

# 等离子喷涂 $\text{MoS}_2/\text{Cu}$ 基复合涂层 真空摩擦磨损性能

Tribological Behavior of Plasma Sprayed  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$   
Composite Coating Under Vacuum Atmosphere

甄文柱, 梁 波

(燕山大学 亚稳材料制备技术与科学  
国家重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

ZHEN Wen-zhu, LIANG Bo

(State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology,  
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

**摘要:** 以  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  复合粉体为原料, 采用等离子喷涂技术在 2A12 铝合金基体上制备  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  基复合涂层。运用扫描电镜、能谱、X 射线衍射、拉曼光谱等手段对涂层显微结构、磨损表面进行表征, 并利用 GTM-3E 球盘式真空摩擦磨损仪探讨真空环境下  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  基复合涂层的摩擦行为。结果表明:  $\text{MoS}_2$  颗粒均匀分布于涂层中; 涂层结构比较致密且与铝基体结合牢固; XRD 分析表明复合涂层物相组成主要为  $\text{Cu}$ 、 $\text{MoS}_2$  相及  $\text{Cu}_2\text{O}$  相。实验条件下复合涂层表现出优异的真空减摩效果, 涂层的真空摩擦因数在 0.05~0.15 之间。真空磨损过程中,  $\text{MoS}_2$  自润滑膜层的形成是涂层低摩擦因数的主要原因; 真空磨损机理主要表现为疲劳磨损和脆性断裂。

**关键词:** 等离子喷涂;  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  基复合涂层; 真空摩擦

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.08.003

中图分类号: TG333 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2013)08-0016-07

**Abstract:**  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  composite coating was deposited by air plasma spraying on 2A12 aluminum alloy substrate using  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  composite powder as raw material. Microstructure and wear surface of coating were characterized by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), X-ray diffraction (XRD) and Raman spectra. The tribological properties of as-sprayed coating in vacuum were explored using GTM-3E ball-on-disc vacuum friction and wear instrument. The results showed that  $\text{MoS}_2$  particles were homogeneously distributed in the as-sprayed coating. The as-sprayed coating was dense and had good bonding with aluminum matrix. XRD analysis demonstrated that  $\text{Cu}$ ,  $\text{MoS}_2$  and  $\text{Cu}_2\text{O}$  phase were observed. Under the test conditions, the as-sprayed coating exhibited excellent friction reducing effect through the addition of  $\text{MoS}_2$  component, the obtained friction coefficients were in the range from 0.05 to 0.15. The low friction coefficient could be attributed to the formation of uniform  $\text{MoS}_2$  lubricating transfer film. The main wear mechanisms observed in vacuum were fatigue wear and brittle fracture.

**Key words:** plasma spraying;  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$ -base composite coating; vacuum friction

铜基复合材料是滑动轴承材料中一类重要的金属基复合材料。已有的大量研究表明, 通过在铜中添加合金元素如 Pb, Zr, Cr 等形成的铜基合金材料, 可以显著改善铜基材料的摩擦磨损性能<sup>[1-3]</sup>。此外, 通过粉末冶金方法合成的铜石墨复合材料, 也可以显著提高铜基材料的抗摩擦磨损性。目前, 采用铜复合固体润滑剂的研究已经成为铜基复合材料的一个研究重点<sup>[4-7]</sup>。对于真空环境下的应用而言,  $\text{MoS}_2$  或 PTFE

呈现出比石墨更好的真空润滑特性<sup>[8-12]</sup>, 因此, 开展铜复合  $\text{MoS}_2$  或 PTFE 的真空摩擦磨损性能研究, 具有十分重要的意义。等离子喷涂技术可以快速实现金属基或陶瓷基复合涂层的制备<sup>[13-16]</sup>。等离子喷涂金属基复合涂层具有结合强度高, 涂层结构致密, 易于工业化生产, 工艺方便等特点<sup>[17-20]</sup>。本工作利用等离子喷涂技术在铝基体上制备  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  基复合涂层, 研究真空环境下不同摩擦速率、载荷条件下  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  基复

合涂层的摩擦磨损行为。

1 实验方法

喷涂粉体选用商用 MoS<sub>2</sub>/Cu 复合粉(CMo-30,新宏泰粉末冶金有限公司)。图 1 为 MoS<sub>2</sub>-70%Cu 复合

粉体形貌及 EDS 分析。粉体各组分含量(质量分数,下同)分别为 70%Cu 和 30%MoS<sub>2</sub>,微量杂质;粉末粒度为 75~150μm;喷涂前粉体置于 60℃干燥箱中干燥 2h。基材选用尺寸为 φ50mm×8mm 的 2A12 铝合金,使用线切割机加工,喷涂前对基材表面进行打磨、丙酮浸泡、喷砂(选用 600 目棕刚玉)并用酒精清洗喷涂面。

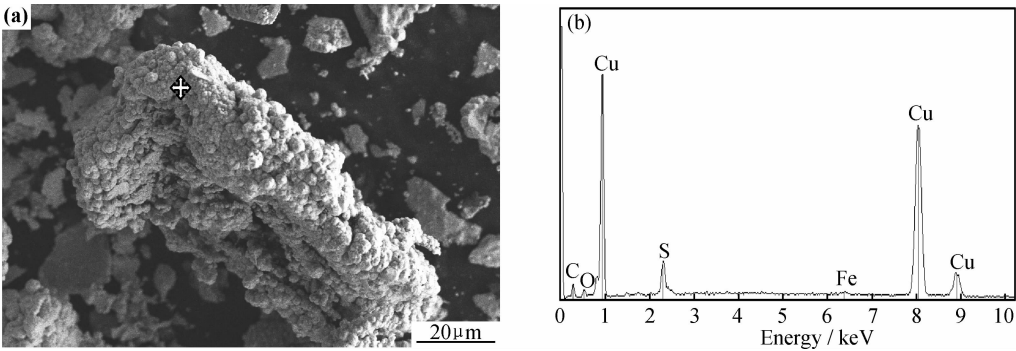


图 1 MoS<sub>2</sub>-70%Cu 复合粉体形貌(a)及 EDS 分析(b)  
Fig. 1 Morphology(a) and EDS analysis(b) of MoS<sub>2</sub>-70%Cu composite powder

采用大气等离子喷涂设备,其中喷枪为 Sulzer Metco 9MB Plasma Gun。优化后的大气等离子喷涂

工艺参数如表 1 所示。  
利用 GTM-3E 球盘式真空摩擦磨损仪对复合涂

表 1 大气等离子喷涂工艺参数  
Table 1 The process parameters of air plasma spraying

Powder	Power/kW	Primary gas(Ar <sub>2</sub> ) (L·min <sup>-1</sup> )	Secondary gas(H <sub>2</sub> )/ (L·min <sup>-1</sup> )	Powder feed rate/ (g·min <sup>-1</sup> )	Spray distance/mm
MoS <sub>2</sub> /Cu	22	0	2	40	100

层进行高真空摩擦磨损性能测试。试样尺寸为 φ50mm×8mm,摩擦对偶为 φ6mm 的 GCr15 不锈钢球。摩擦载荷为 5~25N,摩擦速率为 0.5~2.5m/s,真空度为 10<sup>-3</sup> Pa,摩擦距离为 200m。磨损体积损失利用 CFT-I 型材料表面性能综合测试仪进行测量。每个样品在相同测试条件下重复 5 次,摩擦因数及磨损量均为 5 次测量结果的平均值。

MoS<sub>2</sub>/Cu 复合涂层制备过程少量 Cu 的氧化产生的。Cu<sub>2</sub>O 的存在可以有效防止摩擦过程中涂层与对磨件之间的冷焊、咬合,提高涂层的摩擦磨损性能。

利用 S4800 场发射扫描电镜、E3200 普通扫描电镜、NORAN SYSTEM 7 能谱分析系统、M03XHF 型 X 射线衍射仪、inVia 显微共焦拉曼光谱仪分别对粉体,涂层,摩擦表面的形貌、成分及物相组成进行分析。

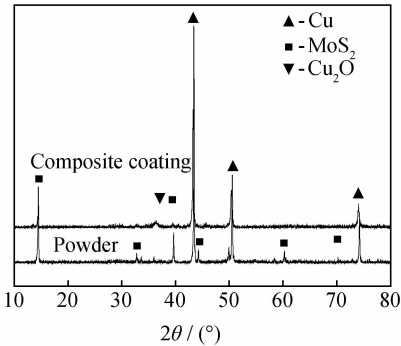


图 2 粉体及 MoS<sub>2</sub>/Cu 复合涂层 XRD 分析图谱  
Fig. 2 XRD patterns of powder and MoS<sub>2</sub>/Cu composite coating

2 结果与讨论

2.1 复合涂层的物相组成与结构

图 2 为粉体及复合涂层 XRD 分析图谱。可知,粉体中主要含有 Cu 和 MoS<sub>2</sub>,粉体纯度较高。复合涂层物相组成主要为 Cu, MoS<sub>2</sub>, Cu<sub>2</sub>O。喷涂后涂层组分中出现新的物质 Cu<sub>2</sub>O。Cu<sub>2</sub>O 新相的引入是由于

为了更清楚地表征涂层的物相组成,对复合涂层表面进行了拉曼光谱分析(图 3)。可见,涂层中除含有 Cu, MoS<sub>2</sub>, Cu<sub>2</sub>O 等物质外,还含有微量的 S 及

$\text{MoO}_3$ ,  $\text{MoO}_2$  等氧化物。S 的出现说明在高温下,  $\text{MoS}_2$  颗粒出现了一定的分解。这些氧化物中  $\text{CuO}$  可提高涂层的摩擦磨损性能, 而  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{MoO}_2$  为硬质相, 摩擦过程中常以磨粒形式存在<sup>[7,8]</sup>。但是结合涂层 XRD 图谱分析的结果, 可以发现这些氧化物都很微量, 因此对涂层润滑性能影响较小。

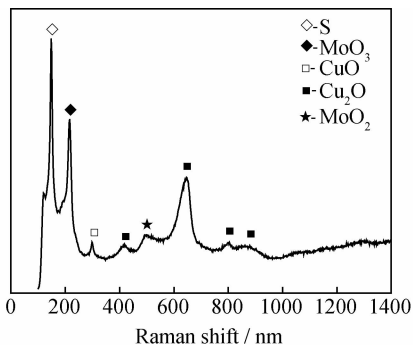


图 3  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  复合涂层表面拉曼分析图谱

Fig. 3 Raman spectrum of  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  composite coating

图 4 为  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  复合涂层截面组织。可知, 涂层结构较为致密, 除少量大气孔外, 其余为几微米左右的细小气孔且均匀分布。 $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  颗粒均匀分布于涂层中, 有利于摩擦过程中  $\text{MoS}_2$  润滑剂的持续稳定供给。涂层与基体结合处平整光滑, 没有出现裂纹, 说明涂层与基体结合良好, 为涂层良好润滑性能的体现提供了保证。

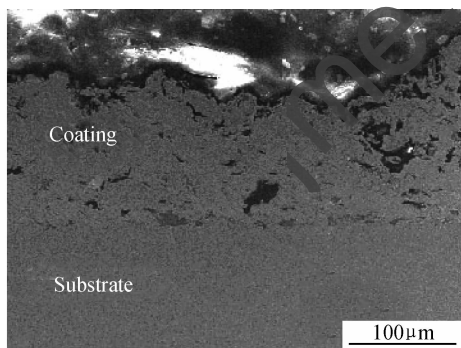


图 4  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  复合涂层截面组织

Fig. 4 Cross-sectional microstructure of  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  composite coating

## 2.2 滑动速率对涂层摩擦行为的影响

图 5 是真空环境中, 不同摩擦速率下  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  复合涂层摩擦因数曲线。由图 5 可知, 滑动速率对等离子喷涂  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  复合涂层的摩擦行为有着较明显的影响。载荷一定时, 随着摩擦速率的增加, 涂层摩擦因数呈现出一定的下降趋势。不同滑动速率下, 所获得的最大摩擦因数为 0.15, 最小摩擦因数为 0.05。

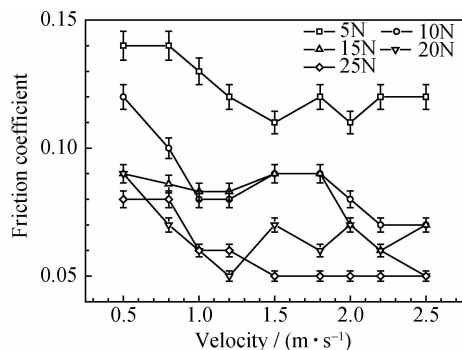


图 5 不同摩擦速率下  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  复合涂层摩擦因数曲线

Fig. 5 Variation of friction coefficient for  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  composite coating under different sliding velocities

滑动速率变化导致  $\text{MoS}_2/\text{Cu}$  复合涂层摩擦因数的变化, 原因在于滑动速率增大造成涂层表面结构出现了变化, 形成了减磨作用的  $\text{MoS}_2$  膜所致。这种滑动速率增大导致的  $\text{MoS}_2$  润滑膜的形成, 在本实验中, 通过磨痕表面形貌的变化和能谱分析得到证实(图 6, 7)。图 6 为 20N, 0.5~2.5m/s 条件下涂层磨痕形貌扫描照片。从图 6(a)可知, 0.5m/s 时, 涂层表面虽然出现了一定的塑性变形, 仍可观察到部分原始表面, 摩擦表面磨痕不连续; 随滑动速率的增加, 明显观察到摩擦表面塑性变形增加, 出现了连续的磨痕。磨痕表面可观察到大量裂纹和层状剥落(图 6(b)~(d))。

实际上, 随着滑动速率增加, 摩擦热会快速积累, 使得摩擦区域材料出现软化现象。磨痕的表面会随着材料软化呈现越来越明显的塑性变形, 形成连续的磨痕。在此过程中, 涂层中均匀分布的  $\text{MoS}_2$  颗粒被逐渐磨出、破碎并吸附于磨痕表面, 形成自润滑膜层。这是由于  $\text{MoS}_2$  层边缘的 Mo 和 S 原子由于分别和 4 个 S 原子和 2 个 Mo 原子成键而具有 S 悬空键,  $\text{MoS}_2$  呈负电性。Cu—S 键键能较小而易于成键, 相比于在 Fe, Ni 及不锈钢(1Cr18Ni9Ti)表面,  $\text{MoS}_2$  更易在 Cu 表面形成  $\text{MoS}_2$  自润滑膜层<sup>[21]</sup>。

钢球与复合涂层之间的接触, 随着  $\text{MoS}_2$  自润滑膜层的形成转变为钢球与自润滑膜层的接触, 从而有效降低了涂层摩擦因数。当滑动速率增大到 2.5m/s 后, 摩擦表面的塑性变形使得摩擦表面形成光滑、连续、较致密的结构。这种由于高速滑动导致的较大的塑性变形, 可以吸收滑动过程中的冲击能量, 缓冲钢球与复合涂层之间的作用力, 从而减小了摩擦阻力, 进一步降低材料摩擦因数(图 6(e))。

喷涂后涂层中形成的  $\text{Cu}_2\text{O}$  也对较高滑动速率下涂层的摩擦行为有一定的益处。滑动速率增大后, 涂层与对磨副间也会出现黏合现象, 增大相对滑动的阻力, 增大摩擦因数。但是, 由于一定量  $\text{Cu}_2\text{O}$  的存在,

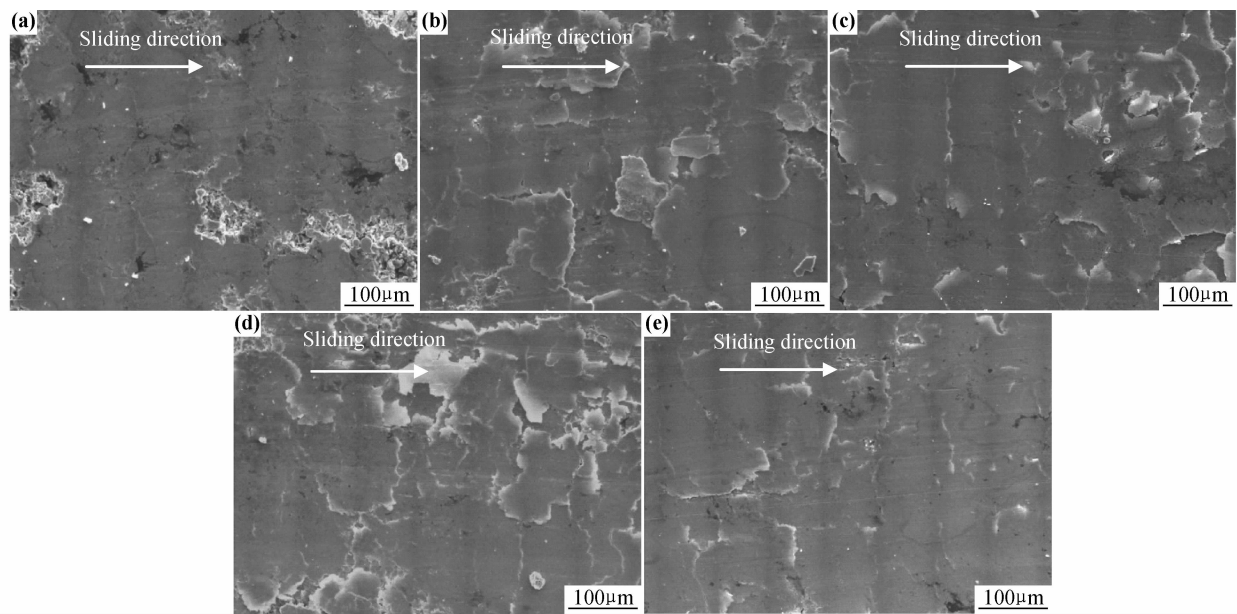


图 6 载荷 20N、不同滑动速率下复合涂层磨痕形貌扫描照片  
(a)0.5m/s;(b)1.0m/s;(c)1.5m/s;(d)2.0m/s;(e)2.5m/s

Fig. 6 SEM micrographs of worn surface of composite coating under the load of 20N and different sliding speeds  
(a)0.5m/s;(b)1.0m/s;(c)1.5m/s;(d)2.0m/s;(e)2.5m/s

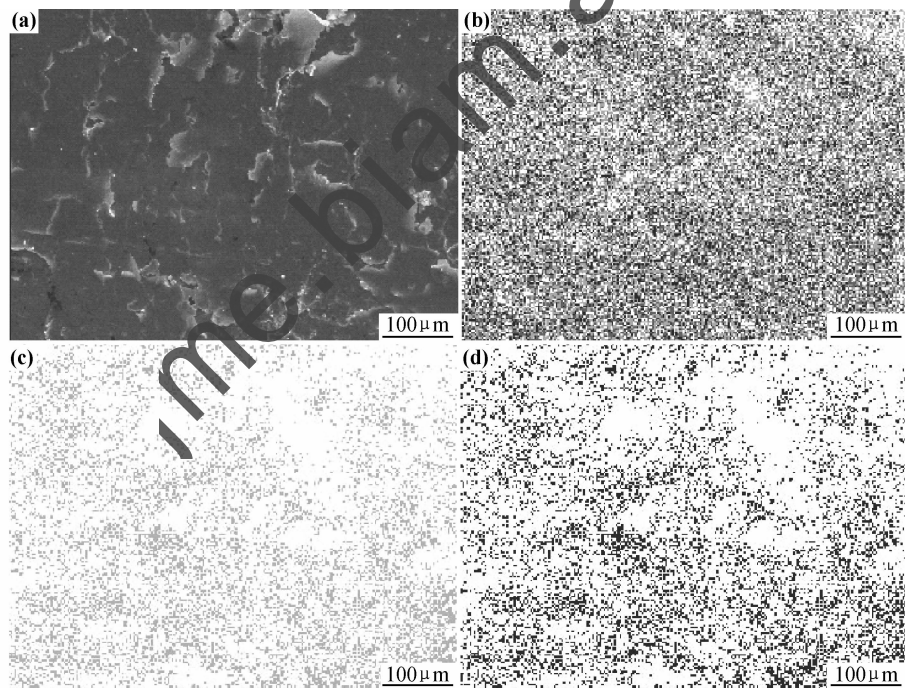


图 7 载荷 20N、1.5m/s 滑动速率下复合涂层磨痕表面形貌和面扫描分析  
(a)磨痕表面形貌;(b)Cu;(c)Mo;(d)S

Fig. 7 Micrograph and EDS analysis of worn surface of composite coating under the load of 20N and velocity of 1.5m/s  
(a)micrograph of worn surface of composite coating;(b)Cu;(c)Mo;(d)S

可以明显降低对摩擦副间的黏合,维持 MoS<sub>2</sub> 膜的减磨作用。

磨痕表面形成的连续 MoS<sub>2</sub> 膜,通过磨痕表面的能谱分析得到了证明。由 20N,1.5m/s 条件下涂层磨

痕表面的能谱可知,Mo 元素和 S 元素在磨痕表面上均匀分布,表明 MoS<sub>2</sub> 已经均匀平铺于磨痕表面。

2.3 载荷对涂层摩擦磨损性能的影响

摩擦载荷是影响摩擦行为的另一重要因素。由图

5 可知,在载荷一定的情况下,随滑动速率增加,MoS<sub>2</sub>/Cu 复合涂层的摩擦因数呈下降趋势。

图 8 是 2.5m/s 滑动速率、不同载荷下复合涂层磨痕形貌照片。从图 8(a)可知,5N 下摩擦表面的磨痕较轻。磨痕表面形貌与原始形貌相比变化不大;当载荷增大到 10,15N 后(图 8(b),(c)),磨痕表面有明

显的塑性变形,磨痕轨迹逐渐清楚,磨痕逐渐光滑。而当载荷增大到 20N(图 8(d)),磨痕表面形貌已经同原始涂层相比完全不同,整个磨痕表面光滑,由于反复研磨,表面塑性变形强烈,出现了典型的层片状结构。原始表面观测到的微小裂纹、气孔被塑性形变的金属层覆盖,磨痕表面的形貌出现较大的变化。

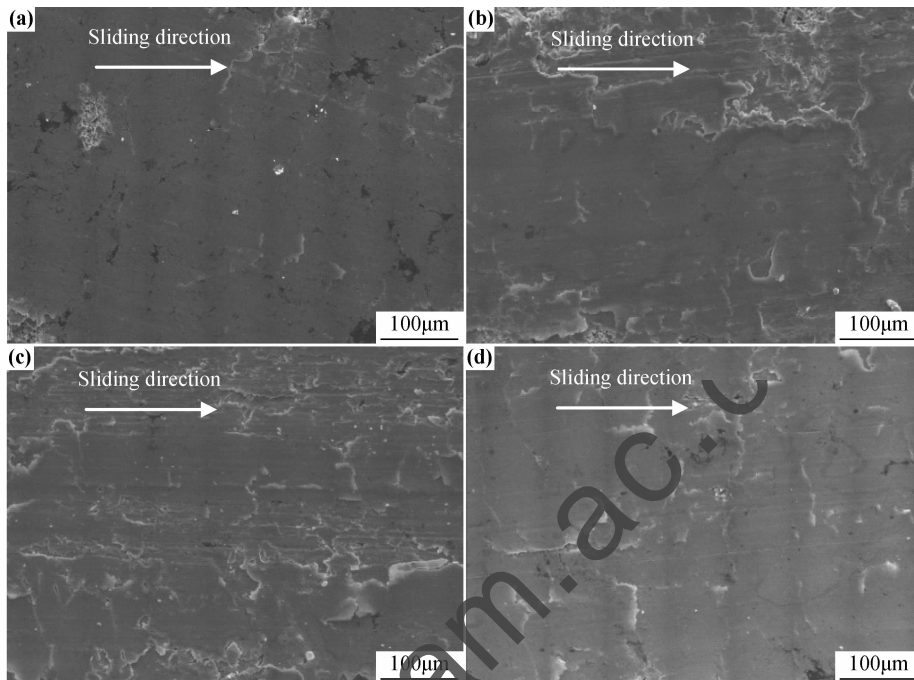


图 8 滑动速率 2.5m/s、不同载荷时复合涂层磨痕形貌

(a)5N;(b)10N;(c)15N;(d)20N

Fig. 8 SEM micrographs of worn surface of composite coating under the velocity of 2.5m/s and different loads

(a)5N;(b)10N;(c)15N;(d)20N

载荷增大对涂层摩擦行为的影响,可归因于复合涂层表面纵向作用力增大后摩擦表面的磨痕更光滑、更易于形成连续和致密的 MoS<sub>2</sub> 润滑膜的缘故。这是因为,载荷增大后,涂层中的 MoS<sub>2</sub> 颗粒更容易被磨出、破碎。其中,部分 MoS<sub>2</sub> 颗粒被吸附于磨痕表面,形成润滑膜层;部分 MoS<sub>2</sub> 颗粒和涂层中的 Cu<sub>2</sub>O 颗粒被挤压,嵌入 Cu 基体中,形成新的润滑源和抗咬合点,增加了自润滑膜层与基体的结合,提高了自润滑膜层在摩擦过程中的稳定性。此外,高载荷也会加大涂层的表面塑性变形程度,促进 MoS<sub>2</sub> 在磨痕表面的铺展即自润滑膜的形成。

## 2.4 磨损率分析

图 9 为不同载荷和滑动速率下所得涂层磨损率曲线。由图 9(a)可知,载荷一定时,复合涂层的磨损率随滑动速率不同呈先增高后降低的趋势。这种变化趋势的原因在于复合涂层摩擦表面的结构出现了变化。随着滑动速率的增大,涂层原有表面结构逐渐被破坏,涂层的磨损率也随之增大。此时,涂层的磨损机制是

以涂层表面的脆性碎裂为主。

但是当滑动速率增大到一定程度后,摩擦表面间形成连续覆盖的金属塑性变形层,塑性变形层的表面上有连续的 MoS<sub>2</sub> 润滑薄膜和抗咬合的氧化物 Cu<sub>2</sub>O 颗粒分布,减弱了对磨钢球对涂层表面结构的破坏,此时,磨损就变成了高速滑动下塑性变形层的疲劳磨损行为,涂层的磨损率呈现下降趋势。

从图 9(b)可知,当滑动速率一定时,涂层的磨损率随载荷的增加而增高。但是高的滑动速率下复合涂层的磨损率比低的滑动速率下的磨损率要低。载荷增大后,摩擦副钢球嵌入涂层的深度增加或嵌入的趋势增大,摩擦副滑动需要克服与涂层的相互作用力增大,对接触表面材料的冲击也随之增大,造成材料的磨损率升高。但是,在高速滑动下,由于摩擦热的影响,对磨副界面间很快形成了表面覆盖有 MoS<sub>2</sub> 和 Cu<sub>2</sub>O 的塑性变形层,疲劳磨损成为涂层的主要磨损机制,使得高速下涂层的磨损率低于低速情况下的。

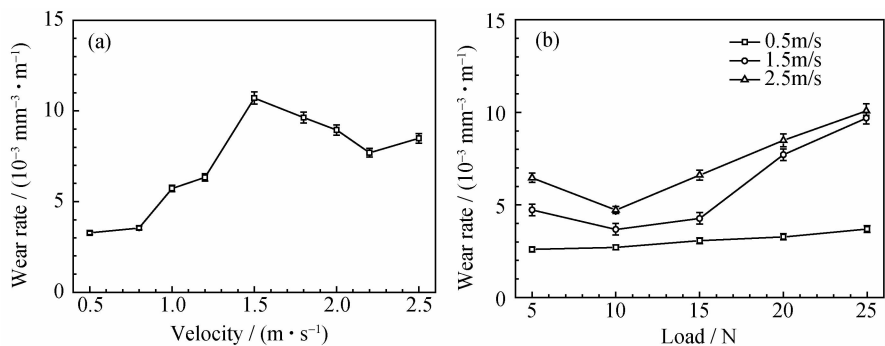


图 9 滑动速率(a)和载荷(b)对磨损率的影响

Fig. 9 Influences of sliding velocity(a) and load(b) on the wear rate

2.5 磨屑与对磨副表面分析

磨屑形状及成分可以反映摩擦过程中的磨损机制。图 10 为摩擦过程中收集到的磨屑照片。可以看出,磨屑形状为片状和细小的碎裂颗粒。对片状磨屑

进行能谱分析可知,其主要组成为 Cu,还有 Mo,S,O 元素。结合以上的摩擦过程分析,可知这种片状磨屑是疲劳磨损产生的。另外一种不规则的细小碎裂颗粒,显然是摩擦过程中脆性断裂的产物。

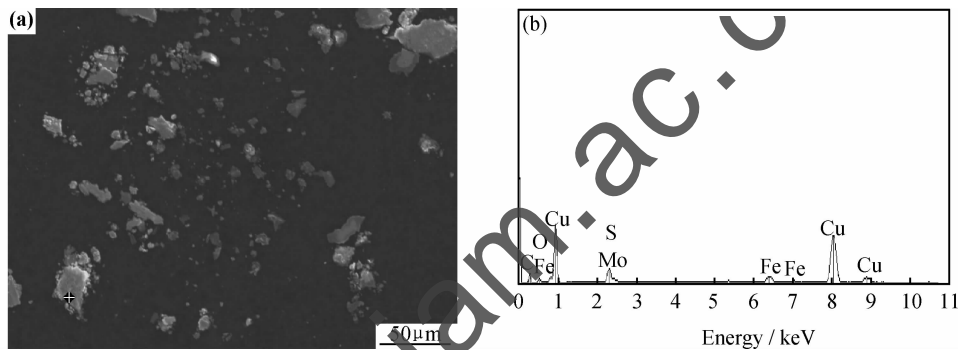


图 10 磨屑 SEM 形貌(a)与 EDS 能谱分析(b)

Fig. 10 SEM micrograph(a) and EDS analysis(b) of wear debris

图 11 为 25N,2.5m/s 条件下钢球对磨面形貌和能谱分析。从图 11 可知钢球磨痕表面比较光滑。磨痕表面的能谱分析其主要元素为 Fe,还有少量的 Cu,以及微量的 S 元素。Cu 元素的出现,表明在摩擦过程

中出现了材料的转移,有轻微的黏着磨损现象。没有观测到典型的黏着磨损现象发生,这说明,真空环境下,MoS<sub>2</sub>/Cu 复合涂层与钢球的摩擦副间主要发生了脆性断裂和疲劳磨损。

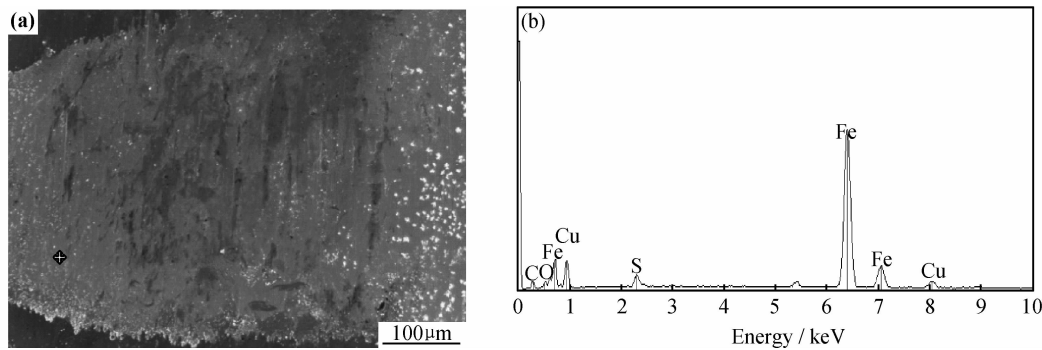


图 11 载荷 25N、滑动速率 2.5m/s 条件下对磨副钢球表面磨痕形貌(a)和能谱分析(b)

Fig. 11 SEM micrograph(a) and EDS analysis(b) of steel ball surface under the load of 25N and velocity of 2.5m/s

3 结论

(1)等离子喷涂制备的 MoS<sub>2</sub>/Cu 基复合涂层具有

良好的真空摩擦磨损性能;MoS<sub>2</sub> 引入后,通过在摩擦过程中形成自润滑膜层,可显著降低 Cu 基材料的摩擦因数。

(2)真空环境下,MoS<sub>2</sub>/Cu 基复合涂层的摩擦因数随着滑动速率和载荷的增加,均呈现出下降趋势。涂层的最大摩擦因数为 0.15,最小摩擦因数为 0.05。

(3)MoS<sub>2</sub>/Cu 基复合涂层的磨损率随着滑动速率增大先增加后降低;随载荷增大而增大。

(4)真空环境下 MoS<sub>2</sub>/Cu 基复合涂层的磨损机制主要为脆性断裂和疲劳磨损。没有观测到典型的黏着磨损行为。

### 参考文献

- [1] EQUEY S, HOURIET A, MISCHLER S. Wear and frictional mechanisms of copper-based bearing alloys[J]. *Wear*, 2011, 273 (1): 9—16.
- [2] HYUNG-SEOP S, JUNG-SOO P, YOON-CHUL J, et al. Similar and dissimilar friction welding of Zr-Cu-Al bulk glassy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 483(1—2): 182—185.
- [3] SAEED A, ARMAN Z, AKBARI A. The effect of sliding speed and amount of loading on friction and wear behavior of Cu-0.65 wt. %Cr alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 486(1—2): 319—324.
- [4] KOVÁČIK J, EMMER Š, BIELEK J, et al. Effect of composition on friction coefficient of Cu-graphite composites[J]. *Wear*, 2008, 265(3—4): 417—421.
- [5] GUILLET A, NZOMA E Y, PAREIGE P. A new processing technique for copper-graphite multifilamentary nanocomposite wire: microstructures and electrical properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182(1—3): 50—57.
- [6] GARCIA-MARQUEZ J M, ANTON N, JIMENEZ A, et al. Viability study and mechanical characterisation of copper-graphite electrical contacts produced by adhesive joining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 143—144: 290—293.
- [7] YASAR I, CANAKCI A, ARSLAN F. The effect of brush spring pressure on the wear behavior of copper-graphite brushes with electrical current[J]. *Tribology International*, 2007, 40(9): 1381—1386.
- [8] MESGARNEJAD A, KHONSARI M M. On the tribological behavior of MoS<sub>2</sub>-coated thrust ball bearings operating under oscillating motion[J]. *Wear*, 2010, 269(7—8): 547—556.
- [9] NAFUMI HIRAOKA. Wear life mechanism of journal bearings with bonded MoS<sub>2</sub> film lubricants in air and vacuum[J]. *Wear*, 2001, 249(10—11): 1014—1020.
- [10] REZAEI H, LIU X B, ARDAKANI S J, et al. A study of cold lake vacuum residue hydroconversion in batch and semi-batch reactors using unsupported MoS<sub>2</sub> catalysts[J]. *Catalysis Today*, 2010, 150(3—4): 244—254.
- [11] TAGAWA M, YOKOTA K, MATSUMOTO K, et al. Space environmental effects on MoS<sub>2</sub> and diamond-like carbon lubricating films: atomic oxygen-induced erosion and its effect on tribological properties[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 202 (4—7): 1003—1010.
- [12] JAYARAMA G, DORAISWAMY N, MARKSA L D, et al. Ultrahigh vacuum high resolution transmission electron microscopy of sputter-deposited MoS<sub>2</sub> thin films[J]. *Surface & Coatings Technology*, 1994, 68—69: 439—445.
- [13] COLMENARES-ANGULO J, ZHAO S, YOUNG C, et al. The effects of thermal spray technique and post-deposition treatment on the photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 204(4): 423—427.
- [14] TARASI F, MEDRAJ M, DOLATABADI A, et al. Structural considerations in plasma spraying of the alumina-zirconia composite[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205(23—24): 5437—5443.
- [15] ZHANG X, VITCHEV R G, LAUWERENS W, et al. Effect of crystallographic orientation on fretting wear behavior of MoS<sub>2</sub> coatings in dry and humid air[J]. *Thin Solid Films*, 2001, 396 (1—2): 69—77.
- [16] SONG J P, VALEFI M, ROOIJ M D, et al. The effect of an alumina counterface on friction reduction of CuO/3Y-TZP composite at room temperature[J]. *Wear*, 2012, 274—275: 75—83.
- [17] 周庆生. 等离子喷涂技术[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982. 18—20.
- [18] 易德亮, 潘银平, 刘光, 等. 离子喷涂 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%TiO<sub>2</sub> 微米/纳米复合涂层的结构与耐磨性能[J]. *材料工程*, 2012, (5): 24—29.
- [19] 易德亮, YE Yin-ping, LIU Guang, et al. Structure and wear properties of plasma sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-30%TiO<sub>2</sub> micro/nano-composite coatings[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012, (5): 24—29.
- [20] 张志强, 李国禄, 王海斗, 等. 等离子喷涂 Fe 基金属涂层组织及接触疲劳损伤性能的研究[J]. *材料工程*, 2012, (6): 59—62.
- [21] ZHANG Zhi-qiang, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Study on the microstructure and property of contact fatigue damage of plasma-sprayed Fe-based alloy coating[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012, (6): 59—62.
- [22] 栗卓新, 祝弘滨, 李辉, 等. 热喷涂金属陶瓷复合涂层研究进展[J]. *材料工程*, 2012, (5): 93—96.
- [23] LI Zhuo-xin, ZHU Hong-bin, LI Hui, et al. Progress of thermal spray cermet coatings[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012, (5): 93—96.
- [24] 齐尚奎, 赵家政, 党鸿辛. MoS<sub>2</sub> 与金属表面摩擦后生成转移膜的研究-Ⅱ. MoS<sub>2</sub> 转移膜与钢摩擦时的化学效应[J]. *固体润滑*, 1983, 3(4): 199—204.
- [25] QI Shang-kui, ZHAO Jia-zheng, DANG Hong-xin. A study of transfer films in the friction of MoS<sub>2</sub>-metal surfaces II. chemical reaction between steel and rubbed transfer film[J]. *Journal of Solid Lubrication*, 1983, 3(4): 199—204.

基金项目: 973 计划资助项目(2010CB71600)

收稿日期: 2012-07-11; 修订日期: 2013-02-28

作者简介: 甄文柱(1987—), 男, 硕士研究生, 从事专业: 等离子喷涂 MoS<sub>2</sub>/Cu 基复合涂层制备与润滑研究。

通讯作者: 梁波(1968—), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向: 特种无机功能涂层, 联系地址: 河北省秦皇岛市海港区河北大街 438 号燕山大学西校区 1500 信箱(066004), E-mail: liangbo@ysu.edu.cn