

7075 铝合金复合微动行为的研究

朱 昊, 周仲荣

(西南交通大学 摩擦学研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 在改进复合微动试验装置和简化接触界面受力分析的基础上, 在倾斜角 30 和 45 以及不同外加载荷条件下, 考察了 7075 铝合金的复合微动行为及损伤机理, 根据不同微动阶段的载荷-位移曲线特征分析了铝合金的微动损伤特性。结果表明, 7075 铝合金的复合微动行为强烈地依赖于倾斜角度和外加载荷; 其复合微动损伤机制主要为剥层机制。

关键词: 铝合金; 微动; 复合微动

中图分类号: TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2003)04-0320-06

紧配合件之间在机械振动、电磁振动、疲劳载荷或热循环等作用下, 发生微米量级的相对运动, 造成材料磨损或产生疲劳裂纹, 通常称为微动损伤^[1~3]。工业中的微动现象十分普遍, 是造成许多机械部件灾难性事故的元凶之一^[1,2]。微动运动十分复杂, 为了便于研究, 可以按照球/平面接触方式简化为 4 种基本运动模式, 即切向微动、径向微动、滚动微动和扭动微动^[4]。至今, 微动摩擦学研究还主要集中于切向微动, 而针对其它模式的微动研究报道较少^[5~7]。实际的微动现象往往不是以单一的微动模式进行, 而是 2 种或 2 种以上的基本模式的复合。我们在径向微动试验装置上, 通过改变夹具系统的结构, 实现了径向和切向

微动的复合^[8,9], 并对复合微动的运行和损伤机理进行了初步考察。本文分析了该试验装置存在的问题, 对其进一步改进, 并对比考察了 7075 铝合金在改进试验装置前后 2 种试验条件下的微动行为, 以期为进一步认识复合微动的本质以及减轻和避免工业中的复合微动损伤提供实验依据。

1 实验部分

改进前的复合微动试验装置^[8,9]采用球/平面接触方式, 通过球试样施加载荷于倾斜角为 θ 的平面试样, 其受力分析如图 1(a) 所示, 接触点处的法向和切向除承受分别产生径向和切向微动的载荷 p_{An} 和 p_{At}

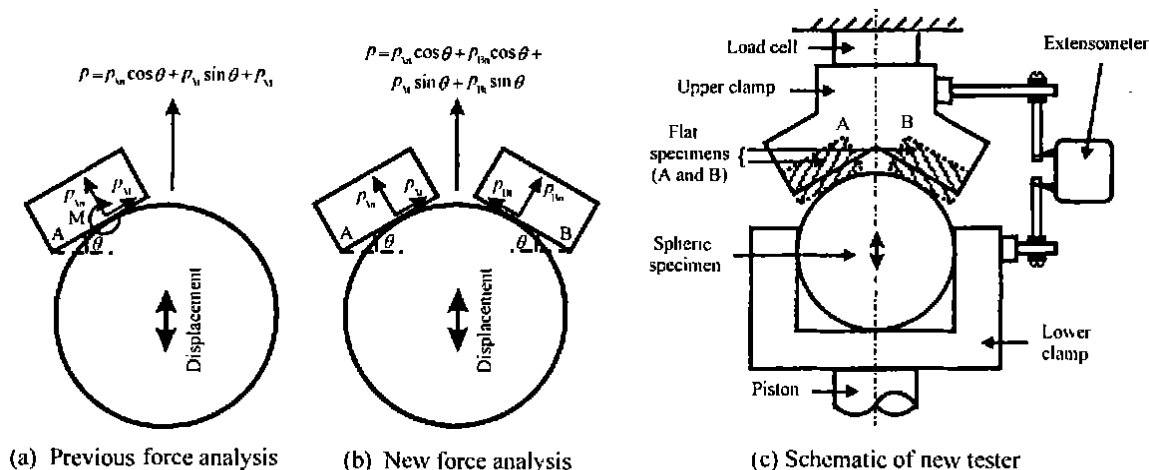


Fig 1 The schematic diagram of new composite fretting tester and the mechanic analysis

图 1 改进后的复合微动试验装置示意图及其受力分析

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50105017); 西南交通大学基金资助项目。

收稿日期: 2002-09-25; 修回日期: 2002-12-17/联系人朱昊, e-mail: zhuminhao@home.swjtu.edu.cn

作者简介: 朱昊, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 目前主要从事摩擦学及表面工程研究

外,还存在使夹具旋转的力矩 M ;由于不能精确求出载荷传感器测量得到的载荷 p 的3个分量 p_M 、 p_{A_n} 和 p_{A_t} ,因此无法获得接触表面的摩擦系数。为此对原试验装置进行改进,改进的复合微动试验装置的受力分析如图1(b)所示。球试样随液压试验机的活塞沿垂向运动,平面试样固定在“人”字形夹具上,接触表面与水平方向呈一定角度 θ 。载荷由“人”字形夹具上方的传感器测量,垂向相对位移由外加位移传感器测量,以控制载荷(p)方式进行试验,即以一定加载和卸载速度将载荷控制在最大和最小载荷($p_{\max}$ 和 $p_{\min}$)之间。试验中分别在“人”字形夹具的A、B两端夹持2个试样[如图1(c)所示]。由于夹具A和B两侧受力对称,不存在使夹具转动的力矩,因此可以确定接触点处法向和切向载荷(p_{A,B_n} 和 p_{A,B_t})的关系。在试验过程中,若仅夹持1个试样,则同改进前的试验模式完全相同,因此可以将改进前后的试验模式的差别视作夹具变形刚度的差别,但改进后的装置使试样受力更简单,更有利于研究复合微动运行和损伤机理。

用 $\phi 40$ mm的GCr15轴承钢球(硬度63HRC)及7075铝合金(尺寸10 mm×10 mm×20 mm,表面粗糙度 $R_a=0.04\text{ }\mu\text{m}$)试块,该合金试块先后进行固溶、淬火、过时效处理和冷变形加工处理。除铝外,其它主要化学成分:2.68%Mg、5.84%Zn、0.16%Fe、0.07%Si、0.20%Cu、0.04%Ti(质量分数),其主要机械性能为 $\sigma_s=460\text{ MPa}$ 、 $\sigma_b=540\text{ MPa}$ 、 $\delta=11\%$ 、硬度160HV。之所以选择铝合金同钢构成摩擦副,主要是因为铝合金有较明显的损伤响应,有利于凸显损伤过程和进行机理分析。平面试样同水平方向夹角 θ 分别为30°和45°;加载速度固定为6 mm/min,最大载荷 $p_{\max}$ 分别为400 N和800 N;为了保证摩擦副接触表面始终处于接触状态,控制 $p_{\min}$ 为50 N;最大循环周次为 10^5 (简称为模式N,以下除特别指明外均为该模式)。为了进行对比,在“人”字形夹具上安装1个平面试样,并分别取对应的 $p_{\max}$ 为200 N和400 N进行试验(简称为模式O),以保证载荷同模式N的相同。

复合微动试验结束后,用光学显微镜和Olympus OL S1100型激光共焦扫描显微镜^[10](CLSM)观察和测量磨痕表面形貌及磨损量。

2 结果和讨论

2.1 载荷-位移曲线

载荷-位移曲线(p - D 曲线)是复合微动试验获得的重要信息。前期研究^[8,9]表明,整个复合微动过程分为3个阶段,并具有3种类型的 p - D 曲线,即:准梯

形、椭圆形和直线形。图(2和3)示出了不同倾斜角度

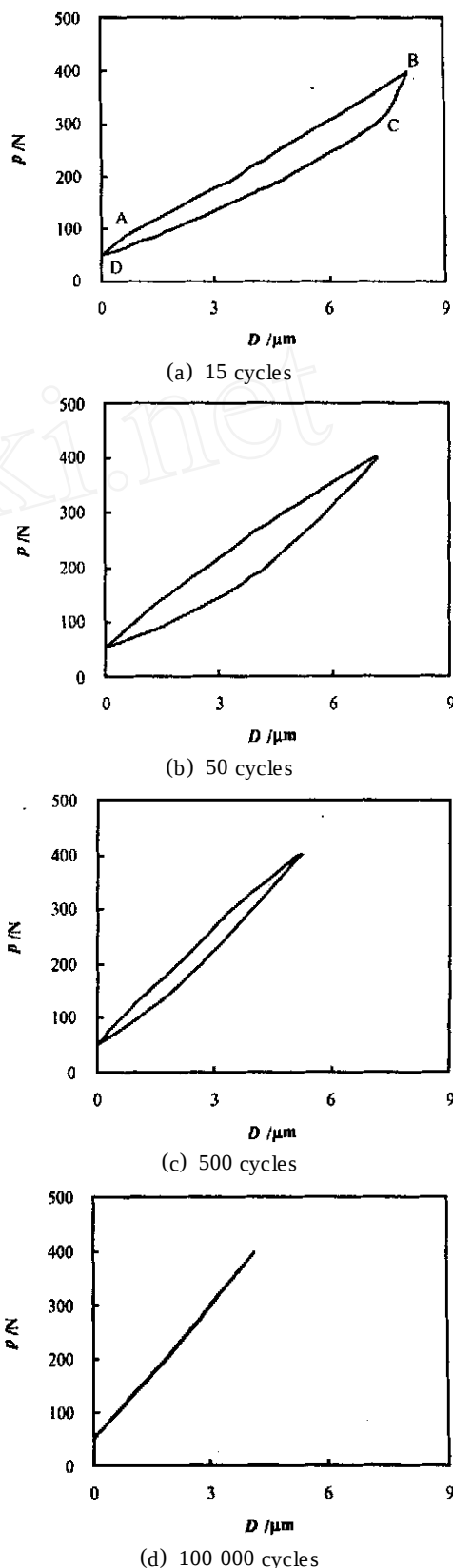


Fig 2 The load-displacement curves of composite fretting at $\theta=45^\circ$ and $p_{\max}=400\text{ N}$

图2 复合微动载荷-位移曲线($\theta=45^\circ$, $p_{\max}=400\text{ N}$)

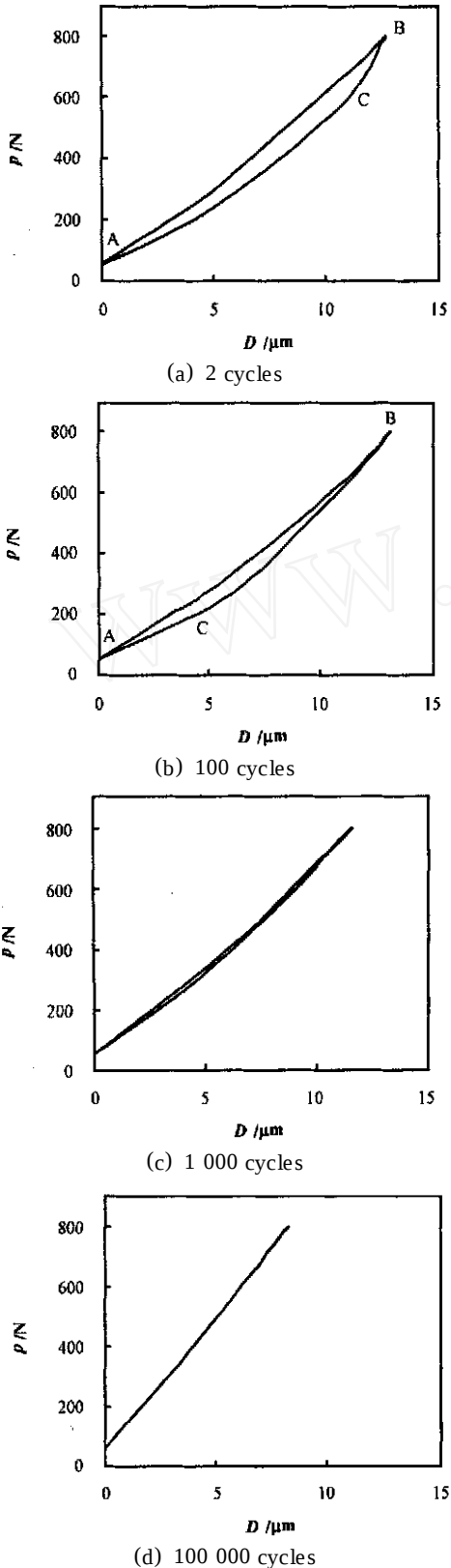


Fig 3 The load-displacement curves of composite fretting at $\theta = 30^\circ$ and $p_{\max} = 800 \text{ N}$

图3 复合微动载荷-位移曲线($\theta = 30^\circ$; $p_{\max} = 800 \text{ N}$)

下 7075 铝合金复合微动的载荷-位移曲线 可见, 当

试样的倾斜角度较大($\theta = 45^\circ$)时, 在试验早期, 第 I 阶段 p - D 曲线呈准梯形[见图 2(a)], 当倾角降低至 $\theta = 30^\circ$ 时, 径向微动分量增加, 接触界面的相对滑移减小, p - D 曲线也随之发生变化, 如图[3(a 和 b)]所示, 相应的 p - D 曲线转变为准三角形 随着循环周次的增加, 第 I 阶段 p - D 曲线中的 BC 段逐渐增长, 这说明接触区的相对位移逐渐减小, 当 BC 段长度达到 $\Delta p = p_{\max} - p_{\min}$ 时, 意味着复合微动的第 I 阶段结束并进入第 II 阶段, 相应的 p - D 曲线呈椭圆形[见图 2(b 和 c) 及图 3(c)] , 表明此时微动处于部分滑移状态, 即接触中心发生粘着而接触边缘发生微滑 当循环周次达到数千次(依试验条件不同而有所差异)后, p - D 曲线上的加载与卸载部分重合[见图 2(d) 和图 3(d)] , 说明接触体的变形处于弹性协调状态

2.2 位移随循环周次的变化

图 4 示出了在改进后的复合微动试验装置上获

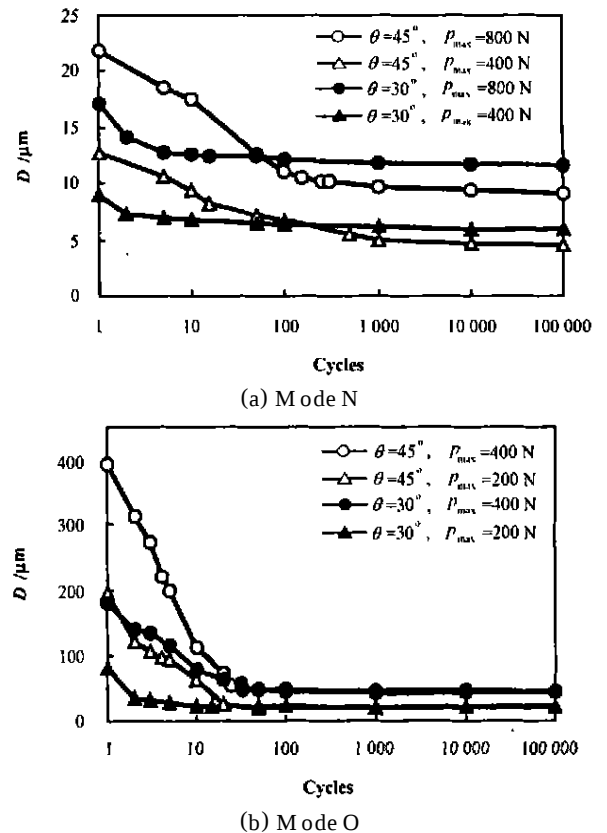


Fig 4 The variation of displacement of composite fretting as function of number of cycles

图4 复合微动位移随循环周次变化的关系曲线

得的位移-循环周次曲线 可以看出: 同单试样的模式 O 相比, 模式 N 的位移值大大降低, 例如当 $\theta = 45^\circ$ 而 $p_{\max} = 400 \text{ N}$ 时, 模式 O 相应的试样首次循环最大位移为 $396 \mu\text{m}$, 而模式 N (对应的 $p_{\max} = 800 \text{ N}$) 相应的

位移仅为 $21.9 \mu\text{m}$ 。这是因为,改进后的试验装置消除了转动转矩的作用,在横向不因夹具转动而产生位移,测量得到的位移仅包括微动产生的相对位移和夹具受力变形的位移,且夹具系统的刚度较高,相应的变形位移较小,因此试验测量的位移主要反映微动过程的相对位移。

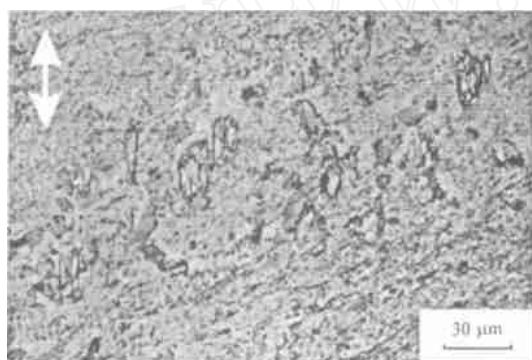
在复合微动第 I 阶段试样的塑性变形较大,磨损较快,接触状态发生迅速变化^[12],因存在位移的协调而导致位移值迅速降低(见图 4)。对比图 4(a 和 b)可见,模式 N 的位移衰减速率大大降低,复合微动的前 2 个阶段持续的时间延长,如当 $\theta = 45^\circ$ 而 $p_{\max} = 800 \text{ N}$ 时,第 I 阶段结束的循环周次从 33 延长到 100。同样地,随着倾斜角的增加,接触界面的相对滑移量增加,复合微动第 I 阶段和第 II 阶段持续的循环次数增大[见图 4(a)]。而增加载荷与增加倾斜角度的结果相

反,如图 5(a) 所示,当 $\theta = 45^\circ$ 时, $p_{\max} = 400 \text{ N}$ 时第 I 阶段持续时间比 $p_{\max} = 800 \text{ N}$ 时长,这同切向微动条件下增加载荷使微动区域向部分滑移区转变的规律相一致。

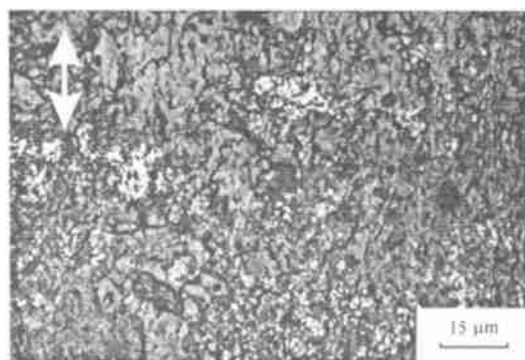
以上复合微动的动力学特性分析表明,复合微动试验装置经改进后,其复合微动过程仍可分为 3 个阶段,并对应不同类型的 $p-D$ 曲线;相应的复合微动的位移及 3 个阶段均强烈地依赖于载荷水平和倾斜角度。

2.3 表面损伤机制

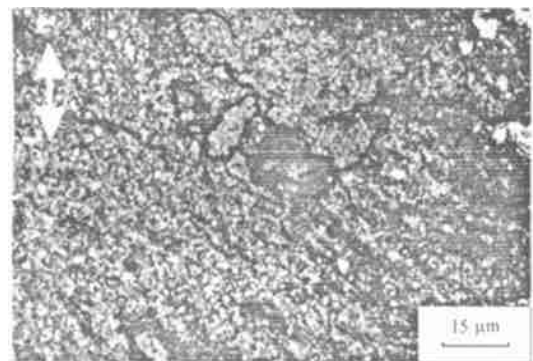
对铝合金试块磨痕进行微观观察发现,复合微动损伤也分为 3 个阶段,并与动力学特性的 3 个阶段相对应。在阶段 I,微动位移值较高,表面仅经过几次微动循环后即出现擦伤;经几十次微动循环后接触表面沿滑移方向产生犁沟,同时呈现粘着磨损特征[如



(a) Mode N, $p_{\max} = 800 \text{ N}$, $\theta = 30^\circ$; 50 cycles



(b) Mode N, $p_{\max} = 800 \text{ N}$, $\theta = 30^\circ$; 100 000 cycles



(c) Mode N, $p_{\max} = 800 \text{ N}$, $\theta = 30^\circ$; 100 000 cycles



(d) Mode O, $p_{\max} = 400 \text{ N}$, $\theta = 30^\circ$; 100 000 cycles

Fig 5 CLSM morphology of wear scars of composite fretting

(arrow direction refers to fretting direction)

图 5 铝合金试块复合微动磨痕的 CLSM 形貌(箭头方向指微动方向)

图 5(a) 所示]

随着循环周次的增加,位移值迅速降低,复合微动进入阶段 II, $p-D$ 曲线转变为椭圆形,此时微动处于部分滑移状态,即接触中心发生粘着而接触边缘发生微滑;在接触中心具有前一阶段滑移特征的区域因粘着变化甚微,磨损主要以疲劳磨损的剥层方式发生

在边缘,剥落的颗粒在两接触体的反复碾压作用下而碎裂,二体接触转变为三体接触,第三体在接触界面间近似起小滚动轴承的作用,有利于降低磨损。

随着循环次数的继续增加,进入复合微动的阶段 III, $p-D$ 曲线收敛为直线型,此时的接触体变形处于弹性协调状态。相应的磨损仍表现出剥层磨损特征,

但相对位移比前一阶段的小, 颗粒以剥层方式脱落 [见图 5(b)]。同图 5(d) 所示的模式 O 的损伤相比, 剥落颗粒的尺寸明显减小, 且因相对位移值较低, 第三体排出困难, 在接触区大多数区域 (中心粘着区除外) 覆盖着较厚的三体层 (磨屑层) [如图 5(c) 所示]。如图 4(a) 所示, 相同载荷不同倾角下的位移-循环周

次曲线发生交叉, 这可能是因为试验初期倾角越大, 切向微动分量越大 (即相对滑移量大), 同时接触界面的初始摩擦系数也较高, 而微动磨损强烈依赖于位移幅值, 使磨损较严重, 从而位移的下降幅度越大。

图 6 示出了 7075 合金在 $\theta = 45^\circ$ 和 $p_{\max} = 800 \text{ N}$ 时, 经历 10^5 次循环之后, 沿滑移方向的中心宽度为

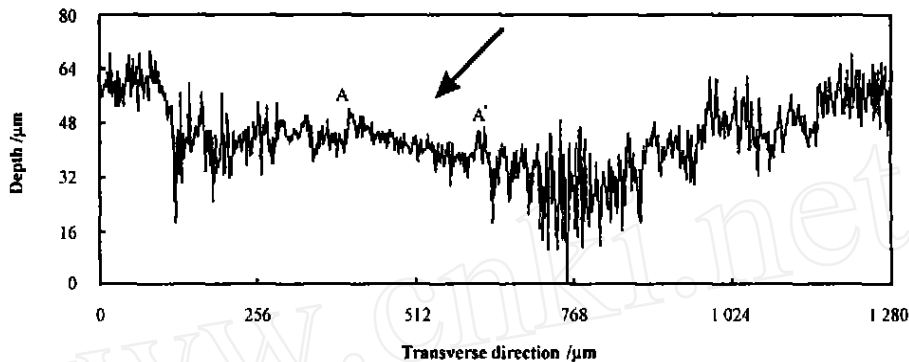


Fig 6 The profile of wear scar of composite fretting at $\theta = 45^\circ$ and $p_{\max} = 800 \text{ N}$ for 10^5 cycles

图 6 复合微动磨痕轮廓形貌 ($\theta = 45^\circ$, $p_{\max} = 800 \text{ N}$, 10^5 次循环)

$55 \mu\text{m}$ 的磨痕平均轮廓形貌。可见磨痕具有明显的非对称性, 这是表面承受倾斜载荷而产生非对称磨损的结果。图 6 中 A-A 区域为两接触体在阶段 III 处于粘着的区域, 表面轮廓较光滑。

3 结论

a 改进后的复合微动试验装置消除了因夹具转动造成的影响, 受力分析更简单。

b 可以将本试验中的复合微动过程分为 3 个阶段, 其分别对应不同类型的 p - D 曲线: 在阶段 I, p - D 曲线呈准梯形或准三角形, 相对位移较高, 摩擦副材料表现出明显的滑动磨损特征和粘着现象; 在阶段 II, p - D 曲线呈椭圆形, 微滑发生在接触边缘, 颗粒以剥层方式剥落并碎化形成第三体; 在阶段 III, p - D 曲线呈直线形, 材料的变形具有弹性协调特征, 颗粒仍以剥层机制剥落。

c 复合微动磨损行为强烈依赖于试验中的载荷水平和倾斜角度, 磨痕呈明显的非对称性。

参考文献:

- [1] Waterhouse R B. Fretting fatigue [M]. Applied Science, London, 1981.
- [2] Waterhouse R B. Fretting wear [M]. ASM Handbook, Vol 18, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International, Cleveland OH, 1992: 233-256.

- [3] Zhou Z R, Vincent L. Cracking induced by fretting of aluminium alloys [J]. Transaction of the ASME, Journal of Tribology, 1997, 119: 36-42.
- [4] Zhou Z R (周仲荣), Luo W L (罗唯力), Liu J J (刘家浚). Recent Development in Fretting Research (微动摩擦学的发展现状与趋势) [J]. Tribology (摩擦学学报), 1997, 17: 272-280.
- [5] Mohrbacher H, Celis J P, Roos J R. Laboratory testing of displacement and load induced fretting [J]. Tribology International, 1995, 28: 269-278.
- [6] Briscoe B J, Chateauinois A, Lindley T C, et al. Fretting wear of polymethacrylate under linear motions and torsional contact conditions [J]. Tribology International, 1998, 31: 701-711.
- [7] Briscoe B J, Chateauinois A, Lindley T C, et al. Contact damage of poly (methmethacrylate) during complex microdisplacement [J]. Wear, 2000, 240: 27-39.
- [8] Zhu M H (朱慕昊), Zhou Z R (周仲荣). A study on composite fretting (关于复合式微动的研究) [J]. Tribology (摩擦学学报), 2001, 21(3): 182-186.
- [9] Zhu M H, Zhou Z R, Kapsa Ph, et al. Composite fretting induced by an oblique oscillatory normal load [J]. Tribology International, 2001, 34: 733-738.
- [10] Shi X Y (石心余), Zhou Z R (周仲荣). A new method of measuring surface texture (一种新的表面相貌检测方法) [J]. Lubrication Engineering (润滑与密封), 2002, 3: 77-79.
- [11] Suh K P. An overview of the delamination theory of wear [J]. Wear, 1977, 44: 1-16.

Study on Composite Fretting Behavior of 7075 Aluminum Alloy

ZHU Ming-hao, ZHOU Zhong-rong

(Tribology Research Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A composite fretting tester was modified by installing a specifically designed holder to eliminate the effect of the rotary momentum of the axle on the fretting behavior. Thus the mechanic analysis at the interfaces of the contacting pairs was simplified. The fretting behavior and failure characteristics of 7075Al alloy block against an SA E52100 steel ball were investigated on the modified test rig at block tilt angles of 30° and 45° and loads of 200 N, 400 N, and 800 N. The variations of the vertical force vs the displacement were recorded and analyzed as the functions of the fretting cycle. The results showed that the load-displacement curves and damage processes of the Al alloy subject to composite fretting could be divided into three stages and the damaged surface of the Al alloy was characterized by strong asymmetry, which was attributed to the changes in the contact states and fretting mechanisms at different fretting stages. The Al alloy had composite fretting behavior strongly dependent on the tilt angle and load and was characterized by delamination in fretting against the steel.

Key words: aluminum alloy; fretting; composite fretting

Author: ZHU Ming-hao, male, born in 1968, Ph. D., Professor, e-mail: zhuminhao@home.swjtu.edu.cn