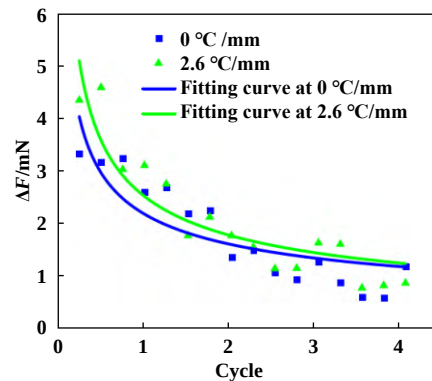
(a) $\Phi 10$ mm Si_3N_4 ball- ΔT parallel to the direction(b) $\Phi 10$ mm Si_3N_4 ball- ΔT perpendicular to the direction(c) $\Phi 5$ mm Si_3N_4 ball- ΔT parallel to the direction(d) $\Phi 5$ mm Si_3N_4 ball- ΔT perpendicular to the direction(e) $\Phi 10$ mm GCr15 ball- ΔT parallel to the direction(f) $\Phi 10$ mm GCr15 ball- ΔT perpendicular to the direction

Fig. 13 Variation diagram of friction force difference

图 13 摩擦力差值变化图

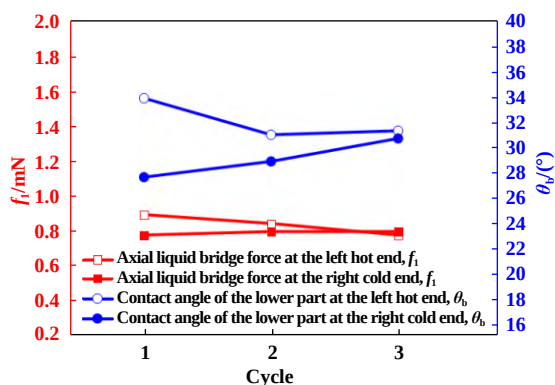
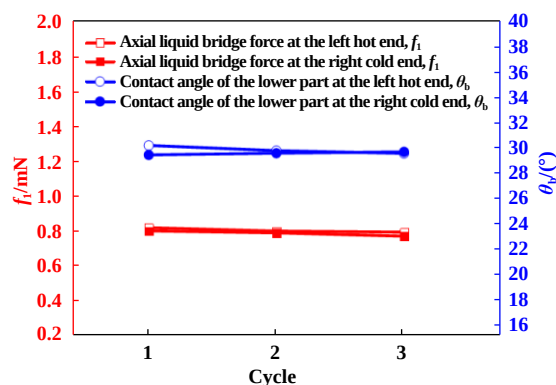
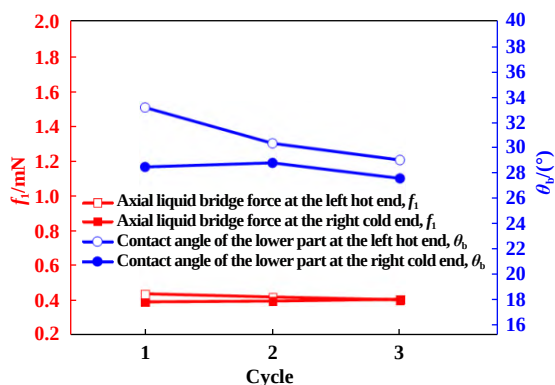
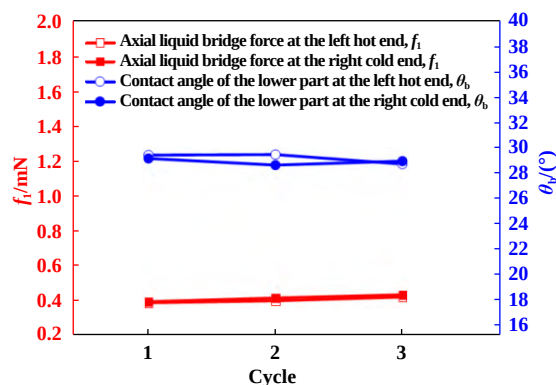
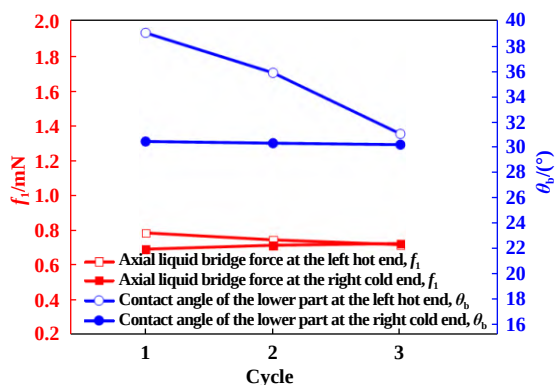
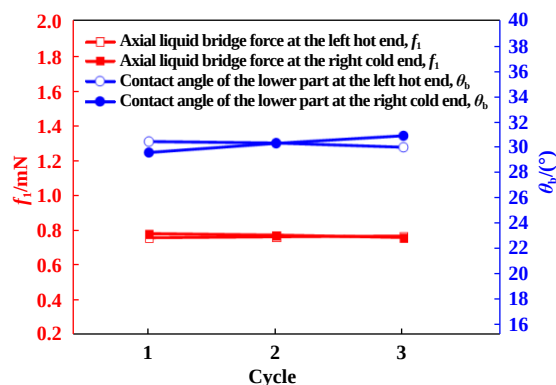
(a) $\Phi 10$ mm Si_3N_4 ball- ΔT parallel to the direction(b) $\Phi 10$ mm Si_3N_4 ball- ΔT perpendicular to the direction(c) $\Phi 5$ mm Si_3N_4 ball- ΔT parallel to the direction(d) $\Phi 5$ mm Si_3N_4 ball- ΔT perpendicular to the direction(e) $\Phi 10$ mm GCr15 ball- ΔT parallel to the direction(f) $\Phi 10$ mm GCr15 ball- ΔT perpendicular to the direction

Fig. 14 Variation diagram of longitudinal liquid bridge force and contact angle

图 14 纵向液桥力与接触角变化图

和界面运动协同作用下油液热驱蠕爬行为和润滑特性。以硅油作为润滑介质,探究了不同温度梯度方向下对润滑情况的影响,着重分析了水平温度梯度方向和竖直温度梯度方向下,干摩擦、硅油润滑以及引入温度梯度后摩擦力的变化规律,并讨论了不同小球直径以及不同小球材料的影响,揭示了产生“对称”与“不对称”现象的原因。根据试验结果可以得出以下结论:

a. 在水平方向的摩擦中,加入一定量的硅油能够有效降低摩擦力,但运动一定时间后摩擦力会逐渐增大到原来干摩擦的大小。引入温度梯度后,若温度梯

度方向与摩擦移动方向平行,则会使得硅油蠕爬与摩擦移动方向相冲突,使得运动方向两侧接触角差异较大,造成摩擦力增大,出现“不对称”现象。若温度梯度方向与摩擦移动方向垂直,则不会引起两侧摩擦力差异较大,接触角几乎相等,表现出“对称”情况。

b. 若竖直方向形成一定温度梯度,油液会克服自身重力具有向上运动的趋势。同时,在竖直方向的温度梯度中,当施加温度梯度与重力方向相反,会阻碍油液向下运动,减小小球两侧的接触角差,使得摩擦力能在较小的情况下持续更长的时间,润滑效果更佳。

而当施加温度梯度与重力方向相同时,情况则相反。

在实际应用中,空间润滑环境具有复杂性大的特点,因摩擦生热而产生某一方向的温度梯度会导致润滑剂蠕爬流失,使得润滑效果下降。因此,对于某些空间机构中竖直摩擦副以及特殊工况下的精密仪器减摩润滑具有重要的参考意义,设计选择合理的温度梯度方向或消除减弱某方向的温度梯度能够在一定程度上抑制润滑剂蠕爬流失,为某些机构实现定区域和持久润滑提供了设计参考,同时对于提升高端航空航天设备仪器性能具有一定的借鉴意义。

参考文献

- [1] Wen Shizhu, Huang Ping. Tribological principle[M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (in Chinese) [温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2002].
- [2] Dai Qingwen, Khonsari M M, Shen Cong, et al. Thermocapillary migration of liquid droplets induced by a unidirectional thermal gradient[J]. *Langmuir*, 2016, 32(30): 7485–7492. doi: 10.1021/acs.langmuir.6b01614.
- [3] Dai Qingwen, Huang Wei, Wang Xiaolei. Research process in mechanism and solution of liquid lubrication migration in space[J]. *Surface Technology*, 2014, 43(6): 125–130 (in Chinese) [戴庆文, 黄巍, 王晓雷. 液体空间润滑剂蠕爬流失机理及对策研究进展[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 125–130]. doi: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2014.06.028.
- [4] Roberts E, Todd M. Space and vacuum tribology[J]. *Wear*, 1990, 136: 157–167. doi: 10.1016/0043-1648(90)90078-O.
- [5] Fusaro R L. Preventing spacecraft failures due to tribological problems[C]//Proceedings of the 2001 Annual Meeting, 2001, 210806.
- [6] Weng Lijun, Liu Weimin, Sun Jiayi, et al. Opportunities and challenges to space tribology[J]. *Tribology*, 2005, 25(1): 92–95 (in Chinese) [翁立军, 刘维民, 孙嘉奕, 等. 空间摩擦学的机遇和挑战[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(1): 92–95]. doi: 10.3321/j.issn:1004-0595.2005.01.018.
- [7] Fote A A, Slade R A, Feuerstein S. The prevention of lubricant migration in spacecraft[J]. *Wear*, 1978, 51(1): 67–75. doi: 10.1016/0043-1648(78)90055-8.
- [8] Kannel J, Dufrane K. Rolling element bearings in space[C]//Proceedings of the NASA Lewis Research Center the 20th Aerospace Mechanics Symposium, 1986, 16330.
- [9] Zhou Feng, Liang Yongmin, Liu Weimin. Ionic liquid lubricants: designed chemistry for engineering applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2009, 38(9): 2590–2599. doi: 10.1039/B817899M.
- [10] Du Hongshi, Meng Yonggang, Wen Shizhu. Lubricant loss mechanism in bearings lubricated with grease[J]. *Lubrication Engineering*, 1999, 24(2): 33–35 (in Chinese) [杜红世, 孟永钢, 温诗铸. 脂润滑轴承静置状态下漏油机理及对策[J]. 润滑与密封, 1999, 24(2): 33–35].
- [11] Bai Yanyan, Zhang Chaoyang, Yu Qiangliang, et al. Supramolecular PFPE gel lubricant with anti-creep capability under irradiation conditions at high vacuum[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 409: 128120. doi: 10.1016/j.ccej.2020.128120.
- [12] Liu Deshuang, Li Ke, Zhang Shumin, et al. Anti-spreading behavior of 1, 3-diketone lubricating oil on steel surfaces[J]. *Tribology International*, 2018, 121: 108–113. doi: 10.1016/j.triboint.2018.01.031.
- [13] Dai Qingwen, Hu Zhengdong, Huang Wei, et al. Controlled support of a magnetic fluid at a superhydrophobic interface[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(22): 221601. doi: 10.1063/5.0005639.
- [14] Klien S, Surberg C H, Stehr W. Temperature driven lubricant migration on tribological surfaces[J]. *Proceedings —ECOTRIB*, 2007: 637–647.
- [15] Dai Qingwen, Huang Wei, Wang Xiaolei, et al. Directional interfacial motion of liquids: Fundamentals, evaluations, and manipulation strategies[J]. *Tribology International*, 2021, 154: 106749. doi: 10.1016/j.triboint.2020.106749.
- [16] Dai Qingwen, Huang Wei, Wang Xiaolei. A surface texture design to obstruct the liquid migration induced by omnidirectional thermal gradients[J]. *Langmuir*, 2015, 31(37): 10154–10160. doi: 10.1021/acs.langmuir.5b03044.
- [17] Grützmacher P G, Rosenkranz A, Szurdak A, et al. Lubricant migration on stainless steel induced by bio-inspired multi-scale surface patterns[J]. *Materials & Design*, 2018, 150: 55–63. doi: 10.1016/j.matdes.2018.04.035.
- [18] Grützmacher P G, Rosenkranz A, Gachot C. How to guide lubricants—Tailored laser surface patterns on stainless steel[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 370: 59–66. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.02.115.
- [19] Liu Yang, Zhang Hui, Dai Songjie, et al. Designing a bioinspired scaly textured surface for improving the tribological behaviors of starved lubrication[J]. *Tribology International*, 2022, 173: 107594. doi: 10.1016/j.triboint.2022.107594.
- [20] Wang Rong, Li Si, Bai Shaoxian. Thermodynamic spreading behaviors of oil on rough surfaces of stainless steel 316L[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 478: 1046–1055. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.02.061.
- [21] Ji Xuecheng, Liu Changsong, Wu Anqi, et al. Control of oil droplet migration behavior and friction reduction effect of SAMs film under temperature gradient[J]. *Tribology*, 2024, 44(8): 1043–1049 (in Chinese) [纪学成, 刘长松, 吴安琪, 等. 温度梯度下SAMs膜对油滴迁移行为控制及减摩效果试验研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(8): 1043–1049]. doi: 10.16078/j.tribology.2023093.

- [22] Wang Wenxue, Sha Lei, Yang Xiaofeng, et al. Research on contact fatigue and tribological performance of Si₃N₄ ceramic ball and 8Cr4Mo4V bearing steel[J]. Tribology, 2024, 44(11): 1516–1527 (in Chinese) [王文雪, 沙磊, 杨晓峰, 等. Si₃N₄陶瓷球与8Cr4Mo4V轴承钢接触疲劳和摩擦性能研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(11): 1516–1527]. doi: 10.16078/j.tribology.2023192.
- [23] Wei Wanxin, Su Yunfeng, Fan Hengzhong, et al. Fretting friction and wear characteristics and damage behaviors of Si₃N₄ ceramic balls sliding against bearing steel[J]. Tribology, 2024, 44(09): 1256–1265 (in Chinese) [魏万鑫, 苏云峰, 樊恒中, 等. 氮化硅陶瓷轴承球的滚动摩擦磨损特性与损伤行为[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(09): 1256–1265]. doi: 10.16078/j.tribology.2023083.
- [24] Liu Qiyue, Zhu Minhao, Zhou Zhongrong, et al. Effect of the oil - lubricated on fretting characteristics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(12): 1–4 (in Chinese) [刘启跃, 朱旻昊, 周仲荣, 等. 油润滑对微动摩擦特性影响的研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(12): 1–4]. doi: 10.3321/j.issn:0577-6686.2000.12.001.
- [25] Gao Shiqiao, Liu Haipeng. Capillary mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese) [高世桥, 刘海鹏. 毛细力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010].