

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20181218001

超音速等离子喷涂 Mo 涂层的载流摩擦磨损性能

惠 阳, 刘贵民, 闫 涛, 杜林飞, 刘 明

(陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系, 北京 100072)

摘 要: 采用超音速等离子喷涂技术在 45CrNiMoVA 钢表面制备 Mo 涂层, 利用场发射扫描显微镜 (SEM)、X 射线能谱分析仪 (EDS) 观测涂层显微形貌与组织成分, 分析了载流摩擦中的电接触模型及电弧成因, 利用滑动式摩擦试验机研究了电流强度对涂层粗糙度、表面温升及摩擦磨损性能的影响。结果表明: 制备的 Mo 涂层组织致密、氧化程度低, 与基体结合方式为“机械铆合”; 随电流增加, 摩擦副间电弧能量急剧升高, 起弧率与表面粗糙度先降低, 后上升。其中收缩电阻和微电容产生的自感电动势促进了电弧形成; 摩擦副表面的温升由摩擦热、焦耳热、电弧热共同决定, 与电流强度呈正相关; 摩擦因数受表面粗糙度、材料剪切强度、表面膜等因素共同影响, 随电流增加呈下降趋势。此外, 载流条件下会出现黏着磨损、氧化磨损、电弧烧蚀等磨损, 加剧了涂层剥落与磨粒磨损, 但形成的摩擦膜可以有效保护涂层, 降低磨损率。

关键词: 超音速等离子喷涂; Mo 涂层; 载流摩擦磨损; 电弧

中图分类号: TG174.442; TG115.58

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)02-0109-11

Current-Carrier Tribological Properties of Mo Coating Deposited by Supersonic Plasma Spraying

HUI Yang, LIU Guimin, YAN Tao, DU Linfei, LIU Ming

(Department of Equipment Maintenance and Remanufacturing Engineering, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: Mo coatings were prepared on the surface of steel 45CrNiMoVA by supersonic plasma spraying. Microstructure and composition of the coatings were observed by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray energy dispersive spectrometry (EDS). Electric contact model and arc formation in the current-carrying friction were analyzed. Effects of current intensity on coating roughness, surface temperature rise and friction and wear properties were studied by sliding friction tester. The results show that the Mo coating presents a dense microstructure and with low oxidation degree, and the bonding mode between the coating and the substrate is “mechanically riveted”. As the current increases, the arc energy between the friction pairs increases sharply, and the arcing rate and surface roughness first decrease and then rise. The self-induced electromotive force generated by the shrinkage resistor and the microcapacitor promotes arc formation. The temperature rise of the friction pair surface is determined by the friction heat, the Joule heat, and the arc heat, and is positively correlated with the current intensity. The friction coefficient which is affected by surface roughness, material shear strength, surface film and other common factors decreases with the increase of the current. In addition, adhesion wear, oxidation wear, arc ablation and other wear mechanisms appear under the current condition, which aggravate spalling and abrasive wear of the coating. The formed friction film can effectively protect the coating and reduce the wear rate.

Keywords: supersonic plasma spraying; Mo coating; current-carrier friction and wear; arc

收稿日期: 2018-12-18; 修回日期: 2019-04-01

通信作者: 刘贵民 (1971—), 男 (汉), 教授, 博士; 研究方向: 失效分析、高性能铜合金; **E-mail:** liuguimin1971@sina.com

基金项目: 北京市自然科学基金 (2152031)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Beijing (2152031)

引用格式: 惠阳, 刘贵民, 闫涛, 等. 超音速等离子喷涂 Mo 涂层的载流摩擦磨损性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 109-119.

HUI Y, LIU G M, YAN T, et al. Current-carrier tribological properties of Mo coating deposited by supersonic plasma spraying[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 109-119.

0 引言

近几年, Mo 及 Mo 基涂层的应用已经由传统的机械零部件强化逐步向军事装备领域延伸。美国海军为提高电磁轨道炮使用寿命, 研制出以 Mo/Ta 合金为主要成分的难熔涂层^[1], 但关于热喷涂 Mo/Ta 合金的研究在国内尚未见诸报道。

季鑫^[2]采用磁控溅射技术制备了 Mo/Ta 高温膜层, 试验中膜层的最大厚度仅为 1.2 nm, 且未探究膜层的摩擦磨损性能。针对电磁轨道炮所需的基本性能及常见的失效形式^[3-4], 热喷涂 Mo 及 Mo 基涂层具有导电率下降幅度低、硬度和强度高、耐磨和抗烧蚀性能良好等优点, 既能对部件起到保护作用, 又满足了装备维修与再制造的要求^[5]。

传统 Mo 及 Mo 基涂层的制备主要以火焰喷涂为主, 该工艺虽易于生产、成本低廉, 但制得涂层晶粒尺寸大、氧化严重、孔隙率高, 并且喷涂精度低, 难以适应大功率设备的摩擦磨损工况要求, 为提高涂层性能, 当前研究多集中于新型高能高速喷涂技术领域^[6-7]。Guo 等^[8]通过真空等离子喷涂技术有效减少了 TiC-Mo 涂层的氧化; Modi 等^[9]采用高速火焰喷涂制备了 Mo 涂层, 结果表明, 与普通火焰喷涂相比, 采用高速火焰喷涂制得涂层在摩擦因数与磨损率方面均有明显降低; 喷涂过程中粒子的飞行速度会影响涂层含氧量与应力释放, 进而影响涂层的摩擦磨损性能。

采用超音速等离子喷涂技术制备 Mo 及 Mo 基涂层, 可以改善传统热喷涂技术中的缺陷, 在提高导轨基本性能指标同时最大程度保持其电导率和电感梯度, 突破了研制新型材料及在 Mo 及 Mo 基涂层中添加 Ni、B、Si、氮化物、碳化物等增强剂的传统思维, 对制备适应苛刻工况下使用的 Mo 及 Mo 基涂层具有重要意义。

文中设计出“Mo 涂层+45NiCrMoVA 钢”的分层导轨结构, 采用 SEM 和 EDS 观测涂层的微观形貌与组织成分, 利用 ImageJ 软件测量涂层孔隙率; 结合电接触模型分析了载流摩擦过程中的电弧成因; 探讨了电流大小对起弧率、电弧能量、表面温升、磨痕粗糙度的影响; 在自行改装的载流摩擦试验机上测量涂层在不同参数下的摩擦因数与磨损量, 并结合摩擦磨损机理对试验现象进行了解释。

1 试验

1.1 试验材料

粉末选用兴荣源科技有限公司生产的喷涂 Mo 粉(纯度 $\geq 99.9\%$, 粒径在 45~60 μm), 主要杂质成分如表 1 所示。基体选用 45CrMoMoVA 钢(860 $^{\circ}\text{C}$ 淬火、460 $^{\circ}\text{C}$ 回火), 常规力学性能及主要化学成分如表 2 和表 3 所示。经线切割制得尺寸为 30 mm $\times$ 30 mm $\times$ 60 mm 的试样。

表 1 Mo 粉的主要杂质成分

Table 1 Main impurity compositions of Mo powders (w/%)						
Element	Fe	Ni	Si	Mg	Ca	Others
Content	0.03	0.028	0.02	0.02	0.015	0.02

表 2 45CrNiMoVA 钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 45CrNiMoVA steel						
Parameter	R_m / MPa	R_e / MPa	A / %	W_t / J	HBW	Z / %
Value	1530	1460	13	48.8	443	47

表 3 45CrNiMoVA 钢的主要化学成分

Table 3 Main chemical compositions of 45CrNiMoVA steel (w/%)								
Element	C	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	V	Fe
Content	0.45	1.58	0.95	0.25	0.65	0.27	0.15	95.7

1.2 涂层制备

采用 HEP-Jet 超音速等离子喷涂系统制备涂层。试样表面预处理过程如下: 砂纸(13~38 μm (400~1000 目))打磨去除氧化层、铁锈及杂质 $\rightarrow$ 超声波清洗去除油污 $\rightarrow$ 棕刚玉(20 μm (700 目))喷砂处理(喷砂角度 60 $^{\circ}$, 喷砂距离 150 mm) $\rightarrow$ 喷枪吹去残留沙粒。喷涂前采用等离子焰流进行无供粉预热, 时间为 30 s。

根据课题组前期研究的正交试验优化结果^[10](见表 4)进行喷涂, 主气为惰性气体 Ar, 次级气为还原性气体 H₂。采用压缩空气对试样表面进行冷却, 控制喷涂过程中基体温度在 200 $^{\circ}\text{C}$ 以下。通过调整喷涂次数控制涂层厚度在 300~500 μm 之间。

表 4 主要喷涂参数^[10]

Table 4 Main spray parameters ^[10]				
Parameters	Voltage / V	Current / A	Argon flow / (L $\cdot$ min ⁻¹)	Spray distance / mm
Value	115	380	130	100

1.3 载流摩擦磨损试验

在加装 MP30100D 大功率恒流电源的 CETR-3 型多功能摩擦试验机上进行载流摩擦磨损实验, 摩擦副选用端部 $\Phi 3$ mm 半球形的 7075 铝合金柱, 表面粗糙度 Sa (算术平均高度) 与 Sq (根均方高度) 分别为 0.483 、 0.809 μm 。采用单因素试验, 电流为 $0\sim 25$ A, 载荷为 10 N, 滑动频率为 10 Hz, 试验时间为 300 s。所有试样表面在试验前都进行打磨抛光, 表面粗糙度 Sa 与 Sq 分别为 0.241 、 0.366 μm 。

起弧率是指试验过程中电弧持续时间占总试验时间的百分比, 是衡量起弧现象的重要指标。采用 SONY AXP55 型高速摄像机记录实验过程中电弧持续时间, 外接 KYR90 型无纸记录仪实时采集摩擦副间电压、电流数据, 并分别按公式 (1) 和 (2) 计算起弧率与电弧能量:

$$\eta = \frac{t}{T} \times 100\% \quad (1)$$

其中: η 为起弧率, %; t 为电弧持续时间, s; T 为试验时间, s。

$$E = \sum e = \sum U I t_i = \sum T \bar{p} \quad (2)$$

其中: E 为电弧能量, J; e 为单次电弧能量, J; U 为离线时摩擦副间电压, V; I 为离线时摩擦副间的电流, A; t_i 为单次电弧持续时间, s; T 为试验时间, s; $\bar{p}$ 为平均电弧电功率, W。

采用 NS9500PRO 型红外热成像仪记录摩擦副温度。采用 Lext OLS 型三维形貌仪测量不同电流

下磨痕表面粗糙度与磨损体积。通过公式 (3) 计算磨损率:

$$\bar{w} = \frac{\Delta V}{NS} \quad (3)$$

其中: $\bar{w}$ 为磨损率, $\mu\text{m}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$; ΔV 为磨损体积, μm^3 ; N 为法向载荷, N; S 为滑动距离, m。

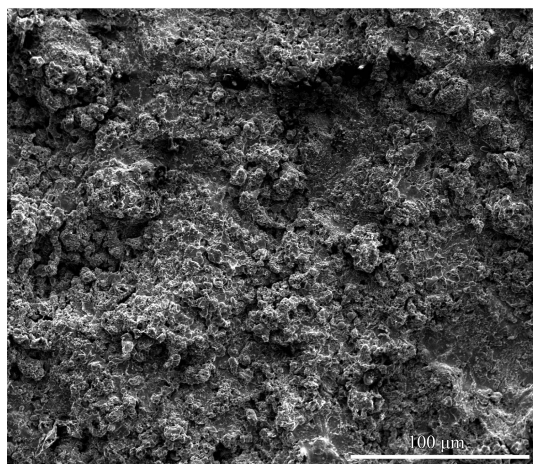
2 结果与讨论

2.1 Mo 涂层微观形貌及组织成分

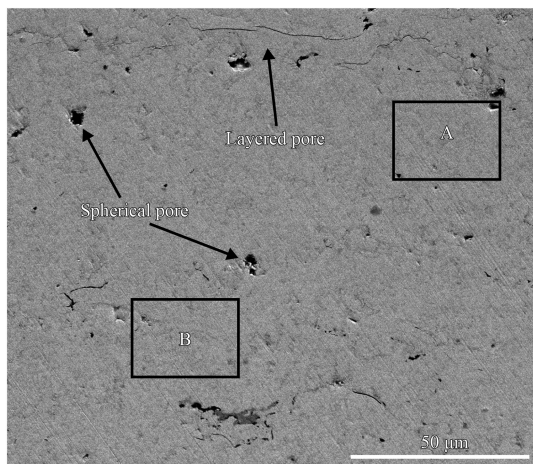
图 1(a) 为 Mo 涂层的原始形貌。由于缺乏后续粒子的撞击夯实, 涂层表面呈凹凸起伏与局部平滑相结合的特征。采用超音速等离子喷涂制备的涂层熔融区相对面积较大, 粉末颗粒能得到较好沉积。

图 1(b) 为 Mo 涂层的截面形貌, 涂层均匀致密, 粒子间搭接效果良好, 除少量球状与层间微裂纹外, 未发现明显分层现象。沿涂层垂直方向依次选取 5 个区域, 经 ImageJ 软件灰度处理, 将结果取平均值, 得到涂层孔隙率仅为 0.59% 。

为检测涂层氧化程度, 分别对图 1(b) 中 A、B 两区域成分进行 EDS 能谱分析, 结果如表 5 所示。涂层的氧元素含量极少, 分别占质量分数的 5.21% 和 4.57% 。Sampath^[11] 在采用普通等离子喷涂技术制备 Mo 涂层时发现, 涂层的氧化物含量主要取决于粒子的飞行速度, 而在同样的飞行速度下, 环境温度越高, 涂层越容易被氧化。试验中, 焰流速度高到 1500 m/s, 且保护气 Ar 以层



(a) Surface



(b) Cross section

图 1 Mo 涂层的微观形貌

Fig. 1 Microscopic morphologies of Mo coating

表 5 涂层 A、B 区域 EDS 能谱分析结果
Table 5 EDS analysis of the coating at area A and B

Area	O		Mo	
	w / %	a / %	w / %	a / %
A	4.57	22.3	95.43	77.7
B	5.21	24.8	94.79	75.2

流为主，气体刚性大，起到了隔绝空气的作用，氧很难与金属液滴接触^[12]。

图 2 为 Mo 涂层与基体结合处的成分 EDS 线扫描。在结合处 Fe 元素与 Mo 元素含量均发生骤降，没有元素扩散迹象，说明涂层与基体未发生冶金结合，而是通过“机械铆合”相接的。由于基体表面经过喷砂处理，粉末颗粒在高速撞击基体后凝固形成“互锁”，涂层与基体的结合仍然紧密，并未出现火焰喷涂及普通等离子制备 Mo 涂层时产生明显结合缺陷和裂纹^[12-13]。

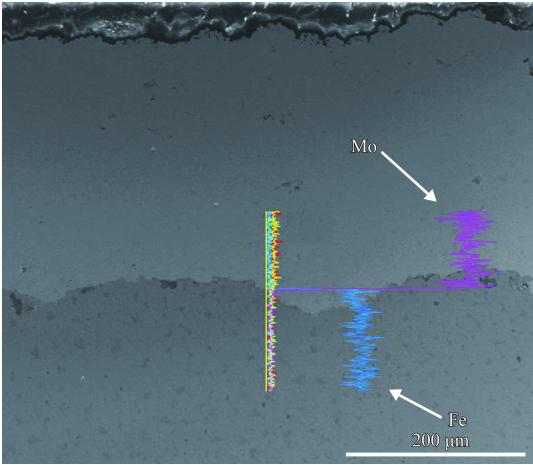


图 2 涂层结合处 EDS 线扫描
Fig.2 EDS line scan on coating junction

2.2 载流摩擦的电接触模型及电弧成因

载流摩擦兼具机械摩擦和电接触的特征，从运动形式上来看，可以将载流摩擦归为一种特殊的电接触形式。如图 3 所示，宏观上光滑的平面，微观上是粗糙不平的。实际接触面积 Ar 往往不足名义接触面积 An 的 1%，其中 Ar 上的全部 $spot-a$ (导电斑点) 面积之和 Ac 起到电流传导作用，导致实际电流密度远大于名义电流密度，产生收缩电阻现象。

结合文献 [14-15]，可将接触区域认为是无数收缩电阻与电容的并联电路 (如图 4 所示)。t 时刻

某点收缩电阻 $R_i(t)$ 根据 Holm 经典模型^[16] 表示为：

$$R_i(t) = \frac{\rho}{2\alpha_i(t)} + \frac{\rho_f d}{\pi \alpha_i(t)^2} \tag{4}$$

其中： ρ 为摩擦副电导率，S/m； ρ_f 为膜层电导率，S/m (或 $\Omega \cdot m$)； $\alpha_i(t)$ 为 t 时刻 $spot-a$ 半径，m。那么，t 时刻总收缩电阻 $R(t)$ 表示为：

$$R(t) = \sum_{i=1}^n R_i(t) \tag{5}$$

同理，t 时刻某微区电容 $C_i(t)$ 表示为：

$$C_i(t) = \varepsilon \frac{S_i(t)}{d_i(t)} \tag{6}$$

其中： ε 为介电常数； $S_i(t)$ 为 t 时刻电容极板面积， m^2 ； $d_i(t)$ 表示某时刻电容极板间距，m。

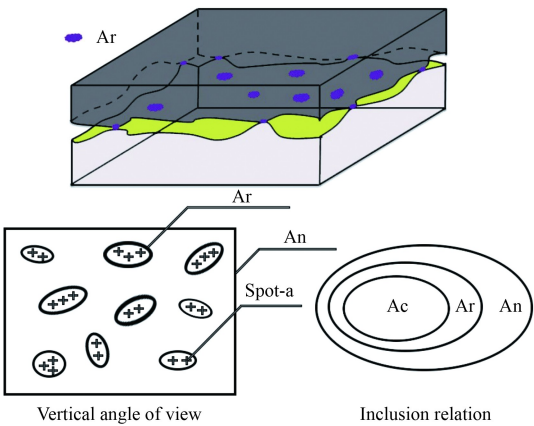


图 3 摩擦副间电接触特征
Fig.3 Electrical contact characteristics between friction pairs

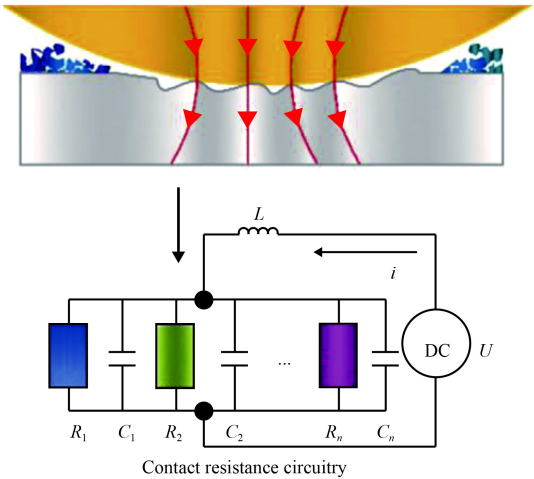


图 4 摩擦副间电接触模型示意图
Fig.4 Schematic diagram of electrical contact model between friction pairs

总电容 $C(t)$ 则表示为:

$$C(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t)$$

(7)

再者, t 时刻摩擦副间电压降 $v_a(t)$ 表示为:

$$v_a(t) = R(t)i = U - R_w i - L \frac{di}{dt}$$

(8)

其中 L 为电路总电感, H; R_w 为外电阻, Ω ; U 为电源电压, V; i 为电路电流, A。

当摩擦副瞬间失接触时情况为:

$$i \rightarrow 0 \Rightarrow -L \frac{di}{dt} \gg 0 \Rightarrow v_a(t) \gg U$$

(9)

即在电流趋近于 0 的过程中, 自感电动势急剧升高, 可产生远大于电源的电压, 当达到最低起弧条件时形成瞬间放电。

由图 5 可知, 随着电流提高, 起弧率整体呈先下降, 后上升趋势, 电弧能量大幅提高。图中起弧率与表面粗糙度变化趋势相似 (如表 6 所示), 这是因为粗糙表面起伏较大, 在较低位置摩擦副间形成间隙, 电弧容易在坑部燃烧^[17]。同时, 在摩擦过程中, 表面粗糙度越高, 摩擦副越容易在冲击和震动作用下发生失接触^[18], 导致起

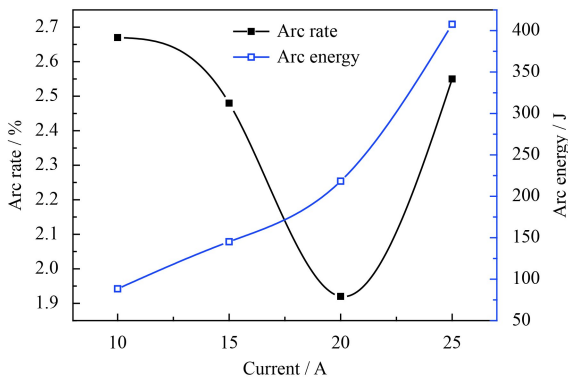


图 5 不同电流下摩擦间起弧率与电弧能量

Fig.5 Buring arc rate and arc energy between friction pairs at different currents

表 6 不同电流下磨痕表面的粗糙度

Roughness coefficient / μm	Current / A				
	0	10	15	20	25
Sq	3.032	7.240	6.380	4.282	5.656
Sa	1.151	5.173	4.482	3.010	3.872

弧率提高。此外, 当 Ac 接触面积减少时, 自感电动势升高, 通过剩余 $spot-a$ 的电流密度骤增, 接触部分在高温下形成熔融桥接, 在拉伸过程中气化为电子和离子, 为电弧的形成创造条件。电流为 25 A 时, 接触点在脱开时电流密度较大, 导致单点熔融频发 (如图 6 所示)。另一方面, 摩擦副间电压、电流越高, 弧区温度也越高, 有利于场电子与热电子的发射, 空隙间电子、离子游离激烈, 起弧率更高, 即提高了起弧率。

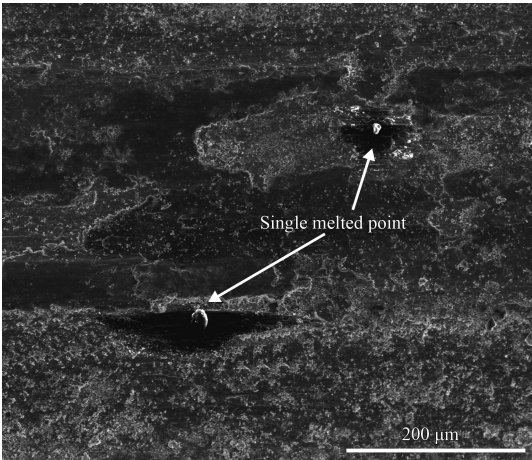


图 6 磨痕表面的单点熔融形貌 (25 A)

Fig.6 Single melted point morphology of worn surface

根据电弧能量计算公式 $\sum UI t_i$, 电流强度与起弧率呈正相关性。虽然各电流条件下起弧率不同, 但电流对电弧能量的影响更为明显, 导致电弧能量总体呈上升趋势。

2.3 电流对摩擦副温升的影响

图 7 为不同电流条件下, 摩擦副在 60、120、180、240 和 300 s 时的温度曲线。由图可见, 电流为 10 A 与未通电情况下摩擦副最高温度范围相近, 为 40~43 $^{\circ}\text{C}$; 而电流为 15 A 以上时摩擦副最高温度范围为 60~109 $^{\circ}\text{C}$, 差异较大。这是因为表面温升是产热与热损耗共同进行的结果。相比于传统机械摩擦, 载流摩擦除摩擦热外, 还存在焦耳热与电弧热两方面热量来源。在载流摩擦中, 根据焦耳热计算公式 $Q = I^2 R t$, 相同条件下的电流越大则产生焦耳热越多, 且磨痕表面氧化也越严重, 由于氧化层的电阻高于纯金属元素, 又增加焦耳热的产生。

如图 8 所示, 摩擦副接触区域温度最高达

96.2 ℃，该区域温升并非由导线热传递所致，而是电阻收缩产生的焦耳热造成的。同时可以看出铝合金摩擦副温度要高于涂层，这是因为 Al 元素的比热容高于 Mo 元素，在试验后期铝合金摩擦副散热速度较慢。且铝合金摩擦副与涂层是点和面的接触，导致其难以同涂层一样通过热传导向四周扩散热量，因此热量积累较严重。

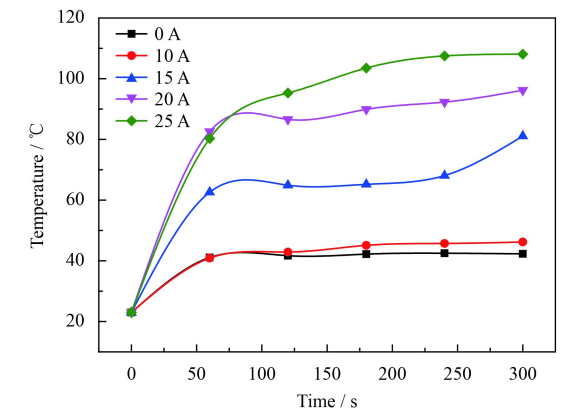


图 7 不同电流下摩擦副温升变化

Fig.7 Variation of temperature rise of different current friction pairs

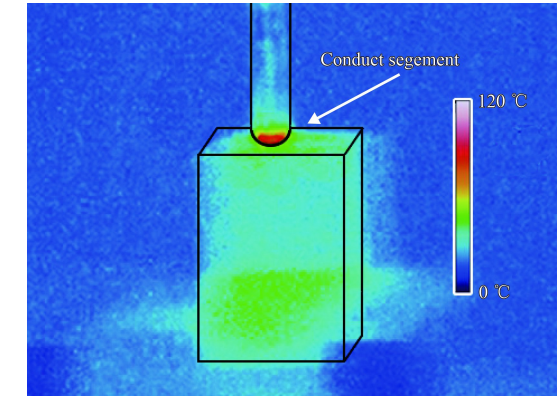


图 8 试验台红外热成像图 (20 A, 300 s)

Fig.8 Infrared thermal image of experimental station

此外，在不同的电流条件下，均观察到磨损表面存在电弧烧蚀痕迹。电流越大，产生电弧的热量越高，摩擦副表面温度瞬时升高，材料发生软化、熔融甚至气化。

对图 9 所示烧蚀区成分进行分析，结果表明该区域含有 Mo (熔点 2623 ℃) 元素及 Al(熔点 660.32 ℃) 元素，同时氧化现象明显，证明了电弧产生的热量极高。因此，焦耳热、电弧热成为了影响 Mo 涂层摩擦磨损性能的主要因素。

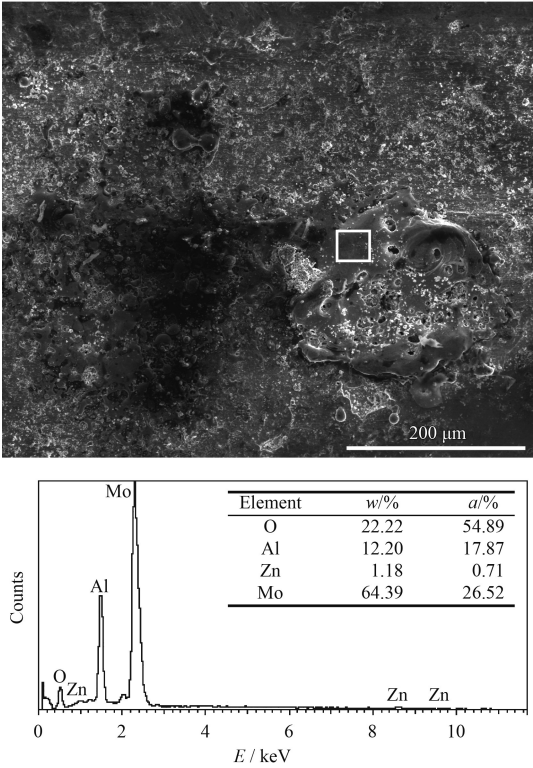


图 9 磨痕熔融区域及 EDS 分析 (25 A)

Fig.9 Morphology and EDS analysis of the wear scar area (25 A)

2.4 电流对表面粗糙度的影响

为测量不同电流下磨痕表面粗糙度，在每组试验参数下等距选取 5 个区域，计算 Sa 与 Sq 平均值，结果如上文表 6 所示。当电流为 0 A 时，粗糙度相对较小；电流从 10 A 增加 25 A 时，粗糙度呈先下降，后上升的趋势。

图 10 和图 11 为 25 A 电流下，铝合金摩擦副微观形貌及磨痕不同区域纵深变化。图 12 为不同

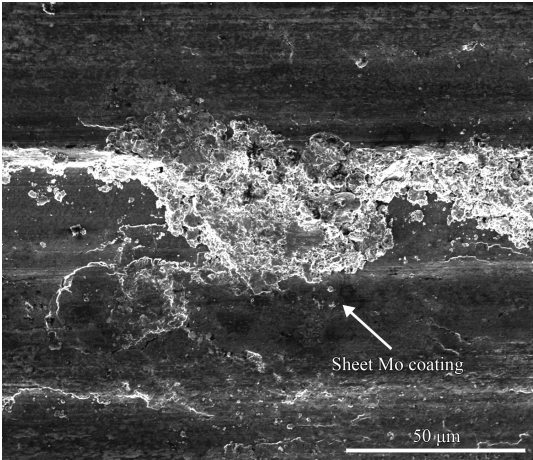


图 10 铝合金摩擦副微观形貌 (25 A)

Fig.10 Microscopic morphology of aluminum alloy friction pair

区域 Mo 涂层显微形貌。结合图 5、7、12 分析可知: 当电流从 0 A 加载到 10 A 时, 起弧率最高, 电弧侵蚀造成了涂层表面开裂, 形成了图 12(b) 中 B 区的剥落形貌, 进而提高了表面粗糙度^[19]; 电流从 10 A 上升到 20 A 时, 氧化膜逐渐形成, 磨痕表面变得平滑, 降低了摩擦副间的黏着倾向, 剥落形貌减少, 同时也提高了摩擦副间的接触面积, 减少了电弧的发生, 表面粗糙度降低;

但当电流增加到 25 A 时, 起弧率和电弧能量明显提高, 产生的瞬时高温导致氧化膜结合强度降低, 在运动中呈片状粘附在铝合金摩擦副表面 (如图 10 所示), 形成了图 12(e) 中的剥落形貌, 导致粗糙度提高。此外如图 11 所示, 电弧烧蚀区域纵深起伏变化明显, 也是造成 10 A(起弧率最高)、25 A(电弧能量最高) 表面粗糙度较高的原因之一。

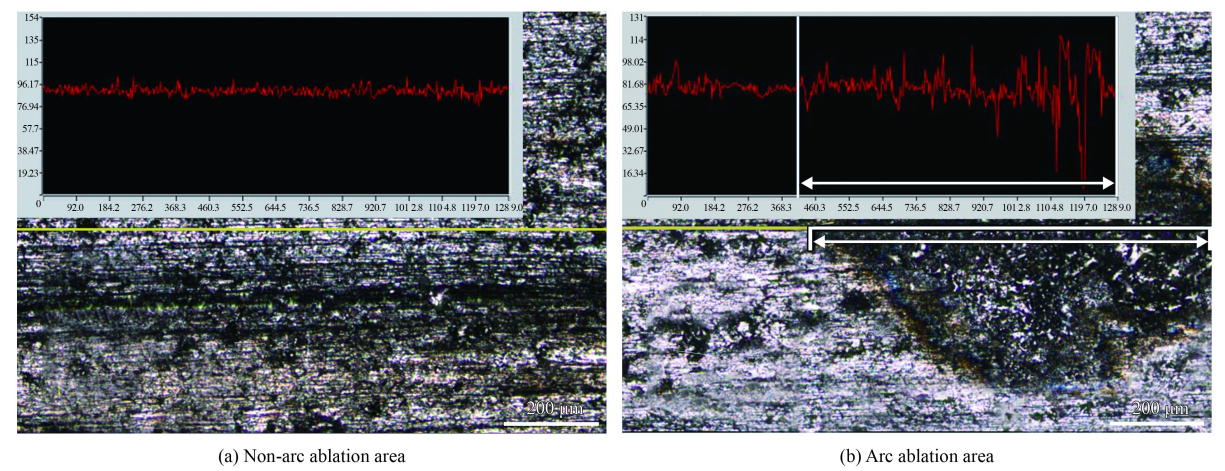


图 11 磨痕不同区域纵深变化对比 (25 A)
Fig.11 Comparison of depth variation in different areas of wear scar

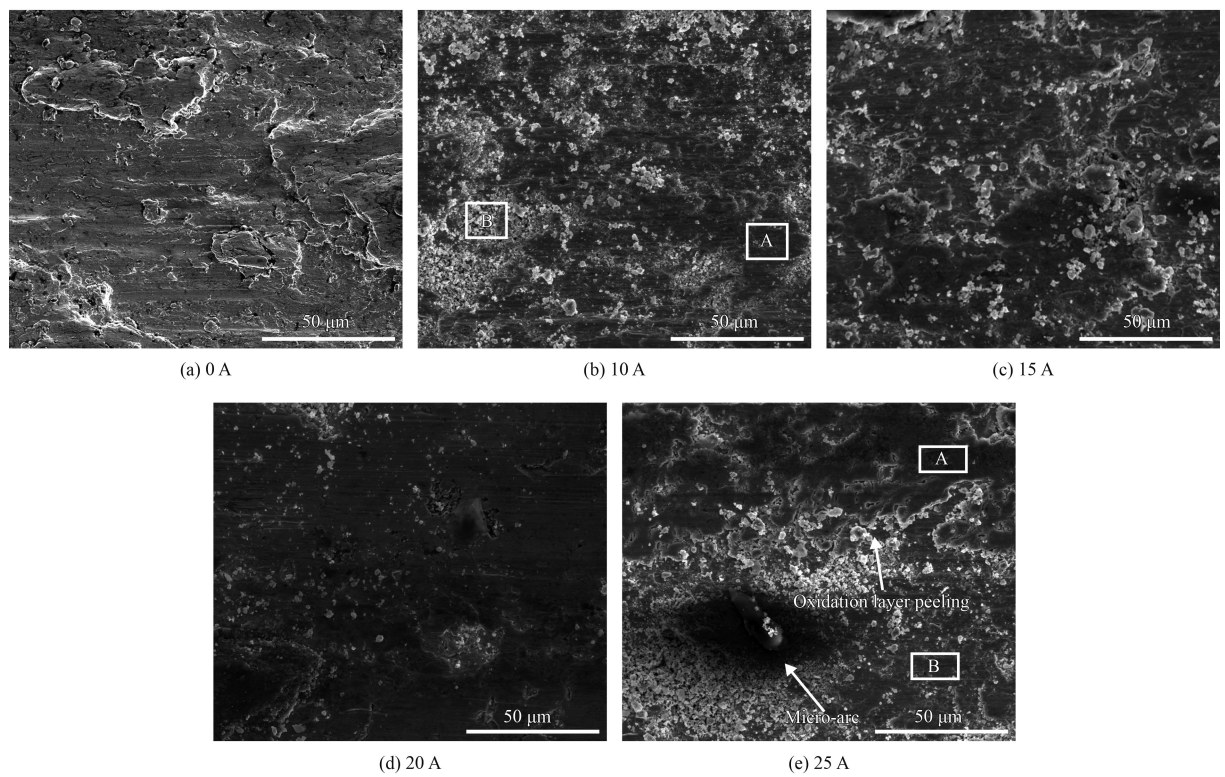


图 12 不同区域 Mo 涂层显微形貌
Fig.12 Microscopic morphologies of Mo coating in different areas

2.5 电流对摩擦磨损性能的影响

图 13 为不同电流下摩擦因数曲线。随着电流增加, 涂层摩擦因数逐渐减小, 特别是在通电后摩擦因数明显降低。电流强度与摩擦因数关系复杂: 一方面, 电流增加, 接触面粗糙度升高, 摩擦因数增加; 另一方面, 电流增加, 高温导致材料发生软化, 剪切强度降低, 摩擦因数下降^[20-21]。此外, 摩擦因数也与涂层表面氧化膜的形成与破裂有关^[22]。

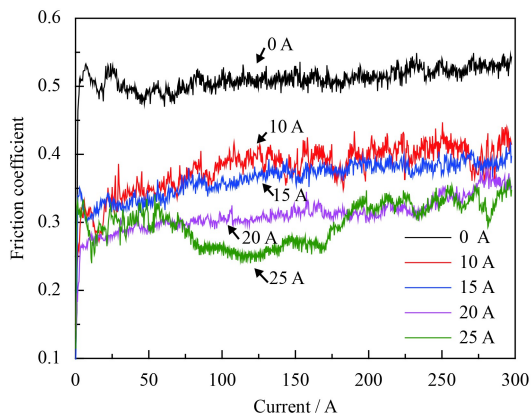


图 13 不同电流下摩擦因数曲线

Fig.13 Friction coefficient curves under different currents

由 2.3 分析可知, 随电流增加, 摩擦副温度升高, 从而导致材料剪切强度降低, 微凸体间相互阻碍作用减弱, 平均摩擦因数整体呈下降趋势。在 0 A 条件下, 摩擦热不足以在磨损表面形成连续致密的氧化膜, 硬度稍低的铝合金在机械力作用下粘附在 Mo 涂层表面, 导致黏着力和摩擦阻力较大, 平均摩擦因数达 0.510。但机械摩擦不涉及电损伤影响, 磨损表面较为平整 (如图 12(a) 所示)。因此, 摩擦因数在经过磨合期后相对平稳。当电流从 10 A 增加到 20 A 时, 氧化膜逐渐连续致密 (如图 12(b)~(d) 所示), 降低了摩擦过程中的黏着力, 摩擦因数波动也随之降低。当电流增加到 25 A 时, 平均摩擦因数比 20 A 时仅下降了 0.013, 且摩擦因数波动较大。结合文献^[23]分析得出: 氧化层与涂层材料热膨胀系数不同, 高温下产生生长应力, 在反复碾压中形成磨屑留在磨痕表面, 导致摩擦因数不稳定 (如图 12(e) 所示)。磨屑堆积可以改变摩擦副接触形式, 从而减少摩擦因数^[24]。

图 14 为不同电流下涂层磨损率。当电流为 0 A 时, 摩擦副温升较低, 微凸体间咬合力大, 涂层

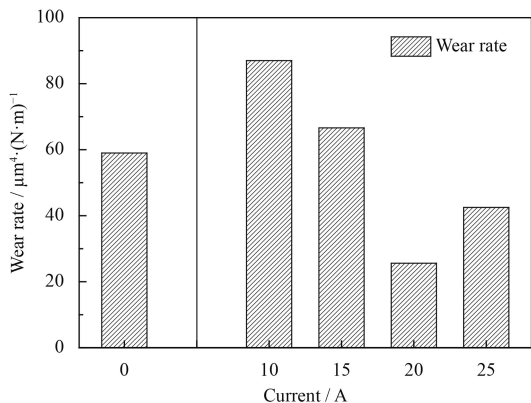


图 14 不同电流下涂层磨损率

Fig.14 Wear rate of coatings under different currents

出现了层状剥落和轻微犁沟, 表面较为平整 (如图 12(a)、图 15 所示)。对表面进行 EDS 分析表明, 磨痕以 Mo 元素为主 (质量分数 88.4%), 含有少量 Al、O 元素 (质量分数分别为 4.23%、7.37%), 未发生明显的黏着磨损及氧化磨损。

如图 12(b) 所示, 电流为 10 A 时, 磨痕表面出现了深色的 Al 转移区 (A 区) 和浅色的富 Mo 区 (B 区), 其中 A 区 Mo、Al、O 元素质量分数分别为 58.88%, 26.41% 和 13.71%, B 区 Mo、Al、O 元素质量分数为 85.21%、5.11% 和 9.68%, 较 0 A 条件下磨损率提高明显。这表明: 通电情况下接触微区在焦耳热和电弧热的作用下温度骤升, 摩擦副间发生了黏着磨损, 涂层在运动过程中被撕裂剥落。剥落的涂层在反复碾压过程中形成细小磨屑, 由于接触面积减少, 电流在磨屑区域产生了“集束”效应, 磨屑在焦耳热及微弧的作用下进一步氧化, 高温下造成更为严重的犁沟现象。此外, 由于电流较小, 涂层未能全部被氧化膜覆盖, 富 Mo 区易于产生电弧, 涂层在热应力作用下沿电弧烧蚀方向开裂 (如图 16 所示), 成为后续涂层发生片状剥落的原因之一, 加剧了机械磨损。

当电流从 10 A 增加到 20 A 时, 磨损率大幅下降。结合图 12(b)~(d) 及图 15 可知, 随电流增大, 温度升高, 铝合金摩擦副软化明显, 磨痕逐渐被含有 Al_2O_3 和 MnO_3 的氧化膜覆盖。进一步对磨痕表面成分和硬度进行测量, 结果如表 7 所示, 可见随电流增加, 磨痕表面的氧含量和硬度均增加, 有效减少了摩擦副间的黏着与磨损, 同时表面粗糙度下降, 降低了起弧率。

当电流增加到 25 A 时, 涂层表面含氧量继续增加, 氧化层结合强度降低, 在正应力与剪应力

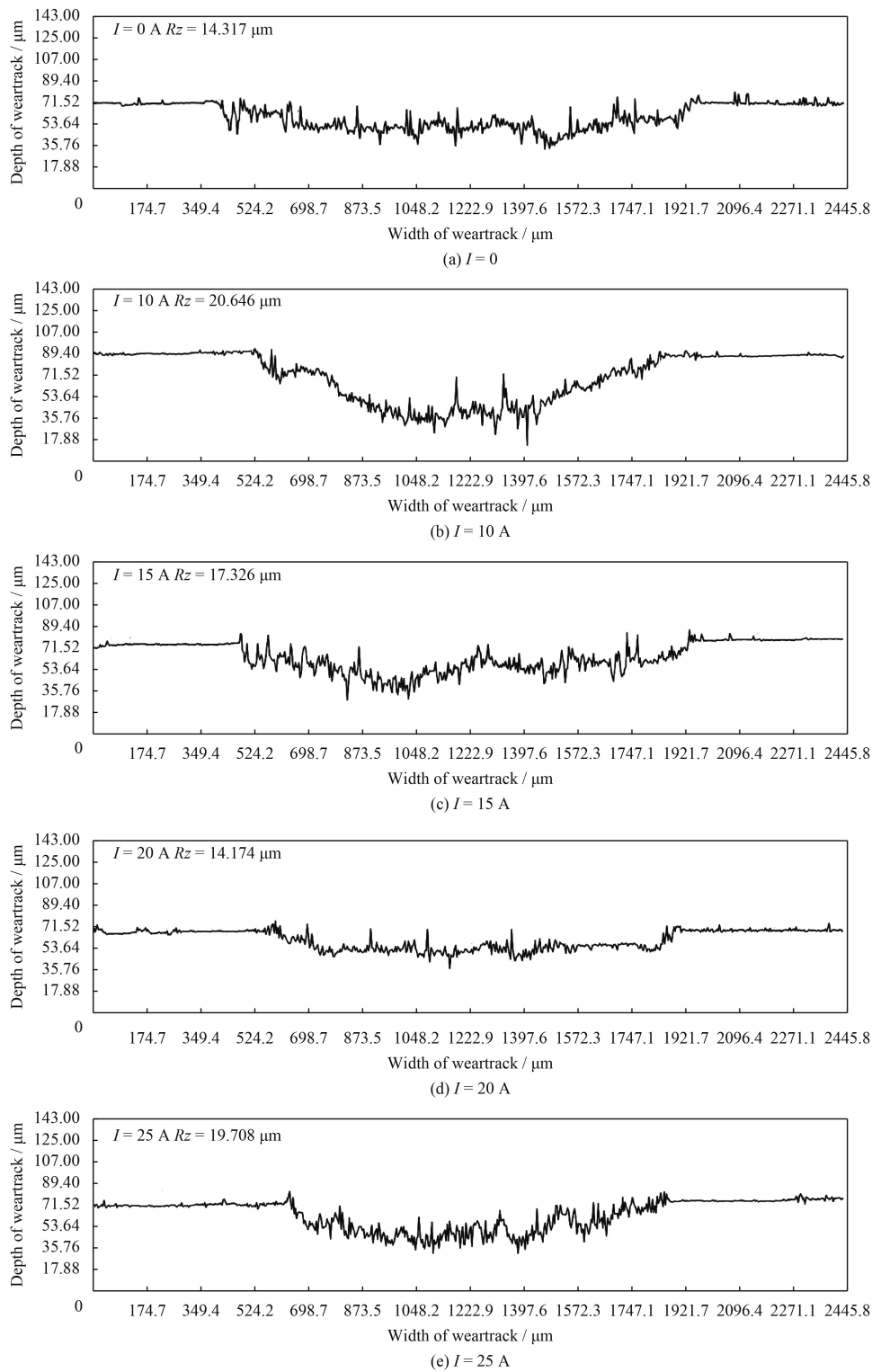


图 15 不同电流下磨痕截面轮廓曲线

Fig.15 Wear profile cross-section profile under different currents

的共同作用下更容易发生剥落，导致磨损率提高。如图 12(e) 所示，可以清晰看到氧化层先沿边缘开裂，后成片状剥落的过程。为澄清涂层剥落是氧化现象导致的，分别对图中所示的区域进行

成分分析，结果表明氧化区域含氧量 (质量分数 31.1%) 明显高于新鲜露出表面含氧量 (质量分数 9.4%)；产生的硬质颗粒在高温下划伤涂层表面，加剧磨粒磨损，且容易形成单点微电弧烧蚀。

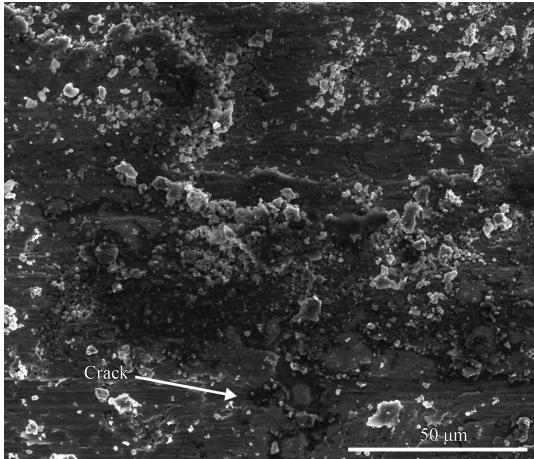


图 16 电弧侵蚀造成的表面裂纹 (10 A)

Fig.16 Surface crack caused by arc erosion

表 7 不同电流下磨痕表面 EDS 分析及硬度

Table 7 EDS analysis and hardness of oxide film under different currents

Current / A	Element, w / %			Hardness / HV _{0.1}
	Mo	Al	O	
0	88.40	4.23	7.27	
10	55.35	27.18	17.47	489.21
15	52.98	25.14	21.88	521.52
20	44.67	30.12	25.21	597.74

3 结 论

(1) 采用超音速等离子喷涂制备的 Mo 涂层组织致密、氧化程度低, 孔隙率仅为 0.59%; 涂层与基体的结合方式为“机械铆合”。

(2) 由于接触表面不平整, 摩擦副间只有极小部分面积承担传导电流作用, 接触区域构成了无数收缩电阻与微电容的并联电路, 产生大于电源电压的自感电动势, 促进电弧形成。随电流提高, 起弧率呈先下降, 后上升趋势, 电弧能量大幅增加。

(3) 载流摩擦中产生的焦耳热与电弧热对摩擦副表面温升影响重大。电流越高, 在接触微区产生的电流收缩越明显, 导致摩擦副温升更高, 同时电弧热产生的瞬时高温可达到 Mo、Al 元素熔点。

(4) 在未通电流情况下, 磨痕表面粗糙度较低; 通电后, 磨痕表面粗糙度受黏着撕裂、电弧烧蚀、氧化膜形成与破裂因素影响呈先下降, 后上升趋势。

(5) 当电流从 0 A 提高到 25 A 时, 平均摩擦因数从 0.510 下降到 0.298, 微凸体间的阻力及氧化膜的完整性成为影响摩擦因数的主要因素; 当电流提高到 25 A 时, 表面膜剥落导致摩擦因数出现波动, 摩擦因数比 20 A 时仅下降了 0.13。

(6) 未通电时, 涂层以机械磨损为主; 通电后, 涂层受电弧烧蚀、黏着磨损、氧化磨损影响, 同时电流的存在也加剧了涂层剥落与磨粒磨损。另一方面, 较高电流也有利于氧化膜形成, 降低涂层磨损率; 当电流为 20 A 时磨损率最低。

参考文献

[1] 吴始栋. 舰载电磁炮材料的应用研究[J]. 中外船舶科技, 2013(1): 25-29.
WU S D. Application of the shipborne electromagnetic rail-gun materials[J]. Chinese & Foreign Ship Technology, 2013(1): 25-29 (in Chinese).
[2] 季鑫. 磁控溅射 Ta-Mo 高温涂层制备工艺和性能的研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2009.
JI X. Research on preparation process and properties of Ta-Mo heat resisting coating by magnetron sputtering[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2009 (in Chinese).
[3] MEGER R A, COOPER K, JONES H, et al. Analysis of rail surfaces from a multishot railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 211-213.
[4] 刘贵民, 杨忠须, 闫涛, 等. 电磁轨道炮导轨失效研究现状及展望[J]. 材料导报, 2015, 29(7): 63-70.
LIU G M, YANG Z X, YAN T, et al. Current status and prospect on rail failures of electromagnetic railgun[J]. Materials Review, 2015, 29(7): 63-70 (in Chinese).
[5] 杨忠须, 刘贵民, 闫涛, 等. 热喷涂 Mo 及 Mo 基复合涂层研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(5): 20-30, 110.
YANG Z X, LIU G M, YAN T, et al. Research progress of Mo and Mo-based coating prepared by thermal spraying[J]. Surface Technology, 2015, 44(5): 20-30, 110 (in Chinese).
[6] 严淑群. 钼系涂层的制备工艺研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2001(2): 16-19, 30.
YAN S Q. Study of technology for Mo-base coat[J]. Hunan Metallurgy, 2001(2): 16-19, 30 (in Chinese).
[7] HWANG B, LEE S, AHN J. Correlation of microstructure and wear resistance of molybdenum blend coatings fabricated by atmospheric plasma spraying[J]. Materials Science & Engineering A, 2004, 366(1): 152-163.
[8] GUO X Q, NIU Y R, HUANG L P et al. Microstructure and tribological property of TiC composite coating prepared by vacuum plasma spraying[J]. Journal of Thermal Spray

- Technology, 2012, 21(5): 1083-1090.
- [9] MODI S C, CALLA E. A study of high-velocity combustion wire molybdenum coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001, 10(3): 480-486.
- [10] 刘贵民, 杨忠须, 张一帆, 等. 基于正交试验法的超音速等离子喷涂钼涂层组织及性能研究[J]. *兵工学报*, 2016, 37(8): 1489-1496.
- LIU G M, YANG Z X, ZHANG Y F, et al. Research on microstructure and properties of supersonic plasma sprayed Mo coating based on orthogonal experiment[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1489-1496 (in Chinese).
- [11] SAMPATH S, JIANG X, KULKARNI A, et al. Development of process maps for plasma spray: case study for molybdenum[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, 348(1): 54-66.
- [12] 刘贵民, 杨忠须, 闫涛, 等. 45CrNiMoVA 钢表面喷涂 Mo 研究[J]. *粉末冶金技术*, 2015, 33(2): 121-126.
- LIU G M, YANG Z X, YAN T, et al. Microstructure and properties of molybdenum coating on 45CrNiMoVA steel[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2015, 33(2): 121-126 (in Chinese).
- [13] VAIDYA A, STREIBL T, LI L, et al. An integrated study of thermal spray process-structure-property correlations: A case study for plasma sprayed molybdenum coatings[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2005, 403(1): 191-204.
- [14] DONG L, CHEN G X, ZHU M H, et al. Wear mechanism of aluminum-stainless steel composite conductor rail sliding against collector shoe with electric current[J]. *Wear*, 2007, 263(1): 598-603.
- [15] LIU X L, CAI Z B, HE J F, et al. Effect of elevated temperature on fretting wear under electric contact[J]. *Wear*, 2017, 376-377: 643-655.
- [16] GREENWOOD J A. Constriction resistance and the real area of contact[J]. *British Journal of Applied Physics*, 2002, 17(12): 1621-1632.
- [17] 冀盛亚, 孙乐民, 上官宝, 等. 铜基粉末冶金/铬青铜摩擦副载流摩擦磨损的电弧侵蚀特性研究[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(2): 5-7.
- JI Y S, SUN L M, SHANG G B, et al. Research on arc erosion characteristics of Cu-base powder metallurgy/QCr0.5 couples under electric current[J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(2): 5-7 (in Chinese).
- [18] BUCCA G, COLLINA A. A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system[J]. *Wear*, 2009, 266: 146-159.
- [19] SHANGGUAN B, ZHANG Y Z, XING J D, et al. Study of the friction and wear of electrified copper against copper alloy under dry or moist conditions[J]. *Tribology Transactions*, 2010, 53(6): 927-932.
- [20] TSAI C W, TSAI M H, YE H J W, et al. Effect of temperature on mechanical properties of Al0.5CoCrCuFeNi wrought alloy[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2010, 490(1): 160-165.
- [21] 闫小青, 谢志龙, 樊保圣, 等. 基于表面粗糙度影响的摩擦声发射特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(6): 587-591.
- YAN X Q, XIE Z L, FAN B S, et al. Characteristics of friction-introduced acoustic emission based on the surface roughness[J]. *Tribology*, 2011, 31(6): 587-591 (in Chinese).
- [22] 马行驰, 何国求, 何大海, 等. 铜石墨合金材料在载流条件下的摩擦磨损行为研究[J]. *摩擦学学报*, 2008, 28(2): 167-172.
- MA X C, HE G Q, HE D H, et al. Friction and wear behavior of copper-graphite material under electrical current[J]. *Tribology*, 2008, 28(2): 167-172 (in Chinese).
- [23] 刘纯波, 林锋, 蒋显亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(1): 1-13.
- LIU C B, LIN F N, JIANG X L. Current state and future development of thermal barrier coating[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(1): 1-13 (in Chinese).
- [24] 李杨绪, 朱德贵, 彭旭, 等. 20%Cu 复合材料的载流摩擦磨损性能[J]. *机械工程材料*, 2016, 40(11): 81-87.
- LI Y X, ZHU D G, PENG X, et al. Friction and wear properties with electrical current of 20%Cu composite[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2016, 40(11): 81-87 (in Chinese).