

DOI: 10.11973/jxgccl201912003

烟炱和灰尘颗粒对紫铜电接触微动磨损性能的影响

王朋关¹, 曹中清¹, 陈海超¹, 彭金方², 蔡振兵¹

(西南交通大学 1.机械工程学院, 2.牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

摘要: 采用球/平面接触方式, 在自制的电接触磨损试验设备上对紫铜进行电接触微动磨损试验, 研究了表面附着的烟炱和灰尘颗粒对紫铜电接触微动磨损性能的影响。结果表明: 表面附着灰尘颗粒时的接触电阻远高于附着烟炱颗粒的; 烟炱颗粒具有减摩作用, 其附着数量的增加会降低试样的摩擦因数, 灰尘颗粒则相反; 烟炱和灰尘颗粒的引入均延缓了试样的微动磨损, 磨痕宽度、磨痕深度和磨损量均与附着颗粒的数量呈负相关。

关键词: 电接触; 微动磨损; 烟炱颗粒; 灰尘颗粒; 磨痕

中图分类号: TM501; TG115.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2019)12-0012-07

Effect of Soot and Dust Particles on Fretting Wear Properties of Copper under Electrical Contact

WANG Pengguan¹, CAO Zhongqing¹, CHEN Haichao¹, PENG Jinfang², CAI Zhenbing¹

(1.School of Mechanical Engineering, 2.State Key Laboratory of Tracation Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: By the ball/plane contact method, fretting wear tests under electrical contact were conducted on copper with a self-developed electrical contact wear test setup. The effect of surface-attached soot and dust particles on the fretting wear property of the copper under electrical contact was studied. The results show that the contact resistance with dust particles on surfaces was much higher than that with soot particles on surfaces. The soot particles had an antifriction effect; increasing the number of soot particles reduced the friction coefficient. The dust particles had the opposite effect. Introducing both the soot and the dust particles reduced the fretting wear of the samples; the width and depth of the wear scar, and the amount of wear were all negatively related to the number of particles attached.

Key words: electrical contact; fretting wear; soot particle; dust particle; wear scar

0 引言

通信和电子设备中存在大量电子连接器, 连接器的可靠接触保证了系统的正常运行^[1]。大部分工业类电子设备和消费类电子产品都暴露在空气中使用, 少部分特殊电子设备还需要在严酷环境下高效稳定安全地工作。环境中的尘土颗粒、有机污染物、腐蚀性气体等都会直接影响到电子

产品的可靠性, 其中较为脆弱的电子连接部分受到的影响较大^[1-2]。例如, 电脑除尘就是因为灰尘太多导致板卡接触不良、CPU 散热不够引起系统死机而采取的措施。大量研究发现: 在失效电接触表面上可发现环境中的尘土颗粒和有机污染物^[3-4]; 尘土颗粒会造成电接触界面发生接触电阻增大、微动磨损、电化学腐蚀等问题^[5]; 有机污染物有很强的黏性, 会黏接其他颗粒造成大量污染物堆积, 从而导致电接触点的失效^[6]; 航天电连接器的电阻随贮存时间的延长而增大, 这与分离力的降低以及尘土的污染有关^[7]。

BRAUNOVIC 等^[8]研究发现, 微动磨损是造成电接触故障的重要原因。电接触微动磨损可分为跑

收稿日期: 2018-12-06; 修订日期: 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1730131); 四川省青年科技创新研究团队项目(2017TD0017)

作者简介: 王朋关(1992—), 女, 河南安阳人, 硕士研究生

导师: 曹中清副教授

合期和相对稳定期两个阶段:跑合期的主要磨损形式为宏观电弧腐蚀和磨粒磨损;相对稳定期的主要磨损形式为微观电弧腐蚀和黏着磨损^[9]。目前,在由颗粒造成的电接触微动磨损研究中,主要存在以下不足:研究内容主要集中在特定尘土颗粒的成分分析和失效触点的分析上,尚未对颗粒在电接触界面的作用机理进行总结;鲜见有机污染物对电接触界面影响的研究。为此,作者采用球/平面接触方式,利用自制电接触磨损试验设备对接触表面上附着烟炱和灰尘颗粒的紫铜试样进行了微动磨损试验,研究了不同数量烟炱和灰尘颗粒对试样电接触微动磨损性能的影响,分析了影响机理,为提高含颗粒电接触的可靠性提供试验依据。

1 试样制备与试验方法

紫铜是最常用的一种导电材料,其导电性能良好。试验用紫铜材料的化学成分(质量分数/%)为63.5Cu,0.08Pb,0.015P,0.005Sn;球/平面接触副具有良好的试验重复性和稳定性,故试验采用球/平面接触形式。上试样为紫铜球,直径为5 mm;下试样为块状紫铜,尺寸为9 mm×15 mm×3 mm。为了消除接触初始表面粗糙度对试验结果的干扰,紫铜试样的接触表面均经过抛光处理,表面粗糙度 R_a 约为0.12 μm 。烟炱颗粒收集自同一工作条件

下某重型柴油汽车发动机排放的尾气,收集位置位于距排气口100~150 mm处,收集到的烟炱颗粒存放在恒温干燥箱内,烟炱粒径在30~70 nm;灰尘颗粒收集自某工业设备连接器上的积尘,用塑料铲和毛刷收集,过滤并存放于恒温干燥箱内,灰尘粒径在10~50 μm 。经 OXFORDX-MAX50INCA-250 型能量色散 X 射线光谱仪(EDX)测定,灰尘主要成分包括碳、氧、铝、硅、硫、磷、钾、钙和铜。

分别取0.5,5.0,50.0 mg烟炱或灰尘颗粒,与50 mL乙醇混合后超声振荡15 min,使颗粒均匀分散,配制得到质量浓度 C_L 分别为0.01,0.10,1.00 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的悬浮液;静置2 min,待悬浮液稳定后,用滴管取1滴(约0.05 mL)中间层悬浮液滴在下试样表面,静置风干至乙醇完全挥发。悬浮液质量浓度越高,附着在表面的颗粒数量越多。

在自制电接触微动磨损试验机(图1)上进行微动磨损试验,在驱动装置作用下上试样在下试样表面发生往复微动行为,通过力传感器测定摩擦力和法向载荷,通过激光位移传感器测定位移,试验中信号在采集端经放大器放大,经噪声滤波器过滤后传输到电脑并保存。试验载荷为2 N,电流为0.02 A,位移幅值为45 μm ,频率为2.5 Hz,循环次数为10 000周次,大气环境;应用四线接触法^[10]测定微动磨损过程中的接触电阻。

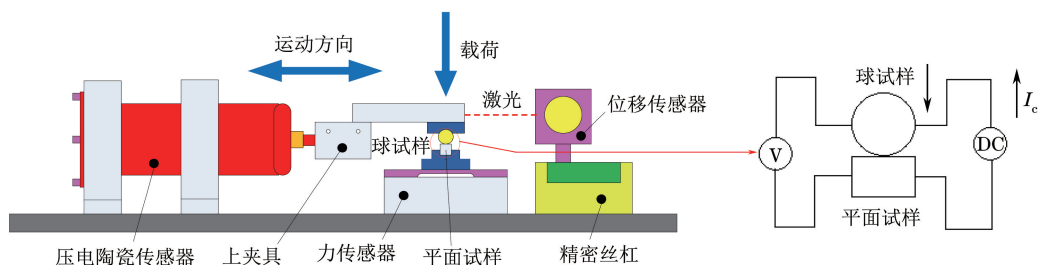


图1 电接触微动磨损试验装置

Fig.1 Electrical contact micro-motion wear test setup

采用 OLYMPUS-BX60M 型光学显微镜(OM)和 JSM6610LV 型扫描电镜(SEM)观察试样表面的磨痕形貌。利用 Contour GTX3 型三维光学表面形貌仪测得磨痕轮廓尺寸,计算磨损体积及磨损率。

2 试验结果与讨论

2.1 接触电阻

由图2可知,表面附着烟炱或灰尘颗粒时,接触电阻在微动磨损初始阶段均存在一个峰值。在初始阶段,铜与铜之间存在电阻率较高、导电性较差的烟

炱或灰尘颗粒,相当于在电路中串联了一个电阻值较高的元器件,因此出现电阻急剧增大的现象。灰尘颗粒的导电性优于烟炱颗粒的,因此附着灰尘颗粒的接触电阻峰值远高于附着烟炱颗粒的。随着微动磨损过程的进行,摩擦副之间的颗粒被排出接触区域,接触电阻快速下降。而在微动磨损后期,接触表面形成大量磨屑并附着在表面参与导电,接触模式在“铜/铜”“铜/颗粒/铜”“铜/磨屑/铜”之间转换,故接触电阻在一个比较稳定的范围内波动。 C_L 越大,则接触表面附着的颗粒数量越多,接触电阻达到稳定值所需的时间越长,这是因为附着在试样表面

参与接触导电的颗粒越多,颗粒排出接触区域所用的时间也越长。

由图 3 可以看出,试样接触电阻平均值和最大

值与表面附着颗粒的数量呈正相关。随着 C_L 的增加,更多的烟炱、灰尘颗粒附着在接触表面上阻碍摩擦副的直接接触,从而增大了接触电阻。

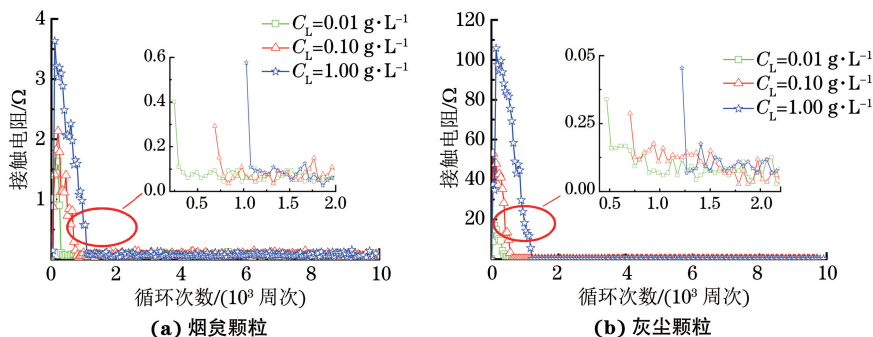


图 2 表面附着不同数量不同颗粒试样在微动磨损过程中的接触电阻曲线

Fig.2 Contact resistance curves of samples with different number of different particles on surfaces during fretting wear process:

(a) soot particles and (b) dust particles

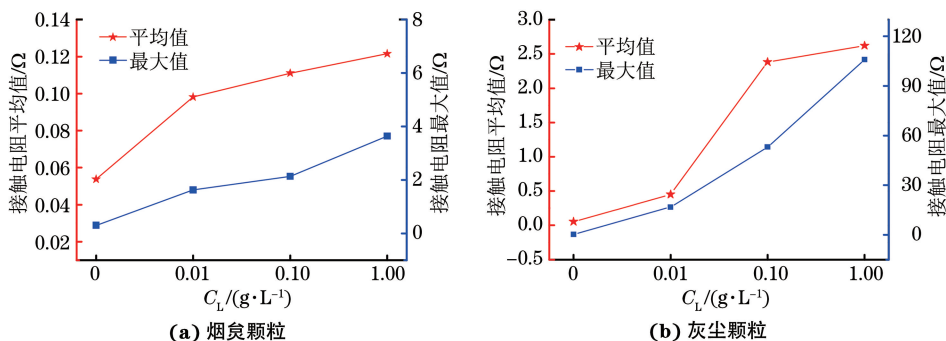


图 3 在微动磨损过程中试样的接触电阻平均值和最大值随 C_L 的变化曲线

Fig.3 Curves of average value and maximum value of contact resistance of samples vs C_L during fretting wear process:

(a) soot particles and (b) dust particles

2.2 摩擦因数

由图 4 可以看出,在表面未附着颗粒和附着不同数量颗粒的微动磨损过程中,试样的摩擦因数随时间的变化曲线均分为稳定、上升、稳定等 3 个阶段^[11]。在起始的几十个循环次数下,摩擦因数保持较低的稳定值,这是因为烟炱/灰尘在接触表面形成污染层,使得下试样表面相对光滑;在上升阶段,摩

擦因数急剧增大,这是因为在微动磨损开始后,下试样表面的烟炱/灰尘污染层发生破坏并被排出微动接触区域。表面附着颗粒的上升期持续时间较短。在稳定期,摩擦因数缓慢增大,这是因为经过上升期后,只有少量颗粒和磨屑留在接触表面,形成了“铜/铜”“铜/颗粒/铜”“铜/磨屑/铜”之间的动态平衡,故而摩擦因数保持在一个相对平稳的状态。在微动磨

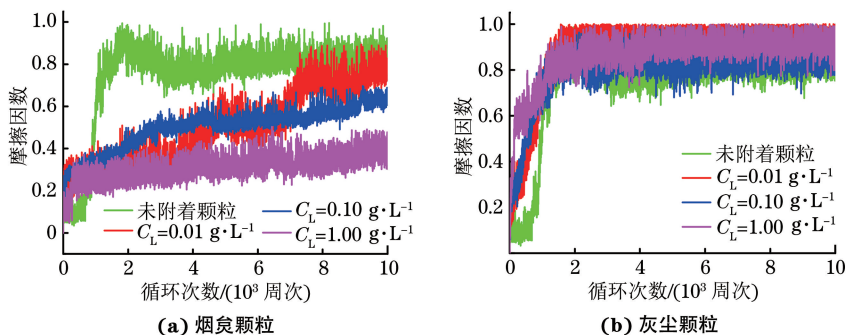


图 4 表面未附着和附着不同数量不同颗粒微动磨损时试样的摩擦因数曲线

Fig.4 Friction coefficient curves of samples without and with different number of different particles on surfaces during fretting wear:

(a) soot particles and (b) dust particles

损初始阶段,附着灰尘颗粒试样的摩擦因数增大速率高于未附着颗粒试样的,这是因为灰尘颗粒尺寸较大,在微动磨损过程中灰尘层较快发生破坏,颗粒各自分散并参与磨损,因此摩擦因数增大速率较大。

由图 5 可知,随着表面附着烟炱数量的增加(即 C_L 的增加),试样的平均摩擦因数降低,且附着烟炱颗粒的平均摩擦因数均小于未附着颗粒试样的,说

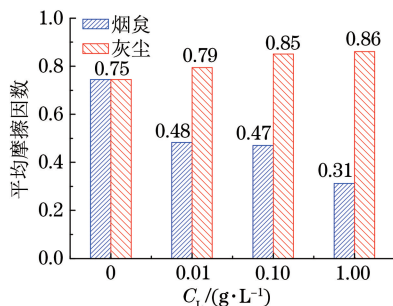


图 5 表面未附着和附着不同数量不同颗粒微动磨损时试样的平均摩擦因数

Fig.5 Average friction coefficients of samples without and with different number of different particles on surfaces during fretting wear

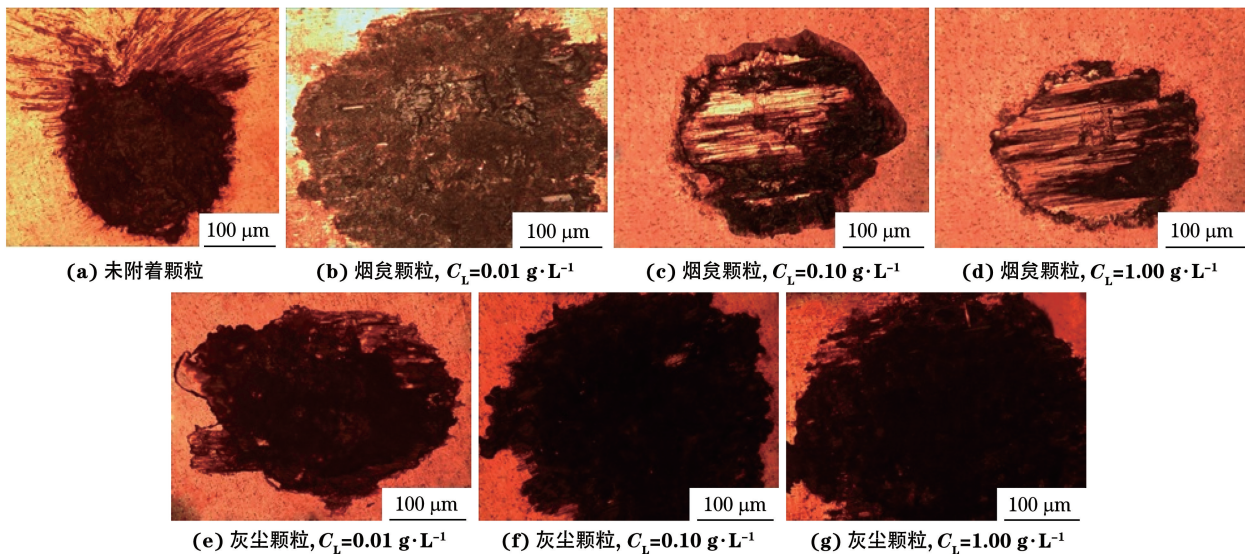


图 6 表面未附着和附着不同数量不同颗粒微动磨损后试样表面磨痕的 OM 形貌

Fig.6 OM morphology of surface wear scar of samples without (a) and with (b-g) different number of different particles on surfaces after fretting wear: (b-d) soot particles and (e-g) dust particles

由图 7 可以看出:未附着颗粒和附着不同数量颗粒微动磨损形成的磨痕轮廓均呈“U”或“V”形,这是滑移区的典型特征;随着颗粒数量的增加,接触边界的磨屑、剥层的堆积减少,说明颗粒的加入延缓了紫铜表面的磨损。未附着颗粒表面的磨痕宽度和磨痕深度分别为 $550.77, 13.33 \mu m$ 。当滴加的烟炱悬浮液的 C_L 分别为 $0.01, 0.10, 1.00 g \cdot L^{-1}$ 时,磨痕宽度分别为 $511.78, 487.18, 438.97 \mu m$;磨痕深度分

明烟炱颗粒对摩擦副起到了一定的润滑作用。试样虽经过抛光处理,但表面仍存在凹凸,在微动过程中粒径小的烟炱颗粒填充或嵌入低凹处,从而降低了摩擦因数;烟炱数量越多,填充的低凹处越多,摩擦因数越小。随着表面附着灰尘数量的增加,试样的平均摩擦因数增大,且附着灰尘颗粒的平均摩擦因数高于未附着颗粒试样的。这是因为灰尘颗粒较大,无法填充试样表面凹坑,甚至部分硬质颗粒嵌入试样表面导致表面粗糙,从而使摩擦因数增大。

2.3 磨痕形貌

由图 6 对比可知:附着烟炱颗粒微动磨损后,试样磨痕中心均有黏着区出现,随着烟炱数量的增加,磨痕面积减小,黏着区面积增大。当烟炱数量较少,即 C_L 为 $0.01 g \cdot L^{-1}$ 时,形成的烟炱层较薄,容易发生破坏并被排出接触区域,导致摩擦副的直接对磨,因此磨痕中心的磨损很严重。附着灰尘颗粒微动磨损后,试样的磨痕面积随灰尘数量的增加而增大,磨痕区域存在大量黑色磨屑或氧化物,接触中心几乎无黏着区出现,这说明整个磨痕区域均为微滑磨损区^[1]。

别为 $7.56, 4.64, 3.21 \mu m$ 。当灰尘悬浮液的 C_L 分别为 $0.01, 0.10, 1.00 g \cdot L^{-1}$ 时,磨痕宽度分别为 $447.18, 396.92, 334.36 \mu m$;磨痕深度分别为 $7.29, 4.85, 3.97 \mu m$ 。可见附着颗粒磨损后试样表面的磨痕宽度和磨痕深度均小于未附着颗粒磨损后的,且磨痕宽度和磨痕深度随着颗粒数量的增加持续减小。

由图 8 可以看出:未附着颗粒微动磨损后,试样表面磨痕有氧化物积累,且有少量磨屑附着在接触

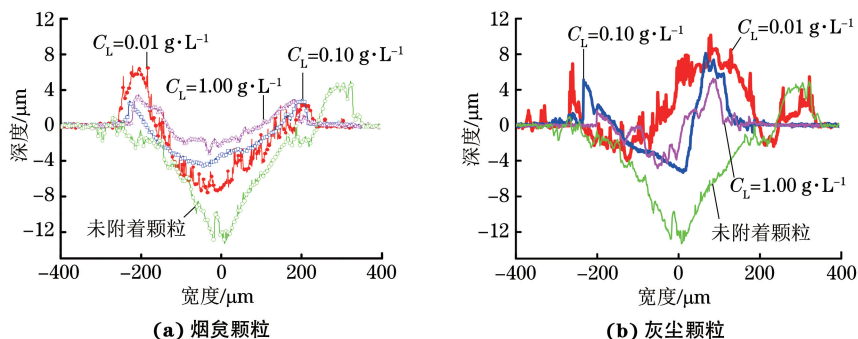


图7 表面未附着和附着不同数量不同颗粒微动磨损后试样表面磨痕的轮廓

Fig.7 Profiles of surface wear scars of samples without and with different number of different particles on surfaces after fretting wear:

(a) soot particles and (b) dust particles

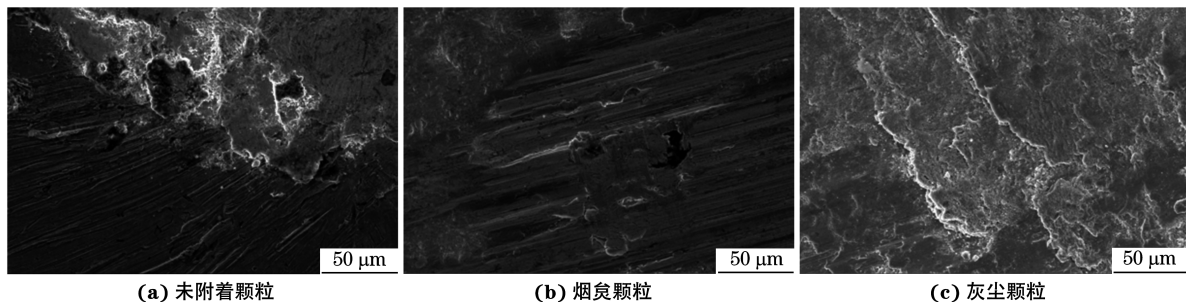
图8 表面未附着和附着相同数量不同颗粒微动磨损后试样表面磨痕的SEM形貌 ($C_L = 0.10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)

Fig.8 SEM micrographs of surface wear scars of samples without (a) and with (b-c) different particles on surfaces after fretting wear

($C_L = 0.10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$): (b) soot particles and (c) dust particles

区域,接触区域周围有明显的毛刺;附着烟炱颗粒微动磨损后,磨痕中心因材料的磨损转移及颗粒的脱落而出现平行于滑动方向的犁沟,试样表面发生塑性变形;随着磨损时间的延长,发生塑性变形的铜与对磨副之间发生焊合,造成金属铜的转移形成黏着磨损。此外,附着灰尘颗粒微动磨损后,接触区域磨屑大量积累,并逐渐形成一层氧化膜;随着微动磨损的进行,氧化膜在摩擦力的作用下发生破裂,试样表面萌生裂纹,当表层铜相磨损后,硬度较高的氧化物颗粒暴露在试样表面,承受载荷作用并往复于摩擦副之间加速磨损,因此试样表面出现平行于滑动方向的划痕。

2.4 磨损量

由图9可知:随着烟炱或灰尘数量的增加,试样的磨损体积和磨损率降低,其中附着灰尘颗粒时的磨损体积和磨损率始终高于附着烟炱颗粒的,说明附着灰尘颗粒时试样的磨损更加严重。

2.5 切向力-微滑动幅值曲线

由图10可以看出:未附着和附着不同数量颗粒微动磨损时试样表面的切向力-微滑动幅值(F_t - D)曲线均主要呈平行四边形,说明铜的微动运行均处于滑移区^[12];附着烟炱颗粒的切向力-微滑动幅值曲线部分呈现椭圆形状,说明部分表面发生了较严重的黏着^[13],这应该是磨损发热导致金属软化,随后

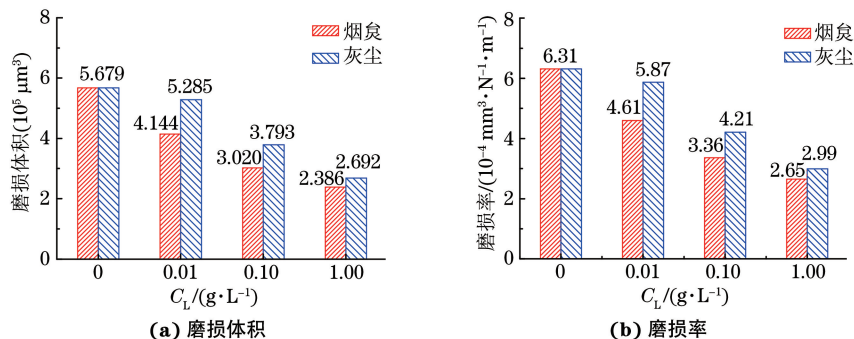


图9 表面未附着和附着不同数量不同颗粒微动磨损后试样的磨损体积和磨损率

Fig.9 Wears volume (a) and wear rates (b) of samples without and with different number of different particles on surfaces after fretting wear

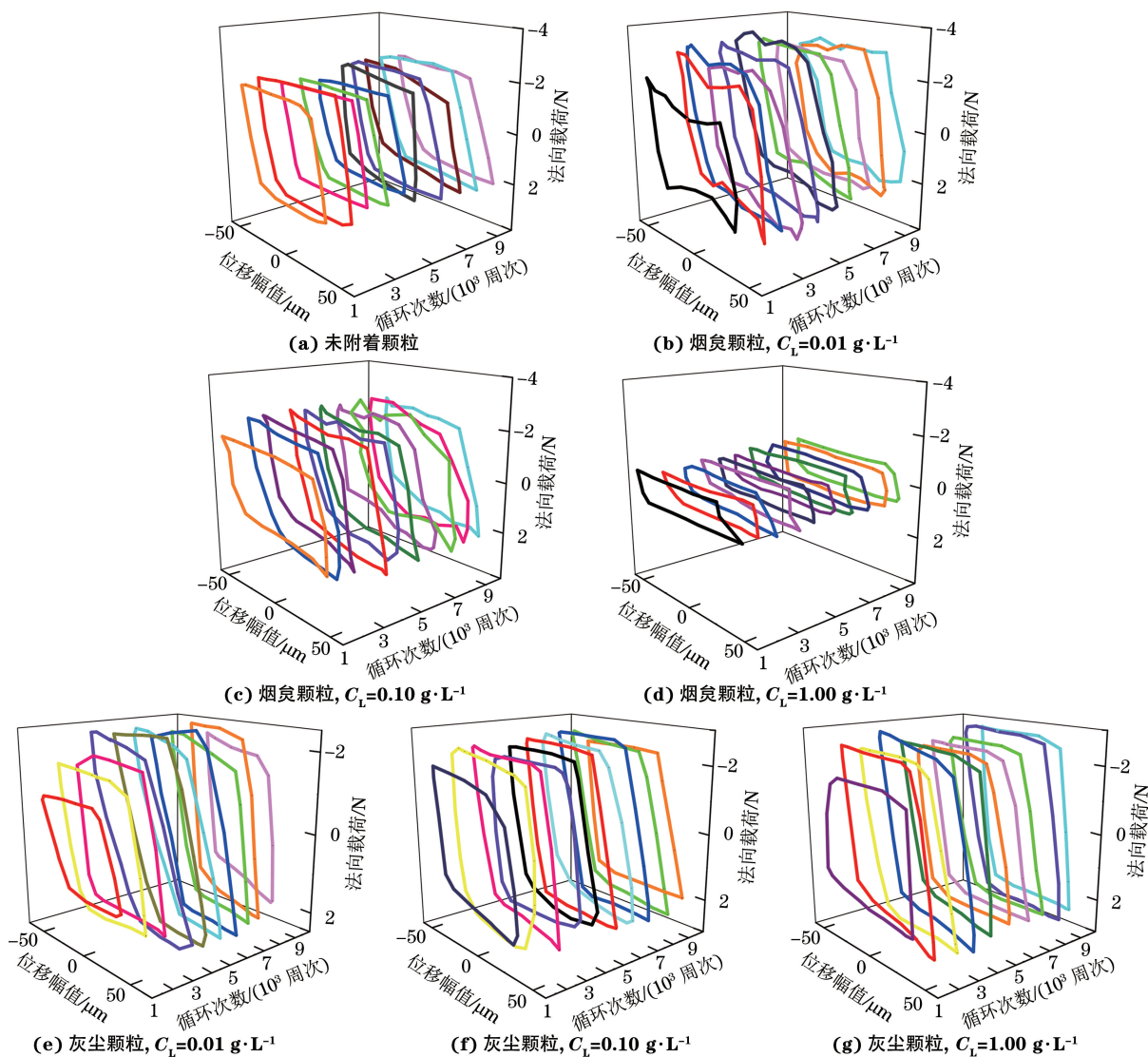


图 10 表面未附着和附着不同数量不同颗粒微动磨损时试样的 F_x - D 曲线

Fig. 10 F_x - D curves of samples without (a) and with (b-g) different number of different particles on surfaces during fretting wear: (b-d) soot particles and (e-g) dust particles

发生了咬合和黏着。

不同循环次数下的切向力-微滑动幅值曲线为封闭环,其面积即为摩擦耗散能^[14]。由图 11 可以

看出:随着微动磨损的进行(循环次数的增加),未附着和附着不同数量不同颗粒条件下的摩擦耗散能均呈现增长趋势,说明试样克服摩擦力所做的功越来越

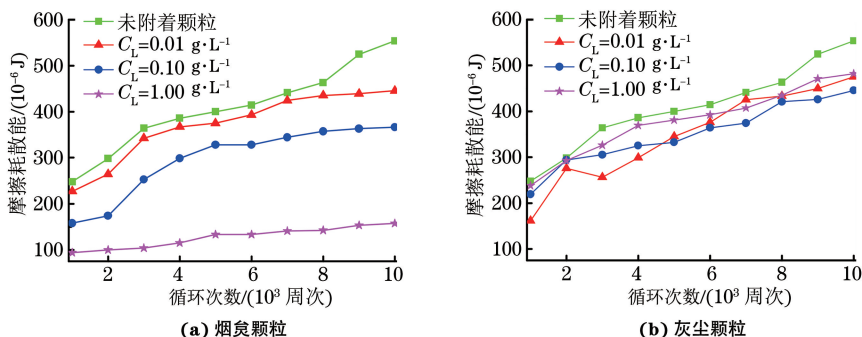


图 11 表面未附着和附着不同数量不同颗粒试样的摩擦耗散能随循环次数的变化曲线

Fig. 11 Friction dissipated energy vs number of cycle curves of samples without and with different number of different particles on surfaces: (a) soot particles and (b) dust particles

越大;在相同循环次数下,烟炱颗粒数量越多,试样的耗散能越小,即克服摩擦力所做的功越小,灰尘颗粒数量的影响则不存在明显的规律。

3 结 论

(1) 当紫铜表面附着导电性较差的烟炱或灰尘颗粒进行微动磨损时,其初始阶段接触电阻出现较大峰值,随后表面颗粒层因磨损而破坏,导致接触电阻急剧下降,最终稳定在一定范围内波动;与附着灰尘颗粒的相比,附着烟炱颗粒的接触电阻更小,微动磨损过程中的导电性能更优。

(2) 与表面未附着颗粒时的相比,表面附着烟炱颗粒微动磨损后的摩擦因数较低,附着灰尘颗粒的磨损因数较高;且表面附着烟炱颗粒数量的增加会降低试样的摩擦因数,而附着灰尘颗粒数量的增加则会增大试样的摩擦因数;两种颗粒的引入均延缓了试样的微动磨损,磨痕宽度、磨痕深度和磨损量均与颗粒数量呈负相关。

参考文献:

- [1] 刘利彪,周怡琳.典型尘土颗粒对电接触的影响[J].机电元件,2011,31(6):6-11.
- [2] 吕阳.环境污染物对电接触和电子设备防护可靠性的影响研究[D].北京:北京邮电大学,2016.
- [3] 冯萃峰.失效手机电接触故障表面的污染物特性及形成机理[D].北京:北京邮电大学,2010.
- [4] 刘宏达.尘土中几种典型成分对电接触性能的影响[D].北京:

北京邮电大学,2011.

- [5] ZHANG J G. Effect of dust contamination on electrical contact failure[C]//Electrical Contacts: 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh: IEEE, 2007: 9983947.
- [6] 王浩.硬质颗粒及有机污染物对电触点可靠性影响的实验研究[D].北京:北京邮电大学,2010.
- [7] 周怡琳,王鹏,葛世超,等.长期贮存航天电连接器尘土污染的研究[J].电工技术学报,2014,29(7):269-276.
- [8] BRAUNOVIC M, MYSHKIN N K, KONCHITS V V. Electrical contacts: Fundamentals, applications and technology[M]. Boca Raton: CRC press, 2006.
- [9] 郭凤仪,任志玲,马同立,等.滑动电接触磨损过程变化的实验研究[J].电工技术学报,2010,25(10):24-29.
- [10] LIU X L, CAI Z B, LIU S B, et al. Effect of roughness on electrical contact performance of electronic components[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 74: 100-109.
- [11] 李正阳.贫铀及其 Ti/TiN 多层涂层的切向微动磨损性能研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [12] ZHU M H, ZHOU Z R. On the mechanisms of various fretting wear modes[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1378-1388.
- [13] TRINH K E, TSIPENYUK A, VAREMBERG M, et al. Wear debris and electrical resistance in textured Sn-coated Cu contacts subjected to fretting[J]. Wear, 2015, 344/345: 86-98.
- [14] LAPORTE J, FOUVRY S, ALQUIER O. Prediction of electrical contact resistance failure of Ag/Ag plated contact subjected to complex fretting-reciprocating sliding[J]. Wear, 2017, 376/377: 656-669.

(上接第 11 页)

- [16] AYATOLLAHI M R, RAZAVI S M J, YAHYA M Y. Mixed mode fatigue crack initiation and growth in a CT specimen repaired by stop hole technique[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 145: 115-127.
- [17] AYATOLLAHI M R, RAZAVI S M J, CHAMANI H R. A numerical study on the effect of symmetric crack flank holes on fatigue life extension of a SENT specimen[J]. Fatigue &

Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014, 37(10): 1153-1164.

- [18] SHIN C S, WANG C M, SONG P S. Fatigue damage repair: A comparison of some possible methods[J]. International Journal of Fatigue, 1996, 18(8): 535-546.
- [19] 孔璞萍,刘志平,周凯,等.起重机金属结构裂纹的复合修复方法[J].中国机械工程,2018,29(13):1610-1614.