

# 轮轴钢 LZ50 的单轴微动疲劳失效机理

刘 兵<sup>1</sup>, 何国球<sup>1</sup>, 蒋小松<sup>1</sup>, 朱旻昊<sup>2</sup>

(1. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 200092; 2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 研究了轮轴钢 LZ50 在单轴微动疲劳条件下的应力-应变滞后回线, 微动区的磨损特征及断口和截面形貌; 分析了磨屑的形成与演变过程及微动疲劳失效机制. 结果表明, LZ50 在单轴微动疲劳过程中消耗的塑性不可逆功少, 微动损伤机制为粘着磨损、磨粒磨损, 并伴有氧化磨损. 磨损过程中基体材料脱落、破碎、氧化形成磨屑, 其中的硬质氧化物颗粒促进了材料表面的磨粒磨损, 加速了疲劳失效过程. 微动疲劳裂纹萌生区的宽度大约为 100  $\mu\text{m}$ , 失效断裂面垂直载荷方向.

**关键词:** 轮轴钢; 微动疲劳机理; 应力-应变滞后回线

**中图分类号:** TG 142.42

**文献标识码:** A

## Uniaxial Fretting Fatigue Properties of LZ50

LIU Bing<sup>1</sup>, HE Guoqi<sup>1</sup>, JIANG Xiaosong<sup>1</sup>, ZHU Minhao<sup>2</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. National Power Traction Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The uniaxial fretting fatigue characteristics of LZ50 axle steel such as stress-strain hysteresis loop, fretting wear, fracture and cross section morphology were investigated. The formation and evolution mechanism of the debris produced in the fretting wear process and the fatigue failure mechanism were analyzed, too. The results indicate that, LZ50, under the condition of uniaxial fretting fatigue loading, has less irreversible plastic power consumption. The fretting fatigue damage mechanisms are adhesive wear and abrasive wear, accompanied with oxidation wear. The fragmentation products wore off from the matrix material surface are oxidized and formed into wear debris, in which the hard particles aggravate the abrasive wear, and accelerate the fretting fatigue failure. The dimension of fretting fatigue crack initiation is about 100  $\mu\text{m}$ , and fracture surface is

perpendicular to the direction of cyclic loading.

**Key words:** axle steel; fretting fatigue mechanism; stress-strain hysteresis loop

微动疲劳(fretting fatigue, FF)是构件由于接触部位同时存在疲劳载荷和微小相对位移幅度的摩擦磨损而加速失效的疲劳破坏过程, 该类失效广泛存在于航空、航天、交通、核能等诸多工业部门中, 常常造成关键部件的提前断裂, 甚至导致严重的事故<sup>[1-9]</sup>. 随着全球经济的快速发展, 迫切要求交通运输不断向高速、重载方向发展. 在众多交通工具中, 高速铁路无疑是最具竞争力和发展潜力的. 铁路科技也将随着高速铁路的引进、消化、吸收和再创新而呈快速跨越式发展. LZ50 材料用于制备列车轮轴等关键部件<sup>[10]</sup>, 在服役过程中与其他部件存在接触压力和微小位移, 从而产生微动疲劳现象. 因此, 对 LZ50 材料的微动疲劳性能研究具有重大的实用价值和社会效益.

## 1 实验

### 1.1 实验方法

微动疲劳试验装置和试件如图 1 所示. 轴向载荷  $P_1$  以正弦波循环加载, 应力幅值为 500 MPa, 频率 5 Hz, 应力比  $R = 0.1$ , 桥的压脚作用在试样上, 接触正压力  $P_2$  用应变仪测定, 恒定为 60 MPa. 微动疲劳试验在 PLN-200 微机控制电液伺服多轴疲劳试验机上进行. 在轴向循环载荷  $P_1$  的作用下, 桥式压脚与拉伸变形试件之间因存在微小的相对位移而产生

收稿日期: 2009-03-17

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2007CB714704); 国家自然科学基金资助项目(50771073); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-05-0388)

作者简介: 刘 兵(1978—), 男, 博士生, 主要研究方向为金属功能材料与材料摩擦学. E-mail: liubng@gmail.com

何国球(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为金属材料疲劳、智能材料、摩擦学材料.

E-mail: gqhe@tongji.edu.cn

微动. 实验过程中测试三组试样, 分别经  $8 \times 10^3$ ,  $4 \times 10^4$  和  $8 \times 10^5$  次循环周期后, 将试件的微动疲劳损伤表面区锯下, 用 HITACHI-S2360N 扫描电子显微镜 (SEM) 观察其微动损伤表面的微观形貌, 以探讨 LZ50 的微动疲劳损伤规律及其断裂机制. 第三组试样经  $8 \times 10^5$  次循环周期后断裂, 用扫描电镜观察断口形貌, 并将其沿轴向切开, 用 LWD200-4C 光学显微镜观察其剖面形貌.

## 1.2 实验材料

实验所用试样和微动桥分别由 LZ50 和 CL60 材料制备, 化学成分如表 1 所示. 将试样做  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$  油淬,  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  回火处理; 将微动桥做  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  油淬,  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  回火处理. 材料热处理后的力学性能如表 2 所示. 试样和微动桥加工处理完成后, 用砂纸在微动试样

和桥的接触区表面进行精细打磨处理, 使其粗糙度达到  $R_a = 0.1\text{ }\mu\text{m}$ . 微动试样和桥在实验前均经除油液除油、丙酮超声波清洗, 冷风吹干.

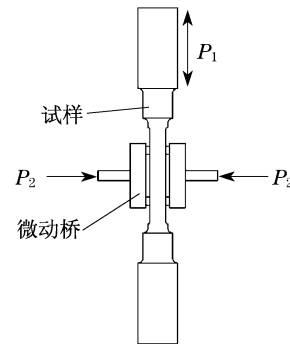


图 1 微动疲劳试样及实验加载示意图

Fig.1 Schematic of fretting fatigue test configuration

表 1 材料的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the material

材料牌号	C	Si	Mn	P	S	Fe
LZ50	0.47—0.57	0.17—0.37	0.60—0.90	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$	Balance
CL60	0.55—0.65	0.17—0.37	0.50—0.80	$\leq 0.035$	$\leq 0.040$	Balance

表 2 材料的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of the material

材料牌号	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	伸长率 $\delta/\%$	断面收缩率 $\psi/\%$
LZ50	750	23	37
CL60	950	10	18

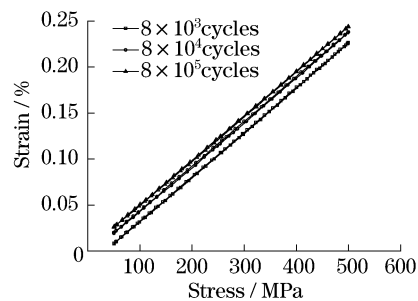


图 2 不同加载循环周次后的应力—应变滞回线

Fig.2 Hysteresis-type stress-strain loops at various number of cycles

## 2 实验结果与分析

### 2.1 材料的应力应变

在交变应力作用下, 疲劳试样的应力-应变曲线产生滞后回线, 这是由于材料在一定程度上发生的塑性变形引起的, 而滞后回线内所包含的面积与试样在一个加载循环中消耗的不可逆的能量成正比<sup>[11]</sup>.

材料在应力幅值为  $500\text{ MPa}$  的拉伸循环应力作用下, 其应力与应变的关系如图 2 所示. 从图中可以看出, 在此应力幅度下, 材料的应力—应变滞回线很窄, 说明材料在单轴微动疲劳加载过程中的塑性应变小, 消耗的不可逆功少, 而弹性功很大. 试样经  $8 \times 10^3$ ,  $4 \times 10^4$  和  $8 \times 10^5$  次循环周期后, 其应变幅值稳定地保持在  $0.25\%$  左右, 也说明了材料没有发生明显的硬化和软化现象.

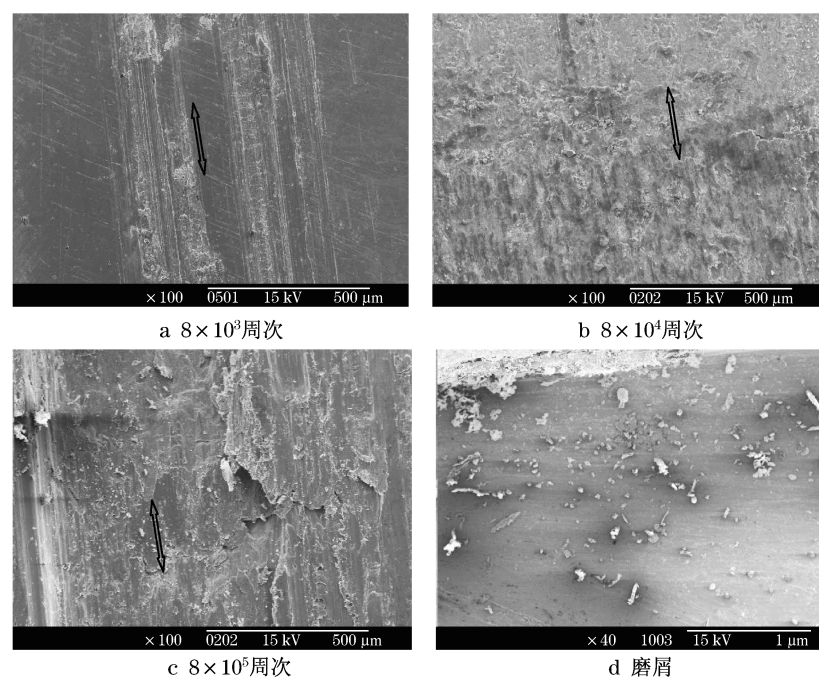
### 3.2 微观形貌分析

微动区的磨损形貌所反映的摩擦损伤特征为微动疲劳机制研究提供了重要依据. 试样经  $8 \times 10^3$ ,  $8 \times 10^4$  和  $8 \times 10^5$  次循环周期后, 在 SEM 下进行观察试样微动区的表面磨损形貌, 如图 3 所示.

从图 3a 中可以看出, 在微动摩擦磨损早期, 摩擦表面出现大量的滑擦、碾压和抹平的痕迹, 材料呈现擦伤的沟槽形貌, 这主要是由微动区表面凸起部位在法向载荷作用下不断接触碰撞以及冷焊作用产生的粘着磨损造成的. 疲劳试样经  $4 \times 10^4$  次疲劳微动循环后, 摩擦表面被大量的磨屑形成的磨屑床覆盖, 如图 3b 所示, 这是因为在磨损初期的一些微凸

体使相对的表面材料产生塑性变形,并把表面材料挤到与运动方向垂直的两侧,形成新的微凸体,这些微凸体随后又被后续的微凸体碾压、涂抹.经过微凸体的反复滑擦,碾压,涂抹,同时由于氧化的作用,材料表面塑性变形层逐渐变硬,变脆,最终会有一部分材料脱离试样的表层而形成磨屑,发生磨粒磨损.同时,这些深度碎化和氧化的磨屑形成磨屑床覆盖在试样表面,分隔微动副,参与微动调节,减少了基体金属间的直接接触,起到缓冲和润滑的作用,Pape<sup>[1]</sup>等通过实验观察发现,在磨屑床形成后,微动磨损表面摩擦力会减小.从图 3c 中可以看到,在微动疲劳

后期,微动试样压装区表面在微动桥的正压力作用下不断发生塑性变形和加工硬化,并导致接近试样表面的材料塑性枯竭,脆性增加.在循环应力和表面摩擦力的共同作用下,试样表面出现开裂,形成微裂纹,随着这个过程的不进行,微裂纹不断产生、扩展,形成大面积的微动裂纹区.当其中一些裂纹继续向深度方向发展时,在循环应力的作用下,将对试件的疲劳寿命产生显著影响.图 3 中所示的 3 个阶段比较完整地反映了磨屑的形成与摩擦表面的演变过程,可以认为,磨屑中的硬质氧化物颗粒促进了合金表面的磨粒磨损,加速了微动疲劳失效过程.



图中箭头方向为微动位移方向

图 3 试样摩擦表面形貌与磨屑形貌

Fig.3 SEM micrographs of fretting surface and debris

在试验过程中,可以观察到褐色的磨屑从微动区排出,其形态如图 3d 所示.磨屑为细碎的颗粒状,直径在  $0.3 \sim 3 \mu\text{m}$  之间.磨屑颜色较暗,这是由于在微动疲劳实验过程中,微动区域连续发生的机械摩擦作用使试样表面温度升高,同时从材料表面剥落的磨屑细小,化学活性高,因此其暴露在空气中很容易发生氧化.

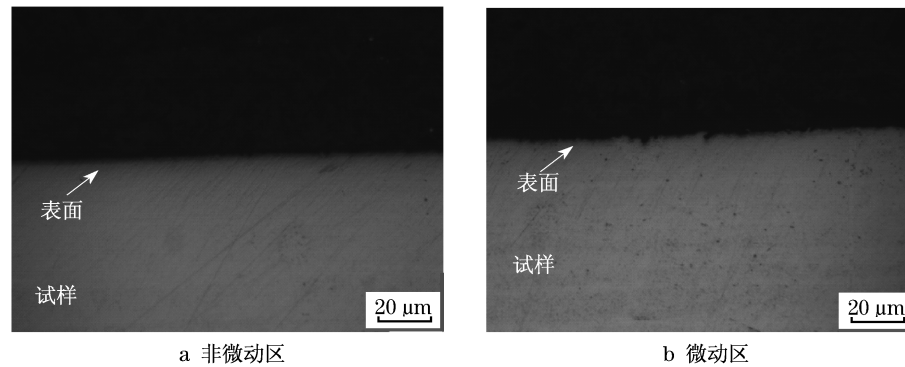
图 4 是断裂试样剖面的光学显微镜照片.从图 4a 可以看出,非微动区的试样表面平滑.而从图 4b 中可以看出,微动区的试样表面粗糙不平,并且可以清楚地看出附着在微动区表面的磨屑层结构及其即将与试样表面分离的情况.说明微动疲劳促使材料

在其表面出现了局部接触疲劳,并造成了疲劳脱层.这种现象使表层材料逐渐剥离、脱落,形成初始磨屑.微动疲劳带来的磨损、接触疲劳及塑性变形破坏了材料表面的完整性,造成了应力集中,从而促进疲劳微裂纹的萌生和扩展.因此,在微动摩擦副作用下,材料的疲劳寿命会大大降低.

图 5 是疲劳断口的 SEM 照片,从图中看出,微动疲劳断口具有一般疲劳断口的显著特征,可分为 4 个区域,即裂纹源区、扩展区、过渡区和瞬间断裂区<sup>[12]</sup>,整个宏观断面与疲劳试件轴向垂直.通过对微动疲劳断口形貌观测发现,裂纹源形成于发生微动疲劳的接触区,由于发生了氧化而颜色较暗,并附

有少量的磨屑. 扩展区有明显韧性断口特征, 在高倍下可见辉纹和更多的次生裂纹. 过渡区内次生裂纹十分明显, 开始有纤维绕线和韧窝. 瞬间断裂区则全是韧窝, 反映出塑性材料的快速断裂特征. 微动疲劳断口与普通疲劳断口的主要区别在裂纹源区, 其位置不一定在应力集中处, 而一定在微动作用处, 颜色

较暗, 并附有一定的褐色氧化物磨屑. 越出源区后, 断口特征与普通疲劳断口相似. 将微动疲劳试样裂纹源区清洗干净后, 在扫描电镜下观测其低倍形貌, 可见微动疲劳断面上裂纹萌生区的宽度大约为  $100\ \mu\text{m}$ , 如图 5b 所示.



图中箭头所示为即将从试样表面脱离的磨屑

图 4 断裂试样剖面形貌

Fig.4 Cross section photos of the specimen

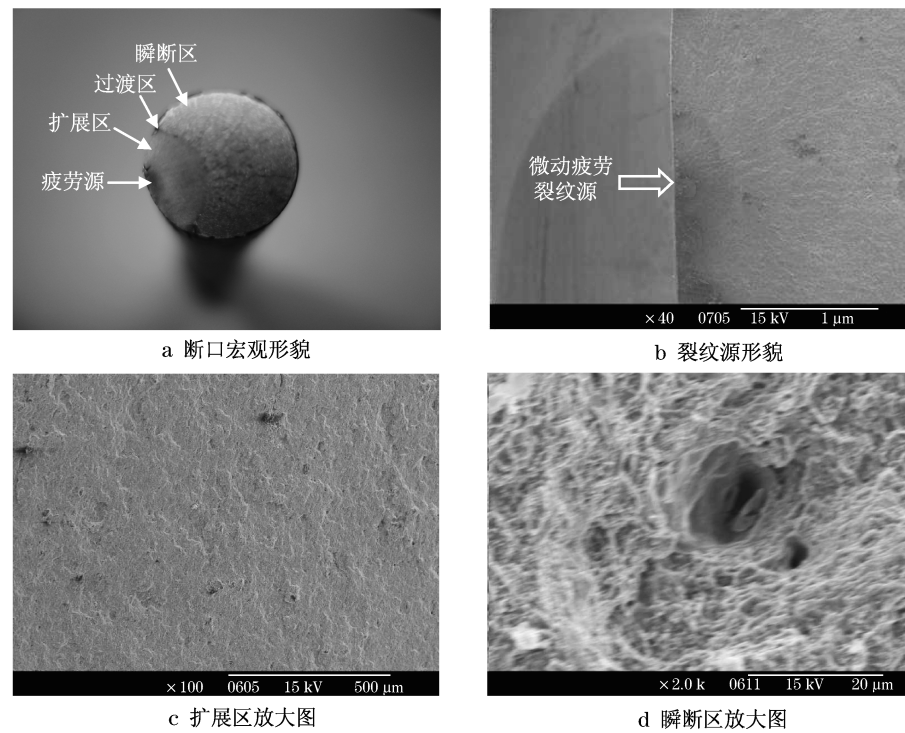


图 5 微动疲劳试样的断口形貌

Fig.5 Fracture characters of the fretting fatigue specimen

### 3 结论

微动摩擦磨损对材料的疲劳特性和裂纹源的产

生及扩展有着重要的影响, 切向摩擦力引起材料表层材料脱落, 并产生磨屑是微动疲劳加速失效的主要原因. 通过对轮轴钢 LZ50 的单轴微动疲劳失效模式的研究, 可以得出以下结论:

(1) LZ50 在应力幅值为  $500\ \text{MPa}$ , 应力比为

$R = 0.1$  的正弦波单轴循环加载条件下,微动疲劳产生的塑性应变小,消耗的不可逆功少。

(2) LZ50 合金微动区的摩擦损伤机制以粘着磨损、磨粒磨损和接触疲劳为主,磨屑中的硬质氧化物颗粒促进了合金表面的磨粒磨损,加速了微动疲劳失效过程。

(3) 材料的微动疲劳失效断裂面垂直载荷加载方向,断口形貌与普通疲劳断口形貌相似。微动疲劳断面上裂纹萌生区的宽度大约为  $100\ \mu\text{m}$ 。

### 参考文献:

- [1] Pape J A, Neu R W. A comparative study of the fretting fatigue behavior of 4340 steel and PH 13 - 8 Mo stainless steel[J]. Tribology International, 2007, 29(12): 2219.
- [2] Madge J J, Leen S B, Shipway P H. A combined wear and crack nucleation-propagation methodology for fretting fatigue prediction [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(9): 1509.
- [3] Nowell D, Hills D A, Dai D N. Energy dissipation and crack initiation in fretting fatigue [J]. Tribology Series, 1994, 27: 389.
- [4] 周仲荣, 罗唯力, 刘家浚. 微动摩擦学的发展现状与趋势[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(3): 270.  
ZHOU Zhongrong, LUO Weili, LIU Jiajun. Recent development in fretting research[J]. Tribology, 1997, 17(3): 270.
- [5] 张栋. 机械失效的痕迹分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.  
ZHANG Dong. Failure trace analysis diagnosis of mechanical press[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992.
- [6] Campbell G S, Lahey R. A survey of serious aircraft accidents involving fatigue fracture[J]. International Journal of Fatigue, 1984, 6(1): 25.
- [7] 刘道新, 何家文. 微动疲劳影响因素及钛合金微动疲劳行为[J]. 航空学报, 2001, 22(5): 454.  
LIU Daoxin, HE Jiawen. Review of factors that influence fretting fatigue (FF) and investigation on FF behavior of Ti-alloy[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2001, 22(5): 454.
- [8] 徐桂珍, 刘家浚, 周仲荣. 表面改性技术在微动摩擦学领域中的应用[J]. 摩擦学学报, 1998, 18(2): 185.  
XU Guizhen, LIU Jiajun, ZHOU Zhongrong. Application of surface modification technology in fretting tribology [J]. Tribology, 1998, 18(2): 185.
- [9] 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.  
LI Shizhuo, DONG Xianglin. Material erosive wear and fretting wear[M]. Beijing: China Machine Press, 1987.
- [10] 中华人民共和国铁道部. TB/T 2945—1999 铁道车辆用 LZ50 钢车轴及钢坯技术条件[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.  
Ministry of Railway of the People's Republic of China. TB/T 2945—1999 Technical conditions for LZ50 steel axles and steel bases for rolling stock[S]. Beijing: China Railway Press, 1999.
- [11] S 戈康达. 金属的疲劳与断裂[M]. 颜鸣皋, 刘才穆译. 上海: 科学技术出版社, 1983.  
S Kocanda. Fatigue and fracture of metal[M]. Translated by YAN Mingnie, LIU Caimu. Shanghai: Scientific and Technical Publishers, 1983.
- [12] Kermanpur A, Sepehri Amin H, Ziaei-Rad S, et al. Failure analysis of Ti6Al4V gas turbine compressor blades [J]. Engineering Failure Analysis, 2008(15): 1052.