

文章编号: 1000-3851(2000)01-0060-05

SiC 和 Gr 颗粒混杂增强 Al 基复合材料的摩擦磨损特性的研究

卢德宏^{1,2} 顾明元¹ 施忠良¹ 吴桢干¹ 金燕萍¹(¹ 上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030) (² 昆明理工大学, 昆明 650093)

摘要: 比较了 SiC 和 Gr 颗粒混杂增强 Al 基复合材料的干摩擦磨损行为, 并与单一 SiC_P 和单一 Gr_P 增强 Al 基复合材料的相应行为进行了比较。结果表明, 在低载荷(< 30 N)时, SiC_P 和 Gr_P 能协调作用, 使混杂复合材料的摩擦系数和磨损率均比单一 SiC_P 和 Gr_P 增强复合材料低。在较高载荷(30~120 N)时, 混杂复合材料磨损以剥层磨损机制为主, 摩擦系数比单一 SiC_P 增强复合材料低, 磨损率比单一 Gr_P 增强复合材料低得多, 比单一 SiC_P 增强复合材料高。混杂复合材料对偶件的磨损比单一 SiC_P 增强复合材料低得多。

关键词: Al 基复合材料; 混杂增强; 摩擦磨损

中图分类号: TB 331; TH 117 文献标识码: A

DRY SLIDING FRICTION AND WEAR BEHAVIOR OF HYBRID COMPOSITE OF PURE Al REINFORCED WITH SiC and Gr PARTICLES

LU De-hong^{1,2} GU Ming-yuan¹ SHI Zhong-liang¹ WU Zhen-gan¹ JIN Yan-ping¹(¹ State Key Laboratory of MMCs, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)(² Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan Province 650093)

Abstract Dry friction and wear behavior of Al matrix composites including those hybridizedly reinforced with 20 vol% SiC and 9 vol% Gr particles, and those separately reinforced with 20 vol% SiC and 9 vol% Gr particles were investigated. The wear tests were performed using a pin-on-disk wear machine under dry sliding condition, at a speed of 0.6 m/s with a load of 10 N to 120 N. At low loads (< 30 N), the friction coefficient and wear rate of hybrid composites were all lower than those of composites reinforced respectively with SiC_P and Gr_P, because of cooperation of load-bearing of SiC_P and self-lubrication of Gr_P. At higher loads (30~120 N), the wear rate of hybrid composite was higher than that of SiC_P/Al because of surface delamination of hybrid composite, but was greatly lower than Gr_P/Al. The friction coefficient of hybrid composite was less than that of SiC_P/Al. The wear rate of counterpart which mated with pin of hybrid composite was largely lower than that of SiC_P/Al at all loads.

Key words: Al matrix composites; hybrid; friction and wear

金属-石墨(Gr)复合材料由于其低摩擦系数、低磨损率、优异的抗咬合性能而得到了很多应用^[1]。另一方面, 近年来以 SiC、Al₂O₃ 等硬质陶瓷颗粒、纤维、晶须等增强的金属基复合材料, 由于其优异的耐磨性、高强度、低密度而显示出在摩擦磨损领域很好的应用前景。如在刹车盘、活塞等方面的应用, 目前已进入产品开发阶段^[2,3]。尽管如此, 上述两种不同

类型增强体(软质、硬质)增强的金属基复合材料在摩擦磨损性能上仍存在许多问题。在 Gr-金属基复合材料中, 由于 Gr 对基体机械性能的有害作用, 复合材料的许用工作条件范围在很大程度上受到 Gr 含量的限制。而硬质陶瓷增强金属基复合材料对偶件的磨损较大, 系统的摩擦系数较高。为此, W. Ames 等曾研究了软、硬两种增强体同时增强的混

收稿日期: 1998-07-27; 收修改稿日期: 1998-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59771013)

作者介绍: 卢德宏(1968), 男, 工学博士, 讲师, 主要从事复合材料制备工艺及摩擦学方面的研究

杂金属基复合材料的磨损性能^[4]。结果表明, 混杂复合材料在高载荷下的磨损性能比单一 SiC 增强复合材料更优, 对偶件磨损也小得多。总的来说, 作为一种很有应用前景的新型摩擦磨损复合材料, 对其的研究报道太少。

为此, 本文中将研究 SiC 颗粒(SiC_P)、Gr 颗粒(Gr_P)单一增强 Al 基复合材料和 SiC_P、Gr_P混杂增强 Al 基复合材料的摩擦磨损性能, 重点研究混杂复合材料的摩擦磨损行为及 SiC_P、Gr_P在其中的作用。

1 实验方法

利用真空反压浸渍工艺制备复合材料^[5]。复合材料中基体采用工业纯铝 L4, SiC_P 的平均粒度为 10 μm, 石墨为粒状人造石墨, 平均粒度为 80 μm。其成分、硬度及弯曲强度(FS)见表 1。

表 1 复合材料成分及性能

Table 1 Composition and Properties of composites

Materials	vol%			HB /	FS /
	Gr	SiC _P	Al	kg · mm ⁻²	MPa
Gr _P /Al	9	0	91	37.7	
SiC _P /Al	0	20	80	63.6	
(Gr _P + SiC _P)/Al	9	20	71	59.0	161

摩擦磨损实验在 M PX-2000 型销盘式磨损试验机上进行^[6]。销试样材料为表 1 中各种材料。磨损实验参数: 滑动速度 0.6 m/s, 载荷从 10 N 到 120 N 之间变化, 磨损时间 20 min。磨损实验后用精度为 0.1 mg 的电光分析天平称量磨损失重, 并转换为体积磨损率。用扫描电镜(SEM)观察磨损表面形貌和亚表层组织, 用 X 射线能谱仪(EDX)和电子探针(EPMA)分析其成分。

2 实验结果

2.1 磨损试验结果

图 1 和图 2 分别表示上述各种材料磨损率和摩擦系数随载荷上升而变化的情况。图 1 右上角的小图是低载荷时复合材料磨损变化的放大图。由图 1, 混杂复合材料磨损率随载荷增加的变化分两个阶段。当载荷在 30 N 以下时, 混杂复合材料具有最低的磨损率, SiC_P/Al 磨损率居中, Gr_P/Al 最高。当载荷高于 30 N 后, Gr_P/Al 首先发生严重磨损。混杂复合材料磨损率随载荷升高而升高的速率比 SiC_P/Al 快, 在约 40 N 后它的磨损率开始高于 SiC_P/Al。

由图 2, 各类复合材料的摩擦系数高低顺序是: $\mu_{\text{SiC}_P/\text{Al}} > \mu_{\text{混杂}} (\mu_{\text{Gr}_P/\text{Al}})$ 。混杂复合材料摩擦系数随载荷变化分两个阶段, 分界点在 30 N。低于 30 N 时, $\mu_{\text{混杂}}$ 很低, 如在 10 N 时比 SiC_P/Al 下降了 55%, 但随载荷升高而升高; 高于 30 N 时, $\mu_{\text{混杂}}$ 稳定在 0.5 左右, 比 20 vol% SiC_P/Al 下降了约 25%。最后又在 90~120 N 之间显著下降, 达 0.44。此时, Gr_P/Al 发生严重磨损而破坏, 不能得到摩擦系数值, 所以复合材料的摩擦系数只有两个数据。SiC_P/Al 的摩擦系数在 10~30 N 之间都在 0.7 附近波动, 但在 90~120 N 间也有较大下降, 从 0.68 降到 0.59。

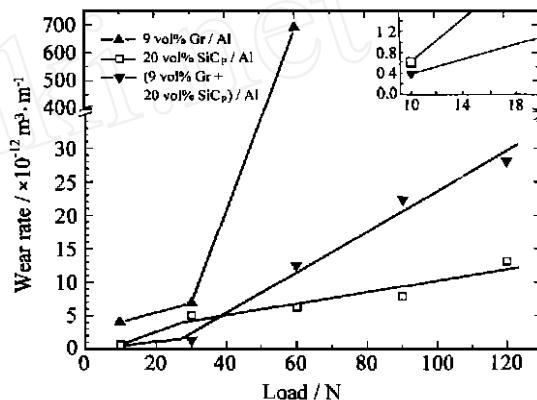


图 1 复合材料磨损率与载荷的关系

Fig. 1 Wear rate vs applied load diagram

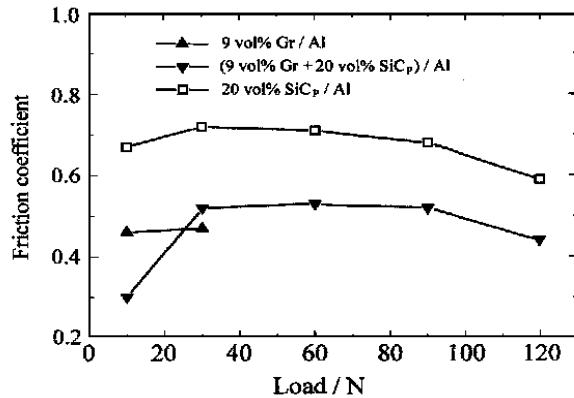


图 2 复合材料摩擦系数与载荷的关系

Fig. 2 Friction coefficient vs applied load diagram

2.2 偶件磨损

由图 3, 混杂复合材料对偶件的磨损一直稳定维持在较低的水平。而 SiC_P/Al 对偶件的磨损随载荷的增加而升高很快, 远高于混杂复合材料的情况。在 10 N 时, 二者对 45 钢的磨损相近, 而到 120 N 时, 二者相差 15 倍。

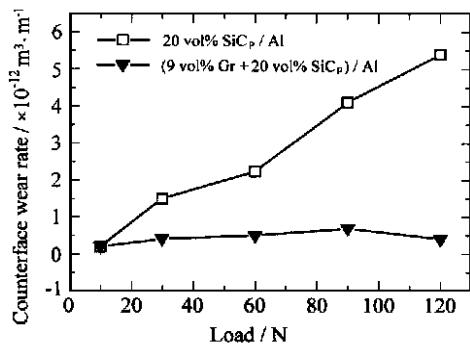


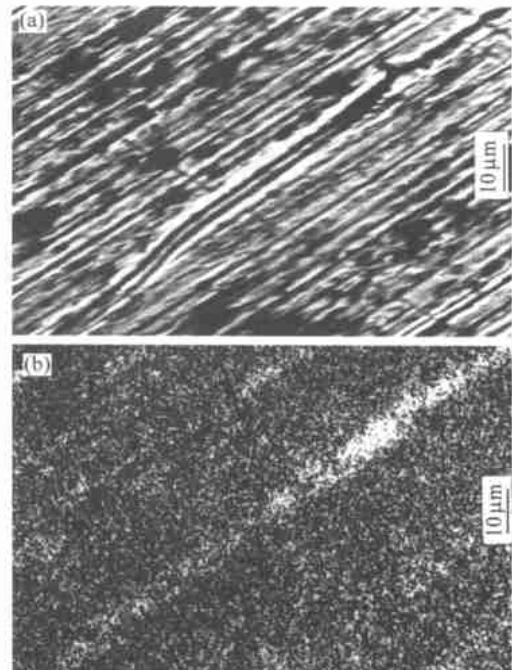
图3 45钢盘磨损率

Fig. 3 Wear rate vs applied load diagram for disks

2.3 磨损表面和亚表面形貌

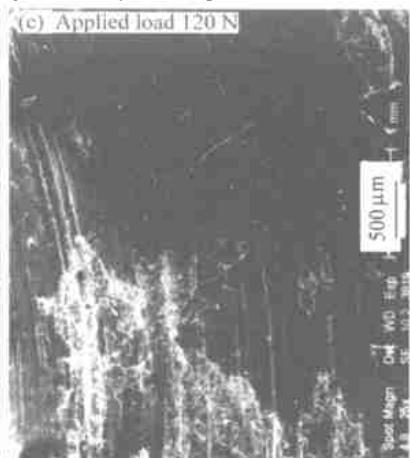
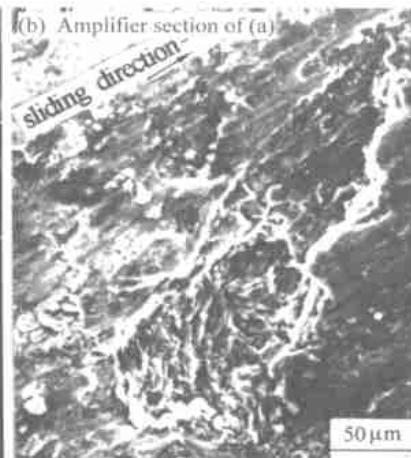
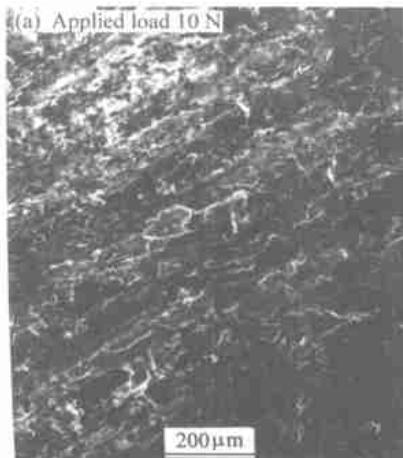
图4显示了(Gr_P+SiC_P)/Al混杂复合材料磨损的表面形貌。其中,图4(a)显示复合材料在10 N时的磨损表面形貌。可见,表面有轻微的磨槽,以及少量被粘着转移的痕迹-残留的小平台。图4(b)反映复合材料表面一颗Gr被偶件表面碾过,其上部已被转移走,表面凹陷。周围的基体由于偶件的刮擦而被优先磨掉。图4(c)是混杂复合材料在高载荷(120 N)下的表面形貌。可见,表面生成了一层黑色表面层,同时部分表面层剥落,形成面积较大的凹坑。试验时偶件盘表面覆盖了一层黑色的表面膜。图5(a)表明,在30 N载荷时,45钢偶件表面由非常细小($< 1\mu\text{m}$)的磨损沟槽组成。同时,有一些黑色颗粒分布在上面。波谱分析证明(图5(b)),在沟槽中存在碳,那些黑色颗粒也是碳。这些说明复合材料中石墨在摩擦过程中转移到了偶件表面。图6表明在30 N载荷时, SiC_P/Al的摩擦系统的表面磨损形貌。可见, SiC_P/Al表面受到偶件的严重犁铧,大部分表面

发生剥落。能谱分析表明,许多钢的磨粒对复合材料表面进行刮擦,进而被压入,在复合材料表面形成了富含铁的机械混合层。同时,钢偶件表面也被复合材料的转移物严重刮擦。图7是Gr_P/Al在30 N时的剖层。可见,由于基体的严重流变,亚表层Gr颗粒两端萌生尖端裂纹,并逐渐向表面延伸,最终露出表面。所以,此时Gr_P/Al复合材料表面剥落非常严重。



(a) Back scattered electron image
 (b) Corresponding X-ray map with CK α
 图5 30 N载荷下偶件的表面形貌及碳元素面扫描

Fig. 5 The worn surface of the counterpart against the hybrid composite at 30 N

图4 (Gr_P+SiC_P)/Al混杂复合材料磨损表面形貌Fig. 4 SEM of the worn surface of (Gr_P+SiC_P)/Al

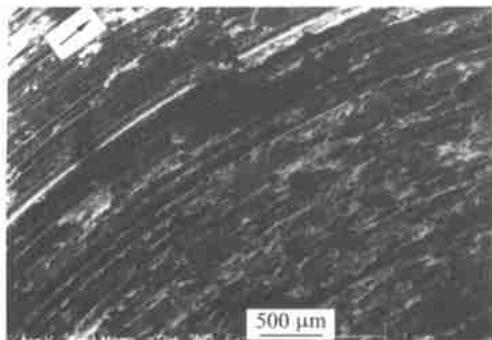
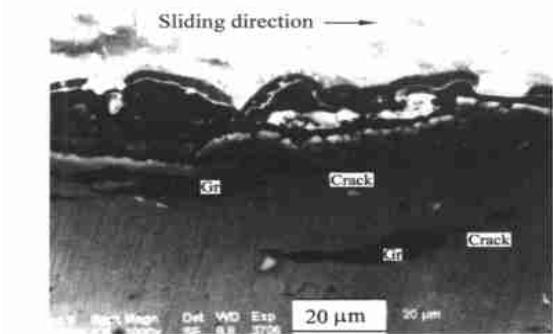
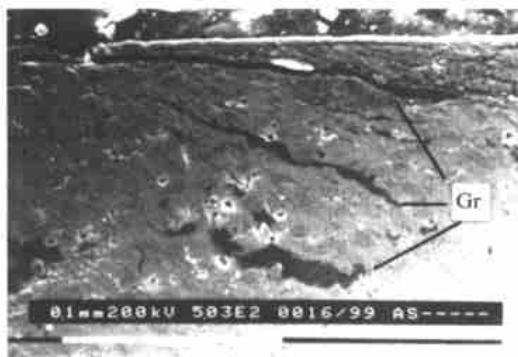
图 6 30 N 载荷下 SiC_P/Al 的表面形貌Fig. 6 Worn surface of SiC_P/Al at 30 N图 7 30 N 载荷时 Gr_P/Al 的亚表层Fig. 7 The cross-section of Gr_P/Al at 30 N

图 8 120 N 时混杂复合材料的剖面

Fig. 8 SEM of a cross-section of the hybrid composites at 120 N

图 8 是混杂复合材料在载荷为 120 N 时的剖面。可见, 在远离表面的组织中, 石墨颗粒为团块状, 而随着距表面越近, 石墨颗粒变得越细长且平行于表面, 即发生了形态和取向的改变。因此, 接近表层的变形了的石墨颗粒容易引发裂纹, 促进裂纹的扩展, 造成表层的成片脱落。

3 混杂复合材料的摩擦磨损机理

在低载荷时($< 30 \text{ N}$), 混杂复合材料中的石墨

颗粒铺展在磨损表面, 并转移到偶件表面(见图 5), 从而在对磨的两表面形成富含石墨的表面膜, 阻止了粘着和严重的犁削发生, 所以混杂复合材料的摩擦系数较低, 10 N 时为 0.3。这与两种单一增强复合材料的情况不同。对于 SiC_P/Al 的摩擦系统, 由于复合材料中 SiC_P 对偶件的刮擦和偶件微凸体对复合材料中基体的刮擦^[6, 7], 复合材料和偶件表面相互严重犁削(见图 6), 所以其摩擦系数是三种复合材料中最高的, 达 0.7。而对于 Gr_P/Al 的摩擦系统, 尽管与混杂复合材料含同样量的石墨, 但其摩擦系数稍高, 原因可能是 Gr_P/Al 表面的破坏消耗了更多的能量。

在低载荷下($< 40 \text{ N}$), 混杂复合材料的磨损是由于偶件钢对复合材料的轻微刮擦造成的, 尤其是石墨颗粒周围的基体容易优先去除(见图 4(a)、4(b))。由图 1 可知, 混杂复合材料的磨损率是三种复合材料中最低的。这有两方面的原因, 一是石墨的加入减小了摩擦力, 其在表面的富集阻止了粘着和严重刮擦的发生, 而未加入石墨的 SiC_P/Al 表面被严重刮擦, 导致磨损率的增加。二是 SiC 颗粒的加入提高了复合材料的硬度和流变强度^[8, 9], 减小了复合材料的塑性流变量, 减小了 Gr 颗粒对混杂复合材料强度的有害作用, 所以降低了磨损, 而未加入 SiC 颗粒的 Gr_P/Al 则由于石墨颗粒尖端引发基体裂纹而发生严重磨损(见图 7)。可见, 两种增强颗粒对混杂复合材料的摩擦磨损行为具有协同作用的效果。

混杂复合材料的摩擦系数随载荷增加而升高, 当载荷为 30 N 时, 上升到约 0.5。在 30~90 N 时稳定在 0.5 左右。摩擦系数的升高是由于两方面因素的作用。一是随载荷增大, 基体 Al 的塑性流动增大, 导致基体对表面石墨颗粒的覆盖作用, 从而减小了露出表面的石墨量, 减小了石墨的润滑作用^[1]。二是随载荷的增大, 基体塑性流动的加剧, 摩擦表面越来越平滑, 所以真实接触面积增加很快, 导致摩擦系数升高。当载荷达到 90~120 N 时, 摩擦系数又有较大下降。这是因为, 此时真实接触面积已经达到最大, 不再增加, 因而摩擦力不变, 而载荷持续增大, 导致摩擦系数降低。这种情况对 SiC_P/Al 摩擦系统也适用。

在高载荷($> 30 \text{ N}$)时, 混杂复合材料的主要磨损机理是剥层机制(见图 4(c))。根据 N. P. Suh^[10]的剥层理论, 发生剥层磨损时, 距表层几十微米的最表层位错密度低, 组织致密, 而更深的亚表层则位错

密度最大, 是微裂纹萌生之处。裂纹平行于表面和滑动方向扩展, 最终露出表面, 使表层呈片状剥落。而本实验中石墨是亚表层中微裂纹的发生源, 所以会促进复合材料磨损(图8)。对于 $\text{SiC}_\text{P}/\text{Al}$, 此时的主要磨损机制也为剥层机制^[11], 其中 SiC 颗粒引发了亚表层裂纹。而在相同的磨损机制下, 由于混杂复合材料中含两种颗粒, 它们都能引发亚表层裂纹, 而且石墨引发裂纹的趋势更大, 所以混杂复合材料的磨损率比 $\text{SiC}_\text{P}/\text{Al}$ 高。

与Ames^[4]的试验相比, 本文中发现了 SiC_P 和 Gr_P 两种增强相的协同增强效果, 以及混杂复合材料在摩擦性能方面的优势, 也证实了整体混杂复合材料摩擦系统较好的综合磨损性能。

4 结 论

(1) 在低载荷(30 N)时, SiC_P 和 Gr_P 能协调作用, 使混杂复合材料具有比单一 SiC_P 和 Gr_P 增强复合材料都低的摩擦系数和磨损率。

(2) 在较高载荷($30\sim 120\text{ N}$)时, 混杂复合材料磨损以剥层磨损机制为主, 其摩擦系数比单一 SiC_P 增强复合材料低, 其磨损率比单一 Gr_P 增强复合材料低得多, 比单一 SiC_P 增强复合材料高。

(3) 混杂复合材料对偶件的磨损比单一 SiC_P 增强复合材料低得多, 且随载荷升高变化不大。

参 考 文 献

- [1] Rohatgi P K, Ray S, Liu Y. Tribological properties of metal matrix-graphite particle composites [J]. *Inter Mater Rev*, 1992, 37(3): 129.
- [2] Sannino A P, Rack H J. Dry sliding wear of discontinuously reinforced aluminum composites: review and discussion [J]. *Wear*, 1995, 189: 1.
- [3] Noguchi M, Fukizawa K. Alternative materials-reduce weight in automobiles [Adv Mater Process], 1993, 143 (6): 20.
- [4] Ames W, Alpas A T. Wear mechanisms in hybrid composites of Gr-20% SiC in A 356 aluminum alloy [J]. *Metal and Mater Trans*, 1995, 26A: 85.
- [5] 卢德宏, 陈仕明, 金燕萍, 等. 混杂复合材料的制备和摩擦磨损性能 [J]. 材料工程, 1998, 180(5): 37.
- [6] Lu Dehong, Gu Mingyuan, Shi Zhongliang. Materials transfer and formation of mechanically mixed layer in dry sliding of metal matrix composites against steel [J]. *Tribology Letters*, 1999, 6(1): 57.
- [7] You C P, Donlon W T, Boileau J M. In: Rohatgi P K, ed. *Tribology composite materials* [M]. Ohio: ASM, Materials Park, 1990: 157.
- [8] Pramila B N Bai, Ramasesh B S, Surappa M K. Dry sliding wear of A 356-Al-SiC_P composites [J]. *Wear*, 1992, 157(2): 295.
- [9] Martin A, Martinez M A, Lorca J L. Wear of Al-Si alloys and Al-Si/SiC composites at ambient and elevated temperatures [J]. *Scripta Metall*, 1993, 28: 207.
- [10] Venkataraman B, Sundararajan G. An overview of the delamination theory of wear [J]. *Acta Mater*, 1996, 44(2): 461.
- [11] Suh N P. The sliding wear behavior of Al-SiC particle composites—II. the characterization of subsurface deformation and correlation with wear behavior [J]. *Wear*, 1977, 44(5): 1.