

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.06.013

银石墨复合镀层的摩擦磨损性能和导电能力

赵生光^{1,2}, 夏延秋¹, 陈俊寰¹, 叶志国³

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 2. 神华集团有限责任公司, 北京 100011; 3. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 310063)

摘要: 采用电镀方法分别在铜基体上制备了纯银镀层和银石墨复合镀层, 并采用X射线衍射仪(XRD)和扫描电镜(SEM)确定了镀层的结构和成分。用MFT-R4000高速往复摩擦磨损试验机, 考察不同镀层在润滑条件下的摩擦磨损性能; 用MFT-R4000载流往复摩擦磨损试验机, 考察了载流条件下复合镀层的摩擦磨损性能; 用HLY-200A回路电阻测定仪测定镀层的导电性。用SEM和X射线能谱分析仪(EDX)观察和分析磨痕表面形貌及元素组成。结果表明, 银石墨复合镀层不但提高了摩擦副的抗磨和减摩性能还提高了材料的导电能力, 降低了接触电阻。

关键词: 银石墨复合镀层; 润滑脂; 润滑性能; 导电能力

中图分类号: TG174.144; TG115.58;

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2016)06-0090-09

Conductivity and Tribological Properties of Ag-graphite Composite Coating Based on Copper Substrate

ZHAO Sheng-guang^{1,2}, XIA Yan-qi¹, CHEN Jun-huan¹, YE Zhi-guo³

(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206; 2. Shenhua Group Corporation Ltd., Beijing 100011; 3. College of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 310063)

Abstract: Silver and Ag-graphite composite coatings based on the copper substrate were prepared by electroplating. Phase constituents and morphology of the coatings were determined by X-ray diffraction (XRD) and the scanning electron microscopy (SEM). Tribological properties and electrical conductivities of these plating materials were tested by MFT-R4000 high speed reciprocating friction and wear tester, MFT-R4000 current-carrier friction and wear tester and HLY-200A circuit resistance tester, respectively. SEM and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) were employed to analyze the wear surfaces and typical elements. Results show that the composite coating can improve the conductivity of the substrate material and improve the antifriction and wear resistance property.

Keywords: Ag-graphite composite coating; grease; lubricating performance; conductivity

0 引言

在电力系统和自动控制系统中, 广泛存在着电接触现象, 如电刷、电器开关、输变电设备、电力机车的受电弓与馈电线等属于电接触, 其承担接通和关闭电源的作用。理想的电联接材料需

满足电阻率低、热导率高、熔点和沸点高、热稳定性好、热容量大、起弧最低电流和电压高等要求, 以达到耐电弧烧蚀的目的。另外为了减少污染和防止金属腐蚀, 需要添加导电润滑脂, 不但起到抗磨、减摩, 降低电阻, 防腐、防锈的作

收稿日期: 2016-07-06; 修回日期: 2016-09-13

通讯作者: 夏延秋(1964—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 材料的摩擦磨损及其理论; Tel: (010) 6177 2251; E-mail: xiayq@ncepu.edu.cn

网络出版日期: 2016-12-14 15:49; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161214.1549.016.html>

引文格式: 赵生光, 夏延秋, 陈俊寰, 等. 银石墨复合镀层的摩擦磨损性能和导电能力[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 90-98. ZHAO S G, XIA Y Q, CHEN J H, et al. Conductivity and tribological properties of Ag-graphite composite coating based on copper substrate[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 90-98.

用,还起到防灰尘的目的。滑动电接触担负着传递电讯号和电能的重要作用,其机械性能和电性能的优劣直接影响着电机、仪表、电路和电器的可靠性、稳定性、精确度和服役寿命^[1-4]。

载流条件下的摩擦磨损过程要复杂得多,它既受到机械因素的制约,又受到电流热效应的影响,同时还被工况环境所影响^[5]。在载流条件下,电流热效应所释放热量与摩擦热结合,放大接触副的损伤,导致摩擦副工作条件更苛刻^[5-6]。理想的滑动电接触材料既要具备良好的减摩耐磨性能,又要具备优异的电接触性能^[7]。镀银层具有优良的导电性、导热性、化学稳定性,银基薄膜在苛刻环境下具有良好的润滑性能,精密运动部件表面沉积一层较软的银或银基薄膜可以起到有效的减摩抗磨作用^[8-9]。因此,银基滑动电接触材料常作为电机和电子器件中集电环、导电换向片、整流片、导电刷、电位器等滑动接触导电元件的关键材料。目前,已研究的低压电器用银基电触头材料有数百种^[10]。这些银基材料可以有效降低接触电阻,减少摩擦和提高电接触部位的耐磨性能。但随着科技的发展,对电器元件的耐磨性提出了更高的要求,单一的银膜润滑很难继续满足需求。对此,国内外学者做了大量的关于银合金镀层、复合镀层和银基复合材料的研究^[11]。邓书山等^[12]发现银-石墨复合材料具有良好的耐磨性和导电性;凤仪等^[13]研究了碳纳米管-银-石墨复合材料摩擦磨损性能,研究发现带电条件下复合材料减摩抗磨性比不带电条件差,磨损量随电流密度增大而增加,并且在电磨损条件下,复合材料的磨损体积与压力成U型变化。刘道新等^[14]研究了Ag/Ni多层膜对钛合金微动磨损和微动疲劳抗力的影响,发现Ag/Ni多层膜致密度高、晶粒细致,并具有良好的润滑作用和抗疲劳性能,能够显著改善Ti811钛合金耐微动磨损和抗微动疲劳性能。王新平等^[15]研究发现,随着Ag粒度减小,Ag-MoS₂复合材料中自润滑材料在基体中的分散性越好,从而能够减轻摩擦表面的剪切应力,达到减摩抗磨作用。郝俊英等^[16-17]发现了DLC薄膜和二硫化钼膜都可以与油脂形成固体-油脂复合润滑体系,这种体系具有良好的减摩抗磨作用。

因此,文中作者采用电镀的方法制备了铜基银镀层及银石墨复合镀层材料,并借鉴固体-脂复合润滑状态的优良减摩抗磨作用,考察对比了银

石墨复合镀层和银镀层在脂润滑条件下的摩擦磨损性能,分析其减摩抗磨作用机理;采用回路电阻测定仪考察了银镀层对材料导电性能的影响。以期为降低电接触部位接触电阻、提高其耐磨性能提供理论与应用技术支持。

1 试验准备

1.1 镀层的制备

选用铜片(纯度 $\geq 99.9\%$)作为电镀基材,先用砂纸打磨去除污垢氧化皮,再预镀薄银使基体材料表面镀上一层银膜,预镀银镀层可以促进基体与镀层之前的结合;然后,使用阴极、阳极电镀设备在氰化体系中进行电镀银层和银石墨复合镀层,最后用蒸馏水水洗,吹干,即得到所需的镀层材料。使用XRD(D8ADVANCE型)分析镀层物相,扫描步径 0.02° ,扫描角度 $20^\circ\sim 80^\circ$ 。图1为试验用银镀层和银石墨复合镀层XRD图谱。天然石墨根据片层堆积方式的不同分为两种晶体结构,即六方形结构Graphite-2H与菱形结构Graphite-3R^[20]。由图1可见,试验用石墨有2个明显的衍射峰,分别对应Graphite-2H和Graphite-3R标准pdf卡片各强度衍射峰,其中在 26.54° 出现的衍射峰对应着石墨的2H相与3R相^[21],说明试验用石墨已经具备天然石墨的晶体特征。由图1可见,银层与银石墨复合层的衍射峰与Silver-3C衍射峰对应^[19],使用电沉积方法制备的银的晶体结构为面心立方结构,点阵常数 $a=b=c=4.086$ ^[20],银石墨复合镀层的石墨衍射峰很弱,这是因为石墨所占的质量分数很低。由XRD结果可知,所制备的镀层材料纯度较高,无其它晶相或杂相含量很低。

图2为复合镀层的截面形貌和元素线扫描能谱。其中白色部分为复合镀层截面,可以看出,复合镀层与铜基体连接紧密,过渡自然,说明镀层具有良好的结合力;复合镀层能谱结果显示含有银与碳元素,说明复合镀层的成分为银与石墨。

用HX-1000TM/LCD显微硬度计测量铜基体和银镀层的维氏硬度(测量参数为:载荷为10 g,加载时间为20 s)。根据GB/T5270-200X标准,采用弯曲试验定性检测结合力:在直径1 mm(试片尺寸为50 mm \times 100 mm \times 1 mm)的轴上将镀层试片弯曲 180° ,反复弯曲直至断裂,镀层未起皮脱落。表1给出了3种材料的物理和力学性能。

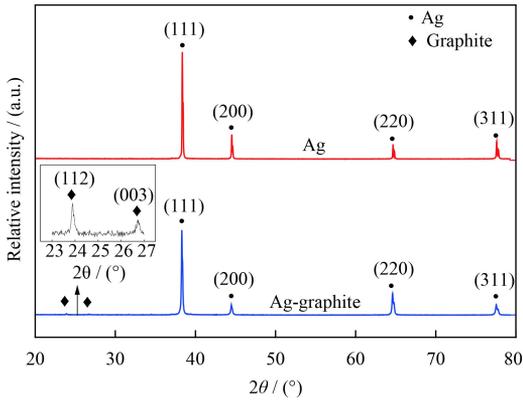


图1 银镀层和银石墨复合镀层的XRD图谱

Fig.1 XRD patterns of silver coating and Ag-graphite composite coating

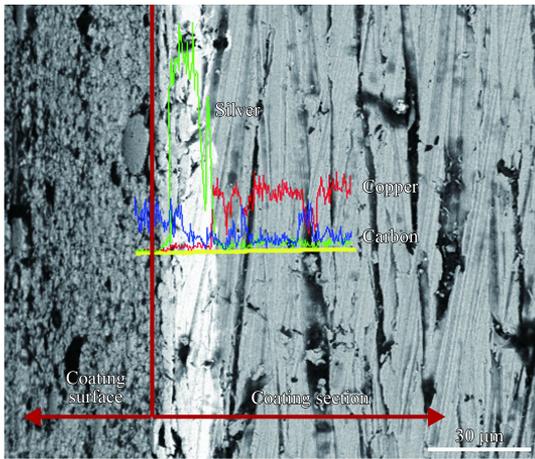


图2 复合镀层截面形貌线扫描能谱

Fig.2 Cross section morphology and line scanning energy spectra of composite coatings

表1 材料的物理和力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of samples

Sample	Thickness/ μm	Hardness/HV	Adhesion
Copper substrate	0	103	
Silver coating	20	105	Good
Ag-graphite composite coating	25	40	Good

1.2 润滑脂的制备

在实验室条件下以聚 α 烯烃(PAO)为基础油,以有机胺和异氰酸酯反应产物作为稠化剂,制备了聚脲润滑脂(JNZ);以PAO为基础油,以锂皂为稠化剂,制备了锂基润滑脂(LJZ);一定量的JNZ与LJZ复配制备了新脂(JNLJZ)。采用北京冠测精电仪器设备有限公司生产的体积表面电阻测试仪,测定润滑脂的体积电阻率;采用HLY-200 A型回路电阻测试仪(铜制母排)测量两种润滑脂和

实验材料的接触电阻,其中拧紧力矩为10 N·m,通电时间为10 s,通电电流为100 A;根据国家标准GB/T 3498、GB/T269和GB/T 7326-1987分别测试了润滑脂的滴点、锥入度和铜片腐蚀性能。表2示出了3种润滑脂的理化性能参数。

表2 3种润滑脂的理化性能

Table 2 Typical physical-chemical properties of three greases

Grease	JNZ	LJZ	JNLJZ
Cone penetration(1/4 mm)/mm	82.6	75.9	81.4
Dropping point / $^{\circ}\text{C}$	274	295	293
Copper corrosion (100 $^{\circ}\text{C}$, 24 h)	1 a	1 a	1 a
Volume resistivity/ ($10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$)	3.53	2.61	3.30
Contact resistance (0°)/ $\mu\Omega$	39.1	37.5	42.9
Contact resistance (10°)/ $\mu\Omega$	38.9	37.4	42.7

1.3 摩擦磨损特性测试

采用中科院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室研制的MFT-R4000型高速往复摩擦磨损试验仪和MFT-R4000载流往复摩擦试验仪进行摩擦学性能评价,摩擦副为球盘点接触(摩擦副上试样钢球固定),属滑动摩擦,往复速度 $v=s \times f$,其中摩擦振幅 s 为5 mm, f 为往复频率,单位为Hz。上试样为AISI 52100标准试验钢球(0.15~0.35 Si, 0.95~1.05 C, 0.027 P, 1.30~1.65 Cr, 0.20~0.40 Mn, 其余是Fe),硬度为705~757 HV,表面粗糙度为 $R_a=0.05 \mu\text{m}$,直径为5 mm和6 mm。下试样为铜基体材料和镀层材料,试验前后用蒸馏水和石油醚分别超声清洗10 min,每次试验前涂抹0.2 g润滑脂于摩擦副之间。摩擦因数由计算机自动记录,磨痕宽度由光学显微镜测得。采用ZEISS-EVO-18型扫描电子显微镜对试样磨损表面形貌进行观察,并用能谱仪(EDX)对试样磨损表面的主要元素组成进行分析。

2 结果与讨论

2.1 材料试件的接触电阻

如表3所示为基体材料和镀层材料的接触电阻,可以看出镀层材料的初始接触电阻和终止接触电阻均比基体材料要小,这说明银镀层和复合镀层均能改善基体材料的导电性能。

2.2 材料试件的摩擦磨损性能

图3示出了室温条件下,镀层材料分别在干摩

表3 材料的接触电阻

Table 3 Contact resistance of samples

Sample	Initial contact resistance/ $\mu\Omega$	Final contact resistance/ $\mu\Omega$	Stabilizing coefficient
Copper substrate	24.8	24.7	1.003 6
Silver coating	20.3	20.3	1.003 7
Ag-graphite composite coating	21.5	21.4	1.004 6

擦和润滑脂润滑(载荷: 10 N, 频率: 2 Hz, 振幅: 5 mm)条件下试验30 min的平均摩擦因数和磨痕宽度。由图3(a)可以看出, 在干摩擦和润滑脂条件下, 银石墨复合镀层材料的摩擦因数 < 银镀层材料 < 基体材料, 其中, 在JNLJZ润滑下3种材料的摩擦因数均最小, 复合镀层的摩擦因数可达0.048, 与基体材料相比, 摩擦因数最高可降低51.1%(干摩擦下)。从图3(b)看出, 与干摩擦相比, 脂润滑下材料的磨痕宽度均较小。在脂润滑和干摩擦下, JNLJZ润滑下的复合镀层磨痕宽度最小, 可达0.305 mm。不难发现脂润滑条件下的复合镀层材料具有优异的减摩抗磨性能。

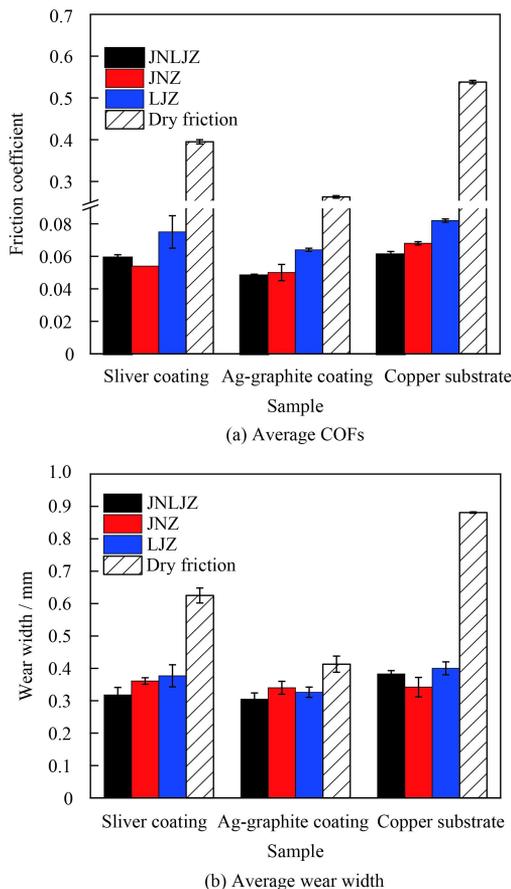


图3 镀层材料的平均摩擦因数和磨痕宽度

Fig.3 Average COFs and average wear width of the cladding materials

2.2.1 载荷对银石墨复合镀层减摩抗磨性能的影响

图4示出了在频率2 Hz、不同载荷(5、10、15和20 N)条件下, 镀层材料和基体材料在JNLJZ润滑条件下的平均摩擦因数和磨痕宽度。从图4(a)中可以看出, 在所选载荷范围内, 3种材料的摩擦因数均随着载荷的增大而逐渐增大, 但复合镀层的摩擦因数始终最低, 可达0.032; 与铜基材料相比, 银石墨复合的摩擦因数最高可降低44.8%; 与银镀层相比, 最高可降低30.7%。在高载荷下(20 N), 银镀层发生了严重的粘着磨损, 导致其摩擦因数急剧上升, 高达0.088。从图4(b)中可以看出, 3种材料的磨痕宽度随载荷增大而增大, 虽然复合镀层的磨痕宽度低于其余2种材料, 但相差不大。

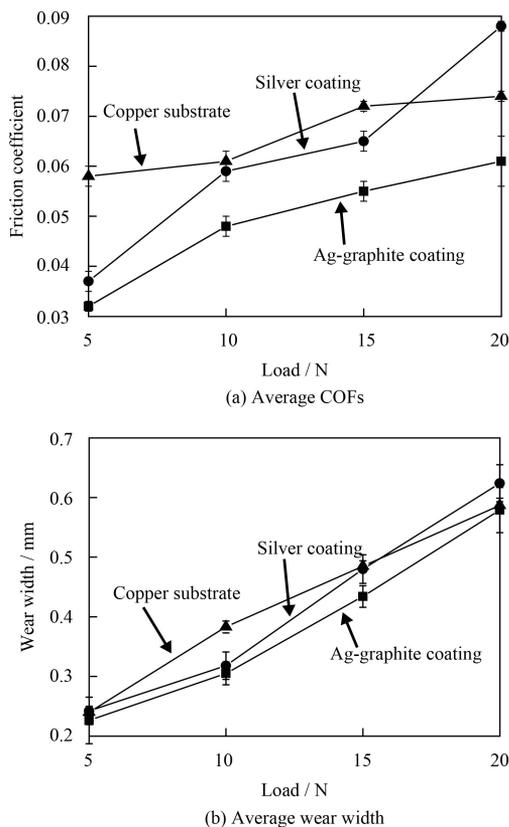


图4 平均摩擦因数和磨痕宽度随载荷变化的曲线

Fig.4 Average COFs and average wear width as a function of load

2.2.2 时间对银石墨复合镀层减摩抗磨的影响

为了进一步研究银石墨复合镀层的减摩抗磨机理, 考察了载荷10 N、频率2 Hz、幅度5 mm条件下时间对复合镀层摩擦磨损性能的影响。图5所示为3种材料的摩擦因数随时间变化曲线。可以看出, 干摩擦下, 银镀层的摩擦因数在约3 min后急

剧上升,接近于铜基体的摩擦因数,证明其磨损寿命较短,而银石墨复合镀层在9 min后才出现摩擦因数的急剧上升,接近于基体稳定阶段的摩擦因数。银镀层摩擦学性能较差是由于较软的银层容易在摩擦过程中产生严重的粘着磨损,而复合镀层磨损寿命虽然高于银镀层,但失效形式依然是摩擦副之间产生了粘着磨损。在JNLJZ润滑下,3种材料的摩擦因数呈现出逐渐减小的趋势,并且在开始1 min时减速最快,随后呈现出线性减小,这是由于磨合阶段接触表面微凸体较多,增大了摩擦过程中的剪切阻力,致使摩擦因数较大,而随着时间的推移,表面微凸体逐渐被磨平,同时润滑脂在摩擦表面逐渐形成边界润滑膜,导致摩擦因数逐渐减小,进入稳定磨损期。

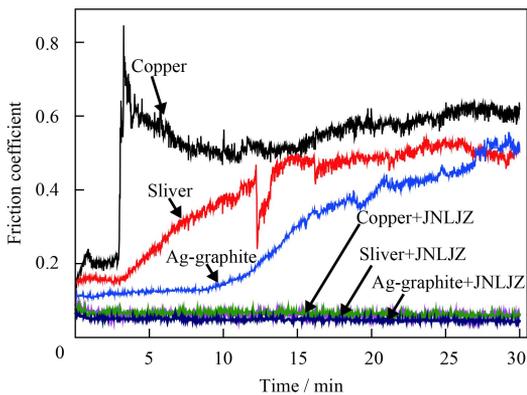


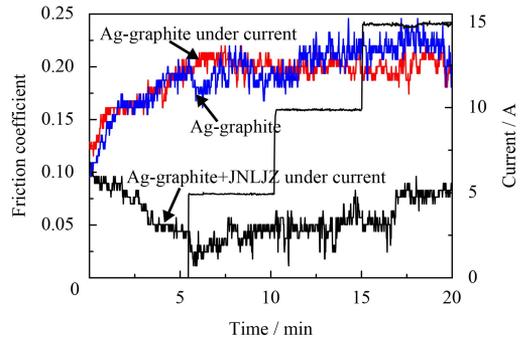
图5 室温下实时摩擦因数随时间变化的曲线

Fig.5 Friction coefficient as a function of time at room temperature

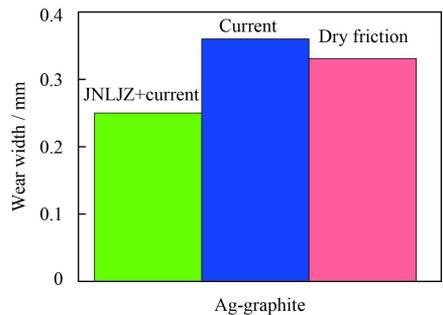
2.2.3 载流条件下银石墨复合镀层减摩抗磨性能

图6为载流条件下(电流0~15 A, 载荷5 N, 频率2 Hz), 银石墨复合镀层在不同润滑条件下的摩擦因数随时间变化曲线。从图中可以看出, 干摩擦情况下, 载流对摩擦因数的影响较小摩擦因数均随时间增大后趋于稳定。而脂润滑条件下, 在4 min左右进入稳定磨损期, 摩擦因数稳定在0.05左右, 随着电流增大, 摩擦因数出现最小值, 后逐渐增加。干摩擦时, 随着电流通过球盘接触点, 摩擦副表面产生收缩电阻, 电流密度瞬时增大, 从而释放大量的热量, 导致接触点处材料软化, 降低了滑动剪切力^[21], 但随着电流强度增大与时间推移, 电流的热效应导致了粘着磨损^[22], 引起了摩擦因数和磨损量的增加。脂润滑条件下的摩擦因数和磨损量最小, 但摩擦因数随时间和

电流的变化趋势与干摩擦相似, 都在加入电流时出现了最低的摩擦因数, 一方面是由于电流热效应导致材料表面软化, 剪切力降低, 另一方面, 瞬时的电流促使了表面的热活化和金属表面电荷的聚集, 导致表面吸附膜的进一步沉积^[23]。随着电流增大和时间增长, 电流的热效应导致了摩擦表面较大的塑形变形及表面吸附膜的部分分解, 引起润滑条件恶化, 摩擦因数上升。



(a) Friction coefficient as a function of time within 20 min at room temperature



(b) Wear width under above mentioned condition

图6 载流条件下, 银石墨复合镀层的摩擦因数与磨损宽度
Fig.6 Friction coefficient and wear width of Ag-graphite under current

2.3 磨损表面分析

图7分别示出了在JNLJZ润滑下(载荷10 N, 频率2 Hz)和干摩擦下的基体材料、银镀层和银石墨复合镀层的磨痕表面形貌。干摩擦下的铜基材料的磨斑宽而深, 并且摩擦表面存在大量的金属剥落区域和明显的犁沟(图7(a)(b)(c)), 这是由于: 钢球试样的热传导能力相对于铜较低, 产生了较大的界面热阻, 不利于摩擦区域热量的传导, 造成摩擦表面上聚集较多的热量, 导致摩擦表面附近软化, 局部区域甚至发生熔化现象, 致使接触的峰顶材料发生焊接, 产生了严重的粘着磨损; 此外, 在压力作用下摩擦副表面的微凸体压入铜块表面, 移动时使表面产生严重的塑性变形和疲劳

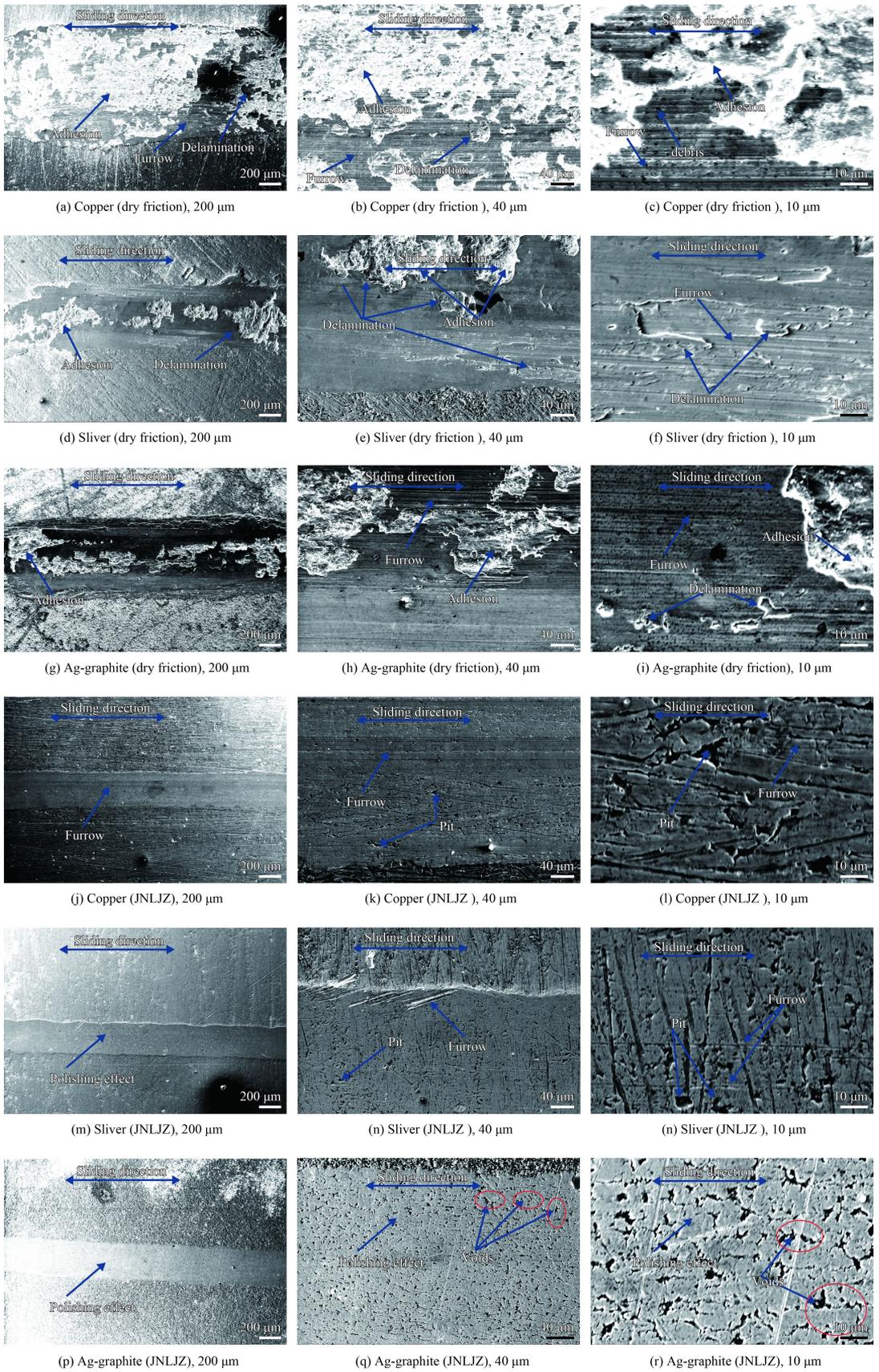


图 7 干摩擦和JNLJZ润滑条件下3种材料的磨损表面形貌

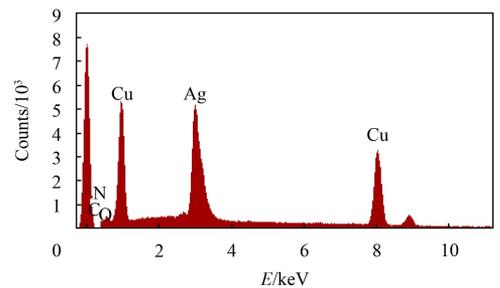
Fig.7 Morphologies of worn surface of samples under dry sliding and JNLJZ

破坏,出现了明显的剥落现象,剥落层沿滑动方向延伸,产生块状磨屑,在接触应力作用下在摩擦表面产生了较深的犁沟^[24];干摩擦下的银镀层材料的磨痕较宽,表面有明显的犁沟和剥落区域(图7(d)(e)(f)),但开始阶段时摩擦因数低且平稳。这是由于:在摩擦开始时,压力作用在较软的银膜上,使银膜相对铜基体滑动,引起摩擦表面的塑性流变,较软的银膜相对对偶表面转移,形成转移膜,使摩擦发生在软金属与转移膜之间,从而改善了摩擦副表面的应力状态,降低了滑动摩擦剪切力,致使摩擦因数初始阶段较低,但随着摩擦时间的推移,一方面,往复的摩擦剪力使摩擦表面产生疲劳破坏,沿滑动方向产生了层状剥落,剥落层脱落产生磨屑,出现磨粒磨损,另一方面,随着磨损的加剧,产生大量的摩擦热,导致了沿摩擦方向迁移的粘着磨损,致使镀层磨穿,摩擦因数急剧上升接近于基体材料^[25,26];干摩擦下的复合镀层磨痕呈现黑色,伴有连续的剥落区域,但犁沟较浅,磨痕表面相对光滑(图7(g)(h)(i)),一方面复合镀层能够起到银镀层的减摩抗磨作用,另一方面,由于低强度的石墨在摩擦表面极易废碎,成为小粒度黑色颗粒平铺在摩擦表面,作为摩擦第三体,起到了润滑作用,导致其摩擦表面较为光滑,延长了磨损寿命^[27]。脂润滑下的铜基材料的磨痕窄而浅,表面有轻微刮伤和塑性变形(图7(j)(k)(l)),这主要是由于:在摩擦进程中,润滑脂能够在金属表面形成剪切强度远低于金属的吸附膜,防止摩擦表面直接接触,避免表面发生干摩擦时的粘着磨损,但摩擦表面的部分微凸体仍会相互碰撞,产生冲击应力,使微凸体受到重复的冲击和变形,是材料受到积累损伤而变弱,最后引起局部的材料脱落^[23]。银镀层的磨痕表面光滑,但磨痕边缘出现了“山丘”状结构及细小的划痕(图7(m)(n)(o)),这是由于脂润滑起到了有效的减摩抗磨作用,避免了粘着磨损。在压力和切应力反复挤压作用下,在磨痕中部,较软的银层呈现出抛光作用,而磨痕两侧由于挤压作用形成了“山丘”状结构及细小的划痕。复合层的磨痕表面呈现出抛光作用,并且磨痕表面出现了镀层内部的孔隙(图7(p)(q)(r)),一方面由于脂润滑的减摩抗磨作用,摩擦表面仅产生塑性变形,反复的挤压变形产生了抛光作用,另一方面复合镀

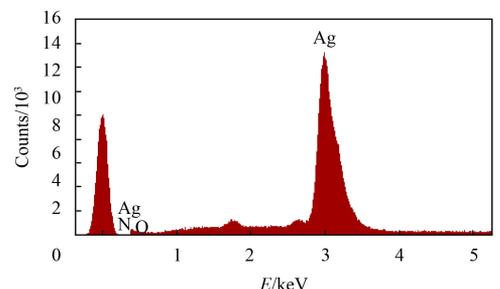
层固有的孔隙能够储存磨屑,增加了摩擦表面的光洁程度,起到减摩抗磨作用。

为了进一步研究复合镀层在脂润滑下的摩擦磨损机理,对复合镀层摩擦表面进行了EDX分析。

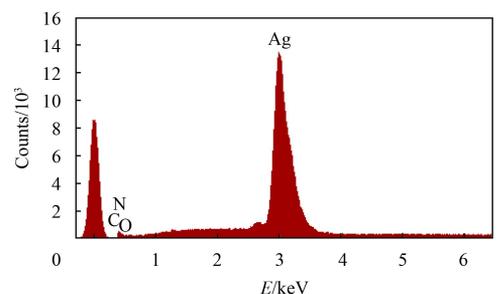
图8示出了载荷为10 N、频率为2 Hz,复合镀层在干摩擦和脂润滑条件下磨痕表面的主要元素组成。从图8(a)可以看出,干摩擦下的复合镀层磨痕表面含有Ag、O和Cu元素,磨痕表面的大量的Cu元素表明了干摩擦下由于剧烈的疲劳破坏和粘着磨损,复合镀层已经被磨穿,铜基体裸露在外。从表4可以看出,干摩擦下复合镀层磨痕表面含氧量最多,表明其摩擦行为较为剧烈,在摩擦区域产生大量的热,较高的温度进一步催化了镀层和基体材料的氧化反应。由于复合镀层中石墨含量很低($<3\%$),XRD图谱已显示复合镀层中石墨的衍射峰很弱(如图1),并且C元素原子质量较轻,所以EDX并未检验出C元素的存在。从图8(b)



(a) Ag-graphite coating (dry friction)



(b) Silver coating (JNLJZ)



(c) Ag-graphite coating (JNLJZ)

图8 银镀层和银石墨镀层的磨痕表面EDX分析

Fig.8 EDX analysis of the silver coating and Ag-graphite coating

表4 磨痕表面元素质量分数

Table 4 Contents of the typical elements on the worn surfaces

Element	(w/%)		
	Ag	O	Cu
Ag-graphite	37.51	5.71	56.79
Silver+JNLJZ	95.12	4.88	
Ag-graphite+JNLJZ	96.46	3.54	

可以看出,脂润滑下的银镀层的磨痕表面仅含有Ag与O元素组成,从表4可以看出,摩擦表面O的含量低于干摩擦下的银石墨复合镀层,表明润滑脂能够有效地将摩擦副接触表面隔绝起来,并在金属表面形成吸附膜,起到润滑作用,有效地改善摩擦状况,所以摩擦表面生成的氧化物较少。图8(c)示出了脂润滑下的银石墨复合镀层的磨痕表面元素组成,从表4中可以看出,相比于脂润滑下的银镀层,复合镀层的O元素与Ag元素的质量比进一步降低,间接表明了有石墨的自润滑作用,进一步改善了摩擦表面的润滑状态,提高了复合镀层的抗氧化能力。

3 结论

(1) XRD分析表明,制备的镀层材料具有较高的纯度和一定的膜层厚度,粘附性能良好。

(2) 干摩擦条件下,相比于铜基体,银镀层和银石墨复合镀层的减摩和耐磨性能大幅度提高。

(3) 不同的润滑脂大幅度提高了3种摩擦副的抗磨和减摩性能,脂润滑下的银石墨复合镀层具有最好的减摩抗磨性能,与铜基体相比摩擦因数最高可减小51.1%,磨痕宽度最高可降低53.1%。

(4) SEM观察发现,JNLJZ润滑脂具有优异的润滑性能,磨痕表面光滑平整,提高了摩擦副的抗磨性能。

参考文献

[1] 钱刚,凤仪,张学斌,等.铜基自润滑电接触复合材料研究综述[J].表面技术,2016,45(1):7-12,27.
QIAN G, FENG Y, ZHANG X B, et al. Review on research of Cu-based self-lubricating electrical contact composites[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 7-12, 27 (in Chinese).

[2] SHIN W G, SONG Y S, SEO Y K. Correlation analysis of brush temperature in brush-type DC motor for predicting life[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(7): 2151-2154.

[3] SHIN W G, LEE S H. An analysis of the main factors on the wear of brushes for automotive small brush/type DC

motor[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(1): 37-41.

[4] JIA S G, LIU P, REN F Z, et al. Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways[J]. Wear, 2007, 262(7/8): 772-777.

[5] ZHAO H, BARBER G C, LIU J. Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current[J]. Wear, 2001, 249(5/6): 409-414.

[6] YI F, ZHANG M, XU Y. Effect of the electric current on the friction and wear properties of the CNT-Ag-G composites[J]. Carbon, 2005, 43(13): 2685-2692.

[7] 马光,孙晓亮.银基电接触材料改性及制备工艺[J].稀有金属快报,2007,26(10):14-19.
MA G, SUN X L. Modifying and manufacturing method of silver based electric contactor[J]. Rare Metals Letters, 2012, 26(10): 14-19 (in Chinese)

[8] 高晓明,孙嘉奕,胡明,等.沉积温度及膜厚对离子镀银膜结构及摩擦学性能的影响[J].机械工程材料,2007,31(7):11-14.
GAO X M, SUN J Y, HU M, et al. Effects of substrate temperature and film thickness on structure and tribological properties of Ag films prepared by ion plating[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(7): 11-14 (in Chinese).

[9] 高晓明,孙嘉奕,胡明,等.低温沉积Ag-Cu薄膜的耐原子氧和摩擦学性能[J].摩擦学学报,2013,33(3):245-252.
GAO X M, SUN J Y, HU M, et al. Atomic oxygen resistant and wear behavior of Ag-Cu films deposited at a low temperature[J]. Tribology, 2013, 33(3): 245-252 (in Chinese).

[10] 王松,付作鑫,王塞北,等.银基电接触材料的研究现状及发展趋势[J].贵金属,2013,34(1):79-83.
WANG S, FU Z X, WANG S B, et al. Present research and future development of silver-based electrical contact material[J]. Precious Metals, 2013, 34(1): 79-83 (in Chinese).

[11] PAL H, SHARMA V. Thermal conductivity of carbon nanotube-silver composite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015(1): 154-161.

[12] 邓书山,王文芳,吴玉程,等.银基复合材料电刷的导电性能[J].机械工程材料,2007,31(4):55-57.
DENG S S, WANG W F, WU Y C, et al. Conductivity of silver matrix brush materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(4): 55-57 (in Chinese).

[13] 凤仪,张敏,徐屹.外加荷载对碳纳米管-银-石墨复合材料电磨损性能的影响[J].中国有色金属学报,2005,15(10):1483-1488.
FENG Y, ZHANG M, XU Y. Effect of pressure on electrical wear of CNTs-Ag-G composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(10): 1483-1488 (in Chinese).

[14] 刘道新,王振亚,张晓化,等. Ag/Ni多层膜对钛合金微动磨

- 损和微动疲劳抗力的影响[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(5): 498-504.
- LIU D X, WANG Z Y, ZHANG X H, et al. The effect of Ag/Ni multilayer film on fretting wear and fretting fatigue resistance of titanium alloy[J]. Tribology, 2010, 30(5): 498-504 (in Chinese).
- [15] 王新平, 肖金坤, 张雷, 等. 银合金粉末粒度对Ag-MoS₂复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2811-2817.
- WANG X P, XIAO J K, ZHANG L, et al. Effect of silver alloy particle size on friction and wear properties of Ag-MoS₂ composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2811-2817 (in Chinese).
- [16] 郝俊英, 翁立军, 孙嘉奕, 等. 固体-油脂复合润滑I: 二硫化钼膜在干摩擦及空间用油脂润滑下的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(2): 106-110.
- HAO J Y, WENG L J, SUN J Y, et al. Solid lubricating film/oil or grease complex system I: tribological properties of MoS₂ film at dry sliding and coated with trifluorinated-butyl with methyl terminated silicon oil or the related grease formulated with powder of PTFE[J]. Tribology, 2010, 30(2): 106-110 (in Chinese).
- [17] 郝俊英, 王鹏, 刘小强, 等. 固体-油脂复合润滑II: 类金刚石(DLC)薄膜在几种空间用油脂润滑下的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 217-222.
- HAO J Y, WANG P, LIU X Q, et al. Solid lubricating film/oil or grease complex system ii: tribological properties of DLC film coated with space oils and the related greases[J]. Tribology, 2010, 30(3): 217-222 (in Chinese).
- [18] BHATTACHARYA R S, BHOWMICK S B. A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites[J]. Progress in Polymer Science, 2011, 36(5): 638-670.
- [19] 万斌, 刘磊, 粮耘, 等. 户外高压隔离开关用纯银/银石墨复合镀层的成分、形貌和生长机制[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(1): 22-25.
- WAN B, LIU L, LANG Y, et al. Composition, morphology and growth mechanism of fine silver/Ag-graphite composite coating for outer high voltage switch[J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(1): 22-25 (in Chinese).
- [20] GANG Q, YI F, BIN L I, et al. Effect of electrical current on the tribological behavior of the Cu-WS₂-G composites in air and vacuum[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(2): 384-392.
- [21] 刘磊. 户外高压隔离开关用纯银/银石墨复合镀层的制备及其高温性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015: 30-34.
- LIU L. Study on preparation and high temperature properties of Ag/silver-Graphite composite coating for outdoor high-voltage isolation switch[D]. Nanchang: Journal of Nanchang Hangkong University, 2015: 30-34 (in Chinese).
- [22] REN W, WANG P, SONG J, et al. Effects of current load on wear and fretting corrosion of gold-plated electrical contacts[J]. Tribology International, 2014, 70(70): 75-82.
- [23] FAN X Q, XIA Y Q, WANG L P, PU J B, et al. Study of the conductivity and tribological performance of ionic liquid and lithium greases[J]. Tribology Letters, 2014, 53(1): 281-291.
- [24] 段海涛, 杜三明, 张永振, 等. 高速干滑动条件下钢/铜摩擦副摩擦磨损表面摩擦热规律研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(10): 40-42, 99.
- DUAN H T, DU S M, ZHANG Y Z, et al. Study on the friction heat rule under high-speed dry sliding condition[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(10): 40-42, 99 (in Chinese).
- [25] HOLMBERG K, RONKAINEN H, MATTEWS A. Tribology of thin coatings[J]. Ceramics International, 2000, 26(7): 787-795.
- [26] 金杰, 邱维维, 王锦辉, 等. IBAD和磁控溅射对银膜性能的影响[J]. 核技术, 2010, 33(12): 918-922.
- JIN J, QIU W W, WANG J H, et al. Microstructure and properties of silver films obtained using ion beam composite deposition[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(12): 918-922 (in Chinese).
- [27] 符蓉, 高飞, 宋宝韞, 等. 铜-石墨材料摩擦学行为的研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(5): 479-484.
- FU R, GAO F, SONG B Y, et al. Tribological behavior copper-graphite friction materials[J]. Tribology, 2010, 30(5): 479-484 (in Chinese).

(责任编辑: 王鑫)