

硼酸镁晶须增强镁基复合材料的摩擦性能及磨损行为

金培鹏^{1,2}, 丁雨田², 刘孝根², 王金辉¹, 王 府²

(1. 青海大学 镁技术工程研究所, 西宁 810016;

2. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 研究真空气压渗流法制备的硼酸镁晶须增强镁基复合材料(体积分数 30%)及其基体合金在液体石蜡润滑条件下的滑动摩擦磨损性能。试验条件为滑动距离 2 km, 滑动速度 0.5、1.0、2.0、3.0 和 5.0 m/s, 载荷 5、10、18、25 和 40 N。结果表明: 在润滑条件下, 引入增强相 MgB_2O_5 能提高复合材料在低载下的耐磨性能。随着载荷的增加, 复合材料的磨损由轻微磨损向严重磨损转变。临界载荷分别为: 1 m/s, 25 N; 2 m/s, 18 N; 3 m/s, 10 N; 5 m/s, 5 N。复合材料磨损情况的扫描电子显微分析和观察显示, 复合材料在两种磨损阶段的主导磨损机制分别为磨粒和剥层磨损。研究还发现, 复合材料由轻微磨损阶段向严重磨损阶段的转变不仅与载荷有关, 还与滑动速度有关。

关键词: 镁基复合材料; 晶须; 磨损率; 磨损机制

中图分类号: TB 333

文献标识码: A

Tribological properties and wear behavior of $Mg_2B_2O_5$ /AZ91D magnesium alloy matrix composites

JIN Pei-peng^{1,2}, DING Yu-tian², LIU Xiao-gen², WANG Jin-hui¹, WANG Fu²

(1. Institute of Magnesium Technology, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The liquid Paraffin-lubricated sliding tribological properties and wear behavior of $Mg_2B_2O_5$ whisker reinforced magnesium matrix composites fabricated by vacuum-gas pressure infiltration process were investigated by using a pin-on-disc wear-testing machine against a GCr15 steel counterface under loads of 5–40 N, and within a sliding velocity range of 0.5–5.0 m/s for a constant sliding distance of 2 km. The results show that the transition load is found for a constant sliding velocity. When the loads are higher than the transition load, the wear rate increases sharply. The composites exhibit superior wear resistance compared with that of matrix alloy when the loads are below the transition load. The transition loads that are called critical loads in some literatures are 25, 18, 10 and 5 N for velocities of 1, 2, 3 and 5 m/s, respectively. The abrasive and delamination wear mechanisms are the dominant ones for loads above and below critical loads according to the SEM analysis of the worn surfaces and the subsurface of the composites. The crossover from abrasive wear mechanism to delamination wear mechanism of the composite is related not only with the loads but also with the sliding speeds.

Key words: magnesium matrix composite; whisker; wear mechanism; wear rate

金属基复合材料的耐磨性在磨粒磨损和有润滑的情况下优于基体^[1-7]。SHARMA 等^[1]指出, AZ91 镁合金中引入长石颗粒可以明显改善其耐磨性能。LIM 等^[2]研究发现加入 Al_2O_3 颗粒能使合金的耐磨性最高提高 1.8 倍。上述报道在增强相体积分数较低的情况下, 增强体的引入对提高耐磨性的作用是明显的, 而目前在增强体体积分数较高时, 增强体对材料磨损性能影响的研究尚未得到一致的结论。SARAVANAN 等^[8]在研究 30% SiC_p (体积分数, 下同)颗粒增强镁基复合材料时发现, 复合材料在轻微磨损阶段的耐磨性相对于基体提高了两个数量级。MONDAL 等^[9]在研究体积分数为 20%的 Saffil 短纤维增强镁基复合材料时也发现, 在低载荷下复合材料的磨损率比合金的要低。这说明高体积分数增强相在磨损过程中所起的积极作用。但也有研究表明: 增强体的体积分数较高时会加剧复合材料的磨损, 复合材料甚至表现出比基体合金更高的磨损率。ABACHI 等^[10]的研究表明, 复合材料的耐磨性并不随增强体体积分数的增加而单调增加。ALAHLISTEN 等^[11]在研究纤维体积分数对镁基复合材料耐磨性影响时发现, 复合材料的磨损率在纤维体积分数为 10%时最低。纤维体积分数继续增大, 复合材料的耐磨性变差, 尤其是镁基复合材料。

本文作者采用真空气压渗流法制备体积分数为 30%的硼酸镁晶须增强镁基复合材料, 研究在液体石蜡润滑条件下的摩擦磨损性能, 分析增强晶须对复合材料摩擦磨损性能的影响, 比较与基体合金在相同实验下的摩擦磨损性能, 为此种复合材料在耐磨件上的应用提供基础数据。

1 实验

本实验中采用的复合材料是晶须体积分数为 30%的 $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5/\text{AZ91D}$ 复合材料及其基体合金 AZ91D。选用 AZ91D 合金作为基体合金的原因主要是它具有优异的铸造性能并具有一定的强度, 很适合大批量生产, 即可以通过砂型铸造也可以通过压铸铸造。选用硼酸镁晶须作为增强相, 主要是因为该晶须具有接近于碳化硅晶须的性能, 但价格只有碳化硅晶须的五分之一, 是一种性价比非常高的增强相。

在本实验中, 合金和复合材料被制成 $d 5 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$ 的销试样。摩擦副采用 GCr15 钢, 加工成 $d 30 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的盘, 淬火硬度达到 HRC66, 润滑剂选用液体石蜡。磨损实验测试了载荷分别为 5、10、18、25 和 40 N, 滑动距离均为 2 000 m, 速度分别为

0.5、1.0、2.0、3.0 和 5.0 m/s 下的复合材料的磨损率及摩擦因数。试样磨损前后在丙酮浴里用超声波清洗、干燥, 然后用精度为 0.1 mg 的天平称量。实验前后质量差即为磨损质量损失, 质量损失除以滑动距离得到质量磨损率。在试验机上记录平均摩擦因数, 实验的每个数据取 4 次实验的平均值。用扫描电镜(SEM)分析磨损表面与磨屑的形貌, 用电子探针(EPMA)分析磨损表面的化学成分, 在磨损过程中测定磨面的温度, 并用硬度仪分析复合材料与基体合金亚表面的硬度。

2 结果

2.1 载荷对复合材料及基体合金摩擦性能的影响

图 1 所示为液体石蜡润滑条件下滑动速度为 2 m/s 时, 载荷对复合材料与基体合金摩擦因数的影响。由图 1 可以看出, 基体合金的摩擦因数随载荷的增大而减小。

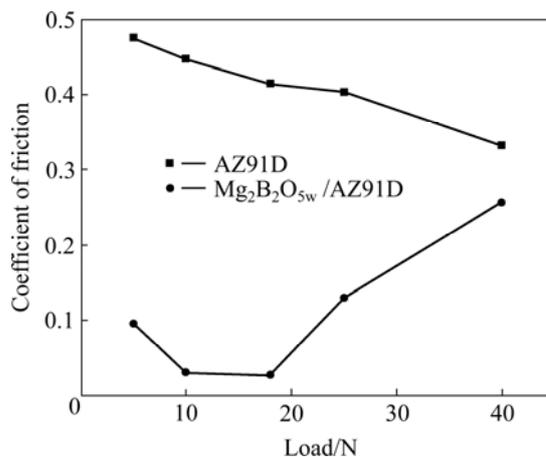


图 1 滑动速度为 2 m/s 时载荷对复合材料及基体合金摩擦因数的影响

Fig.1 Effect of load on friction coefficient of $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5w}/\text{AZ91D}$ composites and AZ91D alloy at speed of 2 m/s

在润滑条件下, 复合材料的摩擦因数随载荷的增大呈先减后增的趋势, 转变载荷为 18 N, 但整体小于基体合金。分析认为, 这是由于在低载(小于 18 N)条件下, 晶须断裂脱落较少, 磨损以两体磨损为主导, 对磨副真实接触面积的增大比载荷的增大慢, 导致摩擦因数呈降低的趋势; 而随载荷的增大(大于 18 N), 晶须开始大量断裂脱落, 脱落的晶须加强了对复合材料中基体合金和对磨副材料的犁削作用, 使磨面变得粗糙, 从而导致摩擦因数增大。在润滑条件下, 复合材料的摩擦因数始终低于基体合金。这是由于复合材

料在磨损过程中晶须的凸起以及基体合金磨掉后的凹坑会产生润滑油的附加泵效应,摩擦副间产生润滑油膜,使得对磨副相对运动阻力减小,导致摩擦因数整体降低。

2.2 载荷对复合材料及基体合金磨损性能的影响

图2所示为液体石蜡润滑条件下滑动速度为1 m/s时,载荷对复合材料与基体合金质量磨损率的影响。由图2可以看出,在润滑条件下复合材料的磨损率总体较基体合金低。复合材料的磨损过程存在临界载荷25 N,当载荷低于25 N时,复合材料的磨损率很小,远低于基体合金,最低可达到基体合金磨损率的1/55。当载荷大于25 N时,复合材料的磨损率急剧增加,当载荷达到40 N时,其磨损率超过基体合金。

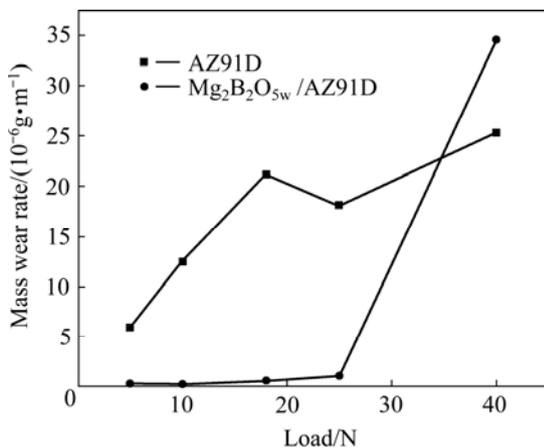


图2 滑动速度为1 m/s时载荷对复合材料及基体合金磨损性能的影响

Fig.2 Effect of load on mass wear rate of $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}/\text{AZ91D}$ composites and AZ91D alloy at speed of 1 m/s

由上可知,增强相的引入有效地降低了合金在低于临界转变载荷时的磨损率,提高了复合材料低载荷下的耐磨性。这与 MONDAL 等^[9]的研究结果一致。金培鹏等^[12]对 $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}/\text{AZ91D}$ 复合材料界面行为的研究发现,材料制备过程中界面上无脆性的界面反应产物。因此,界面能起到良好的应力传递作用。

2.3 载荷、滑动速度对复合材料磨损率的影响

图3所示为液体石蜡润滑条件下载荷(5~40 N)、速度(0.5~5 m/s)对复合材料与基体合金磨损率的影响。从图3中可以看出,复合材料的磨损率随载荷的增大而增大,并且除速度为0.5 m/s外,复合材料的磨损都经历了由轻微磨损阶段到剧烈磨损阶段转变的过程。当滑动速度为0.5 m/s时,在载荷5~40 N范围内

复合材料的磨损率都很小。复合材料的磨损过程存在一个临界载荷,当载荷低于此临界载荷时,复合材料的磨损率很小,磨损处于轻微磨损阶段。当载荷高于临界载荷时,复合材料的磨损率急剧增加,复合材料的磨损转变为严重磨损阶段。如在滑动速度为2 m/s,载荷为18 N时,复合材料的质量磨损率为 $0.5 \times 10^{-6} \text{g/m}$,而当载荷增加到25 N时,其磨损率变为 $59.7 \times 10^{-6} \text{g/m}$,为前者的120倍。

从图3中还可以看出,随着滑动速度的增大,临界载荷有向低载荷转变的趋势。滑动速度为1、2、3和5 m/s时,其对应的转变临界载荷分别为25、18、10和5 N。同时,复合材料在滑动速度较高时剧烈磨损的磨损率曲线比低速时上升快。

从图3中可以看出,滑动速度为1 m/s的基体合金的磨损率随载荷的增大而缓慢增大,与相同滑动速度下复合材料的磨损率曲线相交于33 N处,即复合材料表现出低载下优于基体合金的耐磨性,而随着载荷的增大(大于25 N),复合材料的磨损率急剧增加,并在载荷高于33 N时超过基体合金。

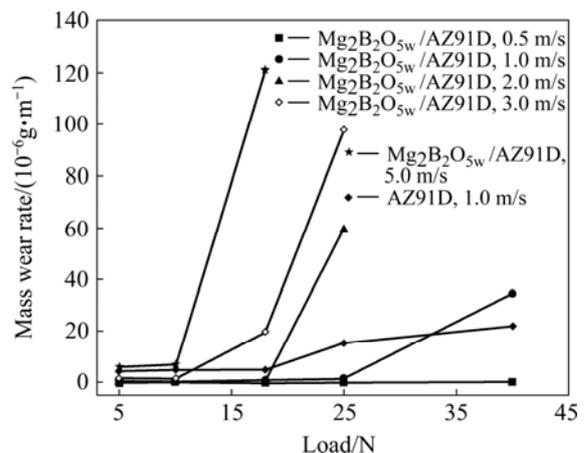


图3 载荷与滑动速度对复合材料及基体合金磨损性能的影响

Fig.3 Effect of load on wear rate of $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}/\text{AZ91D}$ composites and AZ91D alloy at various sliding speeds

2.4 磨损表面与亚表面形貌的显微观察

图4所示为基体镁合金在滑动速度为2 m/s,载荷为10 N时及复合材料在不同的滑动速度和不同载荷下磨面的SEM像。

图4(a)所示为基体合金在载荷为10 N,滑动速度为2 m/s时的磨面形貌。从图中可以看出,磨面上有大量平行于滑动方向的犁沟,与相同载荷和速度条件下的复合材料相比,这些犁沟较宽而深,并存在明显的塑性变形。而复合材料的磨面犁沟比较浅,有的还

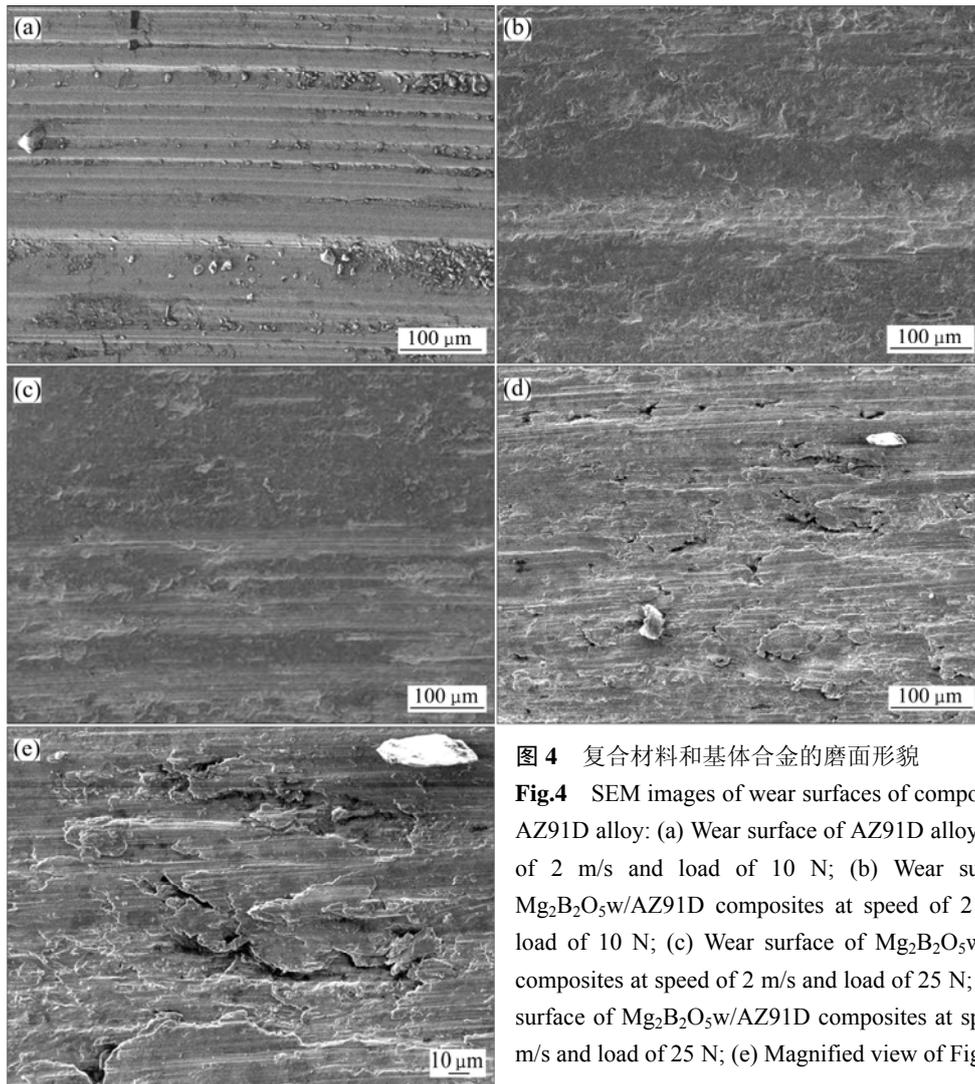


图 4 复合材料和基体合金的磨面形貌

Fig.4 SEM images of wear surfaces of composites and AZ91D alloy: (a) Wear surface of AZ91D alloy at speed of 2 m/s and load of 10 N; (b) Wear surface of $Mg_2B_2O_5w/AZ91D$ composites at speed of 2 m/s and load of 10 N; (c) Wear surface of $Mg_2B_2O_5w/AZ91D$ composites at speed of 2 m/s and load of 25 N; (d) Wear surface of $Mg_2B_2O_5w/AZ91D$ composites at speed of 5 m/s and load of 25 N; (e) Magnified view of Fig.4(d)

不连续, 如图 4(b)所示。这是由于晶须的硬度和强度都比合金高, 晶须的引入提高了合金的强度。因此, 复合材料表现出高于基体合金的耐磨性。

复合材料在滑动速度为 5 m/s, 载荷为 25 N 时的磨面形貌如图 4(d)所示。与相同载荷下滑动速度为 2 m/s 的复合材料相比(图 4(c)), 一方面复合材料磨面的剥层作用进一步加剧, 从其更高倍数下的磨面形貌(图 4(e))可以看到裂纹在材料表面发展很快, 材料表面变形严重并被“分割”成片状, 这说明速度的增大可以加剧复合材料的磨损。另一方面可以看出, 高速下复合材料的塑性变形也较低速下的严重, 这是因为随着滑动速度的增大, 磨面的摩擦热量增加, 在摩擦系统散热速率一定的条件下, 磨面的温度迅速提高。NICHOLS 等^[13]采用 T-MAPS 软件计算出当滑动速度达到 3 m/s 时磨面的温度可达 200~500 °C, 而对于基体镁合金, 常温下为六面体晶体结构, 其滑移面较少,

当温度达到 225 °C 时可以激活更多的滑移面而导致镁合金产生塑性流动。因此, 在相同的载荷作用下, 当滑动速度由 2 m/s 增加到 5 m/s 时, 复合材料的磨面塑性变形大幅度增加。

图 5 所示为复合材料在滑移速度为 2 m/s, 载载荷为 10 N 和 25 N 时的磨屑形貌。从图 5 中可以看出, 两种载荷条件下复合材料的磨屑形貌不同, 两种不同的磨屑形貌对应了两种不同的磨损机制。载荷为 10 N 的磨屑呈细小的颗粒状, 颗粒尺寸为 30~50 μm , 并有少量呈细长条状, 这种形状的磨屑是在犁削磨损机制下产生的。对磨盘表面的微小凸起和在摩擦过程中断裂并保留在对磨副间的晶须粒子都会磨损过程中对复合材料磨面的基体合金产生犁削, 由于晶须的体积分数高达 30%, 磨粒在犁削时容易遇到强度较高的晶须, 所以产生的磨屑大多较小, 只有少数是长条状。而载荷为 25 N 的磨屑大多呈片状, 有的尺寸超过

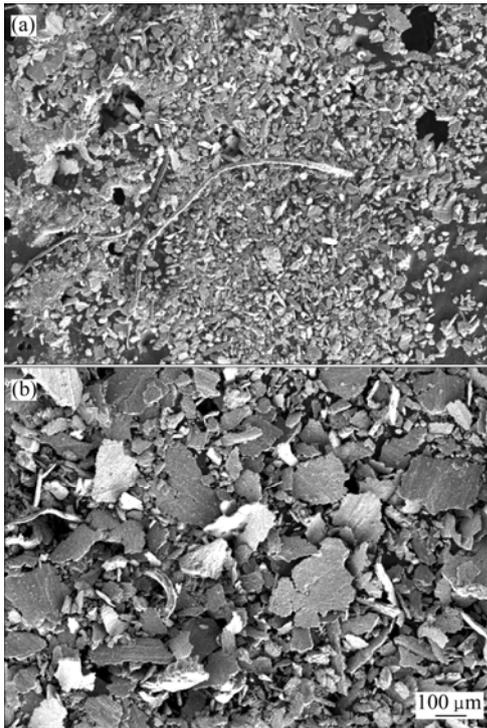


图5 滑移速度为 2 m/s 时复合材料磨屑在不同载荷下的形貌

Fig.5 SEM images of wear debris under 10 N(a) and 25 N(b) at sliding speed of 2 m/s

200 μm 。这是由于在 2 m/s 的速度下 25 N 的载荷已经启动了复合材料的剥层磨损机制所致。

早期的研究发现^[14-15]：在磨损过程中，试样表面在正压力和切向摩擦力的反复作用下，亚表面会形成塑性变形层。图 6 所示为润滑条件下复合材料低载荷和高载荷下亚表面的 SEM 像，从图中可以看出，复合材料在磨损后不存在塑性变形层。这与 IWAI 等^[16]的实验结果一致。IWAI 等^[16]在研究 Al_2O_3 纤维体积分数对铝基复合材料亚表面塑性变形影响时发现，亚表面变形区域的厚度随着纤维体积分数的增大而减小，当纤维体积分数大于 9% 时，观察不到塑性变形层的存在。本实验中复合材料体积分数较高(30%)，这种复合材料的增强相晶须能更为有效地抑制基体在摩擦过程中的塑性变形，有利于提高复合材料的耐磨性。

3 分析与讨论

从实验结果中可以看出，在低于临界载荷时复合材料在液体石蜡润滑条件下的耐磨性比相同滑动速度下基体合金的耐磨性高，在高于临界载荷时比基体合

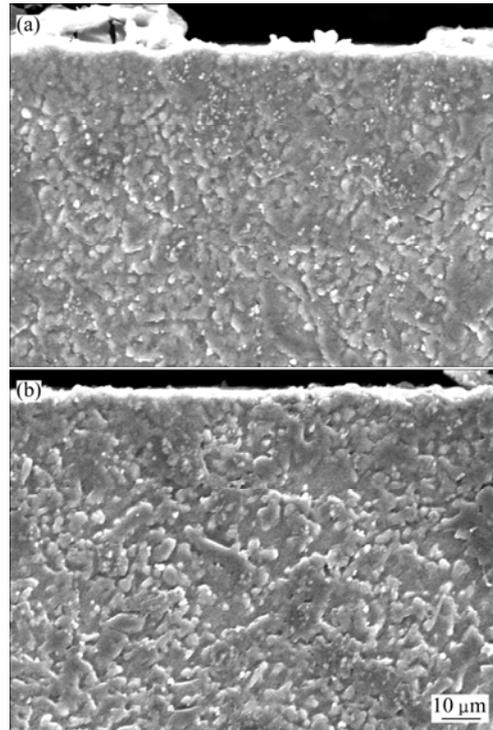


图6 复合材料亚表面的 SEM 像

Fig.6 SEM images of worn sub-surface of composites at speed of 1 m/s and loads of 5 N(a) and 40 N(b)

金的耐磨性低。随着载荷的增加，复合材料表现出比基体合金先提高后降低的耐磨性。这与 ZHANG 等^[17]的研究结果一致。ZHANG 等^[17]在研究 20% Saffil 短纤维增强 Al6061 铝合金磨损行为时发现，在低载荷下复合材料的耐磨性比基体合金的高，在中等载荷下耐磨性与基体合金相当，而在较高载荷下其耐磨性变差。这说明载荷变化时复合材料并不总表现出比基体合金更好的耐磨性。HOW 等^[18]研究了干摩擦条件下 Saffil 短纤维增强 AA6061 复合材料的磨损行为，指出增强相在实验载荷范围内(4.9~48.3 N)并未起到增强耐磨性的作用。另外，LIM 等^[19]研究了 SiC_p 增强 AZ91 复合材料在 10 N 与 30 N 两种载荷下滑动速度为 0.2~5.0 m/s 时的磨损行为，发现在低载荷下复合材料的磨损性能比合金有所提高，而在较高载荷下复合材料的磨损性能具有不确定性。由此可以看出，增强相对复合材料耐磨性的作用会由于载荷的不同而不同。一般而言，在载荷较低时，金属基复合材料的耐磨性比基体合金的高。而在载荷较高时，复合材料的耐磨性呈下降趋势。

复合材料在低载下表现出比基体合金更高的耐磨性，这说明晶须的加入在一定程度上提高了材料的耐磨性。通过对复合材料与基体合金的硬度测试可以看

出,基体合金的硬度为 HV90,而复合材料的硬度达到 HV229,为前者的两倍多。可见,在磨损过程中,经金相砂纸打磨后的复合材料晶须已略凸出于镁基体表面。由于晶须的硬度和耐磨性远高于镁基体,在较低载荷下,当滑动磨损开始后,复合材料表面的镁基体首先被磨掉,使晶须更加暴露到材料表面而直接与对偶面接触,起到承受载荷的作用^[20]。

随着载荷的增加,复合材料的磨损经历了由以犁削为主导的轻微磨损阶段到以剥层为主导的剧烈磨损阶段,载荷的增加使得复合材料由于磨损机制变化引起的磨损率增加。在一定的滑动速度下,存在一个两种磨损阶段间发生转变的临界载荷,当载荷低于相应的临界载荷时,复合材料的磨损处于轻微磨损阶段,当载荷高于相应的临界载荷时,磨损就进入剧烈磨损阶段。复合材料表现出低于临界载荷条件下优于基体合金的耐磨性,当载荷进一步增大,复合材料的磨损率急剧增加,很快超过基体合金。这与 MONDAL 等^[9]的研究结果一致。MONDAL 等^[9]在研究 AE42+20% Saffil 复合材料磨损行为时发现,3种滑动速度下复合材料的磨损都存在临界载荷,当载荷高于临界载荷时,复合材料的磨损率线性增加。SHARMA 等^[1]在研究长石颗粒增强镁基复合材料磨损行为时也发现存在临界载荷。这是因为随着载荷的增加,断裂的晶须增多,复合材料的增强体与基体合金在界面上开始松动所致。这与涂江平等^[21]的研究结果一致。

滑动速度 1、2、3、5 m/s 对应的转变临界载荷分别为 25、18、10 和 5 N。由此可见,不同速度下复合材料的临界转变载荷并不相同。这与 MONDAL 等^[9]的研究结果有所不同。MONDAL 等^[9]研究了 Saffil 短纤维增强镁基复合材料在 0.838、1.676 和 2.513 m/s 3种速度下的磨损率与载荷的变化关系,结果发现3种速度下复合材料由轻微向剧烈磨损阶段转变的临界载荷均为 10 N,分析认为这是短纤维断裂的临界载荷。通过对本实验结果的分析,发现剧烈磨损阶段的启动是载荷和滑动速度综合作用的结果。本实验中复合材料在严重磨损阶段的主导磨损机制为剥层,将载荷均为 25 N,滑动速度为 2 m/s 和 5 m/s 的磨面照片(图 4(c)与图 4(d))进行比较可以看出:后者的磨面上裂纹的宽度与深度明显比前者要大,这说明剥层磨损机制的启动不仅与载荷有关还与滑动速度有关。滑动速度的增加加剧了裂纹在晶须与基体合金界面处的形核与向表面的运动,因此图 4(d)中磨面的裂纹要比图 4(c)中发展完全。另一方面,滑动速度的增加也导致了磨

面温度的升高,可以看出,图 4(d)中磨面材料变形比图 4(c)剧烈,产生了明显的塑性变形。磨面温度的升高软化了基体合金,也使得复合材料的界面结合强度下降,从而使复合材料的磨损率产生上升趋势。

本文中对磨损后的复合材料与基体合金磨面进行了电子探针点成分分析,没有检测到大量氧的存在,这可能与液体石蜡润滑剂的采用有关。因为液体石蜡的存在将复合材料磨面与空气隔绝开来,从而没有出现氧化磨损现象。

LIM 等^[2]研究纳米尺寸 Al_2O_3 颗粒增强镁基复合材料磨损行为时发现在滑动速度为 3 m/s 时出现了粘着磨损,而 LIM 等^[19]也发现当滑动速度大于 2 m/s 时复合材料也出现了粘着磨损。在本实验中速度 0.5~5.0 m/s 范围内,复合材料没有出现粘着磨损。分析认为,这可能与采用的复合材料的晶须体积分数较高有关。本实验中晶须体积分数为 30%,而文献[2, 19]中的体积分数不超过 8%。硼酸镁晶须的熔点为 1360 °C,耐热温度为 1000 °C,其强度也比较高,晶须的加入提高了复合材料的高温稳定性。因此,随着滑动速度的增加,虽然磨面温度上升,但复合材料没有出现粘着磨损现象。

4 结论

1) 当滑动速度一定时,复合材料的滑动摩擦因数总体上远低于基体合金的滑动摩擦因数。复合材料存在一个临界载荷,当实验载荷低于它时,复合材料的滑动摩擦因数随着载荷的增加而降低,而当超过临界载荷时,随着载荷的增加复合材料的滑动摩擦因数随着载荷的增加而升高。基体合金的滑动摩擦因数随着载荷的增加而稳步降低,无临界载荷存在。

2) 滑动速度一定时,当实验载荷低于复合材料的临界载荷时,复合材料的磨损率较小,远低于基体合金;当实验载荷高于复合材料的临界载荷时,复合材料的磨损率急剧增加,超过基体合金。临界载荷将复合材料的磨损分为轻微磨损和严重磨损两个阶段。

3) 随着滑动速度的增加,复合材料的磨损有向低载荷转变的趋势。滑动速度为 1、2、3 和 5 m/s 时对应的转变临界载荷分别为 25、18、10 和 5 N。

4) 在液体石蜡润滑条件下,增强相晶须有效地抑制了基体在反复正压力和切向摩擦力作用下的塑性变形,因此没有观察到复合材料亚表面存在塑性变形层。

5) 复合材料在轻微磨损阶段与严重磨损阶段的

主导磨损机制分别为磨粒磨损和剥层磨损。

REFERENCES

- [1] SHARMA S C, ANAND B, KRISHNA M. Evaluation of sliding wear behaviour of feldspar particle-reinforced magnesium alloy composites[J]. *Wear*, 2000, 241: 33–40.
- [2] LIM C Y H, LEO D K, ANG J J S, GUPTA M. Wear of magnesium composites reinforced with nano-sized alumina particulates[J]. *Wear*, 2005, 259: 620–625.
- [3] SAHIN Y, MURPHY S. Wear performance of aluminium alloy composites containing unidirectionally-oriented silicon carbide coated boron fibers [J]. *Wear*, 1996, 197(1/2): 248–254.
- [4] 杜建华, 刘贵民, 谢凤宽, 李超, 韩文政. 纳米 SiO₂ 对铜基摩擦材料摩擦学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(8): 1453–1457.
DU Jian-hua, LIU Gui-min, XIE Feng-kuan, LI Chao, HAN Wen-zheng. Effect of nano-SiO₂ on tribological properties of Cu-based friction materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(8): 1453–1457.
- [5] WU S Q, WANG H Z, TJONG S C. Mechanical and wear behavior of an Al/Si alloy metal-matrix composite reinforced with aluminosilicate fiber[J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(11): 1261–1270.
- [6] SHARMA S C. The sliding wear behavior of Al6061–garnet particulate composites[J]. *Wear*, 2001, 249(12): 1036–1045.
- [7] ROY D, BASU B, MALLICK A B. Tribological properties of Ti-aluminide reinforced Al-based in situ metal matrix composite[J]. *Intermetallics*, 2005, 13(7): 733–740.
- [8] SARAVANAN R A, SURAPPA M K. Fabrication and characterisation of pure magnesium-30 vol.% SiC_p particle composite[J]. *Mater Sci Eng A*, 2000, 276(1/2): 108–116.
- [9] MONDAL A K, CHANDRA RAO B S S, KUMAR S. Wear behaviour of AE42+20% Saffil Mg-MMC[J]. *Tribology International*, 2007, 40: 290–296.
- [10] ABACHI P, MASOUDI A, PURAZRANG K. Dry sliding wear behavior of SiC_p/QE22 magnesium alloy matrix composites[J]. *Mater Sci Eng A*, 2006, 435/436(5): 653–657.
- [11] ALAHELISTEN A, BERGMAN F, OLSSON M, HOGMARK S. On the wear of aluminium and magnesium metal matrix composite[J]. *Wear*, 1993, 165(2): 221–226
- [12] 金培鹏, 许广济, 丁雨田, 史训兵, 刘孝根. 硼酸镁(铝)晶须增强镁基复合材料中界面特性对比研究[J]. *盐湖研究*, 2007, 15(4): 32–36.
JIN Pei-peng, XU Guang-ji, DING Yu-tian, SHI Xun-bing, LIU Xiao-gen. Comparison of the interface characteristics of the Mg₂B₂O_{5w}/AZ91D and Al₁₈B₄O_{33w}/AZ91D reinforced magnesium matrix composites[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2007, 15(4): 32–36.
- [13] NICHOLS F A, ASHBY M F. T-MAPS, A PC-code for calculating average and local ('flash') temperatures on sliding interfaces[C]//American Society of Mechanical Engineers. Contact Problems and Surface Interactions in Manufacturing and Tribological Systems. New Orleans: Production Engineering Division (Publication) PED, 1993: 75–86.
- [14] 杜军, 刘耀辉, 朱先勇, 于思荣. ZL109 铝合金及其复合材料干滑动表面及亚表面的观察与分析[J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, 33(2): 207–212.
DU Jun, LIU Yao-hui, ZHU Xian-yong, YU Si-rong. Observations and analysis of worn surface and subsurface of ZL109 aluminum alloy and its composites in dry sliding friction and wear[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, 33(2): 207–212.
- [15] 李月英, 刘勇兵, 曹占义, 杨杰. Al₂O₃-SiO₂ 颗粒增强铝基复合材料的摩擦磨损特性[J]. *材料科学与工艺*, 2003, 11(2): 140–143.
LI Yue-ying, LIU Yong-bing, CAO Zhan-yi, YANG Jie. Friction and wear behavior of Al₂O₃-SiO₂ particle reinforced Al matrix composites[J]. *Materials Science & Technology*, 2003, 11(2): 140–143.
- [16] IWAI Y, HONDA T, MIYAJIMA T, IWASAKI Y, SURAPPA M K, XU J F. Dry sliding wear behavior of Al₂O₃ fiber reinforced aluminum composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60: 1781–1789.
- [17] ZHANG J, ALPAS A T. Wear regimes and transitions in Al₂O₃ particulate-reinforced aluminum alloys[J]. *Mater Sci Eng A*, 1993, 161(2): 273–284.
- [18] HOW H C, BAKER T N. Dry sliding wear behaviour of Saffil-reinforced AA6061 composites[J]. *Wear*, 1997, 210(1/2): 263–272.
- [19] LIM C Y H, LIM S C, GUPTA M. Wear behaviour of SiC-reinforced magnesium matrix composites[J]. *Wear*, 2003, 255: 629–637.
- [20] ALPAS A T, ZHANG J. Effect of SiC particulate reinforcement on the dry sliding wear of aluminum silicon alloys (A356)[J]. *Wear*, 1992, 155: 83–104.
- [21] 涂江平, 孟亮, 刘茂森, 刘茂森, 松村昌信. 干摩擦条件下 Al₁₈B₄O₃₃ 晶须增强 AC4C 铝基复合材料的摩擦磨损特性[J]. *摩擦学学报*, 2000, 20(1): 1–5.
TU Jiang-ping, MENG Liang, LIU Mao-sen, MATSUMURA M. Friction and wear properties of Al₁₈B₄O₃₃ whisker reinforced AC4C Al alloy matrix composites under dry sliding conditions[J]. *Tribology*, 2000, 20(1): 1–5.

(编辑 李向群)