

文章编号: 1004-0609(2003)01-0136-05

碳化硼陶瓷的表面形貌和摩擦性能^①

吴芳¹, 王零森²

(1. 五邑大学 化学与环境工程系, 江门 529020; 2. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 用原子力/摩擦力显微镜对碳化硼样品进行了表面形貌的微观分析。在载荷为 1~6 μN 下, 研究了 Si₃N₄ 探针扫描碳化硼表面时摩擦力的分布。结果表明: 摩擦力的变化与扫描处的试样表面形貌有关, 表面形貌变化斜率越大处, 摩擦力增加得越多; 由于试样较平整, 摩擦力的分布是比较均匀的; 碳化硼材料纳米摩擦因数随载荷的增加而显著增加。

关键词: 碳化硼; 原子力/摩擦力显微镜; 表面形貌; 纳米摩擦因数

中图分类号: TQ 174.67

文献标识码: A

碳化硼具有一系列优良的性能: 如密度低, 理论密度仅为 $2.52 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; 硬度高, 是仅次于金刚石和立方 BN 的最硬材料; 化学性质稳定, 是化学性质最稳定的化合物之一; 同时碳化硼还具有很好的力学稳定性和很低的热膨胀系数。基于这些优良的特性, 碳化硼在许多领域得到了广泛的应用^[1]。碳化硼的一个重要用途是通过粉末冶金技术制取耐腐蚀、耐摩擦的碳化硼器件, 以适应各种苛刻条件下对设备结构器件耐磨抗蚀性能的要求^[2, 3]。碳化硼的宏观摩擦学行为在文献[4, 5]中进行了研究。摩擦学就其性质而言属于表面科学的范畴, 其研究的对象是发生在摩擦表面的微观动态行为与变化。纳米摩擦学于 20 世纪 80 年代末期在国际上兴起, 它提供了一种新的思维方式和研究模式, 即从纳米尺度研究摩擦、磨损与润滑, 建立材料微观结构与宏观特性之间的关系, 因此纳米摩擦学更加符合摩擦学的研究规律^[6, 7]。

本文作者首次将原子力显微镜、摩擦力显微镜等先进的纳米摩擦学测试手段用于研究碳化硼材料的纳米摩擦性能, 初步考察了一些主要的变化因素对碳化硼材料纳米摩擦行为的影响。

1 实验

1.1 试样制备

本实验所用试样为热压碳化硼材料。热压条件为: 温度 2 273~2 473 K; 压力 30~40 MPa; 保温

保压时间约 100 s。所得碳化硼试样的性能参数如表 1 所示。在进行纳米摩擦实验前, 试样经粒度 < 1 μm 的金刚石粉精研至宏观表面粗糙度 $R_a < 0.2 \mu\text{m}$, 用蒸馏水反复洗净后, 置于丙酮中用超声波清洗器处理 300 s, 再在蒸馏水中煮沸 10 min, 取出置于空气中干燥待用。

表 1 热压碳化硼材料的基本性能

Table 1 Properties of hot-pressed boron carbide

Density /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Bending strength/MPa	Knoop hardness/GPa	Grain size/ μm	Porosity / %
2 500~2 510	510~520	29.5~30.0	< 1	< 0.1

1.2 实验方法

实验采用 Nano-Scope III型 AFM/FFM 原子力/摩擦力显微镜, 该仪器能同时测得表面形貌和摩擦力。扫描采用 Si₃N₄ 探针, 其针尖半径约为 30 nm。Si₃N₄ 探针的自由端与试样表面接触。在 AFM/FFM 测量过程中, 平行于探针运动方向的扫描速率为 200 nm/s, 垂直于探针运动方向的扫描速率为 2 nm/s。纳米摩擦测量时的扫描范围为 5 μm × 5 μm。测量时扫描范围的选择是随机的。测量在室温(298 K)下于空气下进行, 空气相对湿度为 40%~50%。所用法向载荷(f)分别为 1 μN, 2 μN, 3 μN, 4 μN, 5 μN, 6 μN。

2 结果和讨论

图 1~图 6 是碳化硼表面形貌和在不同载荷下

① 基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(98-A28-11)

收稿日期: 2002-03-24; 修订日期: 2002-05-27

作者简介: 吴芳(1971-), 女, 副教授, 博士。

通讯联系人: 吴芳, 副教授, 广东省江门市五邑大学化工系, 江门 529020;

电话: 0750-3299391; 传真: 0750-3358395; E-mail: 710301-wf@163.com

所得的摩擦力分布的三维图。

2.1 试样的表面形貌

由于实验时扫描区域是随机选取的, 图 1 至图

6 所测的 6 处表面形貌分布图可统计地反映试样的表面形貌状况。由表面形貌分布图可以看出:

1) 试样表面平整。各扫描区域内, 扫描高度距离基准面高度一致, 最凸处与最凹处相差分别只有

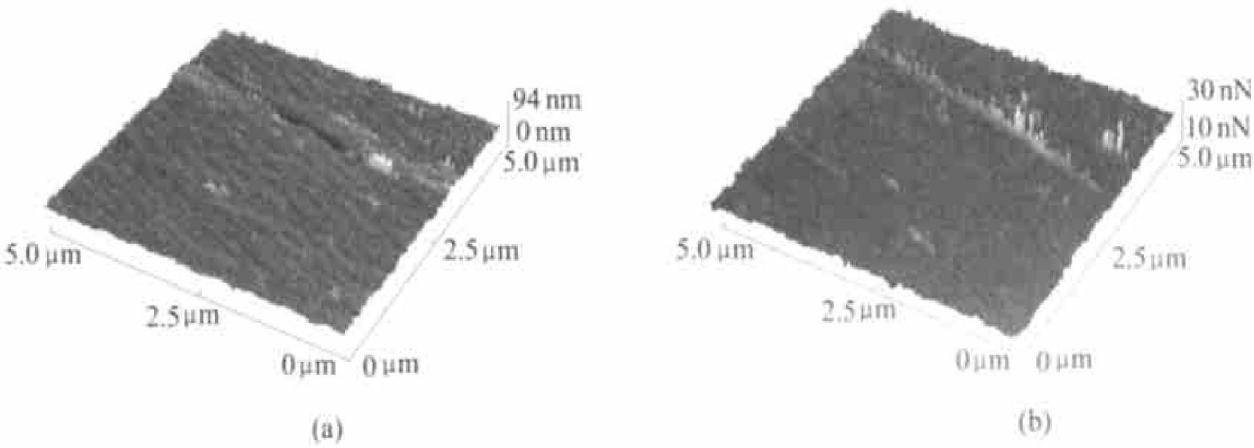


图 1 载荷为 1 μN 时碳化硼试样的表面形貌和摩擦力分布图

Fig. 1 Surface profile and friction force profile for normal load of 1 μN
(a) —Surface profile; (b) —Friction force profile

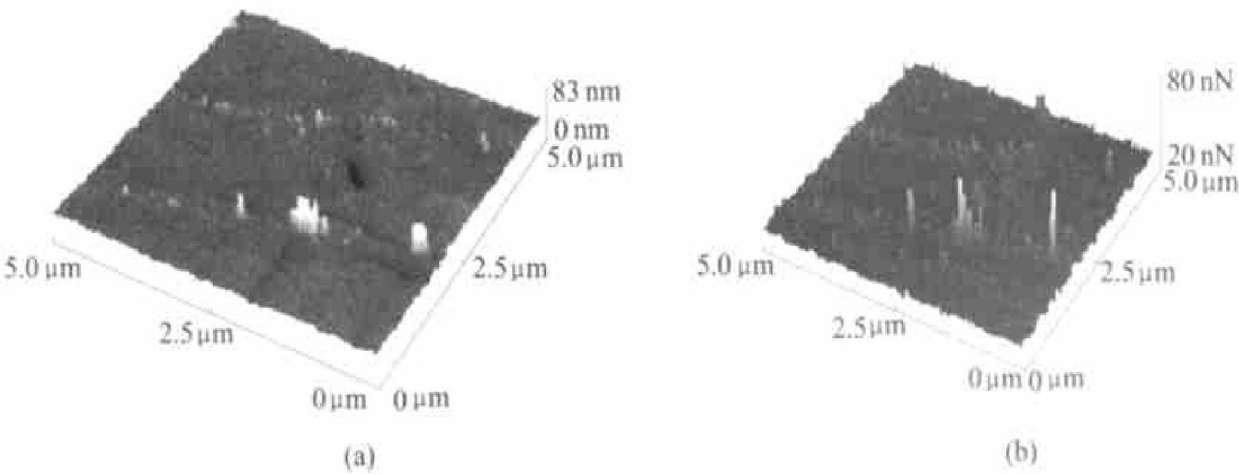


图 2 载荷为 2 μN 时碳化硼试样的表面形貌和摩擦力分布图

Fig. 2 Surface profile and friction force profile for normal load of 2 μN
(a) —Surface profile; (b) —Friction force profile

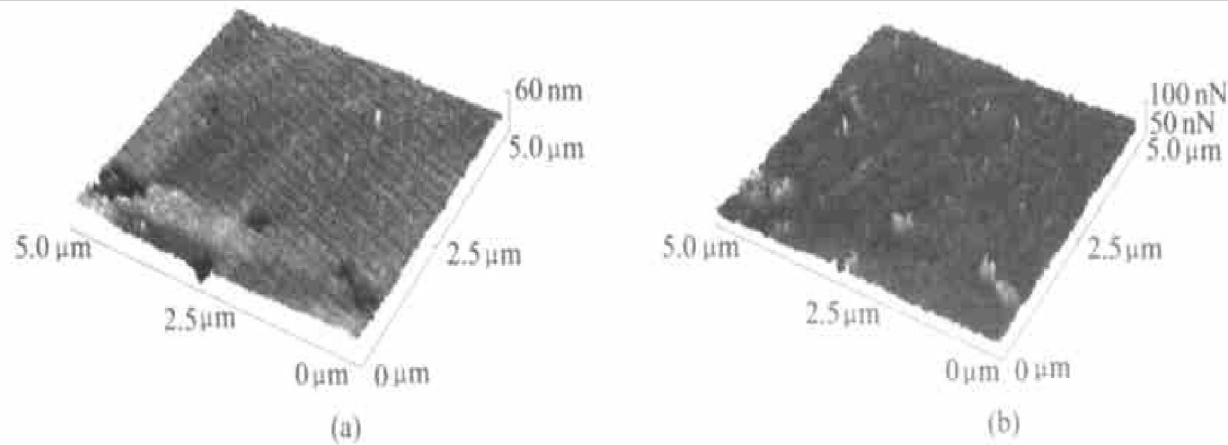


图 3 载荷为 3 μN 时碳化硼试样的表面形貌和摩擦力分布图

Fig. 3 Surface profile and friction force profile for normal load of 3 μN
(a) —Surface profile; (b) —Friction force profile

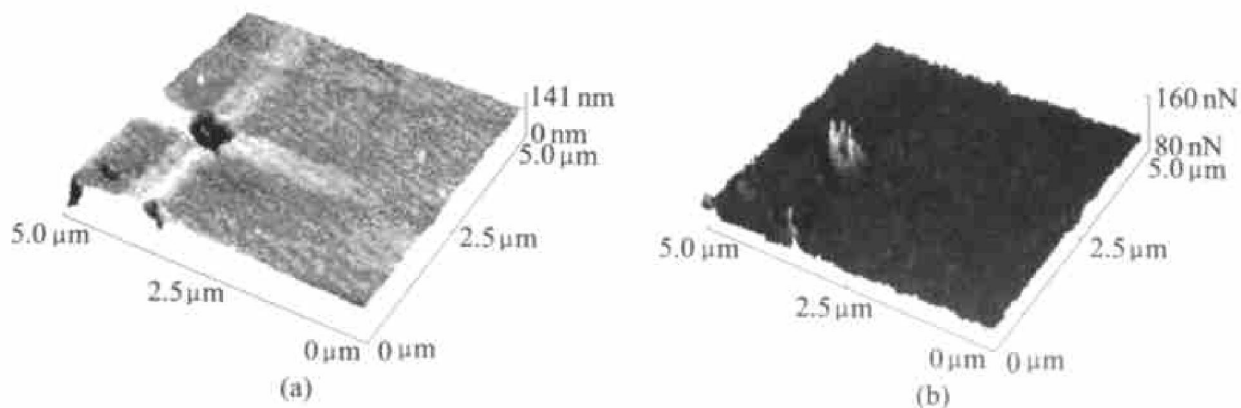


图 4 载荷为 4 μN 时碳化硼试样的表面形貌和摩擦力分布图

Fig. 4 Surface profile and friction force profile for normal load of 4 μN

(a) —Surface profile; (b) —Friction force profile

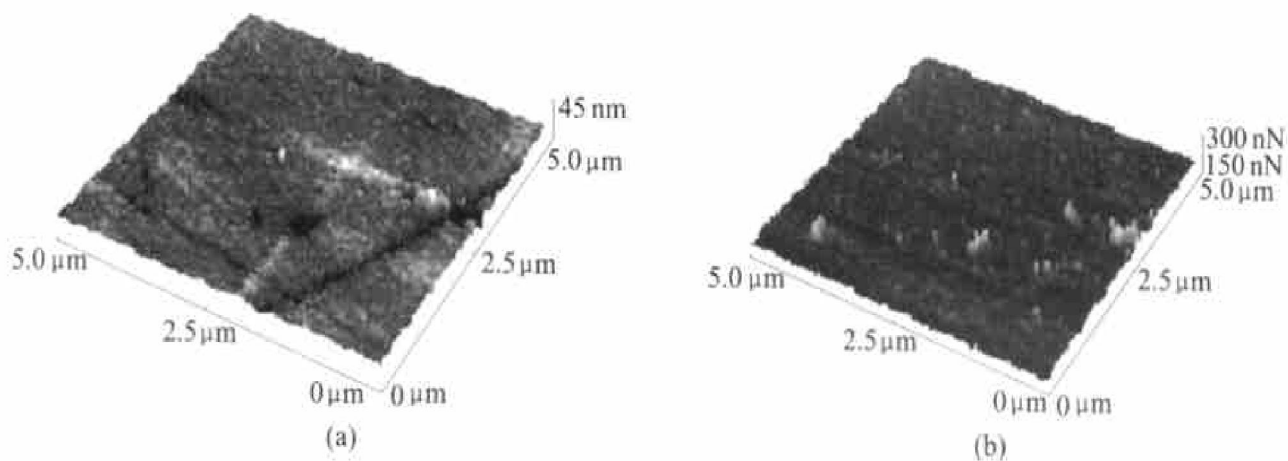


图 5 载荷为 5 μN 时碳化硼试样的表面形貌和摩擦力分布图

Fig. 5 Surface profile and friction force profile for normal load of 5 μN

(a) —Surface profile; (b) —Friction force profile

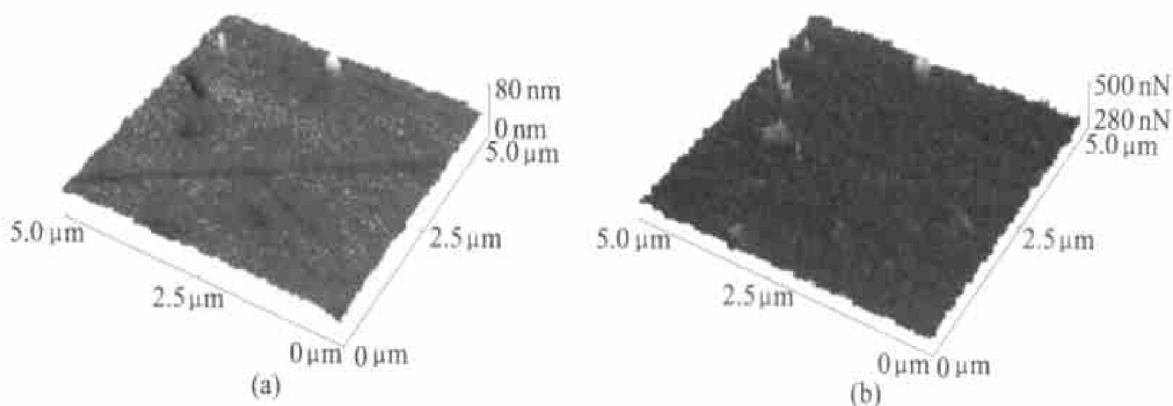


图 6 载荷为 6 μN 时碳化硼试样的表面形貌和摩擦力分布图

Fig. 6 Surface profile and friction force profile for normal load of 6 μN

(a) —Surface profile; (b) —Friction force profile

94, 83, 60, 141, 45, 80 nm, 且凹凸不平处所占的比例很小。图 1、图 2、图 5 和图 6 中几道“沟槽”，可能是磨样过程中留下的。

2) 试样的材质是均匀、致密的。各扫描区域内未见到明显的孔隙、裂纹等缺陷，仅在图 4 表面形貌分布图中有一处大小约为 $0.5 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ 、深

度约为 100 nm 的“孔洞”。

因此可以认为所用碳化硼材料材质均匀致密, 磨样加工方法正确, 制得的样品表面平整。

2.2 表面形貌对摩擦力的影响

从图 1~ 图 6 可以看出, 摩擦力分布的轮廓线的变化与相应的表面形貌轮廓线的变化有相应之处, 即表面形貌发生起伏变化大处摩擦力就大。无论在表面形貌图中表现的是凹进还是凸起, 在摩擦力分布图中与之对应的都是摩擦力增大。Ruan 和 Mathew^[8, 9]提出的纳米摩擦的“棘轮(racket)模型”认为, 探针滑过样品表面类似于棘爪沿棘轮齿缘的运动。对于对称形状的粗糙峰, 用摩擦力显微镜(FFM)测得的平均摩擦因数 μ 为

$$\mu = \mu_0 (1 + \tan^2 \theta)$$

式中 θ 为粗糙峰与水平方向夹角, μ_0 为无粗糙度影响时的摩擦因数。

由此可知, 粗糙峰使纳米摩擦因数增加, 增加量与 $\tan^2 \theta$ 成正比, 所以纳米摩擦因数与粗糙峰斜率密切相关。在同一载荷下, 摩擦力的分布同样与粗糙峰斜率相关, 且增加量与 $f \cdot \tan^2 \theta$ 成正比, 故不论在表面形貌分布图上是凹进还是凸起的部分, 相应的摩擦力分布图上总是呈现摩擦力增加。

2.3 载荷对摩擦因数的影响

根据图 1 至图 6 中的摩擦力分布图, 取图中摩擦力的平均值为摩擦力 F , 探针施加载荷为法向压力 f , 由 $\mu = F/f$ 计算出的摩擦因数平均值列如表 2。

表 2 不同载荷下摩擦因数 μ 的平均值

Table 2 Friction coefficients(μ) at different normal loads

Load/ μN	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
μ	0.006	0.009	0.014	0.021	0.031	0.046

从表 2 可以看出, 纳米摩擦因数远远小于宏观摩擦因数 0.1~ 0.2^[10, 11]。在纳米摩擦学实验中, 微小尺度和极轻载荷测量的材料硬度和弹性模量都比宏观测量的数值高, 因而纳米摩擦过程中, 材料的磨损极少, 从而摩擦因数低, 同时纳米摩擦中, 几乎没有嵌入表面的磨粒, 也减少了犁沟效应对摩擦力的影响。本实验中, 当载荷增加时, 纳米摩擦因数显著增加, 这是与宏观摩擦实验相反的规律^[4, 5]。文献[7]的实验也证明, 当载荷增加时, 纳

米摩擦因数显著增加。其原因可能与载荷增大时, 微观摩擦逐渐向宏观摩擦转变有关^[12]。

3 结论

- 1) 原子力/摩擦力显微镜可以直观地对样品进行表面形貌和摩擦力分布的微观分析, 是一种可用于无损检测碳化硼材料表面状况和摩擦力分布的新方法。通过对碳化硼样品表面形貌的分析, 认为所制得的碳化硼材料材质均匀致密, 磨样加工方法正确, 制得的样品表面平整。
- 2) 在载荷为 1~ 6 μN 下, 研究了 Si_3N_4 探针扫描碳化硼表面时摩擦力的分布, 结果表明, 摩擦力的变化与扫描处的试样表面形貌有关。不论在表面形貌分布图上是凹进还是凸起的部分, 相应的摩擦力分布图上总是呈现摩擦力增加, 且表面形貌变化斜率越大处, 摩擦力增加得越多。由于总体来说试样较平整, 摩擦力的分布也是比较均匀的。
- 3) 碳化硼材料的纳米摩擦因数远远小于宏观摩擦因数, 且纳米摩擦因数随载荷的增加而显著增加。

REFERENCES

[1] Thevent F A. A review on boron carbide [J]. Key Engineering Materials, 1991, 56/57: 59 - 88.

[2] Schwetz K A, Sigl L S, Greim J, et al. Wear of boron carbide ceramics by abrasive waterjets [J]. Wear, 1995, 181/183: 148 - 155.

[3] WANG Ling-sen. Investigation of high strength microcrystalline boron carbide ceramic [J]. Journal CSIMM, 1986(4): 65 - 70.

[4] 吴 芳, 王零森, 张金生, 等. 热压碳化硼表面自润滑膜的生成[J]. 中南工业大学学报, 2001, 32(1): 78 - 80.

WU Fang, WANG Ling-sen, ZHANG Jing-sheng, et al. Formation of self-lubricating surface films on hot-pressed boron carbide [J]. Journal of Central South University of Technology, 2001, 32(1): 78 - 80.

[5] WANG Ling-sen, WU Fang, ZHANG Jirsheng, et al. Tribological behavior of hot-pressed boron carbide with oxidation [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2001, 8(2): 89 - 93.

[6] Kaneko R, Miyamoto T, Andoh Y, et al. Microwear [J]. Thin Solid Film, 1996, 273: 105 - 111.

[7] 路新春, 温诗铸, 雒建斌. 微观摩擦磨损研究的新进展[J]. 摩擦学学报, 1995, 15: 177 - 183.

- LU Xir-chun, Wen Shizhu, Luo Jianbin. The new advance of micro friction and wear [J]. Tribology, 1995, 15: 177 - 183.
- [8] Ruan J, Bhushan B. Atomic-scale and microscale friction studies of graphite and diamond using friction force microscopy [J]. J Appl Phys, 1994, 76(9): 5022 - 5035.
- [9] Mathew M C. Nanotribology studies of carbon surface by force microscopy [J]. Wear, 1993, 168: 17 - 20.
- [10] Gogotsi Yu G, Kovalchenko A M, Kossko I A. Tribor-chemical interactions of boron carbides against steel [J]. Wear, 1992, 154: 133 - 140.
- [11] Riu D H, Choi R, Kim H. Oxidation behaviour and strength of B4C-30wt% SiC composite materials [J]. J of Materials Science, 1995, 30(18): 3897 - 3902.
- [12] 温诗铸. 纳米摩擦学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998. 81 - 87.
- WEN Shizhu. Nano-Tribology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. 81 - 87.

Nano tribology properties of boron carbide ceramic studied by atomic force microscope

WU Fang¹, WANG Ling-sen²

- (1. Department of Chemistry & Environment Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;
2. State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The topographical characteristics of the boron carbide sample surfaces were investigated with atomic force microscope/friction force microscope (AFM/FFM). As the results, the samples are of good consolidation and the surfaces of the polished samples are even. The friction force distributions of Si₃N₄ tip scanning over the boron carbide surfaces were investigated at load 1 μN to 6 μN, 1 μN a step. The results show that friction force changes with the surge of surface topography. The steeper slope of surface topography links with the higher friction force. Friction forces are almost uniform at certain normal load since the surface is even. The nano tribological friction coefficient of boron carbide increases with the normal load rising.

Key words: boron carbide; AFM/FFM; surface topography; nano friction coefficient

(编辑 袁赛前)