

文章编号: 1004 - 0609(2006)07 - 1219 - 08

## 含稀土镁合金的摩擦磨损性能<sup>①</sup>

祁庆琚

(宝山钢铁股份有限公司 技术中心, 上海 201900)

**摘要:** 研究稀土对 AZ91 和 AM60 镁合金摩擦磨损性能的影响。结果表明: 在所研究的范围内, 稀土镁合金的摩擦磨损特性明显优于基体合金; 含稀土镁合金与不含稀土镁合金的磨损速率都随载荷的增加而增加, AZ91 镁合金的耐磨性要远远高于 AM60 稀土镁合金。磨损机制在实验条件下都相同, 均发生由轻微磨损向严重磨损的转变; 稀土的加入细化合金组织, 改善镁合金的综合性能, 增强磨损表面氧化膜的稳定性, 提高稀土镁合金的承载能力, 有效地延迟由轻微磨损向严重磨损的转变过程。

**关键词:** AZ91; AM60; 稀土; Mg-Al 合金; 摩擦磨损

**中图分类号:** TG 136

**文献标识码:** A

## Friction and wear characteristics of rare earth containing magnesium alloy

QI Qing-ju

(Technology Center, Baoshan Iron and Steel Co., Ltd, Shanghai 201900, China)

**Abstract:** The influence of rare earth on the friction and wear characteristics of AZ91 and AM60 magnesium alloys was studied. The results show that the wear resistance properties of rare earth magnesium alloys are better than those of matrix alloy under the testing conditions. The anti-wear behaviour of AZ91 alloy is much better than that of AM60 alloy. In dry sliding process, magnesium alloys undergo a transition from mild wear to severe wear. The addition of rare earths refines the structure of alloys, improves the comprehensive behaviors of magnesium alloys, increases the stability of oxidation films on worn surfaces, enhances the loading ability of rare earth magnesium alloys, and delays the transition from mild wear to severe wear effectively.

**Key words:** AZ91; AM60; rare earth; magnesium alloy; friction and wear

为了节省材料与能源, 轻型铸件的研制与开发已成为一个重要的研究领域和发展方向。镁合金是目前实际应用中轻的金属结构材料, 具有密度小, 比强度和比刚度高, 阻尼性、切削加工性和铸造性能好等优点, 因此, 越来越多的镁合金产品已用于汽车、通讯和航天工业中<sup>[1-5]</sup>。其中, 得到最广泛应用的就是 AZ91 和 AM60 镁合金, 约占汽车应用中的 90%<sup>[6]</sup>。现在, 对镁合金的研究领域正不断拓展, 但是有关其摩擦磨损行为的数据非常少。磨损在许多工程应用中是一个严重的问题, 虽然只是一个表面现象, 但是它能损害工程部件的力学性

能。此外, 磨损也能降低公差精度, 破坏表面精整度, 从而导致过早地更换零部件。虽然目前不期望镁合金能用于如轴承或齿轮等承受严重磨损的场合, 但在镁合金的某些应用中, 包括汽车制动装置、发动机部件(活塞和汽缸内腔)等, 要经受滑动运动, 在材料加工、装配过程中, 例如滚压、挤压、锻造等, 磨损也是重要的考虑因素。因此, 研究镁合金的摩擦磨损性能是很有必要的。

稀土是镁合金的主要合金元素, 能改善镁合金的许多性能<sup>[7, 8]</sup>。本文作者在此研究稀土对镁合金 AZ91 和 AM60 摩擦磨损性能的影响。

① 收稿日期: 2005 - 11 - 04; 修订日期: 2006 - 04 - 03

通讯作者: 祁庆琚; 电话: 021-26649114; E-mail: qqj@baosteel.com

## 1 实验

实验采用 AZ91 和 AM60 合金作为基体合金。稀土以富铈混合稀土的形式加入, 最终制得镁合金的铈稀土含量(质量分数)分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 和 1.0%。

含稀土镁合金的摩擦磨损实验在 MM-2000 型高速高温磨损试验机上采用销-盘磨损形式进行。试样加工成直径为 6 mm, 高度为 12 mm 的销, 偶件为 5CrNiMo 合金盘, 其尺寸为  $d70\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ , 硬度为 55HR。实验条件为干摩擦, 环境温度 25 °C, 滑动速度 0.628 m/s, 载荷 20~110 N。试样表面用 1000# 的 SiC 砂纸抛光, 表面粗糙度  $R_a$  为 0.3  $\mu\text{m}$ , 在摩擦磨损前后均用丙酮清洗。摩擦因数可以通过试验机上自动记录的摩擦力矩经换算得出。磨损质量损失采用质量损失表示, 用感量为 0.1 mg 电光分析天平测量, 用 JXA-840 型扫描电镜观察材料表面磨损形貌和磨屑形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 含稀土镁合金的显微组织

图 1 所示为含稀土镁合金与不含稀土镁合金的显微组织, 稀土含量为 0.6%。从图中可以看出, 加入稀土后, 组织得到了明显细化, 变得更加致密、均匀, 这也是稀土的主要作用之一<sup>[9~11]</sup>。AZ91 和 AM60 合金组织由  $\alpha\text{Mg}$  基体和沿晶界不规则分布的  $\beta$  相 ( $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ ) 组成(图 1(a, c))。在 AM60 中由于铝含量低,  $\beta$  相也大大减少。加入稀土后, 析出了棒状或针状金属间相—— $\text{Al}_{11}\text{RE}_3$  相<sup>[12]</sup>, 而  $\beta$  相相对减少, 这一点对于 AM60 合金尤为明显(图 1(b, d))。

### 2.2 稀土镁合金的拉伸性能与硬度

图 2 与图 3 所示为镁合金的拉伸性能与硬度曲线。从图中可看出, 随稀土含量的增加, 这些性能均得到改善。在拉伸性能方面, 稀土对 AM60 合金的影响更为显著, 这可能与铝含量低有关, 这一点也导致了如前所述的  $\beta$  相的减少与铝在基体中的固溶度降低, 所以 AM60 合金的硬度要比 AZ91 合金低得多。

### 2.3 稀土镁合金的摩擦学特性

图 4 所示为含稀土镁合金与不含稀土镁合金的摩擦因数与载荷的关系曲线。由图可以看出,

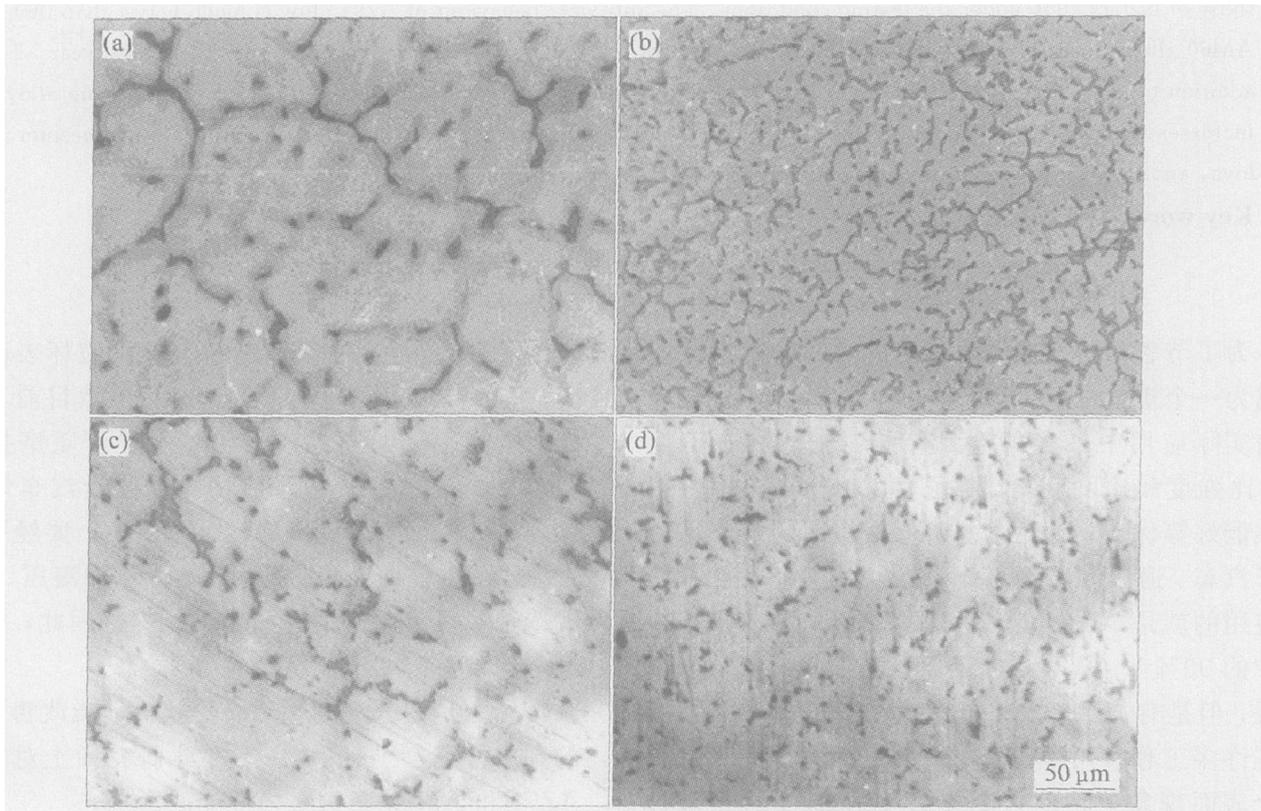


图 1 含稀土镁合金与不含稀土镁合金的组织形貌

Fig. 1 Microstructures of magnesium alloys with or without rare earth

(a) —AZ91; (b) —AZ91+ 0.6% RE; (c) —AM60; (d) —AM60+ 0.6% RE

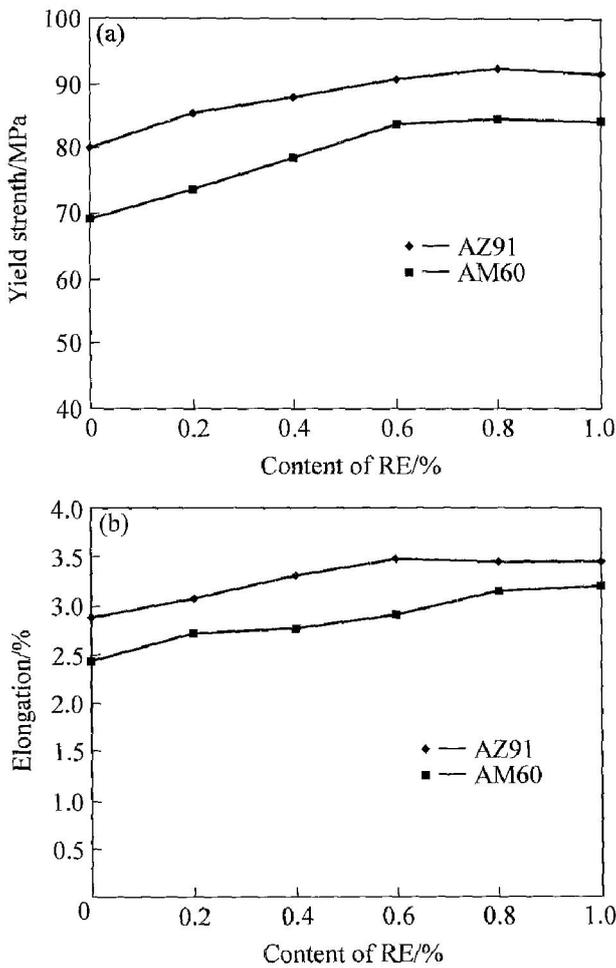


图 2 镁合金的拉伸性能

Fig. 2 Tensile properties of magnesium alloys  
(a) —Yield strength; (b) —Elongation

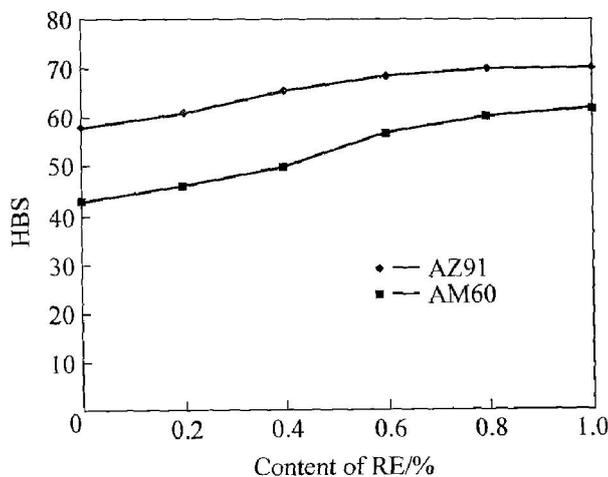


图 3 镁合金的硬度

Fig. 3 Hardness of magnesium alloys

AM60 合金的摩擦因数比 AZ91 合金的高, 加入稀土的镁合金的摩擦因数均低于镁合金基体, 反映了含稀土镁合金与不含稀土镁合金在摩擦性能上的不同。镁合金的摩擦因数随实验载荷增加有减少的趋

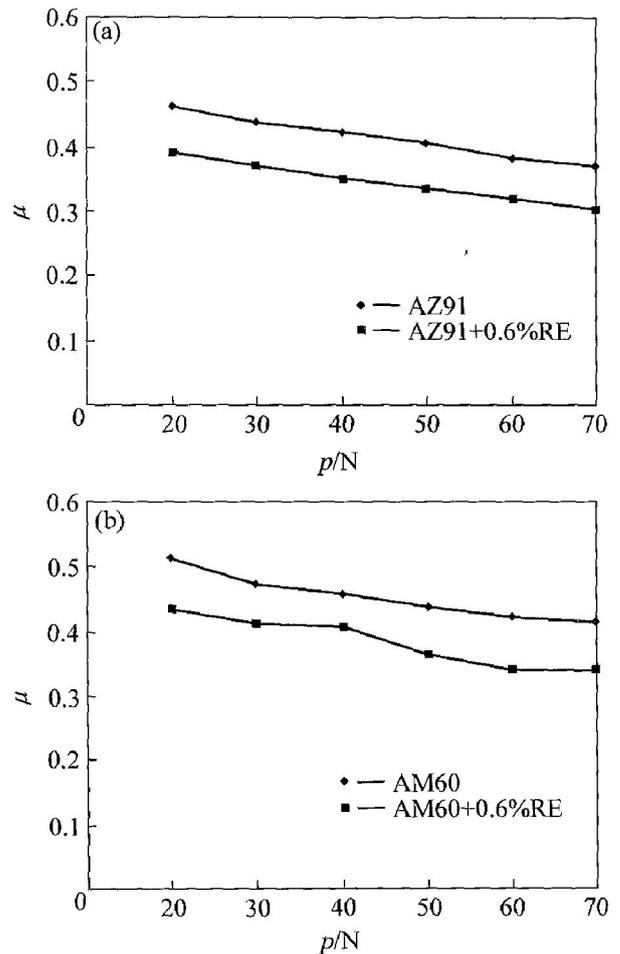


图 4 摩擦因数与载荷的关系曲线

Fig. 4 Relations between friction coefficient and load  
(a) —AZ91 alloy; (b) —AM60 alloy

势并逐渐趋于平稳。载荷是通过接触面积的大小和变形程度来影响摩擦磨损特性的。在滑动摩擦过程中金属表面处于弹塑性接触状态, 由于实际接触面积与载荷的非线性关系, 使得摩擦因数随着载荷的增加而有所降低<sup>[13]</sup>。

图 5 所示为含稀土镁合金与不含稀土镁合金的磨损质量损失与载荷的关系曲线。由图可知, 含稀土镁合金与基体的磨损质量损失都随着磨损过程的进行而增加, 但相比之下, 含稀土镁合金的磨损量增加较缓。与 AZ91 合金相比, AM60 合金的磨损量要高得多。从图中还可看到, 磨损曲线上都有转折点, 说明材料的磨损机制随载荷的增加发生了由轻微磨损到严重磨损的转变。在严重磨损阶段, AM60 合金的磨损曲线要比 AZ91 合金的平缓一些。对于 AZ91 合金, 含稀土镁合金的转变点要比基体合金增加了 20 N 左右。对于 AM60 合金, 含稀土镁合金与不含稀土镁合金的转变点相差不多, 但是含稀土镁合金的磨损量要比基体镁合金低很多。

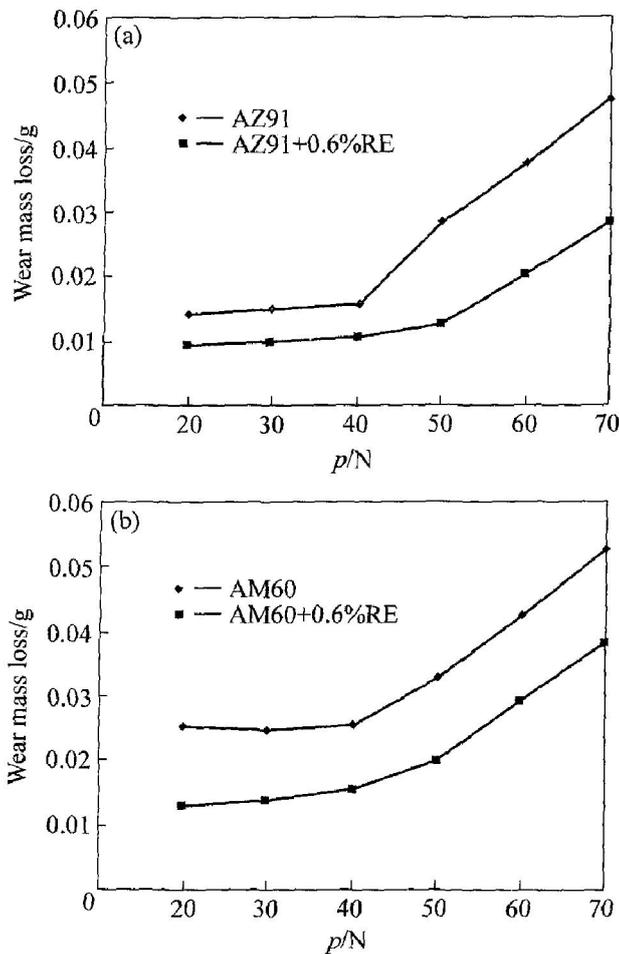


图 5 磨损量与载荷的关系曲线

Fig. 5 Relations between wear mass loss and load (a) —AZ91 alloy; (b) —AM60 alloy

如图 6 所示, 在较低载荷下, 含稀土镁合金磨损率较小, 磨面上可看到平整的滑痕与细小的沟槽, 但在所有情况下, AM60 合金的磨损情况都比 AZ91 合金要严重。对低载荷磨损条件下的镁合金的磨损表面进行能谱分析时, 发现其主要含有 O、Mg、Al、Zn、Fe 等元素, 表明该表面层是由这些金属元素的氧化物构成的。AM60 合金在低载荷下也存在类似的情况。该氧化物层不仅起到润滑作用, 而且有效地隔离了两个摩擦表面, 减少了金属与偶件之间发生直接接触, 使材料的摩擦因数降低, 磨损量减少, 此时磨损机制为氧化磨损。提高载荷后, 镁合金的磨损率增大, 磨面上的犁沟变得深而宽, 并有块状金属剥落现象, 基体镁合金尤为明显, 这表明此时的磨损机制已由氧化磨损转化为剥层磨损。

综合所有情况来看, 在相同磨损条件下, 含稀土镁合金要比基体镁合金明显耐磨。稀土元素与氧、硫等杂质元素有较强的结合力, 抑制了这些杂

质元素所引起的组织疏松; 在熔炼过程中, 稀土元素能与水气和镁液中的氢反应, 生成稀土氢化物和稀土氧化物以除去氢气, 减少气孔、针孔及缩松等铸造缺陷, 提高了铸件质量, 减少了在摩擦过程中裂纹源的产生。稀土元素还可以净化晶界, 增加晶界强度, 使裂纹不易在晶界处产生<sup>[14]</sup>。

AZ91 合金的主要强化相是  $Mg_{17}Al_{12}$  相, 熔点低, 大约为 462 °C, 热稳定性差, 温度升高时易于粗化和软化, 且为体心立方晶体结构, 与镁基体的六方晶格不相协调, 从而导致了 Mg/ $Mg_{17}Al_{12}$  界面的易脆性。稀土加入后, 稀土会优先与铝化合生成化学稳定性更高的  $Al_{11}RE_3$  相<sup>[10]</sup>,  $Al_{11}RE_3$  相的熔点很高, 而且在温度升高时稀土元素的扩散速度很慢, 这使得  $Al_{11}RE_3$  相有高的热稳定性, 因此能有效阻碍温度升高时晶界的滑动和裂纹的扩展, 改善了高温性能。稀土对镁合金磨损性能的改善作用在高载荷下更为显著。在材料摩擦过程中, 磨损表面不可避免会发生温度升高, 在大气环境中, 金属摩擦副的摩擦性能几乎无法避免氧化作用的影响, 摩擦表面的氧化物层对摩擦磨损起着非常重要的作用。稀土元素在氧化物膜与基体界面发生了偏聚, 提高了氧化物膜的粘着力<sup>[15]</sup>, 细化了膜的组织, 有助于提高膜的耐磨性和抗剥离能力, 这样形成的氧化物膜比较稳定, 故增强了含稀土镁合金的承载能力。加入稀土后, 稀土化合物在镁合金中的固溶强化作用提高了镁合金的硬度与屈服强度, 并且随着稀土含量的增加, 镁合金的硬度与屈服强度也逐渐升高, 如图 2 和 3 所示, 这也在一定程度上改善了镁合金的磨损性能。因此稀土的加入有效推迟了镁合金从轻微磨损到严重磨损的转变。

图 7 所示为含稀土镁合金与不含稀土镁合金磨损试样在 50 N 时亚表面的金相组织形貌。在基体镁合金中能够清楚地看到塑性变形区, 并且合金相也发生了严重变形(见图 7(a) 和 (d))。AZ91 合金加入稀土后, 在同样载荷下没有发现明显的塑性变形(见图 7(b)), 当进一步增大载荷时, 也发生了塑性流变。但对于 AM60 合金, 当载荷为 50 N 时变形就已经十分明显了。

图 8 所示为镁合金亚表层的 SEM 形貌。从图中可看到, 在高载荷下有裂纹生成, 其中有一些裂纹平行于磨损表面并最终扩展到表面, 另外还有一些裂纹尚未扩展到表面。如果微裂纹有一端尚未扩展到表面, 则不至于使表面马上剥离, 但随着裂纹不断扩展, 最终会使表面脱落, 从而形成片状磨

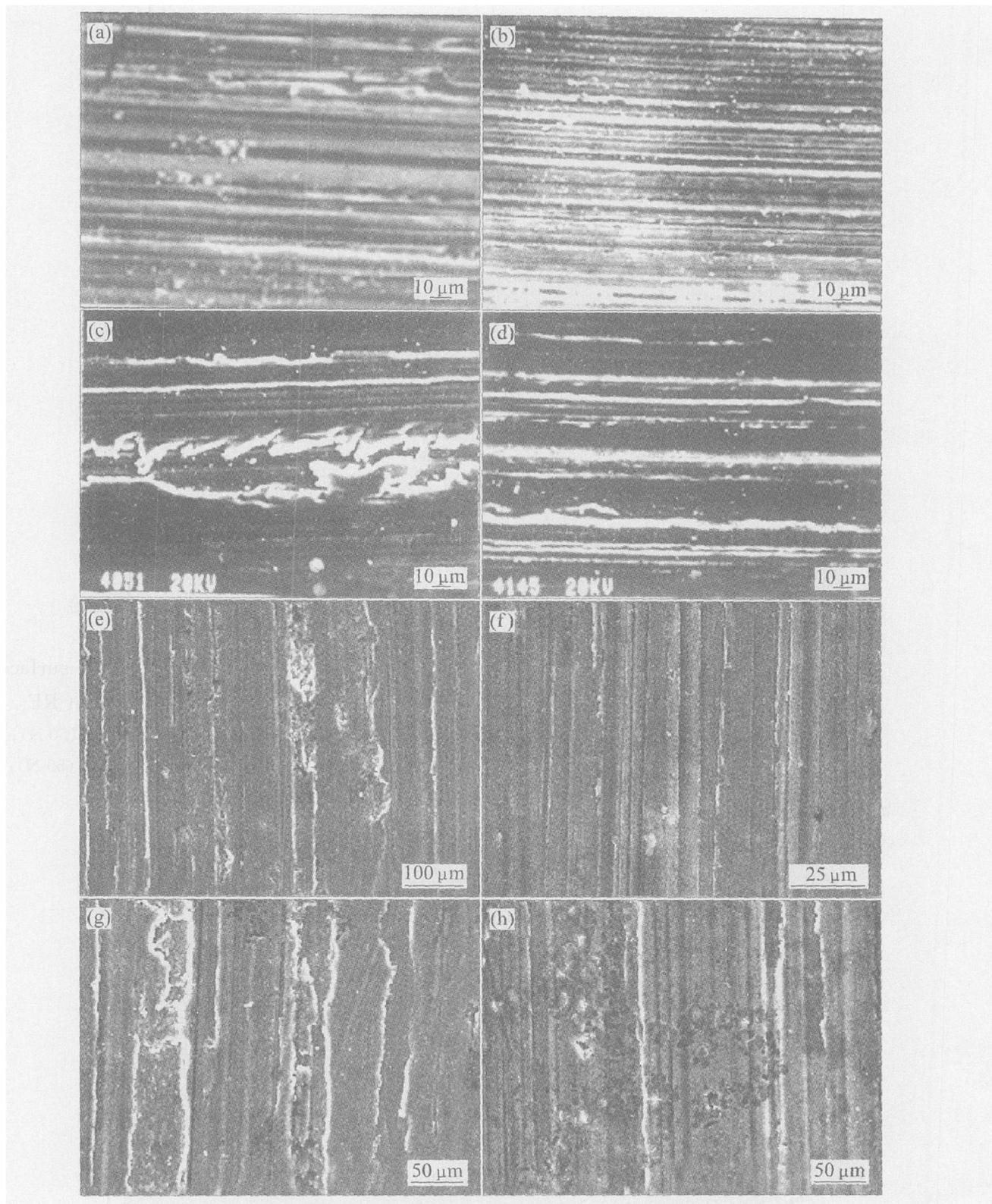


图 6 含稀土镁合金与不含稀土镁合金的磨损表面形貌

**Fig. 6** Worn surface morphologies of magnesium alloys with or without RE

(a) —AZ91 (30 N); (b) —AZ91+ 0.6% RE (30 N); (c) —AZ91 (90 N); (d) —AZ91+ 0.6% RE (90 N);  
 (d) —AM60 (30 N); (e) —AM60+ 0.6% RE (30 N); (f) —AM60 (90 N); (g) —AM60+ 0.6% RE (90 N)

屑。因此,对于含稀土镁合金与不含稀土镁合金来说,在严重阶段的磨损机理都是相同的,均为剥层磨损。

图 9 所示为含稀土镁合金与不含稀土镁合金的磨屑形貌。在周期性的交变摩擦应力和热应力的共

同作用下,镁合金摩擦表面的氧化层不可避免地会产生显微裂纹。裂纹的不断扩展,导致氧化膜最终破裂剥落而形成磨屑。由于稀土的加入能有效阻碍合金表面显微裂纹的扩展,因此含稀土镁合金的磨

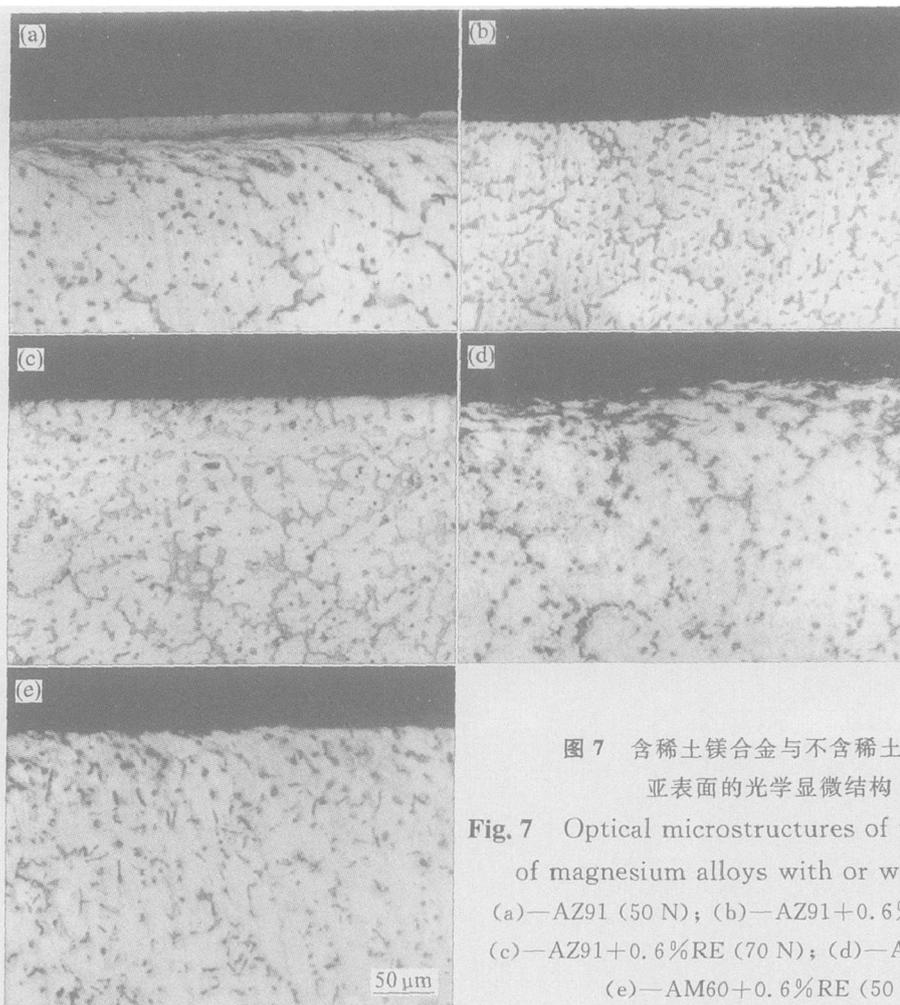


图 7 含稀土镁合金与不含稀土镁合金  
亚表面的光学显微结构

Fig. 7 Optical microstructures of worn surfaces  
of magnesium alloys with or without RE  
(a)—AZ91 (50 N); (b)—AZ91+0.6%RE (50 N);  
(c)—AZ91+0.6%RE (70 N); (d)—AM60 (50 N);  
(e)—AM60+0.6%RE (50 N)

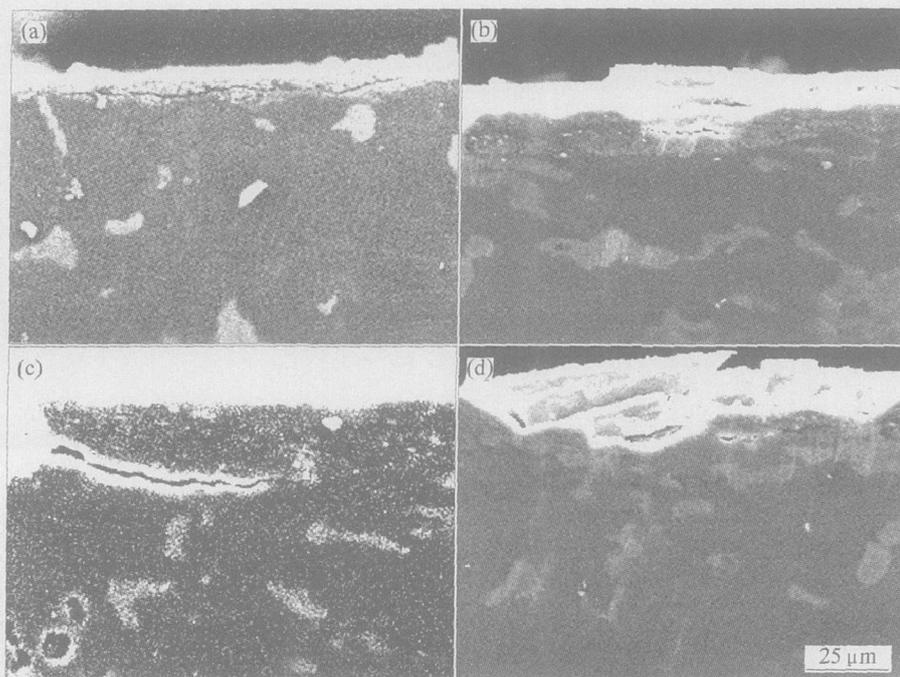


图 8 镁合金在 90 N 时的截面 SEM 形貌

Fig. 8 SEM morphologies of cross sections of magnesium alloys at 90 N  
(a)—AZ91; (b)—AZ91+0.6%RE; (c)—AM60; (d)—AM60+0.6%RE

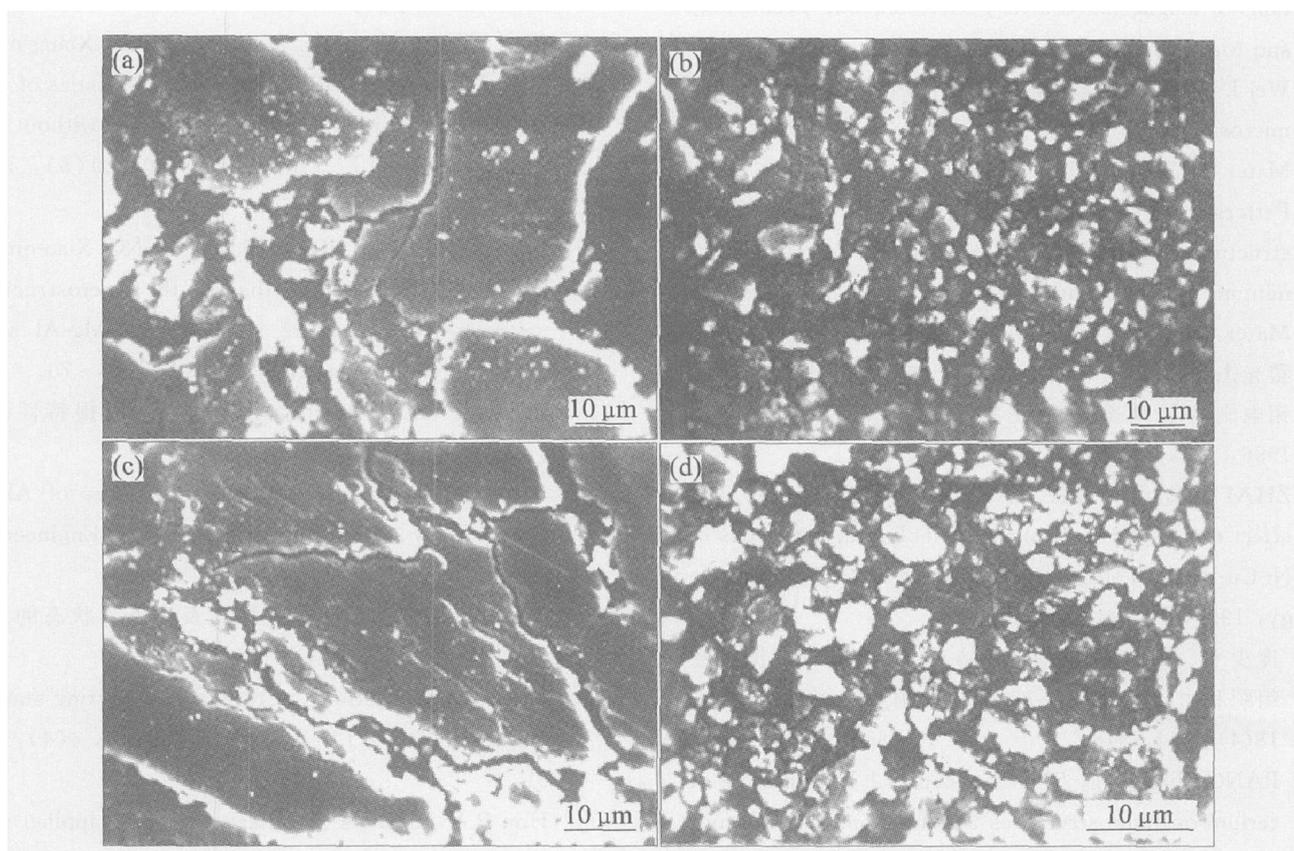


图 9 含稀土镁合金与不含稀土镁合金的磨屑形貌

Fig. 9 Debris morphologies of magnesium alloys with or without rare earth ( $p = 50 \text{ N}$ ,  $t = 10 \text{ min}$ )  
(a) -AZ91; (b) -AZ91+ 0.6% RE; (c) -AM60; (d) -AM60+ 0.6% RE

屑尺寸要比基体合金的小很多。而在基体合金中观察到尺寸较大的片状金属磨屑产生, 并有金属光泽, 较小尺寸磨屑的产生对含稀土镁合金磨损表面影响较小, 摩擦副接触表面的状态不会发生明显变化, 因此含稀土镁合金的磨损率可以长期保持稳定, 而尺寸较大磨屑的产生则会使基体合金的摩擦接触表面状态恶化, 切削作用及剥层磨损加剧, 磨损质量损失随载荷的增加而急剧上升。

### 3 结论

1) 稀土的加入改善了镁合金的摩擦磨损性能。在所研究的实验条件范围内, 含稀土镁合金的摩擦因数稳定地低于基体镁合金。

2) 在干摩擦条件下, AZ91 与 AM60 合金的磨损机制是相同的, 均发生了从轻微磨损(主要为氧化磨损)到严重磨损(主要为剥层磨损)的转变。

3) 稀土元素的加入改善了镁合金的综合性能, 增强了磨损表面氧化膜的稳定性, 提高了含稀土镁合金的承载能力, 从而有效延迟了从轻微磨损向严重磨损的磨损机制的转变。

### REFERENCES

- [1] Polmear I J. Recent developments in light alloy[J]. Trans JIM, 1996, 37(1): 12-31.
- [2] Idris M H. Precision casting of a magnesium-base alloy[J]. Br Foundryman, 1997, 90(4): 140-144.
- [3] Idris M H. Processing and evaluation of investment cast magnesium-base alloy[J]. AFS Trans, 1996, 104: 237-244.
- [4] 曾荣昌, 柯伟, 徐永波, 等. Mg合金的最新发展及应用前景[J]. 金属学报, 2001, 37(7): 673-685. ZENG Rong-chang, KE Wei, XU Yong-bo, et al. Recent development and application of Mg alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(7): 673-685.
- [5] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 120. LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiao-qin. Theoretical Basis and Applications of Magnesium-base Alloys [M]. Beijing: China Machine Press, 2002. 120.
- [6] 卢晨, 卫中山. 镁合金的研究与应用进展[J]. 汽车工艺与材料, 2005(9): 1-3. LU Chen, WEI Zhong-shan. Development and applica-

- tions of magnesium alloys[J]. *Automobile Technology and Materials*, 2005(9): 1-3.
- [7] Wei L Y, Dunlop G L, Westengen H. Development of microstructure in cast Mg-Al-rare earth alloys[J]. *Mater Sci Technol*, 1996, 12(9): 741-750.
- [8] Pettersen G, Westengen H, Hoter R, et al. Microstructure of a pressure die cast magnesium-4wt% aluminium alloy modified with rare earth additions[J]. *Mater Sci Eng A*, 1996, A207(1): 115-120.
- [9] 翟光杰, 刘家浚, 朱宝亮. 稀土铈对镍-铜-磷/二硫化钼电刷镀层摩擦学特性的影响[J]. *摩擦学学报*, 1996, 16(2): 143-149.  
ZHAI Guang-jie, LIU Jia-jun, ZHU Bao-liang. The effect of rare earth cerium on tribological properties of Ni-Cu-P/MoS<sub>2</sub> electro-brush plating layer[J]. *Tribology*, 1996, 16(2): 143-149.
- [10] 庞少平, 石云宝, 李 军. 铈对 Zr-22% Al 减振合金组织和力学性能的影响[J]. *中国稀土学报*, 2000, 18(4): 344-346.  
PANG Shao-ping, SHI Yun-bao, LI Jun. Effects of cerium on microstructures and mechanical properties of Zr-22% Al vibration damping alloy[J]. *Journal of the Chinese Rare Earths Society*, 2000, 18(4): 344-346.
- [11] 戴振东, 文明才, 李祥明. 稀土对等离子喷涂镍-碳化钛陶瓷涂层摩擦学性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2000, 20(3): 175-178.  
DAI Zhen-dong, WEN Ming-cai, LI Xiang-ming. Study on the friction and wear characteristics of plasma sprayed Ni-TiC coatings with or without rare earth additive[J]. *Tribology*, 2000, 20(3): 175-178.
- [12] LU Yi-zhen, WANG Qu-dong, ZENG Xiao-qin, et al. Effects of rare earths on the microstructure, properties and fracture behaviour of Mg-Al alloys[J]. *Mater Sci Eng A*, 2000, A278: 66-76.
- [13] 万怡灶. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/铜合金复合材料的磨损特性研究[J]. *材料工程*, 1997(11): 6-8.  
WAN Yi-zao. Study on wear properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-copper alloy composites[J]. *Materials Engineering*, 1997(11): 6-8.
- [14] 郭巨峰. 稀土在晶界存在形式及对晶界状态的影响[J]. *稀土*, 1983, 4(4): 58-61.  
GUO Ju-feng. Effects of rare earths existing state on grain boundaries[J]. *Rare Earths*, 1983, 4(4): 58-61.
- [15] Hon P Y, Stringer J. Effect of surface-applied reactive element oxide of the oxidation of binary alloys containing Cr[J]. *J Electro-Chem Soc*, 1987, 134(10): 1836-1849.

(编辑 何学锋)