

CuMg0.4合金弯曲微动疲劳损伤特性研究

魏超¹, 彭金方^{1,2*}, 刘曦洋², 刘建华², 蔡振兵², 朱旻昊¹

(1. 西南交通大学 材料科学与工程学院, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 在不同参数条件下, 针对吊弦用CuMg0.4合金在自主设计的弯曲微动疲劳装置上进行了微动疲劳试验, 建立了其疲劳寿命S-N曲线, 并结合扫描电镜(SEM)、三维轮廓仪、电子探针(EPMA)等微观分析设备对损伤区域进行了微观分析, 探究了吊弦材料的弯曲微动疲劳损伤特性及演变规律. 结果显示在接触区处于弹性条件下时, 其弯曲微动疲劳S-N曲线呈现倾斜的“Z”型特征, 微动疲劳寿命随弯曲应力的增大呈现先减小后增大的趋势, 微动依次运行于PSR(部分滑移区)、MFR(混合区)、SR(完全滑移区). 接触区主要存在磨粒磨损、氧化磨损、疲劳磨损和黏着磨损四种形式的弯曲微动疲劳损伤; 微动疲劳裂纹的萌生和扩展从以接触应力控制为主逐渐转为主要受弯曲疲劳应力控制, 整个过程分为三个阶段.

关键词: CuMg0.4合金; 弯曲微动疲劳; 微动损伤; 疲劳寿命; 裂纹扩展

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2018)06-0684-08

Bending Fretting Fatigue Damage Characteristics of CuMg0.4 Alloy

WEI Chao¹, PENG Jinfang^{1,2*}, LIU Xiyang², LIU Jianhua², CAI Zhenbing², ZHU Minhao¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China

2. Tribology Research Institute, Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: Under different parameter conditions, the fretting fatigue test was carried out on self-designed bending fretting fatigue device with CuMg0.4 alloy used in hanging strings. The S-N curve was built up, and the damage area was analyzed according to a series of microscopic analysis equipment, such as three-dimensional morphometer, scanning electron microscope (SEM), electron microprobe (EPMA), etc. Then the bending fretting fatigue characteristics and damage related laws of the material were discussed. The results show that when the contact area is under elastic condition. The curve of bending fretting fatigue S-N shows the characteristic of “Z”. With the increase of bending load, the fretting fatigue life of the material decrease and then increases. In turn, it runs in part of the slip regime(PSR), mixed regime (MFR)and complete slip regime(SR). The contact area includes 4 forms damage mechanism, it’s abrasive wear, oxidation wear, fatigue wear and adhesive wear. The fretting fatigue crack propagation can be divided into 3 stages, from contact stress contral to bending fatigue stress contral.

Key words: CuMg0.4 alloy; bending fretting fatigue; fretting damage; fatigue life; crack propagation

弯曲微动疲劳主要指在载荷作用下接触面发生弯曲的同时存在微小相对位移的现象, 这种微动会使

疲劳裂纹提前萌生和加速扩展从而导致部件过早断裂失效, 这种现象广泛存在于桥梁、铁路、航空、机械、

Received 26 May 2018, revised 16 July 2018, accepted 14 August 2018, available online 28 September 2018.

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

The work was supported by the National Natural Science Foundation of China (U1534209, 51305364) and Project of Traction Power State Key Laboratory of China (2016TPL-Z03, 2015TPL_T15).

国家自然科学基金项目(U1534209, 51305364)和牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2016TPL-Z03, 2015TPL_T15)资助。

电力、汽车等领域^[1-5]。据相关调查,到2018年,中国高速铁路总里程已超过2.5万公里, 占全球高铁总量的66.3%, 三千多辆高速列车贯穿在全国各地的大中型城市, 高铁已成为最重要的交通工具^[6]。接触网作为高速列车的动力供给系统, 为保证列车正常运行, 接触网的安全运行十分重要。其中吊弦是接触网系统最重要的组成部分之一, 它的主要作用是控制接触线的高度, 确保弓网关系的安全性和良好的受流质量, 同时也是高速列车整个接触网的“支架”, 是接触线和轴承电缆振动和力的传递者^[7]。当受电弓高速通过吊弦正下方时, 在钳压管和吊弦接触的部位会发生弯曲微动疲劳损伤, 如此反复将导致吊弦提前断裂失效^[8-14]。近年来, 高速铁路接触网在服役过程中各处出现整体吊弦断股、折断等现象, 导致列车停运, 对人民生命财产安全造成了严重影响^[15-16]。CuMg0.4牌号的铜合金材

料是目前中国高速铁路接触网吊弦主要使用材料之一, 其弯曲微动疲劳损伤机制及其对吊弦寿命影响至今尚未见相关研究报道, 因此本文作者针对CuMg0.4合金材料展开弯曲微动疲劳试验, 探究其弯曲微动疲劳损伤特性, 为吊弦的寿命预测起到一定的参考作用。

1 试验部分

1.1 试验材料及试样

试验材料选用目前吊弦常用材料CuMg0.4合金($\sigma_{0.2}=263$ MPa, $\sigma_b=273$ MPa), 微动垫材料选用目前钳压管常用材料T₂铜($\sigma_{0.2}=260$ MPa, $\sigma_b=273$ MPa), 它们的化学成分如表1~2所示。选用CuMg0.4和T₂铜作为摩擦副的主要目的是模拟吊弦和钳压管这对过盈配合接触副。微动垫的尺寸为 $\Phi 40$ mm \times 42 mm, 试验材料的尺寸如图1所示。

表 1 CuMg0.4合金的化学成分含量表
Table 1 Chemical composition of CuMg0.4

Material	w(Cu)/%	w(P)/%	w(Mg)/%	w(Fe)/%Fe	w(Sn)/%	Sum of impurities
CuMg0.4	allowance	0.001~0.02	0.4	≤0.10	≤0.20	≤0.3

表 2 T₂铜的化学成分含量表
Table 2 Chemical composition of T₂Cu

Material	w(Cu+Ag)/%	w(Bi)/%	w(Sb)/%	w(As)/%	w(Fe)/%	w(Pb)/%	w(S)/%
T ₂ Cu	≤99.90	≤0.001	≤0.002	≤0.002	≤0.005	≤0.005	≤0.002

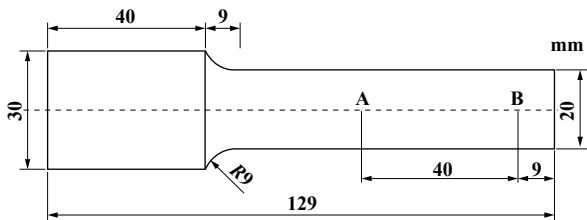


Fig. 1 Size of specimen
图 1 试样尺寸

1.2 试验方法

试验结合自主设计的弯曲微动疲劳装置在疲劳试验机上进行, 试验装置如图2所示。试验过程中, 试样左端完全固定, 试样和微动垫垂直接触于图1中的A点处, 形成点接触(称该区域为接触区)。并通过螺栓在此处施加法向载荷, 法向载荷设定为 $F=100$ N(接触应力 $\sigma=169$ MPa), 同时在B点施加弯曲疲劳载荷(载荷以正弦波的方式施加, 其应力比 $R=0.1$, 频率 $f=20$ Hz), 试验的最大循环次数设定为 $N=1\times 10^6$ 次(即当试验运行到预先设定的最大循环次数时, 不管试样是否断裂, 试验都将停止)。弯曲疲劳载荷通过有限元计算得

到其对应的最大弯曲应力, 列于表3中。试验完成后, 采用三维轮廓仪、SEM、EDS和EPMA对接触区进行微观形貌分析和成分分析。

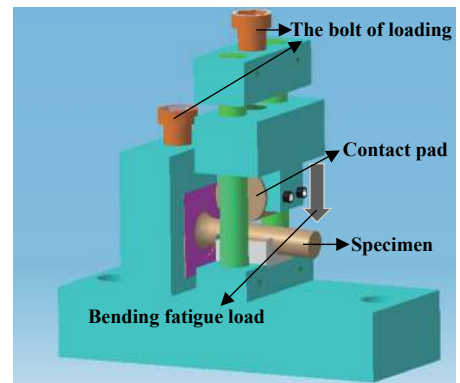


Fig. 2 Schematic diagram of bending fatigue fixture
图 2 弯曲微动疲劳夹具示意图

表 3 弯曲载荷与弯曲应力对应表

Table 3 Test cyclic bending load and bending stresses

F/kN	5.00	5.50	6.00	6.25	6.50	6.75	7.00	7.25	7.50	8.00
$\sigma_{a, max}/MPa$	68.8	77.9	91.6	116.6	139.9	163.3	186.6	210	233.3	280

2 结果与讨论

2.1 弯曲微动疲劳S-N曲线

图3是CuMg0.4合金材料弯曲微动疲劳和常规弯曲疲劳的S-N曲线. 从图中可以看到, 在常规弯曲疲劳试验中(法向载荷 $F=0$ N), 试样在弯曲应力为186.6 MPa的作用下, 试样经过设置的最大循环次数运行后仍未断裂; 而在弯曲微动疲劳试验中, 试样在弯曲应力为93.4 MPa作用下, 经 $N=7.2\times 10^5$ 次左右运行后断裂, 该材料的弯曲疲劳极限(其疲劳极限的条件寿命为 1×10^6 周次)大约为70.2 MPa, 由此可知由于微动的作用, 大大降低了该材料的弯曲疲劳极限. 在试验过程中, 试样由于接触应力和弯曲应力同时作用于试样, 使得接触区出现应力集中现象, 同时微动垫与接触区之间出现微小相对位移, 从而导致接触区产生了微动损伤, 引起裂纹提前萌生和加速扩展, 从而造成试样的提前断裂.

在弯曲微动疲劳试验中, 材料的弯曲微动疲劳寿命随弯曲疲劳应力的增加呈现出非单调变化规律, 其弯曲微动疲劳S-N曲线呈倾斜的“Z”型曲线特征, 西南交通大学Peng等^[17-20]针对7075铝合金、316L奥氏体不锈钢等几种典型金属材料的弯曲微动疲劳试验也都发现了类似的现象. 在弯曲应力作用下, 该材料的弯曲微动随应力的增加依次运行于弯曲应力较小的部分滑移区(PSR)、损伤最严重的混合区(MFR)和弯曲应力较大的完全滑移区(SR)^[21]. 当微动运行于部分滑移区时, 由于弯曲应力较小, 接触区的相对位移很小, 存在轻微磨损, 使得疲劳裂纹不易萌生且扩展缓慢, 弯曲微动疲劳寿命较高; 随着弯曲应力的增大, 接触区

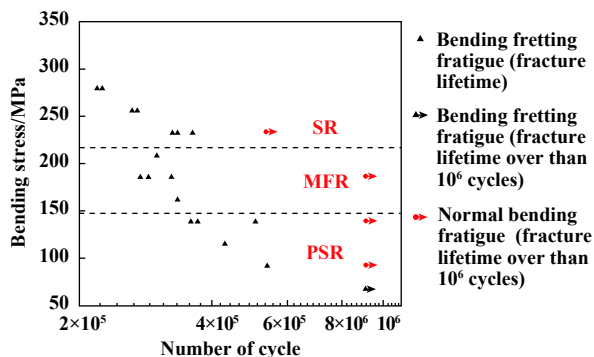


Fig. 3 Bending fretting fatigue S-N curve of CuMg0.4 alloy
图3 CuMg0.4合金的弯曲微动疲劳S-N曲线

相对位移幅值增大, 存在严重磨损, 使得疲劳裂纹提前萌生且加速扩展, 从而造成试样的寿命偏低; 当弯曲应力继续增大, 接触区表面发生更大的相对位移, 材料发生更加严重的磨损和剥落, 磨屑在一定范围内反而抑制了其裂纹的萌生和扩展, 所以试样的寿命会有一定的上升趋势, 使得该弯曲微动疲劳寿命曲线出现了一个寿命凹区, 即该弯曲微动疲劳寿命曲线并不是呈现单调的变化规律, 而是呈现随弯曲应力的增大先减小后增大的“Z”型特征.

2.2 混合区损伤分析

从图3可以看出混合区(MFR)是试样弯曲微动疲劳寿命相对最短的区域, 本文中选用弯曲应力为186.6 MPa分别运行 $N=5\times 10^4$ 、 $N=1\times 10^5$ 、 $N=2\times 10^5$ 次后的试样, 利用微观分析设备对其接触区域进行微观损伤分析, 图4是其接触损伤区域的SEM形貌和白光干涉三维形貌(注: 本文中所有形貌图左端为固定端, 右端为加载

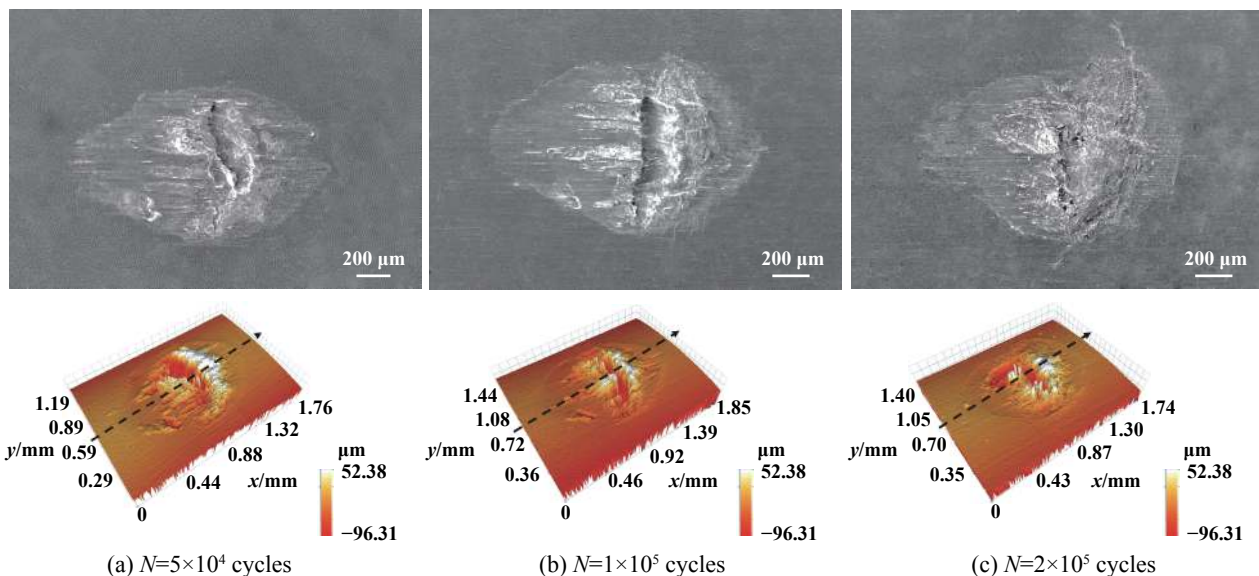


Fig. 4 Damage micrographs on contact area under different cycles

图4 不同循环次数下接触区域的损伤形貌

端). 从图4的(a、b和c)可看出损伤区均呈现非对称椭圆状形貌特征, 靠近加载端损伤带更宽, 随着循环次数的增加, 靠近加载端的损伤带明显增宽, 但固定端变化不明显. 由于CuMg0.4这种材料硬度较低(显微硬度为HV95)且配合接触副均为铜合金, 其接触区左右两端通过图5均可观察到明显的犁沟现象和切削痕迹, 且剥层现象很明显, 在靠近加载端一侧形成了一道沿周向的浅沟, 且结合SEM形貌和三维轮廓图可以看出, 在浅沟右侧堆积了大量磨屑. 试样循环 5×10^4 和 1×10^5 次后在其表面均未发现裂纹, 但随着试验的继续进行, 循环到 2×10^5 次时, 在其表面靠近加载端一侧发现了一条贯穿损伤带的微裂纹, 如图6所示. 通过其

放大图可见其裂纹在表面靠近加载端一侧从中心以树枝状向周向两侧扩展, 导致其断口面凹凸不平, 如图12(a)所示. 为进一步探究接触区损伤形貌特征, 沿图4中箭头所指方向测得其二维形貌如图7所示, 可以看出随循环次数的增加, 磨痕深度逐渐变大, 其右端堆积的磨屑也越来越多.

为进一步探究弯曲微动疲劳损伤机制, 利用EDS分别对接触区靠近加载端、中心区域、靠近固定端进行元素定性分析, 结果如图8所示. 可以发现在接触区靠近加载端、中心区域和靠固定端, 均可发现存在氧化现象, 且靠加载端氧含量相对较高, 说明氧化磨损更为严重. 为了从定量角度揭示接触区域氧化磨

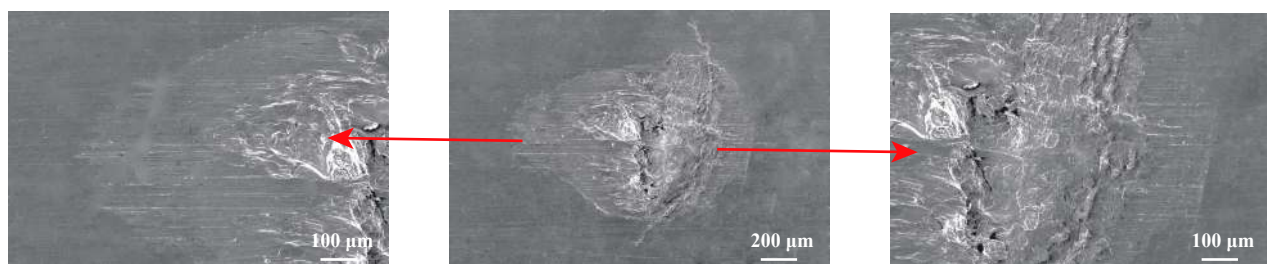


Fig. 5 SEM micrographs of fixed end and loading end
图 5 固定端和加载端形貌的SEM照片

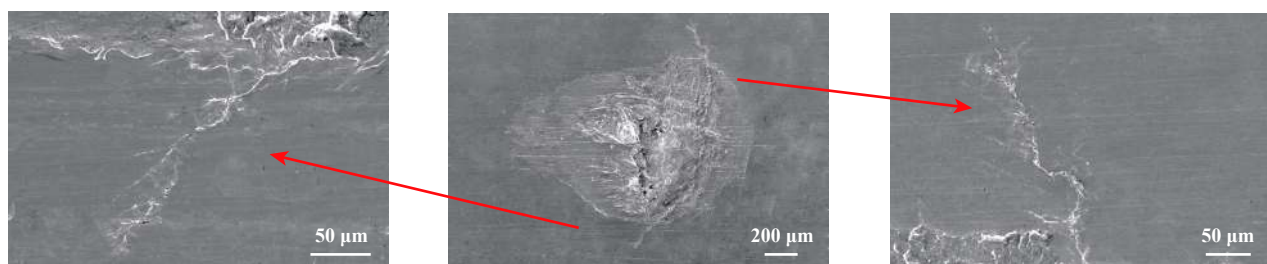


Fig. 6 The micrographs of surface crack
图 6 表面裂纹的放大形貌

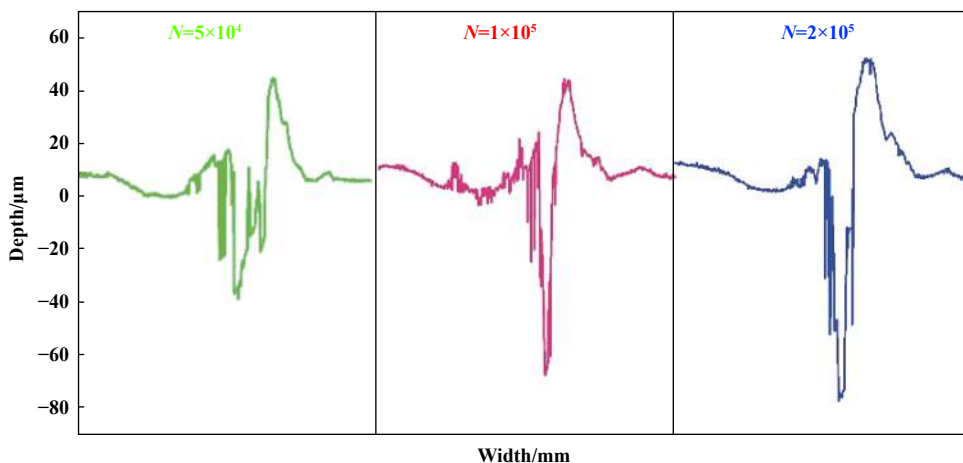


Fig. 7 2D contour of the contact area
图 7 接触区域的二维轮廓

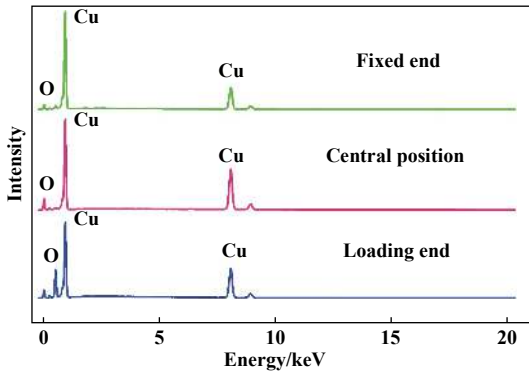


Fig. 8 EDS analysis result of the contact area
图8 接触区域的EDS分析

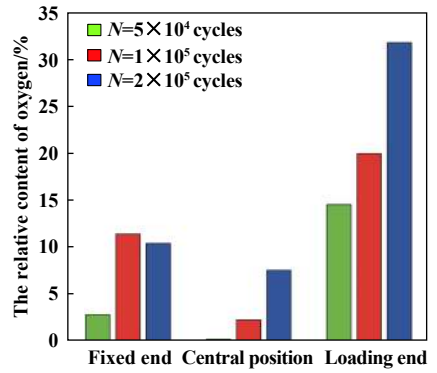
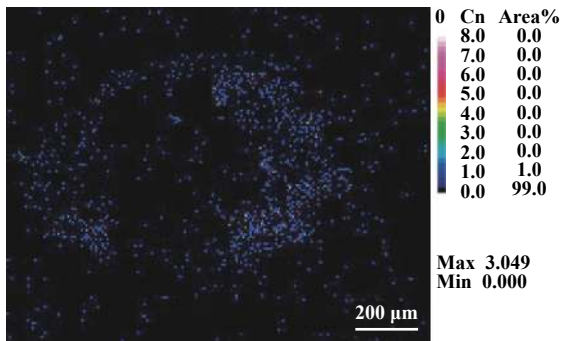


Fig. 9 The oxygen relative content of EPMA analysis result under different cycles in contact area
图9 不同循环次数下接触区域氧相对含量的EPMA点扫描结果

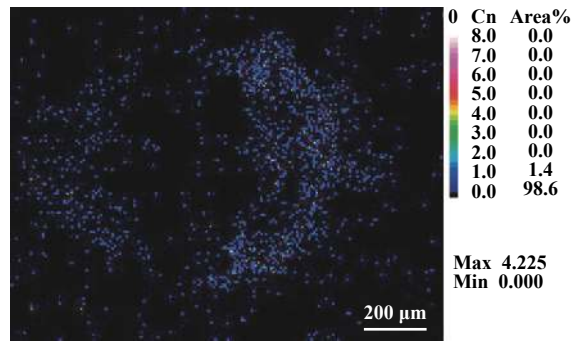
损的程度,利用EPMA对损伤区不同位置进行氧元素的点扫描分析,结果如图9所示.可以发现靠加载端位置比中心区域和靠固定端发生了更加严重的氧化磨损,而且随循环次数的增加,氧化磨损程度呈增加趋势.为了更加全面地研究接触区氧化磨损程度的分布情况,进一步对接触区进行了氧元素的面扫描分析,结果如图10所示.从图10中可直观地观察到:随着循环次数的增加,氧化磨损的程度越大.氧化磨损的分布主要在靠近加载端,而中心区域和靠近固定端氧化磨损轻微,这与EDS分析结果和EPMA点扫描结果吻合,说明在进行弯曲微动疲劳试验时,靠近加载端一

侧相对位移幅值较大,氧化磨损严重;靠固定端和中心区域相对位移幅值较小,氧化磨损轻微.

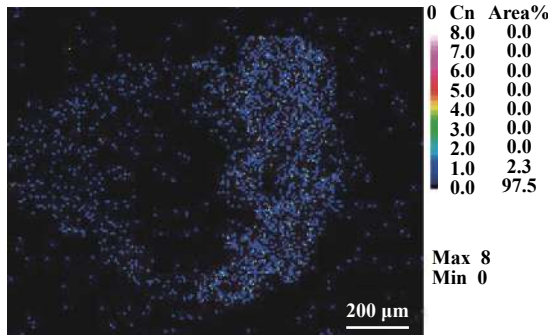
为了研究该材料弯曲微动疲劳混合区裂纹萌生和扩展机制,采用电火花线切割将循环了 3×10^5 次的微动疲劳试样沿轴向经接触区中心切开,并磨制抛光后结合SEM进行剖面分析,如图11所示.从图11(a)中可观察到试样经过 3×10^5 次循环作用后,在剖面形成了长度超过 $100 \mu\text{m}$ 的微观裂纹,将图中I位置放大,如图11(b)所示.可观察到在II位置形成孔洞,延伸出



(a) $N=5 \times 10^4$ cycles

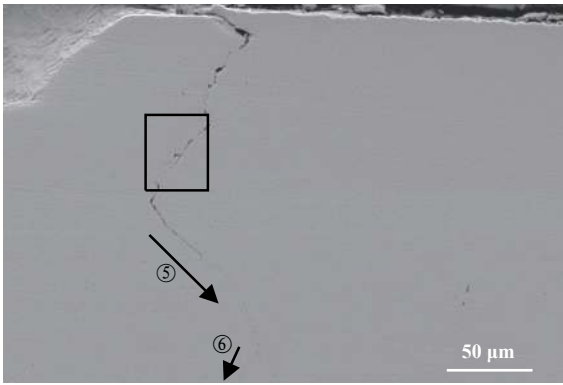


(b) $N=1 \times 10^5$ cycles

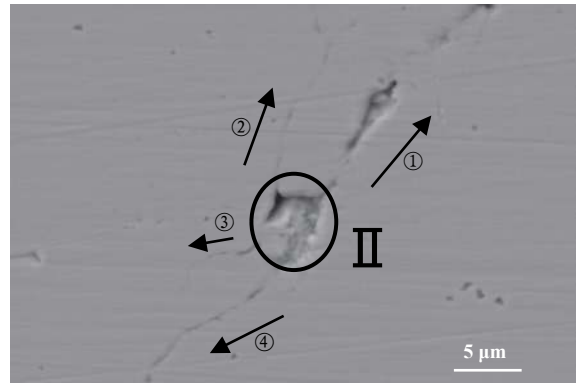


(c) $N=2 \times 10^5$ cycles

Fig. 10 The oxygen distribution result of EPMA under different cycles in contact area
图10 不同循环次数下接触区域氧元素EPMA面扫描结果



(a) $N=3 \times 10^5$ cycles



(b) Enlarged drawing of I in fig.10(a)

Fig. 11 SEM micrographs of the crack cross-section in contact area

图 11 接触区域剖面裂纹形貌的SEM照片

两条细小的裂纹,并结合其应力集中深度判断此处为弯曲微动疲劳裂纹萌生的位置,此位置距离表面大约 $60 \sim 70 \mu\text{m}$ ^[22].结合以上分析,弯曲微动疲劳裂纹萌生和扩展可分为三个阶段:(1)在裂纹萌生初期,接触应力起主导作用,微观裂纹在II位置处萌生,接着主裂纹从II位置沿着图11中①、④箭头方向扩展,同时萌生的次裂纹沿②、③箭头方向扩展,主裂纹在靠近表面几个微米的地方与表面剥落沟通,形成转角.(2)随着裂纹扩展深度的不断增加,微观裂纹转为受接触应力和弯曲疲劳应力共同作用,主裂纹转为沿⑤箭头方向继续扩展.(3)当微观裂纹继续扩展到超过接触应力影响深度时,微观裂纹完全受弯曲疲劳应力控制,在弯曲应力的作用下,微观裂纹扩展方向转为沿⑥处箭头所指方向垂直于表面继续向下扩展,直至试样最后断裂.

2.3 弯曲微动疲劳断口分析

基于以上从剖面角度分析了弯曲微动疲劳裂纹的萌生和扩展特性,现在从微动疲劳断口角度进一步研究裂纹萌生和扩展机制,疲劳断口形貌如图12所示.

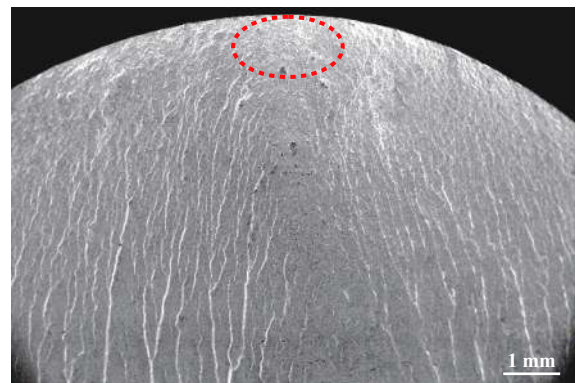
从图12可直观地观察到疲劳断口中可见放射状纹路,指向裂纹扩展方向.常规疲劳由于其仅受弯曲疲劳应力的作用,裂纹萌生于表面,断口较为平整;而弯曲微动疲劳试验中,弯曲疲劳应力和接触应力同时作用于试样,使得裂纹并没有萌生于表面,断口呈现凹凸不平状,即其裂纹扩展路径并不是一直沿着垂直于表面方向扩展.将图12(a)进行放大,如图13所示,可以观察到在浅表层发生了明显的塑性变形,其裂纹萌生于距离表面 $70 \mu\text{m}$ 左右深度处,和剖面分析结果吻合.随着裂纹的扩展深度不断增大,在应力比 $R=0.1$ 的弯曲应力的作用下,试样沿主裂纹扩展方向反复张合,直至其断裂,在其扩展区可以观察到明显的疲劳辉纹,如图14中所示.

3 结论

a. 在相同法向载荷 $F=100 \text{ N}$ (接触应力 $\sigma=169 \text{ MPa}$)下,由一系列吊弦用CuMg0.4合金弯曲微动疲劳试验建立的S-N曲线呈现出倾斜的“Z”型特征.



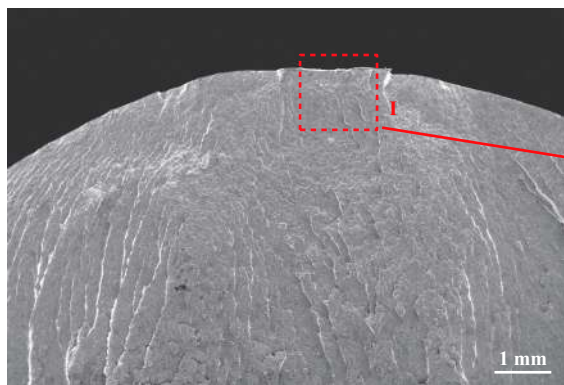
(a) Bending fretting fatigue fracture



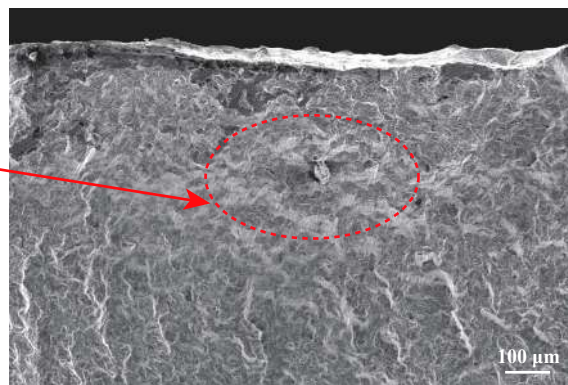
(b) Enlarged drawing of I in fig.13(a)

Fig. 12 The SEM micrographs of fatigue fracture

图 12 疲劳断口形貌的SEM照片



(a) Bending fretting fatigue fracture



(b) Enlarged drawing of I in fig.13(a)

Fig. 13 The micrographs of fretting fatigue fracture crack source region

图13 微动疲劳断口裂纹源区形貌的SEM照片

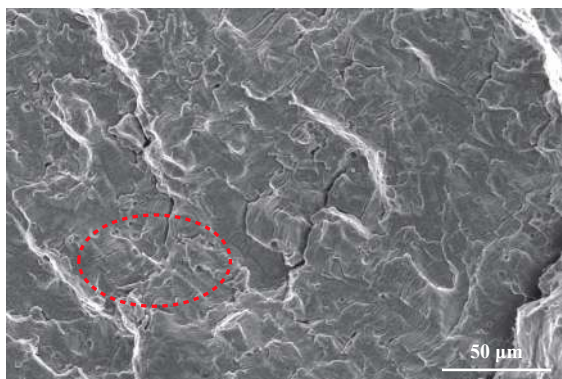


Fig. 14 The micrographs of fatigue fracture propagation region

图14 疲劳断口裂纹扩展区形貌的SEM照片

b. 弯曲微动疲劳混合区试样的接触损伤区经微观形貌分析和成分分析发现其主要存在氧化磨损、磨粒磨损、疲劳磨损和黏着磨损四种损伤机制，且加载端磨损相对较严重。

c. 分析结果表明弯曲微动疲劳裂纹的扩展主要分为三个阶段：①裂纹萌生于靠近加载端应力集中的次表面处，然后同时向表面和内部扩展；②随着裂纹扩展深度的增大转为由接触应力和弯曲应力共同控制，扩展角度逐渐朝垂直于材料表面转变；③当扩展深度超过接触应力影响区时，则转为完全受弯曲应力控制，裂纹以垂直于材料表面的方向扩展至试样断裂。

参考文献

[1] Zhou Zhongrong, Zhu Minghao. Dual-fretting wear[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004: 13-28(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: 13-28].

[2] Zhou Zhongrong. Research on fretting wear and fretting fatigue[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2000, 11(10): 1146-1150

(in Chinese) [周仲荣. 关于微动磨损与微动疲劳的研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(10): 1146-1150]. doi: 10.3321/j.issn:1004-132X.2000.10.022.

- [3] Zhou Zhongrong, Vincent L. Fretting wear[M]. Beijing: Science Press, 2002: 124-140(in Chinese) [周仲荣, Leo Vincent. 微动磨损[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 124-140].
- [4] S Foletti, S Beretta, G Gurer. Defect acceptability under full-scale fretting fatigue tests for railway axles[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 86: 34-43. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.08.023.
- [5] Shi Wei. Research on fretting fatigue life of dovetail joint in aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012(in Chinese) [石炜. 航空发动机榫连接结构微动疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012].
- [6] Zhao Yong, Tian Siming. Data statistics of China railway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(5): 641-642 (in Chinese) [赵勇, 田四明. 中国铁路隧道数据统计[J]. 隧道建设, 2017, 37(5): 641-642].
- [7] Wang Wenbo. Equipment and operational analysis of railway contact network[J]. Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 69-69 (in Chinese) [王文博. 铁路接触网的设备以及运行分析[J]. 南方农机, 2018, 49(2): 69-69]. doi: 10.3969/j.issn.1672-3872.2018.02.059.
- [8] Zhao Nan. The initial oxidation mechanism of Cu-Mg alloy[D]. Jilin: Jilin University, 2010(in Chinese) [赵南. 铜镁合金初期氧化机理的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2010].
- [9] Zhou Hao, Xiao Lairong, Zhao Xiaojun, et al. Influences of trace rare earth on microstructure and properties of Cu-0.4wt%Mg alloy[J]. Hot Working Technology, 2016(10): 54-57 (in Chinese) [周皓, 肖来荣, 赵小军, 等. 微量稀土对Cu-0.4wt%Mg合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016(10): 54-57].
- [10] Cai Feifei, Liu Xinkuan, Liu Ping, et al. Numerical simulation analysis of microstructure evolution in the continuous extrusion for CuMg0.3 Cu-Mg alloy[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(3): 141-146 (in Chinese) [蔡飞飞, 刘新宽, 刘平, 等. 铜镁合金CuMg0.3棒料连续挤压微观组织演变数值模拟分析[J]. 锻压技术,

- 2015, 40(3): 141–146].
- [11] Guo Meihua. Research on friction and wear property of copper alloy conducting wire under electric current[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2007(in Chinese) [郭美华. 铜合金线材载流摩擦磨损性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007].
- [12] Guo Meihua, Ding Yutian. Research on the dry sliding friction and wear behaviour of copper alloy wire[J]. Foundry Technology, 2008, 29(4): 512–515 (in Chinese) [郭美华, 丁雨田. 铜合金线材干滑动摩擦磨损行为研究[J]. 铸造技术, 2008, 29(4): 512–515].
- [13] Wang Wei. Fatigue characteristics analysis of catenary droppers in high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014(in Chinese) [王伟. 高铁接触网吊弦疲劳特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014].
- [14] Yang Guangying, Zhang Haibo, Xu Chao. Study on the repeated bending test method of copper and copper alloy contact wire in electrified railway[J]. Railway Quality Control, 2008, 36(12): 16–18 (in Chinese) [杨广英, 张海波, 徐超. 电气化铁道用铜及铜合金接触线反复弯曲试验方法的研究[J]. 铁道技术监督, 2008, 36(12): 16–18]. doi: 10.3969/j.issn.1006-9178.2008.12.007.
- [15] Li Kexin. Study on low cycle fatigue properties of copper alloy contact wire[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2011(in Chinese) [李克欣. 铜合金接触线低周疲劳性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2011].
- [16] Yang Guangying. The analysis and improvement of the overall suspension of the high-speed railway catenary[J]. Railway Quality Control, 2016, 44(9): 21–23 (in Chinese) [杨广英. 高速铁路接触网整体吊弦断裂分析及改进效果验证[J]. 铁道技术监督, 2016, 44(9): 21–23]. doi: 10.3969/j.issn.1006-9178.2016.09.008.
- [17] Peng J F, Song C, Shen M X, et al. An experimental study on bending fretting fatigue characteristics of 316L austenitic stainless steel[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1417–1426. doi: 10.1016/j.triboint.2010.11.013.
- [18] Peng J F, Liu J H, Cai Z B, et al. Study on bending fretting fatigue damages of 7075 aluminum alloy[J]. Tribology International, 2013, 59: 38–46. doi: 10.1016/j.triboint.2012.06.016.
- [19] Peng Jinfang. Experimental study of several metal materials on bending fretting fatigue[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012(in Chinese) [彭金方. 几种金属材料弯曲微动疲劳试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012].
- [20] Zhang Jun, Peng Jinfang, Xu Zhibiao, et al. Torsional fretting fatigue damages of 7075 aluminum alloy[J]. Tribology, 2017, 37(6): 854–862 (in Chinese) [张俊, 彭金方, 徐志彪, 等. 7075铝合金扭转微动疲劳行为研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(6): 854–862]. doi: 10.16078/j.tribology.2017.06.018.
- [21] Zhou Z R, Fayeulle S, Vincent L. Cracking behaviour of various aluminium alloys during fretting wear[J]. Wear, 1992, 155(2): 317–330. doi: 10.1016/0043-1648(92)90091-L.
- [22] Zhang Yuanbin, Lu Liantao, Zhang Jiawang, et al. Analysis of fretting fatigue crack initiation location in press-fitted shaft[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(10): 90–96 (in Chinese) [张远彬, 鲁连涛, 张继旺, 等. 压装轴微动疲劳主裂纹萌生位置的分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(10): 90–96].