

水介质条件下 7075 合金扭转复合 微动磨损特性研究

沈明学^{1,2}, 蔡振兵², 周 琰², 彭旭东¹, 朱旻昊^{2*}

- (1. 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;
2. 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)

摘要: 在新型扭转复合微动试验机上, 以 7075 合金平面/GCr15 钢球配副为研究对象, 研究水介质对 7075 合金扭转复合微动磨损行为的影响. 在微动动力学特性分析的基础上结合磨痕形貌微观分析, 研究水介质环境下 7075 合金扭转复合微动的磨损机理. 结果表明: 水介质对扭转复合微动运行和损伤机制存在显著影响, 水介质明显地改变了微动运行区域; 相比干态, 在部分滑移区和混合区, 水介质下的剥层现象更加明显, 水介质加速了微动损伤. 在滑移区, 磨损机制主要转变为以磨粒磨损为主, 湿润的磨屑能有效降低表面摩擦系数和减缓微动损伤; 而单一的水介质会加剧材料的磨损. 此外, 水介质和干态微动环境中不同倾斜角度下的磨损体积均与累积耗散能分别呈不同的线性关系.

关键词: 微动磨损; 扭转复合微动; 水介质; 7075 合金

中图分类号: TH117

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2013)06-0594-06

Dual - rotary Fretting Wear Characteristic of 7075 Alloy in Water

SHEN Ming - xue^{1,2}, CAI Zhen - bing², ZHOU Yan², PENG Xu - dong¹, ZHU Min - hao^{2*}

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

2. Tribology Research Institute,

Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The 7075 aluminum alloy flat against GCr15 steel ball were chosen as friction pair. The effect of water medium on the dual - rotary fretting (DRF) wear behavior of 7075 aluminum alloy has been investigated by using an advanced dual - rotary fretting rig. Base on the analysis of the frictional kinetics and the observation of wear morphologies, the damage characteristics of 7075 aluminum alloy in water medium were discussed in detail. The results indicate that the water medium had significant effects on the fretting running characteristics and the damage mechanism. The delamination phenomenon under water medium were more obviously in the partial slip regime and the mixed fretting regime than that of dry condition, and the fretting damage was accelerated in water medium. In slip regime, the main wear mechanisms were gradually changed into abrasive wear, a mixture of the debris and water can more effectively reduce the friction coefficient and mitigate the fretting damage than pure water. In addition, two linear relationship between accumulated dissipated energy and angular displacement amplitudes can be found in water medium and dry condition.

Key words: fretting wear, dual - rotary fretting, water media, 7075 alloy

Received 25 March 2013, revised 2 May 2013, accepted 24 May 2013, available online 28 November 2013.

* Corresponding author. E - mail: zhuminhao@swjtu.cn, Tel: + 86 - 28 - 87600715.

The project was supported by the National Science Foundation of China for Distinguished Young Scientists (51025519), National Science Foundation of China (51005192) and the Yangtze River Scholars and Innovation Team Development Plan (IRT1178).

国家杰出青年科学基金(51025519)、国家自然科学基金(51005192)和教育部创新研究团队项目(IRT1178)资助。

微动是紧配合面间承受振动等交变载荷作用下引发的微幅(通常在微米量级)相对运动,实际的微动现象十分复杂,往往是多种基本模式耦合作用的结果^[1]. 扭转复合微动是指在交变载荷作用下接触界面发生微幅扭转的相对运动,它是扭动与转动微动耦合的复杂微动^[2-3]. 相关研究表明:相比单一模式的微动,扭转复合微动能导致更加严重的损伤^[3]. 扭转复合微动广泛存在于杵臼关节、球阀、球窝配合件及旋转紧固件中,这类零部件运动幅值较小且常服役于介质工况或雨淋、潮湿环境. 例如,人工植入关节工作于体液环境,其接触表面易受到相对扭转的复杂微动破坏,不断地累积损伤易导致植入器械松动、微动产物容易引起组织炎症等,迫使其使用寿命大大降低并给患者带来极大痛苦^[4]. 而研究材料在不同介质环境中的微动磨损特性,可以通过干预微动运行工况来改变微动运行区域,从而进一步控制材料的受损程度^[1]. 近年来,研究环境介质在微动磨损中的影响逐渐受到国内外的重视^[5-9],但所开展的工作一般采用切向微动的简化模式,这与实际工况存在明显差异. 因此,有必要开展水介质下的扭转复合微动磨损试验,但相关研究至今未见报道,水介质对扭转复合微动磨损性能及其失效机制的影响也并不清晰. 本文重点探讨了纯水介质对扭转复合微动磨损特性的影响,以期进一步揭示水介质中的微动磨损损伤机理,并为生产实际中复杂微动的有效控制提供理论依据.

1 实验部分

铝合金是工业中应用最广泛的一类有色金属结构材料,在航空、航天、汽车、机械制造等领域广泛应用,本文中为了凸显扭转复合微动损伤、便于揭示损伤机理,选用钢铝配副、球/平面接触方式. 平面试验材料选用7075铝合金($\sigma_s = 502$ MPa, $HV_{50g} 60$),其尺寸为10 mm × 10 mm × 25 mm,经过砂纸的机械研磨和抛光至表面粗糙度 R_a 约为0.04 μm ;对摩副选用直径为40 mm的GCr15钢球($R_a = 0.03$ μm , $HV_{50g} 870$);环境介质选用去离子水. 试验前所有试样依次用丙酮和酒精进行超声清洗并干燥.

微动试验在新型扭转复合微动试验机上进行(如图1所示),具体过程见文献[2]所述. 扭转复合微动试验参数如下:回转角速度 ω 为0.2 °/s;角位移幅值 θ 为0.25° ~ 10°;法向载荷 F_n 为50 N;循环次数 $N = 10 \sim 1\,000$ 次. 试验环境温度 20 ± 3 °C. 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EDAX-7760/68ME型电子能谱仪(EDX)分析磨损表面主要元素成分等.

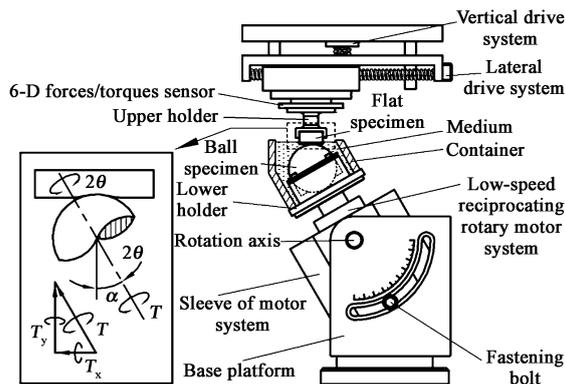


Fig. 1 Schematic diagram of dual-rotary fretting

图1 扭转复合微动试验装置示意图

2 结果与讨论

2.1 $F_t - \theta$ 曲线

图2所示为水介质中不同角位移幅值条件下 $F_t - \theta$ 曲线随循环次数的演变. 当 $\theta \leq 0.5^\circ$ 时,两种不同倾斜角度($\alpha = 10^\circ$ 和 $\alpha = 40^\circ$)下的 $F_t - \theta$ 曲线均呈椭圆型[见图2(a)],此时微动运行于部分滑移区(PSR). 但作者前期在干态下的研究表明^[10]:当 $\alpha = 40^\circ$ 和 $\theta = 0.5^\circ$ 时,微动已运行于混合区. 这可能是由于小角位移幅值下水介质很难进入接触界面但接触边缘的流体吸附效应使得实际接触面积增加^[11],从而提高了接触界面相对运动的难度. 当 $\theta = 1.0^\circ$ 时,在数十个微动周期内两种不同倾斜角度下的 $F_t - \theta$ 曲线均呈平行四边型,随后逐渐转变为椭圆型,在此过程中接触界面由完全滑移状态向部分滑移状态转变,微动均运行于混合区(MFR). 但在干态下, $\alpha = 40^\circ$ 时微动已运行于滑移区(SR)^[10]. 随着角位移幅值 θ 的不断增大,接触界面的相对滑移能力提高. $\theta = 2.0^\circ$ 时,两种不同倾斜角度下的 $F_t - \theta$ 曲线始终保持平行四边型,此时微动运行于滑移区(SR). 此外,在完全滑移状态下,随着循环次数的增加,接触界面的相对滑移能力比干态弱^[10],这可能与干态下接触界面充当固体润滑作用的磨屑层有关. 以上结果表明:水介质明显地改变了扭转复合微动的运行区域,使微动进入混合区或滑移区相对变得困难.

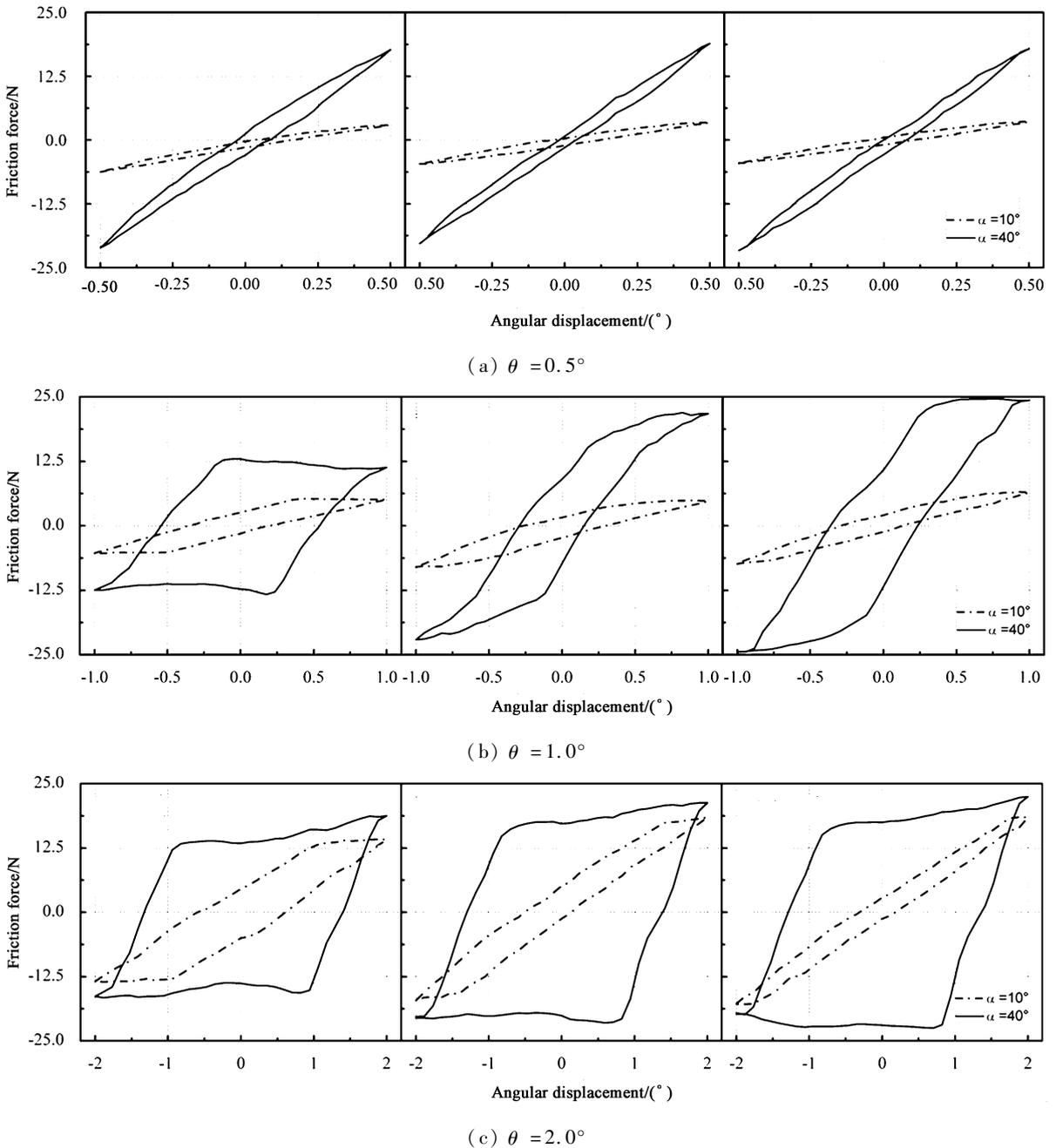


Fig. 2 $F_1 - \theta$ curves as a function of the number of the cycles under varied angular displacement amplitudes in water medium

图2 水介质中不同角位移幅值条件下 $F_1 - \theta$ 曲线随循环次数的演变

2.2 磨痕形貌分析

在部分滑移区,接触界面的相对运动主要由弹性变形协调,水介质很难进入到接触区内.磨痕均呈中心黏着边缘微滑的特征,水介质下磨痕在黏滑交界附近出现明显的剥层现象[见图3(a)],但在干态下磨痕边缘堆积着厚厚的磨屑层,没有剥层出现[见图3(b)].这可能是由于干态下微滑区的氧化磨屑充当了固体润滑作用,从而有效降低了表面切应力.而在水介质中水阻碍了接触区磨屑的氧化,较

高的表面切应力作用下微滑区材料更易被剥落.

在混合区,水介质下剥层现象更加明显,磨痕表面出现大块的剥落,磨痕周围的磨屑被水介质及时带走(干态下磨痕四周分布着大量的粉末状磨屑^[10]),如图4(a)和图4(b)所示.此外,与干态下相似,随着循环次数的增加中心黏着区逐渐缩小直至消失.从磨痕形貌上看,当 $\alpha = 10^\circ$ 和 $\theta = 1.0^\circ$ 时,损伤形貌与扭动微动类似^[12],表明此时微动主要受扭动分量控制;当 $\alpha = 40^\circ$ 和 $\theta = 0.5^\circ$ 时,磨痕形貌

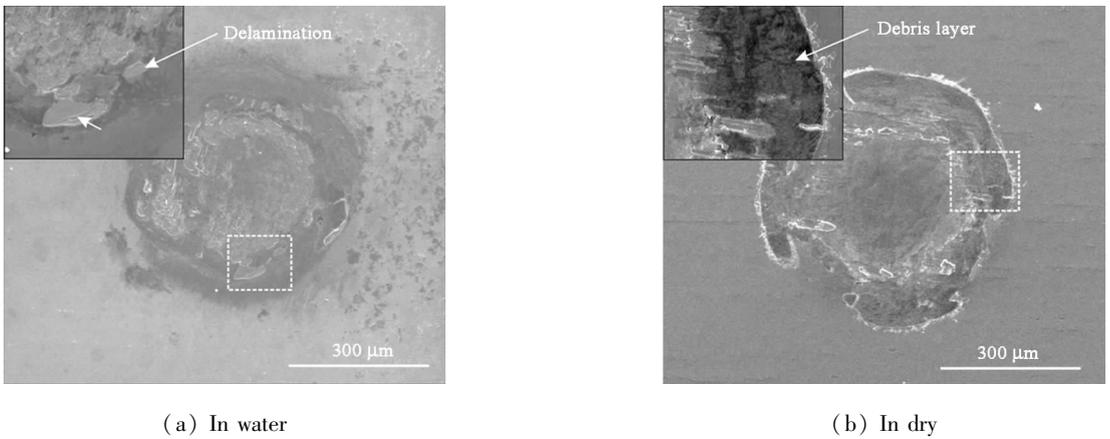
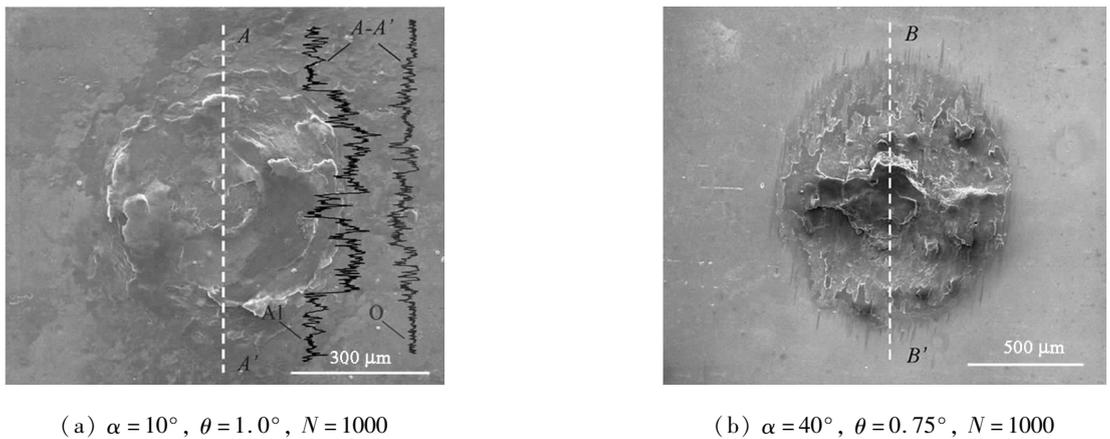


Fig. 3 SEM micrographs of wear scars in PSR under two different lubricated conditions: $\alpha = 10^\circ, \theta = 0.5^\circ, N = 1\ 000$

图 3 部分滑移区两种不同润滑条件下的 SEM 磨痕形貌: $\alpha = 10^\circ, \theta = 0.5^\circ, N = 1000$



(a) $\alpha = 10^\circ, \theta = 1.0^\circ, N = 1000$

(b) $\alpha = 40^\circ, \theta = 0.75^\circ, N = 1000$

Fig. 4 SEM micrographs of wear scar and EDX elements line scanning analysis in MFR under water

图 4 水介质下混合区的 SEM 磨痕形貌及 EDX 元素线扫描分布谱图

与转动微动相似^[13],表明该状态下微动已转变为主要受转动分量控制.当微动主要受扭动分量控制时,磨痕近似呈中心低两侧高的形貌,但水介质下磨痕最大深度可达 $7\ \mu\text{m}$ (见图 5 中 2D 轮廓);当微动主要受转动分量控制时,水介质下磨痕中心隆起两侧出现较深(最大深度可达 $32\ \mu\text{m}$)的低洼区,但研究已表明^[3],在干态下 $\alpha = 40^\circ$ 和 $\theta = 0.5^\circ$ 时磨痕呈“U”型.这种差异可能是由于水介质下极易导致接触区材料以剥落方式去除,较明显的剥落深坑随之出现;另一方面,对比 $F_t - \theta$ 曲线,水介质下的摩擦力远高于干态下,表明干态下磨屑能有效地充当固体润滑层作用.而在水介质下接触区内的粉末状磨屑随着微动的进行能被水及时带走,因此接触区表面切应力较高,接触界面的材料去除机制主要表现为材料的剥落.此外,EDX 线扫描发现:水介质下隆起处 Al 元素明显低于基体材料和中心黏着区,而磨

损区 O 元素含量基本呈相反趋势,但相比干态其氧

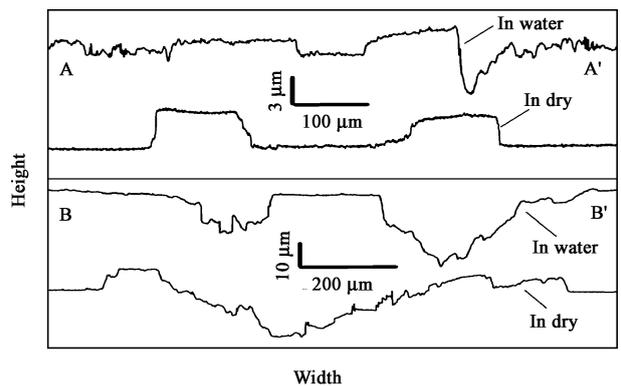


Fig. 5 2D profile of wear scars in MFR under two different fretting conditions

(corresponding to AA' and BB' in Fig. 4, respectively)

图 5 两种不同微动环境下混合区的截面轮廓(分别对应图 4 中的 AA'和 BB')

化程度并不突出,这是由于水隔离了空气中的氧进入接触区,导致没有充分氧化的磨屑层未能及时充当固体润滑层作用,这也是接触界面摩擦力升高的主要原因。

在滑移区,磨损加剧,磨痕轮廓呈“U”型,其磨损机制逐渐转变为以磨粒磨损为主.当扭动分量较大程度地控制着微动损伤时,运动方式的特殊性明显制约了磨痕接触中心磨屑的及时排出(如图6所示),接触中心仍有许多堆积的岛屿状磨屑团,随着微动的进行,这些岛屿状磨屑被研磨成细小颗粒,并在被水介质带走的过程中减缓了材料的磨损、降低了表面切应力,其润滑性能优于干态下的氧化磨屑层,因此等效摩擦系数(F_t/F_n)低于干态(如图7所示).但随着角位移幅值或倾斜角度的增加,微动逐渐转变为受转动分量控制,接触区的磨屑伴随水介质很快被排出接触区外,岛屿状磨屑不能较长时间

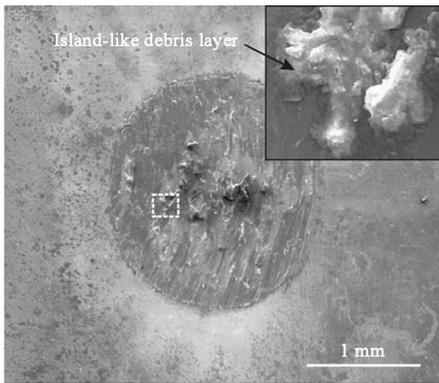


Fig. 6 SEM micrograph of wear scar in SR under water medium; $\alpha = 10^\circ$, $\theta = 3.0^\circ$, $N = 1000$

图6 水介质下滑移区的SEM磨痕形貌: $\alpha = 10^\circ$, $\theta = 3^\circ$, $N = 1000$

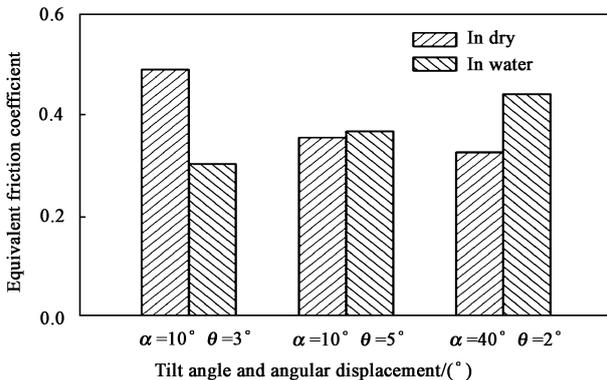


Fig. 7 Equivalent friction coefficient value under two different fretting conditions; $N = 1000$

图7 两种不同微动环境下等效摩擦系数的比较: $N = 1000$

保留在接触界面间,此时摩擦系数又高于干态,水介质加剧了磨损.但值得一提的是,在切向微动模式下,大量的研究已表明水介质能有效降低摩擦系数、一定程度上减缓了微动损伤^[7].这可能是由于切向微动模式下磨屑的排出能力低于转动微动模式,而保持在接触界面间的湿润磨屑层的润滑性能优于氧化磨屑层引起的。

2.3 磨损体积与累积耗散能间的关系

在微动摩擦学的研究中能量方法被广泛采用,每个微动循环内消耗的能量可以用相应微动循环中切向力-位移曲线所包围的面积表示,而累积耗散能表示所有微动循环下的切向力-位移曲线面积之和^[14-16].图8示出了水介质和干态微动环境下的磨

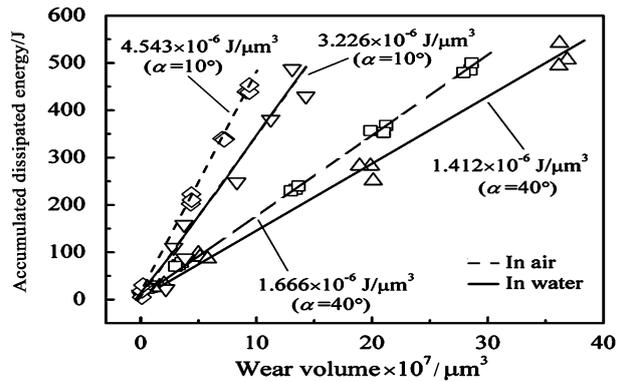


Fig. 8 Relationship between accumulated dissipated energy and wear volume under two different fretting environment

图8 两种不同微动环境下的磨损体积与累积耗散能间的关系

损体积与累积耗散能演变关系.由图8可得:在给定的倾斜角度下,对于相同微动环境下的磨损体积与累积耗散能分别呈近似线性关系;两种不同倾斜角度下均为干态下单位体积消耗的耗散能高于水介质.例如,当 $\alpha = 40^\circ$ 时,水介质及干态条件下,单位体积消耗的耗散能分别为 1.412×10^{-6} 和 $1.666 \times 10^{-6} J/\mu m^3$.也就是说,水介质中用于材料去除的那部分能量所占比例高于干态.另一方面,倾斜角度的改变对单位体积消耗的耗散能也有显著的影响,在相同的微动环境下倾斜角度越小单位体积消耗的耗散能越大。

3 结论

a. 扭转复合微动的 $F_t - \theta$ 曲线演变特性表明水介质明显地改变了扭转复合微动的运行区域,水

介质使微动进入混合区或滑移区相对变得困难。

b. 相比干态,在部分滑移区和混合区,水介质下的剥层现象更加明显,水介质加速了接触区的微动损伤。在滑移区,磨损机制主要转变为以磨粒磨损为主,扭动分量较大程度地控制微动损伤时,岛屿状的磨屑团能有效降低表面摩擦系数、减缓微动损伤;相反,转动分量控制下的微动排屑能力提高,此时与切向微动不同,扭转复合微动下水介质加剧了材料的磨损。

c. 水介质和干态微动环境中不同倾斜角度下的磨损体积均与累积耗散能分别呈线性关系。水介质中用于材料去除的那部分能量所占比例高于干态;在相同的微动环境下倾斜角度越小单位体积消耗的耗散能越大。

参考文献:

- [1] Zhou Z R, Zhu M H. Composite fretting wear[M]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University Press, 2004 (in Chinese) [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].
- [2] Shen M X, Xie X Y, Cai Z B, *et al.* Experimental study and simulation of dual - rotary fretting[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 15: 89 - 94 (in Chinese) [沈明学, 谢兴源, 蔡振兵, 等. 扭转复合微动模拟及其试验研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 15: 89 - 94].
- [3] Shen M X, Zhu M H, Cai Z B, *et al.* Dual - rotary fretting wear behavior of 7075 aluminum alloy[J]. *Tribology International*, 2012, 48: 162 - 171.
- [4] Wang C T. Human biotribology[M]. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese) [王成焘. 人体生物摩擦学[M]. 北京: 科学出版社, 2008].
- [5] Périer V, Dieng L, Gaillet L, *et al.* Influence of an aqueous environment on the fretting behaviour of steel wires used in civil engineering cables[J]. *Wear*, 2011, 271: 1 585 - 1 593.
- [6] Chung I, Lee M. An experimental study on fretting wear behavior of cross - contacting Inconel 690 tubes[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, 241: 4 103 - 4 110.
- [7] Ren P D, Chen G X, Zhou Z R. Fretting wear behavior of GCr15 steel under lubrication of various aqueous Media[J]. *Tribology*, 2003, 23(4): 331 - 335 (in Chinese) [任平弟, 陈光雄, 周仲荣. 不同水介质润滑下 GCr15 钢的微动磨损特性[J]. *摩擦学学报*, 2003, 23(4): 331 - 335].
- [8] Ding H Y, Zhou G H, Dai Z D, *et al.* Corrosion wear behaviors of 2024Al in artificial rainwater and seawater at fretting contact[J]. *Wear*, 2009, 267: 292 - 298.
- [9] Shen Y, Zhang D K, Wang S Q, *et al.* Fretting behaviors of steel wires as hoisting ropes for coal mine in corrosive media[J]. *Tribology*, 2011, 31(1): 66 - 71 (in Chinese) [沈燕, 张德坤, 王崧全, 等. 矿用钢丝绳在腐蚀介质环境下的微动行为研究[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(1): 66 - 71].
- [10] Xie X Y, Shen M X, Cai Z B, *et al.* Dual - rotary fretting behavior of 7075 aluminum alloy[J]. *Tribology*, 2012, 32(1): 70 - 75 (in Chinese) [谢兴源, 沈明学, 蔡振兵, 等. 7075 铝合金扭转复合微动磨损研究[J]. *摩擦学学报*, 2012, 32(1): 70 - 75].
- [11] Kalin M, Vižintin J. The tribological performance of DLC coatings under oil - lubricated fretting conditions[J]. *Tribology International*, 2006, 39: 1 060 - 1 067.
- [12] Cai Z B, Zhu M H, Shen H M, *et al.* Torsional fretting wear behaviour of 7075 aluminium alloy in various relative humidity environments[J]. *Wear*, 2009, 267: 330 - 339.
- [13] Mo J L, Zhu M H, Zheng J F, *et al.* Study on rotational fretting wear of 7075 aluminum alloy [J]. *Tribology International*, 2010, 43: 912 - 917.
- [14] Fouvry S, Kapsa PH, Zahouani H, *et al.* Wear analysis in fretting of hard coatings through a dissipated energy concept[J]. *Wear*. 1997, 203 - 204: 393 - 403.
- [15] Fouvry S, Liskiewicz T, Kapsa PH, *et al.* An energy description of wear mechanisms and its applications to oscillating sliding contacts[J]. *Wear*, 2003, 255: 287 - 298.
- [16] Zheng J F, Yang S, Shen M X, *et al.* Study on rotational fretting wear under a ball - on - concave contact configuration[J]. *Wear*, 2011, 271: 1 552 - 1 562.