GCr15/GCr15SiMn摩擦副在瞬时高应力启动过程中的静动摩擦转化特性

李泓江[1,2] 赵小力[1,2*] 郭宏伟[3] 刘荣强[3] 王黎钦[1,2] 邓宗全[2,3]
1.哈尔滨工业大学航空航天轴承技术及装备工信部重点实验室,哈尔滨,150001
2.哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨,150001
3.宇航空间机构全国重点实验室,哈尔滨,150001

摘要:为探究摩擦副在瞬时高应力启动过程中的静动摩擦转化特性,搭建了模拟工况静动摩擦的测试装置,开展了GCr15SiMn/GCr15摩擦副的静动摩擦转化实验和仿真,研究了接触应力和加速度对静动摩擦转化过程的影响规律。研究结果表明,随着接触应力的增大,微凸体发生塑性变形,减弱了微凸体间的互锁作用,导致静动摩擦因数减小;随着加速度的增大,微凸体间的互锁作用增强,导致静摩擦因数增大,但动摩擦因数无明显变化。

关键词:启动过程;静动摩擦;接触应力;加速度;球盘摩擦副
中图分类号:TH117.1
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.003 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Transition Characteristics between Static and Kinetic Friction of GCr15/GCr15SiMn Friction Pair in Instantaneous High-stress Initiation Process

LI Hongjiang[1,2] ZHAO Xiaoli[1,2*] GUO Hongwei[3] LIU Rongqiang[3] WANG Liqin[1,2]
DENG Zongquan[2,3]
1.MIIT Key Laboratory of Aerospace Bearing Technology and Equipment, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001
2.School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001
3.National Key Laboratory of Aerospace Mechanism, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001

Abstract: To investigate the statictodynamic friction transition characteristics during instantaneous highstress startup, a test apparatus was constructed to simulate friction behavior under operating conditions. Experiments and simulations were conducted on a GCr15/GCr15SiMn friction pair, and the effects of contact stress and acceleration on the friction transition were examined. The results show that increasing contact stress causes significant plastic deformation of asperities, weakens the interlocking effect between them, and reduces both static and dynamic friction coefficients. Increasing acceleration enhances the asperity interlocking effect and raises the static friction coefficient, whereas the kinetic friction coefficient remains relatively unchanged.

Key words: startup process; static-to-dynamic friction transition; contact stress; acceleration; balldisk friction pair

0 引言

近年来国内外学者针对静动摩擦转化过程开

收稿日期:2024-12-20
基金项目:国家自然科学基金(52192634);宇航空间机构全国重点实验室自研课题(2024ASM-ZY04)

LIU Weiji, YANG Feilong, ZHU Xiaohua, et al. Research on Mechanism of Rock Breaking and Speed Increase in Cutting with Abnormal PDC Cutter[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(17): 2133-2141.

(编辑 王艳丽)

作者简介:刘伟吉,男,1989年生,教授、博士研究生导师。研究方向为钻井岩石破碎学与钻头。发表论文120余篇,授权发明专利20余项,出版专著2部。E-mail:lwj2017_swpu@163.com。祝效华*(通信作者),男,1978年生,教授、博士研究生导师。研究方向为管柱力学与井下工具设计。授权发明专利70项。出版专著5部,发表论文460篇。E-mail:zxhth113@163.com。

本文引用格式:
刘伟吉,刘郅航,祝效华,等. 四川盆地凉高山组聚晶金刚石复合片钻头优化设计与应用[J]. 中国机械工程,2026,37(7):1548-1556.
LIU Weiji, LIU Zhihang, ZHU Xiaohua, et al. Optimal Design and Applications of PDC Bits for Lianggaoshan Formation in Sichuan Basin[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1548-1556.

展了大量的理论和实验研究工作[1-6]。文献[7-11]通过光学测量的方法将亚克力板间的静动摩擦转化过程中的接触面积变化规律可视化，利用断裂力学的理论揭示了静动摩擦转化过程的内在机理，但这种可视化方法仅限于透光性良好的聚合物材料。LIAN等[12]研究了法向载荷等因素对钢/页岩配副的静动摩擦转化过程的影响。研究者通过实验研究了不同接触副在不同工况下的静动摩擦转化过程，分析了工况条件对静动摩擦转化过程的影响机理[13-14]，但该类实验所用的应力较低（均低于1 GPa）、静动摩擦转化过程较长（转化时间大多在500 ms以上），缺少研究高应力、瞬时及二者共同作用对静动摩擦转化的影响。基于此，笔者搭建了一台模拟高应力、瞬时工况的静动摩擦转化过程测试装置，开展了GCr15/GCr15SiMn摩擦副的静动摩擦特性测试实验，通过实验和仿真结合的方法揭示了高接触应力和大瞬时加速度对静动摩擦因数的影响规律。

1　实验

1.1　静动摩擦测试装置

静动摩擦测试装置基于UMT-3摩擦磨损试验机，通过试验机自带的二维力传感器测量GCr15试验球和GCr15SiMn试验盘的法向载荷F_N和切向载荷F_T，进而换算得到摩擦因数f，如图1a、图1b所示。UMT-3摩擦磨损试验机的圆盘由电机驱动，无法控制和调节瞬时启动过程，不能模拟高应力瞬态启动过程中的摩擦副间静动摩擦转化过程。因此，将电机驱动改为气动驱动，通过控制输入旋转气缸的空气压力模拟瞬时启动过程。

静动摩擦测试装置如图1c所示，试验球作为上试样，由夹具夹持并固定在二维力传感器上。二维力传感器安装在滑轨上，通过摩擦磨损试验机操控软件控制滑轨上下移动。二维力传感器测量F_N和F_T，并根据球径、弹性模量、泊松比求解接触应力σ_m。试验盘作为下试样，通过螺钉固定在气动圆盘夹具上。压缩气体驱动旋转气缸转动，加速度传感器测量试验盘启动过程中的加速度a。由此可见，静动摩擦测试装置通过接触载荷和压缩气体压力调节接触应力和加速度，开展球盘摩擦试验，研究摩擦副在瞬时高应力启动过程中的静动摩擦转化特性。

试验盘的启动加速度由驱动旋转气缸（型号MSQ）的压缩气体压力控制，如图1d所示。气泵产生的压缩空气经空气干燥管和调压阀传输到电磁阀后，再输入旋转气缸进气口，最后经旋转气缸出气口输出。电磁阀控制气路的通断，调压阀控制压缩气体压力，进而控制旋转气缸的启动加速度。试验盘启动加速度的重复测试显示，输入气体压力不变时，不同接触应力的瞬间最大加速度大小在3%范围内波动，可见试验盘启动加速度的输出值较为稳定。

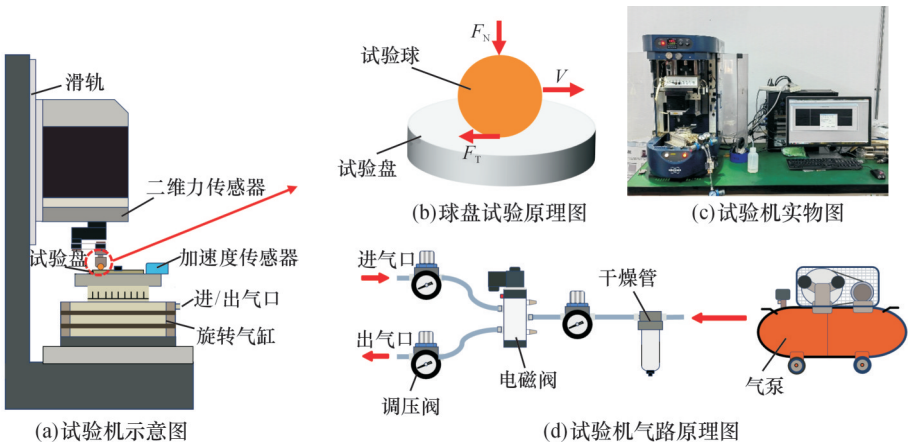


图1　静动摩擦测试装置结构示意图和实物图

Fig.1　Structural schematic and physical diagram of static and kinetic friction transition test device

为模拟执行机构摩擦副的典型工况，依托UMT-3摩擦磨损试验机的球盘模块、二维力传感器与旋转气缸选型，静动摩擦测试装置的主要技术指标：接触载荷F_N为0～20 N，加速度a为3～5g。

1.2　材料准备

试验球的材质为GCr15（直径3.969 mm，日本AKS公司生产），试验盘的材质为GCr15SiMn。使用显微维氏硬度计测量热处理后的试验盘表面硬度，表面硬度的测量值均为65HRC。使用光学3D表面轮廓仪测量精磨加工后的试验盘表面粗糙度，每个实验盘均匀取3个点进行测量并求均值，开展应力、加速度影响实验的试验盘表面粗糙度Ra分别为0.014 μm、0.15 μm。

1.3 静动摩擦测试的方案与步骤

摩擦副静动摩擦测试研究接触应力和加速度对静/动摩擦因数的影响规律。接触应力可由接触载荷、球直径、球和盘材料性能求解，接触载荷可由接触应力求解。静动摩擦测试实验中的接触应力 σ_m 分别为1.1、1.4、1.7、2.0 GPa，对应的接触载荷分别为2.0、4.3、7.7、12.6 N。加速度取决于压缩气体压力，瞬间最大加速度3.2、3.8、4.3、4.8g对应的气压分别为100、125、150、175 kPa。

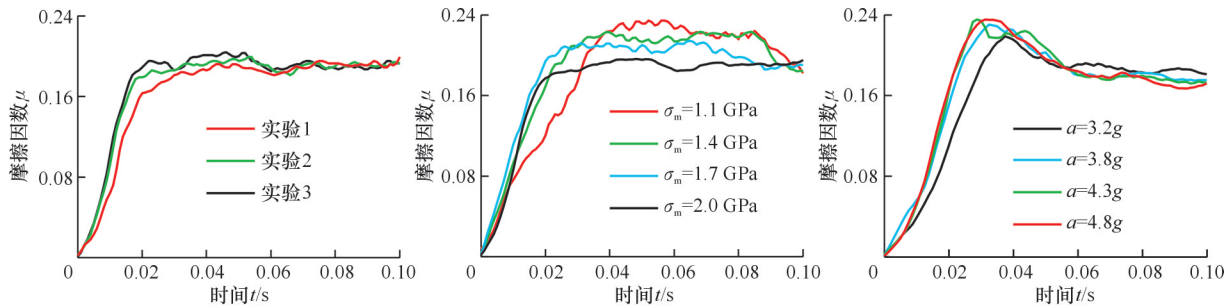
首先，安装固定试验盘和试验球，接通气动回路，打开气源开关。然后，通过控制滑轨的上下移动调整球与盘之间的接触载荷。控制调压阀，改变输入旋转气缸的压缩气体压力。最后，按动电磁阀的开关使旋转气缸瞬间启动，根据二维力传感器所测的接触载荷和切向载荷换算出摩擦因数。加速度传感器直接测量启动过程中的加速度，从而在一定接触应力和加速度下获得摩擦副启动过程中的静动摩擦转化特性。

通过试验测得的静动摩擦因数转化曲线获得静动摩擦因数，其中，静摩擦因数取摩擦因数的第一个极大值，动摩擦因数为静动摩擦转化后稳定动摩擦阶段的摩擦因数均值。测量前，用无水乙醇超声波清洗试验盘和试验球15 min并烘干。调整好摩擦副的接触力及旋转气缸内的气压。摩擦副保持静止接触状态15 s后，按动电磁阀，启动旋转气缸，记录二维力传感器和加速度传感器的数据。相同工况重复测量3次，记录数据的均值和标准差。

2 实验结果与讨论

2.1 实验结果

GCr15/GCr15SiMn摩擦配副在某一工况下的摩擦因数-时间曲线见图2a，三组实验结果证明该试验方案的可重复性好。不同应力、瞬间最大加速度的摩擦因数-时间曲线分别见图2b、图2c。摩擦因数随应力的增大而减小。瞬间最大加速度对静摩擦因数的影响较大，动摩擦因数却在小范围内波动，可见实验设定条件范围内的瞬间最大加速度对动摩擦因数的影响较小。



(a)重复性验证(2GPa-3.2g-15s)　(b)应力影响　(c)瞬间最大加速度影响

图2 GCr15/GCr15SiMn配副在不同工况影响下的摩擦因数-时间曲线

Fig.2 Curves of friction coefficient-time of GCr15/GCr15SiMn friction pair under different working conditions

2.2 讨论分析

2.2.1 接触应力对静动摩擦特性的影响分析

对摩擦配副设置了仅接触应力不同的一系列工况，其中，输入气压为0.1 MPa(保证有相近的瞬间最大加速度)，摩擦副间的接触静止时间为15 s。如图3所示，静动摩擦转化过程中的静摩擦因数随应力增大而减小，应力1.1 GPa、2.0 GPa的静摩擦因数分别为0.240和0.194；静动摩擦转化过程中的动摩擦因数随应力增大而减小，应力1.1 GPa、2.0 GPa的动摩擦因数分别为0.218和0.191。

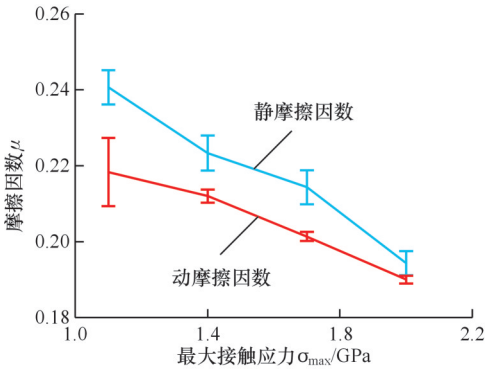


图3 GCr15/GCr15SiMn摩擦配副的静动摩擦因数随应力变化曲线

Fig.3 Curve of static and kinetic friction coefficient with stress of GCr15/GCr15SiMn friction pair

摩擦配副在不同应力下的磨损表面微观形貌如图4所示。静动摩擦转化实验不属于循环往复摩擦实验且淬火处理后的试验盘表面硬度极高，几乎不存在宏观的表面损伤，因此从摩擦副表面微观接触行为分析接触应力对静动摩擦转化的影响机理。高接触应力工况下，随着接触应力的增大，GCr15SiMn试验盘表面的微凸体发生塑性变形。微凸体的塑性变形程度随接触应力的增大而

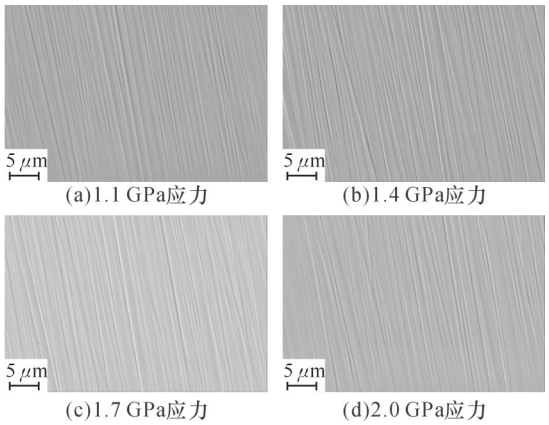


图4　GCr15/GCr15SiMn摩擦配副在不同应力下的微观损伤形貌

Fig.4　Microscopic damage morphology of GCr15/GCr15SiMn friction pair under different stresses

增大，减小发生相互滑动的摩擦副表面微凸体高度将导致微凸体间的机械互锁作用减弱，摩擦配副更容易克服微凸体间的互锁作用，发生相对滑动，摩擦副间的静动摩擦状态转变更加顺利，同时减小静/动摩擦因数，提高摩擦副静动摩擦转化过程的稳定性。

基于统计模型的模拟方法采用二维数字滤波法和Johnson转化处理的方法生成随机非高斯粗糙表面。模拟表面轮廓在X向的自相关长度β_x、Y向的自相关长度β_y分别为10 μm和2 μm。$\beta_x \neq \beta_y$时会生成沿自相关长度较大方向的纹理。X向、Y向的长度均为256 μm，模拟表面的均方根为0.3 μm，偏度为−0.5，峰度为5，据此生成的非高斯粗糙表面如图5所示。将生成的非高斯粗糙表面叠加到弹性半空间，并结合Hertz接触理论和Tabor的节点增长模型计算球和带粗糙表面的弹性半空间接触后的弹塑性变形。输入GCr15球和GCr15SiMn试验盘的材料参数及球半径、法向载荷等参数。根据材料的弹性模量、泊松比，以及球的半径、法向载荷，按照Hertz接触理论对法向载荷和接触应力进行转换。模拟摩擦配副在不同应力下的微凸体塑性变形，结果如图6所示，接

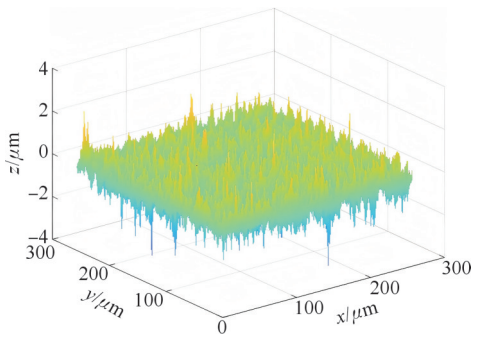


图5　随机生成的非高斯粗糙表面

Fig.5　Randomly generated non-Gaussian rough surface

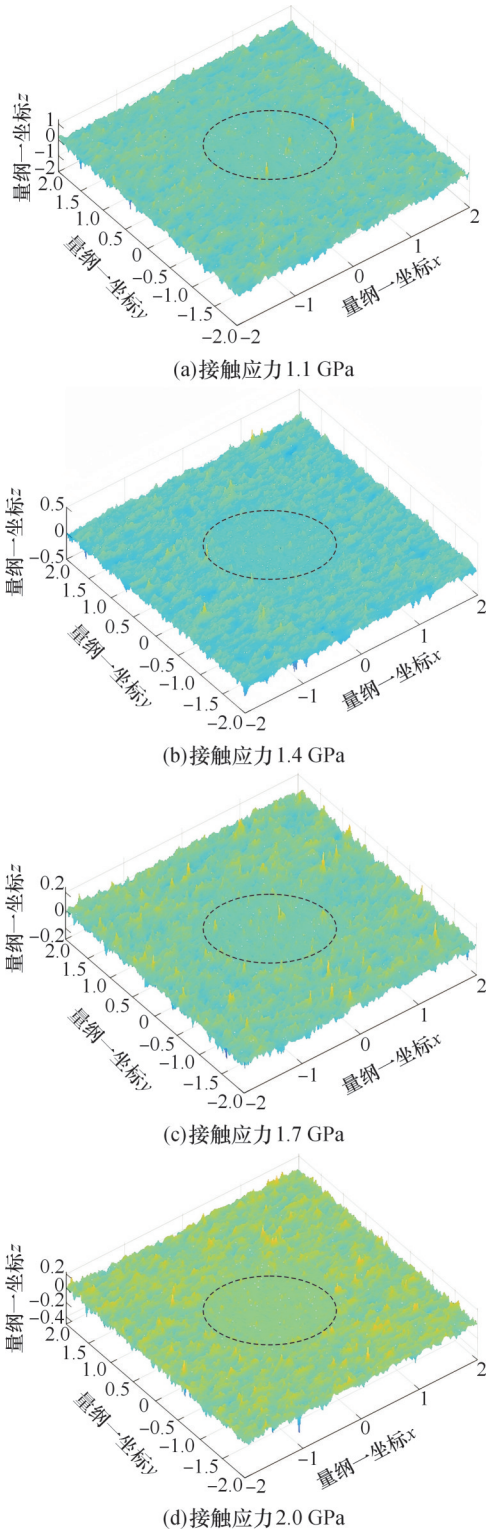


图6　不同接触应力工况下的粗糙表面塑性变形情况

Fig.6　Plastic deformation of rough surface under different contact stress conditions

触应力由1.1 GPa增大到2.0 GPa时，球和粗糙表面接触面微凸体发生的弹塑性变形增大，弹性半空间的微凸体发生塑性变形。随着应力的增大，接触区域逐渐趋于“平坦化”，球和粗糙表面微凸体间的互锁作用减弱，切向力减小，因此在法向力基本不变的情况下，静动摩擦因数随着接触应力

的增大均有所减小。

2.2.2 瞬间最大加速度对静动摩擦特性的影响分析

设置仅瞬间最大加速度不同的工况，其中，接触应力为2 GPa，摩擦副间的接触静止时间为15 s，通过控制输入气压来控制启动瞬间的最大加速度，研究瞬间最大加速度对配副摩擦因数的影响。如图7所示，摩擦副的静摩擦因数随瞬间最大加速度的增大而增大，瞬间最大加速度3.2g、4.8g的静摩擦因数分别为0.225和0.245；动摩擦因数受瞬间最大加速度的影响不大，瞬间最大加速度3.2g、4.8g的动摩擦因数分别为0.181和0.178，基本保持不变。

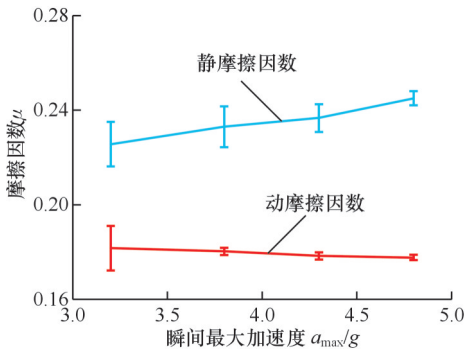


图7 GCr15/GCr15SiMn摩擦配副的静动摩擦因数随瞬间最大加速度变化曲线

Fig.7 Curve of static and kinetic friction coefficient of GCr15/GCr15SiMn friction pair with instantaneous maximum acceleration

不同瞬间最大加速度的磨损表面微观形貌如图8所示，随着瞬间最大加速度的增大，GCr15SiMn试验盘微观表面的损伤不明显。瞬时启动过程中的瞬间加速度较大，但后续滑动过程中无持续动力来源。不同的瞬间最大加速度下，动摩擦因数变化不大是由于启动后无持续动力输出，接触副表层性质在摩擦过程中的变化不大。瞬间最大加速度为3.2～4.8g时，随着瞬间最大加速度的增大，静摩擦因数持续增大。这是因为瞬间加速度的增大导致微凸体间的机械相互作用增加，需要更大的切向力克服微凸体间的阻碍作用。这个过程中，摩擦副仍处于“黏-滑”状态，切向力大到足够破坏微凸体间的互锁作用时发生首次滑动，完成由静摩擦到动摩擦的状态转变。在瞬间加速度增大的条件下，静动摩擦因数之间的差值逐渐增大，影响摩擦副在静动摩擦转化过程中的稳定性。

从微凸体的接触情况解释摩擦配副间的摩擦因数随不同接触应力、瞬间最大加速度变化的机制，如图9所示。图9a为球盘接触时的微观接触状态示意图，粗糙表面部分微凸体发生接触。当接触应力增大时，微凸体发生弹塑性变形，表面变得相对平坦，减弱微凸体间的机械互锁作用，静摩擦和动摩擦因数均减小，见图9b。球盘之间的相互滑动速度不变的情况下，球盘间从静到动的启动过程中，瞬间最大加速度的增大，微凸体之间所受的载荷作用时间越短，从缓慢弹塑性变形变为快速冲击碰撞，表现为微凸体间的机械互锁作用

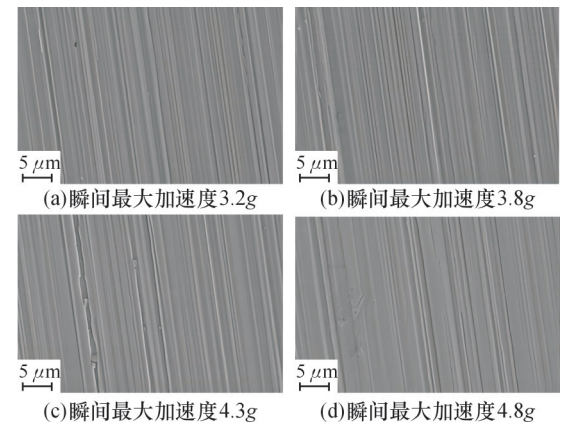


图8 GCr15/GCr15SiMn摩擦配副在不同瞬间最大加速度下的微观损伤形貌

Fig8 Microscopic damage morphology of GCr15/GCr15SiMn friction pair under different instantaneous maximum acceleration

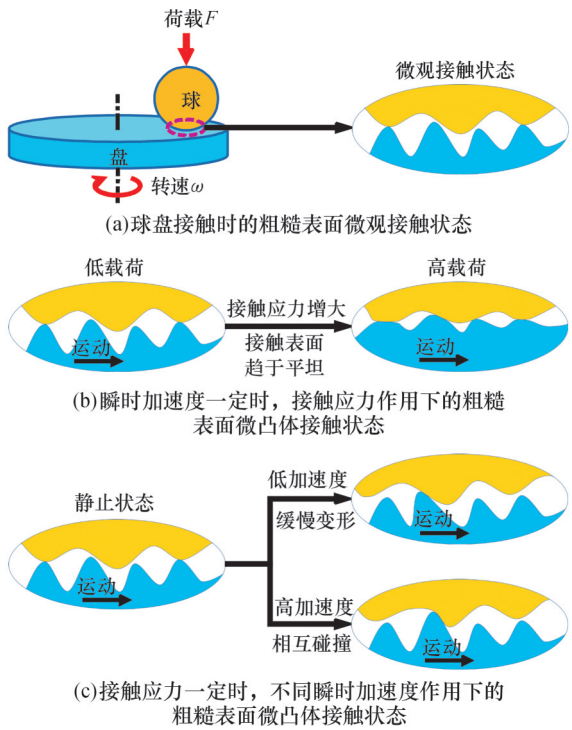


图9 接触应力、瞬间最大加速度对静动摩擦因数的影响机制

Fig9 Influence mechanism of contact stress and instantaneous maximum acceleration on static and kinetic friction coefficient

增强，导致静摩擦因数随加速度的增而增大，见图9c。当静摩擦转化为动摩擦后，运动状态趋于平稳，动摩擦因数相对稳定，受初始加速度影响较小。

3　结论

1)基于UMT-3摩擦磨损试验机搭建了模拟高应力、高瞬间加速度的静动摩擦测试装置，可施加的接触载荷为0～20 N，瞬间最大加速度为3～5g。

2)在接触应力2.0 GPa、瞬间最大加速度4.8g下，研究了GCr15/GCr15SiMn摩擦副的静动摩擦特性变化规律。静动摩擦转化过程中，静动摩擦因数均减小。考虑微凸体瞬时弹塑性变形，瞬间最大加速度增大时，静摩擦因数增大，动摩擦因数受瞬间最大加速度的影响较小，基本保持不变。

3)针对接触应力和瞬时加速度对静动摩擦特性的影响规律，从粗糙表面微观接触理论开展了机理分析，分析发现摩擦副表面微凸体间的微观接触行为是决定静动摩擦转化特性的关键。

参考文献：

[1] JALALI S K, PUGNO N M. 2D Spring-block Model to Study the Transition from Static to Kinetic Friction of Complex-micro-textured Contact Surfaces[J]. Tribology International, 2023, 188: 108866.

[2] COSTAGLIOLA G, BOSIA F, PUGNO N M. A 2-D Model for Friction of Complex Anisotropic Surfaces[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2018, 112: 50-65.

[3] BERARDO A, COSTAGLIOLA G, GHIO S, et al. An Experimental-numerical Study of the Adhesive Static and Dynamic Friction of Micro-patterned Soft Polymer Surfaces[J]. Materials & Design, 2019, 181: 107930.

[4] RUBINSTEIN S M, COHEN G, FINEBERG J. Dynamics of Precursors to Frictional Sliding[J]. Physical Review Letters, 2007, 98(22): 226103.

[5] CHO D H, BHUSHAN B, DYESS J. Mechanisms of Static and Kinetic Friction of Polypropylene, Polyethylene Terephthalate, and High-density Polyethylene Pairs during Sliding[J]. Tribology International, 2016, 94: 165-175.

[6] VENCL A, JAKIMOVSKA K, IVANOVA B, et al. Static and Kinetic Friction of Electroless Ni Composite Coatings[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2015, 70: 13-21

[7] SVETLIZKY I, BAYART E, FINEBERG J. Brittle Fracture Theory Describes the Onset of Frictional Motion[J]. Annual Review of Condensed Matter Physics, 2019, 10: 253-273.

[8] SVETLIZKY I, FINEBERG J. Classical Shear Cracks Drive the Onset of Dry Frictional Motion[J]. Nature, 2014, 509(7499): 205-208.

[9] BAYART E, SVETLIZKY I, FINEBERG J. Fracture Mechanics Determine the Lengths of Interface Ruptures that Mediate Frictional Motion[J]. Nature Physics, 2016, 12(2): 166-170.

[10] SHLOMAI H, ADDA-BEDIA M, ARIAS R E, et al. Supershear Frictional Ruptures along Bimaterial Interfaces[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(8): e2020JB019829.

[11] BOUCHBINDER E, GOLDMAN T, FINEBERG J. The Dynamics of Rapid Fracture: Instabilities, Nonlinearities and Length Scales[J]. Reports on Progress in Physics, 2014, 77(4): 046501.

[12] LIAN Qin, YANG Chunxu, CAO Jifei. Experimental Study on the Transition between Static and Kinetic Frictions of Steel/Shale Pairs[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 2764803.

[13] LI Hulin, YIN Zhongwei, JIANG Dan, et al. A Study of the Static/Kinetic Friction Behavior of PTFE-based Fabric Composites[J]. Tribology Transactions, 2018, 61(1): 122-132.

[14] OUERGHEMMI M, CARRAL C, BLACHOT J F, et al. Determination of the Static and Kinetic Friction Coefficients between the Catalyst Layer and the Microporous Layer - Influence of the MEA Components and Its Assembly Conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 402-413.

（编辑　张　洋）

作者简介：李泓江，男，2000年生，硕士研究生。研究方向为航空航天极端工况摩擦学。E-mail: lhj19946284181@163.com。

赵小力*（通信作者），男，1978年生，副教授、硕士研究生导师。研究方向为极端工况摩擦学、航空航天轴承技术、陶瓷轴承技术和微纳米加工技术。发表论文10余篇。E-mail: zhaoxl@hit.edu.cn。

本文引用格式：

李泓江，赵小力，郭宏伟，等. GCr15/GCr15SiMn摩擦副在瞬时高应力启动过程中的静动摩擦转化特性[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1556-1561.

LI HongJiang, ZHAO Xiaoli, GUO Hongwei, et al. Transition Characteristics between Static and Kinetic Friction of GCr15/GCr15SiMn Friction Pair in Instantaneous High-stress Initiation Process[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1556-1561.