

文章编号: 1004-0609(1999)03-0458-07

Al₂O₃ 短纤维/SiC 颗粒混杂

增强铝合金复合材料^①

方 浩 张国定

(上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 研究了 Al₂O₃ 短纤维和 SiC 颗粒混杂增强铝合金复合材料在制动过程中的摩擦磨损性能。结果表明复合材料在制动过程中的摩擦系数较稳定, 磨损量较小, 与传统的制动材料铸铁相比, 复合材料的表面温升较低, 铸铁由于表面温升较高而产生了大量的裂纹。复合材料由于增强体的存在, 制动过程中表面易形成致密连续的转移膜, 该转移膜的出现保证了复合材料在制动过程中摩擦系数的稳定, 降低了复合材料的磨损量。与铸铁相比, 复合材料的密度较低, 更适用于作制动材料。

关键词: Al₂O₃ 短纤维; SiC 颗粒; 复合材料

中图分类号: TB331, TG146

文献标识码: A

关于铝基复合材料摩擦磨损性能的研究很多, 众多的研究者认为与基体相比, 复合材料表现了较好的耐磨性^[1~6]; 但有些研究者发现^[7~10], 在某些条件下, 铝基复合材料的耐磨性与基体相当。铝基复合材料的耐磨性与增强体的尺寸、形状、体积分数、基体与增强体的界面结合行为以及不同的工况条件等因素有关, 然而关于这些因素对复合材料耐磨性的影响也有不同的说法。由此可见, 复合材料由于增强体的存在, 使本身就复杂的摩擦磨损过程变得更为复杂, 往往某一条件的变化会导致完全不同的结果, 因此有必要针对某一具体的应用背景, 模拟实际工况来研究复合材料的摩擦磨损性能。目前所报道的研究结果绝大多数都是基于实验室的条件, 与实际应用尚有一定距离。鉴于上述情况, 本文以铝基复合材料在汽车制动系统中的应用为背景, 模拟短时反复制动的工况, 研究了铝基复合材料与汽车刹车材料对磨的摩擦磨损性能, 并与传统的刹车盘

材料——铸铁进行比较, 为铝基复合材料在汽车工业中的应用提供理论依据。

1 实验方法

1.1 实验材料

复合材料的基体为 LY12 和 LD31 两种合金, 这是两种不同性质的合金。其中 LY12 是硬铝中的典型合金, 该合金的强度高, 有一定的耐热性; LD31 合金属低合金化的 Al-Mg-Si 系高塑性合金, 具有中等强度, 冲击韧性高, 对缺口不敏感, 有极好的热塑性。这两种合金的化学成分列于表 1。

复合材料的增强体为 Al₂O₃ 短纤维和 SiC 颗粒, 颗粒尺寸为 20 μm。在前期研究^[11]的基础上, Al₂O₃ 短纤维和 SiC 颗粒的体积分数分别为 10% 和 20%, 总体积分数为 30%。为便于表达, 对复合材料进行编号, 见表 2。复合材料中增强体体积分数的选择主要依据复合材

① 上海市自然科学基金和中南工业大学粉末冶金国家重点实验室资助项目

收稿日期: 1998-06-23; 修回日期: 1998-11-04 方浩(1968-), 男, 博士研究生

表1 LY12 和 LD31 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of LY12 and LD31 alloy

	Cu	Mg	Mn	Ti	Zn	Fe	Si	Ni	Fe+ Ni	Cr	Impurity	Al
LY12	38~ 1.9	1.20~ 1.80	0.3~ 0.9	≤0.15	≤0.3	≤0.50	≤0.5	≤0.1	≤0.5	-	≤0.1	Balance
LD31	≤0.1	0.45~ 0.90	≤0.1	≤0.10	-	≤0.35	0.2~ 0.6	-	-	≤0.1	≤1.5	Balance

料的应用背景和制备工艺而定。本研究主要关系复合材料在制动系统中的应用,一般情况下汽车刹车盘的温度低于 300 °C,但在某些极端的情况下该温度可达 450 °C,因此提高刹车材料不咬合的最高工作温度显得尤为重要。文献 [12] 指出,复合材料中增强体的体积分数增加到 30%~ 35% 时,工作温度可提高 20 °C 左右,因此综合考虑,本研究增强体的体积分数选为 30%。

与复合材料对磨的刹车材料为中南工业大学粉末冶金研究所研制的刹车材料,主要成分如表 3 所示。

表2 各复合材料的代号

Table 2 Code name of composites

Material	Serial number
[Al ₂ O ₃ + SiC(20 μm)]/LY12	H20LY12
[Al ₂ O ₃ + SiC(20 μm)]/LD31	H20LD31

表3 刹车材料的化学成分

Table 3 Chemical compositions of brake material

Steel fibre	Chromite	Graphite dust	Friction powder	Phenolic resin
18%	20%	35%	7%	Balance

1.2 摩擦磨损实验

摩擦磨损实验在 MM-1000 磨损试验机上进行,将刹车材料、复合材料和铸铁制备成同样尺寸的圆环,外径为 75 mm,内径为 52 mm,厚为 13 mm 左右,接触形式如图 1 所示,在复合材料的摩擦表面的背面钻直径为 2 mm 的测温孔,孔的底部离摩擦表面的距离为 0.5 mm。每次制动前,刹车材料高速旋转,然后以一定

的载荷将复合材料压向刹车材料,直到刹车材料停止转动为止,并用计算机记录这一制动过程中摩擦系数、温升、扭矩、制动时间及制动速度等参数。复合材料在磨前磨后用丙酮超声清洗,并分别称取质量。在制动实验前,在载荷为 50 kPa,速度为 1000 r/min 的条件下预磨 3 min,再进行后续的制动实验。制动实验的工况如下:转动惯量为 25 N·cm·s²,先固定刹车材料的速度为 2000 r/min,制动载荷分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 MPa,然后固定制动载荷为 1.5 MPa,刹车材料的转速分别为 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 r/min,一对摩擦副在每一工况条件下制动 4 次,总共制动 40 次,每次制动开始前摩擦表面的温升不超过 50 °C。

用扫描电镜分析摩擦表面和次表面的形貌。

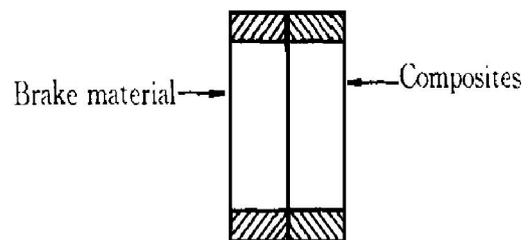


图1 复合材料与刹材料的接触形式

Fig. 1 Contact form of composites and brake material

2 实验结果

以 LD31 合金为基体的复合材料在速度为 4000 r/min,载荷为 150 N/cm² 时的制动记录曲线,如图 2 所示。由此可见在制动过程中,复合材料的摩擦系数变化平稳,没有出现较大的波动和衰退现象。

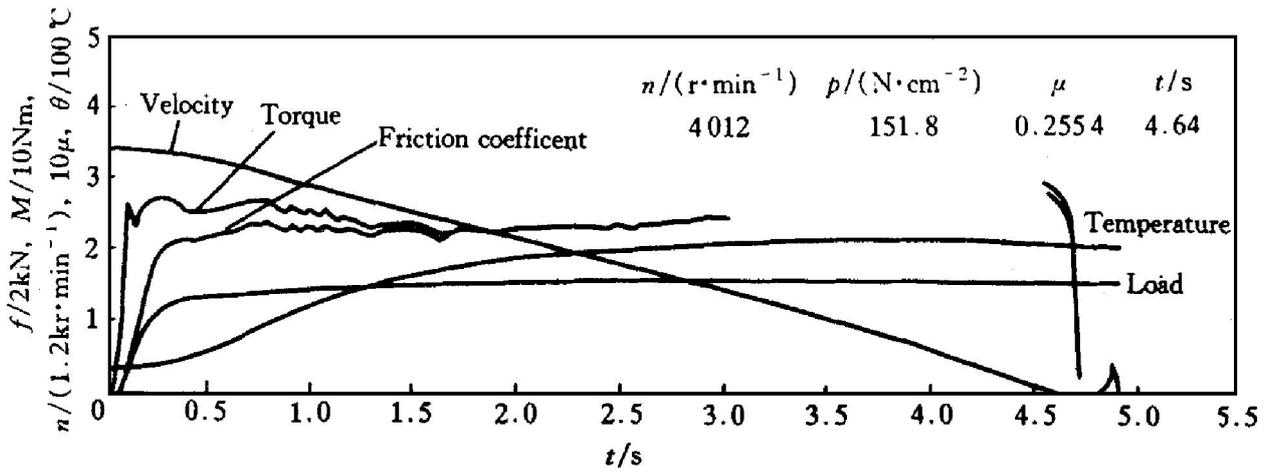


图2 H20LD31 复合材料在 1.5 MPa, 4000 r/min 时的制动曲线

Fig. 2 Braking curve of H20LD31 composites at condition of 1.5 MPa, 4000 r/min

复合材料、铸铁的摩擦系数随载荷、速度的变化情况分别如图 3, 4 所示。制动实验结束后, 材料的磨损量如图 5 所示。

表面温升高于复合材料的摩擦表面温升, 尤其是载荷速度越高, 这种差别越明显, 从这一点来看, 复合材料的优势较明显。

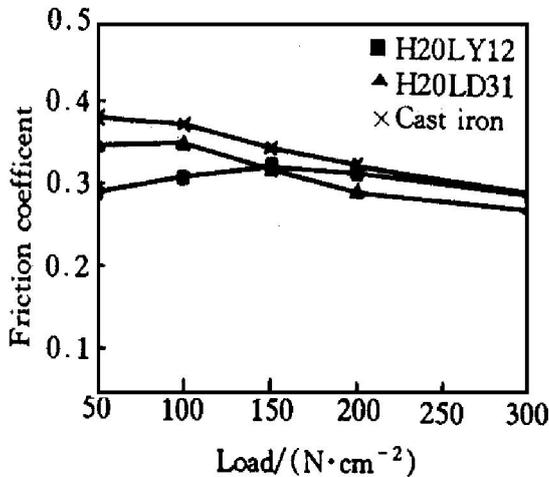


图3 材料的摩擦系数与载荷的关系

Fig. 3 Relationship between friction coefficient and load

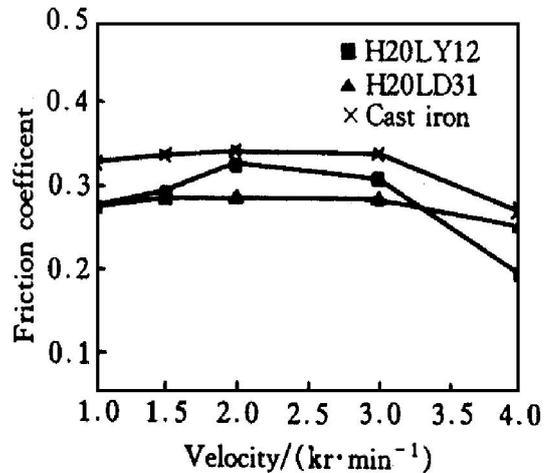


图4 材料的摩擦系数与制动速度的关系

Fig. 4 Relationship between friction coefficient and braking velocity

图 3, 4 表明在所有情况下, 铸铁的摩擦系数比复合材料的摩擦系数要略高一些。各材料的摩擦系数随载荷及速度变化的平稳性基本相当, 说明这几种材料的摩擦系数随载荷及速度的变化没有严重的衰退现象。图 5 表明基体为 LY12 的复合材料的磨损量与铸铁差不多, 基体为 LD31 的复合材料的磨损量比铸铁低一些。从实验结果看, 复合材料与铸铁相比, 由于复合材料重量轻, 存在着一定的优越性。图 6, 7 分别为材料的摩擦表面温升与速度和载荷的关系, 从中可以明显地看出, 铸铁的摩擦

3 分析与讨论

从实验结果来看, 铝基复合材料的摩擦系数随载荷、速度变化的平稳性较好, 磨损量和铸铁相当或略低一些。图 8, 9 分别是基体为 LY12 和基体为 LD31 的复合材料在制动实验结束后(制动 40 次)的磨损表面和次表面的形貌, 从中可以发现在磨损表面形成了转移膜。对转移膜表面进行能谱分析, 得出成分与刹车材料的成分基本一样。转移膜的出现是复合材

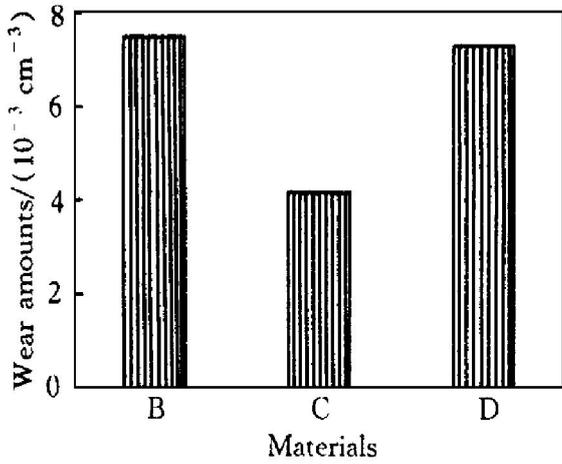


图5 材料的磨损量

Fig. 5 Wear amounts of materials

B—H20LY12; C—H20LD31; D—Cast iron

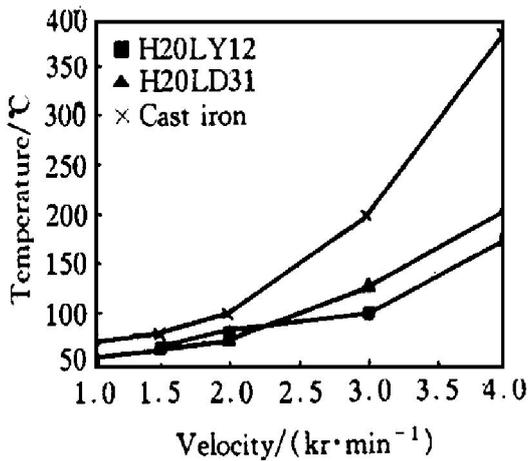


图6 材料的摩擦表面温升与制动速度的关系

Fig. 6 Relationship between temperature increase of wear surface and braking velocity

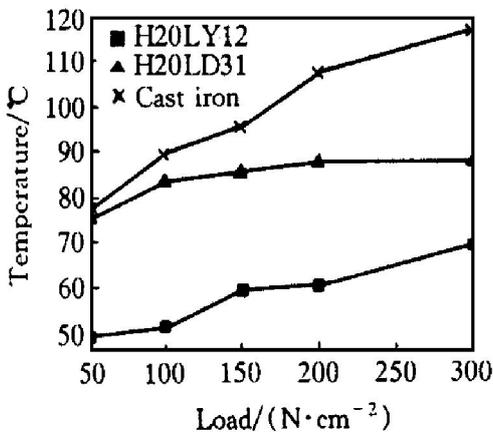


图7 材料的摩擦表面与载荷的关系

Fig. 7 Relationship between temperature increase of wear surface and load

料与刹车材料对磨时所表现出的最显著的特点, 这层膜的出现对制动过程中的摩擦系数的稳定和材料磨损量的大小起着至关重要的作用。

用。在汽车的制动系统中, 较理想的情况是制动副有足够而稳定的摩擦系数, 且磨损又小(衬片的磨损小且制动盘的表面损伤也小)。解决这一矛盾的最好方法, 就是利用在制动过程中在制动盘的摩擦表面形成致密连续的转移膜, 且该转移膜和制动盘的摩擦表面连接牢靠, 并能保持一定的摩擦系数, 而复合材料由于自身组织的特点, 较好地解决了这一问题。当复合材料刚开始制动时, 较软的基体首先被刹车材料中的硬质点磨去, 使增强体微凸于表面, 这种状况的出现极有利于转移膜的出现, 以至于在实验开始的预磨阶段, 在复合材料的摩擦表面就形成了均匀连续的转移膜, 并且随着制

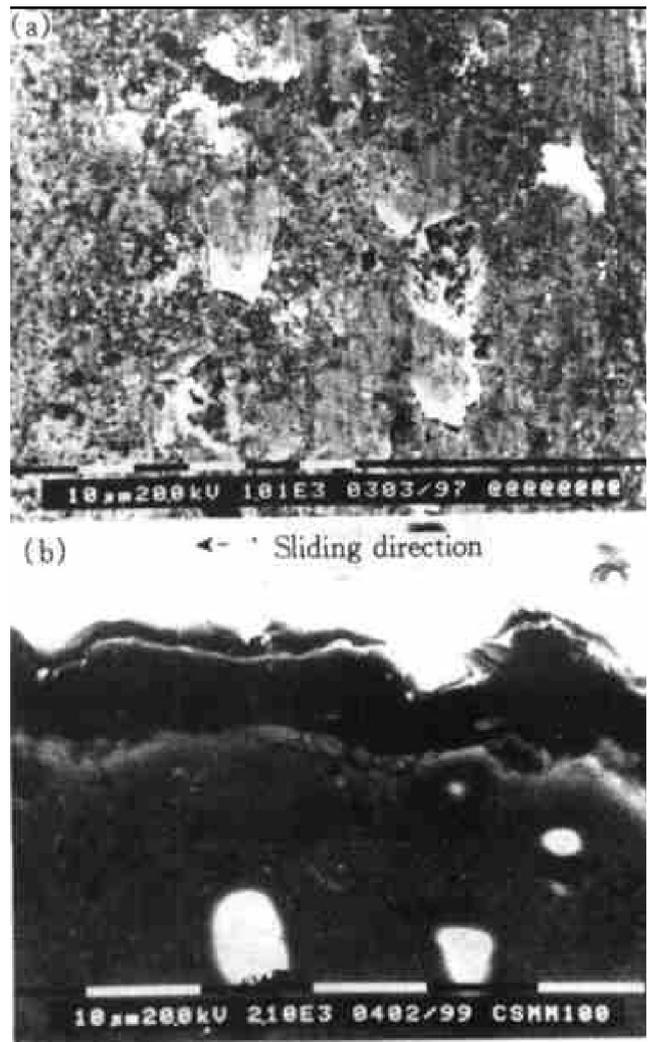


图8 基体为LY12的复合材料的表面及次表面磨损形貌

Fig. 8 Morphologies of wear surface and cross section perpendicular to wear surface of LY12 alloy matrix composites

(a) —Wear surface;

(b) —Cross section perpendicular to wear surface

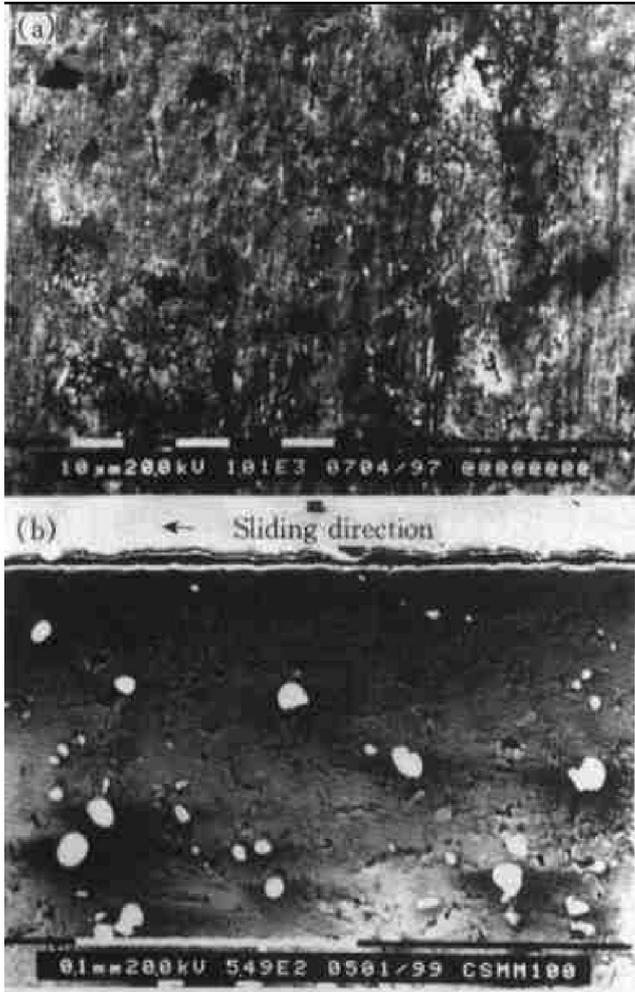


图9 基体为LD31的复合材料的表面及次表面磨损形貌

Fig. 9 Morphologies of wear surface and cross section perpendicular to wear surface of LD31 alloy matrix composites
(a) —Wear surface;
(b) —Cross section perpendicular to wear surface

动实验的进行, 转移膜更均匀。从图 8(b) 可见突出表面的颗粒和凹凸的表面, 使表面形成了均匀连续的致密膜, 从最初的制动开始到最终制动结束, 转移膜都一直存在, 且不易剥落, 说明转移膜与复合材料的表面结合牢固。这层膜的出现使复合材料在制动过程中表现了较稳定的摩擦系数, 该转移膜同时对复合材料的磨损起到保护作用。第一次制动时复合材料表面被磨去的磨屑绝大部分脱落, 而在随后的转移膜形成过程中, 本应即将脱落的磨屑却被转移膜固定住, 这种未脱落的磨屑反过来又使转移膜更易形成, 且更牢靠均匀。需指出的是转移膜的出现使复合材料的摩擦表面免于直接和对

磨材料的接触, 降低双方的直接磨损, 但不能阻碍次表面的裂纹扩展。作者对 10% Al₂O₃ 和 20% SiC(3.5 μm) 混杂增强 LD31 复合材料的研究发现, 由于制动载荷的不断作用, 次表面裂纹的扩展形成了两层剥落层(如图 10 所示), 但同样由于转移膜的保护作用, 使剥落层并未脱落, 这种未脱落的剥离层在随后的制动过程中, 能起到一定的承载作用, 防止更深一层地产生裂纹。对于未增强的铝合金来说, 由于铝合金的硬度及强度都较低, 磨损时和对磨材料相互切削粘着, 无法形成转移膜, 因而制动时, 无论是铝合金还是刹车材料都表现出了较大的破坏, 在制动实验时只制动了一次, 便无法进行下去。对于铸铁来说, 由于它不象复合材料那样有增强体起承载作用, 铸铁表面的磨损较光滑均匀, 因而转移膜的出现有一定的难度, 且结合不很牢固, 用手摸即可去掉。图 11 为铸铁的磨损表面和次表面磨损形貌, 可见该区域的转移膜不明显, 而且表面及次表面的裂纹较多。由于铸铁的导热性差, 制动时, 摩擦发热, 则铸铁的摩擦表面温升较高, 发生膨胀, 热膨胀的摩擦表面因受未膨胀的内部约束, 引起摩擦表面发生塑性变形, 当冷却时, 受热膨胀的摩擦表面要恢复原来的状态,



图10 [Al₂O₃ 短纤维+ SiC 颗粒(3.5 μm)]/LD31 复合材料的磨损横切面

Fig. 10 Cross section perpendicular to wear surface of [Al₂O₃ short fibre+ SiC particle (3.5 μm)]/LD31 composites



图 11 铸铁的磨损表面及次表面形貌

Fig. 11 Morphologies of wear surface and cross section perpendicular to wear surface of casting iron

(a) —Wear surface;

(b) —Cross section perpendicular to wear surface

使压缩塑性变形变为拉伸,从而使摩擦表面发生裂纹,其裂纹扩展后,可导致铸铁盘的破裂。这和实际应用铸铁盘的破坏形式一样,实际应用表明,铸铁盘的破坏并不是因为其磨损寿命的到期,而是由于热容量不足导致裂纹破坏^[12]。然而对于复合材料而言,因复合材料的导热性大大好于铸铁,使得复合材料从表面到内部温升较均匀,且表面温升较低,热裂倾向也就相应地较低。从这一点来看,金属基复合材料比铸铁有着明显的优越性。

铸铁由于其摩擦表面转移膜较薄且不均匀,再加上热裂纹的出现,因而在制动时其摩擦系数比复合材料略高。以 LD31 为基体的复合材料和以 LY12 为基体的复合材料相比,由

于 LD31 合金塑性较好,其表层易产生塑性流动,在制动过程能更快地产生转移膜,因而磨损量较低。相对来说更宜于用作制动材料。

4 结论

(1) 复合材料和铸铁在制动过程中都表现出了较好的制动性能,和铸铁相比,铝基复合材料的密度较低,更适合作制动盘材料。

(2) 复合材料的导热性比铸铁好得多,因而在制动过程中,摩擦表面的温升比铸铁低,且载荷速度越大,这种差别越大。较低的摩擦表面温升有效地降低了铝基复合材料及对磨材料的磨损。

(3) 复合材料由于增强体的存在,较易形成致密均匀的转移膜,该转移膜的出现能保证复合材料在制动过程中有较稳定的摩擦系数,且对材料的磨损有保护作用。

致谢

作者的模拟制动实验在中南工业大学粉末冶金研究所进行,期间得到中南工业大学黄伯云教授的大力支持,作者深表感谢。此外还得到中南工业大学粉末冶金研究所蔡叶博士后及其夫人钟艳女士的热心帮助,在此作者也深表感谢。

REFERENCES

- 1 Jiang J Q and Tang R S. *Wear*, 1996, 195: 106~111.
- 2 Manish Roy, Venkataraman B *et al.* *Metallurgical Transactions A*, 1992, 23A, 2833~ 2847.
- 3 Modi O P, Prasad B K *et al.* *Materials Science and Engineering A*, 1992, 151: 235~ 245.
- 4 Ma Z Y, Ling Y N *et al.* *Materials Science and Technology*, 1996, 12: 751~ 756.
- 5 Stefanos Skolianos. *Materials Science and Engineering*, 1993, 163A: 107~ 113.
- 6 Caracostas C A, Chiou W A *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1997, 28A: 491~ 502.

- 7 Perrin C and Rainforth W M. *Wear*, 1995, 181~183: 312~ 324.
- 8 Alpas A T and Zhang J. *Mater Sci Eng*, 1993, 161A: 273~ 284.
- 9 Alpas A T and Zhang J. *Wear*, 1992, 155: 83~ 104.
- 10 Lee C S, Kim Y H *et al.* *J Mater Sci*, 1992, 27: 792~ 800.
- 11 Fang Hao(方 浩) and Zhang Guoding(张国定). *Journal of Shanghai Jiang Tong University*, 1998, 2: 10~ 13.
- 12 John E Allison and Gerald S Cole. *JOM*, 1993: 19~ 24.

Al₂O₃ short fibre/ SiC particle hybrid reinforced aluminum alloy composites

Fang Hao, Zhang Guoding

*State Key Laboratory of Metal Matrix Composites,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, P. R. China*

Abstract: Tribological properties and wear resistance of Al₂O₃ short fibre and SiC particles hybrid reinforced aluminum alloys matrix composites during braking were studied. The results show that the friction coefficient of composites is steady, and the wear amounts are small. Compared with the traditional braking materials such as cast iron, the increase in temperature of composites surface is low due to its good thermal conductivity, a lot of cracks emerge on the surface of cast iron due to its poor thermal conductivity. Owing to the fact that the reinforcements exist in the composites, the continuous and compacted transfer layer is easy to be produced on the surface of composites, the transfer layer makes contribution to the stability of friction coefficient of composites, decreases the wear amounts of composites. Compared with the cast iron, the composites are more suited to be used as braking materials due to its low density.

Key words: Al₂O₃ short fibre; SiC particle; composites

(编辑 黄劲松)