

文章编号: 1004-0609(2003)05-1161-05

电厂飞灰颗粒增强铝基复合材料的摩擦磨损行为^①

李月英, 刘勇兵, 曹占义

(吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130025)

摘 要: 对挤压铸造制成的飞灰颗粒增强 ZL109 复合材料在不同条件下的摩擦磨损行为进行了研究。结果表明: 飞灰颗粒的加入可提高铝合金材料的耐磨性, 复合材料同基体合金相比, 摩擦因数也较低。在摩擦磨损过程中, 在较低载荷下复合材料的摩擦表面形成一稳定的摩擦转移层, 该转移层的存在可以起到降低摩擦因数的作用。在较高载荷下由于该摩擦转移层遭到破坏, 从而影响了其减摩作用的发挥。镶嵌在基体中的飞灰颗粒在摩擦过程中主要起到承受载荷、限制对磨材料与铝基体直接接触的作用。脱落的飞灰颗粒可以起到“滚珠”的作用, 在摩擦表面形成“三体”摩擦, 从而起到减摩的作用。

关键词: 铝基复合材料; 飞灰颗粒; 耐磨性; 磨损机制

中图分类号: TB 333

文献标识码: A

铝基复合材料以其质轻、性能优异而倍受人们重视, 现已成为优先发展的新型材料, 并被广泛用于航空、航天、电子、汽车等领域^[1-3]。颗粒增强铝基复合材料与基体铝合金相比其耐磨性得到提高, 这正是运输机械的抗磨部件必须具备的性能。飞灰颗粒是火力发电厂粉煤燃烧后的生产废料, 价格低廉容易获取。该种混合物在相当高的温度和相当短的时间内形成, 形态呈现球形或椭球形, 其密度小、模量高, 经过一定的工艺处理, 可用作复合材料良好的颗粒增强体材料^[4, 5]。作为抗磨或减摩材料, 其耐磨性及其影响规律的确定是非常重要的。为此, 本文作者研究了铝基飞灰复合材料的摩擦磨损特性, 并对其磨损机理进行了分析。

1 实验

选用 ZL109 铝合金作为复合材料的基体合金, 火力发电厂粉煤燃烧所产生的飞灰颗粒作为增强体。飞灰颗粒的组成如表 1 所示。由于普遍认为铁在铝基复合材料中是有害元素, 应尽量使铁元素在铝基复合材料中的含量减少。酸洗后可去除飞灰颗粒中含有的铁元素。使用前飞灰颗粒需经过筛选(直径 < 45 μm)、酸洗(5% 稀盐酸)、清洗、烘干等预处理。本实验采用挤压铸造法制成飞灰含量(体积分数)分别为 5%, 10%, 20%, 30% 的铝基

飞灰颗粒增强复合材料。摩擦磨损实验在 MG-2000 型磨损实验机上进行。摩擦形式为销-盘式干滑动摩擦, 对磨盘材料选为 5CrNiMo 钢, 其硬度为 HRC55。摩擦磨损实验在室温下进行, 相对湿度为 60% ~ 80%。

表 1 飞灰颗粒的组成

Table 1 Composition of fly ash particles
(mass fraction, %)

Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
1.04	21.95	70.38	2.43	0.90	0.75	2.75

2 实验结果

2.1 磨损量和摩擦因数的变化

图 1(a) 所示为铝基飞灰复合材料及基体铝合金的磨损量随实验载荷变化的情况。由图 1 可知, 随实验载荷的增加, 复合材料和铝基体的磨损量均显著增加。在低载荷下, 复合材料的耐磨性显著高于铝基体; 在较高载荷下, 复合材料耐磨性的改善有所降低。此磨损曲线上存在转折点, 说明随着载荷的增加磨损机制发生了转化。由图还可以看到, 飞灰颗粒的加入起到了改善复合材料的耐磨性及推迟复合材料向严重磨损转变的作用。

图 1(b) 显示了铝基飞灰复合材料和铝基体的

① 收稿日期: 2002-10-22; 修订日期: 2003-03-10

作者简介: 李月英(1971-), 女, 博士研究生。

通讯联系人: 李月英, 吉林大学材料学院金相教研室; 电话: 0431-5705874; E-mail: lyy710413@sina.com

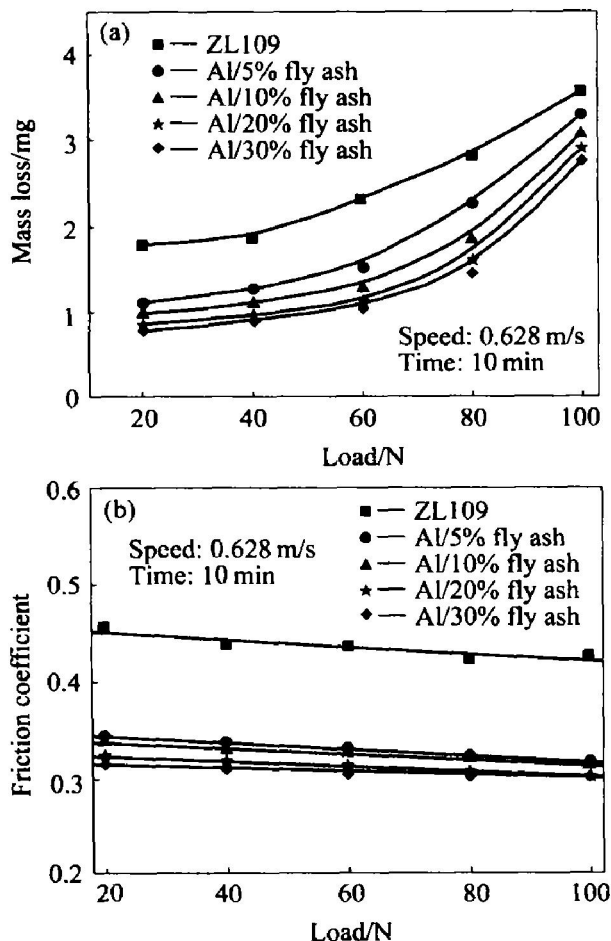


图 1 铝基飞灰复合材料及
基体铝合金的摩擦磨损特性

Fig. 1 Friction and wearing behavior of
Al/fly ash particles reinforced
MMCs and Al matrix

摩擦因数随实验载荷变化的关系曲线。复合材料和铝基体的摩擦因数随实验载荷增加略有减小的趋势,但基本趋于稳定。并且复合材料的摩擦因数均低于铝基体,随飞灰含量的增加复合材料的摩擦因数略有降低。载荷是通过接触面积的大小和变形程度来影响摩擦磨损特性的^[6, 7]。载荷增加使两接触表面的真实接触面积增加,变形程度加剧,并且还使产生的磨损粒子增多且不易从接触区排出,从而载荷增加使磨损加剧。滑动摩擦过程中金属表面处于弹塑性接触状态,由于实际接触面积与载荷的非线性关系,使得摩擦因数随着载荷的增加而有所降低。

2.2 磨损亚表层显微硬度的变化

利用 HX-1000 显微硬度计测试了铝合金及飞灰含量为 20% 的铝基复合材料磨损试样亚表层显微硬度随深度的变化情况。测试结果如图 2 所示。由图可见铝合金和铝/20% 飞灰复合材料的亚表层

中均有一硬化层,复合材料亚表层的硬度明显高于铝基体亚表层的硬度。亚表层硬度表征材料的应变硬化水平,深度变化则表示发生塑性变形区的尺寸。在摩擦过程中,材料亚表层经历应变硬化而使硬度有所提高。这种高硬度的硬化层可以阻碍亚表层的塑性变形,从而使复合材料具有比铝基体优越的耐磨性^[8, 9]。

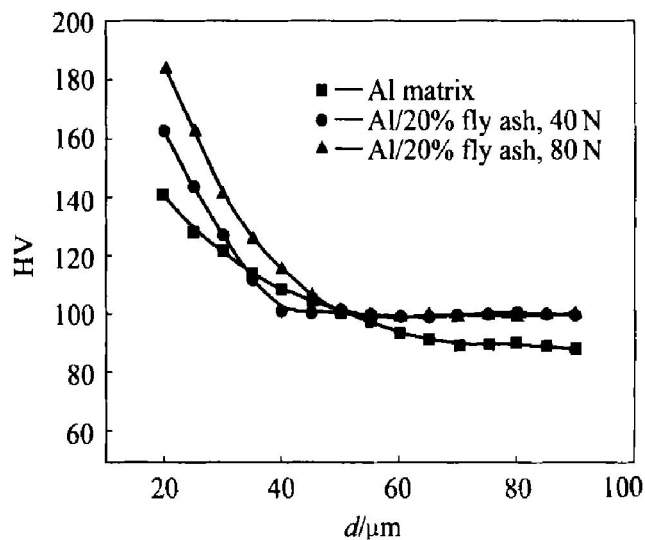


图 2 显微硬度随深度的变化

Fig. 2 Variation of Vickers micro-hardness
with depth

3 摩擦磨损机理

3.1 摩擦表面层的形成

材料的摩擦表面和亚表面物理化学性能决定了材料的摩擦磨损行为。摩擦表面层理论认为:在摩擦副 2 个表面的相互作用下,材料表面将产生一个不同于基体材料的表面层。该层在形成过程中有物理作用,如塑性变形、固态相变和晶粒碎化;也有化学作用,如摩擦副之间形成化合物、材料的氧化和腐蚀等。在各种因素的综合作用下,摩擦表面层的形态、成分和性能存在非常大的差异。常见的有两种情况:一种是主要由塑性变形层组成的摩擦表面层;另一种是主要由表面涂抹层组成的摩擦表面层。

本实验过程中在较低载荷下复合材料的磨损表面观察到存在一亮黑色的摩擦表面层,厚度约在几百纳米到几微米之间。图 3, 4 显示了在低载荷(20 N)下 Al/20% 飞灰复合材料的磨屑和磨损表面形貌及其能谱分析结果。可见该摩擦表面上存在一含有 Fe 元素及其氧化物的摩擦转移层,此时的磨屑形貌为块状,尺寸约为几个微米。通过该复合材料

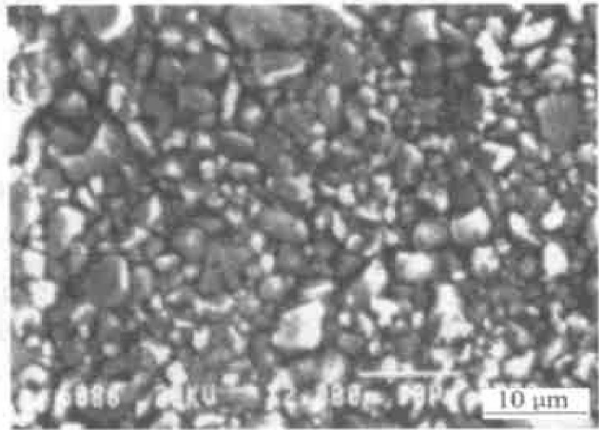


图 3 Al/20% 飞灰复合材料的磨屑形貌

Fig. 3 SEM micrograph of fragments of Al/20% fly ash particles reinforced MMCs (Load 20 N)

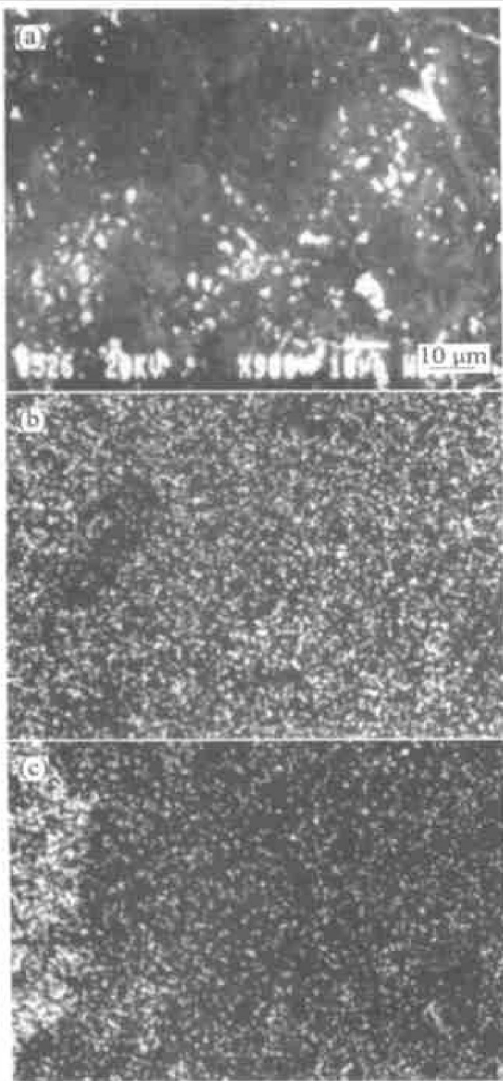


图 4 低载荷下 Al/20% 飞灰复合材料磨损表面形貌及能谱分析

Fig. 4 Morphology of worn surface and EDX images for Al/20% fly ash particles reinforced MMCs (a) —Worn surface; (b) —EDX analysis of Fe; (c) —EDX analysis of O (Load 20 N)

的磨面进行 X 射线衍射分析可知, 摩擦过程中摩擦表面确实产生了含 Fe(主要为 α - Fe_2O_3 的形式) 的摩擦转移层(图 5) 。Alpas 等^[10-12] 在对 SiC 颗粒增强铝基复合材料的研究中也观察到了同样的摩擦转移层。该摩擦表面层的存在就像在摩擦表面形成了一层硬的保护膜, 从而使复合材料的整体磨损率减小。当载荷增加到 60~ 80 N 时, 复合材料的磨损曲线上出现转折点, 说明此时复合材料的磨损机制发生了改变。从磨面及磨屑的观察上可知复合材料的磨损机制已开始转变为剥层磨损和磨粒磨损(如图 6 所示) 。并且此时复合材料的磨面上黑亮色的连续均匀的摩擦转移层已遭到破坏, 从而在较高载荷下摩擦表面层的减摩作用有所减弱。

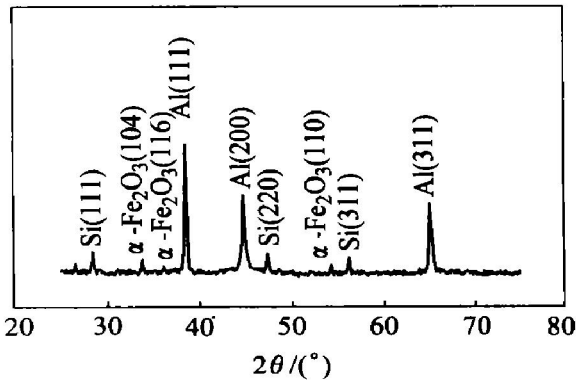


图 5 Al/20% 飞灰复合材料磨面的 XRD 谱

Fig. 5 XRD pattern of worn surface for Al/20% fly ash particles reinforced MMCs (Load 20 N)

3.2 飞灰颗粒在摩擦磨损过程中的作用

经过金相砂纸打磨、抛光后的复合材料表面上飞灰颗粒略凸出铝基体表面, 在较低载荷下, 由于飞灰颗粒的硬度和耐磨性均远高于铝基体, 从而当滑动摩擦开始后, 复合材料表面的铝基体首先被磨损掉, 使飞灰颗粒更加暴露到材料表面而与对偶表面直接接触, 起到了承受载荷、限制对磨材料与铝基体直接接触的作用。当载荷增加到一定值(约为 40~ 80 N) 后, 铝基体对飞灰颗粒的约束力不足以抵抗摩擦力对它的作用时, 飞灰颗粒就会发生脱落(如图 6(b) 所示) 。当从磨面上脱落下来的飞灰颗粒达到一定的数量之后, 飞灰颗粒在磨损表面就可以起到“滚珠”的作用, 使两接触表面之间的摩擦形式由“二体”摩擦转变为“三体”摩擦, 从而起到了抗磨和降低摩擦因数的作用。

随着飞灰含量的增加, 飞灰颗粒的承载面积加大, 分配到单个飞灰颗粒上的压力将减小, 因而飞灰

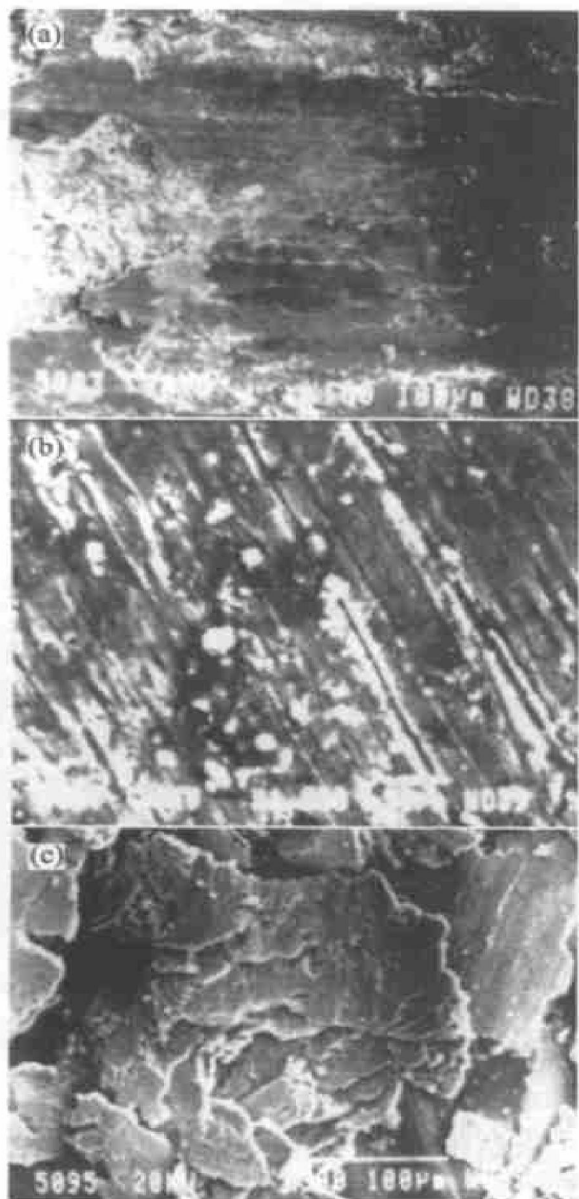


图6 Al/20% 飞灰复合材料的磨面和磨屑形貌

Fig. 6 Morphologies of worn surface and debris of Al/20% fly ash particles reinforced MMCs

(a), (b) —Worn surface; (c) —Worn debris (Load 80 N)

含量越大, 其从轻微磨损向严重磨损转变的载荷也就越高。磨面上的飞灰颗粒越多, 其在磨面上起到的“滚珠”效应也就越明显, 从而其减磨作用也就越明显。故 ZL109/ 飞灰颗粒复合材料的耐磨性随飞灰含量的增加而逐渐增强。

4 结论

1) 在本实验条件下, ZL109/ 飞灰颗粒复合材料的摩擦磨损特性优良, 其耐磨性优于基体铝合金, 摩擦因数低于基体铝合金。

2) 在摩擦磨损过程中, 较低载荷下复合材料的

摩擦表面形成一稳定的摩擦转移层, 该转移层的存在起到降低摩擦因数的作用。在较高载荷下由于该摩擦转移层遭到破坏, 从而影响了其减磨作用的发挥。

3) ZL109/ 飞灰颗粒复合材料中镶嵌在基体中的飞灰颗粒在摩擦磨损过程中主要起到承受载荷、限制对磨材料与铝基体直接接触、阻碍基体塑性变形的作用。在摩擦磨损过程中, 从基体中脱落下来的飞灰颗粒在两对磨面之间可以起到“滚珠”的作用, 形成“三体”磨损, 从而起到减摩的作用。

REFERENCES

- [1] 吴人洁. 金属基复合材料的发展现状与应用前景[J]. 航空制造技术, 2001(3): 19-21.
WU Renjie. Development situation and application prospects of metal matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2001(3): 19-21.
- [2] 姜龙涛, 武高辉, 孙东立, 等. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 复合材料中颗粒粒径与形态对组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(3): 516-519.
JIANG Longtao, WU Gaohui, SUN Dongli, et al. Effect of particle size and morphology on microstructure and properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(3): 516-519.
- [3] 秦蜀懿, 张国定. 改善颗粒增强金属基复合材料塑性和韧性的途径与机制[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(5): 621-629.
QIN Shuyi, ZHANG Guoding. Methods and mechanisms to improve ductility and toughness of particle reinforced metal matrix composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(5): 621-629.
- [4] Clyne T W, Withers P J. An Introduction to Metal Matrix Composites[M]. Cambridge: Syndicate of University of Cambridge Press, 1993. 2-243.
- [5] Lee J C, Lee J I, Lee H I. Methodologies to observe and characterize interfacial reaction products in $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p/\text{Al}$ and SiC_p/Al composites using SEM, XRD, TEM[J]. Scripta Materialia, 1996, 35(6): 721-726.
- [6] Sannino A P, Rack H J. Dry sliding wear of discontinuously reinforced aluminum composites: review and discussion[J]. Wear, 1995, 189(1-2): 1-19.
- [7] Wang R M, Surappa M K, Tao C H. Microstructure and interface structure studies of SiC_p -reinforced Al(6061) metal-matrix composites[J]. Mater Sci Eng A, 1998, 254(1-2): 219-226.
- [8] Bai M W, Xue Q J, Guo H F. Reciprocal sliding wear of SiC particle reinforced Al-Cu aluminum matrix composites against

- stainless-steel[J]. Wear, 1996, 194(1-2): 126-136.
- [9] Deuis R L. Dry sliding wear of aluminum composites—a review[J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(4): 415-435.
- [10] Zhang J, Alpas A J. Wear regimes and transitions in Al_2O_3 particulate reinforced aluminum-alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1993, 161(2): 273-284.
- [11] Alpas A T, Zhang J. Effect of SiC particulate reinforcement on the dry sliding wear of aluminum-silicon alloys (A356) [J]. Wear, 1992, 155(1): 83-104.
- [12] Wilson S, Alpas A T. Wear mechanism map for metal matrix composites [J]. Wear, 1997, 212(1): 41-49.

Friction and wearing behavior of aluminum matrix fly ash particles reinforced composites

LI Yue-ying, LIU Yong-bing, CAO Zhan-yi

(Department of Materials Science and Engineering,
Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The friction and wearing behavior of ZL109/ fly ash particles reinforced MMCs made by squeeze casting were investigated under different conditions. The results indicate that the wear resistance of the composites is improved as fly ash particles are mixed. Comparing the composites with its matrix alloy, the formers have the lower friction coefficient. Under lower loads, a tribolayer is formed on the worn surface, which contributes to the decreasing of the friction coefficient. Under higher loads, the tribolayer is destroyed and then affects its effect of decreasing the friction coefficient. Fly ash beset in the MMCs acts as supporting load and limiting the direct contact between Al matrix and the steel slider. Fly ash falling off acts as “rolling ball”, forms the “three body” friction on the worn surface, which contributes to improve the wearing resistance of the MMCs.

Key words: aluminum matrix composites; fly ash particles; wearing resistance; wear mechanism

(编辑 陈爱华)