

无压浸渗 SiC_p/Al 复合材料干摩擦磨损性能研究

吕一中^{1,2}, 王宝顺^{1,3}, 崔岩³, 赵会友¹, 曲敬信¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电学院, 北京 100083 2 北京工业职业技术学院, 北京 100042 3. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 采用无压浸渗法制备了不同 SiC 颗粒体积分数以及不同 SiC 颗粒粒度的 Al 基复合材料。以硬质合金 (80% WC + 20% Co) 为对摩试样进行了干摩擦试验, 研究了颗粒体积分数 (15%, 25%, 35%, 45%, 55%)、颗粒粒度 (110 μm , 63 μm , 45 μm) 以及载荷 (196N, 392N) 对 SiC_p/Al 复合材料干摩擦磨损性能的影响。采用 SEM 和 EDS 分析了铝合金基体、复合材料的磨损表面及磨损机理。研究结果表明, 颗粒体积分数在 15% ~ 35% 之间时, 复合材料的耐磨性明显优于铝合金基体。载荷为 196N 时, 铝合金的磨损率是 15%, 25%, 35% SiC_p (110 μm) Al 复合材料的 2.16, 2.76, 2.07 倍。 SiC_p/Al 复合材料的磨损率随着颗粒粒度的增加、载荷的减小而降低。 SiC 颗粒的体积分数对铝基复合材料的磨损率和磨损机制有显著影响: SiC 颗粒体积分数存在一个最佳值 (25%), 此时复合材料的磨损率最小, 耐磨性能最好。当体积分数小于 25% 时, 复合材料磨损率随着体积分数的增加而下降, 磨损机制以磨粒磨损为主, 而当体积分数大于 25% 时, 复合材料磨损率随着体积分数的增加而上升, 磨损机制以表层剥落磨损为主, 同时伴有磨粒磨损。

关键词: 无压浸渗; SiC_p/Al 复合材料; 摩擦磨损; 硬质合金

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2007)05-0053-05

由于硬质颗粒的加入, SiC 颗粒增强铝基复合材料表现出优良的耐磨性^[1-3], 在一些耐磨工程领域 (如汽车驱动轴、气缸套、发动机活塞、刹车盘等) 首先得到了应用^[4-6]。然而, SiC_p/Al 复合材料摩擦磨损是一个十分复杂的过程, 影响因素众多 (颗粒尺寸、颗粒含量、外加载荷、对摩材料等)。因此近几十年来有不少人对它的摩擦磨损行为进行过研究。如 Apas^[1] 等人研究了颗粒体分为 10~20% 的 SiC_p/Al 356 复合材料摩擦磨损行为, 结果发现载荷对复合材料磨损率的影响呈现三阶段规律, 即: 低载荷阶段 (< 10N), 复合材料的磨损率比基体合金低一个数量级, 复合材料表现出良好的耐磨性。中载荷阶段 (10N ~ 95N), 复合材料与基体合金的磨损率接近, SiC 颗粒的加入并没有显著提高复合材料的耐磨性。高载荷阶段 (> 95N), 基体合金磨损率迅速从 $7.4 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$ 上升到 $6.0 \times 10^4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$, 而复合材料在载荷大于 150N 时磨损率才发生突变, 复合材料耐磨性优于基体合金。Ma^[2] 等人的研究结果表明: 当 SiC 颗粒尺寸从 3.5 μm 增加到 20 μm

时, 复合材料的耐磨性能得到提高, 这与 Rubaie^[7] 等人的研究结果是一致的。Venkataraman^[8] 等人研究了颗粒体积分数 (10%, 20%, 30%, 40%) 对复合材料磨损性能的影响, 结果表明, 复合材料的磨损率随着颗粒体积分数的上升而下降, Ma^[2] 等人也得到了类似的结果。而 Sahin^[9] 等人的研究结果表明, SiC 颗粒体积分数为 10% 时, 复合材料的磨损率最小。当颗粒体积分数继续增加时, 复合材料的磨损率几乎不变, 即颗粒体积分数几乎不再继续影响复合材料的耐磨性。

尽管有不少人对 SiC_p/Al 复合材料的摩擦磨损行为进行过研究, 但是有关高载荷、大尺寸颗粒, 尤其是中、高体分 SiC_p/Al 复合材料摩擦磨损行为的研究较少、报道不多^[10]。本工作系统研究了低、中、高体分 SiC_p/Al 复合材料摩擦磨损行为, 同时研究了大尺寸的 SiC 颗粒以及高载荷对复合材料摩擦磨损行为的影响。

1 实验部分

本实验采用无压浸渗法制备了三种不同粒度、体积分数可控的颗粒增强 SiC_p/Al 复合材料。 SiC 颗粒平均尺寸分别为 110 μm , 63 μm , 45 μm , SiC 颗粒

收稿日期: 2006-12-18; 修订日期: 2007-05-08

作者简介: 吕一中 (1961-), 男, 博士研究生, 教授, (E-mail) lyz1030@sohu.com.

体积分数分别为 15%、25%、35%、45%、55%，基体合金为 A1SiMg 合金。

在 M-200 型摩擦磨损试验机上进行了环-块式干摩擦磨损实验，磨损试样为 SiC_p/A1 复合材料块，尺寸为 12 mm × 10 mm × 10 mm，对摩试样为硬质合金 (80% WC + 20% Co)，尺寸为带 φ16 mm 内孔的 φ45 mm × 10 mm 圆环，硬度为 HRA 83。试验参数：转速 200 r/min，载荷 196 N 和 392 N，摩擦时间 10 min。实验前后均用丙酮超声清洗块试样十分钟后烘干，用 0.1 mg 的电子天平称重，磨损前后的质量差为磨损量，并换算成体积磨损量，磨损率为单位距离的体积磨损量。每种实验条件下至少重复试验四次，结果取平均值。

采用 HBRVU-187.5 型布洛维光学硬度计，对颗粒体积分数不同的 SiC_p/A1 复合材料进行了维氏硬度测试，载荷为 306 N，保压时间为 30 s。用 HITACHI LS3500 型扫描电子显微镜和 Oxford IE250 型能谱仪进行了显微组织、磨损表面、磨屑形貌和化学成分分析。

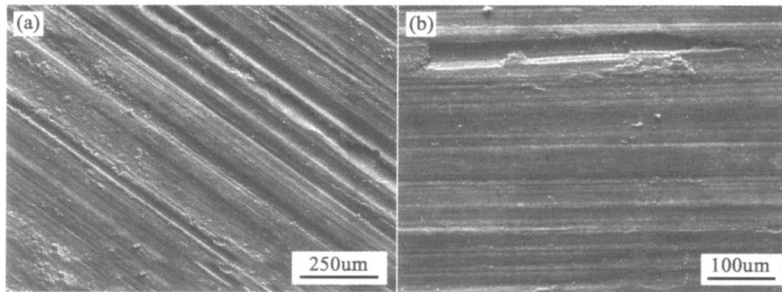


图 2 SiC_p/A1 复合材料磨损表面形貌 SEM 图

Fig. 2 SEM photographs of worn surface of SiC_p/A1 composites

(a) 45 μm SiC; (b) 110 μm SiC

数一定时，随着 SiC 颗粒尺寸的增加，复合材料的磨损率逐渐降低。载荷为 392 N 时，也得到了类似的曲线。从复合材料磨损表面 (图 2) 可以看出，小颗粒 (45 μm) 增强的复合材料磨损表面上存在着连续、较深的犁沟，而大颗粒 (110 μm) 增强的复合材料磨损表面上分布的犁沟较浅。由于对摩圆环表面分布着大量的微凸体，这些微凸体容易刺入基体合金表面，并在切向作用力下对其产生微观切削作用，因而铝合金的磨损率较高。复合材料中由于 SiC 颗粒的加入，其抵抗微观切削的能力得到提高，因此复合材料的耐磨性要高于基体合金。但是由于小颗粒嵌于基体中的深度较浅，在对摩材料表面微凸体的犁削作用下容易从基体合金中脱落，掉入摩擦副之间并形成三体磨料磨损，因此小颗粒对基体的保护

2 结果与讨论

2.1 颗粒粒度对 SiC_p/A1 复合材料摩擦磨损性能的影响

图 1 是载荷为 196 N 时，SiC_p/A1 复合材料磨损率随颗粒粒度变化的曲线，由图可知：当颗粒体积分

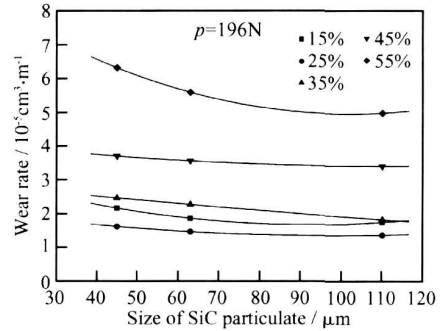


图 1 SiC_p/A1 复合材料磨损率与 SiC 颗粒粒度关系图

Fig. 1 Wear rate of SiC_p/A1 composites vs. size of SiC particulate

作用有限。随着 SiC 颗粒粒度的增加，颗粒镶嵌在基体中的深度增加，颗粒对基体的保护作用以及抵抗微观切削的能力增强，从而使得复合材料的磨损率降低，耐磨性得到提高^[11]。因此在本研究粒度范围内，颗粒越大越有利于复合材料耐磨性能的提高。

2.2 颗粒体积分数对 SiC_p/A1 复合材料摩擦磨损性能的影响

图 3 是载荷为 196 N 时，SiC_p/A1 复合材料磨损率随 SiC 颗粒体积分数变化的关系曲线图，由图可知：SiC 颗粒粒度相同时，随着颗粒体积分数的增加，复合材料的磨损率先随着 SiC 颗粒体积分数的增加而逐渐下降 (图 3 阶段)，当 SiC 颗粒体积分数超过 25% 时，复合材料的磨损率则随着颗粒体积分数的增加而上升 (图 3 阶段)。即颗粒体积分数

存在一个最佳值 (25%), 此时复合材料的磨损率最小。当 SiC 颗粒粒度为 110 μm 时, 铝合金基体的磨损率为 $3.774 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$, 是 15vo%, 25vo%, 35vo%, 45vo% SiC_p/Al 复合材料磨损率的 2.16 2.76 2.07, 1.11 倍; SiC_p 粒度为 63 μm 时, 铝合金基体的磨损率是 15vo%, 25vo%, 35vo%, 45vo% SiC_p/Al 复合材料磨损率的 2.02, 2.58 1.66 1.06 倍。颗粒体积分数为 55% 时, SiC_p (110 μm , 63 μm , 45 μm) /Al 复合材料的磨损率 ($4.983 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$, $5.594 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$, $6.321 \times 10^{-5} \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$) 是铝合金基体的 1.32 1.48 1.67 倍。可见 SiC 颗粒体积分数在 15% ~ 35% 时, 复合材料的耐磨性明显优于铝合金基体, 颗粒体积分数为 45% 的复合材料的磨损率与基体合金相当, 而颗粒体积分数为 55% 的复合材料磨损率比基体合金还要高, 耐磨性比铝合金基体差。载荷为 392N 时, 也得到了类似的结果。

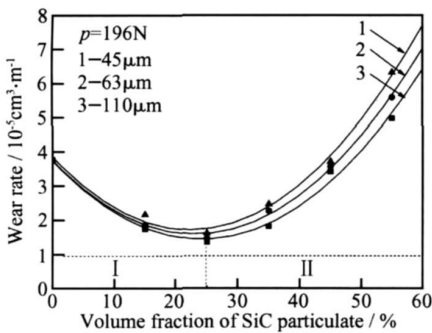


图 3 SiC_p/Al 复合材料磨损率与 SiC 颗粒体积分数关系

Fig 3 Wear rate of SiC_p/Al composites vs. volume fraction of SiC particulate

SiC 颗粒体积分数的增加会对复合材料力学性能及耐磨性产生两方面的影响^[12], 一方面可以提高复合材料的整体硬度 (图 4), 从而提高复合材料抵抗犁沟磨损的能力, 所以颗粒的加入有助于提高复合材料的耐磨性, 且磨损率随着颗粒体积分数的增加而降低 (图 3 阶段)。另一方面, 随着 SiC 颗粒含量的增加, 会使复合材料的塑性降低, 从而降低了复合材料抵抗表层剥落的能力。此外, 随着颗粒体积分数的大量增加, 复合材料中出现了许多 SiC-Al 界面, 而这些界面往往是裂纹的发源地。在一定的载荷下, 裂纹容易在界面、亚表面上产生和扩展, 在反复摩擦过程中容易造成复合材料的剥落以及颗粒的大量脱落, 磨损率逐渐上升 (图 3 阶段), 耐磨性下降。可见硬度的升高和塑性的下降会同时作用于复合材料的磨损过程, 但是在某个具体阶段其中的

一个因素起主要控制作用, 如在图 3 阶段中硬度的提高对复合材料磨损率的降低的起了主要作用, 而在图 3 阶段中, 塑性的下降则控制了复合材料磨损率的升高。

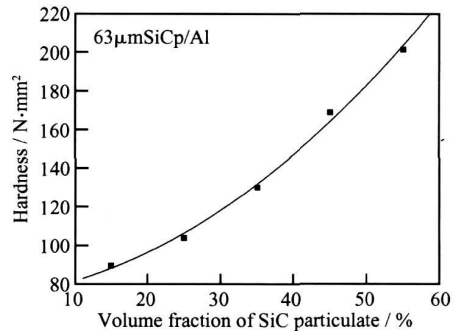


图 4 复合材料维氏硬度与 SiC 颗粒体积分数的关系图

Fig. 4 Variation of hardness with volume fraction of SiC particulate

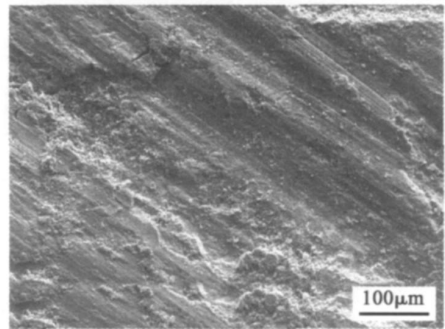


图 5 55vo% SiC_p/Al 复合材料磨损表面 (P = 196N, 110 μm SiC)

Fig. 5 Worn surface of SiC_p/Al composites reinforced with 55vo% particulates (P = 196N, 110 μm SiC)

2.3 载荷对 SiC_p/Al 复合材料摩擦磨损性能的影响

图 6 是 SiC_p/Al 复合材料磨损率随载荷变化的关系曲线, 增强颗粒粒度为 45 μm , 从图中可以看出当颗粒体积分数一定时, 复合材料的磨损率随着载荷的增加而上升。随着外加载荷的增加, 有可能造成摩擦表面上部分 SiC 颗粒的破碎并剥落, 既直接增加了磨损率, 也失去了承载作用, 使较软的基体合金直接与较硬的摩擦环接触, 从而使得复合材料磨损率上升。此外, 摩擦表面及亚表层中的应力也会随着载荷的增加而上升, 使裂纹扩展、逐渐连通, 造成摩擦表面的断裂、剥落磨损加剧 (图 7)。

2.4 磨损机理的讨论

复合材料中由于 SiC 颗粒的加入, 使得复合材料的磨损变得十分复杂, 颗粒的大小、含量、载荷的

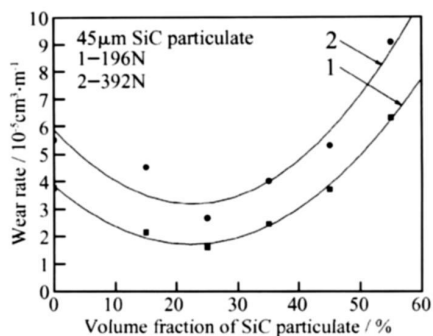


图 6 SiC_p/Al 复合材料磨损率与载荷关系图

Fig 6 Wear rate of SiC_p/Al composites vs. applied load

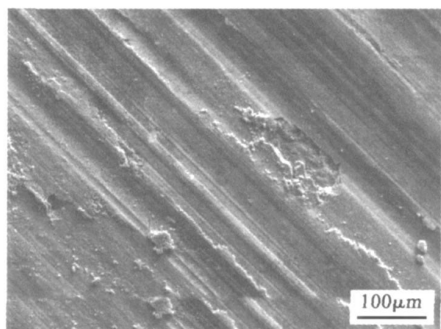


图 7 SiC_p/Al 复合材料在 392N 时的磨损表面 (35vol%)

Fig. 7 Worn surface of SiC_p/Al composites under a load of 392N (35vol%)

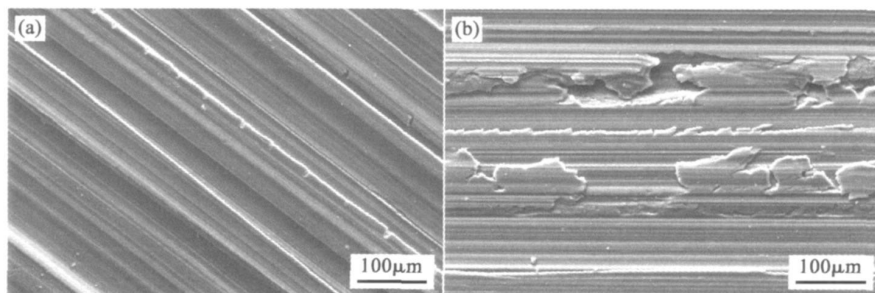


图 8 铝合金磨损表面及磨屑形貌的 SEM 图

Fig. 8 SEM photographs of the worn surface of aluminum alloy

性的转变, 即 SiC 体分小于 25% 时, 复合材料以磨粒磨损为主, 当 SiC 体分大于 25% 时, 复合材料以表层剥落磨损为主, 同时伴有磨粒磨损。由此可见, 颗粒体积分数比载荷更能影响到复合材料磨损机理的转变。

3 结论

(1) SiC 颗粒体积分数在 15% ~ 35% 时, 复合材料耐磨性能明显优于铝合金基体, 45vol% SiC_p/Al

大小都会影响其磨损机理。铝合金中由于没有硬质颗粒的加入, 对摩擦表面的微凸体对其表面会产生微观犁削作用, 但是由于铝合金基体具有良好的塑性, 所以铝合金基体主要表现为磨粒磨损 (图 8a)。较高载荷 ($P = 392\text{N}$) 下, 铝合金的塑性变形加大, 使得材料容易往犁沟两侧堆积, 在磨粒反复推碾作用下材料从基体上产生脱落 (图 8b)。此时铝合金的磨损机制仍以磨粒磨损为主, 同时伴有以塑性流动、剥落导致材料损失。

SiC 颗粒的体积分数显著影响到复合材料的磨损率, 这一点可以从图 3 的两个阶段看出, 其原因是随着颗粒体积分数的变化, 复合材料表现出不同的磨损机理。当 SiC 体分小于 25% 时, SiC 颗粒的加入提高了复合材料的整体硬度 (图 4), 而 SiC 颗粒具有一定的承载作用, 复合材料主要以磨粒磨损为主, 因此随着颗粒的体积分数增加, 单位面积上承载颗粒数目也相应地增加, 复合材料磨损率逐渐降低, 耐磨性提高。当 SiC 体分大于 25% 时, 随着颗粒体积分数的增加, 复合材料塑性降低, 抵抗表层剥落磨损的能力逐渐下降 (图 3 阶段), 磨损表面出现了大面积的剥落坑 (图 5), 此时复合材料主要以表层剥落磨损为主, 同时伴有磨粒磨损。载荷增大时, 各个阶段的磨损率增加, 但是磨损机制没有发生根本

复合材料的耐磨性与铝合金基体相当, 而 55vol% SiC_p/Al 复合材料的磨损率比铝合金基体还要高, 耐磨性低于基体合金。

(2) SiC_p/Al 复合材料的磨损率随着颗粒粒度的增加而下降, 颗粒尺寸越大, 复合材料的耐磨性能越好。

(3) SiC 颗粒体积分数对复合材料磨损率的影响存在一个最佳值 (25%), 即: 颗粒体积分数小于 25% 时, 复合材料的磨损率随着体积分数的增加而下降, 复合材料的磨损机理以磨粒磨损为主; 体积分

数大于 25% 时,复合材料的磨损率随着颗粒体积分数的增加而上升,复合材料的磨损机理以表层剥落磨损为主,同时伴有磨料磨损。颗粒体积分数比颗粒粒度、载荷更能影响到复合材料磨损机理的转变。

(4) 载荷为 196N 时,铝合金以磨料磨损为主;载荷为 392N 时,铝合金的磨损机制仍以磨料磨损为主,同时伴有以塑性流动、剥落导致材料损失。

参考文献:

[1] ALPASA T, ZHANG J Effect of SiC particulate reinforcement on the dry sliding wear of aluminum-silicon alloys (A356) [J]. *Wear* 1992, 155: 83-104

[2] MA ZY, LIANG YN, ZHANG YZ Sliding wear of behaviour of SiC particulate reinforced 2024 aluminum alloy composites [J]. *Materials Science and Technology*, 1996, 12: 751-756

[3] Mehmet Acilar, Ferhat Gul Effect of the applied load, sliding distance and oxidation on the dry sliding wear behaviour of Al+10Si/SiCp composites produced vacuum infiltration technique [J]. *Materials & Design* 2004, 25: 209-217

[4] Thomas Zehner 高速列车使用铝基复合材料制动圆盘 [J]. *国外机车车辆工艺*, 1999, 2: 19-21

[5] 大岸秀之. 铝合金制动盘的开发 [J]. *国外机车车辆工艺*, 2003, 5: 21-24

[6] T. W. 克莱因, P. J. 威瑟斯. 金属基复合材料导论 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996

[7] AL-RUBAIE K S, YOSHIMURA H N, MELLO J Two-body abrasive of AlSiC composites [J]. *Wear* 1999, 233-235: 444-454

[8] VENKATARAMAN B, SUNDARARAJAN G. The sliding wear behaviour of AlSiC particulate composites-macrobehaviour [J]. *Acta Materialia* 1996, 44(2): 451-460

[9] SAHN Y, ACILAR M. Production and properties of SiCp-reinforced aluminum alloy composites [J]. *Composites (A)*, 2003, 34: 709-718

[10] TIEJUN MA, HIDEKI YAMAMURA, DONALD A. KOSS, ROBERT C. VOIGT Dry sliding wear behavior of cast SiC-reinforced AlMMCs *Materials Science and Engineering (A)*, 2003, 360: 116-125

[11] 湛永钟, 张国定. SiCp/Cu 复合材料摩擦磨损行为研究 [J]. *摩擦学报*, 2003, 23(6): 495-499

[12] 卢德宏. SiC 和 Gr 混杂增强铝基复合材料干摩擦磨损研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 1999

Dry Sliding Wear Behavior of SiC Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites Fabricated Using Pressureless Infiltration Process

LV Yi-zhong^{1,2}, WANG Bao-shun^{1,3}, CUI Yan³, ZHAO Hui-you¹, QU Jing-xin¹

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering China University of Mining & Technology-Beijing Beijing 100083 China
2. Beijing Vocational and Technical Institute of Industry, Beijing 100042, China 3. Beijing Institute of Aeronautical Materials Beijing 100095, China)

Abstract The Aluminum matrix composites reinforced with SiC particulates of different sizes and volume fraction were fabricated by pressureless infiltration process. The effect of the size (110 μ m, 63 μ m, 45 μ m) and volume fraction (15%, 25%, 35%, 45%, 55%) of SiC particulate on the friction and wear behaviour of the composites sliding against cemented carbide (80% WC+ 20% Co) was investigated under dry condition. The wear tests were carried out using a block-on-ring tester at two loads of 196N and 392N under a constant sliding speed of 200rad/min. Worn surface and wear debris were examined by scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The wear mechanism were determined. It was showed that the wear resistance of the composites was superior to that of aluminum matrix alloy when the SiC particulate volume fraction was in the range of 15% ~ 35%. The results of the investigation also indicated that the wear rate of the composites decreased with increasing the particulate size and decreasing load. The optimal volume fraction of SiC particulate is at 25%. When the SiC particulate volume fraction was less than 25%, the wear rate of the composites significantly decreased with increasing SiC volume fraction, the wear mechanism of the composites in this period is abrasive wear. When the SiC particulate volume fraction was more than 25%, wear rate of the composites increased with increasing the SiC particulate volume fraction, the composite is characterized by delamination wear and abrasive wear.

Key words pressureless infiltration; SiCp/Al composites; friction and wear