

硅油浸渍对树脂基滑板/铜抗电弧侵蚀磨损性能的影响

涂川俊, 陈振华, 夏金童, 陈 鼎, 严红革

(湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 采用二次热压和真空浸渍工艺制备树脂基受电弓滑板试样。并模拟滑板正常运行条件进行室内载流磨损实验, 通过 SEM 和 EDS 分别对滑板磨损表面及其磨屑、截面形貌和滑板元素成分进行分析。结果表明, 在载流磨损过程中, 随电流密度和滑行速度的增加滑板的磨损率逐渐增大; 硅油能有效地抑制滑板/铜在周期性接触-分离条件下产生的交流电弧, 未浸渍处理滑板的磨损率比经真空浸渍处理的大 1.6~2.1 倍; 滑板/铜载流磨损机理主要为电弧侵蚀磨损和氧化磨损的交互作用, 同时伴随着粘着磨损; 在电弧作用下, 硅油受热气化和发生热分解吸收部分电弧热, 有利于弧隙熄弧。

关键词: 电弧侵蚀; 磨损机理; 滑板; 熄弧原理; 浸渍

中图分类号: TB 332; U 264.3

文献标识码: A

Effect of impregnation by silicon oil on arc erosion resistance wear of resin-matrix contact strip against copper

TU Chuan-jun, CHEN Zhen-hua, XIA Jin-tong, CHEN Ding, YAN Hong-ge

(College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The resin-matrix pantograph contact strip (RMPCS) was prepared by using hot re-pressing and vacuum-impregnation process. The tribological behaviors with electrical current of RMPCS against copper were measured under the indoor simulated conditions of normal running conditions. The characteristics of worn surfaces, wear debris, cross-section and typical elemental distributions of RMPCS were studied by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersion spectrometer (EDS), respectively. The results show that the wear rate of RMPCS increases with increasing sliding speed and electrical current density. The silicon oil can effectively inhibit the alternating current arc of RMPCS against copper, which is produced periodically between the separating or contacting course. The wear rate of RMPCS against copper without impregnating technology is about 1.6~2.1 times higher than the value with vacuum impregnating technology. The main wear mechanism of RMPCS against copper is arc erosion wear and oxidative wear, which is accompanied by adhesive wear during electrical sliding wear process. Silicon oil has evaporation and thermal decomposition under the stress of electric arc, which can absorb part of arc heat and is beneficial to arc extinguishing.

Key words: arc erosion; wear mechanism; contact strip; arc extinguishing theory; impregnation

载流磨损的主要特征是摩擦副在强电流作用下产生磨损^[1-6]。受电弓滑板/导线构成一对机械与电气耦合的特殊摩擦副^[7-8]。根据摩擦副的工况特点和磨损形式, MATSUYAMA^[9]将滑板与导线载流系统的滑动磨损机理进行了分类, 认为滑板/导线的磨损机理可分为

机械磨损、化学磨损和电气磨损3类, 且随着滑板使用条件的变化, 其作用形式和主次顺序也相应变化。在高速滑动和强电流的综合作用下, 当受电弓滑板与接触导线发生离线-接触时, 在高的电压和电流作用下, 就会在空气间隙产生电弧放电, 导致电弧烧蚀, 使滑

板的摩擦表面劣化造成剧烈磨损。在电弧侵蚀过程中，摩擦副接触点材料和电弧间隙的物相变化过程十分复杂，这给电接触材料的抑弧研究带来很大困难。对于这个问题许多学者已经做了大量研究工作。郭凤仪等^[10]研究发现电触头材料的电弧侵蚀是热、力和环境3个方面综合作用的结果，其损耗量与开断电流和燃弧时间有关，开断电流越大、燃弧时间越长，材料损失就越多。AMBIER等^[11]研究认为在电弧热作用下，电触头材料的物相变化存在燃弧时的熔化、气化过程和熄弧时的凝固、冷凝过程，并给出了在熔化凝固过程中触头材料烧损区深度随时间和温度的变化曲线。张昆华等^[12]采用反应合成和热挤压工艺制得AgSnO₂电接触材料，研究了在直流电弧作用下触点烧损表面的微观结构，提出Ag富集区、SnO₂富集区、孔洞、气孔及裂纹的电弧侵蚀形貌特征。在对电接触材料抑弧研究过程中，这些研究主要集中在对已产生的电弧进行性能探讨，而关于灭弧介质对电接触材料抗电弧侵蚀性能的研究和熄弧原理却鲜见报道。

为此，本文作者以改性树脂作为粘结剂，添加导电相、润滑相、增强相和灭弧相，采用二次热压、真空浸渍和通氢固化等工艺制得抗电弧侵蚀性能和耐磨性能优良的树脂基受电弓滑板试样。考察电流密度和滑行速度对滑板载流磨损率的影响，研究硅油浸渍液

对滑板抗电弧侵蚀磨损性能的影响，并对其电弧侵蚀磨损和熄弧原理进行探讨。

1 实验

1.1 树脂基受电弓滑板实验配方

树脂基受电弓滑板的实验配方如表1所列。滑板的物理性能参数见表2。

1.2 树脂基受电弓滑板的制备

树脂基受电弓滑板的制备流程如图1所示。

1.3 滑板/铜磨损性能测试

采用排水法测量滑板的体积密度；采用HR-150DT洛氏硬度计测量滑板的洛氏硬度；采用SX1934(SZ-82)数字式四探针测试仪测定滑板的电阻率；采用CBJ-11J型简支梁摆锤式冲击试验机测定滑板的冲击强度；采用JEOL JSM-6700F型扫描电子显微镜(SEM)观察滑板的磨损表面及其磨屑和截面形貌；采用EDS分析滑板磨损面元素。

采用自行研制的高速载流磨损实验机检测滑板的厚度变化量和电弧放电。滑板磨损面在滑动方向上尺寸为长5.0 mm，宽度20.0 mm。对磨盘为紫铜材料，

表 1 树脂基受电弓滑板的实验配方

Table 1 Chemical compositions of RMPCS material

Function	Raw material	Volume fraction/%
Continuous main phase	Polybismaleimide	12–20
	FBY	24–32
Electric conductive main phase	Electrolytic copper powder	45–55
Lubricating main phase	Polygonal flake graphite	6–9
Intensifier fiber phase	Red copper fiber	7–14
	Chopped carbon fiber	
Arc-suppression phase	Tungsten disulfide	0–2
Addition agent phase	Activated charcoal	Proper quantities
Impregnant	Methylsilicone oil ¹⁾	Proper quantities
Addition agent	Phosphate	Proper quantities

1) Molecular formula of methylsilicone oil is (CH₃)₃SiO[Si(CH₃)—O]_x—Si(CH₃)₃.

表 2 树脂基受电弓滑板的物理性能参数

Table 2 Physical property parameters of RMPCS material

Test sample	Density/(g·cm ⁻³)	HRB	Impact strength/(kJ·m ⁻²)	Room temperature resistivity/(μΩ·m)
Without impregnation	3.94	49.6	8.0	9.7
With vacuum-impregnation	3.96	48.1	7.8	13.2

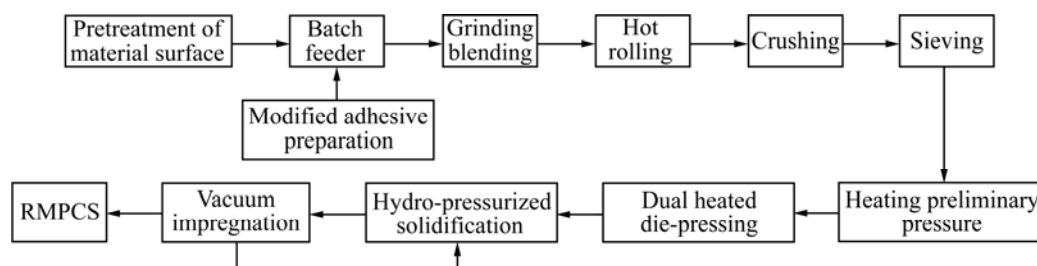


图 1 树脂基受电弓滑板的制备流程

Fig.1 Preparation process of RMPCS material

其磨损表面在测试前后分别用丙酮擦洗干净。滑板试样和对磨盘表面均用800号水砂纸抛光打磨。对磨盘表面有一处离线打弧槽, 尺寸为40.0 mm × 50.0 mm × 0.5 mm。采用照相设备(SAMSUNG-NV10)连续记录电火花尾部高度。滑板/铜载流磨损测试条件为: 室温; 加载电流密度分别为1.05、1.50、1.95、2.40和2.85 A/mm²。对磨盘运行速度分别为16.7、25、33.3和41.7 m/s, 加载压力为50 N, 运行时间为60 min。高速载流磨损实验机示意图如图2所示。

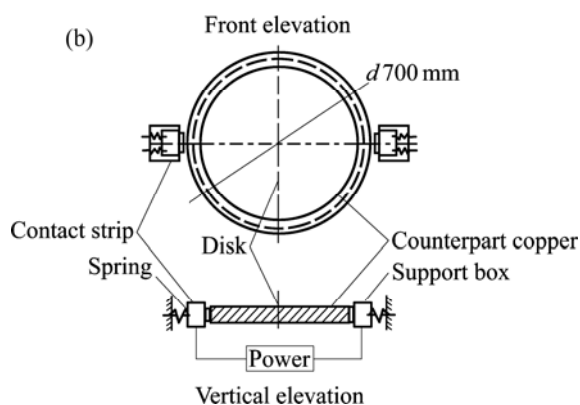


图 2 高速载流磨损实验机及结构示意图

Fig.2 Photo and schematic diagram of test apparatus of self-made high speed electrical wear tester

2 实验结果

2.1 电流密度对滑板磨损率的影响

图3所示为滑板/铜在接触压力为50 N、滑行速度为41.7 m/s 条件下对磨60 min时, 滑板的磨损率随加载电流密度的变化。

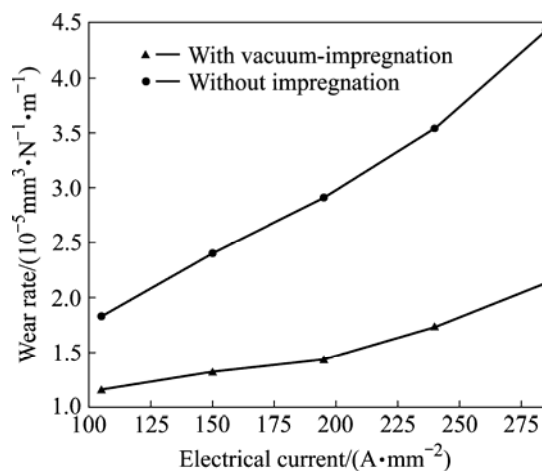


图 3 树脂基滑板的磨损率随加载电流密度的变化

Fig.3 Variations of wear rate of RMPCS with electric current density

由图 3 可见, 两种树脂基滑板的磨损率均随电流密度的增大而逐渐增大。经真空浸渍处理滑板的耐磨性明显优于未浸渍处理滑板。相同条件下, 未浸渍处理滑板的载流磨损率比经真空浸渍处理滑板的大 1.6~2.1 倍左右。

2.2 滑行速度对滑板磨损率的影响

图4所示为滑板/铜在接触压力50 N、加载电流密度分别为0和2.85 A/mm²条件下对磨60 min 时, 滑板

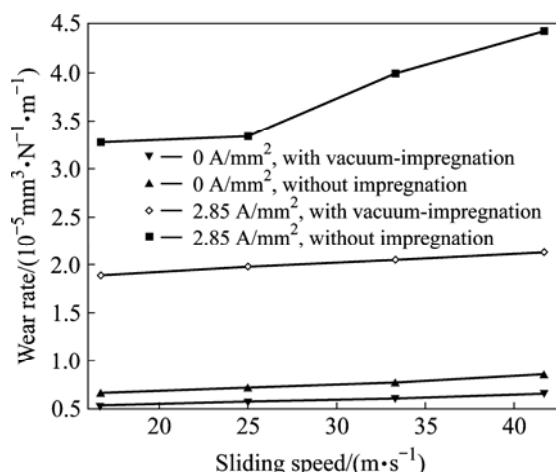


图4 滑板的磨损率随滑行速度的变化

Fig.4 Variations of wear rate of RMPCS with sliding speed

的磨损率随滑行速度的变化。

由图4可知,树脂基滑板的磨损率均随滑行速度的增大而逐渐增加。其中,在载流条件下,未浸渍处理滑板的载流磨损率比经真空浸渍处理滑板的大1.6~2.1倍,而在未受流条件下,未浸渍处理滑板的载流磨损率比经真空浸渍处理滑板的仅大1.3倍左右。

2.3 滑行速度对电火花高度的影响

图5所示为滑板/铜在接触压力为50 N、加载电流密度分别为1.05 A/mm²和2.85 A/mm²条件下对磨60 min时,电火花高度随滑行速度的变化关系。

由图5可知,两种树脂基滑板/铜的电火花高度随滑行速度的增大而增加。在载流条件下,在加载电流

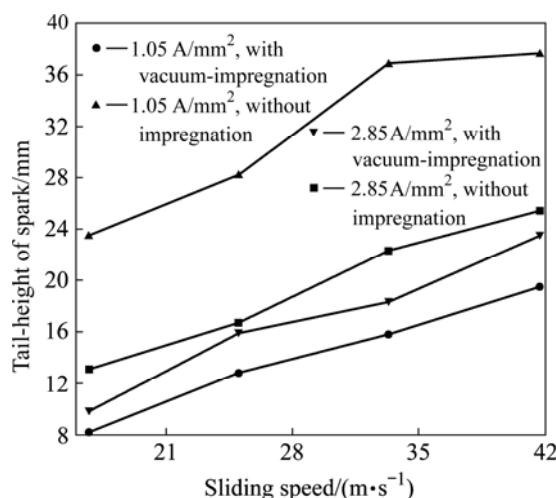


图5 电火花高度随滑行速度的变化

Fig.5 Variations of electrical spark tail-height of RMPCS with sliding speed

密度为2.85 A/mm²时摩擦副产生的电火花尾部高度高于电流密度为1.05 A/mm²时产生的高度。未浸渍处理滑板/铜产生的电火花尾部高度要明显高于经真空浸渍处理滑板/铜产生的高度,在速度为41.7 m/s及电流密度为2.85 A/mm²条件下,未浸渍处理滑板产生的电火花尾部比经真空浸渍处理滑板的高12.3 mm左右。

2.4 显微结构及分析

图6~8分别为在接触压力50 N,滑行速度41.7 m/s,加载电流密度2.85 A/mm²,磨损时间60 min时不同滑板的磨损表面及其磨屑和截面形貌,其中白色箭头所指为滑板滑行方向。

对比图6(a)~(f)可知,经浸渍处理滑板和未浸渍处理滑板与铜载流磨损实验后,滑板磨痕的表面形态明显不同。从图6(a)和(b)可知,经真空浸渍处理滑板的磨痕表面未见明显犁沟状磨痕和剥落坑,磨面致密,界面膜润湿、模糊,在沿滑行方向的磨面上形成连续的润滑油膜。从图6(c)和(d)可知,未浸渍处理滑板磨痕表面呈现出明显的孔隙和白色发亮区域,磨面粗糙、组织松散,在沿滑行方向的磨面上有大量杂乱分布的磨屑。从图6(e)和(f)可知,经常压浸渍处理滑板的磨痕表面未见明显油膜和剥落坑,磨面光滑致密,界面结合紧密。从图6分析可知,在电弧侵蚀磨损过程中,未浸渍处理滑板呈现出氧化磨损^[13]的典型特征,其表面氧化破坏程度大于经浸渍处理滑板的磨损;经浸渍处理滑板中的硅油能在磨面上形成润滑的薄膜,减缓了磨屑的去除,起到润滑作用。这说明经浸渍处理滑板的耐磨性能优于未浸渍处理滑板。

图7所示为不同滑板磨屑的SEM像。由图7可知,经真空浸渍处理滑板的磨屑主要呈类球形和条状分布,颗粒尺寸较均匀,未见明显的氧化物块状磨屑。而未浸渍处理滑板的磨屑中含有直径约为40 μm的白色块状磨屑和实心球形磨屑及磨掉的纤维。由图7分析可知,在载流磨损过程中,由于电弧作用形成的微小高温区^[3]导致滑板表面金属组元形成熔滴,且在高速旋转中旋出,在空气中冷却形成类球形磨屑。在电弧高温作用下,未浸渍处理滑板接触面的脆弱结合区域较经真空浸渍处理滑板易疲劳产生裂纹,并扩展形成块状磨屑。

比较图8(a)和(b)可知,经真空浸渍处理滑板摩擦变形层的断面结构致密,界面润湿、模糊,未产生明显的塑性变形。未浸渍处理滑板摩擦变形层的断面结构疏松、存在大量的微孔穴。

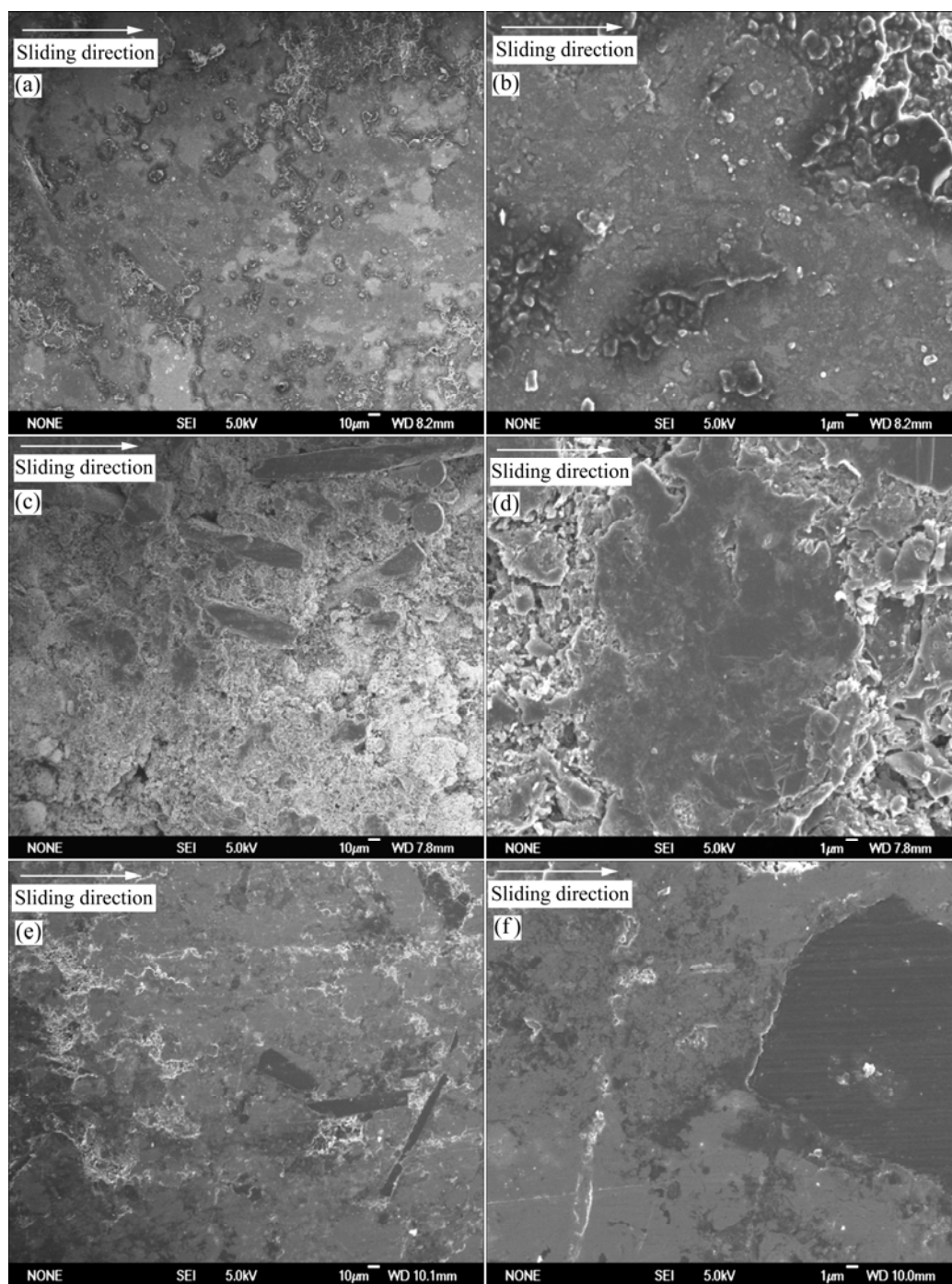


图 6 滑板磨损表面形貌的 SEM 像

Fig.6 SEM micrographs of worn surface of RMPCS: (a), (b) With vacuum-impregnation; (c), (d) Without impregnation; (e), (f) With atmospheric-impregnation

2.5 磨损表面元素

采用能谱仪分别对图6(b)和(d)中滑板的磨损表面白色区域和图7(a)和(b)中不同滑板截面的表层和次表层进行元素组成分析, 结果如表3所列。

从表3可知, 在滑板磨损表面, 未浸渍处理滑板表面白色区域的含氧量高于经真空浸渍处理滑板相应区

域的含氧量。在相同条件下, 滑板截面表层含氧量明显高于其次表层含氧量。这说明在电弧高温的作用下, 滑板接触点的金属熔融物从外界吸收大量气体(包括 CO 、 H_2O 、 O_2) 主要是 O_2 , 发生氧化反应, 使滑板表层含氧量较高。未浸渍处理滑板磨损面的氧化程度高于经真空浸渍处理滑板的磨损面, 从而使氧的浓度较

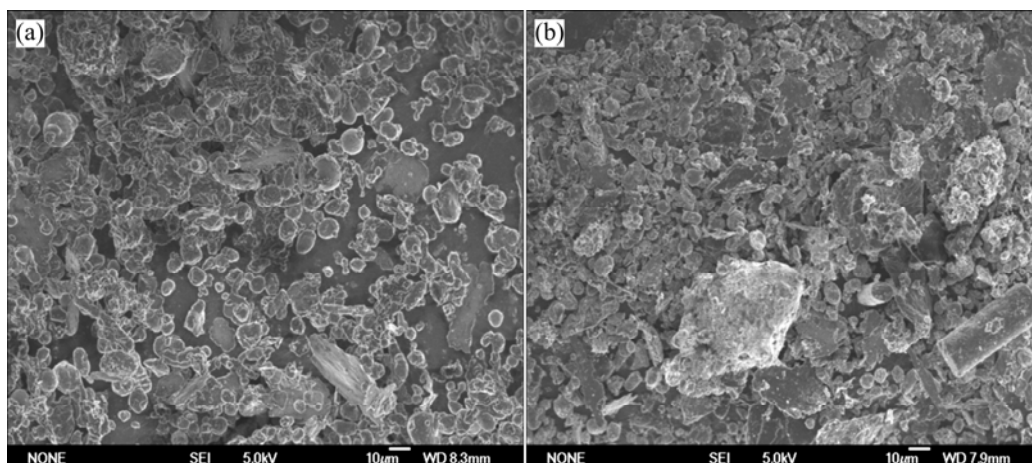


图 7 滑板磨屑的 SEM 像

Fig.7 SEM micrographs of wear debris of RMPCS: (a) With vacuum-impregnation; (b) Without impregnation

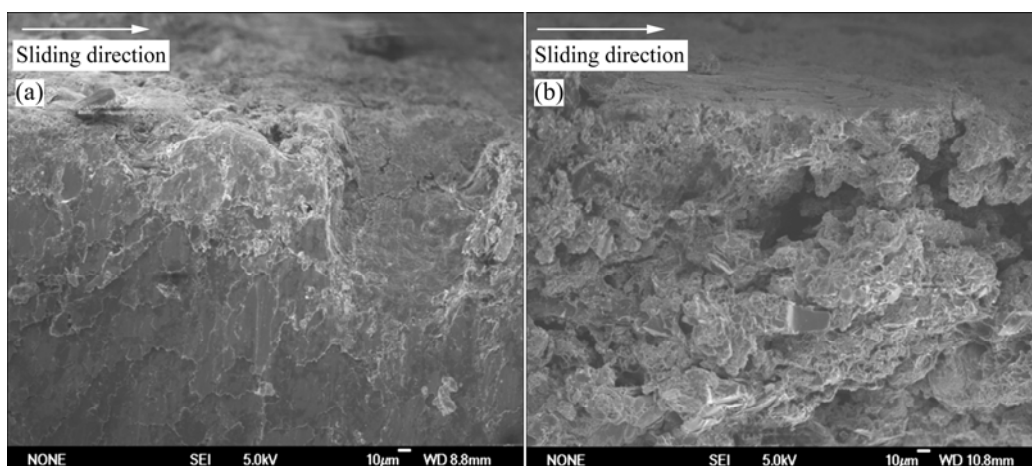


图 8 滑板截面形貌的 SEM 像

Fig.8 SEM micrographs of cross-section of RMPCS: (a) With vacuum-impregnation; (b) Without impregnation

高,但还需进一步证实。

表3 滑板载流磨损表面和截面元素的能谱分析

Table 3 EDS analysis results of worn surface and cross-section of RMPCS

Test area ¹⁾	Mass fraction/%			
	Cu	W	O	Others
Aa	34.53	1.63	7.93	55.91
Ba	13.93	2.45	8.11	75.51
Ca	47.24	2.69	5.82	44.25
Ab	51.44	1.89	12.67	34.01
Bb	29.98	1.36	17.09	51.57
Cb	37.18	1.82	5.55	55.45

1) A-White area; B-Surface layer; C-Subsurface; a-With vacuum- impregnation; b-Without impregnation.

3 分析与讨论

3.1 电流的影响

不同树脂基滑板的载流磨损率均随电流密度的增大而逐渐增大,这主要是因为载流条件下,摩擦过程中摩擦面产生的热量主要来自3个方面^[14]:相对滑动产生的摩擦热、电流作用下接触电阻产生的焦耳热和接触-分离条件下释放的电弧热。因此电流密度对摩擦副产生的焦耳热和电弧热有显著影响。电流密度越大,接触面的温度就越高,滑板磨损就越严重。其中焦耳热遵循焦耳定律,而电弧热主要是由于摩擦副在周期性的接触-分离条件下存在接触间隙,造成接触不

良而发生电流瞬时中断所致,即电路中电流突然由 I_0 ($I_0 = U/R$)变为零,此时 dI/dt 很大^[15-16],摩擦副就会因自感感应出瞬时高压。当自感电动势超过空气间隙的击穿电压而引起电流通过气体时便产生电火花。单位体积电弧的积累能量^[14]可通过式(1)计算:

$$Q = \int (P - P') dt = \rho_a c_p (T - T_1) \quad (1)$$

式中 Q 为单位体积电弧的积累能量, J; P 为单位体积电弧的输出功率, W; P' 为单位体积电弧的散出功率, W; t 为时间, s; ρ_a 为在温度 T 时电弧气体的密度, g/cm³; c_p 为在常压力下气体的比热容; T 为电弧间隙的温度, K; T_1 为电弧周围空间的温度, K。从式(1)可知,电弧温度 T 是弧隙间积累能量 Q 的函数。载流条件下,电弧作用产生的高温使接触点材料依次经历了燃弧时的受热分解或热熔融等相变过程,树脂降解、熔融金属流动及熄弧时熔融物的冷凝过程。

3.2 硅油浸渍液对滑板抗电弧侵蚀性能的影响

在周期性的接触-分离条件下,未浸渍处理滑板/铜产生的电火花尾部高度要明显高于经真空浸渍处理滑板/铜产生的高度。这是因为在载流磨损过程中,滑板/铜周期性接触-分离造成的不良接触在磨损面上产生了交流电弧。在触点分离初期,在高电压和电流作用下,触点气体间隙发生电击穿形成火花放电,此时触点间隙表现导体行为。载流条件下,在摩擦热、焦耳热,尤其是电弧热的综合作用下产生局部高温使得经真空浸渍处理滑板的磨损面不断析出硅油介质。硅油与脱落的鳞片石墨和氧化铜薄膜相互作用,在滑板/铜磨面间逐渐形成了致密、连续的复合表面膜(见图6(b)),部分封闭了滑板磨损面的开气孔,阻滞了氧的扩散速度和减少了摩擦副的直接接触。随触点分离程度的增大,使接触电阻增大,发生电流瞬时中断现象,摩擦副就会因自感感应出过高压。在此阶段,弧隙电阻的变化遵循MAYR动态电弧方程^[17],见下式:

$$R_a = e^{\frac{t}{t_0}} \left[R_0 - \frac{1}{N_0 t_0} \int_0^t E^2(t) e^{-\frac{t}{t_0}} dt \right] \quad (2)$$

式中 R_a 为单位体积电弧电阻的瞬时值, Ω ; t_0 为电弧时间常数, R_0 为在 $t = 0$ 时的电弧电阻, Ω ; t 为时间, s; N_0 为单位体积电弧的散出功率常数; E 为电弧电压的瞬时值, V。由式(2)可知,随着电弧电压和时间的增加,弧隙电阻逐渐增大。此外在电侵蚀过程中,复合表面膜接触点的硅油在电弧高温作用下,受热蒸发形成硅油蒸汽并发生热分解反应^[18],吸收了部分电弧热量。硅油的分解产物为环状有机硅分子,蒸发到弧隙

中,可进一步分解为 H_2O 、 CO_2 和二氧化硅水合物。电弧作用产生的带电粒子随硅油的分解而扩散,很难在弧隙中聚集,不易形成空间电荷效应^[19]。其次,硅油介质^[20]具有良好的绝缘导热性,有效地降低了弧隙间电弧的电导。因此,弧隙就从导体状态逐渐转变成介质状态^[21],导致电弧减少甚至熄灭。因此,在相同条件下,经真空浸渍处理滑板的抗电弧侵蚀性明显优于未浸渍处理滑板。

3.3 滑板/铜载流磨损机理

对滑板表面的显微结构分析可知,在载流条件下,随着电流密度的增大,焦耳热和电弧热的综合作用使得摩擦面产生局部高温,造成接触点材料受热发生热分解和氧化反应。在电弧作用下,树脂发生热分解和炭化,石墨氧化生成炭的氧化物而挥发,铜氧化生成介电性的氧化物薄膜,表现出氧化磨损特征。冷凝过程中,滑板表面在摩擦力作用下产生了电灼伤小孔(见图6(c)和(d)),表现出电侵蚀磨损特征^[22]。此外磨损初期,在磨损面未形成复合表面膜时易发生粘着磨损。因此,在载流条件下,树脂基滑板/铜摩擦副主要产生了电弧侵蚀磨损和氧化磨损的综合作用,同时伴随着粘着磨损。

4 结论

- 1) 在载流磨损过程中,滑板/铜的磨损机制主要是电弧侵蚀磨损和氧化磨损的综合作用,同时伴随着粘着磨损。
- 2) 载流条件下,电弧作用产生的高温使接触点材料依次经历了燃弧时的受热分解或热熔融等相变过程,树脂降解、熔融金属流动及熄弧时熔融物的冷凝过程。
- 3) 滑板的磨损率随电流密度和滑行速度的增加而逐渐增大,未浸渍处理滑板的载流磨损率比经真空浸渍处理滑板的大1.6~2.1倍左右。
- 4) 在电侵蚀过程中,滑板的弧隙从导体状态逐渐转变成介质状态,导致电弧减少甚至熄灭。

REFERENCES

- [1] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on the wear rate and wear mode transition of a copper-impregnated metallized carbon contact strip sliding against a copper disk[J]. Tribology International, 1999, 32(7): 367-378.

- [2] ZHAO H, BARBER G C, LIU J. Friction and wear in high speed sliding with and without electrical current[J]. *Wear*, 2001, 249(5): 409–414.
- [3] BOUCHOUCHA A, ZAIDI H, KADIRI E K, PAULMIER D. Influence of electrical filed on the tribological behaviour of electro dynamical copper/steel contacts[J]. *Wear*, 1997, (203/204): 434–441.
- [4] JIA S G, LIU P, REN F Z, TIAN B H, ZHENG M S, ZHOU G S. Sliding wear behavior of copper alloy contact wire against copper-based strip for high-speed electrified railways[J]. *Wear*, 2007, 262(8): 772–777.
- [5] BOUCHOUCHA A, CHEKROUD S, PAULMIER D. Influence of the electrical sliding speed on friction and wear processes in an electrical contact copper-stainless steel[J]. *Applied Surface Science* 2004, 223(4): 330–342.
- [6] 陈振华, 涂川俊, 陈刚, 严红革, 夏金童. 改性树脂基滑板制备及其热磨损性能研究[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(11): 1785–1791.
CHEN Zhen-hua, TU Chuan-jun, CHEN Gang, YAN Hong-ge, XIA Jin-tong. Preparation and thermal wear properties of modified resin-matrix pantograph contact strip[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(11): 1785–1791.
- [7] AZEVEDO C R F, SINATORA A. Failure analysis of a railway copper contact strip[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2004, 11(6): 829–841.
- [8] JIA S G, ZHENG M S, LIU P, REN F Z, TIAN B H, ZHOU G S, LOU H F. Aging properties studies in a Cu-Ag-Cr alloy[J]. *Mater Sci Eng A*, 2006, 419(2): 8–11.
- [9] MATSUYAMA S. Electric contact tribological behavior of pantograph[J]. *Toyo Denki Giho*, 1995, 91: 52–60.
- [10] GUO Feng-yi, CHEN Zhong-hua, ZHANG Ling-ling, ZHANG Ji-hua, LEUSCHNER F W. The mechanisms of cracks formation of silver-based contact materials under arc and making pressure[J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2004, 10(1): 73–77.
- [11] AMBIER J, BOURDA C, JEANNOF D. Modification in the microstructure of materials with air-break sitching at high current[J]. *IEEE Trans on CHMT*, 1991, 14(1): 153–161.
- [12] 张昆华, 管伟明, 孙加林, 卢峰, 陈敬超, 周晓龙, 杜焰. AgSnO₂电接触材料的制备和直流电弧侵蚀形貌特征[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(6): 924–927.
ZHANG Kun-hua, GUAN Wei-ming, SUN Jia-lin, LU Feng, CHEN Jing-chao, ZHOU Xiao-long, DU Yan. Preparation and DC arc erosion morphology of AgSnO₂ contact materials[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(6): 924–927.
- [13] ABOUEI V, SAGHAFIAN H, KHEIRANDISH S. Effect of microstructure on the oxidative wear behavior of plain carbon steel[J]. *Wear*, 2007, 262(10): 1225–1231.
- [14] KUBO S, KATO K. Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon contact strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current[J]. *Wear*, 1998, 216(2): 172–178.
- [15] NAGASAWA H, KOJI K. Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current[J]. *Wear*, 1998, 216(2): 179–183.
- [16] KUFFEL E, ZAENGL W S. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993: 34–36.
KUFFEL E, ZAENGL W S. High-voltage engineering fundamentals[M]. Beijing: China Machine Press, 1993: 34–36.
- [17] MAYR O. Beitrage zur theorie des statischen und des dynamischen lichtbogens[J]. *Arch Elektrotech*, 1943, 37(12): 588–608.
- [18] BICA I. The obtaining of magneto-rheological suspensions based on silicon oil and iron particles[J]. *Mater Sci Eng B*, 2003, 98(2): 89–93.
- [19] NAGAI H, ROSSIGNOL F, NAKATA Y, TSURUE T, SUZUKI M, OKUTANI T. Thermal conductivity measurement of liquid materials by a hot-disk method in short-duration microgravity environments[J]. *Mater Sci Eng A*, 2000, 276(1): 117–123.
- [20] RABE J G, SCHMIDT W F, KLEIN W. Physico-chemical investigation of the behavior of silicone oils under the influence of high voltage stress[J]. *Journal of Electrostatics*, 1979(7): 253–266.
- [21] 曹春斌, 蔡琪, 江锡顺, 宋学萍, 孙兆. Ag-MgF₂ 复合纳米金属陶瓷薄膜的渗透阈研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(6): 3147–3151.
CAO Chun-bin, CAI Qi, JIANG Xi-shun, SONG Xue-ping, SUN Zhao. A study on percolation threshold of Ag-MgF₂ nanoparticle cermet films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(6): 3147–3151.
- [22] YASAR I, CANAKCI A, ARSLAN F. The effect of brush spring pressure on the wear behaviour of copper-graphite brushes with electrical current[J]. *Tribology International*, 2007, 40(9): 1381–1386.

(编辑 陈爱华)