

SiCp 与 Gr 混杂增强 Al 基复合材料的制备和摩擦磨损性能

Fabrication of the Hybrid Composites and their Friction and Wear Performance

卢德宏 陈仕明 金燕苹 施忠良 顾明元
(上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室)

Lu Dehong Chen Shiming Jin Yanping Shi Zhongliang Gu Mingyuan
(Shanghai Jiao Tong University)

[摘要] 利用真空压力浸渍工艺制备了 SiCp 增强和 SiCp、Gr (石墨) 混杂增强铝基复合材料, Gr 能降低复合材料的摩擦系数, 减少偶件的磨损, 但 Gr 的片状和针状外形对其耐磨性不利。

关键词 混杂复合材料 制备 石墨 摩擦磨损

[Abstract] Aluminium matrix composites which were reinforced with both SiC particles and flake graphites or by only SiC particles were fabricated by pressure infiltration casting and their friction and wear performance in dry sliding against steel were investigated. The hybrid composites containing SiCp and graphites showed its superior seizure resistance to matrix alloy and SiCp reinforced composites. In the tribosystem of the hybrid composites, the friction coefficient was lower, the counter-face wore less than that of SiCp reinforced composites due to graphites smearing on the sliding surface, but the wear rate of the hybrid composites was higher due to stress concentration, crack formation and propagation in matrix at the tip of flake graphities.

Keywords hybrid composites fabrication graphite friction and wear

1 前言

单一陶瓷颗粒增强金属基复合材料 (MMCs) 的耐磨性能优异, 但其摩擦系数较大, 对偶件的磨损严重^[1]。单一 Gr 颗粒增强金属基复合材料具有优异的减摩耐磨性能, 但其承载的能力有限。而同时加入两类增强相的混杂复合材料可望综合上述两类材料的优点, 克服其缺点, 从而得到更加优异的摩擦磨损性能^[8]。但是由于两种或多种不同性能增强混杂, 导致复合材料摩擦磨损行为的复杂, 目前对这种混杂复合材料的摩擦磨损性能研究还很少, 所以本文研究了 SiCp、Gr 混杂增强铝基复合材料的制备及其摩擦磨损性能, 并与基体金属材料、SiCp 增强复合材料的摩擦磨损性能进行了比较, 旨在分析硬相 SiCp 和软相 Gr 颗粒混杂后材料摩擦磨损过程中的一些现象, 为复合材料制备和性能控制提供实验依据。

2 实验方法

2.1 复合材料的制备

原料为鳞片状石墨, 平均粒度为 $80\mu\text{m}$, SiCp 平均粒度为 $7\mu\text{m}$, 添加剂粒度为 $80\mu\text{m}$ 。采用干法工艺制备预制件, 并在适当温度烘干。最后进行真空压力浸渍, 基体采用铝合金, 浸渍温度为 720°C , 压力为 8MPa 。制成的复合材料成分如表 1 所示。

表 1 复合材料组成

Table 1 Composition of MMCs

| | SiCp vol% | 添加剂 vol% | 石墨 vol% | 铝基体 |
|--------------|--------------|-------------|------------|--------------|
| 单一增强 复合材料 | 20 | 20 | 0 | Al0.8Si0.7Mg |
| 混杂增强 复合材料 | 20 | 14 | 6 | Al0.8Si0.7Mg |

2. 2 摩擦磨损实验

在 MPX-200 型销盘式磨损试验机上进行。销试样为试验材料, 直径为 6mm, 经过 T6 处理, 即 525 保温 30min, 水淬, 然后 160 保温 6h, 空冷。盘试样材料为 45 钢, 硬度为 HV180。销、盘试样都经过 W5 抛光膏抛光, 实验前后分别用丙酮、超声波清洗, 然后用精度为 0.1mg 的电光天平称量磨损失重。摩擦磨损实验分两部分: 先采用分段加载方法测量基体、SiCp 增强复合材料和混杂复合材料的咬合转变载荷^[2]。如果间隙时间为 5~6min, 对基体材料每次加载为 40N, 最后当销试样与盘咬合而引起异常噪音和振动时停止试验, 即得到咬合转变载为 10~20N, 对复合材料每次加载荷。然后对比研究上述材料在载荷 150N (5.30MPa) 和滑动速

度 $0.6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下的摩擦磨损行为, 磨损时间为 40min。对磨损后的销试样进行了剖切、镶嵌, 按标准金相试验制备方法制样。用 SEM 520 型电镜对试样磨损表面和剖面进行了观察和分析。

3 实验结果及讨论

3. 1 复合材料组织特征

SiCp 增强和 Gr、SiCp 混杂增强铝基复合材料的组织特征分别由图 1a、b 所示。可见, 复合材料中增强体 SiCp 和 Gr 分布比较均匀, 说明本实验的工艺可行。混杂复合材料中 Gr 呈片状, 甚至针状, 其平均长径比大约在 10 左右。

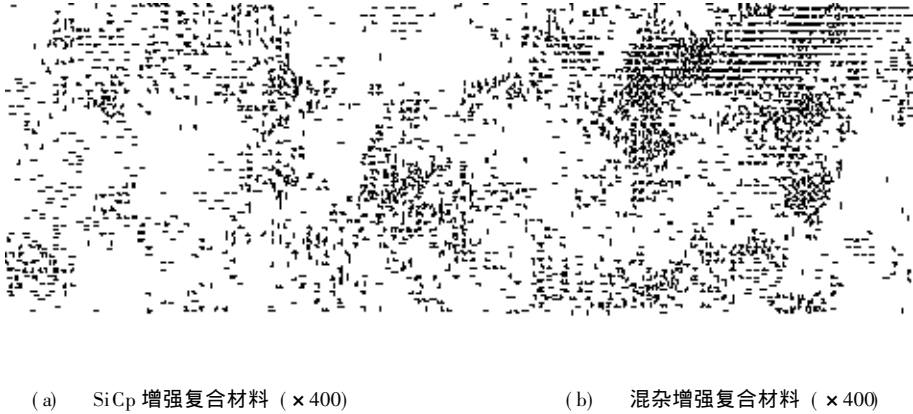


图 1 复合材料组织特征

Fig. 1 Microstructure of SiCp/ Al6061 (a) and (SiCp+ Gr) / Al composite (b)

3. 2 磨损实验结果

3. 2. 1 材料的咬合载荷

根据分段加载方法, 测出了材料的咬合载荷如表 2 所示。可见, 两种复合材料的咬合载荷都大大高于基体合金。尤其是混杂复合材料的为最高, 即其具有最高的抗咬合能力。

表 2 材料摩擦磨损实验结果

Table 2 The results of friction and wear test

| | 咬合载荷 N | 摩擦系数 | 试样磨损率, $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$ | 偶件磨损率, $\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$ |
|-------------|-----------|------|--|--|
| 铝基体合金 | 110 | | | |
| SiCp 增强复合材料 | 300 | 0.49 | 3.0×10^{-5} | 1.3×10^{-5} |
| 混杂增强复合材料 | 340 | 0.38 | 6.7×10^{-3} | 3.2×10^{-6} |

在较高载荷 (5.30MPa) 和 $0.6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度下, 基体合金与偶件已发生咬合, SiCp 增强和混杂增强复合材料的摩擦磨损实验结果也如表 2 所示。可见, 混杂增强复合材料磨损率比 SiCp 增强复合材料高一倍, 但其摩擦系数以及偶件的磨损却都比后者小许多。也就是说, 石墨的加入减小复合材料的摩擦系数, 也减小偶件的磨损, 提高了复合材料的抗咬合能力。石墨只起减摩作用而并不使材料更耐磨。对比两种材料试样磨损表面的组织形貌 (图 2), 发现两者有显著的差别, 混杂复合材料的磨损表面有两个特点: 一是表面非常平滑, 二是剥落坑明显更深, 更大。前者间接说明了石墨在混杂复合材料磨损表面形成了润滑膜, 使之更平滑^[2, 3]。后者说明混杂复合材料发生了明显的剥削磨损。而 SiCp 增强复合材料磨损表面明显的犁沟和少量小剥落坑。这差别是与实验数据相符的, 即混杂复合材料摩擦系数比 SiCp 增强复合材料低, 但磨损率比后者高。

3. 2. 2 两种复合材料的摩擦磨损对比

3.3 复合材料磨损表层组织特征

对试样剖面的显微分析可以进一步弄清两种复合

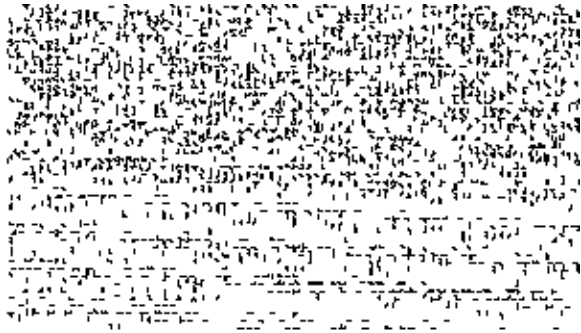


图2 复合材料磨损表面形貌 (SEM)

(a) SiCp 增强复合材料 (b) 混杂增强复合材料

Fig2 SEM of the worn surfaces of SiCp/Al6061 (a) and (SiCp+ Gr) / Al composite (b)

材料的摩擦磨损特征及石墨在复合材料中作用 (图3, 4)。图3a显示了混杂复合材料中一颗石墨正处于铺展

成膜过程中。这直接证明石墨减小复合材料摩擦系数的作用。图3b, c则表现了石墨片引发裂纹及其扩展的情况。可见, 石墨片尖端在远离磨损表面的本体组织中就开始萌生裂纹, 进而向亚表层扩展, 并最终在亚表层的一定深度处平行于表面形成长距离扩展, 或与表面裂纹连通。这证明石墨引发了混杂复合材料的剥层磨损机制。可见, 石墨在复合材料中同时起了两种相反的作用, 一是减少摩擦系数, 二是提高磨损率。而石墨引起复合材料耐磨性降低是与形态有关的, 因为石墨尖端应力集中效应引起了基体开裂。关于石墨形状对复合材料摩擦磨损性能的影响, 目前还没有定论。有人认为, 不论初始形态如何, 由于摩擦表面和亚表层中石墨都会变成片状, 其对材料摩擦磨损过程具有相同的影响, 所以石墨的初始形态与复合材料摩擦磨损性能没有关系^[4]。但是Okamoto等认为, 石墨的形态, 甚至取向都对复合材料摩擦磨损性能有影响^[5]。本实验的结果与此类似。而有关石墨形态对复合材料耐磨性的影响尚须进一步研究。图3中也可以见到复合材料疲劳破坏的征兆。但总体来看, 混杂复合材料是以剥层破坏机制为主。



图3 混杂增强复合材料磨损剖面形貌 (SEM)

(a) 石墨铺展 (b) 石墨引发裂纹及裂纹扩展 (c) 石墨引发裂纹 ((b) 的高倍)

Fig. 3 SEM of cross-section (parallel to the sliding direction and normal to the worn surface) of hybrid composites (a) smearing of a Gr particle (b) cracks at tips of Gr particles (c) magnitude of (b)

从图4b发现亚层表中SiCp与基体的界面发生了脱粘, 产生空穴。进一步由于显微缩颈效应发生空穴连通, 形成裂纹。在交变应力的作用下, 裂纹呈“之”字形路径向表面扩展。表层则被严重压溃。图4表明SiCp增强复合材料是以疲劳机制为主。

关于复合材料具有较高的抗咬合能力已有定论, 其原因是增强相的加入, 提高了复合材料的流变强度, 减小了表面金属的接触面积, 降低了接触表面温度^[6], 尤

其在含石墨的复合材料中, 石墨能在摩擦表面形成部分润滑膜, 隔开对磨金属, 又降低了摩擦表面温度^[7,8]。所以本实验中混杂复合材料咬合载荷最高。

总之, SiCp、Gr混杂增强铝基复合材料摩擦系数比SiCp增强复合材料低, 抗咬合性能好, 石墨加入复合材料中能起到一定减摩作用, 但是在本实验条件下, 石墨的片状和针状外形对复合材料磨损性能有害。

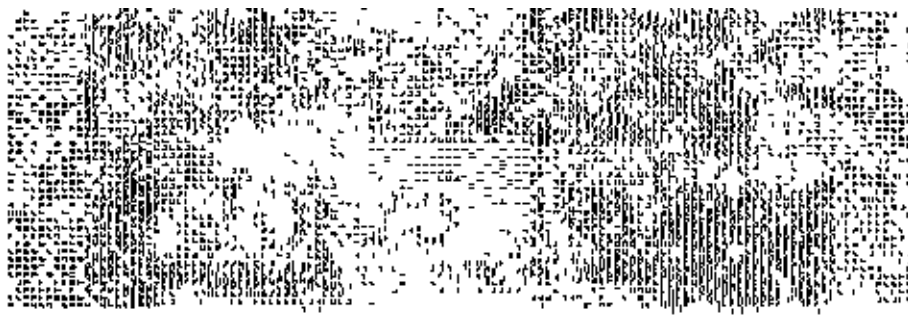


图4 SiCp增强复合材料磨损剖面形貌 (SEM)

(a) 表层疲劳破坏

(b) SiCp颗粒引发裂纹及裂纹扩展

Fig. 4 SEM of cross-section (parallel to the sliding direction and normal to the worn surface) of SiCp/Al6061 (a) fatigue of wear surface (b) cracks due to debond of SiCp at the SiC-Al interface

4 结论

(1) 利用真空压力浸渍工艺能够制备组织比较均匀的SiCp增强和SiCp、Gr混杂增强Al基复合材料。复合材料具有很高的抗咬合性能,尤其是混杂增强复合材料。

(2) 石墨对混杂复合材料有一定减小摩擦系数的作用,但石墨的片状和针状外形对耐磨性不利。

参考文献

- 1 L. M. Hutchings. Mater. Sci. Tech., 1994, 10: 513 ~ 515
- 2 Das, S. VPras and T. R. Ramacandam. Wear, 1989, 133: 173 ~ 187
- 3 S. Das, S. V. Prasad and T. R. Ramahandram. Matre. Sci. Eng. 1991, A 138: 123 ~ 132

(上接第36页)

[6] 的结果类似,发现编织角、轴向纱明显地影响模量和强度。随着编织角的增大,拉压模量和强度降低,编织角尤其是横向编织角影响泊松比;轴向纱能显著增加弹性模量和强度性能。并大大地减小泊松比。

参考文献

- 1 F. R. Phelam. Jr., Proceedings of the American Society for Composites, Seventh Technical Conference, 1992, 13-15 (10): 90 ~ 102
- 2 W. Michaeli, V. Hammes, L. Kirberg, R. Kotte, T. A. Osswald and O. Specker. Hanser Publishers, Munich, 1989.
- 3 M. V. Bruschke and S. G. Advani. ANTEC Technical Pa-

- 4 R. K. Rohatgi, R. Asthana and S. Das. Inter. Mater. Rev., 1986, 31 (3): 115 ~ 139
- 5 T. Okumoto, T. Sasaki and T. Hayada. J. Jpan. Foundry-mens, Soc., 1974, 46: 913
- 6 A. T. Alpsa and J. Zhang. Mater. Sciy. Eng., 1993, A 161: 273 ~ 284
- 7 P. K. Rohatgi, S. Pay, Y. Liu, Inter. Mater. Rev., 1992, 37 (3): 129 ~ 149
- 8 W. Ames and A. T. Alpsa, Metall. Mater. Trans., 1995, 26A: 85 ~ 98

收稿日期: 1997年10月13日

卢德宏,男,1968年10月生,博士研究生。现在上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室从事金属基复合材料制备及摩擦磨损性能方面的研究,200030。

pers, 1989, 1769.

- 4 杨桂,敖大新,万叔禹,刘述文. 复合材料进展. 航空工业出版社, 1994, 225 ~ 229
- 5 孙慧玉. 编织结构复合材料的力学性能预报和成型工艺研究, 南京航空航天大学博士学位论文. 1996, 23 ~ 25
- 6 Jenn-Ming Yang, Chang-Long Ma and Tsu-Wei Chou. Journal of Composite Materials, 1986, 20 (9): 472 ~ 484

收稿日期: 1997年7月25日

孙慧玉,男,1966年7月生,1996年毕业于南京航空航天大学,获博士学位,现在中国科技大学做博士后研究工作,主要从事编织结构复合材料的力学性能,非线性本构特性等方面工作。合肥(230026)中国科技大学力学和机械工程系