

钢-钢接触的扭动微动磨损氧化行为研究

蔡振兵, 朱旻昊, 张强, 何莉萍, 林修洲

(西南交通大学摩擦学研究所, 610031, 成都)

摘要: 在空气、氧气和氮气气氛中,研究了 LZ50 车轴钢在法向载荷为 50 N 和不同角位移幅值下的扭动微动运行行为,并重点分析了其摩擦磨损特性和氧化作用机理. 结果表明,当气氛中含氧量增加时,混合区和滑移区向小角位移幅值方向移动,摩擦扭矩随循环周次的变化曲线分别为跑合、上升和稳定阶段,当气氛中含氧量增加时,上升阶段缩短,稳定阶段提前,摩擦扭矩值则越低. 在部分滑移区,损伤比较轻微,在混合区和滑移区,扭动微动磨损机制为磨粒磨损和剥层,并伴随明显的塑性变形. 摩擦氧化在扭动微动接触界面不仅增加了界面滑移,而且产生的氧化磨屑不易排出接触区,因此有利于减少磨损.

关键词: 摩擦磨损;微动磨损;扭动微动;摩擦氧化

中图分类号: TH117.3;TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0086-05

Oxidation Behaviors of Steel-to-Steel Contact under Torsional Fretting Wear

CAI Zhenbing, ZHU Minhao, ZHANG Qiang, HE Liping, LIN Xiuzhou

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

Abstract: On an atmosphere-controlled torsional fretting tester, torsional fretting running behaviors of LZ50 steel is investigated in three atmospheres (ambient air, oxygen and nitrogen). The results indicates that the mixed fretting regime and slip regime shift towards the smaller angular displacement amplitude with the increasing oxygen content in the atmospheres. The variation curves of friction torques as function of the number of cycles are defined during initial, climbing and stable stages. With the increasing oxygen content in the atmospheres, the climbing stage is shortened, the stable stage arises in advance, and the friction torques are reduced. The friction torques and wear depths increase with the increasing angular displacement amplitude accordingly. In the partial slip regime, the damage gets slighter. The wear mechanism of torsional fretting here is shown as abrasive wear and delamination accompanied with the plastic deformation in the mixed fretting and slip regimes. The interface slip is enhanced, the oxidative debris becomes difficult to remove, hence the wear is reduced due to the tribo-oxidation.

Keywords: friction and wear; fretting wear; torsional fretting; tribo-oxidation

扭动微动是指在交变载荷下接触界面发生微幅扭动的相对运动,大量存在于杵臼关节、球窝接头、机车车辆心盘和轮轴,以及一些旋转紧固件中^[1-3]. 长期的微动磨损研究发现,微动接触界面具有与滑动、滚动等摩擦方式不同的氧化行为,其中钢的氧化

磨屑通常呈鲜艳的红褐色,这已成为判断微动磨损的重要判据之一^[4-5]. 扭动微动磨损作为一种研究和认识较少的微动模式,其接触界面的氧化行为未见研究报导. 此外,环境(如温度、湿度、气氛等)对材料的摩擦磨损性能具有显著的影响^[5-11],尤其是在微

动磨损条件下^[4],因此为揭示扭动微动条件下的接触界面氧化作用机理,本文研制了可控气氛的实验装置,设计了氮气、实验室大气和氧气的气氛工况,系统研究了钢-钢接触下的微动运行和损伤机理。

1 实验部分

如图1所示,可控气氛扭动微动磨损实验装置采用球-平面接触方式,待测试平面试样在上方,与磨球和旋转平台相联,球中心轴与平台旋转轴高度重合(同轴度小于等于 $5\text{ }\mu\text{m}$)。六维力-力矩(F - T)传感器对摩擦过程中产生的力和扭矩的6个分量($F_x, F_y, F_z, T_x, T_y, T_z$)随循环次数变化的情况进行实时记录。实验在大气、氮气和氧气气氛中进行,空气气氛的相对湿度为 $(60\pm 3)\%$,使用压力为12 MPa的工业氮气、氧气作为气源,对氮气、氧气进行实验。实验时环境压强保持为 $1.01\times 10^5\text{ Pa}$,气流平稳,气密性好,实验温度为 $(22\pm 3)\text{ }^\circ\text{C}$ 。

实验平面试样选用中碳钢-LZ50车轴钢,其中 $w(\text{C})$ 为 0.55% , $w(\text{Si})$ 为 $0.26\%\sim 0.32\%$, $w(\text{Mn})$ 为 0.78% , $w(\text{P})$ 小于 0.03% , $w(\text{S})$ 小于 0.03% , $w(\text{Ni})$ 小于 0.30% ,硬度 H_v 为352, σ_s 为330 MPa,将试样加工成 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的方形块,测试表面经打磨抛光至表面粗糙度 $R_a=0.02\text{ }\mu\text{m}$ 。对于偶件为 $\phi 40\text{ mm}$ 的GCr15钢球,其热处理状态为淬火和低温回火, $H_v=876$ 。扭动微动磨损的实验参数为:扭动角速度 $\omega=0.21\text{ rad/min}$;往复扭动角位移幅值 θ 为 $0.1^\circ\sim 15^\circ$;法向载荷 F_n 为50 N;循环次数 N 为1~1 000。实验后用光学显微镜(OM, Carl Zeiss)及扫描电镜(SEM, Quanta 200)观察磨痕表面形貌,用EDX(EDAX-7760/68 ME)进行磨痕和磨屑的氧化分析。

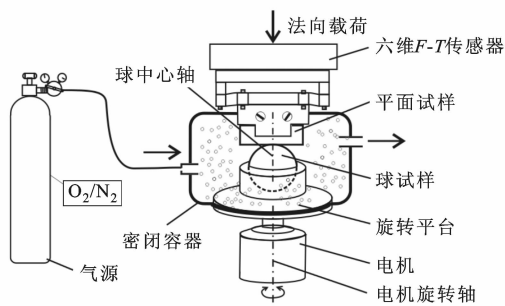


图1 可控气氛扭动微动磨损实验装置

2 实验结果及讨论

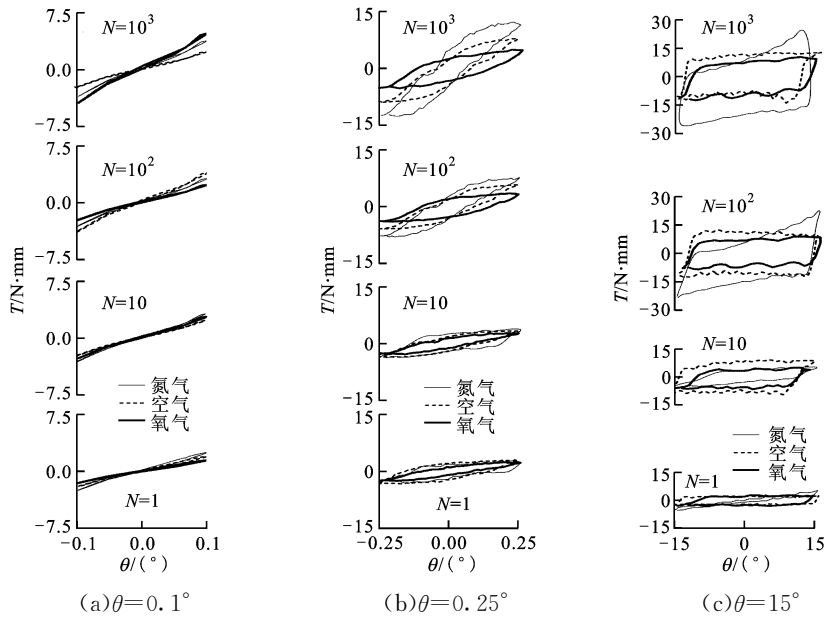
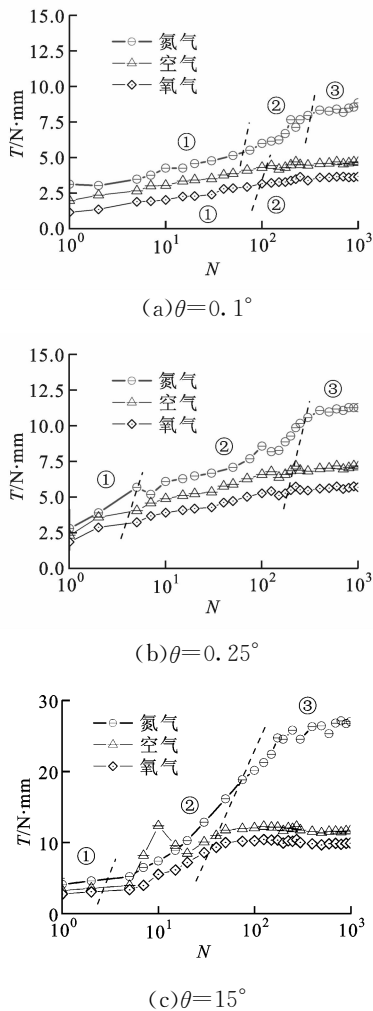
2.1 运行特征分析

摩擦扭矩-角位移(T - θ)曲线反映了扭动微动界

面的摩擦动力学特性。在扭动微动中, T - θ 曲线通常表现为3种形式:①直线型主要发生在极小角位移或较大法向载荷条件下,两接触表面间发生部分滑动,扭动主要由接触区之间的弹性变形来协调;②椭圆型的接触区中心黏着且微滑发生在接触边缘区,相对运动由弹塑性变形来协调;③平行四边形型的接触区整体处于完全滑移状态^[3]。在图2中,当 $\theta=0.1^\circ$ 时,3种气氛条件下的 T - θ 曲线均呈直线型,即相对运动由弹性变形协调,此时扭动微动处于部分滑移状态,微动运行于部分滑移区。当 $\theta=0.25^\circ$ 时, T - θ 曲线在初次循环时均呈现出椭圆状,表明接触界面发生了部分滑移,但接触界面有塑性变形发生, T - θ 曲线形状随着循环次数的增加发生改变,由椭圆型转变为平行四边形型,即由部分滑移转变为完全滑移,扭动微动运行于混合区。随着 θ 的继续增大,3种气氛环境中的 T - θ 曲线除初期跑合阶段外,均呈平行四边形型,扭动微动处于完全滑移状态,并进入了扭动微动的滑移区,摩擦扭矩 T 随着循环次数 N 的增加而相应增加。可见,在含氧条件下(空气和氧气气氛),扭动微动混合区的宽度比无氧条件(氮气气氛)下窄,即滑移区和混合区的边界向小位移方向移动,说明有氧条件下微动界面更有利于相对滑动。

2.2 摩擦扭矩分析

如图3所示,扭矩变化曲线可以划分为3个阶段:①在摩擦过程的初期,由于金属材料表面吸附膜和氧化膜的作用,使得摩擦系数较低,因此为跑合阶段;②随着循环次数的增加,表面膜被去除,两摩擦副直接接触,摩擦表面在交变的压应力和剪切力作用下发生塑性变形和加工硬化,并由于摩擦副之间的黏着和犁削作用,使得摩擦扭矩随之上升;③由于磨屑参与承载,磨屑形成与排出达到相对平衡,因此摩擦扭矩变化不大,处于稳定阶段。当角位移较小时($\theta=0.1^\circ$,见图3a),对于含氧气氛,扭矩值随循环次数的增加而缓慢上升,第①和第③阶段没有明显区分,第③阶段的扭矩值保持在较低水平,氮气条件下的扭矩值有第①~③阶段特征,且扭矩值始终高于含氧气氛。随着角位移幅值的增大(见图3)或是随着气氛中氧含量的减少,第②阶段所持续的时间明显增加,第③阶段出现时间推迟,相应的摩擦扭矩也较高。当增加气氛的含氧量时,使得摩擦扭矩下降,且第②阶段缩短,并较早地进入扭矩的稳定阶段。因此,磨屑在不同气氛中的行为有很大差别,而且氧化是重要的因素,对微动界面的摩擦过程起重要作用,即氧化有利于减少磨损。

图2 LZ50 钢在不同条件下的 $T-\theta$ 曲线图3 LZ50 钢在不同条件下的扭矩曲线($F_n = 50\text{ N}$)

2.3 磨痕损伤分析

如图4所示,在部分滑移区,3种气氛下的微动磨痕呈环状特征,即接触中心黏着,微滑发生在接触边缘,在氮气条件下,损伤较轻微,但随气氛中含氧量的增加,磨斑边缘的损伤程度逐渐递增,尤其是氧气条件下磨痕周围可观察到磨屑堆积.由于扭动微动在沿半径方向上的不同各点的相对位移不同,因此其混合区不同于切向微动,需根据形貌演变过程和 $T-\theta$ 曲线共同决定.从图4a~4c中看出了混合区的磨痕形貌,可见在氧气和空气条件下的磨痕仍明显分为2个区域,即接触中心的黏着区和处于边缘的磨损区.不同于部分滑移区的是,磨损区的宽度随着循环次数的增加而增加,氮气条件下的磨痕在1 000

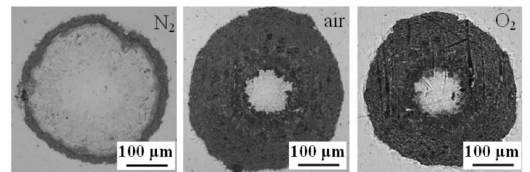
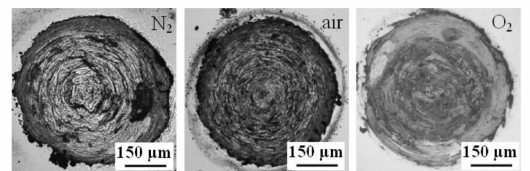
(a) $\theta = 0.5^\circ$ (氮气) (b) $\theta = 0.5^\circ$ (空气) (c) $\theta = 0.5^\circ$ (氧气)(d) $\theta = 15^\circ$ (氮气) (e) $\theta = 15^\circ$ (空气) (f) $\theta = 15^\circ$ (氧气)

图4 不同条件下 LZ50 钢的磨痕形貌

次循环后的中心黏着区已很小,其中磨痕中磨屑堆积不明显,主要显示塑性变形、犁沟和剥层的特征,这说明氧化磨屑易黏着且磨痕不宜排出,而非氧化磨屑则极易排出。同时,随着环境中氧含量的增加,磨痕中磨损区的颜色越来越深,说明摩擦氧化作用愈严重。随着角位移幅值的增加,磨痕表面的损伤加剧,在滑移区,氮气条件下的磨屑排出并堆积在磨痕边缘,而空气和氧气条件下的氧化磨屑则形成了第 3 体层,覆盖于接触表面,其中氧气条件下的第 3 体层最厚。从图 5 中可见,随着角位移幅值的增加,磨痕深度 H 单调上升,而且氮气条件下的磨损最严

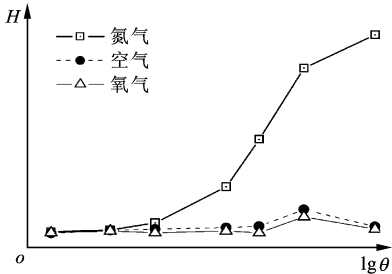


图 5 不同角位移和气氛条件下的最大磨痕深度

重。气氛中氧含量的增加,降低了磨损,这与动力学和摩擦特性的分析是一致的,即氧化有利于减少摩擦,从而降低了磨损。

2.4 表面氧化分析

图 6 为 $\theta=1.5^\circ$ 时,磨痕表面铁、氧元素沿磨痕直径方向的 EDX 线分布谱图。可见,在氮气条件下自接触边缘到接触中心,磨痕表面氧的含量很低且变化不大(氧的出现可能来源于原始表面的吸附氧),因此该气氛下几乎不存在摩擦氧化作用。在空气和氧气气氛下,氧元素呈“V”型分布,氧元素在接触中心的含量极低,这与接触中心的黏着有关。沿半径方向向外到磨痕的边缘处,氧含量逐渐增加至最大值,且氧气环境下磨斑边缘的氧含量明显较空气环境中的高,氧化更严重。因此,当扭动微动处于部

分滑移区和混合区时,接触区中心黏着,氧不容易进入,氧化反应被抑制。在接触区外侧的相对滑移区,越靠外相对位移值越高,产生的氧化程度也就越高,说明氧化与相对滑移量密切相关。当处于滑移区时,接触面上各点的位移与半径成正比关系,发生的氧化程度也与接触区半径呈正比。

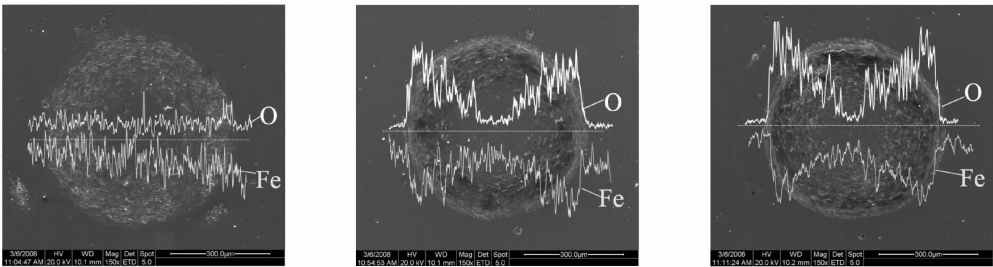
综上所述,在扭动微动过程中的含氧气氛下,摩擦所形成的氧化磨屑不易从接触区排出,堆积的磨屑一方面充当了磨粒,另一方面也参与承载,充当固体润滑剂的作用。氧化磨屑在反复的挤压作用下,碎化并形成致密的第 3 体层,从而进一步降低了磨损。因此,在含氧气氛中,含氧量越高,氧化磨屑越容易产生,磨损也就越低。

3 结 论

(1)根据摩擦扭矩、角位移幅值曲线,在空气、氧气和氮气中,扭动微动均呈现部分滑移区、混合区和滑移区,相对于氮气,因气氛含氧,使接触界面滑移倾向增加,所以混合区和滑移区向小角位移幅值的方向移动。

(2)在 3 种气氛条件下,稳态摩擦扭矩值随角位移的增加而增加,摩擦扭矩随循环次数的变化曲线可以分为 3 个阶段,即跑合阶段、上升阶段和稳定阶段。气氛中的含氧量越高,上升阶段越短,就越较快地进入稳定阶段,则摩擦扭矩值也越低。

(3)在 3 个微动运行区域,均呈现氮气气氛下的磨损较空气和氧气下的磨损高,其中氧气条件下的磨痕深度最低。在部分滑移区,损伤相对轻微,但滑移区的磨损却最严重。在混合区和滑移区,3 种气氛的扭动微动磨损机制均为磨粒磨损和剥层,并伴随明显的塑性变形。除氮气气氛外,氧化磨损也是磨损机制之一,由于氧化增加了界面滑移,产生的氧化磨屑不易排出接触区,因此有利于减少磨损。



(a) 氮气 (b) 空气 (c) 氧气

图 6 不同气氛中磨痕表面的元素分布($\theta=1.5^\circ$)

参考文献:

- [1] 蔡振兵,朱旻昊,俞佳,等. 扭动微动的模拟与试验研究[J]. 摩擦学学报,2008,28(1):18-22.
CAI Zhenbing, ZHU Minhao, YU Jia, et al. An experimental investigation and simulation of torsional fretting mode [J]. Tribology, 2008, 28(1):18-22.
- [2] YU J, CAI Z B, ZHU M H, et al. Study on torsional fretting behavior of UHMWPE [J]. Applied Surface Science, 2008,225(2):616-618.
- [3] 蔡振兵,高姗姗,何莉萍,等. 聚甲基丙烯酸甲酯的扭动微动摩擦学特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2009,41(1):96-100.
CAI Zhenbing, GAO Shanshan, HE Liping, et al. Study on torsional fretting characterization of polymethyl-methacrylate [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition,2009,41(1):96-100.
- [4] 周仲荣,朱旻昊. 复合微动磨损[M]. 上海:上海交通大学出版社,2004:3-10.
- [5] 李诗卓,董祥林. 材料的冲蚀磨损与微动磨损[M]. 北京:机械工业出版社,1987:26-27.
- [6] 王观民,张永振,杜三明,等. 不同气氛环境中钢/铜摩擦副的高速干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报,2007,27(4):346-351.
WANG Guanmin, ZHANG Yongzhen, DU Sanming, et al. Study on tribological behavior of steel-brass couples in different atmosphere under high speed and dry sliding [J]. Tribology,2007,27(4):346-351.
- [7] 任平弟,朱旻昊,周仲荣. 油、水介质对 GCr15 钢微动磨损特性的影响[J]. 西安交通大学学报,2004,38(11):1152-1155.
REN Pingdi, ZHU Minhao, ZHOU Zhongrong. Influence of oil and water mediums on characteristics of fretting wear of 52100 steel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(11): 1152-1155.
- [8] 刘峰壁,李续娥,谢友柏. 三体磨粒磨损中摩擦副表面粗糙度预测研究[J]. 西安交通大学学报,1999,33(12):35-39.
LIU Fengbi, LI Xu'e, XIE Youbai. Roughnesses prediction of interacting surface for three-body abrasive wear [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(12):35-39.
- [9] DAVID N. Friction and wear behavior of engineering materials in a simulated martian (CO₂) environment: a preliminary study [J]. Wear, 2007,263 (1/6): 88-92.
- [10] TORU Y, PETER H. Analysis of XPS spectra of Fe²⁺ and Fe³⁺ ions in oxide materials [J]. Applied Surface Science, 2008,254(8):2441-2449.
- [11] 樊康旗,贾建援. 微机械黏着接触问题的建模和分析[J]. 西安交通大学学报,2006,40(11):1280-1284.
FAN Kangqi, JIA Jianyuan. Adhesive contact model and calculation of micro-mechanical systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(11):1280-1284.

(编辑 管咏梅)

[本刊相关文献链接]

松装叶片燕尾型叶根干摩擦力模型及振动响应分析. 西安交通大学学报,2009,43(7):1-5.
 悬臂梁平面结合面参数的识别技术研究. 西安交通大学学报,2008,42(11):1323-1326.
 二维高精度磁悬浮定位平台的研究. 西安交通大学学报,2008,42(11):1377-1381.
 微滑移阻尼叶片最优正压力的影响因素分析. 西安交通大学学报,2008,42(7):828-832.
 同步回转式压缩机滑片摩擦特性研究. 西安交通大学学报,2008,42(7):843-847.
 同步回转式制冷压缩机的运动分析. 西安交通大学学报,2008,42(6):565-568.
 内啮合转子压缩机齿间啮合效率研究. 西安交通大学学报,2007,41(9):1040-1043.
 碳/碳复合材料表面聚四氟乙烯复合涂层的摩擦学性能. 西安交通大学学报,2006,40(1):72-74.