

接触载荷对 7075 铝合金扭转复合微动摩擦学行为的影响

沈明学^{1,2}, 杨 莎¹, 周 琰¹, 蔡振兵¹, 朱旻昊¹

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所, 成都 610031;

2. 浙江工业大学 过程装备及其再制造教育部工程研究中心, 杭州 310032)

摘 要: 在新型扭转复合微动试验机上, 以 7075 铝合金平面/GCr15 钢球配副为研究对象, 研究不同接触载荷对 7075 铝合金扭转复合微动磨损行为的影响。在动力学特性分析的基础上结合磨痕形貌微观观察, 研究 7075 铝合金扭转复合微动的磨损机理。结果表明: 接触载荷明显地改变微动运行区域, 随着接触载荷的增加, 微动推迟进入混合区和滑移区, 且混合区逐渐扩大; 在相同的微动运行区域内, F_t/F_n 系数随循环次数增加的变化趋势受接触载荷的影响不大, 但 F_t/F_n 系数随着法向接触载荷的增加依次降低; 在其它参量不变的情况下, 接触载荷越大, 微动更趋向于受扭动微动分量控制, 表面损伤伴随着明显的剥落。扭转复合微动的磨损机制主要为磨粒磨损、氧化磨损和剥层。

关键词: 7075 铝合金; 扭转复合微动; 接触载荷; 磨损行为

中图分类号: TH117.3

文献标志码: A

Effect of contact load on dual-rotary fretting tribological behavior of 7075 aluminum alloy

SHEN Ming-xue^{1,2}, YANG sha¹, ZHOU Yan¹, CAI Zhen-bing¹, ZHU Min-hao¹

(1. Tribology Research Institute, Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Engineering Research Center of Process Equipment and Its Remanufacture, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: On an advanced dual-rotary fretting rig, the dual-rotary fretting (DRF) wear behavior of 7075 Al alloy flat against GCr15 steel ball was investigated with various contact loads. Thus, the effect of contact load on the DRF wear behavior was examined. Based on the analysis of the frictional kinetics and the observation of wear morphologies, the damage characteristics of 7075 Al alloy were discussed in detail. The results show that the fretting regimes change with the variation of the contact load, the gross slip regime and mixed fretting regime of dual-rotary fretting are postponed, and the mixed fretting regime is broadened slowly. Under the same fretting regime, the F_t/F_n presents a same trend of evolution with the increase of the cycles, while the effect is insignificant with the increase of contact load. The value of F_t/F_n decreases with the increase of the contact load. With the increase of the contact load, the fretting is more approachable to control by torsional fretting component under a higher contact load, obviously accompanies with detachment. The wear mechanisms of DRF are mainly abrasive wear, oxidative wear and delamination.

Key words: 7075 Al alloy; dual-rotary fretting; contact process; wear behavior

实际工况中的微动现象十分普遍且复杂, 往往是多种基本模式耦合作用的结果^[1]。扭转复合微动作为

一种扭动和转动微动相耦合的复合模式, 它是指在交变载荷下接触副配合面间发生微幅扭转的相对运

基金项目: 国家自然科学基金资助项目((51025519, 51005192); 教育部创新研究团队项目(IRT1178); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010XS13); 西南交通大学博士生创新基金资助项目

收稿日期: 2011-12-12; **修订日期:** 2012-04-28

通信作者: 朱旻昊, 教授, 博士; 电话: 028-87601484; E-mail: zhuminhao@swjtu.cn

动^[2-3]。日常生活中常见的球阀、轴承(滚动体与内外圈间)、人体内的杵臼关节(如髋关节、肩关节等)、交通运输工具中的球窝式配合件(如汽车悬挂系统中的球窝接头)等^[3],它们在运行过程中会经受不同程度的动态交变载荷,使接触面间不可避免地发生扭转复合微动,从而导致构件过早地失效,给生产和生活带来了诸多困扰。

法向接触载荷决定了微动的应力场分布、接触区尺寸及切向刚度等的大小,对微动有重要影响^[4]。目前,对微动的绝大部分研究结果源于单一的切向模式,如 CRUZADO 等^[5]研究了接触压力对正交状态下的钢丝切向微动磨损的影响,表明不同接触载荷下磨损量随时间(或循环次数)均呈现两阶段,即跑合阶段和稳定阶段。在跑合阶段,磨损严重,不同载荷下的磨损率呈相同趋势;在稳定阶段,较高载荷下材料表现出更高的磨损率。WATERHOUSE 等^[6]通过试验研究发现磨损体积与法向正压力间成线性关系,正压力越大磨损越严重。MITCHELL 和 SHROTRIYA^[7]研究了材料内应力和环境对磨损行为的影响。此外,在特殊环境(如高温、介质等)、特殊领域的微动摩擦学研究也逐渐受到重视^[8-11]。然而,针对扭转复合微动的研究鲜见报道,作者所在课题组^[1, 12-14]系统研究了不同微动模式下的材料运行行为和损伤机理,发现接触载荷不仅能改变微动的运行区域,而且对材料的损伤行为和磨损特性也有重要影响。本文作者主要研究接触载荷对扭转复合微动运行和损伤行为的影响,对揭示材料在扭转复合微动作用下的摩擦学规律及提高材料的抗微动损伤性能和零部件的使用寿命具有重要意义。

1 试验

试验材料选用 7075 铝合金平面试样(10 mm×10 mm×20 mm),其硬度为 71 HV_{0.5N},表面粗糙度 $R_a=0.02\ \mu\text{m}$;对偶件为直径 40 mm 的 GCr15 钢球($R_a=0.03\ \mu\text{m}$, 870 HV_{50g}),选择 7075 铝合金与 GCr15 钢球配副的目的在于让微动损伤在铝合金上突显,这样有利于揭示复合微动的损伤行为。

微动试验在新型扭转复合微动试验机上进行,采用球/平面接触方式^[2-3]。扭转复合微动试验参数为:回转角速度 $\omega=0.2\ (^{\circ})/\text{s}$;角位移幅值 θ 为 $0.25^{\circ}\sim 10^{\circ}$;法向载荷 F_n 为 20 N、50 N、100 N;循环次数 $N=1\ 000$ 。试验环境为大气,温度 $(20\pm 3)^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $\text{RH}=60\%\pm 10\%$ 。试验后,用光学显微镜(OM)和 Quanta200 型扫描电子显微镜(SEM)观察磨痕形貌;用

NanoMap-D 双模式轮廓仪测定磨痕轮廓和磨损体积;采用 EDA X-7760/68ME 型电子能谱仪(EDX)分析磨损表面主要元素成分。

2 结果与分析

2.1 $F_t-\theta$ 曲线

与切向微动相似,扭转复合微动也可以利用 $F_t-\theta$ 曲线对其进行动力学行为的分析^[3]。图 1 所示为 7075 铝合金在倾斜角度为 $\alpha=40^{\circ}$ 时不同角位移幅值和法向载荷下的 $F_t-\theta$ 曲线。可见,当 $\theta=0.25^{\circ}$ 时,3 种不同载荷下的 $F_t-\theta$ 曲线均呈扁窄的椭圆形,表明接触界面的相对运动由弹性变形协调为主,根据微动图理论^[15-16],此时微动运行于部分滑移区(Partial slip regime, PSR);当角位移幅值增加至 $\theta=0.5^{\circ}$,在 $F_n=100\ \text{N}$ 时, $F_t-\theta$ 曲线仍始终保持椭圆形,而较小载荷下 $F_t-\theta$ 曲线由平行四边形转向椭圆形,表明前者微动仍运行于 PSR,后者接触界面由滑移状态向部分滑移状态转变,微动运行于混合区(Mixed fretting regime, MFR);当 $\theta=1.0^{\circ}$ 时,在 F_n 为 10 N 和 50 N 两种载荷下, $F_t-\theta$ 曲线始终保持平行四边形;而当 $F_n=100\ \text{N}$ 时, $F_t-\theta$ 曲线的变化与 $F_n=20\ \text{N}$ 、 $\theta=0.5^{\circ}$ 时相同,说明前者微动已运行于滑移区(Slip regime, SR),而后者运行于 MFR;当 $\theta=2.0^{\circ}$ 时,曲线始终保持平行四边形,说明接触界面始终处于完全滑移状态,即微动运行于 SR。以上结果表明:扭转复合微动的微动运行区域法向接触载荷和角位移幅值。

2.2 微动运行工况图

根据以上分析可判别不同接触载荷和角位移幅值下的微动运行区域,标绘出扭转复合微动的微动运行工况图,如图 2 所示,分别为 7075 铝合金在倾斜角度为 $\alpha=10^{\circ}$ 和 $\alpha=40^{\circ}$ 时的微动运行工况图。从图 2 中可以看出,两种倾斜角度下随着法向载荷的增大,混合区均逐渐扩大,同时 SR 和 MFR 分别向 MFR 和 PSR 转移。另一方面,对比图 2(a)和(b)可发现,随着倾斜角度的增加,混合区逐渐缩小。

2.3 F_t/F_n 系数

在扭转复合微动中得到的 F_t/F_n 系数相当于切向微动的摩擦系数。图 3 所示为 3 种不同接触载荷和角位移幅值下 F_t/F_n 系数随循环次数变化曲线。由图 3 可见,在相同角位移幅值(或运行区域)下,随着接触载荷的增加, F_t/F_n 系数依次降低。这可能是由于切向

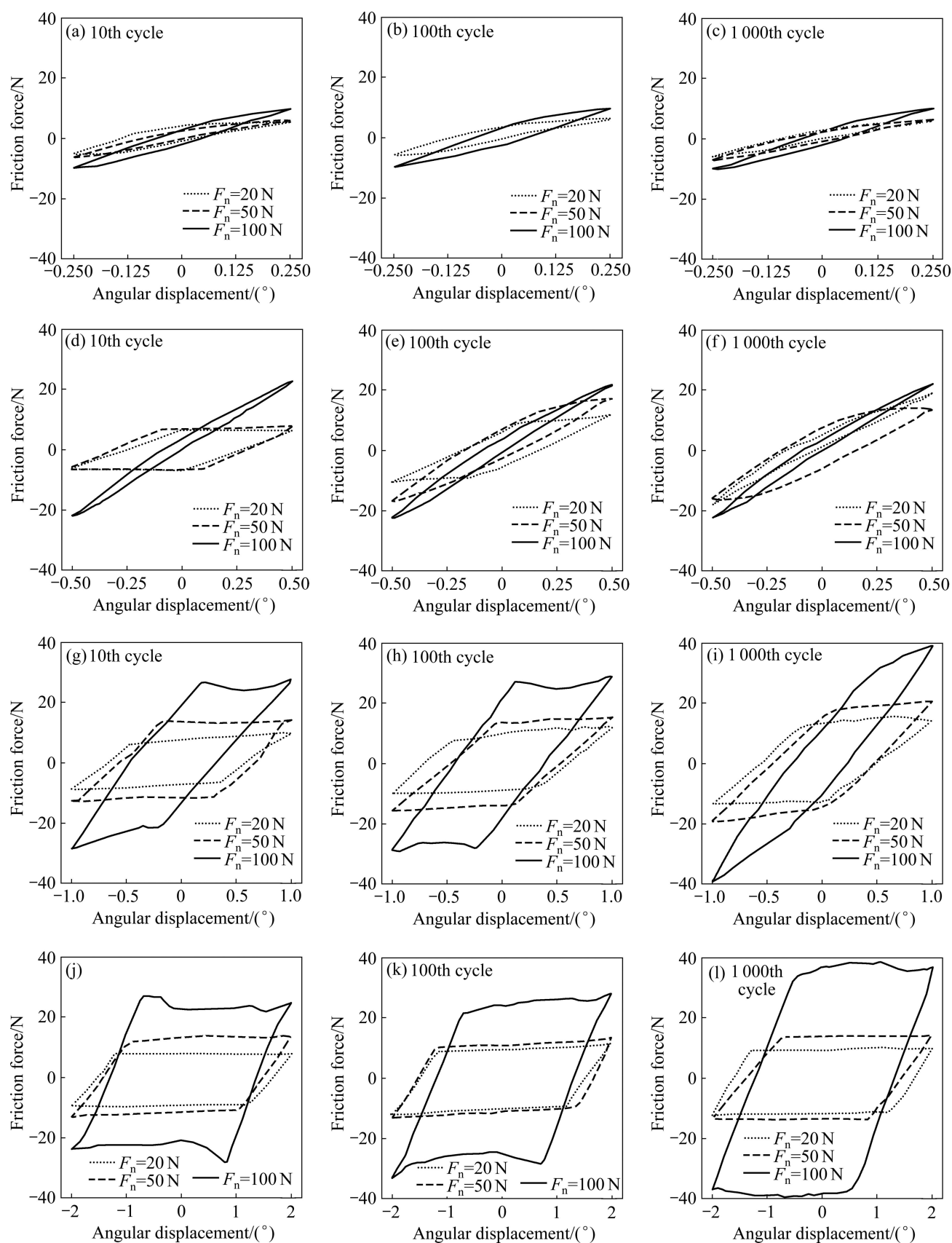


图1 $\alpha=40^\circ$ 时 7075 铝合金在不同角位移幅值和法向载荷下的 $F_t-\theta$ 曲线

Fig. 1 $F_t-\theta$ curves of 7075 Al alloy under different angular displacement amplitudes and contact loads at $\alpha=40^\circ$: (a), (b), (c) $\theta=0.25^\circ$; (d), (e), (f) $\theta=0.5^\circ$; (g), (h), (i) $\theta=1.0^\circ$; (j), (k), (l) $\theta=2.0^\circ$

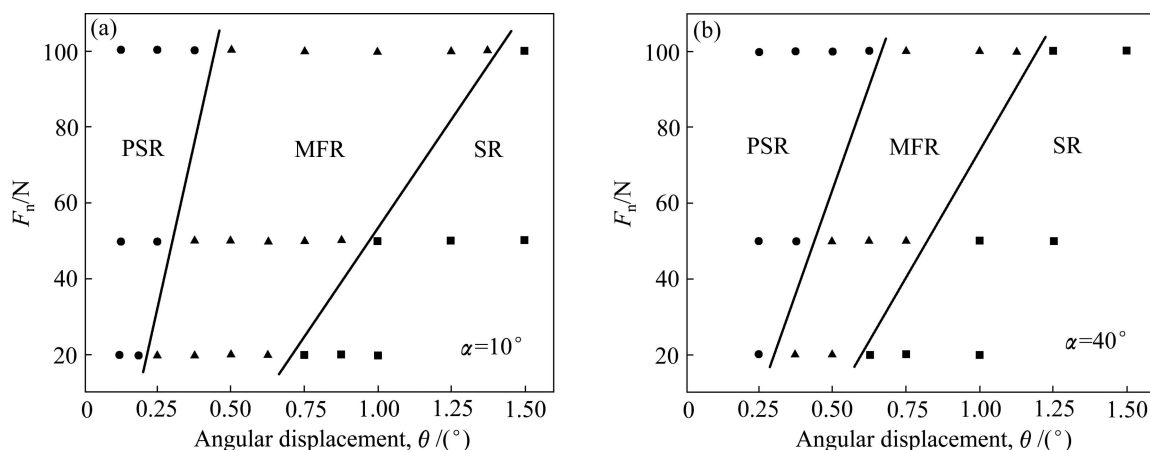


图 2 7075 铝合金在两种不同倾斜角度下的微动运行工况图

Fig. 2 Running condition fretting map (RCFM) of 7075 Al alloy under different contact loads: (a) $\alpha=10^\circ$; (b) $\alpha=40^\circ$

力的大小受实际接触面积影响,而接触载荷的增加快于接触面积的增加,从而导致高接触载荷下 F_t/F_n 值反而降低。另一方面,在相同的微动区域内,不同接触载荷下的 F_t/F_n 系数随循环次数增加的变化趋势相近。在 PSR, 由于弹性变形协调, F_t/F_n 系数始终保持较低值并很快进入稳定期。在 MFR, 由于塑性流动的不断累积和接触状态由部分滑移逐渐向完全滑移转变, F_t/F_n 系数一直保持爬升状态最后趋于稳定。在 SR, F_t/F_n 系数可分为跑和一初步稳定—爬升—稳定阶段。与前两个区域不同,在 SR, 小载荷下微动反而容易进入稳定阶段,这可能是由于在小载荷下磨屑的产生和排出更早地达到动态平衡的原因。

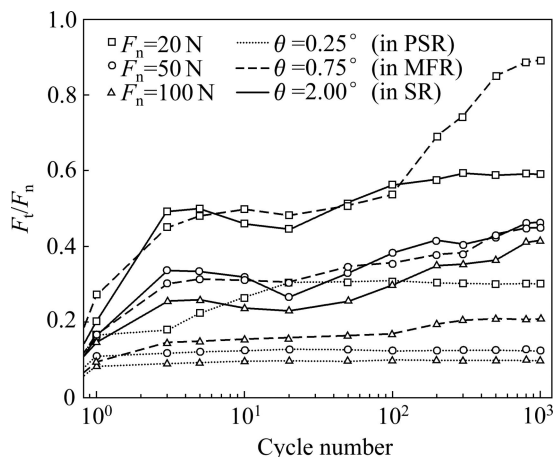


图 3 $\alpha=40^\circ$ 时不同载荷和角位移幅值下的 F_t/F_n 系数曲线

Fig. 3 Variation of friction coefficient of 7075 Al alloy under varied angular displacement amplitudes and different contact loads at $\alpha=40^\circ$

2.4 磨痕形貌分析

图 4 所示为 $\alpha=40^\circ$ 、 $\theta=0.25^\circ$ 时 3 种不同接触载荷下的磨痕形貌。由图 4 可见,磨痕中心黏着边缘轻微

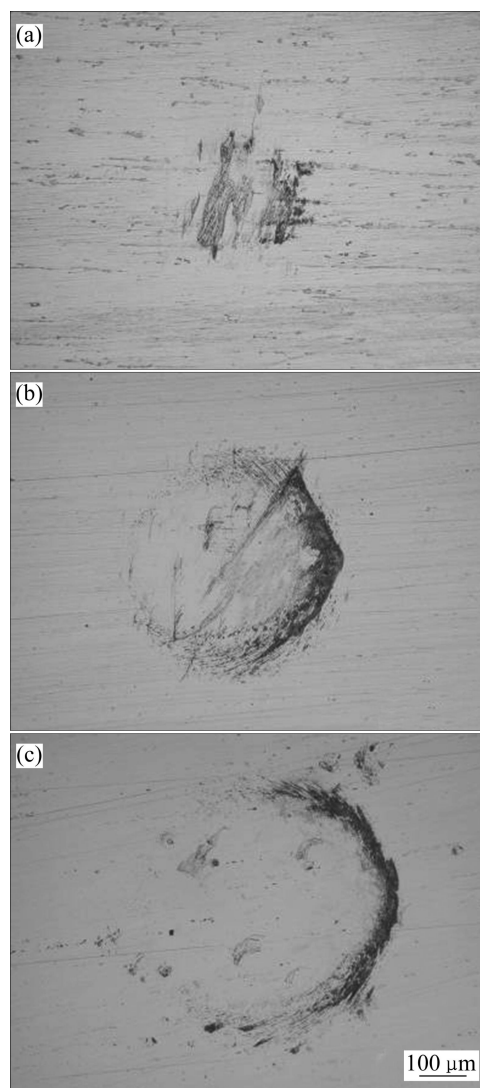


图 4 $\alpha=40^\circ$ 、 $\theta=0.25^\circ$ 时不同接触载荷下的磨痕光学显微形貌照片

Fig. 4 Optical micrographs of wear scar under different contact loads at $\alpha=40^\circ$ and $\theta=0.25^\circ$: (a) $F_n=20$ N; (b) $F_n=50$ N; (c) $F_n=100$ N

损伤, 整个磨痕呈不对称的月牙形。随着载荷的增大, 磨痕区域扩大损伤区相对减小且磨痕的不对称性更加明显。

图 5 所示为 $\alpha=40^\circ$ 和 $\theta=0.5^\circ$ 时两种不同载荷下的磨痕形貌。此时, 前者微动已运行于混合区, 而后者运行于部分滑移区, 表明接触载荷明显改变了微动运行区域。由图 5 可得, $F_n=20\text{ N}$ 时, 微动损伤的轨迹近似直线, 磨痕形貌类似于转动微动形貌^[14], 说明此时微动主要受转动微动分量控制, 且随着塑性流动的不断累积磨痕中心呈明显的隆起(见图 5(a)); 而后者是明显受扭动分量和转动分量双重支配的典型复合微动损伤形貌^[2-3], 从磨痕轮廓可以看出损伤较前者轻微。

表明此时接触载荷越小, 扭转复合微动中摩擦副越容易受转动微动分量控制, 这个结论也可以在图 6 中得到证实。在图 6 中前者已运行于滑移区, 微动主要受转动微动分量控制; EDX 测试发现, 磨痕心部氧化已十分严重, 大量的氧化磨屑从接触区排出; 而后者磨痕中心仍处于黏着状态, 但随着循环次数的增加黏着区将逐渐减小并最终消失, 此时微动运行于混合区并主要由扭动微动分量控制^[3, 13]。图 7 所示为 $\alpha=40^\circ$ 和 $\theta=2.0^\circ$ 时两种不同接触载荷下的 SEM 磨痕形貌, 此时微动均运行于滑移区。从图 7 中可以看出, 当 $F_n=20\text{ N}$ 时, 磨痕表面有明显的犁沟, 表明小载荷下磨损机制以磨粒磨损为主; 而在 $F_n=100\text{ N}$ 时, 可以看到压实的

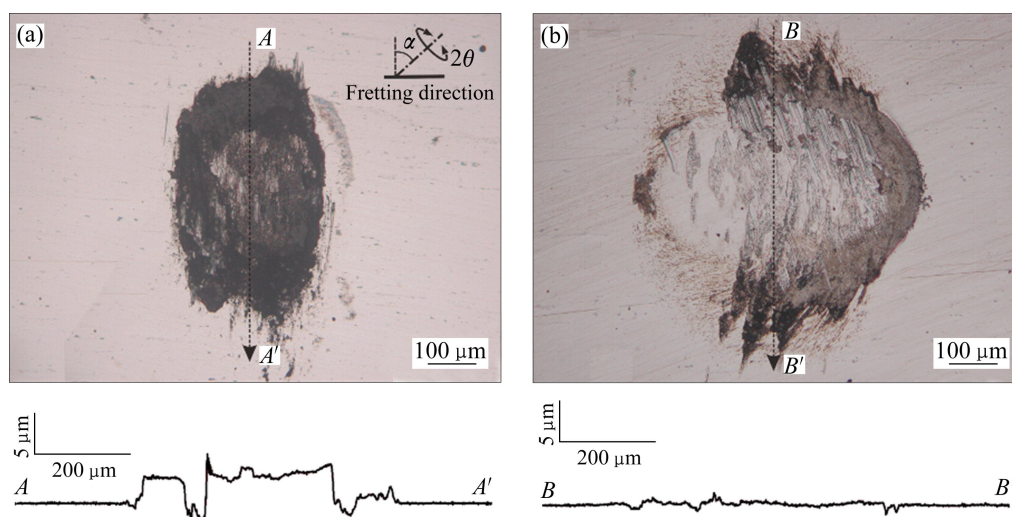


图 5 $\alpha=40^\circ$ 、 $\theta=0.5^\circ$ 时不同接触载荷下的磨痕光学显微形貌照片及相应的截面形状

Fig. 5 Optical micrographs and corresponding 2D profiles of wear scar under different contact loads at $\alpha=40^\circ$ and $\theta=0.5^\circ$: (a) $F_n=20\text{ N}$; (b) $F_n=100\text{ N}$

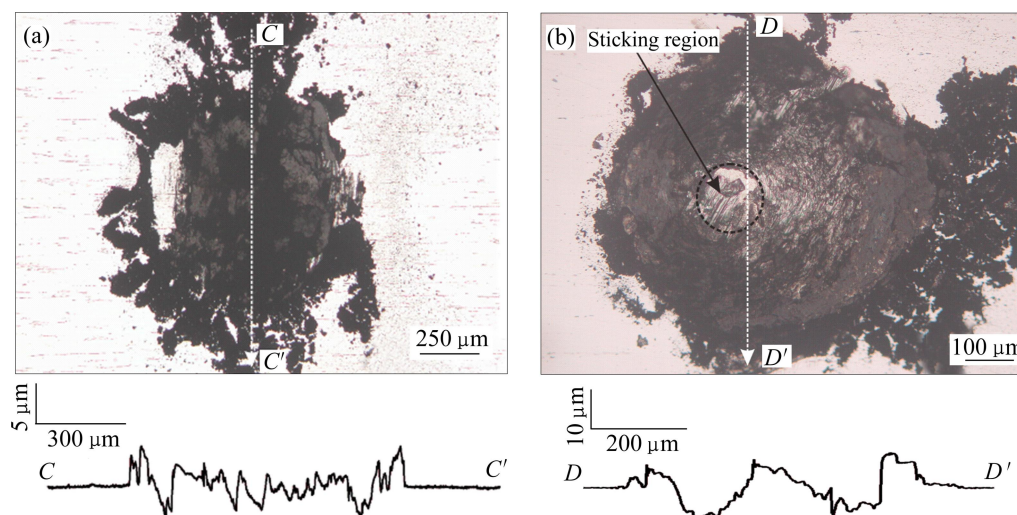


图 6 $\alpha=10^\circ$ 、 $\theta=2.0^\circ$ 时不同接触载荷下的磨痕光学显微形貌照片及相应的截面形状

Fig. 6 Optical micrographs and corresponding 2D profiles of wear scar under different contact loads at $\alpha=10^\circ$ and $\theta=2.0^\circ$: (a) $F_n=20\text{ N}$; (b) $F_n=100\text{ N}$

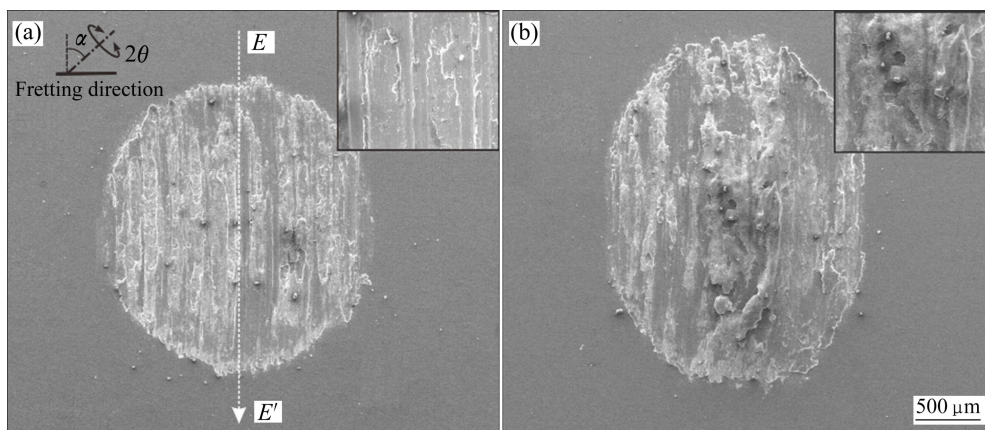


图 7 $\alpha=40^\circ$ 、 $\theta=2.0^\circ$ 时不同接触载荷下的 SEM 磨痕形貌

Fig. 7 SEM micrographs of wear scar under different contact loads at $\alpha=40^\circ$ and $\theta=2.0^\circ$: (a) $F_n=20$ N; (b) $F_n=100$ N

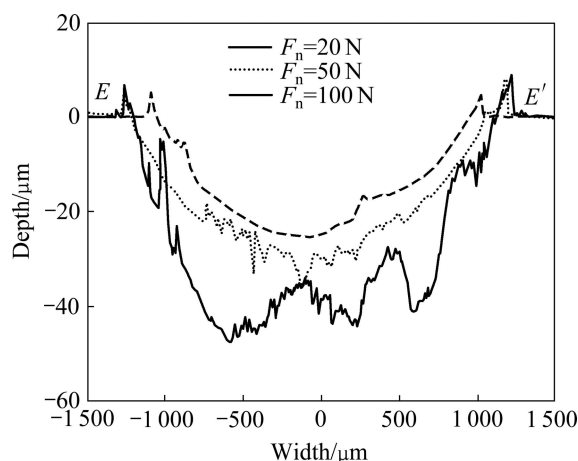


图 8 $\alpha=40^\circ$ 、 $\theta=2.0^\circ$ 时滑移区不同接触载荷下的磨痕截面轮廓

Fig. 8 2D profiles of wear scars under different contact loads in SR at $\alpha=40^\circ$ and $\theta=2.0^\circ$

氧化物堆积于磨痕表面,磨痕上出现明显的片状剥落,表明大载荷下磨屑不易排出接触区,磨损机制以伴随剥层的疲劳磨损为主。此时,不同载荷下的磨痕轮廓均呈现深坑且随着载荷的增加磨损加剧(见图 8)。

2.4 磨损量分析

在较小角位移幅值下,由于接触区磨屑排出困难及接触区材料塑性流动等原因造成材料负磨损,因此本文作者仅考虑滑移区磨痕的磨损量。图 9 所示为不同接触载荷下的磨损量变化关系。从图 9 可以看出,由于在 $\alpha=10^\circ$ 、 $\theta=0.5^\circ$ 时较高载荷下微动接近或处于滑移区,所以随着接触载荷的增大磨损量依次降低。而在其它参数下,随着接触载荷的增大磨损量快速增加,表明接触载荷越大材料被去除的能力越强。值得注意

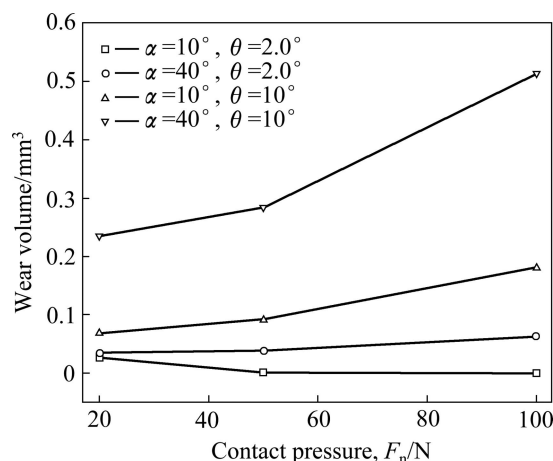


图 9 不同接触载荷下的磨损量演变

Fig. 9 Wear volume evolution under different contact loads

的,接触载荷与磨损量并不成线性关系,这与 WATERHOUSE 等^[5]在切向微动中接触载荷与磨损量成线性关系的推论不吻合。这是由于扭转复合微动中材料的磨损是扭动微动和转动微动耦合作用的结果,试验参数的改变会直接影响微动中扭动或转动分量的支配程度发生改变。也进一步说明了扭动分量或转动分量控制程度的不同,材料的去除能力明显不同。

3 结论

1) 在 3 种不同接触载荷下,随着角位移幅值的增加,7075 铝合金的扭转复合微动 $F_t-\theta$ 曲线均依次从扁窄的椭圆形转变为打开的椭圆形和平心四边形。据此,可将扭转复合微动的运行区域判定为部分滑移区、混合区和滑移区,接触载荷明显地改变了微动运行区

域;随着接触载荷的增加,微动推迟进入混合区或滑移区,且混合区逐渐扩大。

2) F_t/F_n 系数在不同的微动运行区域呈现不同的变化趋势。在相同的微动运行区域内,不同接触载荷下的 F_t/F_n 系数随循环次数增加的变化趋势相近; F_t/F_n 系数随着法向接触载荷的增加逐渐降低。

3) 接触载荷和角位移幅值强烈地影响扭转复合微动的运行行为。接触载荷越大或角位移幅值越小,微动向部分滑移区或混合区转移,微动磨损更趋向于受扭动微动分量控制;此外,接触载荷越大材料表面损伤易受到局部接触疲劳支配,伴随着明显的疲劳剥落;在滑移区,微动受转动微动分量支配的程度提高,随着法向接触载荷的增加磨损量非线性快速增加。总之,扭转复合微动的磨损机制主要为磨粒磨损、氧化磨损和剥层。

REFERENCES

- [1] 周仲荣, 朱旻昊. 复合微动磨损[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
ZHOU Zhong-rong, ZHU Min-hao. Composite fretting wear[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004.
- [2] 沈明学, 谢兴源, 蔡振兵, 莫继良, 朱旻昊. 扭转复合微动模拟及其试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 89–94.
SHEN Ming-xue, XIE Xing-yuan, CAI Zhen-bing, MO Ji-liang, ZHU Min-hao. Experimental study and simulation of dual rotary fretting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 89–94.
- [3] SHEN Ming-xue, XIE Xing-yuan, CAI Zhen-bing, ZHENG Jian-feng, ZHU Min-hao. An experiment investigation on dual-rotary fretting of medium carbon steel[J]. Wear, 2011, 271: 1504–1514.
- [4] 沈燕, 张德坤, 王大刚, 许林敏. 接触载荷对钢丝微动磨损行为影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(4): 404–408.
SHEN Yan, ZHANG De-kun, WANG Da-gang, XU Lin-min. Effect of contact load on the fretting wear behavior of steel wire[J]. Tribology, 2010, 30(4): 404–408.
- [5] CRUZADO A, HARTELT M, WÄSCHEB R, URCHIGUI M A, GÓMEZ X. Fretting wear of thin steel wires. Part 1: Influence of contact pressure[J]. Wear, 2010, 268: 1409–1416.
- [6] WATERHOUSE R B, MCCOLL I R, HARRIS S J, TSUJIKAWA M. Fretting wear of a high-strength heavily work-hardened eutectoid steel[J]. Wear, 1994, 175: 51–57.
- [7] MITCHELL A, SHROTRIYA P. Mechanical load-assisted dissolution of metallic implant surfaces: Influence of contact loads and surface stress state[J]. Acta Biomaterialia, 2008, 4: 296–304.
- [8] 张晓宇, 任平弟, 张亚非, 朱旻昊, 周仲荣. Incoloy800 合金的高温微动磨损特性[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(8): 1545–1551.
ZHANG Xiao-yu, REN Ping-di, ZHANG Ya-fei, ZHU Min-hao, ZHOU Zhong-rong. Fretting wear behavior of Incoloy800 alloy at high temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(8): 1545–1551.
- [9] 郭亮, 梁成浩, 隋洪艳. 模拟体液中纯钛及 Ti6Al4V 合金的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 107–110.
GUO Liang, LIANG Cheng-hao, SUI Hong-yan. Corrosion behavior of commercially pure Ti and Ti6Al4V alloy in artificial body fluid[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(1): 107–110.
- [10] 蔡振兵, 杨莎, 林修洲, 何莉萍, 朱旻昊. 扭动微动条件下含水气氛对氧化行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(6): 527–531.
CAI Zhen-bing, YANG Sha, LIN Xiu-zhou, HE Li-ping, ZHU Min-hao. Oxidation behavior in different humid environments induced by torsional fretting wear[J]. Tribology, 2010, 30(6): 527–531.
- [11] 何玉怀, 刘昌奎, 张兵. TC11 钛合金转子叶片断裂分析[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(专辑 1): s365–s368.
HE Yu-huai, LIU Chang-kui, ZHANG Bing. Fracture analysis of rotor blade of titanium alloy TC11[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(Special 1): s365–s368.
- [12] ZHU Min-hao, ZHOU Zhong-rong. Dual-motion fretting wear behaviour of 7075 aluminum alloy[J]. Wear, 2003, 255(1/6): 269–275.
- [13] CAI Zhen-bing, ZHU Min-hao, LIN Xiu-zhou. Friction and wear of 7075 aluminum alloy induced by torsional fretting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: 371–376.
- [14] MO Ji-liang, ZHU Min-hao, ZHENG Jian-feng, LUO Jun, ZHOU Zhong-rong. Study on rotational fretting wear of 7075 aluminum alloy[J]. Tribology International, 2010, 43(5/6): 912–917.
- [15] ZHOU Zhong-rong, VINCENT L. Mixed fretting regime[J]. Wear, 1995, 181/183: 531–536.
- [16] ZHOU Zhong-rong, NAKAZAWA K, ZHU Min-hao, MARUYAMA N, KAPSA Ph, VINCENT L. Progress in fretting maps[J]. Tribology International, 2006, 39: 1068–1073.

(编辑 李艳红)