

# SiC颗粒增强物对铜基复合材料磨损行为转变的影响\*

## Effect of SiC Particulate Reinforcement on the Wear Transition of Copper Matrix Composite

湛永钟,解浩峰,史小波,曾建民

Zhan Yongzhong, Xie Haofeng, Shi Xiaobo, Zeng Jianmin

(广西大学有色金属材料及其加工新技术教育部重点实验室,广西南宁 530004)

(Key Laboratory of Nonferrous Metals and New Processing Technology, Ministry of Education, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

**摘要:**采用粉末冶金结合热挤压的工艺制备 SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料,研究 SiC 颗粒增强物对铜基复合材料在不同载荷条件下磨损行为转变的影响规律;并与纯铜进行比较,探讨颗粒增强物对材料磨损行为影响的机理。结果表明, SiC 颗粒的加入提高了铜基复合材料的耐磨性,延缓了高载荷条件下严重磨损的发生。在低于临界转变载荷时,复合材料的磨损表面形成硬度很高的机械混合层(MML),改变了摩擦副的接触形式,对复合材料起到保护作用。高载荷条件下, SiC 颗粒增强物可有效减轻亚表层的塑性变形量和粘着磨损程度,提高了材料发生严重磨损的临界转变载荷,有利于材料在高载荷滑动条件下的应用。

**关键词:** 复合材料 铜 磨损行为 转变载荷 SiC 颗粒

中图分类号: TG146.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2005)04-0295-05

**Abstract** SiC<sub>p</sub>/Cu composite was fabricated by powder metallurgy plus hot extrusion method while studying the effect of particulate addition on the wear transition of copper matrix composite. It was compared with the pure copper specimens to investigate the wear mechanism. The experimental results showed that the incorporation of SiC particulates improved the wear resistance and delayed severe wear under high applied loads. When the applied load was lower than the transition load, a hard mechanically mixed layer (MML) was formed on the worn surface of the composite. MML protected the composite in the wear process by changing the contact mode of the tribo-system. At high applied load, SiC particulate reinforcement effectively decreased the plastic deformation of subsurface region, therefore, alleviated adhesive wear and significantly improved the wear resistance.

**Key words** matrix composite, copper, wear behavior, transition load, SiC particle

铜具有导电、导热性能优异,耐蚀性和工艺性能优良等特点,是广泛应用于各工业部门的导电、导热功能材料。但铜的强度低,耐磨性差,且高温下易软化变形,因而其应用受到了限制。颗粒增强金属基复合材料具有良好的耐磨性、高的高温力学性能和较低的

热膨胀系数,且制备工艺简单、成本较低,因此近年来发展迅速<sup>[1~3]</sup>。在铜基体中加入 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiB<sub>2</sub>、TiC 等高力学性能的颗粒增强物,可在保持铜良好传导性能的前提下,提高材料的强度和耐磨性<sup>[4,5]</sup>。然而,目前关于颗粒增强金属基复合材料摩擦磨损行为的研究中,对严重磨损阶段的机制报道很少。SiC 颗粒具有强度大、模量高、成本较低的优点,是金属基复合材料最常采用的非连续增强物之一。本文采用粉末冶金结合热挤压的工艺制备 SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料,研究 SiC 颗粒增强物对铜基复合材料在不同载荷条件下磨损行为转变的影响规律;并与纯铜进行比较,探讨颗粒增强物对材料磨损行为影响的机理,以期开发新型的

收稿日期: 2004-12-17

修回日期: 2005-07-28

作者简介: 湛永钟(1975-),男,广西南宁人,工学博士,主要从事电子功能材料、结构功能一体化复合材料、相图、相结构等方面的研究。

\* 广西教育厅(桂教科研(2004)20号)、广西青年科学基金(桂科青0542011)和有色金属材料及加工新技术教育部重点实验室开放基金课题(kfj200501)联合资助。

## 1 材料制备与实验方法

### 1.1 样品制备

实验选用的基体原料为粒度小于  $4\mu\text{m}$  纯度高于 99.7% 的电解铜粉;  $\text{SiC}$  颗粒增强物的平均尺寸为  $1\mu\text{m}$ 。将 10% 体积分数的  $\text{SiC}$  粉末与电解铜粉进行配比,混合均匀后冷压成坯,然后在分解氢还原气氛中烧结,最后热挤压成直径  $\varnothing 12\text{mm}$  的  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料棒材。为了进行性能的比较,也以同样的工艺参数制备了纯铜样品。制作的纯铜和复合材料样品尺寸均为  $6\text{mm}\times 7\text{mm}\times 16\text{mm}$ ,试验前  $7\text{mm}\times 16\text{mm}$  的工作面均经 800 号砂纸细磨,并用丙酮超声波清洗。

### 1.2 实验方法

干摩擦试验在 MM-20 磨损试验机上进行,对磨钢环为 GCr15 (硬度  $62\pm 2\text{HRC}$ ),滑动速度  $0.42\text{m/s}$ ,载荷范围为  $20\sim 220\text{N}$ ,相对滑动距离为  $400\sim 2000\text{m}$ 。按 GB12444.2-9 (测磨痕宽度,并转换为磨损体积。采用扫描电镜观察材料的磨损表面形貌和亚表层组织,用能谱分析磨损表面的成分;用 FischerScope 力学探针测定磨损亚表层的显微硬度值。

## 2 结果与分析

### 2.1 载荷和滑动距离对磨损率变化的影响

从图 1 可见,随着滑动距离的增加,两种材料的磨损量都呈线性增加,但  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料具有比基体材料更低的磨损体积损失。当载荷较低时 ( $40\text{N}$ ),两种材料的体积磨损量相差较小,见图 1(a);当载荷为  $100\text{N}$  时,磨损量之差显著增加,铜的体积磨损量为  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料的 6 倍以上,见图 1(b)。

从图 2 可见,磨损率均随着载荷的增加而逐渐变大,两种材料都分别在某一载荷范围内发生磨损率突变。其中  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料发生突变的临界载荷比纯铜的高得多,表明  $\text{SiC}$  颗粒增强物的加入不但提高了复合材料的耐磨性,也延缓了高载荷条件下严重磨损的发生。

### 2.2 磨损表面形貌分析

由图 3 可见,在低于临界载荷时,磨损表面的特征主要为平行于滑动方向的犁沟和周围的转移层(深色区域)组成(图 3a)。能谱分析结果表明,该转移层富含 Fe、Cu、O、Si 和 C 等,Fe 元素的存在说明对磨钢环表面上有物质转移到了  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料的磨损表面上。由于在磨损过程中该层物质被反复混合、研磨,因而被称为机械混合层 (MML)<sup>[4]</sup>。进一步的观察发现, MML 在磨损过程中会发生剥落而留下凹陷的剥落

区(图 3b),其变化过程影响着  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料的磨损行为。在高于临界转变载荷时,磨损表面没有 MML 层,主要是平行于滑动方向的较深且宽大的

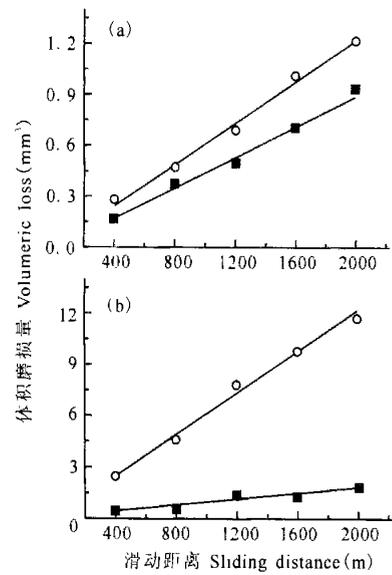


图 1 不同载荷条件下的体积磨损量

Fig. 1 The volumetric loss under different applied loads

(a) 40N; (b) 100N

—○—: 纯铜; —■—:  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料

—○—: Cu; —■—:  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  composite.

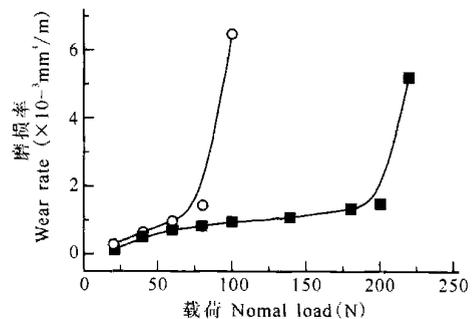


图 2 载荷对材料磨损率变化的影响

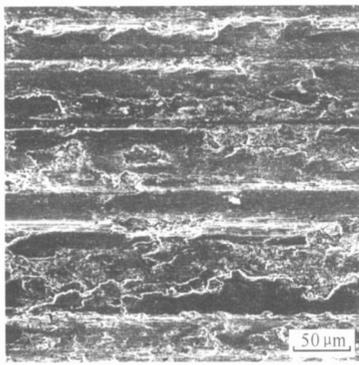
Fig. 2 The effect of applied load on the transition of wear rate

—○—: 纯铜; —■—:  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料

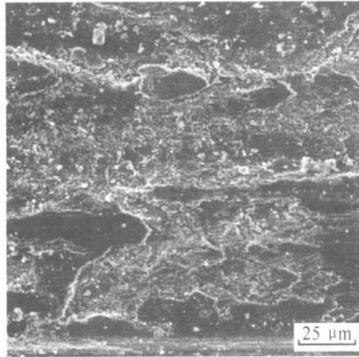
—○—: Cu; —■—:  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  composite.

犁沟(图 3c);犁沟中的表层材料沿相对滑动方向发生变形而呈层状(图 3d),表明在严重磨损阶段  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料受到配偶件的推碾作用;亚表层发生较大的塑性变形并遭到破坏是磨损率突然增加的主要原因。

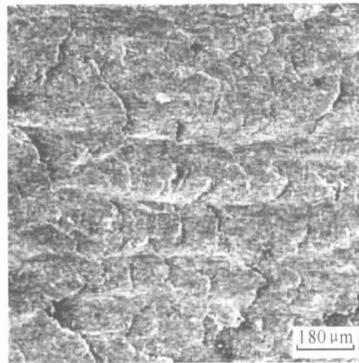
比较两种材料在各自的严重磨损阶段配偶件的表面形貌,可以发现,都有材料转移到了配对的钢环表面上,如图 4 所示,因此,粘着磨损是这一条件下主要的磨损机制之一。与纯铜试样相比,和  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料配对的钢环表面粘着物较薄,以细小的条状沿滑动方向分布。这一结果说明,  $\text{SiC}$  颗粒增强物不但



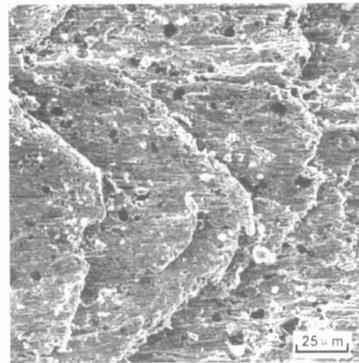
a



b



c



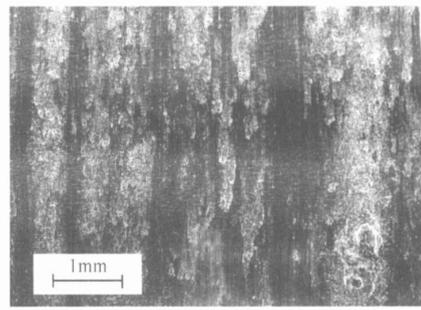
d

图3 不同载荷条件下  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料的磨损表面形貌

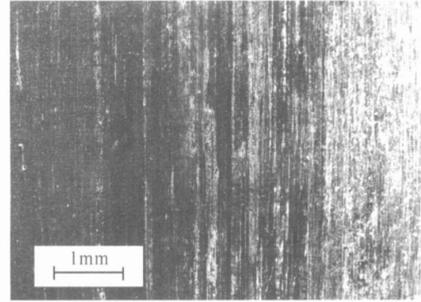
Fig. 3 Morphologies showing the worn surfaces of  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  composite under different applied loads

a. 100N, 低倍观察; b. 100N, 高倍观察; c. 220N, 低倍观察; d. 220N, 高倍观察.

a. 100N, low magnification; b. 100N, high magnification; c. 220N, low magnification; d. 220N, high magnification.



a



b

图4 严重磨损时的配偶件表面形貌

Fig. 4 Surface morphologies of the counterface in severe wear

a. 纯铜; b.  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  复合材料.

a. Cu; b.  $\text{SiC}_p/\text{Cu}$  composite.

提高了材料发生严重磨损的临界转变载荷,而且也减少了严重磨损阶段粘着磨损的发生,有利于材料在高载荷滑动条件下的应用.

### 2.3 磨损亚表层观察分析

由图5可见,当载荷小于临界转变值时,磨损表面覆盖着一转移层(即MML)(图5a).在MML以下的亚表层区域存在沿滑动方向的显微裂纹,说明裂纹形核、扩展是该试验条件下 $\text{SiC}_p/\text{Cu}$ 复合材料破坏的主要机制之一.发生严重磨损时,磨损表面上没有MML的存在,材料由于被推碾而以层状沿滑动方向平移流动,平移层与基底之间可观察到显微裂纹(图5b).

对载荷为100N时纯铜和 $\text{SiC}_p/\text{Cu}$ 复合材料的磨损剖面进行了显微硬度的测定,发现材料的亚表层区域存在一个硬度梯度(图6).磨损亚表层的硬度升高是由于配偶件的摩擦作用而造成的加工硬化引起的,因此研究该区域的硬度变化规律可以反映出材料磨损时的塑性变形特征.可以发现, $\text{SiC}_p/\text{Cu}$ 复合材料的加工硬化区厚度比基底材料的小,说明颗粒增强物提高了材料的力学性能,有效减小了亚表层的塑性变形量.值得注意的是, $\text{SiC}_p/\text{Cu}$ 复合材料表面MML层的硬度很高,超过了材料硬度的4倍.

### 2.4 机理分析

由前面的结果可知,粘着磨损是导致纯铜在载荷

达到 100N 时其磨损率急剧增加的主要原因。对环-块式磨损试验,初始的接触面积很小(最初为线接触形式),当外载荷较大时,接触面承受的压力很大,使

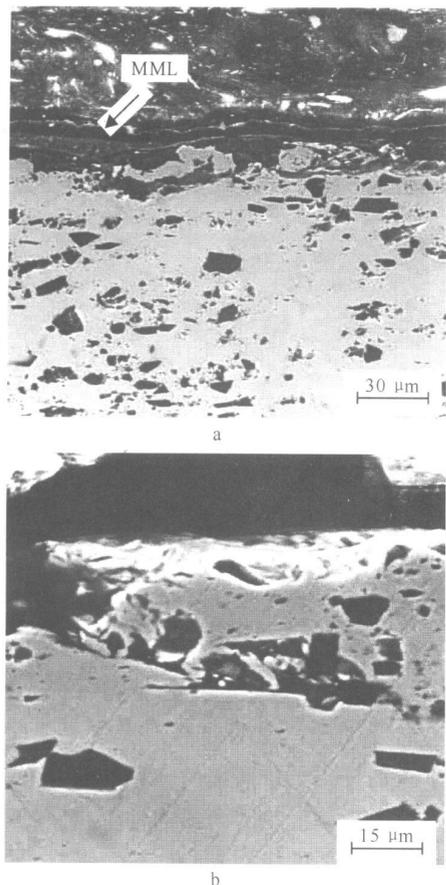


图 5 SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料在不同载荷条件下的磨损剖面形貌

Fig. 5 Cross sections showing the subsurface region of the composite under different applied loads

a. 100N; b. 220N.

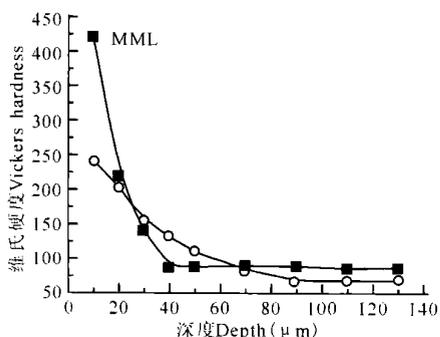


图 6 材料亚表层区的显微硬度梯度

Fig. 6 Hardness gradients in the subsurface region

—○—: 纯铜; —■—: SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料  
—○—: Cu; —■—: SiC<sub>p</sub>/Cu Composite

得闪温很高<sup>[6]</sup>,引起铜表面的微突体在配偶件表面粘着,而在钢环表面形成小块的铜的转移层。随着配偶件表面上铜转移层的增多,部分接触面由铜-钢接触变为铜-铜的同种材料接触,增大了粘着的倾向,使得摩擦系数迅速提高,于是随着滑动距离增加,接触面

温度迅速升高,引起亚表层材料的软化,剪切应变增加,从而在随后的剪切力作用下发生塑性断裂

低于临界转变载荷时, SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料的磨损表面形成一层致密的机械混合层,使部分磨损面的接触形式由 SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料-钢变为 MML-钢。MML 的硬度值很高,对 SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料起到保护作用。同时, SiC 颗粒增强物可使 SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料在高温下保持较高的力学性能,减少亚表层的塑性变形,减缓了高载荷条件下 SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料的软化,从而降低铜基体与钢环的粘着倾向。SiC 颗粒的加入也在一定程度上减少了基体与配偶件的直接接触;凸出于磨损表面的 SiC 颗粒还能将粘着在配偶件表面的材料刮下,这些因素都影响着磨损过程,使 SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料发生严重磨损的临界载荷提高。

随着载荷的增加,试样亚表层区域的塑性变形增大。当外力足以使距磨损表面某个深度的区域中空位密度增加到临界值而发生剪切失稳时,该区域附近将形成严重的紊流层<sup>[7]</sup>。当载荷较低时,该紊流层比较稳定,与被表面 SiC 刮下的 Fe 微粒相混合,将会被反复碾压而形成机械混合层;而当达到材料的临界转变载荷时,由于亚表层的剪切失稳显著增加,该紊流层很容易开裂,则还没有足够的时间来形成 MML,表层的材料已通过裂纹形核、扩展的机制剥落。与 Cu 相比,由于 SiC 颗粒增强物起承载作用,减少了亚表层的塑性变形,使紊流层破坏所需的载荷增大。所以,当载荷超过 100N 后, SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料试样表面仍可形成稳定的 MML,大大提高了材料发生严重磨损的临界转变载荷。

### 3 结束语

采用粉末冶金工艺制备了 SiC 颗粒增强铜基复合材料,并在不同载荷条件下进行的干滑动摩擦磨损实验结果表明, SiC 增强物的加入提高了铜基复合材料的耐磨性,延缓了严重磨损的发生,有利于材料在高载荷滑动条件下的应用。在低于临界转变载荷时, SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料的磨损表面形成硬度很高的机械混合层(MML),改变了摩擦副的接触形式,对 SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料起到保护作用。高于临界转变载荷时, SiC<sub>p</sub>/Cu 复合材料磨损表面没有 MML 形成,但由于 SiC 颗粒增强物可有效减小亚表层的塑性变形量,显著减轻粘着磨损的发生,显著提高了材料发生严重磨损的临界转变载荷。

参考文献:

[1] Zhan Y, Zhang G. Friction and wear behavior of copper  
Guangxi Sciences, Vol. 12 No. 4, November 2005

matrix composites reinforced with SiC and graphite particles [J]. Tribol Lett, 2004, 17(1): 91-98.

- [2] Zhan Y, Zhang G. Mechanical mixing and wear debris formation in the dry sliding wear of copper matrix composite [J]. Tribol Lett, 2004, 17: 581-592.
- [3] Harrigan W C. Commercial processing of metal matrix composites [J]. Mater Sci Eng, 1998, A244: 75-79.
- [4] Liang S H, Fan Z K. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced copper matrix composite using for continuous casting mould [J]. Acta Metall Sinica, 1999, 5(12): 782-786.
- [5] Tjong S C, Lau K C. Abrasive wear behavior of TiB<sub>2</sub>

particle-reinforced copper matrix composites [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A282: 183-186.

- [6] Lim S C, Ashby M F. Wear-Mechanism maps [J]. Acta Metall, 1987, 35(1): 1-24.
- [7] Venkataraman B, Sundararajan G. Correlation between the characteristics of the mechanically mixed layer and wear behaviour of aluminum, A-7075 alloy and Al-MMCs [J]. Wear, 2000, 245: 22-38.

(责任编辑: 韦廷宗 邓大玉)

(上接第 294 页 Continue from page 294)

表 3 MR 阻尼器的参数

Table 3 The parameters of MR damper

$h$	$D$	$d$	$L$	$Z_0$	$f_{y_{max}}$	$f_{y_{max}}$
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(Pa·s)	(kPa)	(kPa)
2	80	40	40	1.0	0	50

表 4 各种结构各楼层的峰值位移

Table 4 The peak displacement of each storey in different structure

楼层 Storey	位移 Displacement (m)		
	原结构 Uncontrolled structure	被动隔震 Passive base- isolated structure	智能隔震 Intelligent base- isolated structure
5	0.1311	0.0903	0.0519
4	0.1197	0.0901	0.0506
3	0.0991	0.0899	0.0491
2	0.0703	0.0894	0.0476
1	0.0364	0.0887	0.0459
隔震层 Base-isolated storey	-	0.0880	0.0449

由表 4 可知, 虽然被动基础隔震结构的顶层峰值位移比原结构减小了 31.12%, 但却放大了底部楼层的位移, 而且隔震层的位移也较大. MR 智能基础隔震结构的顶层峰值位移比原结构减小了 60.41%, 比被动基础隔震结构减小了 42.52%, 底部楼层的位移比被动基础隔震结构还小. MR 智能基础隔震结构的隔震层的峰值位移比被动基础隔震结构减小 48.98%, 而且所需的最大驱动力不过 7.20kN. 可见, MR 智能基础隔震的控制效果优于被动基础隔震的

控制效果.

## 6 结论

本文为研究 MR 智能基础隔震结构的抗震性能, 建立了该混合控制结构的数学模型, 其中应用双线性恢复力模型描述基础橡胶隔震垫的弹塑性特性, 运用模糊半主动控制策略计算 MR 阻尼器的控制力. 具体的算例分析表明: (1) 基础隔震结构设置了 MR 阻尼器后, 基础隔震结构的动力反应进一步减小, 使隔震层的位移控制在允许的范围之内, 从而更好地保护了隔震系统, 使其免遭过度变形和破坏. (2) 混合控制的效果优于单一的被动控制, 所需的驱动力也较小, 容易被实际工程接受.

参考文献:

- [1] 黄建文, 赵斌. 叠层橡胶支座基础隔震建筑的非线性分析 [J]. 西安科技学院学报, 2000, 20(4): 317-321.
- [2] 欧进萍. 结构振动控制——主动、半主动和智能控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 隋莉莉, 欧进萍. 半主动磁流变减振驱动器的工作原理及应用 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(3): 9-13.
- [4] 陈以新. Matlab 在结构动力分析中的应用 [J]. 福建建筑, 1999, (2): 44-47.
- [5] 李士勇. 模糊控制和智能控制理论与应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.

(责任编辑: 黎贞崇)