

Mg₂B₂O_{5w}, SiC 和 Gr 颗粒 增强 6061Al 基复合材料的 摩擦磨损行为

Friction and Wear Behavior of Mg₂B₂O_{5w},
SiC and Gr Particles Reinforced
6061Al Matrix Composite

丁雨田,王冬强,胡 勇,彭和思,马国俊
(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与
再利用国家重点实验室,兰州 730050)

DING Yu-tian, WANG Dong-qiang, HU Yong,
PENG He-si, MA Guo-jun

(State Key Laboratory of Advanced Processing and
Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University
of Technology, Lanzhou 730050, China)

摘要: 采用粉末热挤压法制备 2% Mg₂B₂O_{5w}/6061Al, 2% Gr/6061Al, 2% SiC_p/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al 单一及混杂增强的铝基复合材料,并对其耐磨性和摩擦行为进行研究。结果表明:随着载荷的增大,各种复合材料的磨损率均增大,石墨的添加增大了铝基复合材料的磨损率;复合材料的摩擦因数随载荷的增大而降低并趋于稳定,摩擦因数均介于 0.22~0.32 之间。未加入石墨的复合材料的磨损机制以磨料磨损和轻微的黏着磨损为主,加入石墨后复合材料的磨损机制转变为剧烈的黏着磨损。

关键词: 粉末热挤压;增强体;铝基复合材料;摩擦磨损

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.10.007

中图分类号: BT331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)10-0042-07

Abstract: Single and hybrid Al matrix composites with 2% Mg₂B₂O_{5w}/6061Al, 2% Gr/6061Al, 2% SiC_p/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al reinforcements were prepared by powder hot extrusion process, and the wear resistance and the friction behaviour of the single and hybrid Al matrix composites were studied. The results show that the wear rates of all kinds of the composites increase with the load increasing, the wear rate of Al matrix composites increase with the addition of graphite, the friction coefficients of all kinds of the composites decrease with the load increasing and then become stabilized, the friction coefficient is between 0.22 to 0.32. Abrasive wear and slight adhesive wear dominate the wear mechanism of Al matrix composites without graphite, after the addition of graphite, the wear mechanism of Al matrix composites converts into serious adhesive wear.

Key words: powder hot extrusion; reinforcement; aluminum matrix composite; friction and wear

铝基复合材料以其低密度、高比模量、比强度、优良的导热性及耐磨性广泛应用于汽车、航空航天等行业^[1-5]。铝基复合材料具有良好的耐磨性,王宝顺等^[6]研究发现复合材料-刹车材料摩擦副的耐磨性明显优于 HT250-刹车材料摩擦副。铝基复合材料的摩擦磨损特性与多重因素相关,Diler 等^[7]研究发现随着

SiC_p 增强体体积分数的增加,材料的磨损量减小,然而,当增强体体积分数大于 17.5%时,增强体在基体中团簇加剧反而使材料磨损量增大。刘慧敏等^[8]对 TiC 增强 7075 铝基复合材料的磨损性能研究发现,只有在低载荷条件下 TiC/7075 Al 基复合材料磨损率随 TiC 颗粒含量的增加而降低,而在高载荷条件下,

7075Al 基体合金具有比 TiC/7075Al 基复合材料更加优越的耐磨性。另外,在一定条件下,混杂增强铝基复合材料具有比单一复合材料更优越的耐磨性能,因其可以综合多种增强体各自的优点,Umanath^[9]在研究 SiC/Al₂O₃ 混杂铝基复合材料时发现:随着增强体体积分含量的增大、载荷的降低、滑动速率的降低以及对偶件硬度的增大,混杂复合材料的磨损率降低。Alidokht 等^[10]研究 SiC/MoS₂ 混杂增强 A356 Al 基复合材料摩擦磨损行为时得出结论,Al/SiC/MoS₂ 混杂复合材料的耐磨性优于 Al/SiC 混杂复合材料。

铝基复合材料常用的增强体有碳化物、氧化物、硼化物等^[11-13]。硼酸镁晶须作为新型的增强体材料具有轻量化、高强度、耐高温、耐腐蚀等优异性能。而价格仅为碳化硅晶须的 1/20~1/30,是当今复合材料增强体中最有希望广泛应用的晶须之一^[14]。目前,硼酸镁晶须增强铝基复合材料的研究甚少,尤其硼酸镁晶须与其他增强体的混杂效应对铝基复合材料摩擦磨损行为影响的研究更是鲜见报道。本工作利用粉末热挤压工艺制备硼酸镁晶须、碳化硅颗粒、石墨颗粒增强铝

基复合材料以及混杂增强的铝基复合材料,研究了不同种类增强体及混杂增强体对铝基复合材料磨损率、摩擦因数的影响,并对其磨损行为及机理进行研究,进而推进硼酸镁晶须在金属基复合材料中的应用。

1 实验材料与方法

1.1 实验制备

采用粉末热挤压法制备铝基复合材料,实验所用的硼酸镁晶须增强体长径比为 10~50,直径为 0.5~5 μm,碳化硅颗粒粒度为 10~30 μm,Gr 颗粒粒度为 2~15 μm。6061Al 基体粒度为 10~30 μm。粉末热挤压法制备复合材料的工艺流程:混粉(球磨)→预压除气→致密化→挤压成型。工艺参数为:150℃时,在 20MPa 下预压 5~10min,540℃保温 1h 后以 25:1 的挤压比挤压成型。制备的复合材料和基体合金的部分性能如表 1 所示。复合材料的显微组织及能谱分析如图 1 所示。图 1(d),(e),(f)分别为图 1(a),(b),(c)中 A,B,C 处的 EDS 图谱。

表 1 基体合金和复合材料的力学性能
Table 1 Mechanical property of 6061Al and composites

Material	Density/(g·cm ⁻³)	HV	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation/%
6061Al	2.7191	51.80	210.0	14.13%
2%Mg ₂ B ₂ O ₅	2.7232	57.16	234.4	11.20%
2%Gr	2.7161	54.90	205.0	9.60%
2%SiC	2.7265	53.50	220.7	12.80%
2%Mg ₂ B ₂ O ₅ +2%Gr	2.7087	49.86	200.0	7.29%
2%Mg ₂ B ₂ O ₅ +2%SiC	2.7360	53.60	214.0	10.69%
2%Mg ₂ B ₂ O ₅ +2%SiC+2%Gr	2.7163	50.97	203.5	7.22%

1.2 摩擦磨损实验

摩擦磨损实验在 MMW-1A 型微机控制万能摩擦磨损试验机上进行,采用销-盘形式的摩擦实验装置进行干滑动摩擦磨损实验。摩擦配副采用 φ70mm×4mm 的 Cr12 钢圆盘,HRC 为 45~48。复合材料试样尺寸为 φ4.8mm×12.8mm 的圆柱体。实验滑动速率为 0.2m/s,测试不同载荷时(10,20,30,40N)6 种复合材料(2%Mg₂B₂O_{5w}/6061Al,2%Gr/6061,2%SiC_P/6061Al,2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr/6061Al,2%Mg₂B₂O_{5w}+2%SiC_P/6061Al,2Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr+2%SiC_P/6061Al)磨损率与摩擦因数的变化。磨损率采用材料被磨去的质量 *m*,摩擦滑动的距离 *S* 表示,如式(1)所示:

$$K = m/S \tag{1}$$

用 JSM-6700F 扫描电子显微镜观察材料磨损表面和磨屑形貌并分析磨损机理。

2 结果与讨论

2.1 磨损率与摩擦因数

2.1.1 磨损率

图 2 为 6 种复合材料的磨损率随载荷的变化曲线,由图 2 可知,随着载荷的增加,复合材料的磨损率均有增大趋势。2% Mg₂B₂O_{5w}/6061Al,2% SiC_P/6061Al,2% Mg₂B₂O_{5w}+2% SiC_P/6061Al 的磨损率低于 2% Gr/6061Al,2% Mg₂B₂O_{5w}+2% Gr/6061Al 以及 2% Mg₂B₂O_{5w}+2% Gr+2% SiC_P/6061Al 复合材料,其中 2% Mg₂B₂O_{5w}+2% SiC_P/6061Al 复合材料的磨损率最低,2% Mg₂B₂O_{5w}+2% SiC_P/6061Al 复合材料的磨损率在载荷为 10N 和 40N 时,分别为 2% Mg₂B₂O_{5w}+2% Gr/6061Al 复合材料磨损率的 63.5%和 49.2%,这是由于 Mg₂B₂O_{5w}和 SiC_P的杂合

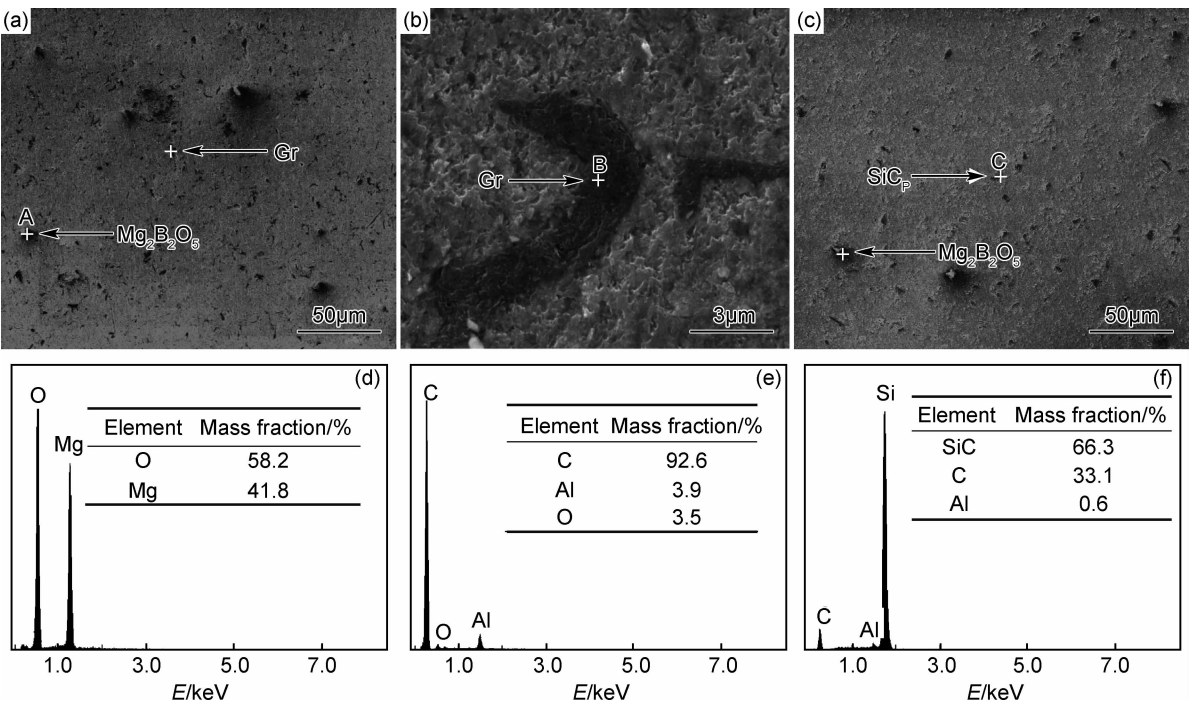


图 1 复合材料的 SEM 照片和 EDS 分析

(a) 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% Gr / 6061Al 的 SEM 图片; (b) 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% Gr / 6061Al 中 Gr 的 SEM 图片;
(c) 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% SiC_p / 6061Al 的 SEM 图片; (d) 图 1(a) 中增强相 A 的 EDS 分析;
(e) 图 1(a) 中增强相 B 的 EDS 分析; (f) 图 1(a) 中增强相 C 的 EDS 分析

Fig. 1 SEM photographs and EDS analysis of composites

(a) SEM of 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% Gr / 6061Al; (b) SEM of Gr in 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% Gr / 6061Al;
(c) SEM of 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% SiC_p / 6061Al; (d) EDS analysis of reinforcement A in fig. 1(a);
(e) EDS analysis of reinforcement B in fig. 1(b); (f) EDS analysis of reinforcement C in fig. 1(c)

效应使得材料的磨损率降低, 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% Gr / 6061Al 复合材料中加入的 Gr 并没有起到润滑的作用, 反而提高了材料的磨损率, 这是因为 Gr 的加入降低了材料基体与基体以及与 $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ 之间的结合强度。2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% Gr + 2% SiC_p / 6061Al 复合材料中 3 种增强体同时加入基体使材料磨损率提高, 这与大部分^[3,15]研究结果是背道而驰的。

2.1.2 摩擦因数

图 3 为 6 种复合材料的摩擦因数随载荷的变化曲线, 由 3 图可知, 随着载荷的增大, 材料摩擦因数呈下降趋势。2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ / 6061Al, 2% SiC_p / 6061Al 及 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% SiC_p / 6061Al 复合材料的摩擦因数小于 2% Gr / 6061Al, 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% Gr / 6061Al 及 2% $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_{5\text{w}}$ + 2% Gr + 2% SiC_p / 6061Al 复合材

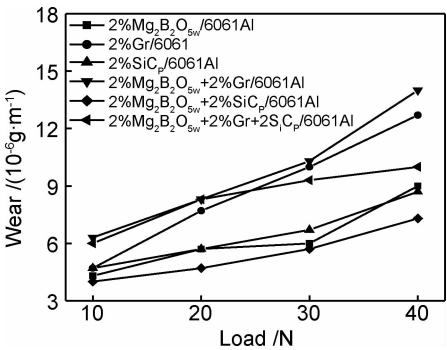


图 2 不同载荷下 6 种复合材料的磨损率

Fig. 2 The wear rate of six kinds of composites under different load

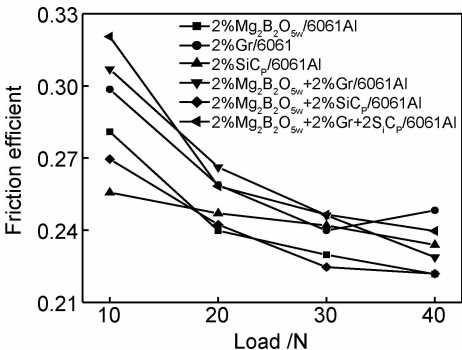


图 3 不同载荷下 6 种复合材料摩擦因数

Fig. 3 Friction coefficient of six kinds of composites under different loads

料, 2% Gr/6061, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al 及 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr+2%SiC_p/6061Al 复合材料中 Gr 的加入并没有对摩擦表面起到固体润滑作用, 反而使材料的摩擦因数变大, 这可能是 Gr 的加入促使复合材料以剧烈的黏着磨损形式滑动, 使复合材料的摩擦因数增大。另外, 随着载荷的增大, 材料与摩擦副之间的接触面积越大, 材料的摩擦因数越来越稳定。

2.2 摩擦形貌与机理

图 4 为 6 种复合材料在 30N 时摩擦形貌的 SEM 图片, 由图 4 可看出, 2%Mg₂B₂O_{5w}/6061Al 复合材料的磨损形式以磨料磨损和黏着磨损共同作用, 如图 4 (a)所示, 摩擦过程中材料表面出现犁沟和少量的剥落, Mg₂B₂O_{5w} 的加入增强了材料的硬度, 提高了材料的耐磨性。2%Gr/6061Al 复合材料主要以黏着磨损为主, 如图 4(b)所示, Gr 的加入降低了材料硬度, 材料表面出现大量的塑性变形; 另外, Gr 与铝合金的润湿性差, 降低了基体之间的结合强度, 在摩擦过程中, 复合材料表面发生加工硬化而使材料硬度提高, 但材料亚表层的硬度较低, 容易在摩擦切应力下产生开裂分层的现象。在 2%Gr/6061Al 复合材料中, Gr 使基体的结合能力降低, 加速了磨屑的生成和脱落, 如图 4 (b)左上角可看到离层脱落后 Gr 深坑。2% SiC_p/

6061Al 材料的磨损主要以磨料磨损为主, 如图 4(c)所示, 材料的摩擦表面出现塑性变形和裂纹, 但剥离的现象较少, 这是由于复合材料中 SiC_p 与基体具有良好结合性。2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al 复合材料的磨损形式以剧烈的黏着磨损为主, 并伴随着磨料磨损, 如图 4(d)所示, 材料表面出现大量的剥离现象, 而且大多形成于 Gr 团聚的部位, 其磨损机理与 2% Gr/6061Al 复合材料类似。在 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al 复合材料中, Gr 的加入不仅降低了合金基体之间的结合强度, 而且降低了 Mg₂B₂O_{5w} 与基体的结合, 这样使得材料中的 Mg₂B₂O_{5w} 容易在摩擦过程中被拔出, 被拔出 Mg₂B₂O_{5w} 在基体部位出现空洞缺陷, 易形成裂纹源, 而且被拔出的 Mg₂B₂O_{5w} 以磨料的形式存在于摩擦表面, 进而犁削摩擦副表面, 对复合材料起到消极的作用, 使复合材料磨损率变大。2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al 复合材料的磨损形式以黏着磨损为主, 如图 4(e)所示, 材料表面出现剥落现象, 然而, 从材料表面可看到大量的黏附物, 如图 4(e)所示, 对其进行 EDS 分析如图 5 所示, 可以看出黏附物为富铁混合物, 在摩擦过程中, 由于材料表面可以将脱落的磨屑重新回收, 使其以机械混合层的形式存在于摩擦面, 从而降低了材料的磨损率。2% Mg₂B₂O_{5w} +

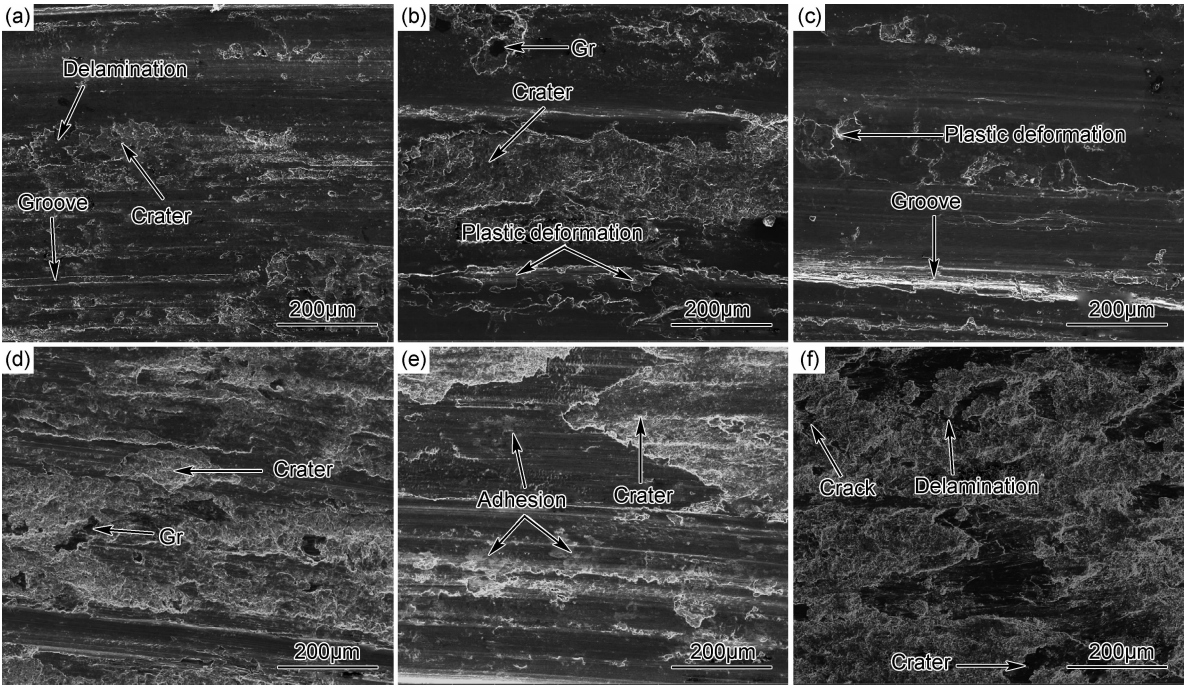


图 4 载荷为 30N 时 6 种复合材料摩擦表面 SEM 图片
(a) 2% Mg₂B₂O_{5w}/6061Al; (a) 2% Gr/6061Al; (c) 2% SiC_p/6061Al; (d) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr /6061Al;
(e) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al; (f) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al
Fig. 4 SEM micrographs of the worn surfaces of six composites under wear load of 30N
(a) 2% Mg₂B₂O_{5w}/6061Al; (a) 2% Gr/6061Al; (c) 2% SiC_p/6061Al; (d) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr /6061Al;
(e) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al; (f) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al

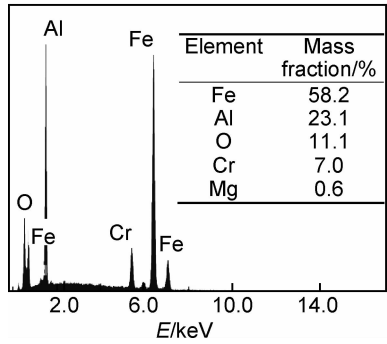


图 5 富铁黏附层的 EDS 分析

Fig. 5 EDS analysis of the iron-rich adhesion layer

2%Gr+2%SiC_P/6061Al 复合材料的磨损形式以剧烈的黏着磨损和磨料磨损为主,如图 4(f)所示,材料表面出现大量地剥离脱落和巨大的裂纹,也可以从材料表面看到富铁相的黏附物,然而,富铁相并不是像 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%SiC_P/6061Al 复合材料以机械混合层的形式起到减磨的作用,在摩擦过程中,这些富铁相易与材料表层基体结合,因为 Gr 的存在使材料亚表层结合较薄弱,这些富铁相与摩擦表面的结合物容易脱落形成大块的磨屑,又因为 Gr 的润滑作用抑制这些磨屑重新黏附于摩擦副表面,促使磨屑从摩擦表面脱落而彻底被磨损掉,使材料的磨损率变大。

图 6 为 6 种复合材料在 30N 时的摩擦表面 EDS 分析曲线(1,2,3,4,5,6 分别代表 2%Mg₂B₂O_{5w}/6061Al, 2%Gr/6061Al, 2%SiC_P/6061Al, 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr/6061Al,2%Mg₂B₂O_{5w}+2%SiC_P/6061Al,2Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr+2%SiC_P/6061Al),由图 6 可看出,6 种材料磨损表面氧含量变化不大,处于 26%~29%之间,说明在摩擦过程中,材料发生了较强的氧化磨损。与 2%Gr/6061Al,2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr/6061Al 及 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr+2%SiC_P/

6061Al 复合材料相比,2%Mg₂B₂O_{5w}/6061Al, 2%SiC_P/6061Al, 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%SiC_P/6061Al 复合材料摩擦表面铁含量较多,说明 2%Mg₂B₂O_{5w}/6061Al,2%SiC_P/6061Al 及 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%SiC_P/6061Al 复合材料在摩擦过程中易与摩擦配副 Cr12 结合形成稳定的富铁摩擦缓冲层;相反,2%Gr/6061Al, 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr/6061Al 以及 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr+2%SiC_P/6061Al 复合材料在摩擦过程中则倾向于与摩擦配副结合后迅速脱落而产生新的摩擦界面,从而增大了材料的磨损率。这正是由于加入的 Gr 使得材料亚表层结合降低,且在摩擦过程中润滑促进材料与摩擦界面脱落的原因。

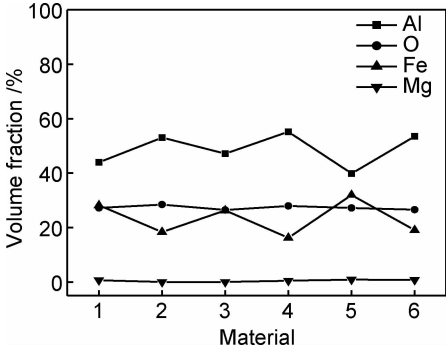


图 6 载荷 30N 下 6 种复合材料磨损表面 EDS 分析

Fig. 6 EDS analysis of the worn surfaces of six composites under wear loads of 30N

图 7 为 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr/6061Al, 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%SiC_P/6061Al 和 2Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr+2%SiC_P/6061Al 3 种复合材料在摩擦过程中产生磨屑碎片的 SEM 图片,由图 3 可看出 2%Mg₂B₂O_{5w}+2%SiC_P/6061Al 复合材料的磨屑碎片较为均匀,且表面光滑而致密,这是由于碎片在脱落之前经过多次的碾压,磨屑组成的机械混合层塑性降低,磨屑碎片缓慢

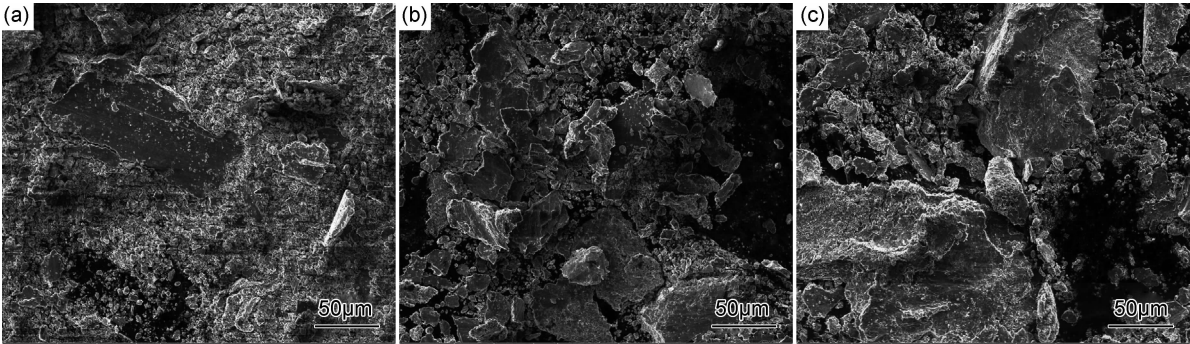


图 7 30N 负载下 3 种复合材料磨屑的 SEM 图像

(a)2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr/6061Al; (b)2%Mg₂B₂O_{5w}+2%SiC_P/6061Al; (c)2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr+2%SiC_P/6061Al

Fig. 7 SEM micrographs of the worn debris of three composites under wear load of 30N

(a)2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr/6061Al; (b)2%Mg₂B₂O_{5w}+2%SiC_P/6061Al; (c)2%Mg₂B₂O_{5w}+2%Gr+2%SiC_P/6061Al

的脱离摩擦表面。由图 7(a)和 7(c)可看出, Gr 的加入使磨屑大小不一, 大块磨屑与小颗粒磨屑体积差异较大, 而且磨屑表面粗糙松散, 这正是由于 Gr 的加入使得复合材料亚表面结合能力降低, 材料在摩擦过程中可形成较大块的磨屑。另外, Gr 又可以抑制小颗粒磨屑与摩擦表面及其他小颗粒磨屑相互结合, 促使磨屑从摩擦表面的脱落, 最终使得材料磨损率变大。这可能与粉末热挤压的成型工艺有关。

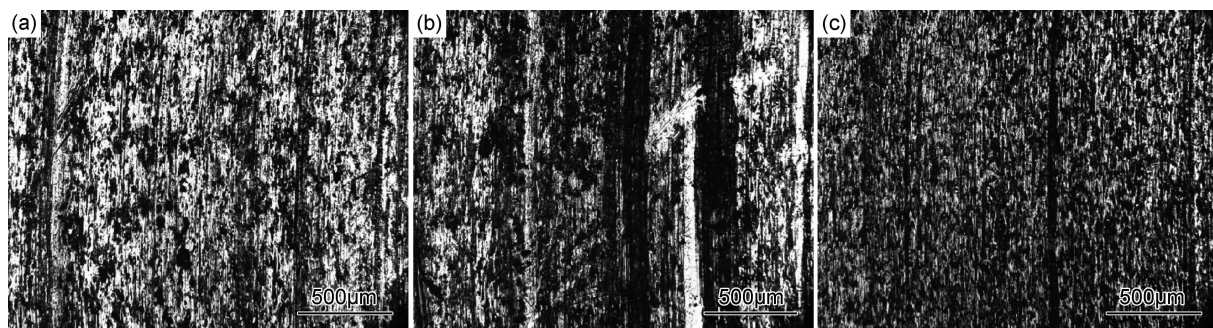


图 8 30N 载荷下 3 种复合材料对偶件的摩擦表面及光镜显微照片

(a) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al; (b) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al; (c) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al

Fig. 8 Optical micrographs of the counter face at applied load of 30N for three composites

(a) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al; (b) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al; (c) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al

摩擦配副 Cr12 具有一定的润滑效果。

3 结论

(1) 通过粉末热挤压工艺成功制备出致密度高、增强体分布均匀的 6 种铝基复合材料 (2% Mg₂B₂O_{5w}/6061Al, 2% Gr/6061Al, 2% SiC_p/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al, 2Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al)。

(2) 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al 混杂增强复合材料的磨损率最低, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al 混杂增强复合材料的磨损率最高, 当载荷为 40N 时, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al 混杂复合材料的磨损率为 7.3×10^{-6} g/m, 仅为 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al 混杂增强复合材料磨损率的 49.2%。

(3) 6 种复合材料的摩擦因数随载荷的增大呈下降趋势, 且摩擦因数均介于 0.22~0.32 之间, 添加 Gr 的复合材料 (2% Mg₂B₂O_{5w}/6061Al, 2% SiC_p/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al) 的磨损率高于未添加 Gr 的复合材料 (2% Mg₂B₂O_{5w}/6061Al, 2% SiC_p/6061Al), Gr 并没有对复合材料起到润滑减摩的作用。

(4) 未加入 Gr 的复合材料 (2% Mg₂B₂O_{5w}/

图 8 为与 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al 及 2Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al 复合材料对磨的摩擦配副磨损表面的光镜图片, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al 复合材料对摩擦配副的刮擦较大, 有较大的犁沟产生, 如图 8(b) 所示。2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al 和 2Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al 复合材料由于 Gr 的加入使得材料对摩擦配副的刮擦较小。由此可以说明 Gr 对

6061Al, 2% SiC_p/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% SiC_p/6061Al) 的磨损机制以磨料磨损或黏着磨损为主; 加入 Gr 的复合材料 (2% Gr/6061Al, 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr/6061Al 及 2% Mg₂B₂O_{5w} + 2% Gr + 2% SiC_p/6061Al) 的磨损机制由剧烈的黏着磨损主导。

参考文献

- [1] RAVINDRAN P, MANISEKAR K, NARAYANASAMY P, et al. Application of factorial techniques to study the wear of Al hybrid composites with graphite addition[J]. Materials & Design, 2012, 39: 42-54.
- [2] 杨佼源, 韦习成, 洪晓露, 等. 高含量 SiC 颗粒增强铝基复合材料的增摩特性研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 446-451. YANG Jiao-yuan, WEI Xi-cheng, HONG Xiao-lu, et al. Dry friction coefficient of high content SiC particle reinforced aluminium matrix composite against commercial friction material[J]. Tribology, 2014, 34(4): 446-451.
- [3] RAVINDRAN P, MANISEKAR K, NARAYANASAMY P, et al. Tribological behaviour of powder metallurgy-processed aluminium hybrid composites with the addition of graphite solid lubricant[J]. Ceramics International, 2013, 39(2): 1169-1182.
- [4] RAO R N, DAS S. Effect of matrix alloy and influence of SiC particle on the sliding wear characteristics of aluminium alloy composites[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1200-1207.
- [5] 汤赞武, 陈飞, 曹志强, 等. 原位生成 TiB₂/ZA27 复合材料的组织与耐摩擦磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(1): 194-198.

- TANG Yun-wu, CHEN Fei, CAO Zhi-qiang, et al. Microstructure and friction-wear resistance of in-situ $\text{TiB}_2/\text{ZA27}$ composites [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(1):194—198.
- [6] 王宝顺, 吕一中, 崔岩, 等. SiCp/Al 复合材料-半金属刹车材料干摩擦磨损性能研究[J]. *材料工程*, 2007, (6):7—10
- WANG Bao-shun, LU Yi-zhong, CUI Yan, et al. Dry sliding tribological behavior of SiCp/Al composites against semi-metallic brake pad[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2007, (6):7—10.
- [7] DILER E A, IPEK R. Main and interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on wear characteristics of Al-SiCp composites using central composite design[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 50:371—380.
- [8] 刘慧敏, 宋振东, 许萍, 等. $\text{TiC}/7075$ 铝基复合材料的磨损实验研究[J]. *材料工程*, 2011, (7):66—69.
- LIU Hui-min, SONG Zhen-dong, XU Ping, et al. Experimental study of the wear resistance of $\text{TiC}/7075$ Al matrix composite [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011, (7):66—69.
- [9] UMANATH K, PALANIKUMAR K, SELVAMANI S T. Analysis of dry sliding wear behaviour of $\text{Al6061}/\text{SiC}/\text{Al}_2\text{O}_3$ hybrid metal matrix composites[J]. *Composites: Part B*, 2013, 53:159—168.
- [10] ALIDOKHT S A, ABDOLLAH-ZADEHN A, ASSADI H. Effect of applied load on the dry sliding wear behaviour and the subsurface deformation on hybrid metal matrix composite[J]. *Wear*, 2013, 305(1):291—298.
- [11] 甄文柱, 梁波. 等离子喷涂 MoS_2/Cu 基复合涂层真空摩擦磨损性能[J]. *材料工程*, 2013, (8):16—22.
- ZHEN Wen-zhu, LIANG Bo. Tribological Behavior of plasma sprayed MoS_2/Cu composite coating under vacuum atmosphere [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2013, (8):16—22.
- [12] 李维学, 张凯, 戴剑锋, 等. TA2 钛合金表面 Al_2O_3 /石墨自润滑沉积层的制备及其摩擦学性能研究[J]. *航空材料学报*, 2013, 33(3):46—52.
- LI Wei-xue, ZHANG Kai, DAI Jian-feng, et al. Preparation and tribological properties of self-lubricating Al_2O_3 /graphite composite coating on TA2 titanium[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2013, 33(3):46—52.
- [13] PRABHU R T, VARMA V K, VEDANTAM S. Effect of SiC volume fraction and size on dry sliding wear of $\text{Fe}/\text{SiC}/\text{graphite}$ hybrid composites for high sliding speed applications[J]. *Wear*, 2014, 309(1):1—10.
- [14] 金培鹏, 陈庚, 韩丽, 等. 硼酸镁晶须增强 6061 铝基复合材料的干摩擦磨损行为[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(1):49—57.
- JIN Pei-peng, CHEN Geng, HAN Li, et al. Dry sliding friction and wear behaviors of $\text{Mg}_2\text{B}_2\text{O}_5$ whisker reinforced 6061Al matrix composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(1):49—57.
- [15] LENG J F, JIANG L T, WU G H, et al. Effect of graphite particle reinforcement on dry sliding wear of $\text{SiC}/\text{Gr}/\text{Al}$ composites [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(11):1894—1898.

收稿日期:2014-11-17;修订日期:2015-03-23

通讯作者:丁雨田(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事热型连铸技术制备新材料、新型医用镁合金、镍及合金、金属基复合材料等方向的研究,联系地址:甘肃省兰州市七里河区兰工坪路287号材料学院(730050),E-mail:dingyutian@126.com