

# Effects of Load on High-Speed Wear Properties of Recycled WC<sub>p</sub>/Fe-C Functional Composites under Different Wear Velocities

Yan-pei Song<sup>1a</sup>, Yong-kai Li<sup>2b</sup>, Hui-gai Wang<sup>1c</sup>

<sup>1</sup>Mat. Sci. & Eng. College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, China, 471003

<sup>2</sup>Luan Chuan Molybdenum Company, Luan Chuan, China, 471500,

<sup>a</sup>sypei@mail.haust.edu.cn, <sup>c</sup>hgwang\_80@163.com

**Abstract:** Effect of loads on high-speed friction and wear properties of recycled WCP/Fe-C functional composites were investigated by MMS-1G high-speed pin-dish friction-wear tester and TEM at the sliding velocities of 60m/s and 80m/s in present work. Wear mechanism for the recycled functional composites was discussed under the testing condition. The results showed that the wear rates of the recycled functional composites under the two sliding velocities increased with the increasing load, and their friction coefficients decreased with increase of the loads. Under same load, the wear rate for the recycled functional composites was higher at the sliding velocity of 80m/s than that of at the sliding velocity of 60m/s, and the friction coefficient was lower at 80m/s than at 60m/s. Wear mechanism of the recycled functional composites were mainly micro-cutting wearing, grain wearing, surface peeling off at lower loads and oxidation wear and fatigue wear, which is accompanied by adhesive wear at higher load.

**Keywords:** Recycled WC<sub>p</sub>/Fe-C functional composites; External load; High speed dry sliding wear properties; Wear mechanism

## 载荷对不同磨损速度下再生功能复合材料磨损性能的影响

宋延沛<sup>1a</sup>, 李永凯<sup>2b</sup>, 王悔改<sup>1c</sup>

<sup>1</sup>河南科技大学材料科学与工程学院, 洛阳, 中国, 471003

<sup>2</sup>栾川钼业公司, 栾川, 中国, 471500

<sup>a</sup>sypei@mail.haust.edu.cn, <sup>c</sup>hgwang\_80@163.com

**摘要:** 本文采用 MMS-1G 高速销-盘摩擦磨损试验机和带能谱的扫描电镜, 研究了 60m/s 和 80m/s 两种滑动磨损速度下载荷对再生 WC<sub>p</sub>/Fe-C 功能复合材料高速摩擦磨损性能的影响, 探讨了再生复合材料在试验条件下的磨损机理。研究表明, 在 60m/s 和 80m/s 两种滑动磨损速度下, 再生复合材料的滑动磨损率均随外加载荷的增加而增大, 摩擦系数则随外加载荷的增加而减小。在相同载荷下, 再生功能复合材料在 80m/s 滑动速度下的磨损率明显高于 60m/s 滑动速度下的磨损率, 而 80m/s 滑动速度下的摩擦系数则低于 60m/s 滑动磨损速度下摩擦系数。低载荷下再生功能复合材料的磨损机理为犁沟、磨粒磨损和表面层剥落, 高载下为氧化磨损和疲劳磨损, 并伴随有粘着磨损。

**关键词:** 再生 WC<sub>p</sub>/Fe-C 功能复合材料, 外加载荷, 高速滑动磨损性能, 磨损机理

### 1 引言

金属基复合材料由于具有高比强度、良好的导热电性、耐磨性和高温性能以及尺寸稳定性和低膨胀系数等, 因此被誉为 21 世纪极具发展前景的先进材料。随

着金属基复合材料制备技术的成熟及科技工作者努力, 金属基复合材料的应用范围不断扩大, 颗粒增强铁/钢基功能复合材料在高温耐磨环境下的应用也已得到较快的发展<sup>[1-5]</sup>。但在金属基复合材料的回收与再生利用方面的研究报道非常少, 尤其是铁基复合材料的回收与再循环利用几乎是一片空白。因此, 金属基复合材料的回收与再生利用将成为未来材料科学领域发展的必然趋势。

本文主要通过重熔再生方法制备了再生 WC<sub>p</sub>/Fe-C

河南省科技发展项目 (0524250022)

宋延沛 (1957-), 男, 河南武陟人, 教授, 博士, 主要从事耐磨材料及金属基功能复合材料研究

功能复合材料,并在高速干滑动磨损条件下,研究了外加载荷对再生 WC<sub>p</sub>/Fe-C 功能复合材料磨损特性的影响,探索了不同滑动速度下载荷对再生功能复合材料耐磨性的影响规律。并讨论了高速干滑动磨损条件下再生功能复合材料的磨损机理。

## 2 试验方法

再生 WC<sub>p</sub>/Fe-C 功能复合材料的高速磨损试验在 MMS-1G 高速销-盘摩擦磨损试验机上进行, WC<sub>p</sub> 体积分数约 75 vol.%的再生功能复合材料磨损销试样的尺寸为 Φ14×40mm,与销试样配副的摩擦盘采用 3Cr<sub>2</sub>W<sub>8</sub>V 模具钢制造,硬度 HRC51。摩擦盘直径为 φ160mm。销试样先预磨后用丙酮清洗、称重,然后再进行正式磨损试验,销试样的磨损失重量采用 BS201S 电子天平称量,天平精度 0.1mg。根据销试样的磨损失重量,按公式 1 和公式 2 计算销试样的磨损率 W 和摩擦系数 μ。

$$W = \Delta W / L \quad (1)$$

式中, ΔW 为销试样的磨损失重量(g); L 为销试样的滑动摩擦距离(m),即  $L = vt$ , 其中, v 为滑动速度(m/s), t 为滑动时间(s)。

$$\mu = M / RP \quad (2)$$

式中, M 为摩擦力矩(N·m); R 为摩擦力臂(m),即摩擦盘试样的半径; P 为销试样摩擦面的法向载荷(N)。

采用带能谱的 SEM-56 扫描电镜分析再生功能复合材料磨损表面形貌。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 载荷对再生复合材料磨损率的影响

图 1 是 60m/s 和 80m/s 两种滑动磨损速度下再生 WC<sub>p</sub>/Fe-C 功能复合材料的磨损率随载荷的变化规律。由图 1 可知,在两种的滑动摩擦速度下,再生功能复合材料的磨损率均随载荷的增加而增大。当载荷为 50N 时,两种摩擦速度下再生功能复合材料的磨损率分别为  $0.0475 \times 10^{-4} \text{g/m}$  和  $0.06458 \times 10^{-4} \text{g/m}$ , 载荷增加磨损率升高,当载荷增加至 150N 时,再生功能复合材料在两种摩擦速度下的磨损率分别增加到  $0.19694 \times 10^{-4} \text{g/m}$  和  $0.39104 \times 10^{-4} \text{g/m}$ 。相比之下,滑动磨损速度为 60m/s 时,再生功能复合材料磨损率随载荷的变化几乎呈线性增加。磨损速度增加至 80m/s 时,再生功能复合材料磨损率随载荷的变化率明显高

于滑动磨损速度为 60m/s 时的变化率,并且载荷越大,磨损率的变化率增加越快。可见,在干滑动摩擦磨损条件下,载荷和磨损速度对再生功能复合材料磨损率均有显著影响。而磨损速度对再生功能复合材料磨损率的影响大于载荷对磨损率的影响。

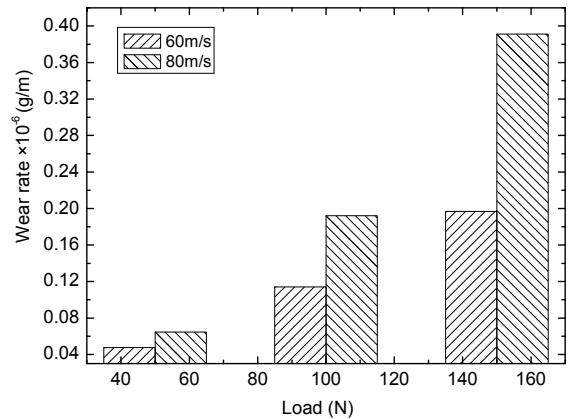


Fig.1 Effects of load applied on wear rate of the recycled functional composites

图 1 载荷对再生功能复合材料的磨损率的影响

### 3.2 载荷对再生复合材料摩擦系数的影响

图 2 是在 60m/s 和 80m/s 两种滑动速度下再生功能复合材料摩擦系数随载荷的变化规律。

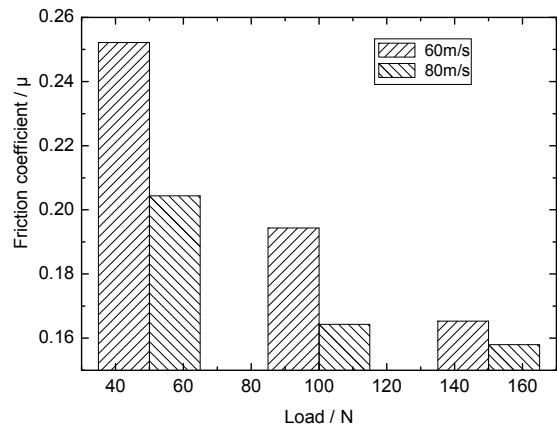


Fig.2 Effects of load applied on friction coefficient of the recycled functional composites

图 2 载荷对再生功能复合材料摩擦系数的影响

由图 2 可以发现,在 60m/s 滑动磨损速度和 50N

载荷下，功能复合材料滑动摩擦系数为 0.2522，载荷增加，滑动摩擦系数急剧降低，当载荷增加到 150N 时，功能复合材料滑动摩擦系数降低至 0.1653；滑动速度增加至 80m/s 时，滑动摩擦系数随载荷的变化规律与滑动速度为 60m/s 时的相同，但滑动摩擦系数明显低于 60m/s 滑动磨损速度下相同载荷的摩擦系数。由此可见，在高速干滑动磨损条件下，滑动摩擦速度提高，再生功能复合材料的摩擦系数减小。

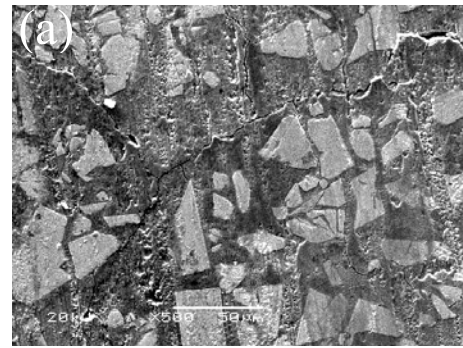
### 3.3 磨损形貌观察及磨损机理探讨

再生 WC<sub>p</sub>/Fe-C 功能复合材料销试样在高速干滑动摩擦磨损下的磨损表面形貌见图 3。由图 3 可以看出，在 60m/s 滑动速度和 50N 载荷下，销试样磨损表面基体出现轻微犁沟，并伴有“龟裂”现象（见图 3a），载荷由 50N 增加到 150N 时，销试样磨损表面有明显的氧化磨损和疲劳剥落现象（见图 3c）。

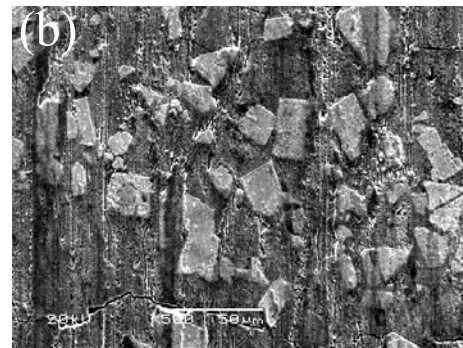
当滑动磨损速度由 60m/s 增加至 80m/s 时，50N 低载荷下磨损试样表面的犁沟明显增多（见图 3a,b），载荷增加磨损表面温度升高，磨损表面 Fe-C 基体软化，WC 颗粒在摩擦载荷作用下被压入亚表层，亚表层内 WC 颗粒体积分数增多，磨损过程中起支撑外加载荷的亚表层硬度提高，微凸体压入磨损表面更加困难，因此，销试样磨损表面变得比较光滑（见图 3d）。

磨损机理不仅与磨损条件有关，而且也与磨损表面氧化物层的结构、性能有很大关系。在较低的磨损速度和较小的载荷下，由于磨损表面的温度较低，磨损试样抵抗塑性变形的能力较强，再加上再生 WC<sub>p</sub>/Fe-C 功能复合材料中未熔的 WC 颗粒在磨损过程中起支撑外加载荷的作用，减少了基体与对磨面微凸体的直接接触，因此，磨损机理主要是磨粒磨损和轻微划痕。

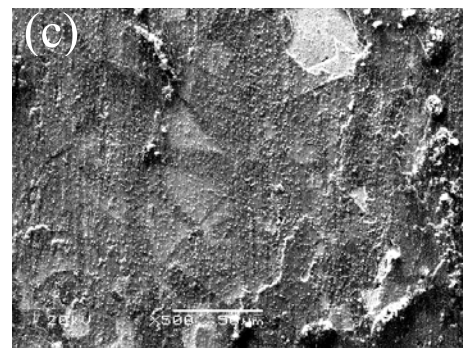
当滑动磨损速度和载荷提高时，磨损表面温度升高，再生功能复合材料磨损试样表面的 Fe 与空气中的氧作用形成氧化膜。一般认为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、FeO 可降低摩擦系数，而 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对降低摩擦系数是不利的<sup>[5]</sup>。由于高速高载磨损条件下，磨损表面温度高达 600℃ 以上，磨损表面产生的氧化物主要为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 FeO，这种氧化物对摩擦表面具有一定的固体润滑作用，使再生复合材料的摩擦系数降低<sup>[6]</sup>。同时磨损表面温度升高导致再生复合材料磨损试样磨损表面基体软化，在磨损载荷反复作用下，使磨损面基体疲劳裂纹产生，最终导致磨损表面氧化膜剥落。由此可见，再生复合材料



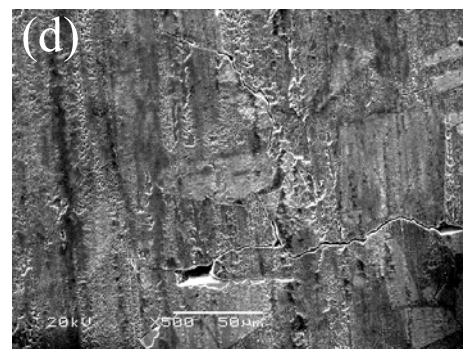
(a) 60m/s, 50N



(b) 80m/s, 50N



(c) 60 m/s, 150N



(d) 80 m/s, 150N

Fig.3 Wear surface morphologies of the recycled functional composites pin specimens (SEM)

图 3 再生功能复合材料销试样的磨损形貌照片 (SEM)

销试样在低载低滑动磨损速度下，其磨损机理主要是磨损过程中摩擦副间脱落的未熔 WC 颗粒和摩擦副微凸体对磨损销试样的磨粒磨损和犁沟磨损，而在高载荷和高滑动磨损速度时，其磨损机理主要是磨损表面氧化磨损和氧化膜的疲劳剥落。

#### 4 结论

1. 在 60m/s 和 80m/s 两种滑动磨损速度下，再生复合材料销试样的磨损率随着载荷的增加均呈快速增加趋势。但 80m/s 磨损速度下功能复合材料的磨损率均高于相同载荷下 60m/s 滑动速度下的磨损率，并且载荷越大，两种磨损速度下的磨损率相差也越大。

2 试验条件下，再生功能复合材料的摩擦系数随载荷的增加而减小，磨损速度提高，摩擦系降低。滑动速度对再生功能复合材料摩擦学性能的影响作用大于载荷对摩擦系数的影响。

3. 在试验条件下，再生功能复合材料在低载荷下的磨损机理主要是犁沟，磨粒磨损和表面剥落，而高载荷下的磨损机理主要是氧化磨损，疲劳磨损和粘着磨损。

#### References (参考文献)

- [1] Song Yan-pei, Li Bing-zhe, Wang Wen-yan et al. Investigation of WC<sub>p</sub>/Fe Composites Roller Ring [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(11): 99-102 (Ch).  
宋延沛, 李秉哲, 王文焱等. WC 颗粒增强铁基复合材料辊环的研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37 (11) : 99-102.
- [2] Song Yan-pei, Mao Xie-min, Dong Qi-ming et al. WC<sub>p</sub>/Fe-C composites with centrifugal casting and their application [J]. Journal of Functional Materials, 2004, 35(6): 761-762/768 (Ch).  
宋延沛, 毛协民, 董企铭等. 离心铸造 WC<sub>p</sub>/Fe-C 复合材料及其应用研究[J]. 功能材料, 2004, 35 (6): 761-762/768.
- [3] Zhang Yuan-hao, Zeng Da-xin. The Preparation Process and the Application in Automobile Industry of Particle Reinforced Metal Matrix Composites [J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2002,16(4):24-28 (Ch).  
张元好, 曾大新. 颗粒增强金属基复合材料的制备及应用[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2002,16(4):24-28.
- [4] Zhao Tian-jun, Meng Fan-ai, Pei Long-gang et al. Fabrication and Properties of Metal-matrix Ceramic Composite Brake for High-speed Rolling Stocks [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2004,28(7):26-28/36 (Ch).  
赵田臣, 孟凡爱, 裴龙刚等. 高速列车金属陶瓷复合材料制动闸片的制备与性能[J]. 机械工程材料, 2004, 28(7):26-28/36.
- [5] Bi Shuang-xu, Song Yan-pei, Wang Yun-fei. Mechanical Properties and Microstructures of WC<sub>p</sub>/Fe-C Recycled Composites[J], China Foundry, 2010, 59(2):157-160 (Ch).  
毕双绪, 宋延沛, 王云飞. WC<sub>p</sub>/Fe-C 再生复合材料的力学性能与显微组织[J]. 铸造, 2010, 59(2):157-160.
- [6] Shao He-sheng, Qu Jing-xin, Xu Xiao-li et al. Friction and Wear [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1992 (Ch).  
邵荷生, 曲敬信, 许小棣, 陈华辉. 摩擦与磨损[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992. 9:120-122.
- [7] Song Yan-pei, Li Luo-li. Effects of sliding velocity on wear properties of WCP/Fe-C functionally graded composites[J]. Journal of Functional Materials, 2006, 37: 660-663 (Ch).  
宋延沛, 李洛利. 滑动速度对 WC<sub>p</sub>/Fe-C 功能梯度复合材料磨损性能的影响. 功能材料, 2006, 37: 660-663.