

# 铸态铝基复合材料与半金属衬片摩擦副的干滑动摩擦磨损特性研究

金云学<sup>1</sup>, Jung-Moo Lee<sup>2</sup>, Suk-Bong Kang<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 江苏 镇江 212003;

2. Advanced Materials Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Changwon, 641-010, Korea)

**摘要:** 采用铸态 A356/SiC 复合材料与高速列车制动盘偶件半金属衬片材料摩擦副进行干摩擦磨损试验,并用扫描电子显微镜、X射线衍射仪和能谱仪等手段分析了复合材料的磨损机制.结果表明:复合材料表现出良好的磨损特性,在滑动速度 3.0 m/s 以下,载荷达到 600 N (12 MPa) 时的磨损量仍很小;复合材料的磨损率随  $pv$  (压力与速度的积) 值的增加而增大,摩擦系数则随  $pv$  值增加而小幅度减少;磨损过程中磨损表面很快形成以氧化物和以石墨为主的润滑膜,起到了减摩和耐磨作用.在  $pv$  值较低时复合材料的磨损机制为轻微的氧化磨损机制,随着  $pv$  值增加出现剥层磨损,在复合材料与半金属衬片间的接触表面,由于塑性流动挤出片状磨屑而使磨损量降低.

**关键词:** 复合材料; 半金属衬片; 干摩擦; 摩擦磨损性能

**中图分类号:** TH117.3; TF1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-0595 (2008) 03-0266-06

随着高速列车的不断发展及列车加速、制动性能的提高,要求列车轻量化<sup>[1]</sup>和制动盘的高性能化,而目前常用铁基制动盘材料在性能和轻量化方面很难满足要求,其最佳的解决方法是采用具有优异耐磨性、低密度、高导热系数及优良机械性能的陶瓷颗粒增强铝基复合材料<sup>[1,2]</sup>,相关研究已成为制动盘材料研究的热点,但尚未实现实用化,其主要原因为基础性性能研究存在不足.铝基复合材料的摩擦磨损特性与其偶件材料有关,多数研究者选用工具钢作为其偶件材料<sup>[3~5]</sup>,但因磨损量较大,不适合于实际应用.半金属衬片材料常用于制动盘闸片材料<sup>[6,7]</sup>,多数半金属衬片材料均以目前常用铁基(铸铁或钢)材料匹配而成,当与铝基复合材料组成摩擦副时其耐磨性并不佳,尽管齐海波等<sup>[8]</sup>研究发现,铝基复合材料与无石棉半金属衬片对摩时表现出优异的耐磨性及高而稳定的摩擦系数,但其选用韩国中速(150 km/h)列车半金属衬片与铝基复合材料对摩时,只有在低载荷下的磨损特性优于工具钢,而在高载荷下的磨损量反而增加<sup>[7]</sup>.另外,朱龙驹等<sup>[6]</sup>研制出与复合材料高速列车制动盘材料匹配的衬片材料.本文作者研究铸态 A356/SiC20Vol% 复合材料与特制半金属衬片材料摩擦副

的摩擦磨损特性,并探讨其磨损机制.

## 1 实验部分

### 1.1 试样制备及组织分析

试验所用复合材料为 MC21 公司提供的 A1/SiC 铸锭,增强相为 SiC,其尺寸为 20  $\mu\text{m}$ ,体积分数为 20%,基体合金选用 A356,其化学组成为 6.58% Si, 0.44% Mg, 0.39% Fe, 0.01% Cu, 0.01% Zn, 0.11% Ti 偶件材料采用外购某公司作为 A356/SiC 复合材料制动盘的衬片材料研制的半金属材料(其中含粘结剂、金属纤维、耐磨粉、润滑剂、充填料和橡胶粉等).

试验时采用 Nikon 光学显微镜和 JEOL5800 扫描电子显微镜(SEM)观察复合材料(销试样)的组织形貌,利用日本 Rigaku 公司产 X 射线衍射仪(XRD)测定复合材料的相组成,采用铜靶,电压为 40 kV,电流 30 mA,步长 2 ( $^{\circ}$ /min).采用日本 Akashi 公司产 HV-112 型维氏硬度计测量复合材料的显微硬度,每个试样测试 15 次取其平均值.

### 1.2 摩擦磨损试验

采用英国 Plint and Partners 公司产 TE/92 型销-盘式摩擦磨损试验装置进行干滑动摩擦磨损试验.

收稿日期: 2007-08-14; 修回日期: 2007-10-29 联系人金云学, e-mail: jinyunxue@126.com

作者简介: 金云学,男,1964年生,博士,教授,目前主要从事复合材料研究.

复合材料销试样尺寸为  $\phi 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ , 偶件盘尺寸为  $\phi 105 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ . 试验时, 销试样磨损表面采用金相砂纸研磨, 盘试样用磨床研磨. 为了使销试样的受力和磨损均匀, 将 2 个销试样同时对称装夹, 试验结果取 2 个试样的平均值. 试验开始选择滑动速度  $1.0 \text{ m/s}$ , 但即使载荷增至  $500 \text{ N}$  ( $9.9 \text{ MPa}$ ), 采用分析天平也检测不到其磨损量. 根据上述初步试验结果, 选择滑动速度为  $1.0 \sim 4.0 \text{ m/s}$ , 附加载荷为  $300 \sim 600 \text{ N}$  (约  $5.94 \sim 11.88 \text{ MPa}$ ), 滑动距离  $1500 \text{ m}$ . 试验过程中因附加载荷和速度较大, 产生大量的热量, 使试样温度变化很大, 为了尽量减少试样升温过高, 每次滑动距离控制在  $500 \text{ m}$  以内,  $1500 \text{ m}$  的滑动距离分 3 次进行. 试验后, 将试样浸入丙酮超声清

洗, 用精度  $0.1 \text{ mg}$  的分析天平检测磨损质量损失, 且测定每个试样密度, 用于计算体积磨损率  $W$ :

$$W = \frac{W}{vt} \times 1000 \quad (1)$$

式中:  $W$  为磨损质量损失 ( $\text{g}$ );  $v$  为滑动速度 ( $\text{m/s}$ );  $t$  为试验时间 ( $\text{s}$ );  $\rho$  为试样密度 ( $\text{g/cm}^3$ ).

采用 SEM 观察磨损表面及其磨损断面形貌, 用 XRD 测定复合材料磨损表面的相组成.

## 2 结果与分析

### 2.1 摩擦磨损特性

图 1 所示为铸态复合材料与半金属衬片摩擦副对摩时磨损率和摩擦系数随载荷变化的关系曲线.

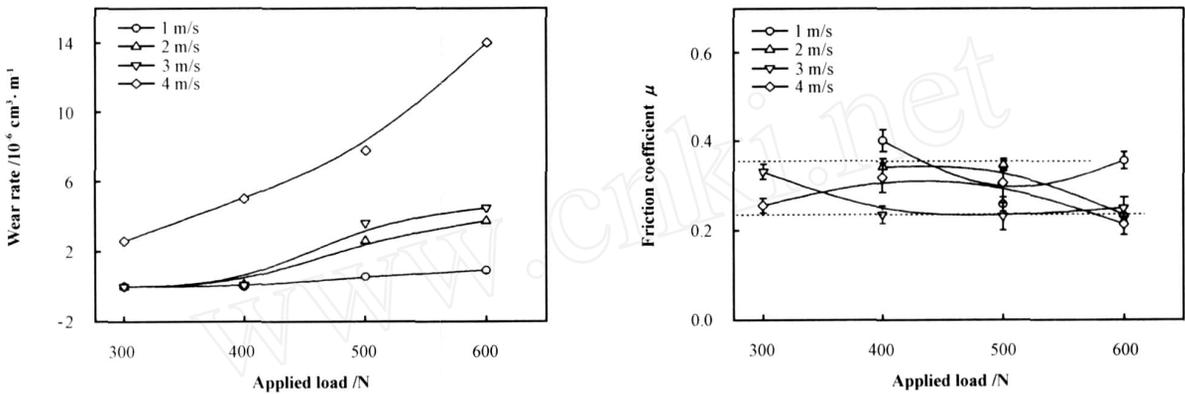


Fig 1 Variation of wear rate and friction coefficient of composites with load and sliding speed

图 1 复合材料的磨损率和摩擦系数随载荷和滑动速度变化的情况

可见磨损率随载荷的增加而增大, 但不同滑动速度下的增幅不同. 在低滑动速度 ( $1.0 \text{ m/s}$ ) 下, 即使达到  $600 \text{ N}$  的附加载荷, 其磨损量也检测不到, 表现出优异的磨损性; 在滑动速度处于中速 ( $2 \sim 3 \text{ m/s}$ ) 且载荷较高 ( $400 \text{ N}$  以上) 时开始出现磨损, 但磨损率非常有限, 载荷为  $600 \text{ N}$  时磨损率仅为  $(3.5 \sim 4.5) \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{m}$ , 当滑动速度处于高速 ( $4 \text{ m/s}$ ) 时, 磨损率随着载荷增加而迅速增大, 载荷达到  $600 \text{ N}$  时磨损率为  $14 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{m}$ , 比同一载荷中速 ( $2 \sim 3 \text{ m/s}$ ) 下的磨损率增加近 3 倍, 表明滑动速度和载荷的复合作用较明显. 图 2 所示为滑动速度与载荷的乘积 (以下简称  $pv$  值) 对磨损率的影响规律. 可见, 随着  $pv$  值增加, 磨损率可以拟合成指数规律增加的曲线 (图中点划线), 表明铝基复合材料不适用于高载荷高速场合.

由图 2 (b) 所示  $pv$  值与摩擦系数的关系曲线. 可见, 摩擦系数随着  $pv$  值的增加而降低, 即高载、高速区域的摩擦系数较低. 复合材料摩擦系数的减少

与 SiC 颗粒的“镶嵌”作用有关<sup>[8]</sup>. 当压力和速度较低时, 复合材料与偶件的接触表面主要由面心立方的  $\text{-Al}$  微突体组成, 其黏着系数较大, 随着载荷和速度增加, 复合材料接触表面形成润滑膜的同时, 由于塑性流动黏而使着系数更低的密排六方的 SiC 颗粒集中于磨损表面, 使其摩擦系数降低<sup>[8]</sup>.

本试验的摩擦系数结果与文献 [7] 的结果相近, 只是整个试验参数范围内的变化幅度稍大, 其差异可能是由于文献 [7] 中所选滑动速度及附加载荷范围较小所致. 这与文献 [8] 中的摩擦系数变化规律相近.

### 2.2 磨损表面形貌

图 3 所示为载荷  $500 \text{ N}$  下, 不同滑动速度时复合材料的磨损表面形貌变化情况. 可见, 复合材料的磨损表面被黑色膜覆盖且存在白色岛状区域. 滑动速度  $1 \text{ m/s}$  下的磨损表面磨痕较明显, 而由图 1 (a) 可知其磨损率很小, 出现这种结果的原因可能是因为磨损初期摩擦副两侧都容易发生黏着磨损, 而偶

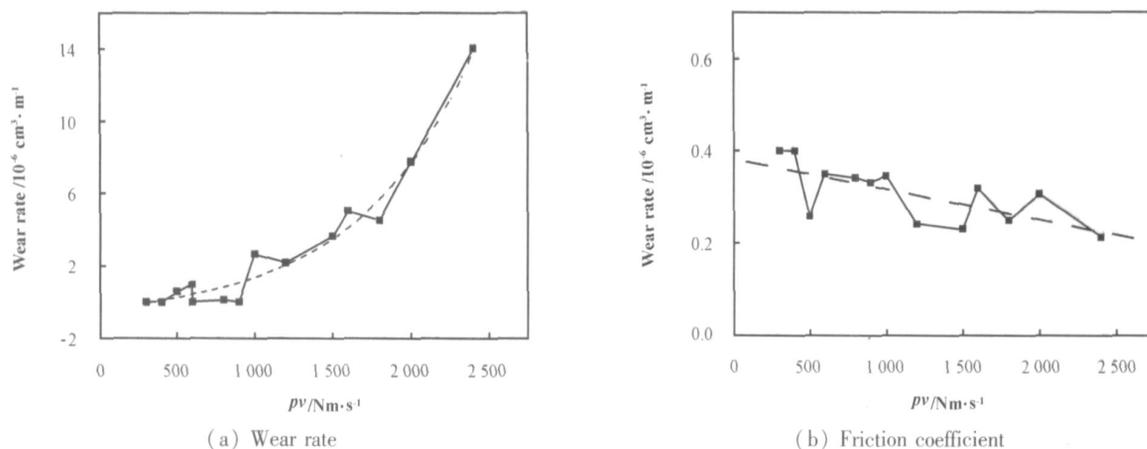


Fig 2 Relationship among wear rate, friction coefficient of composites, and the variation of  $pv$  value

图 2 复合材料的磨损率和摩擦系数随  $pv$  值变化的关系曲线

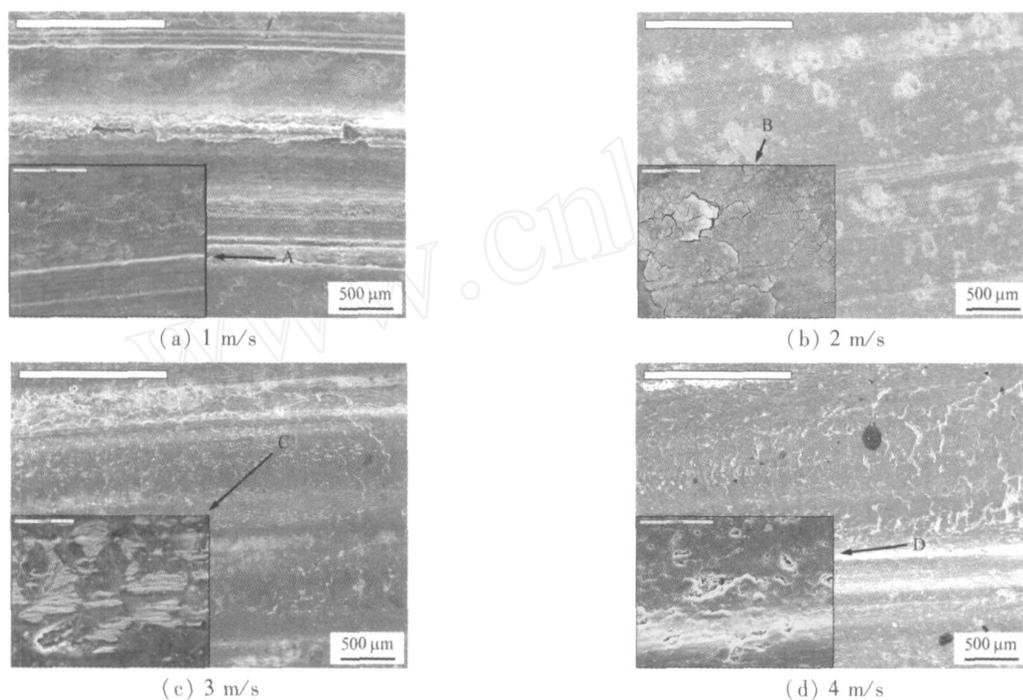


Fig 3 SEM morphology of worn surface with load increasing to 500 N

图 3 载荷 500 N 下的磨损表面形貌 SEM 照片

件上脱落的磨屑容易黏附到复合材料表面而形成表面膜,造成复合材料试样质量增加,抵消了复合材料本身黏着磨损引起的磨损量.从图 3 还可见,随着滑动速度变化,磨损表面形貌类似且均被黑色膜覆盖,并存在白色岛状物,因此其磨损机制相近.

图 4 所示为在 500 N, 3.0 m/s 条件下磨损表面形貌及其不同位置的 EDS 图谱.可见其黑色膜中存在 Fe、Ca、C 及 Cu 等元素 (B 点),而白色岛状物部分则主要由 Fe 组成 (A 点). B 点的基体金属元素 Al 的峰很强,而 A 点则用 EDS 几乎检测不到基体

合金中的 Al 和 Si 等元素,表明该区域白色覆盖层的厚度较大,使得电子束穿不透白色膜,白色膜为偶件材料的磨屑嵌入复合材料中所形成的.另外,黑色膜中存在的 C 也来自于偶件材料中的石墨,其在磨损过程中可以起到良好的润滑作用.

### 2.3 磨屑和磨损断面形貌

图 5 所示为不同载荷下的磨屑形貌 SEM 照片.可见,沿磨损方向被挤出而形成大片磨屑.随着载荷增加,磨屑增多,其形状和产生方式没有变化.但磨屑两侧形态完全不同,这与磨屑的形成过程有关.其

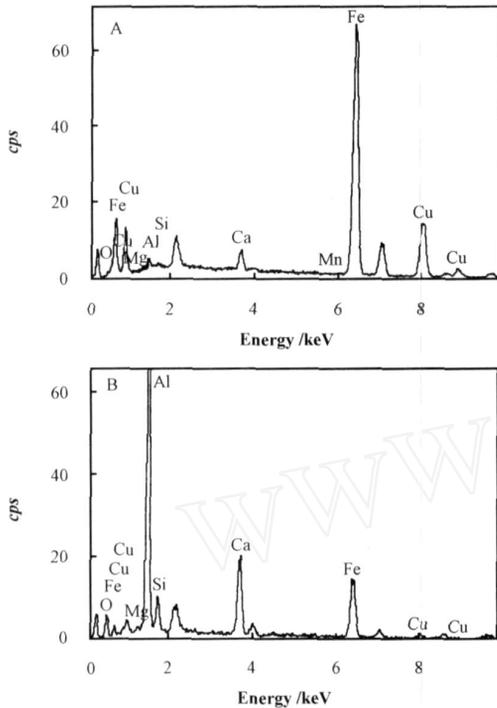
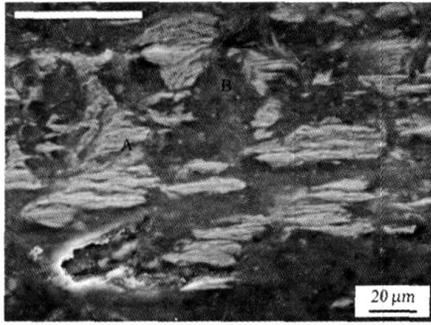


Fig 4 Worn surface and EDS in different positions (500 N, 3.0 m/s)

图 4 500 N, 3.0 m/s 下的磨损表面形貌及其不同位置的 EDS 图谱

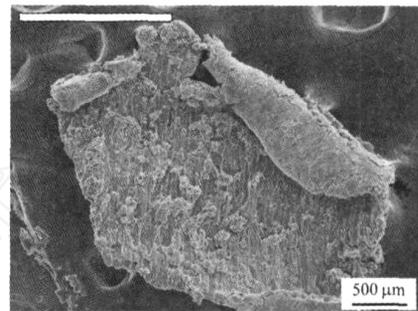
中光滑表面为与偶件材料接触的表面,完全保留着图 3 中的表面形貌及化学组成,而粗糙表面为新形成的背面,其形态与材料压缩试验时所形成的剪切表面类似,化学成分则与复合材料一致。

图 6 所示为不同载荷下的磨损断面形貌 SEM 照片。可见复合材料内层均存在裂纹(图中箭头)和 SiC 颗粒及白色混合物(图中白色箭头区域),对白色区域进行 EDS 分析发现含有大量 Fe、Cu 及 Ca 等偶件材料的元素,表明图 4 中的白色颗粒区域通过塑性流动进入材料内部而形成机械混合层(MML),图中的裂纹主要形成于 MML 中,且裂纹主要产生于 SiC 等颗粒与基体的界面[图 6(a)中箭头]。另外,因为磨屑形貌及其形成方式的特殊性,检测磨屑

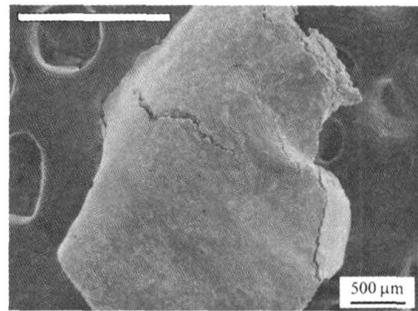
的厚度较难,但可以从磨损断面边缘的挤出层看出磨屑的厚度随载荷的增加而增大。从图 6 还可以看出,断面的机械混合层厚度比磨屑的厚度小,且其厚度不一定与载荷成正比,加上磨屑背面(粗糙面)的 EDS 分析可见,复合材料断面的塑性变形与塑性流动的界面不在机械混合层中,而是在更深层的复合材料内部。从机械混合层可见磨损过程中可能存在剥层磨损机制,但主要的磨损形式为接触表面以挤出方式形成的磨损。

### 2.4 磨损表面 XRD 分析

图 7 所示为在 500 N, 4 m/s 下复合材料磨损表面主要元素的 XRD 谱图。可见,磨损表面除了复合



(a) 300 N



(b) 500 N

Fig 5 Morphology of wear debris and load at 4.0 m/s

图 5 滑动速度 4.0 m/s 下的磨屑形貌 SEM 照片

材料的组成相 Al、Si 和 SiC 外,还存在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等氧化物,证明在磨损过程中还存在氧化磨损。磨损表面检出的各种氧化物存在于表面膜中,表面膜的润滑作用可能源于石墨与氧化物的共同作用。

### 3 结论

a 随着  $pv$  值增大,复合材料的磨损率呈指数规律增加,但总的磨损率较小,基本属于轻微磨损,摩擦系数则随  $pv$  值增加而有所降低,但幅度不大。

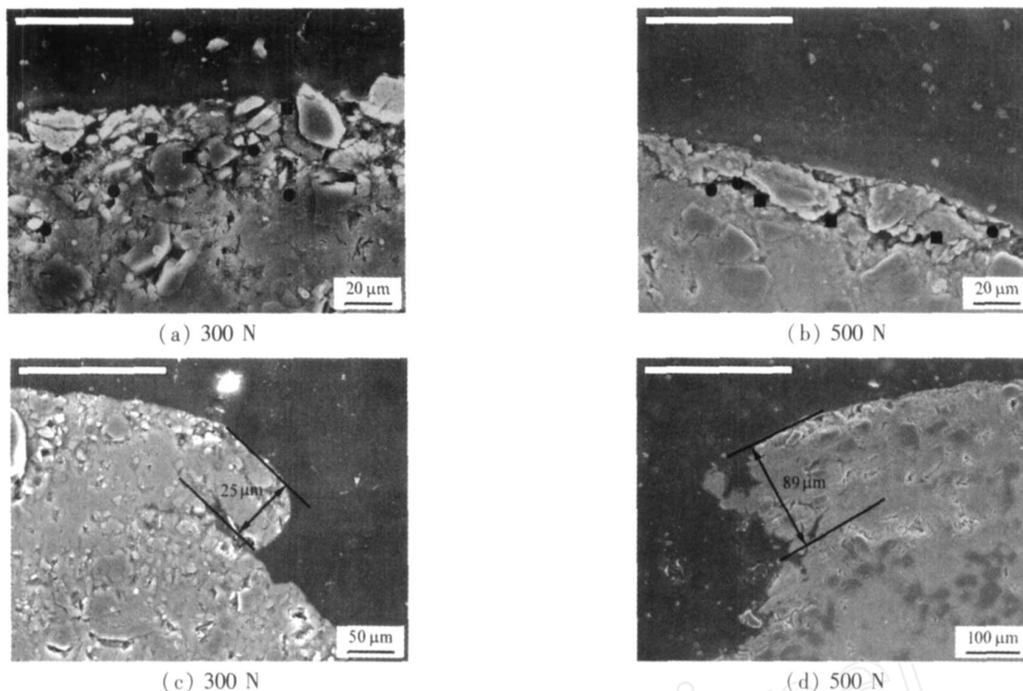


Fig 6 Cross-section SEM morphology of worn surface at 4.0 m/s

图 6 在 4.0 m/s 下的磨损断面形貌 SEM 照片

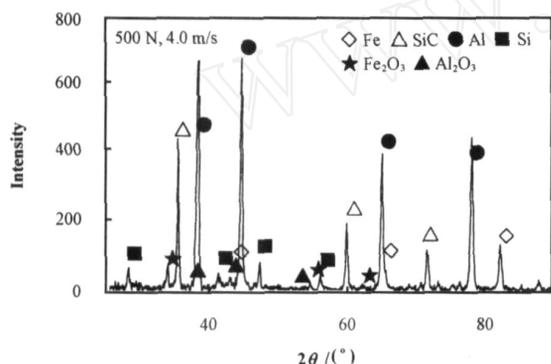


Fig 7 XRD analysis of worn surface

图 7 复合材料磨损表面主要元素的 XRD 图谱

b 复合材料磨损表面形成以石墨和氧化物为主的润滑膜,从而降低了其磨损量及摩擦系数,随着  $p_v$  值增加,润滑膜形成时间缩短。

c 在磨损过程中虽存在氧化磨损和机械混合层引起的剥层磨损,但其主要磨损机制为塑性变形和塑性流动引起挤出磨屑的磨损。

#### 参考文献:

- [1] 黄楠,刘世楷.我国高速列车制动摩擦材料的发展方向[J].铁道车辆.1993,(9):29-31.  
Huang N, Liu S K. Development direction of braking friction materials for high-speed trains in China[J]. Rolling Stock, 1993, (9): 29-31.

- [2] 宋宝韞,高飞,陈吉光,等.高速列车制动盘材料的研究进展[J].中国铁道科学,2004,25(4):11-18.  
Song B Y, Gao F, Chen J G, *et al* Development of materials for high speed train brake discs[J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 11-18
- [3] Manchang Gui, Suk Bong Kang, Jungnoo Lee. Dry sliding wear behavior of spray deposited AlCuMn alloy and AlCuMn/SiCp composite[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35: 4 749-4 762.
- [4] Manchang Gui, Suk Bong Kang, Jungnoo Lee. Influence of porosity on dry sliding wear behavior in spray deposited Al-6CuMn/SiCp composite [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A293: 146-156
- [5] 张永振,邱明,上官宝,等.高速干摩擦条件下铝基复合材料的摩擦磨损行为研究[J].摩擦学学报.2005,25(4):343-347.  
Zhang Y Z, Qiu M, Shang GB, *et al* Friction and wear behavior of the materials under very high sliding velocity [J]. Tribology, 2005, 25(4): 343-347.
- [6] 朱龙驹,陈喜红,齐斌,等.高速列车铝基复合材料制动盘及其闸片的研制[J].电力机车与城轨车辆,2006,29(1):1-5.  
Zhu L J, Chen X H, Qi B, *et al* Fabrication of aluminium composite brake discs and pads for high speed train[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2006, 29(1): 1-5.
- [7] Jin Y X, Jung-Moo Lee, Suk Bong Kang. Dry sliding wear properties of A356/SiCp composites against organic pad [J]. Kor Inst Met and Mater, 2007, 45(4): 258-267.
- [8] 齐海波,丁占来,樊云昌,等. SiC 颗粒增强铝基复合材料制动盘的研究[J].复合材料学报,2001,18(1):62-66.  
Qi H B, Ding Z L, Fan Y C, *et al* Research on automotive brake

## Dry Slide Friction Wear Characteristics of As-cast Aluminum matrix Composite against Semimetallic Pad

JIN Yun-xue<sup>1</sup>, Jung-Moo Lee<sup>2</sup>, Suk-Bong Kang<sup>2</sup>

(1. Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology,

Zhenjiang 212003, China;

2. Advanced Materials Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Changwon 641-010, Korea)

**Abstract:** Dry sliding experiment was carried out to evaluate the tribological behavior of as-cast A356/SiC composite against semimetallic pad, which is used as brake disc couple materials for high speed train. The wear mechanisms of the composite were analyzed by means of SEM, XRD and EDS. The as-cast A356/SiC composite exhibited good wear resistance. With sliding speed less than 3.0 m/s, even under high load of 600 N or 12 MPa, the composite kept high wear resistance. With increasing  $pv$  value, wear rate increased and friction coefficient decreased. During wear process, lubricating film was quickly formed on the worn surface, mainly composed of oxide and graphite. With the help of lubricating film, both wear rate and friction coefficient reduced. At small  $pv$  value, the worn surface was characterized with mild oxidative wear. Although delamination was occurred when  $pv$  value increased, wear was mainly related to the extruded debris due to plastic flow on the interface between composite and semimetallic pad.

**Key words:** composite, semimetallic pad, dry friction, friction and wear behavior

**Author:** JIN Yun-xue, male, born in 1964, Ph.D., Professor, e-mail: jinyunxue@126.com