

文章编号: 1004 - 0609(2004)09 - 1621 - 06

A359-Zr(CO₃)₂ 体系反应合成 复合材料的干滑动磨损性能^①

江润莲^{1, 2}, 赵玉涛¹, 戴起勋¹, 程晓农¹, 纪嘉明¹, 朱延山¹, 冯 钦¹

(1. 江苏大学 材料科学与工程学院, 镇江 212013; 2. 中国人民解放军镇江船艇学院, 镇江 212003)

摘 要: 研究了新型反应体系 A359-Zr(CO₃)₂ 熔体反应法制备的 (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 复合材料干滑动磨损性能。结果表明: 复合材料的磨损量随着载荷的增大和时间的延长均远小于基体磨损量, 由于颗粒的支撑和减磨作用, 使得同一条件下复合材料的磨损量随颗粒体积分数的增加而减少; 当载荷为 98 N 时, 12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 复合材料的磨损量为 20.2 mg, 而基体材料的磨损量为 54.5 mg, 复合材料比基体材料耐磨性提高了 2.5 倍; 由磨损表面 SEM 观察表明, 基体 A359 合金存在严重粘着和变形, 表现为粘着磨损和剥层磨损, 复合材料的磨损类型表现为磨粒磨损。

关键词: (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 复合材料; 熔体反应法合成; 耐磨性; 磨损机制

中图分类号: TB 331

文献标识码: A

Dry sliding wear characteristics and mechanism of in-situ composites synthesized by A359-Zr(CO₃)₂ reaction system

JIANG Run-lian^{1, 2}, ZHAO Yu-tao¹, DAI Qi-xun¹,

CHENG Xiao-nong¹, JI Jia-ming¹, ZHU Yan-shan¹, FENG Qin¹

(1. School of Materials Science & Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Zhengjiang Watercraft College of PLA, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites were fabricated by direct melt reaction method in novel system A359-Zr(CO₃)₂. The dry sliding wear properties of these composites were studied. The results show that the wear mass loss of (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites is less than that of A359 matrix alloy with increasing load and sliding time. The wear mass loss of (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites decreases further with the increase of Al₃Zr and Al₂O₃ volume fraction under the same condition because of Al₃Zr and Al₂O₃ supporting and reducing milling. Under the condition that the load is 98 N, the wear mass loss of 12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites is only 20.2 mg, whereas the wear mass loss of A359 matrix alloy is 54.5 mg. Thus the wear resisting property of this composite is enhanced by 2.5 times than its matrix A359 alloy. The observation of wear surface of (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites and the matrix A359 alloy with the help of SEM indicates that severe adhesion and deformation occurs on the wear surface of A359 alloy. The wear mechanism of the matrix A359 alloy is stripped and adhesive wear, while the wear surface of (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites is superior to that of the matrix A359 alloy. The wear mechanism of (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites is abrasive wear.

Key words: (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites; direct melt reaction synthesis; wear resistance; wear mechanism

^① 基金项目: 教育部重点基金资助项目(2000156); 江苏省“十五”科技攻关资助项目(BE2002039); 江苏省高等学校高新技术产业化发展资助项目(JH02-039); 江苏省铝基复合材料工程中心基金资助项目(BM2003014); 江苏大学高级人才基金资助项目
收稿日期: 2004-02-11; 修订日期: 2004-05-22
作者简介: 江润莲(1971-), 女, 讲师, 硕士研究生。
通讯作者: 赵玉涛, 教授, 博士; 电话: 0511-8791919; 传真: 0511-8791919; E-mail: zhaoyt@ujs.edu.cn

颗粒增强金属基复合材料(PRMMCs)因具有各向异性小、微观结构均匀、成型容易、成本低廉等优点而引起人们的普遍关注,目前在汽车工业和发电机行业得到广泛的应用^[1]。在各种金属基复合材料中,铝基复合材料一直占主导地位,尤其是通过熔体反应生成的铝基复合材料,由于增强体在熔体内反应生成,具有尺寸小、界面洁净无污染,热稳定性好、与基体界面相容性好等优点,已成为复合材料研究中的一个重要方向^[2~4],同时熔体反应生成的铝基复合材料比基体铝合金在强度和刚度、耐磨和减摩、尺寸稳定性等方面得到显著改善,从而使铝基复合材料具有优良的综合性能^[5]。

颗粒增强铝基复合材料的基体合金的选择首先应满足使用的工况条件,同时要考虑基体与增强相颗粒的结合强度,用于干滑动摩擦条件下的基体合金以Al-Si系为主。选择颗粒增强相的参数包括:弹性模量、抗拉强度、密度、熔点、硬度、热稳定性、热膨胀系数、尺寸及形状、基体材料的相容性和成本,目前使用的增强颗粒有SiC、B₄C、Si₃N₄、AlN、Al₂O₃、SiO₂以及C、Si等^[6]。颗粒增强铝基复合材料作为阻摩材料,影响其摩擦磨损特性的主要因素可分为2大部分:1)机械及物理因素(外部因素),如载荷、相对滑动速度、滑动距离、温度、表面状态、对磨件和运动形式等;2)材料因素(内部因素),如增强颗粒的种类、大小、体积分数和基体的微观结构等^[7, 8]。郝远等^[9]研究了SiC_p/ZA27复合材料的摩擦磨损性能,指出随着SiC含量的增加,复合材料的磨损量急剧下降;陈跃等^[10]分析了3种ZL101-SiC_p、Al₂O_{3p}复合材料的磨损行为,得出ZL101合金的磨损率比复合材料要大近3个数量级。Logsdon等^[11]的研究表明,在各种摩擦条件下,颗粒增强复合材料比纤维增强复合材料具有更好的耐磨性能。对于内生颗粒增强铝基复合材料的磨损性能研究报道较少。本文作者对A359-Zr(CO₃)₂体系反应生成(Al₃Zr+Al₂O₃)_p/A359颗粒增强复合材料干滑动磨损性能进行了研究,考察了载荷和磨损时间对复合材料磨损性能的影响,并通过磨损表面形貌(SEM)观察对其磨损机制进行了分析。

1 实验

1.1 材料的制备

基体选用A359合金,其主要化学成分为(质量分数):Si9.5, Mg0.5, Cu0.2, Mn0.1, Al余量。工

业用Zr(CO₃)₂纯度为99.2%,实验前将Zr(CO₃)₂放入电烘箱中升温至250℃,保温3h,充分去除水份,然后冷却、研磨。先将铝锭在石墨坩埚中用电阻炉熔化,然后升温到900℃,用钟罩压入不同量的Zr(CO₃)₂(生成颗粒理论体积分数分别为3%, 6%, 12%), A359与Zr(CO₃)₂原位反应生成Al₃Zr和Al₂O₃颗粒,反应30min后,除渣,在720℃时浇入金属型中,制得复合材料。

1.2 实验条件

干磨损实验在国产MM-200型销盘式试验机上进行。实验前将试样线切割成尺寸为19.5mm×10mm×8mm试样,对磨面尺寸为19.5mm×10mm,磨面用金相砂纸磨至1200号。对磨件为40Cr钢(HRC40),尺寸为40mm×10mm,磨损量以试样磨损前后的质量差来衡量,称量采用MA110电子分析天平,精度为0.0001g,在JEOL-JXA-840A扫描电镜上观察磨损表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 载荷和滑动时间对复合材料磨损性能的影响

图1所示为滑动速度为0.42m/s,每一载荷下滑动时间为20min时基体A359合金和(Al₃Zr+Al₂O₃)_p/A359复合材料的磨损量与外加载荷的关系曲线。由图1可以明显看出,复合材料和基体的磨损量都随着外加载荷的增大而增大,但复合材料的磨损量随载荷的增大幅度远小于基体。载荷小于58.8N时,颗粒含量为6%和12%(体积分数)的2种复合材料磨损量很小,基体合金与复合材料都存在着磨损急剧增加的瞬变载荷,但复合材料的瞬变载荷要比基体合金高得多,而且随颗粒含量的增加而增加,基体合金的瞬变载荷为39N,而12%增强体含量的复合材料的瞬变载荷为58.8N。增强颗粒的存在提高了瞬变载荷,延缓了微磨损向剧烈磨损的转变^[12]。低载荷时复合材料明显比基体耐磨,6%和12%增强体含量的复合材料由于颗粒含量较高,在基体中分布较均匀,大量Al₃Zr和Al₂O₃增强相颗粒的引入减少了复合材料与对磨件之间的有效接触面积,有效地削弱了粘着磨损;同时复合材料中的硬质颗粒具有承载属性,当软基体在外力作用下被磨损后,颗粒将凸显在试样表面上,承受大部分载荷,有利于阻止软基体直接参与摩擦过程;增强相颗粒与基体之间的界面结合较强,抑制了颗粒从基体上脱落而加剧磨粒磨损的倾向,加强了复合

材料抵抗粘着和变形的能力,从而使复合材料的耐磨性能提高^[13, 14]。因此低载荷时复合材料具有较好的耐磨性能,但是,当施加载荷达到瞬变载荷时,复合材料的磨损机理也由微磨损变为剧烈磨损。随着载荷的增大,磨面上的颗粒将在高的表面切应力的作用下发生破碎,同时表层上一些与基体结合不牢固的颗粒也会从接触面上剥落下来,颗粒因断裂或者脱落不能承受载荷,导致摩擦面直接与基体合金接触,从而形成高应力使表面层被剥去。但在载荷为 98 N 时 12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 复合材料的磨损量为 20.2 mg,而基体材料的磨损量为 54.5 mg。可见,在高载荷下复合材料虽然比低载荷时磨损剧烈,但耐磨性仍然比基体材料提高了 2.5 倍,重载荷下基体合金磨面上因发生大面积粘着,粘着磨损严重,其耐磨性仍不如复合材料^[15]。

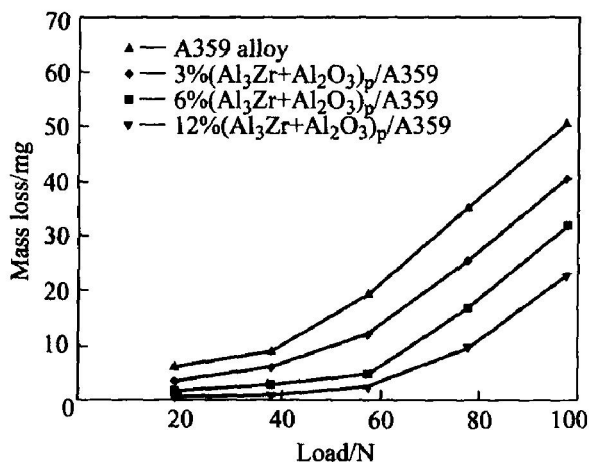


图 1 载荷与基体和复合材料的磨损量的关系

Fig. 1 Wear mass loss of composites and matrix versus load

图 2 所示为滑动速度为 0.42 m/s, 载荷为 58.8 N, A359 合金和 (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 复合材料的磨损量与滑动时间的关系曲线。由图 2 可见,随着磨损时间的延长,磨损量增加。基体合金与颗粒含量为 3% 的复合材料随着滑动时间的延长,磨损量增加幅度很大,曲线的斜率很大。颗粒含量为 6% 和 12% 的复合材料随着时间的延长磨损量增加幅度减小,磨损时间为 45 min 时基体材料的磨损量为 34.8 mg,而 12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 的磨损量仅为 7.4 mg。在磨损后期基体材料的磨损量增幅很快,在磨损时间为 90 min 时,12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 的磨损量仅为 26.2 mg,而基体材料的磨损量为 80.2 mg,基体材料的磨损量是复合材料的 3 倍,这是由于磨损后期基体材料被大块撕脱而造成的。

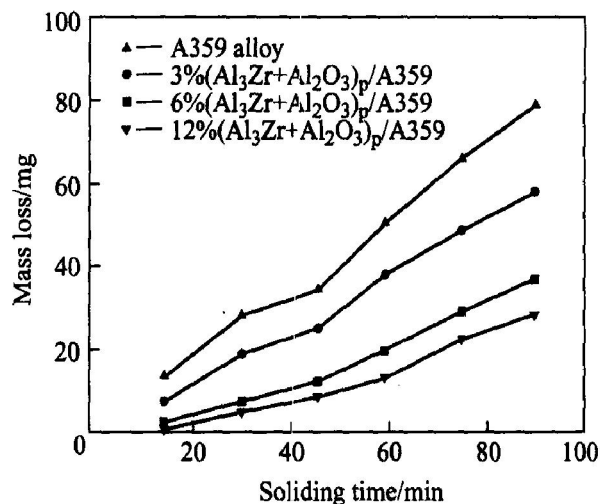


图 2 基体和复合材料的磨损量与时间的关系

Fig. 2 Wear mass loss of composites and matrix versus time

2.2 磨损表面形貌及磨损机理分析

图 3 所示为 12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 复合材料的 SEM 显微组织,可以看到颗粒呈细小粒状,且在基体中弥散分布。

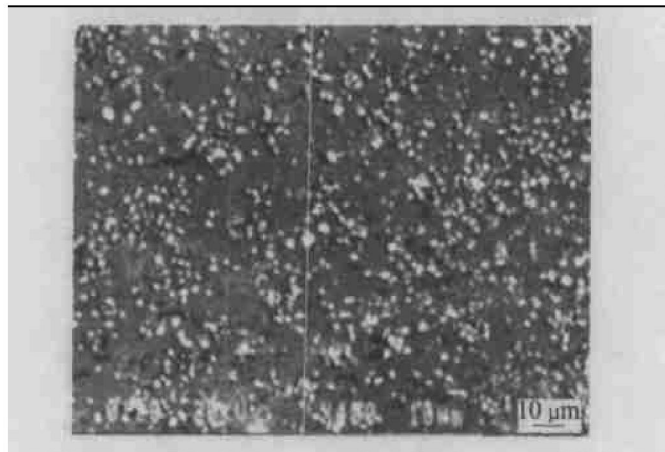


图 3 12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 复合材料的 SEM 显微组织

Fig. 3 SEM image of 12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites

图 4 所示为滑动速度为 0.42 m/s, 载荷为 58.8 N, 滑动时间为 90 min 时,基体 A359 合金的摩擦磨损表面的 SEM 形貌。图 4(a) 为沿滑动方向 A359 的磨损表面形貌,表面较粗糙,受变形和挤压而产生的变形迁移层明显而密集,基体直接与钢对偶表面接触,大量的塑性流变导致了摩擦层的形成。图 4(b) 为一明显的撕裂坑,此凹坑深而宽,由于 A359 合金基体硬度较低,在摩擦过程中产生的热量使基体表面层温度升高而软化变形,接着在摩擦表面形成凸起的具有犁削作用的粘着点,随着摩擦

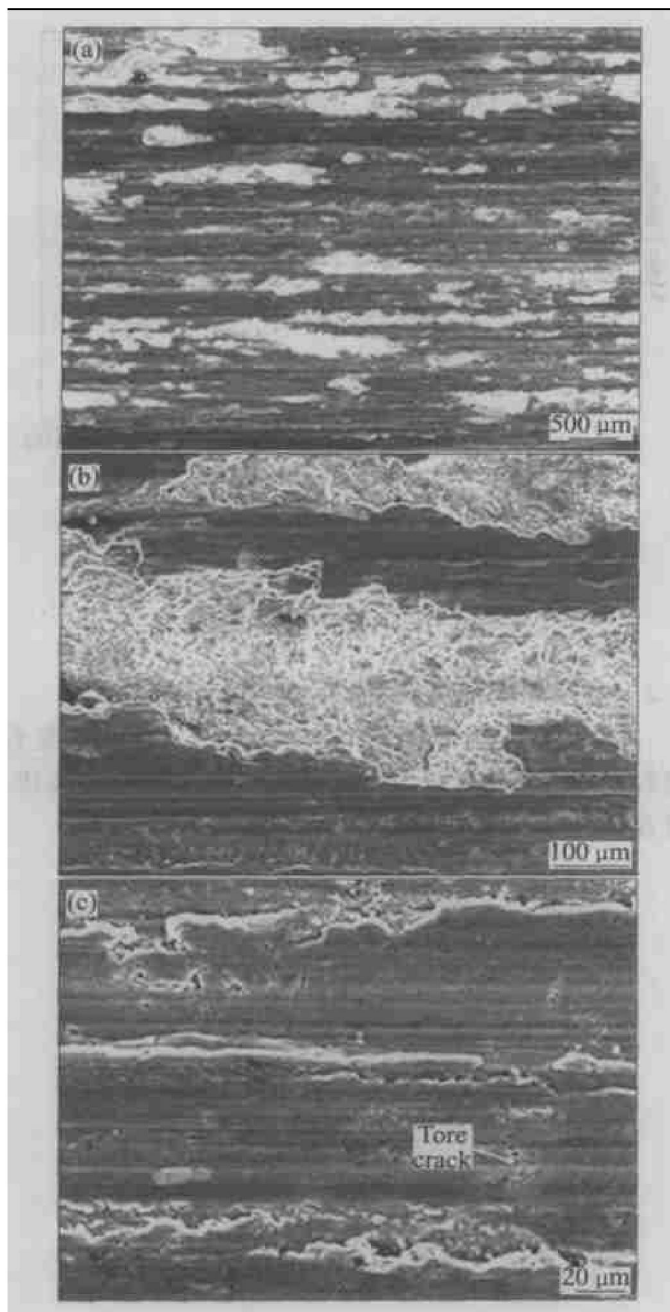


图 4 基体 A359 合金磨损表面的 SEM 形貌

Fig. 4 SEM photographs of wear surface of A359 alloy

(a) —Wore surface; (b) —Tore pit;
(c) —Plastic deformation area

磨损过程的不断进行, 粘着点逐渐增大, 在剪切力的作用下, 致使铝合金基体的剥落加剧, 表面因磨削而被大片撕脱转移, 由此产生大面积的凹坑^[16]。图 4(c) 为 A359 合金基体磨损表面磨痕的形貌, 磨痕宽且表面无颗粒附着, 表现出较大的塑性变形, 在垂直磨损方向有大量的撕裂纹, 主要表现为粘着磨损和剥层磨损。

图 5 所示为滑动速度为 0.42 m/s, 载荷为 58.8 N, 滑动时间为 90 min 时, 12% (Al₃Zr+

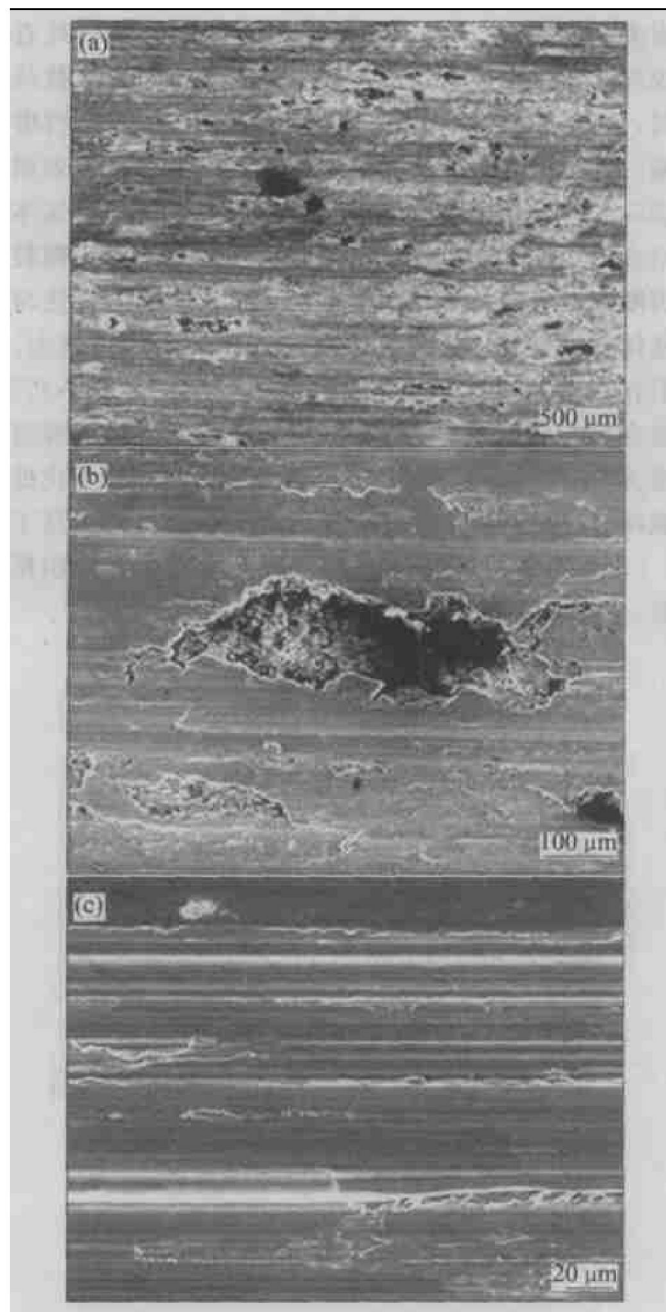


图 5 12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 复合材料磨损表面的 SEM 形貌

Fig. 5 SEM photographs of wear surface of 12% (Al₃Zr+ Al₂O₃)_p/A359 composites

(a) —Wore surface; (b) —Tore pit;
(c) —Furrow formed by wear

Al₂O₃)_p/A359 复合材料的摩擦磨损表面的 SEM 形貌。图 5(a) 为沿滑动方向复合材料的磨损表面形貌, 表面较平整光滑, 磨损表面暴露出基体或因犁削作用而裸露的黑色颗粒, 在磨损过程起支撑减磨的作用^[17]。图 5(b) 中磨损表面的凹坑明显比图 4(b) 中基体材料的窄而浅, 这是由于增强颗粒突出于磨损表面, 起到了抵抗对磨材料对复合材料表面的微切削破坏, 从而提高了基体抗剪切应变的能力。在摩擦表面形成的摩擦转移膜, 减少了铝合金

基体与对磨材料直接接触的几率,也减少了摩擦表面上合金基体可能被粘着的区域面积,因此磨损表面粘着撕脱的块度和数量均降低^[18]。图5(c)为复合材料磨损表面的犁沟形貌。可以看到,犁沟较明显,且轮廓清晰,这是由于复合材料磨损表面脱落的较硬颗粒在摩擦过程中起磨粒的作用,在较大载荷的作用下压入了复合材料摩擦表面,并沿摩擦方向发生了滑移,从而在磨损表面形成了犁沟。从图5(c)可看出磨层间的犁沟中有一些很小的粒状磨屑,这是磨粒的微切削形成的犁削作用,由于塑性挤压被推到犁沟两侧而形成的,较深的划痕说明硬的颗粒嵌入到较软的基体中引起了磨粒磨损。

3 结论

1) 原位熔体反应生成的($\text{Al}_3\text{Zr} + \text{Al}_2\text{O}_3$)_p/A359复合材料的耐磨性显著高于基体A359合金的耐磨性。

2) 随着颗粒体积分数的增加, ($\text{Al}_3\text{Zr} + \text{Al}_2\text{O}_3$)_p/A359复合材料耐磨性有所提高,尤其在低载荷时颗粒的减磨作用更加突出。

3) ($\text{Al}_3\text{Zr} + \text{Al}_2\text{O}_3$)_p/A359复合材料的耐磨性的提高主要是颗粒的支撑减磨作用,主要表现为磨粒磨损,而基体A359合金磨损表面存在严重粘着,表现为粘着磨损和剥层磨损。

REFERENCES

- [1] Mikucki B A, Mercer II W E, William G G, et al. Extruded magnesium alloy reinforced with ceramic particles [J]. *Light Metal Age*, 1990, 48(6): 12-16.
- [2] 吴进明, 郑史烈, 李志章. 颗粒增强铝基原位复合材料[J]. *材料导报*, 1999, 13(5): 52-54.
WU Jir-ming, ZHEN Shi-lie, LI Zhi-zhang. Particle reinforced aluminum composites in situ [J]. *Materials Review*, 1999, 13(5): 52-54.
- [3] Koczek M J. Reactive processing of MMC [J]. *Proceeding of TMS*, 1993, 3(2): 223-228.
- [4] YANG Bin, WANG Yu-qing, ZHOU Ben-lian. Analysis of the formation mechanism of TiB₂ particulate fabricated by in situ reaction in molten aluminum [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1998, 34(1): 100-104.
- [5] Gotman J. Fabrication of Al matrix in situ composites via self-propagating synthesis [J]. *Mater Sci & Eng*, 1994, 187: 189-199.
- [6] 陈跃, 沈百令, 张永振, 等. 颗粒增强铝基原位复合材料干摩擦磨损研究进展 [J]. *兵器材料科学与工程*, 1999, 22(2): 61-64.
- [7] CHEN Yue, SHEN Bai-ling, ZHANG Yong-zhen, et al. Review on friction and wear behaviour of particle reinforced aluminum composites under dry sliding [J]. *Ordance Material Science and Engineering*, 1999, 22(2): 61-64.
- [7] 吴洁君, 王殿斌, 桂满昌, 等. 颗粒增强铝基复合材料干滑动摩擦性能述评 [J]. *稀有金属*, 1999, 23(3): 214-219.
- [8] WU Jie-jun, WANG Dian-bin, GUI Mang-chang, et al. Dry sliding wear of particle reinforced aluminum composites: review and discussion [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 1999, 23(3): 214-219.
- [8] Alpas A T, Embury J D, Ludema K C, et al. *Wear of Materials* [M]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1991. 159-168.
- [9] 郝远, 陈体军, 寇生中, 等. SiC_p/ZA27复合材料的摩擦磨损性能 [J]. *中国有色金属学报*, 1998, 8(S1): 223-228.
- [9] HAO Yuan, CHEN Ti-jun, KOU Sheng-zhong, et al. Wear and friction properties of SiC_p/ZA27 composites [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1998, 8(S1): 223-228.
- [10] 陈跃, 张永振, 上官宝, 等. 颗粒增强铝基复合材料干摩擦磨损特性研究 [J]. *中国机械工程*, 2001, 8(12): 959-963.
- [10] CHEN Yue, ZHANG Yong-zhen, SHANGGUAN Bao, et al. Review on friction and wear behaviour of particle reinforced aluminum composites under dry sliding [J]. *The Chinese Mechanical Engineering*, 2001, 8(12): 959-963.
- [11] Logsdon W A, Liaw P K. Tensile fracture toughness and fatigue crack growth rate properties of silicon carbide whisker and particulate reinforced aluminum metal matrix composites [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1986, 24(5): 737-751.
- [12] 王香, 李庆芬, 马旭梁, 等. TiC_p/ZA-12复合材料磨损行为的研究 [J]. *材料工程*, 2002(9): 10-13.
- [12] WANG Xiang, LI Qing-fen, MA Xu-liang, et al. Wear behavior of TiC_p/ZA-12 composites [J]. *Materials Engineering*, 2002(9): 10-13.
- [13] 朱和祥, 黎祚坚, 曾国勋. 铸造铝基复合材料的滑动磨损行为 [J]. *特种铸造及有色合金*, 1994(1): 28-31.
- [13] ZHU He-xiang, LI Zou-jian, ZENG Guo-xun, et al. Sliding wear behavior of casting aluminum alloy matrix composites [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 1994(1): 28-31.
- [14] 王文龙, 吴军华, 张国定. 铝基复合材料的摩擦磨损性能 [J]. *金属学报*, 1998, 34(11): 1177-1182.
- [14] WANG Wen-long, WU Jun-hua, ZHANG Guo-ding. The

- tribological and wear behavior of aluminum matrix composites[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1998, 34(11): 1177 - 1182.
- [15] 郝 远, 陈体军, 寇生中. SiC_p 含量及粒度对锌基复合材料高温摩擦磨损性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 1997, 7(3): 132 - 136.
- HAO Yuan, CHEN Ti jun, KOU Sheng-zhong. Influences of SiC_p content and size on elevated temperature wear of zinc matrix composites[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(3): 132 - 136.
- [16] 卢德宏, 顾明元, 吴桢干, 等. 基体种类对混杂复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. *材料工程*, 2000(5): 19 - 21.
- LU De hong, GU Ming yuan, WU Zhen gan, et al. Effect of the matrix on the wear and friction performance of silicon carbide and graphite particulates reinforcing aluminum matrix composite[J]. *Materials Engineering*, 2000(5): 19 - 21.
- [17] 宋延沛, 谢敬佩, 祝要民, 等. Al₂O₃/ZA27 复合材料的高温摩擦磨损特性[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(1): 123 - 126.
- SONG Yan pei, XIE Jing pei, ZHU Yao-min, et al. Friction and wear behaviors of Al₂O₃/ZA27 composites at elevated temperature[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(1): 123 - 126.
- [18] LI Yuan yuan, LUO Jun-ming. The microstructure and wear mechanism of a novel high strength wear resistant zinc alloy (ZMJ) [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995(55): 154 - 161.
- (编辑 李向群)