

摩擦学学报

TRIBOLOGY



不同含氧量环境下紫铜/黄铜电接触微动磨损性能研究

何莉萍, 彭金方, 蔡振兵, 朱旻昊

Electrical Contact Fretting Wear Behavior of Copper/Brass under Different Oxygen Content

HE Liping, PENG Jinfang, CAI Zhenbing, ZHU Minhao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021141>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

690合金传热管在不同摩擦副条件下的微动磨损性能研究

Effect of Mating Material on Fretting Wear Behavior of 690 Alloy

摩擦学学报. 2020, 40(3): 314 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2019199>

位移幅值对铜镁合金微动磨损行为的影响

Effect of Displacement Amplitude on Fretting Wear Behavior of Copper – Magnesium Alloy

摩擦学学报. 2021, 41(1): 125 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020064>

载荷及位移幅值对DLC薄膜微动磨损行为的影响

Effects of Load and Displacement Amplitude on Fretting Wear Behavior of DLC Film

摩擦学学报. 2021, 41(2): 213 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020090>

碳纤维切向微动磨损特性研究

Fretting Wear Damage Characteristics of Carbon Fiber

摩擦学学报. 2019, 39(3): 330 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018168>

考虑微动磨损的钢丝微动疲劳裂纹扩展寿命预测研究

Prediction of Fretting Fatigue Crack Propagation Life of Steel Wire Considering Fretting Wear

摩擦学学报. 2021, 41(5): 710 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021157>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16078/j.tribology.2021141

不同含氧量环境下紫铜/黄铜电接触 微动磨损性能研究

何莉萍¹, 彭金方², 蔡振兵^{1*}, 朱旻昊¹

(1. 西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室 摩擦学研究所, 四川 成都 610031;

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: 电连接器常因接触界面磨损发生严重失效, 因此有必要研究电接触模式下的微动磨损行为。本文中基于电接触模式和不同环境含氧量(即氧气体积分数分别为10%、20%和30%, 后文统一称作10%O₂、20%O₂和30%O₂环境), 着重研究含氧量对紫铜/黄铜微动磨损行为与磨损机制的影响。研究发现: 10%O₂、20%O₂和30%O₂环境时所对应的摩擦系数稳定值分别为0.77、0.71和0.80, 摩擦耗散能和磨损体积的结果变化趋势一致, 即10%O₂环境下最高, 20%O₂最低, 30%O₂介于两者之间, 可以推测, 含氧量最低条件时的损伤比含氧量高时更严重。通过电接触寿命可以看出, 20%O₂环境中电接触性能最优, 10%O₂次之, 30%O₂最差, 不同含氧量时的微动磨损区均发生不同程度的氧化, 理论上含氧量越高氧化现象越严重, 但10%O₂时的抗微动磨损性能最差, 30%O₂时的电接触性能最差, 而类大气含氧量的20%O₂环境时的电接触性能和抗磨损性能最佳。结果表明: 电接触性能与环境含氧量存非线性依赖关系, 30%O₂的环境中氧化最严重, 微观形貌为尺寸粗大和团聚状的氧化颗粒, 导致其接触电阻高于其余两种含氧量时; 而在10%O₂环境中, 因微动产生的磨屑多, 新鲜的磨屑松散覆盖在磨痕区域, 极易与氧气发生氧化反应, 使其接触电阻高于20%O₂环境, 但是低于30%O₂时, 说明环境中含氧量和微动产生的磨屑协同主导铜电接触性能与磨损行为, 结合白光干涉、扫描电镜和电子探针等微观分析结果发现, 在不同含氧量环境下的铜磨损机制主要表现为氧化、材料转移和剥落。

关键词: 电接触模式; 接触电阻; 微动磨损; 接触失效; 含氧浓度

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2022)04-0680-10

Electrical Contact Fretting Wear Behavior of Copper/Brass under Different Oxygen Content

HE Liping¹, PENG Jinfang², CAI Zhenbing^{1*}, ZHU Minhao¹

(1. Tribology Research Institute, Ministry of Education Key Laboratory of advanced materials technology, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China

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

Abstract: The contact interface of electrical connector often occurs serious failures due to wear, so it is necessary to study the fretting wear behavior in electrical contact mode. Based on the difference of ambient oxygen concentration (10%, 20%, 30%) in electrical contact mode, this paper focused on the effect of oxygen concentration on fretting wear behavior and wear mechanism of copper/brass. It indicated that the stable values of friction coefficient corresponding to

Received 3 July 2021, revised 15 September 2021, accepted 16 September 2021, available online 19 October 2021.

*Corresponding author. E-mail: czb-jiaoda@126.com, Tel: +86-15828457775.

This project was supported by the Science and Technology Project of Sichuan Province (2022JDJQ0019).

四川省科技计划项目支持(2022JDJQ0019)资助.

oxygen content of 10%O₂, 20%O₂ and 30%O₂ in the environment were 0.77, 0.71 and 0.80, respectively. The result of friction dissipation energy was consistent with that of wear volume, i.e. the highest in 10%O₂ environment, the second in 30%O₂ environment, the lowest in 20%O₂ environment. It can be inferred that the damage under the condition of lowest oxygen content was more serious than that under the condition of high oxygen content. It can be seen from the electrical contact life that the electrical contact performance was the best with 20%O₂, the second with 10%O₂ and the worst with 30%O₂. The fretting wear zone was oxidized in varying degrees under different oxygen concentrations, theoretically, the more sufficient the oxygen content, the more serious the oxidation. Among them, the fretting wear resistance was the worst in 10%O₂ environment and the electrical contact performance was the worst in 30%O₂ environment; while the electrical contact performance and wear resistance were the best 20%O₂ environment. The results showed that there was a nonlinear dependence between the electrical contact performance and the oxygen concentration in the atmosphere. The oxidation wear was the most serious at 30% oxygen concentration, the microstructure was coarse and agglomerated oxide particles which resulted in the higher contact resistance than the other two oxygen concentrations. However, more debris induced by fretting wear was easy to be oxidized at lower concentration with 10%, so the contact resistance was higher than oxygen concentration with 20% and less than oxygen concentration with 30%, the fresh wear debris was loosely covered in the wear scar indicating that the oxygen content and wear debris dominated jointly the electrical contact performance and wear behavior of copper. Combined with the results of white-light interferometry, scanning electron microscope and electron probe microanalysis, it was found that the wear mechanisms under different oxygen concentrations were mainly oxidation, material transfer and delamination.

Key words: electrical contact model; contact resistance; fretting wear; contact failure; oxygen atmosphere concentration

电接触是电气工程、电工技术和电信设备最重要的组成部分,为高效率能量输出提供了保证^[1].电连接器由于受到外界环境和工作条件的影响,容易引起触点微动磨损、微动腐蚀和微动疲劳现象,导致电接触性能逐渐退化甚至功能失效^[2],当下电接触部件的磨损问题已成为电接触材料可靠性、稳定性、精确性和使用寿命的瓶颈^[3].

触头材料接触电阻是电连接器工作性能的诸多技术参数之一,接触电阻主要包含两部分,一是由于电流经过接触表面路径变窄发生收缩而产生的收缩电阻,二是接触面上膜层本身的膜电阻.铜具有良好的导电性和导热性,价格比银低廉且资源丰富,使铜基材料成为银基电接触材料的理想替代材料.但是铜及铜合金电接触材料在使用过程中易形成电导率很低的氧化膜,增大触头的接触电阻,试验结果证明,电接触失效是由于接触区产生致密的氧化层引起的^[4],限制其在低压电器触头材料中的应用.应用环境的复杂性与特殊性使电接触磨损问题具有强烈的系统依赖性、不可移植性和过程时变特征,由此导致的磨损失效机理也迥然不同.影响触点材料微动磨损特性的因素主要包括微动幅值、微动频率、正压力、温度、湿度和环境气氛等^[5].国内外学者在影响铜基材料接触电阻寿命和稳定性的基础因素如位移幅值、载荷、频率和电流等^[6-9],环境因素如相对湿度和温度等^[6-7,10]以及表面粗糙度和氧化处理^[11-12]等方面取得了较为一致的研究成果.而在密封电连接器中,工作环境气氛可

能通过两方面共同影响触头材料接触电阻.工作气氛对磨损程度的影响,主要表现为磨屑的堆积或者磨屑坑的产生,从而引起表面粗糙度的变化,使其闭合时接触点减少、接触面积缩小,导致收缩电阻增大.其次是气氛可能通过化学反应在触头材料上生成表面膜,从而影响接触电阻^[13-15]. Song等^[16]的研究结果表明,氧化膜的生长与氧化分压大致呈线性规律. Toshihiro等^[17]对Ag基触头在混有微量苯蒸气的氮氧混合气氛中开展电接触试验,结果表明,随着O₂含量的增大,触头接触电阻逐渐减小.刘文轩等^[18]对CuW50、CuW60、AgW60和Cu等四种触头开展了在O₂、空气、N₂和CO₂等六种气氛中的电接触试验,O₂中的接触电阻一般最大,空气次之,50%CO₂+50%Ar最小. Liu等^[19]研究了不同气氛环境下(空气、O₂和N₂)铜的电接触微动磨损性能,其结果完全不同:纯氧状态下反复出现间隙性断路,而在纯氮气环境中接触电阻值一直很低,在大气环境中的接触电阻居于二者之间. Grandin等^[20]发现铜表面形成的摩擦膜由石墨和Cu₂O组成,氧化物不一定有害,氧含量越高,接触电阻反而越低.对于铜基材料的氧化机理尚待进一步研究,有研究发现含氧量越高,接触电阻越高,也有研究发现不同的结论.目前的研究主要集中在环境中是否含氧,如果不含氧,接触电阻低,故认为氧是氧化反应的唯一主导因素.影响接触电阻的主要因素是表面产物,但是环境中的氧是引起表面产物差异的主导因素但非唯一因素,在其他试验条件一定的情况下,本研究中主要以大气中

含氧量为参照,通过调节氛围中的含氧量定性对比分析,揭示基于电接触模式下含氧环境中影响铜电接触微动磨损的主导因素,进一步完善铜基材料的电接触氧化机理,为其在电接触领域的应用提供具有参考价值的理论指导。

1 试验部分

1.1 试验材料

本试验中选择典型的导电块状紫铜C11000(质量分数:Cu 99.9%; P 0.0116%; Fe 0.016%; Pb 0.0019%; S 0.0047%; Zn 0.0216%; Sn 0.0034%)作为摩擦材料,黄铜球C3604(质量分数:Cu 60.5%~63.5%; Fe 0.01%; Pb 0.08%; P 0.15%; Sn 0.005%; Bi 0.002%,其余为Zn)作为摩擦对偶,接触方式为球/面接触,试验参数:法向载荷 F_n 为4 N,微动幅值 D 为45 μm ,微动频率 f 为2 Hz,循环次数 N 为 10^4 次,紫铜表面粗糙度 R_a 为2.61 μm ,黄铜球表面粗糙度 R_a 为0.08 μm ,触点电流 I 为20 mA,每次试验重复3次取平均值,用标准差作为误差,试验材

料性能列于表1中。

1.2 试验测试方法

试验设备采用西南交通大学摩擦学研究所自制的电接触微动试验机和PC微机系统对整个试验进行数据采集(图1),气氛装置[图1(b)]通过调节气压阀来控制Ar/O₂的流速进而保证试验氛围中10%O₂和30%O₂环境,20%O₂采用的是大气环境,向另外两种氛围腔里通水蒸气保证与空气湿度一致(30% RH),环境温度为25 $^{\circ}\text{C}$,保证三种环境下恒温恒湿.接触电阻的测量采用经典的四线法接线方式^[6,21][图1(c)],由于试验接触界面电压信号通常只有几毫伏,所以对电压进行100倍放大处理,电阻值通过欧姆定律计算得出.用光学显微镜(OM,型号:OLYMPUS-BX60M)、扫描电子显微(SEM,型号:FEI-Quanta200,美国)和白光干涉仪(型号:contour GT-X 3D)分别对磨痕的表面形貌、磨损体积以及磨损深度进行了测试和对比,并结合电子能谱(EDX)和电子探针(EPMA)分析表面的成分变化以进一步了解摩擦化学行为。

表1 试验材料性能

Table 1 Test material properties

Material	Size/mm	Resistivity/($10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)	Density/(g/cm^3)	Hardness/HV _{0.1}	Yield strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Linear expansivity	Poisson's ratio
Copper	30×10×10	1.75	8.96	102	258.646	100	16.6	0.37
Brass	$\Phi 5$	6.42	8.50	150	239.689	110	12	0.33

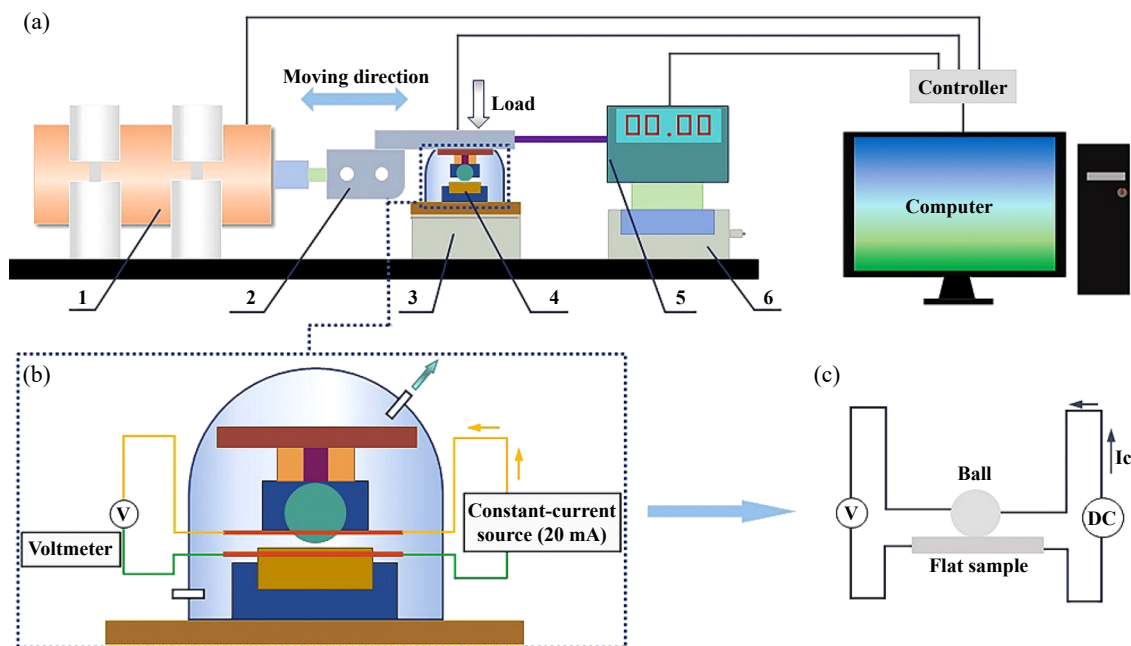


Fig. 1 Schematic of the wear tes: (a) Schematic diagram of electrical contact fretting wear test device (1. piezoelectric ceramic actuator; 2. upper fixture; 3. force transducer; 4. sample; 5. displacement sensor; 6. precision lead screw); (b) Atmosphere device; (c) Resistance measurement principle

图1 试验示意图:(a)电接触微动磨损试验装置示意图(1. 压电陶瓷驱动装置; 2. 上夹具; 3. 力传感器; 4. 样品; 5. 位移传感器; 6. 精密丝杠); (b)气氛装置; (c)四线接触法测量接触电压

2 结果与分析

2.1 微动磨损性能

摩擦力-位移(F_t - D)曲线和摩擦系数是微动过程中主要的动力学参数. F_t - D 曲线可反映材料的微动运动状态, 图2所示为不同含氧量下的 F_t - D 曲线, 从图2中可以看出不同含氧量下的 F_t - D 曲线均为平行四边形, 表明微动运行状态为完全滑移区^[22]. 由文献^[23]可知, 微动过程中, 材料的损伤可以通过摩擦耗散能(E_f)来表征. 在 F_t - D 曲线图中, 每个循环的耗散能等于该循环对应

的 F_t - D 曲线所围面积. 本文中通过 F_t - D 曲线(图2)计算了10th、100th、500th、1 000th、2 000th和5 000th循环对应的摩擦耗散能(表2), 500th循环前, 随着循环次数的增加三种不同含氧环境摩擦耗散能均线性递增, 500th~5 000th循环, 不同含氧量环境下的摩擦耗散能变化出现不同程度的波动, 先下降再上升. 在整个循环周期内, 20% O_2 环境下的摩擦耗散能较其他两种条件下低, 而10% O_2 环境下的摩擦耗散能高于其他两种情况. 可以推测, 20% O_2 条件下的损伤最轻, 10% O_2 条件下的损伤最严重.

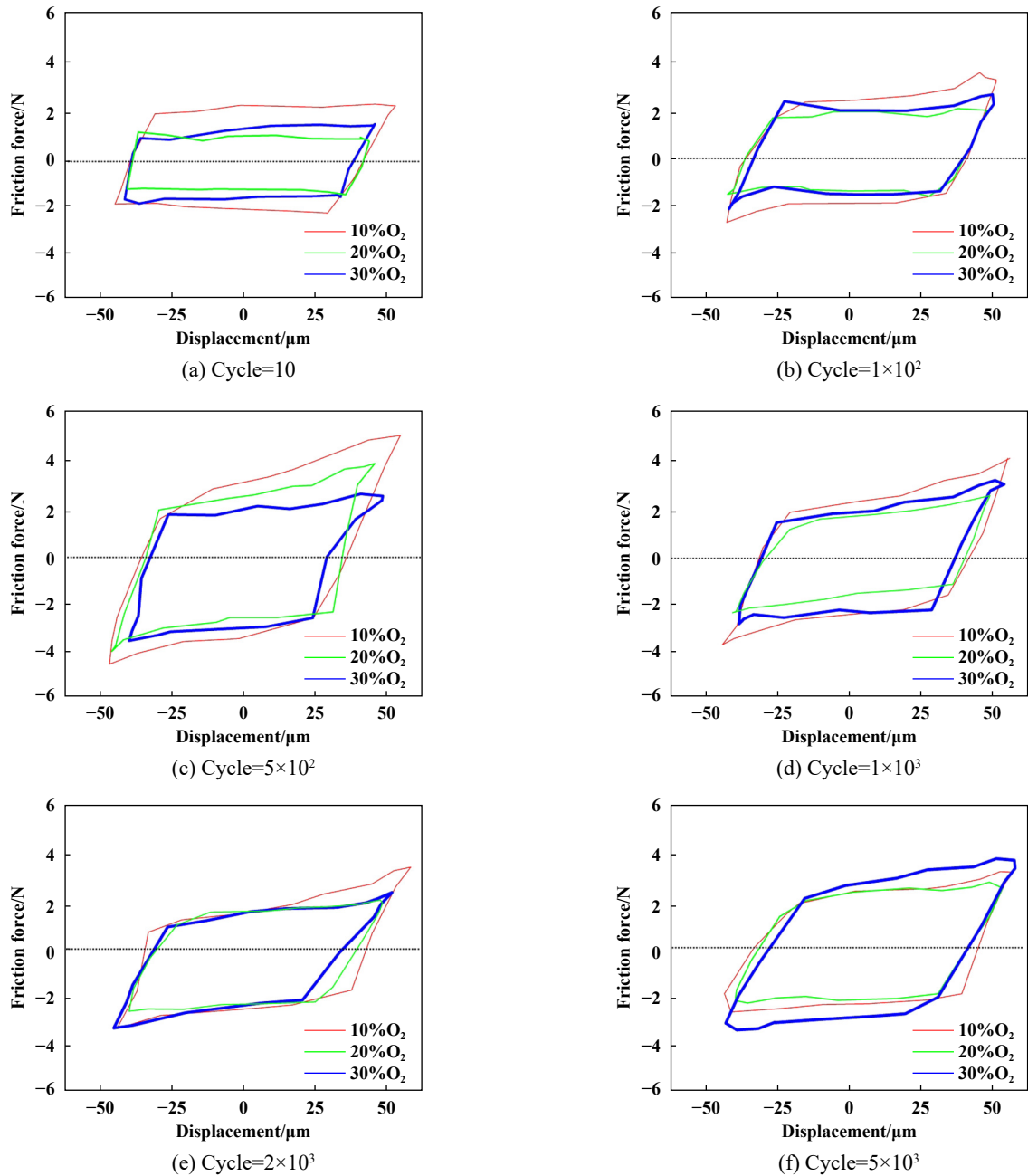


Fig. 2 F_t - D curve in different oxygen content environment

图 2 不同含氧量环境中的 F_t - D 曲线

表2 不同含氧量环境中的摩擦耗散能

Table 2 Friction dissipation energy in different oxygen content environment

Oxygen content	$E_f/\mu\text{J}$					
	10	1×10^2	5×10^2	1×10^3	2×10^3	5×10^3
10%O ₂	270	275	385	323	280	300
20%O ₂	130	203	273	278	260	314
30%O ₂	165	226	241	306	270	364

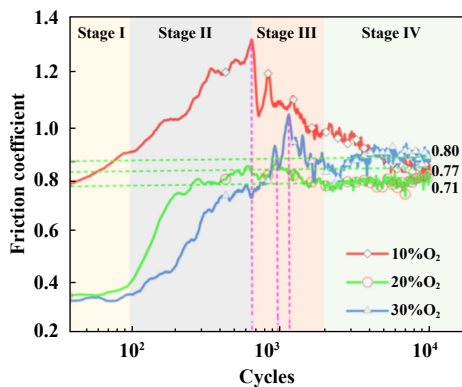
铜在三种不同含氧量环境中的摩擦系数曲线如图3(a)所示,摩擦系数均经历4个阶段:(1) 1~100次循环,初始阶段,即表面膜的保护阶段,摩擦系数低;(2) 100~1 000次循环,二体作用,爬升阶段,表面膜破裂,摩擦对偶之间为直接接触,接触表面发生黏着和咬合,摩擦系数迅速增大;(3) 1 000~2 000次循环,二体向三体过渡,下降阶段,铜氧化物颗粒不断生成和剥落,形成第三体层,起到固体润滑的作用,摩擦系数下降^[22]; (4) 2 000~10 000次循环,稳定阶段,磨屑不断产生和压碎,但是产生和溢出达到动态平衡,摩擦系数变化不大.可以看出环境中10%O₂、20%O₂和30%O₂时

摩擦系数稳定值分别是0.77、0.71和0.80.爬升阶段10%O₂环境下摩擦系数高可能因为含氧量低,表面生成氧化物少,紫铜与黄铜基本完全处于二体接触,两者属于较软金属,黏着和塑性变形严重.

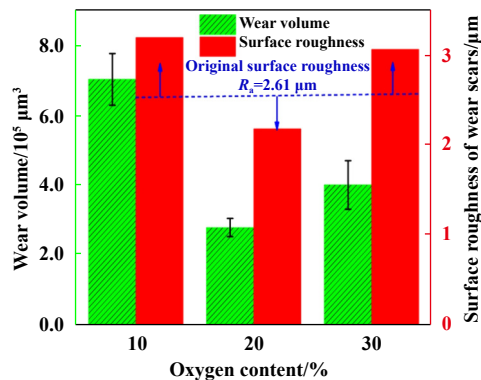
采用白光干涉仪测量了磨痕的表面粗糙度,并计算了磨损体积,如图3(b)所示,样品初始表面粗糙度为2.61 μm,在不同含氧量环境中磨损后磨痕的表面粗糙度不同,10%O₂、20%O₂和30%O₂环境下磨痕的表面粗糙度依次为3.22、2.20和3.09 μm,而铜在10%O₂环境中磨损体积最大,20%O₂环境中磨损体积最小,30%O₂环境中磨损体积居于两者之间,磨损体积与摩擦耗散能的结果一致.

2.2 电接触性能

图4(a)所示为环境中不同含氧量的接触电阻值对比图,处于10%O₂环境时,接触电阻值在7 500次循环前有较小的波动,但未超过200 mΩ,7 500次循环后开始爬升,9 400次达到最大值1 360 mΩ.处于20%O₂环境时,5 500次循环前接触电阻均保持较低水平,7 100次循环后逐步下降,8 700次后接触电阻上升到最大值



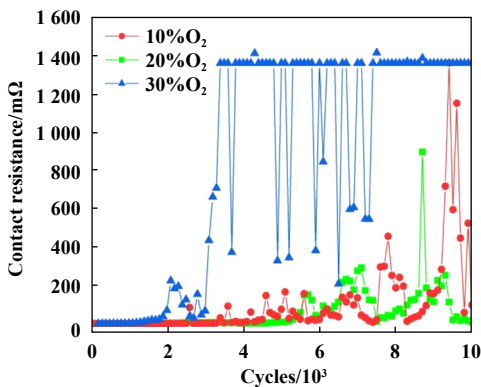
(a) Friction coefficient



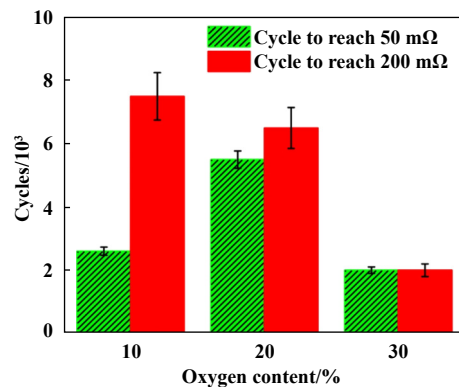
(b) Wear volume and surface roughness

Fig. 3 Friction coefficient, wear volume and surface roughness under different oxygen content

图3 不同含氧量下的摩擦系数、磨损体积及表面粗糙度



(a) Electrical contact resistance



(b) Electrical contact life

Fig. 4 Contact resistance and electrical contact life under different test conditions

图4 不同试验条件下的接触电阻和电接触寿命

900 m Ω . 处于30%O₂环境时,接触电阻值在2 000次循环后开始上升到260 m Ω ,然后逐渐下降,3 000次循环时接触电阻值陡然上升到1 360 m Ω ,随着循环次数增加接触电阻一直居高不下,维持在1 360 m Ω .可以看出不同含氧量环境下,接触电阻的变化规律不一样,10%O₂的条件下,接触电阻前期波动不大,后期有较大波动,而20%O₂条件下,接触电阻峰值和波动较10%O₂时小,30%O₂环境中接触电阻很快到达稳定峰值.一般常用电接触寿命来评价电接触性能,而电接触寿命即到达允许最大接触电阻值(R_{\max})的时间(本试验中用循环次数).首先给接触电阻设置门槛值,即允许的最大接触电阻,如果设置为50 m Ω ,则10%O₂、20%O₂和30%O₂环境时对应的寿命分别是2 600、5 500和2 000.如果门槛值为200 m Ω ,则10%O₂、20%O₂和30%O₂时对应的寿命分别是7 500、6 500和2 000[见图4(b)].在10 000次循环内,10%O₂、20%O₂和30%O₂时对应的 R_{\max} 分别是1 360、900和1 360 m Ω .无论从电接触寿命还是接触电阻峰值评价,电接触性能20%O₂时最优,10%O₂时次之,30%O₂时最差.

3 讨论

3.1 磨痕形貌分析

图5为不同试验条件下的磨损中心区域光学显微镜图和白光干涉图,从光镜图可以看出,三种条件下的磨痕都呈圆形且颜色较黑,可能跟磨痕表面发生了

较严重的氧化反应有关,20%O₂环境下的磨痕直径最小,30%O₂环境下的磨痕直径最大[图5(a~c)].白光干涉结果包括了三维形貌图和磨损深度曲线[图5(d~f)],10%O₂环境下的磨坑和边缘堆积严重,20%O₂环境下的磨痕心部有部分堆积,能一定程度上保护基体不受磨损,30%O₂环境下由于磨损面积更大,磨屑更容易挤出,但是磨损深度也较大,呈现典型的W型.

图6(a)为10%O₂环境中磨痕的SEM形貌图,可以看到中心区域有很厚的剥层,大块的剥层脱落后可见较大的磨损裂纹,说明损伤严重,而磨痕边缘处溢出的磨屑颗粒尺寸较小,松散地覆盖在表面.20%O₂环境下磨痕心部有犁沟存在,磨痕中心也可见明显的裂纹,磨屑颗粒均匀分布在周围[图6(b)].在30%O₂的环境中剥层现象更明显,但未发现裂纹,取而代之的是沉积,磨屑呈较大颗粒或者团聚体并黏着在周围[图6(c)],颗粒尺寸明显大于另外两种含氧量环境中,大块颗粒和剥落导致较大的接触电阻和波动^[24].大颗粒块状疏松覆盖在基体表面,可能与生成较多的铜氧化物有关,铜表面氧化层的外部是由晶粒细小的CuO组成,内部则为Cu₂O,其晶粒为粗大组织且疏松,铜被氧化成Cu₂O或CuO时产生较大的体积变化,氧化层在生长过程中势必承受一定的压缩应力,可能引起氧化层破裂^[25].接触表面的氧化颗粒在磨损初期导致磨粒磨损,接触电阻随之增大,但磨损后期影响不明显^[7].磨损后期主

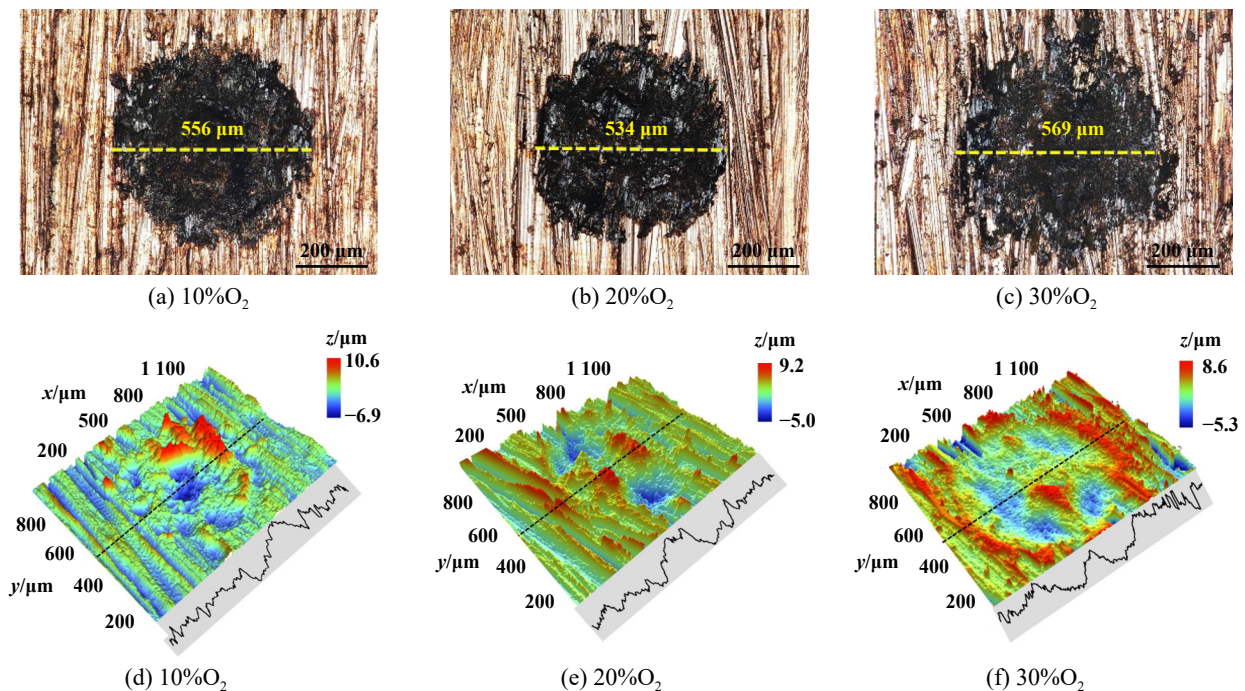


Fig. 5 Micrographs of wear scars under different oxygen content

图5 不同含氧量环境下的磨痕形貌图

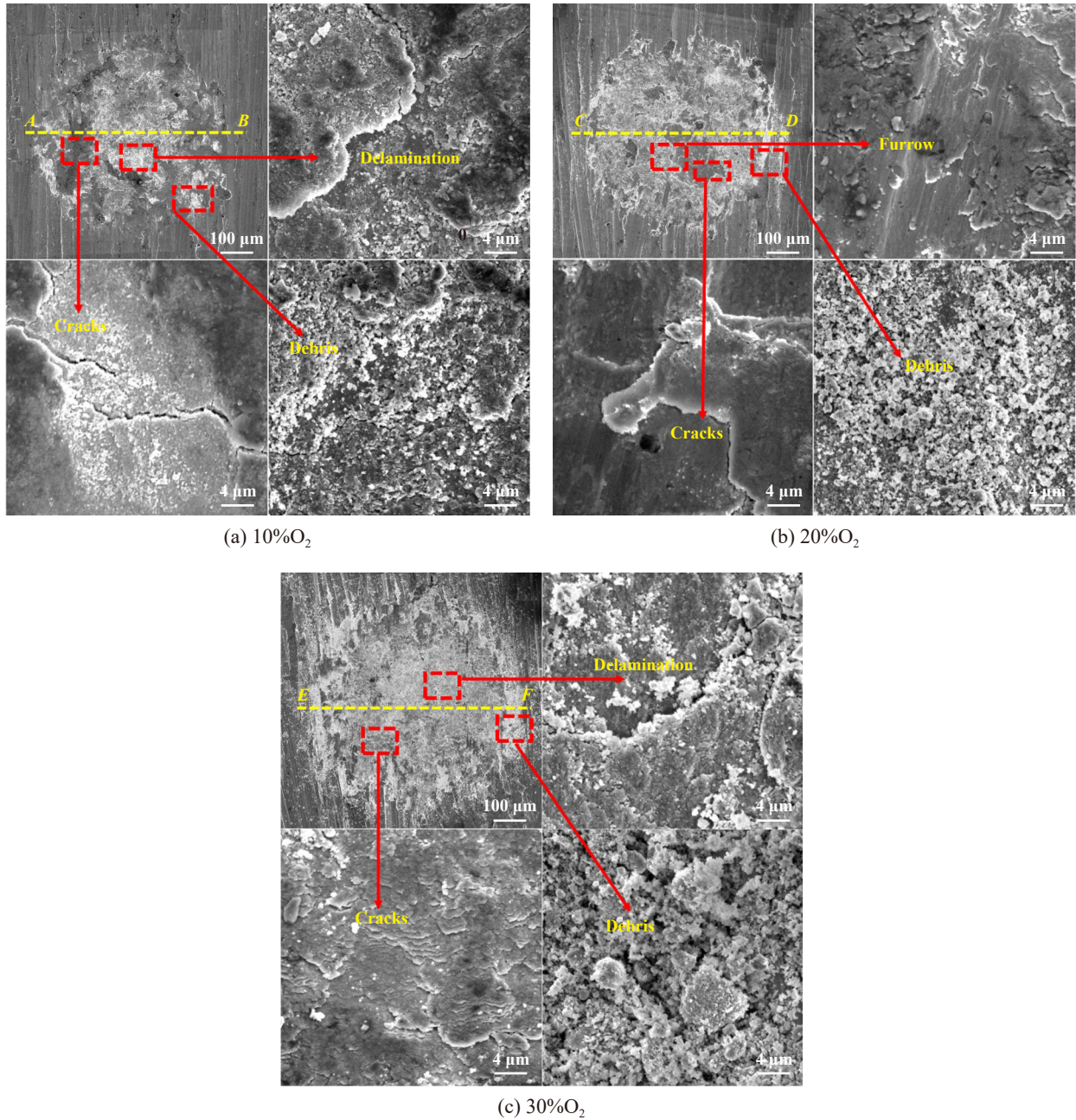


Fig. 6 SEM micrographs of wear scars in different area

图6 磨痕不同区域微观形貌

要是氧化物的影响,氧化物黏着和团聚导致接触副的接触电阻增大甚至电流断路^[6-7],因此从磨损形貌的SEM照片可以看出磨损产物的形状和尺寸可能是引起接触电阻不同的重要因素,团聚越严重,磨屑和氧化物尺寸越大,可能导致接触电阻变大,另外从形貌图可看出磨损机制主要为剥落、氧化和黏着。

3.2 磨痕成分分析

本文中对三种状态下的磨痕用EPMA进行元素的线扫描,扫描位置分别为图6中AB、CD和EF线段,同时对图6中的磨痕全貌进行EDS线扫描,结果见图7,

主要了解Cu、O和Zn元素相对于基体含量的分布情况。从线扫描结果[图7(a~c)]可以看出,三种状态下Cu元素强度曲线呈现边缘(未磨损区)高和中间(磨损区)低的现象,说明磨痕表面较基体表面Cu元素相对含量均有不同程度的减少,而与之相反的是O元素和Zn元素强度曲线呈现边缘(未磨损区)低、中间(磨损区)高的现象,说明磨痕位置O元素相对含量增加,证明磨损过程中的氧化比在空气中自然氧化更严重,Zn元素是从对偶球黄铜球上转移过来的,说明在试验中摩擦对偶黄铜球也发生了一定程度的磨损,磨痕区域内是两

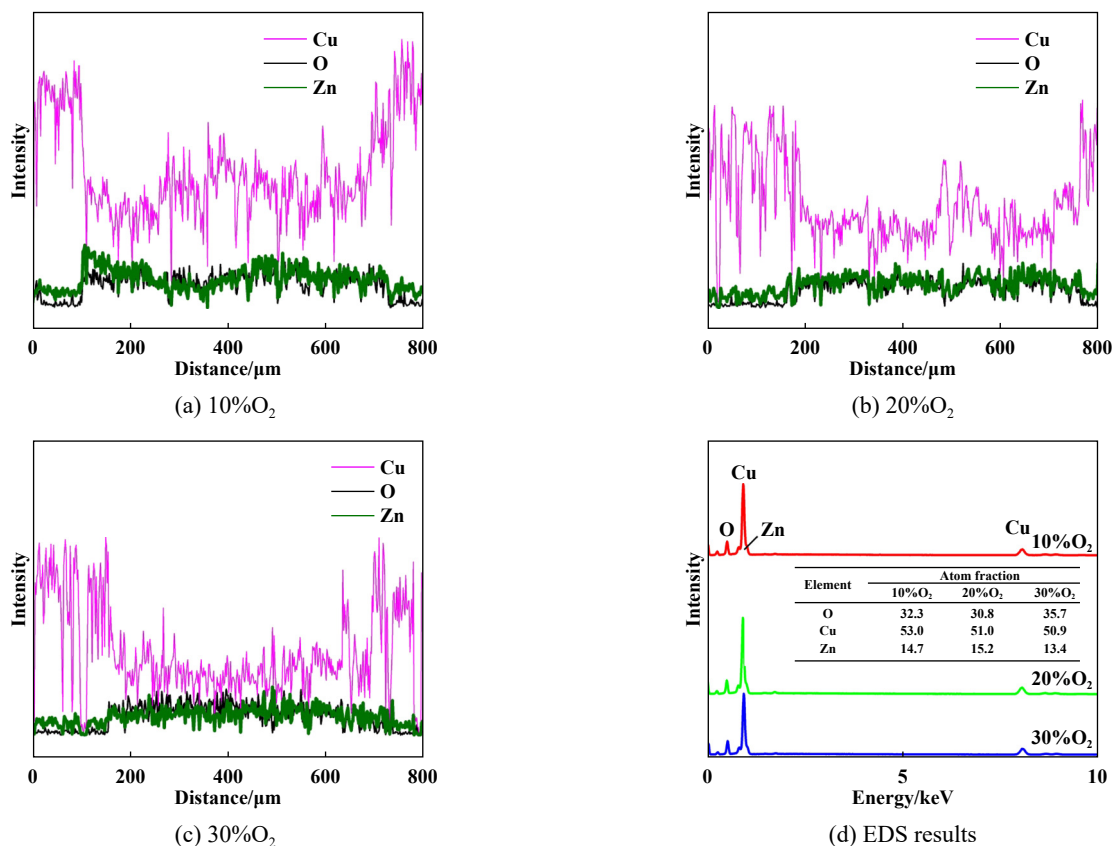


Fig. 7 EPMA and EDS results of wear scar

图7 磨痕的EPMA线扫和EDS结果

者的磨屑和氧化混合物. EDS可以定量分析三种元素原子百分比[图7(d)], 10%O₂、20%O₂和30%O₂三种环境下Cu原子含量分别为53.0%、51.0%和50.9%, O原子含量分别为32.3%、30.8%和35.7%, Zn原子含量分别为14.7%、15.2%和13.4%. O原子含量高说明氧化严重, Cu原子含量高低决定导电性能, Zn原子含量差别不大. 从成分分析看出, 材料转移也是其磨损机制之一, 30%O₂环境下氧化最严重, 20%O₂环境下氧化最轻.

3.3 环境中含氧量不同对铜接触电阻的影响

微动形成的金属氧化物的性能极大地影响微动损伤的程度和微动的动力特性. 由微动作用产生的氧化物碎屑将增大摩擦系数, 并通过研磨作用增大表面损伤^[1], 氧化膜是干摩擦状态中常见的润滑膜^[26], 摩擦热的软化和氧化物的产生起到减磨润滑的作用^[27]. 根据Rabinowicz和Quinn氧化磨损模型^[28], 环境中含氧量越低, 磨损率越高, 说明氧化物具有减磨润滑的作用. 铜具有在氧气中易氧化的性质, 氧化磨损是其主要的磨损机制, 在三种不同含氧量的环境中, 10%O₂环境中磨损最严重, 30%O₂最轻, 20%O₂居中. 由于磨损和氧化同时进行, 磨损产生更多的磨屑又会加剧氧化, 更多的氧化物增大接触电阻. 当接触表面有氧化膜存

在时, 根据接触电阻 $R_t=R_s+R_f$ (R_t 为总接触电阻, R_s 为收缩电阻, R_f 为膜电阻), 本试验中收缩电阻的影响可以忽略不计, 主要考虑膜电阻的影响.

根据Liu等^[19]的研究结果, 铜在无氧、空气和纯氧三种气氛环境中, 电接触性能主要受氧化膜的影响, 氧气越充足的环境中氧化现象越严重, 电接触性能越差, 因此无氧环境电接触性能最好, 纯氧环境电接触性能最差. 但是电连接器的工作环境很难做到完全密封的真空环境, 本文中以空气中20%O₂为参照, 对比环境中含氧量低于和高于此含量, 发现氧化程度并非完全取决于环境中含氧量, 还跟磨损程度有关系, 磨损严重将会产生更多的磨屑, 磨屑容易被氧化. 因为10%O₂环境下磨损最严重, 在磨损和氧化的共同作用下, 其氧化程度反而比20%O₂环境下严重, 说明接触电阻与环境中含氧量呈非线性关系, 是环境中含氧量和磨损程度耦合的结果, 但是具体耦合的公式或者趋势还有待进一步研究确定. 磨损和氧化过程示意图如图8所示, 在大气中, 随着磨损时间的增加, 氧化加剧, 两接触界面之间的第三体既有磨屑层也有氧化颗粒和金属氧化层[图8(a)]. 而在不同含氧量环境中, 氧化

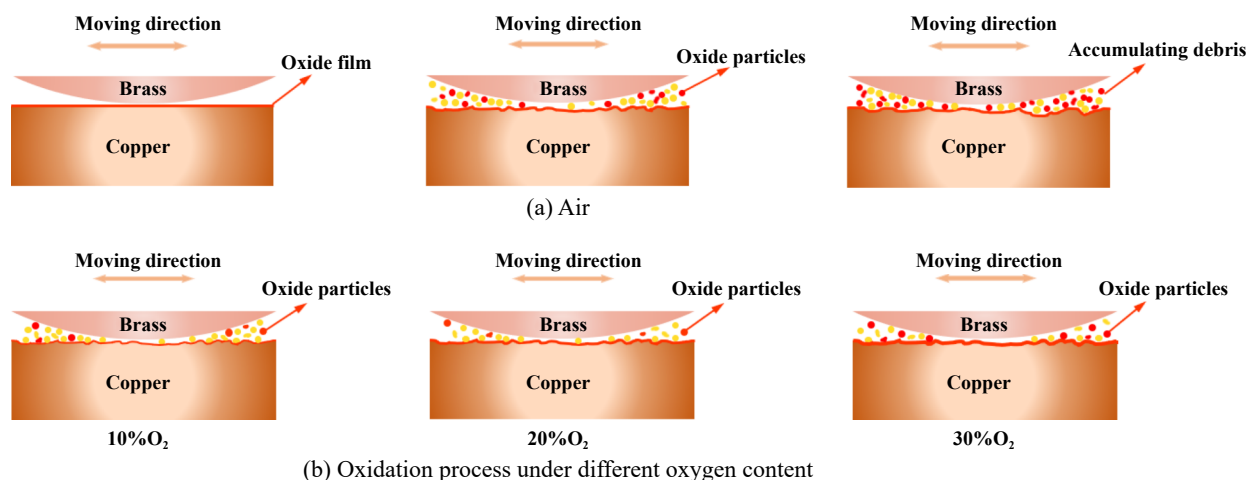


Fig. 8 Schematic diagram of the formation process of surface products in the contact area during fretting

图 8 微动过程中接触区表面产物形成过程示意图

和磨损的规律略微有些不同,同样的磨损时间,10%O₂环境中,由于磨损较为严重,产生的磨屑较20%O₂和30%O₂环境中多,磨屑反复碾压升温,更容易被氧化,虽然O₂含量较低,但是单位体积内被氧化的磨屑数量较20%O₂多,30%O₂环境下由于具有更充足的O₂,氧化现象最严重,故20%O₂环境下接触电阻最低[图8(b)].

4 结论

本文中对比了铜在三种不同含氧量的环境中滑移区的电接触微动磨损试验后发现:

a. 10%O₂微动磨损性能最差,电接触性能介于20%O₂和30%O₂之间,20%O₂环境中电接触性能和微动磨损性能最好,30%O₂环境中电接触性能最差,微动磨损性能介于其他两种环境之间。

b. 30%O₂环境中氧化最严重,导致接触电阻较高,而10%O₂环境中磨损最严重,产生更多的磨屑,加剧了氧化行为,故10%O₂环境中铜的接触电阻高于20%O₂环境,说明接触电阻与环境中含氧量呈非线性关系,还与磨损程度相关.氧气只是一种氧化介质,环境中含氧量和磨损产生的磨屑共同主导电接触性能。

c. 不同含氧量环境中均发生了不同程度的氧化和剥落以及摩擦对偶材料的转移,因此三种状态下的主要磨损机制为氧化、黏着(转移)和剥落。

参考文献

[1] Braunovic M, Konchits V V, Myshkin N K. Electrical contacts fundamentals, applications and technology[M]. London: CRC Press, 2006.

[2] Chen Wenhua, Pan Jun, Lu Xianbiao, et al. Reliability modeling of electrical connectors under vibration stress[J]. Journal of

Astronautics, 2003, 24(1): 78–81 (in Chinese) [陈文华, 潘骏, 卢献彪, 等. 航天电连接器的振动可靠性建模[J]. 宇航学报, 2003, 24(1): 78–81]. doi: 10.3321/j.issn:1000-1328.2003.01.015.

[3] Xie Bohua, Ju Pengfei, Ji Li, et al. Research progress on tribology of electrical contact materials[J]. Tribology, 2019, 39(5): 656–668 (in Chinese) [谢博华, 鞠鹏飞, 吉利, 等. 电接触材料摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2019, 39(5): 656–668]. doi: 10.16078/j.tribology.2019025.

[4] Noh H J, Kim J W, Lee S M, et al. Effect of grain size on the electrical failure of copper contacts in fretting motion[J]. Tribology International, 2017, 111: 39–45. doi: 10.1016/j.triboint.2017.02.043.

[5] Ren Wanbin, Wang Peng, Ma Xiaoming, et al. Intermittency phenomenon of electrical contacts induced by fretting behavior[J]. Tribology, 2013, 33(4): 382–387 (in Chinese) [任万滨, 王鹏, 马晓明, 等. 微动诱发的触点电接触间歇失效现象研究[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(4): 382–387]. doi: 10.16078/j.tribology.2013.04.015.

[6] Sung I H, Kim J W, Noh H J, et al. Effect of displacement and humidity on contact resistance of copper electrical contacts[J]. Tribology International, 2016, 95: 256–261. doi: 10.1016/j.triboint.2015.11.027.

[7] Kong Z G, Swingler J. Combined effects of fretting and pollutant particles on the contact resistance of the electrical connectors[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2017, 27(3): 385–390. doi: 10.1016/j.pnsc.2017.04.018.

[8] Liu Xinlong, Cai Zhenbing, Liu Shanbang, et al. Influence of wear test parameters on the electrical contact performance of brass alloy/copper contactors under fretting wear[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2): 817–827. doi: 10.1007/s11665-018-3821-9.

[9] Lu Tonggang, Liu Feng, Gao Xiang, et al. Wear characteristics between aramture and rails under the action of Lorentz force and temperature field[J]. Tribology, 2021, 41(4): 474–483 (in Chinese) [卢铜钢, 刘峰, 高翔, 等. 洛伦兹力与温度场作用下枢轨摩擦磨损

- 特性[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(4): 474–483. doi: [10.16078/j.tribology.2020148](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020148).
- [10] Liu Xinlong, Cai Zhenbing, Liu Shanbang, et al. Effect of elevated temperature on fretting wear of nickel and copper under electric contact[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(5): 944–954 (in Chinese) [刘新龙, 蔡振兵, 刘善邦, 等. 温度对镍和铜电接触微动性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(5): 944–954]. doi: [10.19476/j.yzxb.1004.0609.2018.05.11](https://doi.org/10.19476/j.yzxb.1004.0609.2018.05.11).
- [11] He Liping, Cai Zhenbing, Peng Jinfang, et al. Effects of oxidation layer and roughness on the fretting wear behavior of copper under electrical contact[J]. Materials Research Express, 2020, 6(12): 1265e3. doi: [10.1088/2053-1591/ab5aaf](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5aaf).
- [12] Liu Xinlong, Cai Zhenbing, Liu Shanbang, et al. Effect of roughness on electrical contact performance of electronic components[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 74: 100–109. doi: [10.1016/j.microrel.2017.05.024](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.05.024).
- [13] Umemura S, Aoki T. Effects of CO₂ atmosphere on contact resistance characteristics of noble metal contacts[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1992, 15(2): 258–265. doi: [10.1109/33.142903](https://doi.org/10.1109/33.142903).
- [14] Neufeld C N, Rieder W F. Carbon contamination of contacts due to organic vapors[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A, 1995, 18(2): 399–404. doi: [10.1109/95.390323](https://doi.org/10.1109/95.390323).
- [15] Zang Chunyan, He Junjia, Li Jin, et al. Contact resistance and surface film of sealed relay contacts[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 125–130 (in Chinese) [臧春艳, 何俊佳, 李劲, 等. 密封继电器接触电阻与表面膜研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 125–130]. doi: [10.3321/j.issn:0258-8013.2008.31.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-8013.2008.31.020).
- [16] Song J, Yuan H M, Schinow V. Fretting corrosion behavior of electrical contacts with tin coating in atmosphere and vacuum[J]. Wear, 2019, 426–427: 1439–1445. doi: [10.1016/j.wear.2018.11.024](https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.11.024).
- [17] Toshihiro A, Yasuhisa N, Toshifumi S. Suppression of contact activation by oxygen gas[C]. Proceedings of the 17th international conference on electrical contacts, Nagoya, Japan, 1994.
- [18] Liu Wenxuan, Liao Yuan, Jiao Lin, et al. The experimental study on contact resistance under different contact materials and surrounding atmospheres in HVDC[J]. Electrical Engineering Materials, 2019(6): 16–19 (in Chinese) [刘文轩, 廖园, 焦琳, 等. 触头材料及环境气氛对高压直流触头接触电阻影响的试验研究[J]. 电工材料, 2019(6): 16–19]. doi: [10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2019.06.004](https://doi.org/10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2019.06.004).
- [19] Liu Xinlong, Cai Zhenbing, Cui Ye, et al. Effect of different atmospheres on the electrical contact performance of electronic components under fretting wear[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(15): 155302. doi: [10.1088/1361-6463/aab30d](https://doi.org/10.1088/1361-6463/aab30d).
- [20] Grandin M, Wiklund U. Wear phenomena and tribofilm formation of copper/copper-graphite sliding electrical contact materials[J]. Wear, 2018, 398–399: 227–235. doi: [10.1016/j.wear.2017.12.012](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.012).
- [21] Mengotti E, Duarte L I, Pippola J, et al. Fretting corrosion: analysis of the failure mechanism for low voltage drives applications[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9–10): 2109–2114. doi: [10.1016/j.microrel.2014.07.153](https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.07.153).
- [22] Zhou Zhongrong, Leo Vincent. Fretting wear[M]. Beijing: Science Press, 2002 (in Chinese) [周仲荣, Leo Vincent. 微动磨损[M]. 北京: 科学出版社, 2002].
- [23] Zhou Zhongrong, Zhu Minhao. Compound 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].
- [24] Ren Wanbin, Wang Peng, Song Jian, et al. Effects of current load on wear and fretting corrosion of gold-plated electrical contacts[J]. Tribology International, 2014, 70: 75–82. doi: [10.1016/j.triboint.2013.09.024](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.09.024).
- [25] Li Xun, Luo Jixun. The oxidation of copper at 200–900 °C[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1965, 1(3): 311–318, 419–420 (in Chinese) [李薰, 骆继勋. 铜在200–900 °C的氧化[J]. 金属学报, 1965, 1(3): 311–318, 419–420].
- [26] Jiang Zeqi, Fang Jianhua, Chen Fei, et al. Research progress on tribo-electrophysical and tribo-electrochemical mechanisms[J]. Tribology, 2017, 37(5): 695–706 (in Chinese) [江泽琦, 方建华, 陈飞, 等. 摩擦电物理和摩擦电化机理的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 695–706]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.05.018](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.018).
- [27] Fan Wenxin, Guo Peijian, Yuan Xia, et al. Effects of load and speed on the friction and wear properties of copper alloys[J]. Tribology, 2021, 41(6): 821–832 (in Chinese) [樊文欣, 郭佩剑, 原霞, 等. 载荷和转速对铜合金材料摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(6): 821–832]. doi: [10.16078/j.tribology.2020186](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020186).
- [28] Xiong Dangsheng, Li Xibin. Oxidation wear and oxide lubrication[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 1996, 1(1): 49–57 (in Chinese) [熊党生, 李溪滨. 氧化磨损与氧化物润滑[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 1996, 1(1): 49–57].