复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第28卷 第4期 8月 2011年
Vol. 28 No. 4 August 2011

文章编号：1000-3851(2011)04-0136-06

Al_2O_3/Mo 复合材料的磨料磨损性能

侯凤亮[1]，倪 峰*[1]，崔延遂[2]，侯麦珍[3]，魏世忠[1,4]，徐流杰[4]

（1. 河南科技大学 材料科学与工程学院，洛阳 471003；2. 洛阳栾川钼业集团股份有限公司，洛阳 471500；
3. 洛阳高科钼钨材料有限公司，洛阳 471003；4. 河南科技大学 河南省耐磨材料工程技术研究中心，洛阳 471003）

摘 要： 对 Al_2O_3/Mo 复合材料的微观形貌进行了分析，同时测试了 Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损行为。结果表明，随 Al_2O_3 体积分数的增加，基体的密度先增大后减小，显微硬度逐渐增加，磨损过程中产生的切削、犁沟在数量、深度上都有一定程度的减少。当 Al_2O_3 的体积分数为 3%时，随着磨粒粒度的减小，复合材料的比磨损率逐渐增加，Al_2O_3 的体积分数较高(5%、10%、15%)时，比磨损率随磨料粒径的增大而呈现先增加后减少的趋势。材料的磨损量随载荷增加而增加，材料的磨损量的排列顺序不受载荷变化的影响。在同一载荷下，材料的磨损量随掺杂量的增加呈现下降趋势，但是随着掺杂量的不断增大，磨损量下降趋势减缓。

关键词： Al_2O_3；Mo；磨料；载荷；磨损；犁沟

中图分类号： TG146.4 **文献标志码：** A

Abrasive wear properties of Al_2O_3/Mo composite

HOU Fengliang[1], NI Feng*[1], CUI Yansui[2], HOU Maizhen[3], WEI Shizhong[1,4], XU Liujie[4]

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;
2. Luoyang Luanchuan Molybdenum Group Co., Ltd, Luoyang 471500, China;
3. Luoyang Hi-tech Molybdenum & Tungsten Material Company, Luoyang 471003, China;
4. Henan Engineering Research Center for Wear of Materials, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: The microstructure of Al_2O_3/Mo composite was analyzed and the wear behavior was tested. The analysis results of wear data and wear morphology show that the amount of density first increases and then decreases gradually, but hardness increased with the increasing of the volumn fraction of Al_2O_3. There is some degree of reduction on the wear produced by the process of cutting, plowing. When the Al_2O_3 volume fraction is 3%, the specific wear rate of composites increases gradually with the particle size decreases. However, at higher Al_2O_3 volume fraction (5%, 10%, 15%), the specific wear rate first increases and then decreases with the increasing of abrasive grain diameter. The wear loss increases with the increase of the load, while there is no influence on the order. On the same load, the wear loss shows a declining trend with the continuous increase of Al_2O_3 content, but the speed is slower.

Keywords: Al_2O_3; Mo; abrasive; load; wear; plowing

Mo 具有熔点高、热膨胀系数低、抗热震性能和耐热疲劳性能好、耐液态轻金属腐蚀等一系列优点，通常用作合金及不锈钢的添加剂，它可增强合金的强度、硬度、可焊性及韧性，还可增强其耐高温强度及耐腐蚀性能，广泛应用于航空航天、电子、化工等的关键领域；然而 Mo 及 Mo 合金的高温抗氧化能力差、低温脆性和再结晶脆性等，限制了 Mo 及其合金在结构材料方面的使用[1-2]；Al_2O_3 具有高熔点、高硬度和优良的化学稳定性，被广泛应用于制作各种耐火砖、耐火坩埚、耐高温试验仪器等，但是其韧性差，脆性大，不能经受较大的机械冲击等缺点也限制了其应用范围[3]。利用 Mo 和 Al_2O_3 各自的优点，可以形成综合性能优于纯 Mo 和纯 Al_2O_3 的复合材料[4]；目前，对于 Mo 基

收到初稿日期： 2010-06-20；**收到修改稿日期：** 2011-01-30
基金项目： 国家自然科学基金(50972039)
通讯作者： 倪 峰，博士，教授，主要从事金属凝固过程及其控制研究和高温抗磨钼合金的研究 E-mail：nnifeng@sohu.com

Al_2O_3 复合材料已经有所报道，但对其磨损性能报道较少[5-8]。本文作者基于前期的研究工作[9]，主要对不同条件下的 Mo 基 Al_2O_3 复合材料的磨料磨损性能进行了分析，以期对 Mo 基合金的高温抗磨领域具有一定的指导意义。

1 实验部分

1.1 原材料

九水硝酸铝，分析纯，主含量大于 99.0%，天津市科密欧化学试剂有限公司；二钼酸铵，分析纯，主含量大于 99.0%，洛阳高科钼钨有限公司；柠檬酸，分析纯，主含量大于 99.5%，成都市科龙化工试剂厂；无水乙醇，分析纯，主含量大于 99.7%，烟台市双双化工有限公司。

1.2 样品制备

称取一定量的钼酸铵，放入干燥的烧杯中，加入适量的水，得到无色透明的溶液，然后在钼酸铵溶液中加入一定量的柠檬酸，经柠檬酸充分络合后，加入适量无水乙醇，用硝酸和氨水调整至溶液的 pH<1，向溶液中加入一定量的硝酸铝溶液，充分搅拌后，在 85 ℃水浴中形成溶胶，将得到的溶胶在 120 ℃真空条件下烘干形成干凝胶，干凝胶在 550 ℃分解后，分解产物在还原炉中通过二次还原工艺得到 Al_2O_3/Mo 混合粉体。混合粉体在 300 MPa 压力下，保压 5 min 压制成坯，然后在氢气气氛烧结炉中经 1250 ℃预烧结 2 h 后，于 1800 ℃烧结 8 h，得到 Al_2O_3 掺杂 Mo 基复合材料。

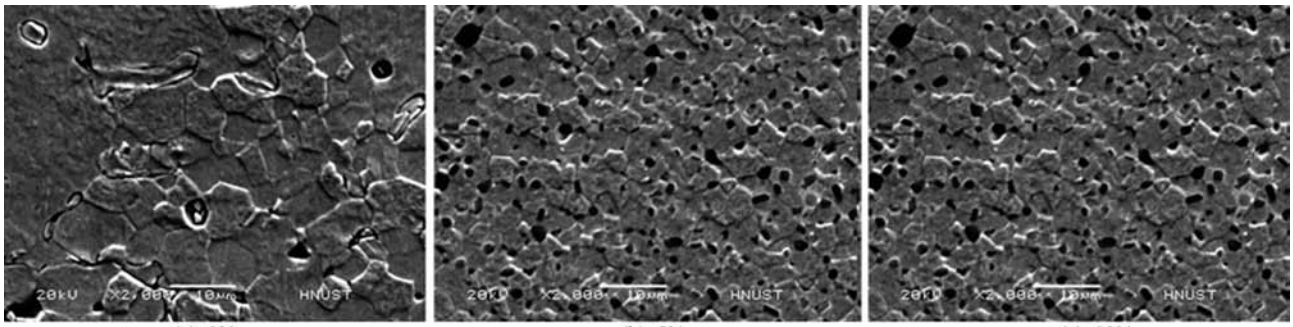
1.3 实验方法

用 JSM-5610LV 型 SEM(日本电子株式会社)对复合材料微观形貌进行分析，其中实验真空电压为 10^{-3} Pa，加速电压为 20 kV，观察 Al_2O_3/Mo 复合材料放大 2000 倍的表面形貌，同时观察了 Al_2O_3/Mo 复合材料放大 1000 倍的磨损形貌；用 MH-3 型显微硬度计(上海丽驰计量仪器有限公司)测量 Mo 基体显微硬度，硬度测量过程中加载 100 g，加载时间为 5 s，取 6 组稳定数据均值实验分析。用 ML-100 型磨料磨损试验机(宣化科华试验机制造有限公司)测定复合材料的摩损性能，试样加工尺寸为 4 mm×4 mm×5 mm，并将其嵌在标准试样夹具中，与不同粒度的硅砂磨料砂纸对磨，试样旋转的同时，沿磨损圆盘径向运动，试样旋转速度为 60 r/min，径向进给量设定为 1 mm，磨损圆盘半径为 100 mm，固定磨损起始旋转半径及行程，对不同载荷不同掺杂量的材料进行磨损试验。磨损量为磨损前后的质量差，电子天平精确度为 0.1 mg，实验值为 3 次稳定测量结果的平均值。

2 结果与分析

2.1 Al_2O_3/Mo 复合材料的显微组织

图 1 为 Al_2O_3/Mo 复合材料的显微组织，从图 1(a)、1(b)、1(c)可以看出，纯 Mo 坯表面存在气孔，晶粒粗大，而 Al_2O_3/Mo 复合材料表面气孔较少，且 Mo 为连续相，Al_2O_3 为分散相；Al_2O_3 颗粒细小，平均粒径在 1 μm 以下，分布均匀，大颗粒主要分布在晶界处，从而抑制晶粒的长大；部分小颗粒分布在晶内；随 Al_2O_3 体积分数的增加，Mo 晶粒逐渐细化，Mo 基体晶粒比纯 Mo 晶粒细小，说明第二相颗粒对晶界有钉扎作用，阻碍晶粒长大，细化了晶粒。如图 2 所示，Al_2O_3/Mo 复合材料中存在 Mo 与 α-Al_2O_3 两相，烧结条件下，正是由于细小的 Al_2O_3 晶粒的存在，促进了 Al_2O_3/Mo 复合材料的烧结与致密化。



(a) 0% (b) 5% (c) 10%

图 1 不同 Al_2O_3 体积分数的 Al_2O_3/Mo 复合材料的显微组织

Fig. 1 Microstructure of Al_2O_3/Mo composite materials with different volume fractions of Al_2O_3

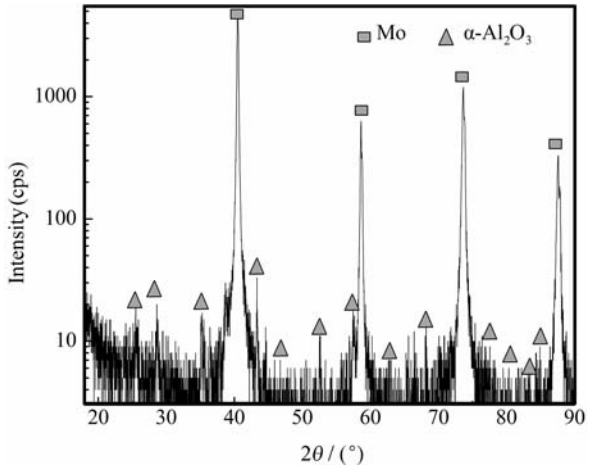


图 2　Al_2O_3/Mo 复合材料 XRD 图

Fig. 2　XRD pattern of Al_2O_3/Mo composite materials

2.2　Al_2O_3 对 Al_2O_3/Mo 复合材料密度、硬度的影响

图 3 为 Al_2O_3/Mo 复合材料的密度、硬度随 Al_2O_3 体积分数的变化趋势。可以看出，随着 Al_2O_3 体积分数的增加，基体的显微硬度逐渐增加，密度值先增加后降低，逐渐接近理论密度，并在 7%～9%掺杂量附近，实测 Al_2O_3/Mo 复合材料密度与理论密度存在交点，这是由于 Al_2O_3 晶粒与 Mo 晶粒存在一定的粒径比，压制烧结过程中，Al_2O_3 晶粒填充在 Mo 晶粒的空隙中，阻碍了晶粒的长大，细化晶粒，增大 Mo 基体的位错密度，同时在其周围产生的应力场，引起应力集中，对基体起到强化作用，使得硬度逐渐提高。但是，随着 Al_2O_3 掺杂量的进一步增加，Al_2O_3 晶粒已经无法继续填充 Mo 晶粒之间的空隙，使得 Al_2O_3/Mo 复合材料体积增大的趋势明显，从而出现密度降低的趋势。

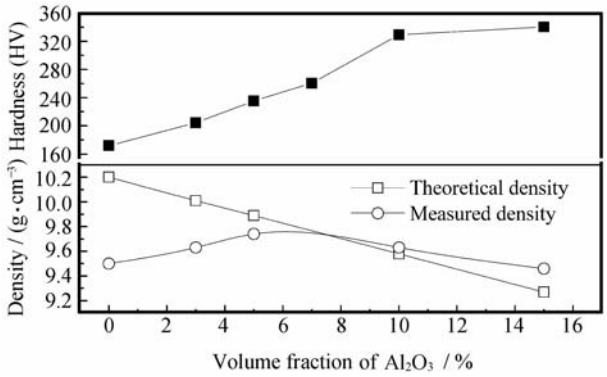


图 3　Al_2O_3/Mo 复合材料密度和硬度随 Al_2O_3 体积分数的变化

Fig. 3　Variation of hardness and density of Al_2O_3/Mo composite materials with the volume fractions of Al_2O_3

2.3　磨料尺寸对 Al_2O_3/Mo 复合材料比磨损率的影响

在固定磨料上对不同 Al_2O_3 体积分数的材料进行的磨损试验，如图 4 所示，当 Al_2O_3 的体积分数为 3%时，随着磨粒粒度的减小，Al_2O_3/Mo 复合材料的比磨损率逐渐增加，这是由于在 Al_2O_3 体积分数较低时，磨粒由于载荷的作用，与基体直接接触，使得较多的基体暴露给磨料，Al_2O_3 不但不能对基体起到保护作用，反而使磨损掉落的 Al_2O_3 颗粒与磨料一起加剧了材料的磨损[10]；

Al_2O_3 的体积分数较高(5%、10%、15%)时，Al_2O_3/Mo 复合材料的比磨损率随磨料粒径的增大而呈现先增加后减少的趋势，说明当磨料尺寸达到一定值时，继续增大磨料尺寸，磨损不再有明显的增加量；在同一磨料粒度范围内，随 Al_2O_3 体积分数的增加，Al_2O_3/Mo 复合材料的比磨损率逐渐减小，说明 Al_2O_3 的掺入，一定程度上提高了 Al_2O_3/Mo 复合材料的抗磨损性能。

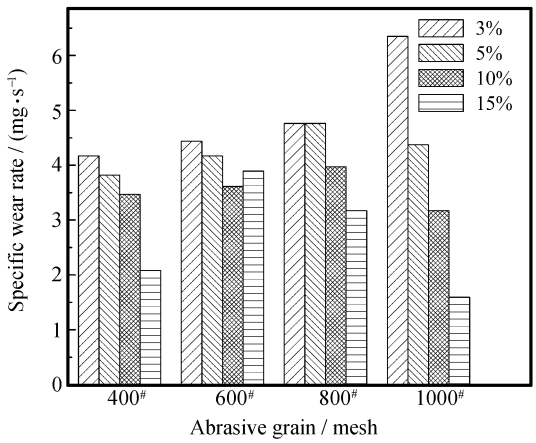


图 4　磨料粒度对 Al_2O_3/Mo 复合材料的比磨损率的影响

Fig. 4　Specific wear rate of Al_2O_3/Mo composite materials under the different grains

2.4　载荷对 Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损量的影响

图 5 为不同载荷条件下，Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损量随 Al_2O_3 体积分数的变化趋势。可以看出，在硬磨料条件下(600#)，Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损量随载荷增加而增加，随 Al_2O_3 体积分数的增加而降低，Al_2O_3/Mo 复合材料磨损量的排列顺序不受载荷变化的影响。在同一载荷下，Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损量随掺杂量的增加而呈现下降的趋势，但是随着掺杂量的不断增大，磨损量下降趋势减缓，甚至出现了缓慢上升。

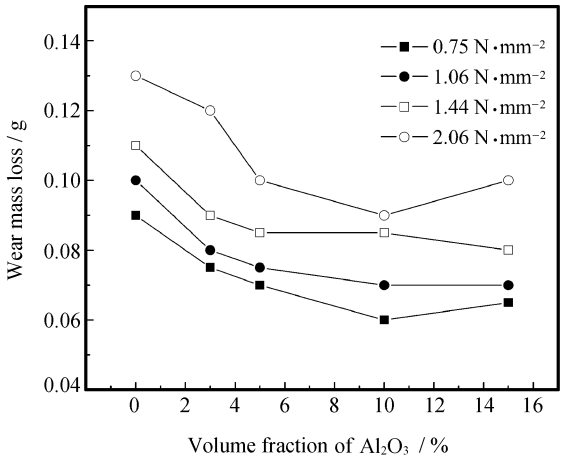


图 5　不同载荷条件下 Al_2O_3/Mo 复合材料磨损量随 Al_2O_3 含量的变化趋势(600#)

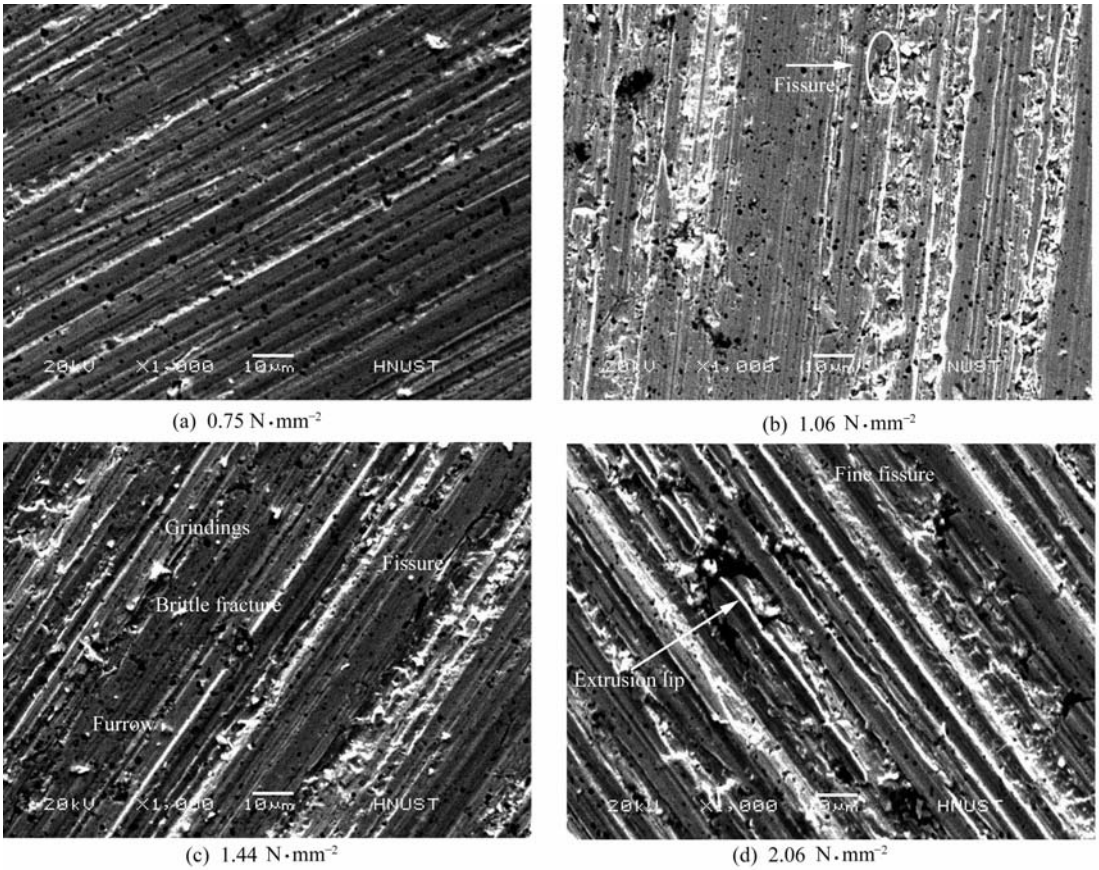
Fig. 5　Wear mass loss of Al_2O_3/Mo composite materials with different volume fractions of Al_2O_3 and load (600#)

2.5　Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损形貌分析

磨料颗粒作用在材料表面，承受的载荷可分解为法向分力和切向分力，在法向分力作用下，磨粒的棱角刺入材料表面，使表面产生压痕；在切向分力作用下，磨粒沿平行表面方向滑动，对材料进行显微切削、擦伤、犁皱，在表面留下两侧突起的沟槽[11]。

图 6 为不同载荷下的 Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损 SEM 图，由图 6(a)、6(b)可知，随着磨损载荷的增加，犁沟的深度、宽度均在增加；且在高载荷下，材料的裂纹较为明显，挤出唇厚大(图 6(d))，在材料磨损过程中，由于基体材料沿着裂纹断裂(图 6(c)、6(d))，致使增强相颗粒损失，并与磨粒一起起到磨损材料的作用，而且硬而尖锐的磨料更容易使压痕周围出现裂纹；一旦横向裂纹相交或扩展到表面时，金属边缘开裂将产生小碎片，材料纹理便发生脱落(图 7(a))，形成磨屑。其材料的主要失效方式是因磨料滚压作用而产生的切削沟槽和犁沟。

图 7 为不同 Al_2O_3 体积分数的 Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损形貌。可知，图 7(a)有大块的基体掉落现象，而且伴随着长条的裂纹存在，图 7(b)出现了大块的磨屑和粗大的挤出唇，图 7(c)犁沟的数量和



(a) 0.75 N·mm-2　(b) 1.06 N·mm-2　(c) 1.44 N·mm-2　(d) 2.06 N·mm-2

图 6　不同载荷下 Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损形貌

Fig. 6　SEM images of wear surfaces of Al_2O_3/Mo composite materials under different loads

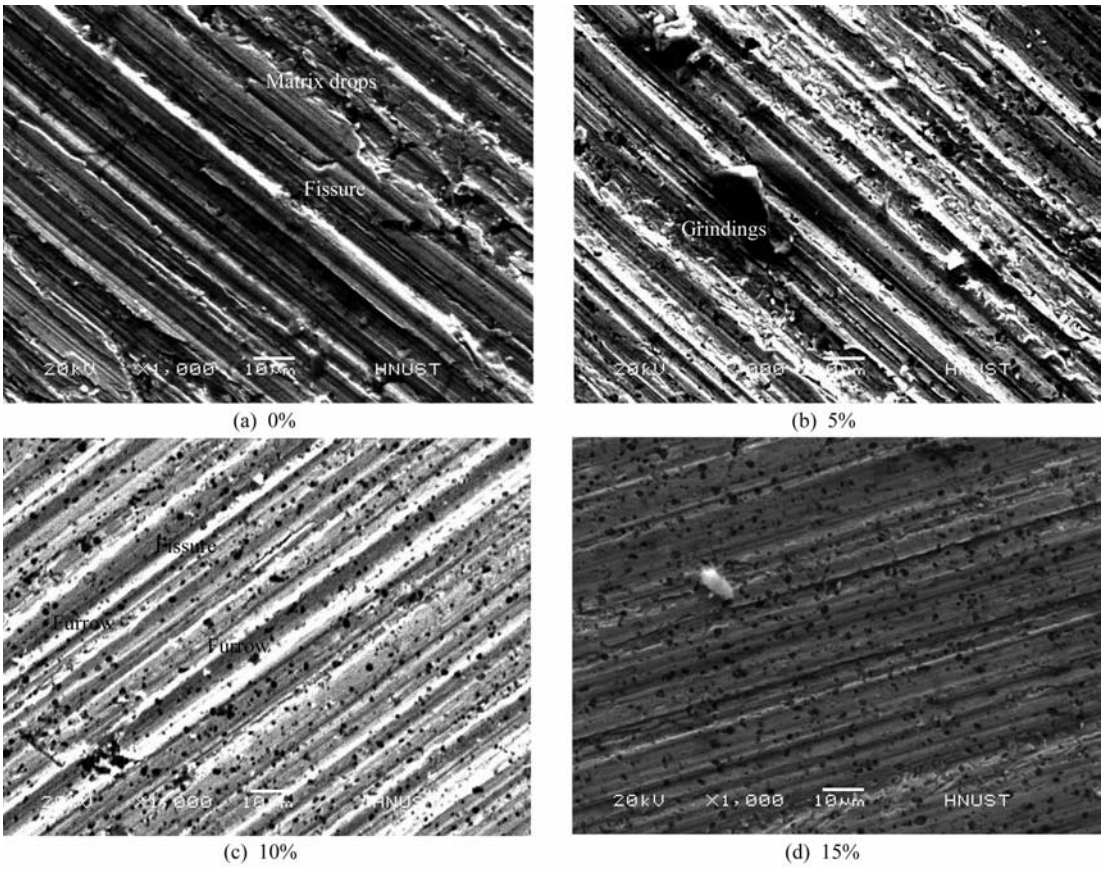


图 7　不同 Al_2O_3 体积分数的 Al_2O_3/Mo 复合材料磨损形貌(600#，载荷：2.06 N/mm²)

Fig. 7　SEM images of wear surfaces of Al_2O_3/Mo at different volume fractions of Al_2O_3(600#，load：2.06 N/mm²)

深度仍旧较大，而且还有隐性裂纹的存在，图 7(d)则无论是犁沟还是裂纹在一定程度上轻得多；即随着增强相含量的增加，基体损伤程度降低，Al_2O_3/Mo 复合材料的耐磨性能越来越好；这是由于复合材料中增强相突出基体，故能够承受较多的载荷，阻碍了磨粒对基体的损伤[12]，随着掺杂 Al_2O_3 体积分数的增加，增强相减轻了磨粒的嵌入和切削作用，阻断了犁沟的扩展并抑制 Al_2O_3/Mo 复合材料的塑性变形，阻碍了材料的磨损，Al_2O_3 颗粒的加入在一定程度上减少了基体与磨料的直接接触，从而改善了材料的磨损性能。

3　结　论

(1) 随 Al_2O_3 体积分数的增加，Al_2O_3/Mo 复合材料的密度先增大后减小，掺杂 Al_2O_3 体积分数约为 10%时，实测密度值最接近理论密度值；Al_2O_3/Mo 复合材料显微硬度随 Al_2O_3 掺杂量的增加而增加。

(2) 当 Al_2O_3 的体积分数为 3%时，随着磨粒粒度的减小，Al_2O_3/Mo 复合材料的比磨损率逐渐增加，Al_2O_3 的体积分数较高(5%、10%、15%)时，Al_2O_3/Mo 复合材料的比磨损率随磨料粒径的增大而呈现先增加后减少的趋势。

(3) Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损量随载荷增加而增加，在同一载荷下，Al_2O_3/Mo 复合材料的磨损量随掺杂量的增加而呈现下降的趋势，但是随着掺杂量的不断增大，磨损量下降趋势减缓。

(4) 材料的主要失效方式是因磨料滚压作用而产生的切削沟槽和犁沟；随着磨损载荷的增加，犁沟的深度、宽度均增加；随着掺杂 Al_2O_3 体积分数的增加，Al_2O_3/Mo 复合材料的抗磨性增强。

参考文献：

[1] 李荣久. 陶瓷金属复合材料 [M]. 北京：冶金工业出版社，2004：7-9.

[2] 王东辉，袁晓波，李中奎. 钼及钼合金研究与应用进展 [J]. 稀有金属快报，2006，25(12)：1-7.
Wang Donghui，Yuan Xiaobo，Li Zhongkui. Progress of research and applications for Mo metal and its alloys [J]. Rare

Metals Letters，2006，25(12)：1-7.

[3] 李国军，黄校先，郭景坤. Al_2O_3基金属陶瓷的研究现状 [J]. 材料导报，2000，14(9)：22-24.
Li Guojun，Huang Xiaoxian，Guo Jingkun. Current status of research on Al_2O_3 based cermet [J]. Materials Review，2000，14(9)：22-24.

[4] Nawa M，Sekino T，Niihara K. Fabrication and mechanical behaviour of Al_2O_3/Mo nano - composites [J]. Journal of Materials Science，1994，29(12)：3185-3192.

[5] 余大江，常　春，刘俊涛，姜　江. Mo/Al_2O_3 复合材料的耐磨性 [J]. 摩擦学学报，2009，29(5)：442-446.
Yu Dajiang，Chang Chun，Liu Juntao，Jiang Jiang. Wear resistance of Mo/Al_2O_3 composites [J]. Tribology，2009，29(5)：442-446.

[6] Sbaizero O，Pezzotti G，Nishida T. Fracture energy and R - curve behavior of Mo/Al_2O_3 composites [J]. Acta Mater，1998，46(2)：681-687.

[7] 常　春，余大江，刘少斌，刘俊涛，李木森. Mo/Al_2O_3 材料的微观结构和抗腐蚀性 [J]. 硅酸盐学报，2008，36(8)：1124-1128.
Chang Chun，Yu Dajiang，Liu Shaobin，Liu Juntao，Li Musen. Microstuctures and corrosion resistance of molybdenum - alumina materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society，2008，36(8)：1124-1128.

[8] 刘开琪，潘　伟，樊震坤，张会军，石汝军，殷书建，任允鹏. Mo - Al_2O_3 金属陶瓷的氧化和渣蚀行为研究 [J]. 稀有金属材料与工程，2007，36(1)：238-240.
Liu Kaiqi，Pan Wei，Fan Zhenkun，Zhang Huijun，Shi Rujun，Yin Shujian，Ren Yunpeng. Study of oxidation and slag corrosion behavior on Mo - Al_2O_3 cermets [J]. Rare Metal Materials and Engineering，2007，36(1)：238-240.

[9] 代宝珠，魏世忠，徐流杰，彭光辉，李继文，张国赏. Al_2O_3 对钼合金组织与性能的影响 [J]. 河南科技大学学报：自然科学版，2010，31(1)：1-4.
Dai Baozhu，Wei Shizhong，Xu Liujie，Peng Guanghui，Li Jiwen，Zhang Guoshang. Effect of Al_2O_3 on structure and properties of molybdenum alloys [J]. Journal of Henan University of Science and Technology：Natural Science，2010，31(1)：1-4.

[10] 鲍崇高，王恩泽，高义民，邢建东. 颗粒体积分数对 Al_2O_3/钢基复合材料高温抗磨性影响 [J]. 复合材料学报，2001，18(2)：61-64.
Bao Chonggao，Wang Enze，Gao Yimin，Xing Jiandong. Effect of the volume fraction of particles on elevated temperature wear resistance of Al_2O_3/steel composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2001，18(2)：61-64.

[11] 材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书委员会. 材料的磨粒磨损 [M]. 北京：机械工业出版社，1990：31-38.

[12] 尤显卿，任　昊. 颗粒增强钢基复合材料摩擦学研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程，2003，26(5)：57-61.
You Xianqing，Ren Hao. Progress of tribological research on steel - matrix composites reinforced by particles [J]. Ordance Material Science and Engineering，2003，26(5)：57-61.