

# 纳米金刚石/铜基复合材料的摩擦磨损性能研究<sup>1</sup>

刘辉，赵乃勤，师春生，乔志军  
天津大学材料科学与工程学院，天津（300072）  
E-mail：[liuhuibright@yahoo.com.cn](mailto:liuhuibright@yahoo.com.cn)

**摘要：**纳米金刚石具有良好的润滑性及抗磨损性能。将纳米金刚石弥散分布到金属基体中可以得到低摩擦耐磨性良好的金属基复合材料。本文采用粉末冶金的方法制备纳米金刚石弥散分布的铜基复合材料，并对复合材料的微观组织及摩擦磨损性能进行了研究。在 MM—200 型磨损试验机上对块状试样进行油磨实验，对磨材料为 GCr15 钢。结果表明：纳米金刚石均匀的弥散分布在铜基体上；随着纳米金刚石含量的增加，铜基复合材料的摩擦磨损性能得到了明显改善。此外，本文还对纳米金刚石/铜基复合材料在油磨过程中的磨损机理进行了探讨。

**关键词：**纳米金刚石，铜基复合材料，摩擦磨损，粉末冶金

## 1. 引言

摩擦磨损对于机器的性能及使用寿命具有极大的影响，如何降低机器的摩擦磨损一直是材料工作者研究的重点。由爆炸法合成的纳米金刚石具有许多优异的性能，比如良好的分散性、高硬度、良好的润滑性和耐磨性<sup>[1-4]</sup>。因此纳米金刚石被广泛应用于复合涂层、超精密抛光及医学和化学领域<sup>[5-7]</sup>。其中具有较好应用前景的领域之一就是用于耐磨材料。将纳米金刚石弥散分布到金属、陶瓷及高分子基体中，有望得到具有低摩擦良好耐磨性的高性能复合材料<sup>[8]</sup>。K.Okada 等人对所制得的纳米金刚石/铝基复合材料进行磨损实验发现其摩擦系数达到 0.02<sup>[9]</sup>。

本文采用粉末冶金的方法制备纳米金刚石弥散分布的铜基复合材料。在油磨条件下研究不同纳米金刚石含量对于复合材料摩擦磨损性能的影响，并对油磨过程中复合材料的磨损机理进行了探讨。

## 2. 实验方法

实验所用的初始原料为平均晶粒尺寸为 40 μm 的电解铜粉和粒径为 5-10 nm 的纳米金刚石粉。铜粉和纳米金刚石的形貌如图 1 所示。

采用机械球磨的方法将纳米金刚石粉和铜粉混合均匀。将混合粉放入 100 ml 的球磨罐中并放入直径为 10 mm 的玛瑙球，球料比为 9: 10。纳米金刚石的质量百分含量从 0 到 3%。将球磨罐放入行星式球磨机中转速为 1000 rpm 保持 10 h。在油压机用 370 MPa 的压力将混合粉末压制成型保压 2 min。用管式烧结炉对坯坏进行烧结，在 H<sub>2</sub> 保护气氛下加热到 1000 °C 保温 100 min。然后在室温下对烧结后试样在 700 Mpa 下进行复压，之后对所得试样进行性能测试。

采用光学显微镜及透射电子显微镜（TEM）对纳米金刚石/铜基复合材料的微观组织进行表征。在显微硬度仪器上对试样的硬度进行测试，载荷为 100 g 保压 10 s。利用 MM—200 型磨损试验机上对试样进行油磨试验，对磨材料为 GCr15 轴承钢，转速为 0.52 m/s，时间为 1 h，所加载荷分别为 500 N 和 1000 N。滴油速率为 40-50 滴每分钟。利用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜（SEM）对磨损表面进行观察。

<sup>1</sup> 本课题得到天津市自然科学基金（项目编号：05YFJZJC01900）的资助。

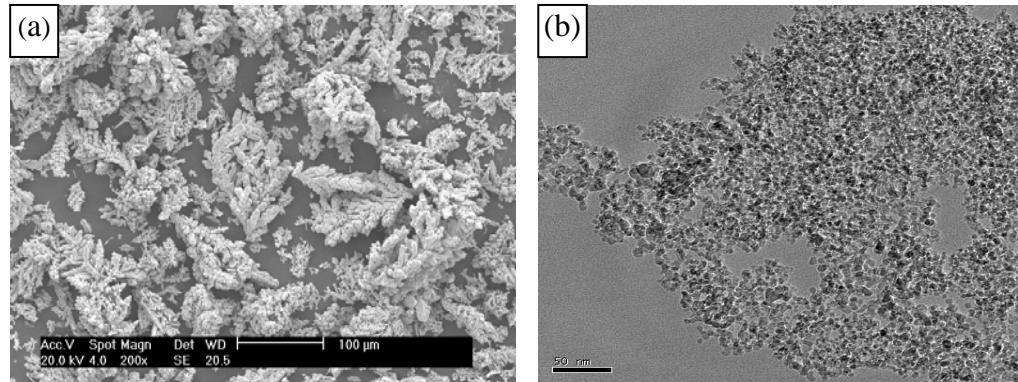


图 1 铜粉 (a) 和纳米金刚石 (b) 的形貌  
Fig.1. Morphologies of (a) copper and (b) ND powders.

### 3. 结果与讨论

#### 3.1 纳米金刚石/铜基复合材料的微观组织，密度和硬度

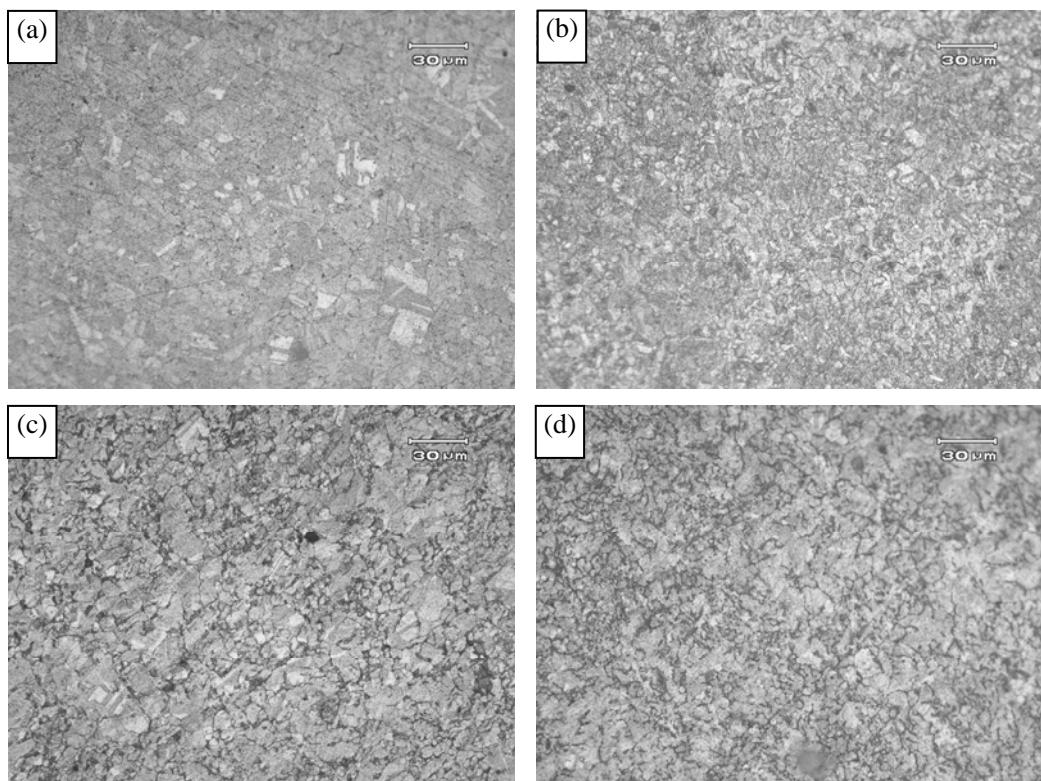


图 2 纳米金刚石/铜基复合材料的光学组织图片: (a)纯铜  
(b) 0.5 wt.% ND, (c) 1 wt. % ND and (d) 3 wt.% ND。

Fig.2. Optical micrographs of ND/Cu composites: (a) pure copper,  
(b) 0.5 wt.% ND, (c) 1 wt. % ND and (d) 3 wt.% ND.

图 2 为具有不同纳米金刚石含量的铜基复合材料的显微组织图片。从图 2 (b) (c) 中可以观察到纳米金刚石均匀的分散到铜基体中。但当纳米金刚石含量达到 3% 时, 与纯铜 (图 2 (a)) 相比, 可以在基体中明显观察到金刚石的团聚现象。这是由于当纳米金刚石含量超过 1% 时, 球磨过程中很难将纳米金刚石的团聚体破碎, 以至于球磨后大量的金刚石团聚体聚集在铜颗粒的表面, 如图 3 所示。因此, 在粉体经过烧结成型后可以观察到

金刚石团聚体分布在铜颗粒周围。

图 4 为金刚石含量 0.5% 的复合材料的 TEM 图片及其 EDS 分析。由图发现纳米金刚石颗粒均匀的嵌入到铜基体中。

图 5 为不同纳米金刚石含量的复合材料的相对密度曲线。随着纳米金刚石含量的增加，复合材料的密度逐渐降低。当纳米金刚石质量分数超过 2% 时，复合材料的相对密度低于 90%。

图 6 为不同纳米金刚石含量的复合材料的显微硬度曲线。随着纳米金刚石含量的增加，纳米金刚石的硬度明显提高。金刚石含量为 3% 时，复合材料的显微硬度达到 130。

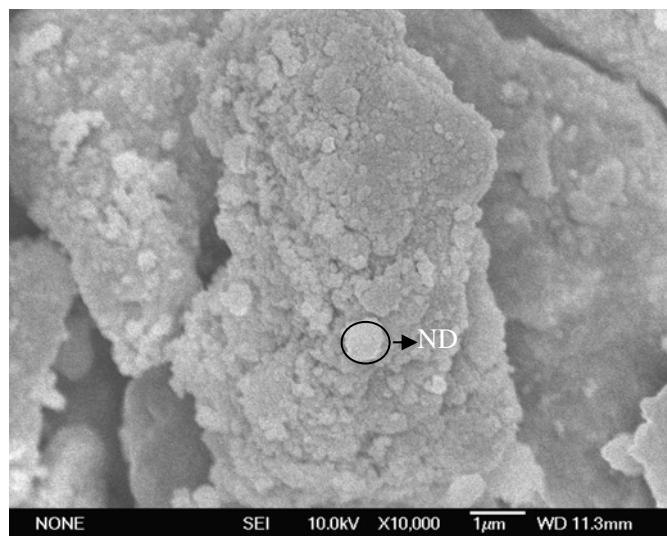


图 3 球磨后混合粉 (3%ND) 的 SEM 图片  
Fig.3. SEM micrograph of mixed powder (3 wt.% ND) after ball-milling at 1000rpm for 10h.

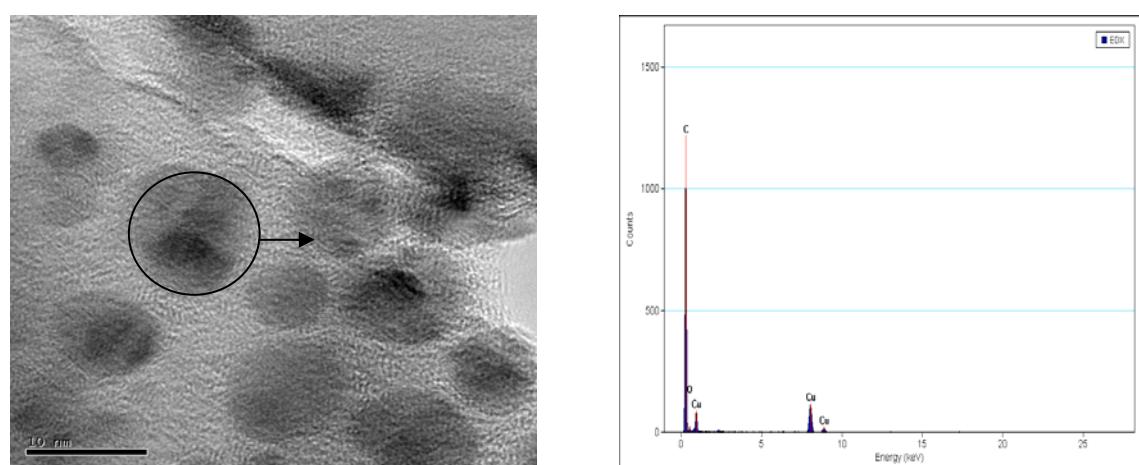


图 4 0.5wt.% ND/Cu 复合材料的 TEM 图片及其 EDS 分析  
Fig.4. TEM micrograph of the 0.5wt.% ND/Cu composite and EDS analysis of the ND particle

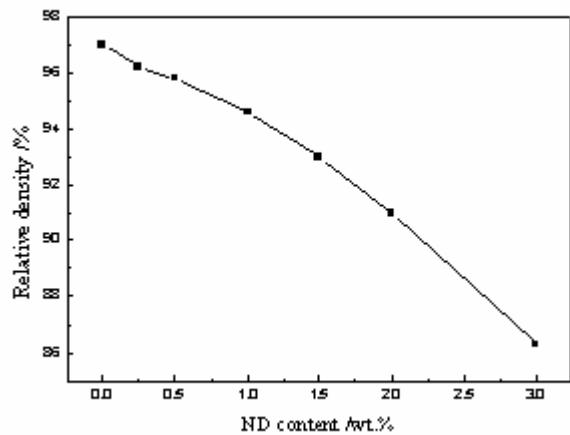


图 5 不同纳米金刚石含量的铜基复合材料的相对密度曲线  
Fig.5. Relative density of Cu composite with various ND content.

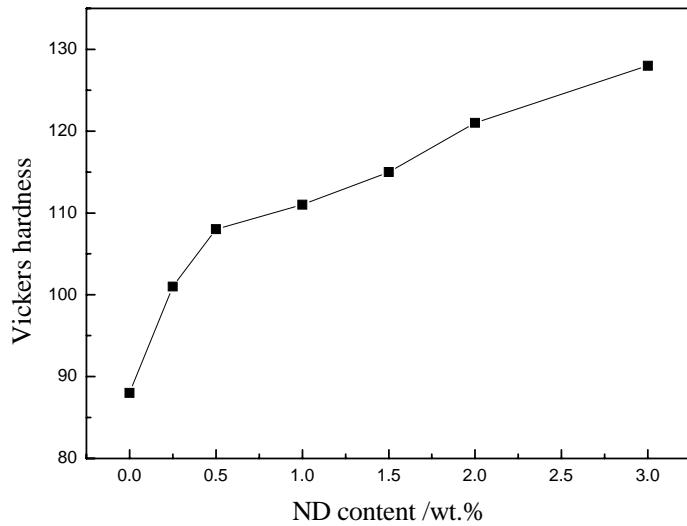


图 6 不同纳米金刚石含量的铜基复合材料的硬度曲线  
Fig.6. Microhardness of Cu composite with various ND content.

### 3.2 纳米金刚石/铜基复合材料的摩擦磨损性能研究

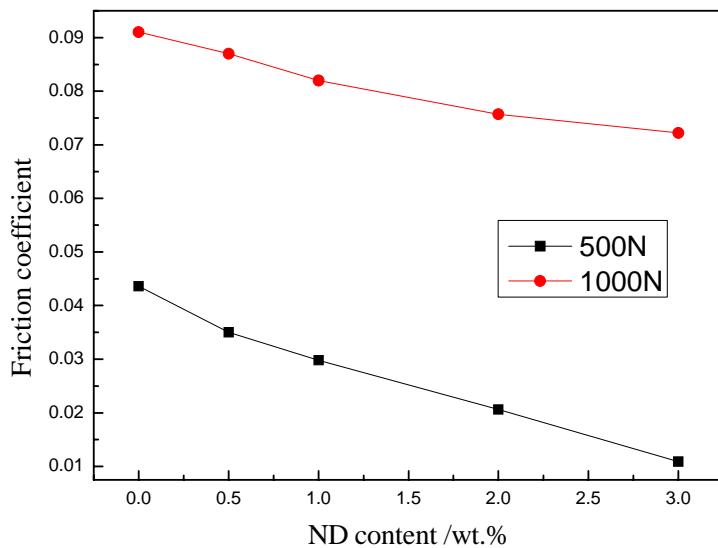


图 7 不同纳米金刚石含量对铜基复合材料摩擦系数的影响  
Fig.7. Effect of weight fraction of ND on the friction coefficient of Cu composite.

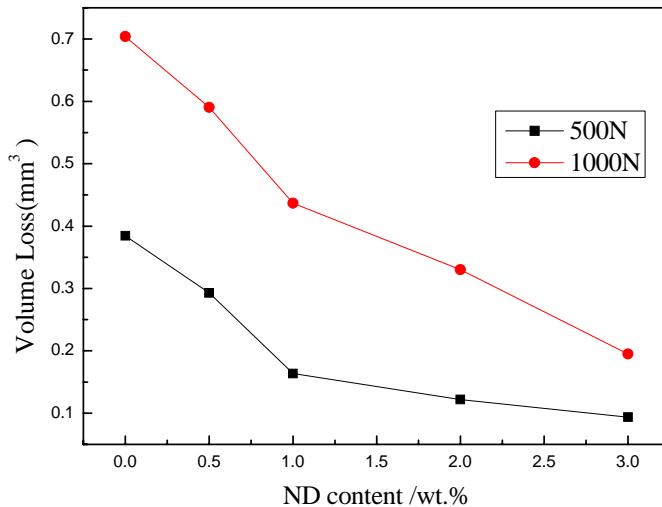


图 8 不同纳米金刚石含量对铜基复合材料磨损体积的影响  
Fig.8. Effect of weight fraction of ND on the volume loss of Cu composite.

图 7 显示了在油磨试验中不同纳米金刚石含量对于复合材料摩擦系数的影响。随着纳米金刚石质量分数的增加，复合材料的摩擦系数显著降低。对于载荷为 500 N 质量分数为 3% 的复合材料的摩擦系数仅为 0.01，只相当于纯铜（摩擦系数为 0.045）的 20%。此外，当载荷从 500 N 增加到 1000 N 时，复合材料的摩擦系数明显提高。

由图 8 可以发现随着纳米金刚石含量的增加，复合材料的磨损量明显降低。这表明在有润滑的条件下，纳米金刚石的加入能够明显提高铜基复合材料的抗磨损性能。

图 9 为分别在 500 N 和 1000 N 载荷下纯铜及复合材料的磨损表面的 SEM 图片。在纯

铜的表面可以明显的观察到较深的磨痕犁沟，如图 9 (a) (b) 所示。随着纳米金刚石含量的增加，复合材料磨损表面的磨痕逐渐变浅，如图 9 (c) (d) 所示。由图 9 (e) (f) 可以发现，当纳米金刚石含量达到 3% 时，磨损表面的犁痕基本消失并且变得相对平滑。

以上结果表明，与纯铜相比，含有纳米金刚石颗粒的铜基复合材料显示出良好的耐摩擦磨损性能。其主要原因在于，在滑动磨损过程中，由于纳米金刚石的高硬度使其在滑动接触面上具有良好的承载能力。随着纳米金刚石含量的增加，金刚石的承载能力增强。在巨大的正压力下，纳米金刚石的团聚体被破碎并且纳米粒子被挤入铜基体的空隙中。结果在复合材料的表面形成了一层纳米尺寸厚度的薄膜。这种硬膜的形成能够有效的降低基体的摩擦磨损。而且随着纳米金刚石含量的增加，使得这层超硬膜具有较好的连续性和均匀性。此外，由于润滑油的存在降低了摩擦面之间剧烈的冲击及接触面的温度，从而很好的保护了这层超硬膜。换而言之，在油润滑的条件下有利于纳米金刚石耐磨性的发挥。因此，在油磨条件下，随着金刚石含量的增加，铜基复合材料的摩擦磨损性能得到明显提高。

#### 4. 结论

- 1.采用粉末冶金法制备了不同金刚石含量的铜基复合材料。纳米金刚石均匀的弥散分布在铜基体中；
- 2.随着纳米金刚石含量的增加，复合材料的显微硬度明显提高；
- 3.油磨试验表明随着纳米金刚石含量的增加，铜基复合材料的摩擦磨损性能得到明显改善。在油润滑的条件下有利于纳米金刚石耐磨性的发挥。

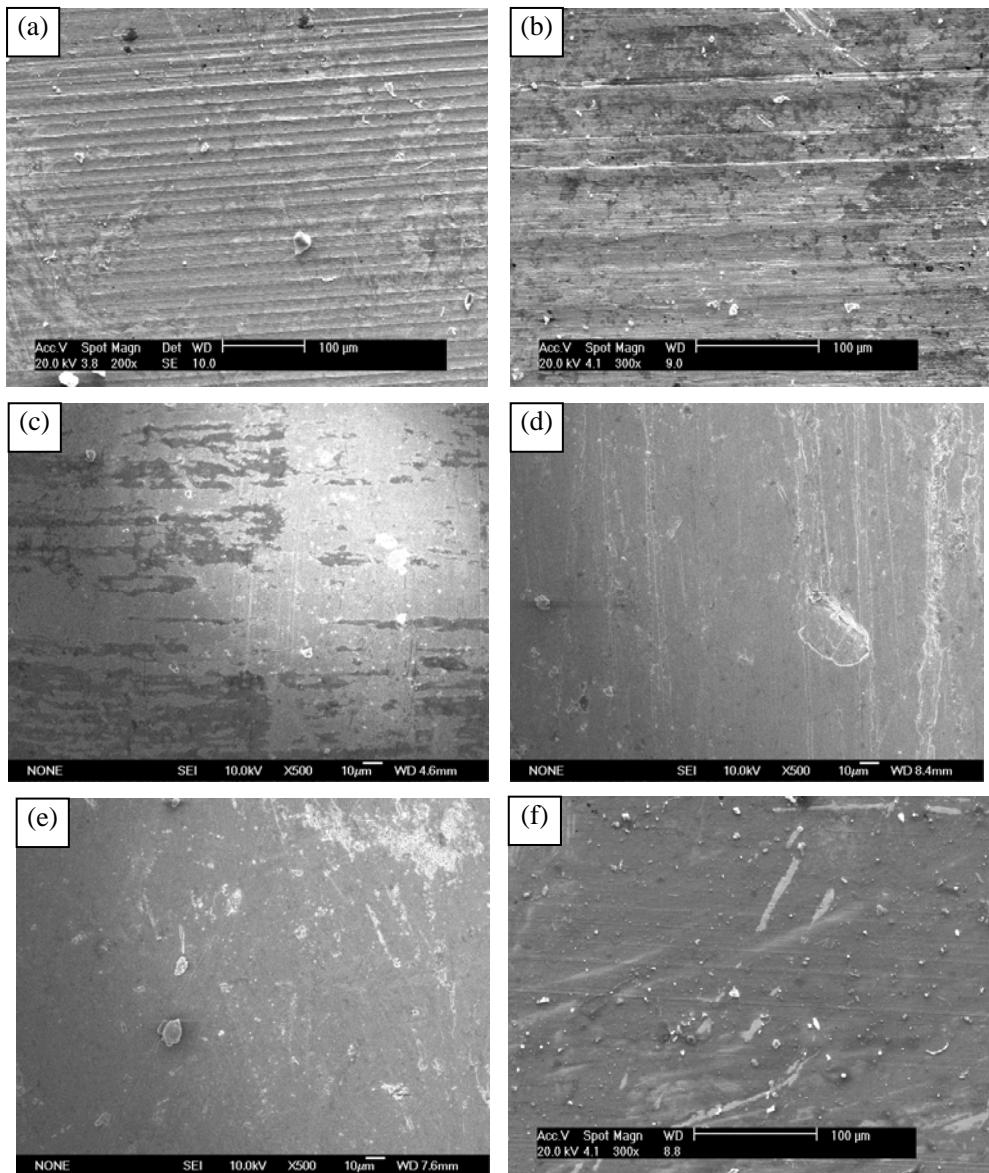


图 9 复合材料的磨损表面: (a) 纯铜-500N, (b) 纯铜-1000N, (c) 1% ND-500N, (d) 1% ND-1000N, (e) 3% ND-500N 和 (f) 3% ND-1000N。

Fig.9. Wear surface of Cu composite: (a) pure copper at 500N, (b) pure copper at 1000N, (c) 1% ND at 500N, (d) 1% ND at 1000N, (e) 3% ND at 500N and (f) 3% ND at 1000N.

### 参考文献

- [1] H. Makita. Ultrahigh particle density seeding with nanocrystal diamond particles [J]. New diamond, 1996, 12: 8-13.
- [2] M. Mayuzuml, R. Imai. in: Proceedings of the ABTEC'92, Tokyo, 1992, pp. 732-736.
- [3] H. Makita. Reducing the grain size for fabrication of nanocrystalline diamond films[J]. Surface Technology, 1996, 47: 914-918.
- [4] Z.J. Qiao, J.J. Li, N.Q. Zhao. Graphitization and microstructure transformation of nanodiamond to onion-like carbon [J]. Scripta Materialia, 2006, 54: 225-229.
- [5] G. Post, et al. Technical modeling in integrated risk assessment of chemical installations[J]. Journal of Applied Chemical, 2002, 75:755-759.
- [6] G.P. Bogatyreva, et al. in: Y. Gogotsi, I. Uvarova (Eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002, pp. 111.
- [7] G.P. Bogatyreva, M.A. Marinich, V.L. Gvyazdovskaya. Diamond - an adsorbent of a new type [J]. Diamond Related Material, 2000, 9:2002-2005.
- [8] K. Hanada, M. Mayuzuml, N. Nakayama. Processing and characterization of cluster diamond dispersed Al-Si-Cu-Mg composite[J]. Journal of Material Processing Technology, 2001, 119:216-221.
- [9] K. Okada, I. Sekigut. Friction and wear properties of nanodiamond diapersed Al-based composite[J]. Journal of Japanese Precision Engineering, 1995, 61(2):171-175.

## Tribological behavior of nanodiamond dispersed Cu composites

Liu Hui, Zhao Naiqin, Shi Chunsheng, Qiao Zhijun

School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin (300072)

### Abstract

Nanodiamond (ND) exhibits excellent lubrication and good wear resistance properties. In the present study, ND dispersed copper composites were fabricated by powder metallurgy method. The microstructures and tribological properties under oil sliding conditions of the Cu composites with various ND content were investigated. The oil sliding tests were carried out with GCr15 steel ring rotating against block-shaped samples. The results showed that the ND particles were homogeneously dispersed in the copper matrix. The anti-friction and wear resistance of the Cu composites were dramatically improved with increasing the weight fractions of ND. Besides, the mechanism of ND on reducing the friction and wear of the composites was discussed.

**Keywords:** Nanodiamond(ND); Copper matrix composite; Tribological properties; Powder metallurgy