

DOI: 10.16078/j.tribology.2018016

微波烧结氮化硅基复合陶瓷刀具材料 摩擦特性研究

徐伟伟, 袁军堂*, 殷增斌, 汪振华
(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用微波烧结技术制备了一种氮化硅基复合陶瓷刀具材料, 研究了其与三种不同属性的硬质材料(氮化硅、硬质合金和GCr15轴承钢)在不同载荷下对摩时的摩擦特性与磨损机理. 研究表明: 当与氮化硅对摩时, 磨损率最大且磨损率随载荷增大急速升高, 磨损主要以脆性剥落形式存在; 当与硬质合金对摩时, 摩擦系数最小, 随载荷增加磨损机理由磨粒磨损转变为磨粒磨损与疲劳磨损共同作用. 当与轴承钢对摩时, 磨损率最小, 因在摩擦过程中在磨痕表面形成金属黏着, 其磨损率随载荷的增大而减小. 与商业的氮化硅陶瓷刀具材料相比, 微波烧结氮化硅陶瓷刀具材料摩擦系数略有降低, 磨损率降低了14.17%~59.49%.

关键词: 氮化硅基复合陶瓷; 摩擦特性; 磨损机理; 微波烧结
中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2018)06-0721-07

Frictional Characteristic of Si₃N₄-Based Composite Ceramic Tool Materials by Microwave Sintering

XU Weiwei, YUAN Juntang*, YIN Zengbin, WANG Zhenhua

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Jiangsu Nanjing 210094, China)

Abstract: A Si₃N₄-based composite ceramic tool material was fabricated by microwave sintering. Its tribological behaviors and wear mechanisms sliding against three counterpart materials (i.e. Si₃N₄, cement carbide and bearing steel GCr15) under the several applied loads were studied. The results show that in sliding against Si₃N₄, the wear rate was highest and increased rapidly with the increase of applied load. The wear was mainly in the form of brittle flaking. In sliding against cement carbide, the friction coefficient was lowest. Transition of wear mechanism from abrasive wear to abrasive and fatigue wear was observed by increasing the applied load. In sliding against bearing steel GCr15, the wear rate was smallest and decreased with the increase of applied load. This was due to the transferred metal formed on the surface of wear tracks. Compared with the commercial Si₃N₄ ceramic of SNGN120408, the coefficient of friction was slightly lower and the wear rate was reduced by about 14.17%~59.49%.

Key words: Si₃N₄-based composite ceramic; frictional characteristic; wear mechanism; microwave sintering

氮化硅陶瓷是一种具有良好力学性能^[1]、耐磨性^[2]和抗热震性能^[3]的陶瓷材料, 因其在常温和高温均能具有优良的性能, 被作为一种结构材料而被广泛使用, 例如隔热材料、燃气轮机和刀具材料等.

目前在氮化硅基陶瓷刀具材料领域, 其制备的主

要方式仍以传统烧结方式为主, 如无压烧结、反应烧结、气氛烧结、热压和热等静压烧结等^[4-8], 众多学者采用传统烧结方式制备出多种具有优良力学性能的氮化硅陶瓷刀具材料, 例如通过添加TiB₂、TiC、TiN、Ti(C₇N₃)和SiC等第二相陶瓷材料^[9-14], 制备出氮化硅

Received 26 April 2018, revised 18 August 2018, accepted 21 August 2018, available online 28 November 2018.

*Corresponding author. E-mail: mc106@mail.njust.edu.cn, Tel: +86-25-84315421.

This project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51675285) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (BK20150783).

国家自然科学基金项目(51675285)和江苏省自然科学基金项目(BK20150783)资助.

基复合陶瓷. 然而, 传统烧结方式制备氮化硅基陶瓷刀具材料时具有烧结温度高、升温速率慢和保温时间长的特点, 较长的制备周期和较高的成本限制了陶瓷刀具材料的广泛使用. 微波烧结作为一种高效、节能、环保的新技术在陶瓷刀具制备方面具有广阔的前景, 但目前微波烧结氮化硅基陶瓷刀具材料仍处于在起步阶段^[15]. 在前期研究中, 利用微波烧结技术在低温快速条件下成功制备了一种性能较好的氮化硅基陶瓷刀具材料, 其维氏硬度和断裂韧性分别为 17.49 ± 0.58 GPa和 6.15 ± 0.42 MPa·m^{1/2}.

刀具材料的摩擦磨损特性对刀具的切削性能具有重要的影响. 目前, 针对传统烧结制备的氮化硅陶瓷摩擦特性做了大量研究^[16-19]. 然而, 对微波烧结的氮化硅复合陶瓷材料的摩擦特性研究还鲜有报道. 本文中对一种微波烧结的氮化硅基复合陶瓷刀具材料的摩擦特性和磨损机理进行研究, 选用三种不同属性的硬质材料(氮化硅、硬质合金和GCr15轴承钢)作为对磨材料, 研究了摩擦系数和磨损率与载荷的关系, 分析了与不同材料对磨的磨损机理, 并与商业化的热压烧结氮化硅陶瓷刀具材料的耐磨性进行了对比.

1 试验过程

1.1 氮化硅基复合陶瓷的制备

所制备的氮化硅基复合陶瓷刀具材料体系的组分列于表1中, 采用微波烧结技术, 将 $17 \text{ mm} \times 17 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的塑坯置于2.45 GHz微波烧结炉中, 在氮气气氛中以 $30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $1650 \text{ }^\circ\text{C}$, 并保温20 min制备出致密度为98.5%左右的氮化硅基复合陶瓷刀具材料(SWTCN), 其维氏硬度和断裂韧性分别为 17.49 ± 0.58 GPa和 6.15 ± 0.42 MPa·m^{1/2}. 所使用的原料均为上海超威纳米科技有限公司生产的粉料, 粉末的预处理和制备过程在前期研究中已有详细报道^[20].

表1 氮化硅基复合陶瓷刀具材料组分质量配比

Table 1 The detail composition and mass fraction of components for Si₃N₄-based composite ceramic tool materials

Powder	Component	Grain size/ μm	Purity
α -Si ₃ N ₄	71%	0.7	99.9%
(W, Ti)C	15%	1~3	99.9%
Al ₂ O ₃	2%	0.5	99.9%
MgO	5%	1	99.9%
Y ₂ O ₃	5%	1	99.9%
Ni	2%	0.6	99.9%

1.2 摩擦磨损测试

采用UMT-2摩擦磨损仪进行球-块往复摩擦试

验, 样品尺寸为 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 表面进行研磨抛光处理, 表面粗糙度 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$. 三种对磨材料分别为氮化硅球、硬质合金球和GCr15轴承钢球, 摩擦速度为 100 mm/s , 单次行程 10 mm , 往复摩擦时间 20 min , 载荷为 $10 \sim 40 \text{ N}$. 摩擦系数在线自动记录, 磨损率(W)由下列公式(1)计算得出:

$$W = \frac{V}{F \cdot v \cdot t} \quad (1)$$

式中: V 表示磨损体积; F 表示载荷; v 表示摩擦速度; t 表示摩擦时间. 其中磨损体积是采用DEKTAK-XT台阶仪测量磨痕截面曲线, 通过拟合计算出截面积, 再乘以单次行程得出. 磨损表面形貌是采用美国Quant 250FEG和日本日立SU3500型扫描电子显微镜进行观察分析.

2 结果和讨论

2.1 摩擦系数

不同载荷下氮化硅基复合陶瓷刀具与不同硬质材料对磨时的摩擦系数如图1所示, 可以看出摩擦系数分为两个阶段, 分别为磨合期和稳定期, 不同的对磨条件对两个阶段的影响规律也不尽相同. 从图1(a)中可以看出在与氮化硅球对磨时, 载荷变化对磨合过程影响较大, 不同载荷下进入摩擦稳定阶段的时间存在较大差异, 载荷为 10 N 时在 200 s 以内即可进入摩擦稳定期; 载荷增大到 20 N 时, 磨合时间则增长到 700 s 左右; 当载荷大于 30 N 时磨合过程存在较大波动现象, 磨合期也随之延长. 但在进入摩擦稳定期后其摩擦系数受载荷影响较小, 均在 $0.50 \sim 0.55$ 之间. 在与硬质合金球对磨时, 如图1(b)所示, 摩擦系数随载荷影响较大, 载荷在 30 N 以下时能快速进入摩擦稳定期, 在 10 N 载荷下摩擦系数最小, 其值大约为 0.381 . 当载荷增大到 40 N 时, 磨合期较长, 摩擦系数随摩擦时间增长而快速升高, 稳定期摩擦系数大约为 0.493 . 与轴承钢对磨时, 如图1(c)所示, 不同载荷下摩擦系数随摩擦时间变化规律基本一致, 经过 550 s 左右的磨合期后均进入到稳定期. 在摩擦稳定期, 随载荷的增大, 摩擦系数先增大后减小, 在 10 N 载荷下摩擦系数最小大约为 0.467 . 比较氮化硅基复合陶瓷刀具材料与三种硬质材料的摩擦试验, 不同摩擦副摩擦系数变化规律存在差异, 与硬质合金对磨时, 摩擦系数受载荷变化影响较显著, 随载荷增大, 摩擦系数呈增大趋势, 但其摩擦系数在三者中最小; 另两种摩擦副对磨过程中, 摩擦系数随载荷增大呈先增大后减小趋势. 同载荷不同摩擦

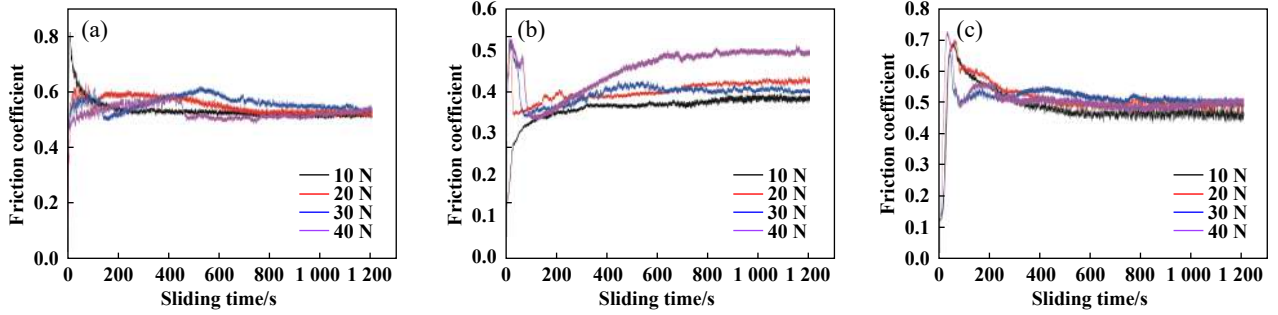


Fig. 1 The friction coefficient of Si₃N₄-based composite ceramic sliding against (a) Si₃N₄, (b) cemented carbide and (c) bearing steel GCr15 under the different applied load

图 1 不同载荷下氮化硅基复合陶瓷与(a)氮化硅、(b)硬质合金和(c)轴承钢对磨的摩擦系数变化曲线

副摩擦系数值比较可得出以下排列规律: SWTCN/氮化硅>SWTCN/轴承钢>SWTCN/硬质合金.

2.2 磨损率

图2给出了氮化硅基复合陶瓷刀具材料与三种不同硬质材料对磨时磨损率随载荷的变化曲线. 从图2可以明显看出, 对磨介质不同, 材料磨损率差异较大, 相差1~2个数量级. 与氮化硅球对磨时, 其磨损率最大, 其值在 $3.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ 以上. 随载荷增大, 磨损率急剧增大, 载荷为40 N时磨损率最大达到 $1.42 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ 左右. 与另两种材料对磨时, 磨损率明显降低, 其磨损率值均在 $1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ 以下. 与硬质合金对磨时, 基体磨损率随载荷增大先降低后升高, 载荷为20 N时磨损率最小, 其值大约为 $2.5 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$. 与轴承钢对磨时, 磨损率随着载荷增大呈现下降趋势, 在40 N载荷下磨损率大约为 $2.1 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$.

2.3 磨损机理分析

通过观测材料磨损表面形貌, 分析其磨损机理可以看出材料摩擦系数和磨损率变化与磨损形式具有必然的联系. 图3为样品材料与氮化硅球在100 mm/s

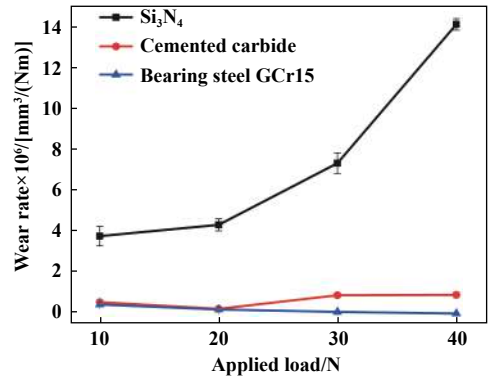


Fig. 2 The wear rate of Si₃N₄-based composite ceramic sliding against different hard materials under different applied loads

图 2 氮化硅基复合陶瓷与不同材料对磨时磨损率随载荷变化曲线

速度和40 N载荷作用下对磨后的表面形貌图. 可以看出磨痕表面由一系列沟壑和破碎剥落特征组成, 从图3(b)划痕局部放大图可以看出磨痕表面材料发生破损形成凹坑, 可解释是由于样品材料与对偶材料均为硬质脆性材料, 其断裂韧性较低, 摩擦过程中受垂直

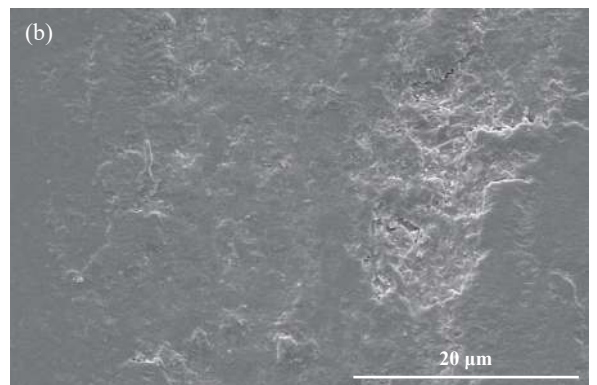
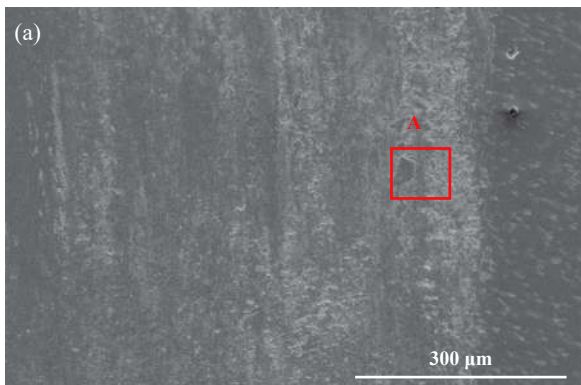


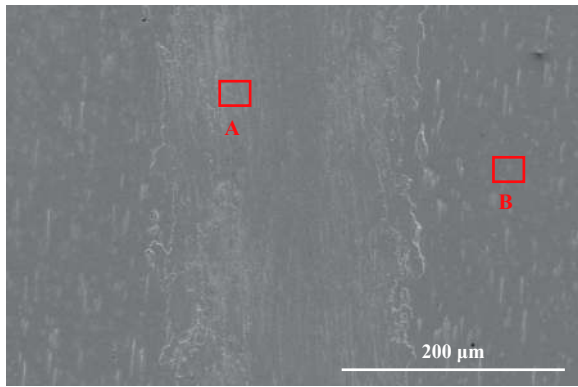
Fig. 3 (a) SEM micrograph of the wear track of Si₃N₄-based ceramic sliding against Si₃N₄ under a applied load of 40N and (b) the enlarged SEM micrograph of area A

图 3 (a)40N载荷下氮化硅基陶瓷与氮化硅球对磨后磨痕形貌图和(b)区域A的放大图

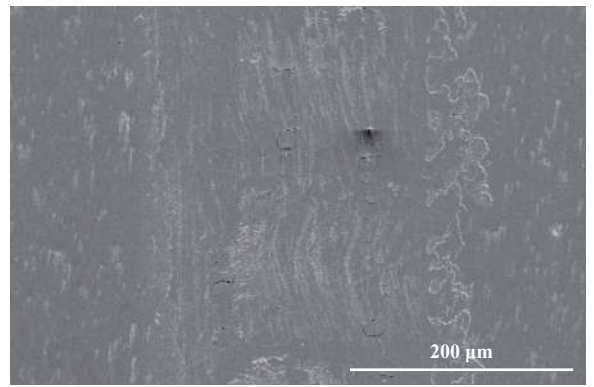
载荷和摩擦力作用会发生脆性断裂而导致磨损. 且随着载荷增大, 其脆性剥落材料增多, 这些硬质磨粒因无法及时排出会作为磨料继续参与摩擦, 加速基体材料磨损, 造成磨损率急速增大. 同时随剥落材料增多, 表面的破损和凹坑会造成磨痕表面质量下降, 其摩擦系数随之增大. 因其在不同载荷下磨损形式相似, 在摩擦稳定期的摩擦系数并未随载荷发生急剧变化.

图4为不同载荷下氮化硅基陶瓷材料与硬质合金对摩擦磨损表面形貌图, 发现其磨损表面形貌随载荷变化影响较大. 在10 N载荷下磨痕表面形成许多较浅的划痕, 发生明显的磨粒磨损. 当载荷增至20 N时,

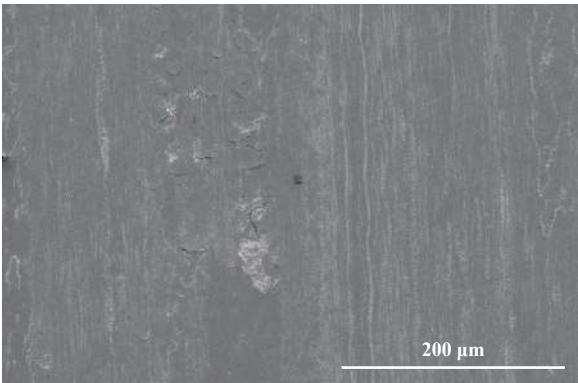
划痕增多, 磨粒磨损加剧, 同时磨痕表面形成一些裂纹碎片. 这是由于在该摩擦过程中接触表面会有摩擦热产生, 随着温度的交替变化, 摩擦表面受到交变接触应力作用从而发生疲劳现象. 裂纹碎片的产生使得磨痕表面质量下降, 摩擦系数随着升高. 当载荷增大到30 N时, 少量的裂纹碎片发生剥落, 表面质量变化不大, 但基体材料与磨球接触面积减小, 使得摩擦系数略有下降. 随着载荷进一步增大, 磨痕表面裂纹碎片发生剥落, 疲劳磨损加剧, 造成磨损率升高, 同时磨痕表面质量下降造成摩擦系数急剧升高. 图4(e和f)为陶瓷材料基体和磨痕表面元素扫描能谱图, 从图中



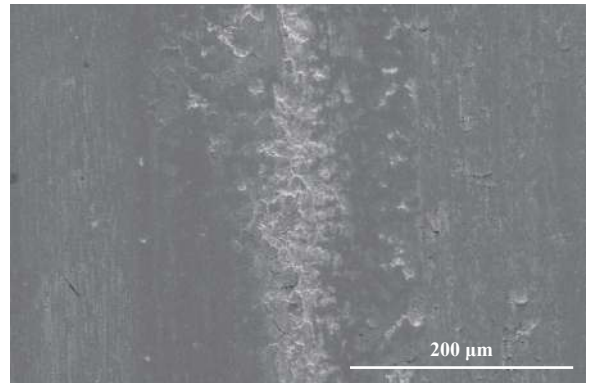
(a) 10 N



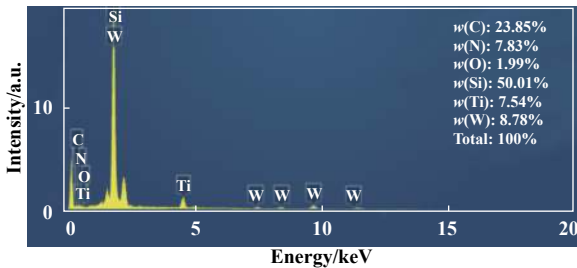
(b) 20 N



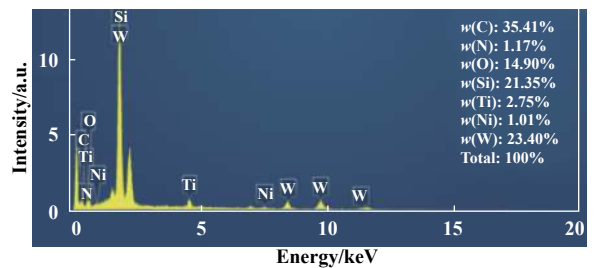
(c) 30 N



(d) 40 N



(e) Area A



(f) Area B

Fig. 4 SEM micrographs of the wear tracks of Si_3N_4 -based ceramic sliding against cemented carbide under the applied loads of (a)10 N, (b)20 N, (c)30 N, (d)40 N and the EDS spectra of the (e)area A and (f)area B

图4 (a)10 N、(b)20 N、(c)30 N和(d)40 N载荷下氮化硅基陶瓷材料与硬质合金对摩擦磨损表面形貌图和(e)区域A、(f)区域B的EDS分析图

可以看出磨痕表面C、O和W元素含量明显提高, N元素含量明显较少, 可得出在摩擦过程中硬质合金球中的WC会渗透到氮化硅基陶瓷材料表面, 同时因摩擦温度升高, 氮化硅会与空气中氧气发生化学反应生成 SiO_2 ^[21], 该氧化物在摩擦副表面充当固体润滑剂的作用, 同时对偶材料转移也有利于平均摩擦系数的减小^[22], 从而使得该摩擦副摩擦系数比另两种摩擦副略低。

图5为不同载荷下氮化硅基陶瓷与GCr15轴承钢对摩后磨损表面形貌图。可观测到在磨损表面形成了许多片状物质, 通过元素扫描分析片状物质, 发现了大量的Fe元素(21.15%)和微量的Cr元素[见图5(e)], 因

铁与氮化硅陶瓷具有较强的亲和力, 在摩擦过程中随摩擦热的产生, 轴承钢材料受热软化, 渗透到氮化硅基陶瓷表面并形成片状黏着现象。同时与图4(e)相比, O元素含量略有升高, 可得出在摩擦过程中还伴有化学氧化反应。此外在黏着物下方可见许多犁沟, 可说明在磨损初期仍以磨粒磨损为主。在10 N载荷下, 随摩擦时间延长, 摩擦热升高, 轴承钢软化发生金属黏着, 磨损表面以黏着现象为主。当载荷为20~30 N时, 表面黏着增多, 且发生局部的黏着磨损, 如图5(b和c)中圆圈中所示, 由于陶瓷表面黏着物受摩擦表面微凸体的切向力作用, 少量基体材料会随着黏着材料发

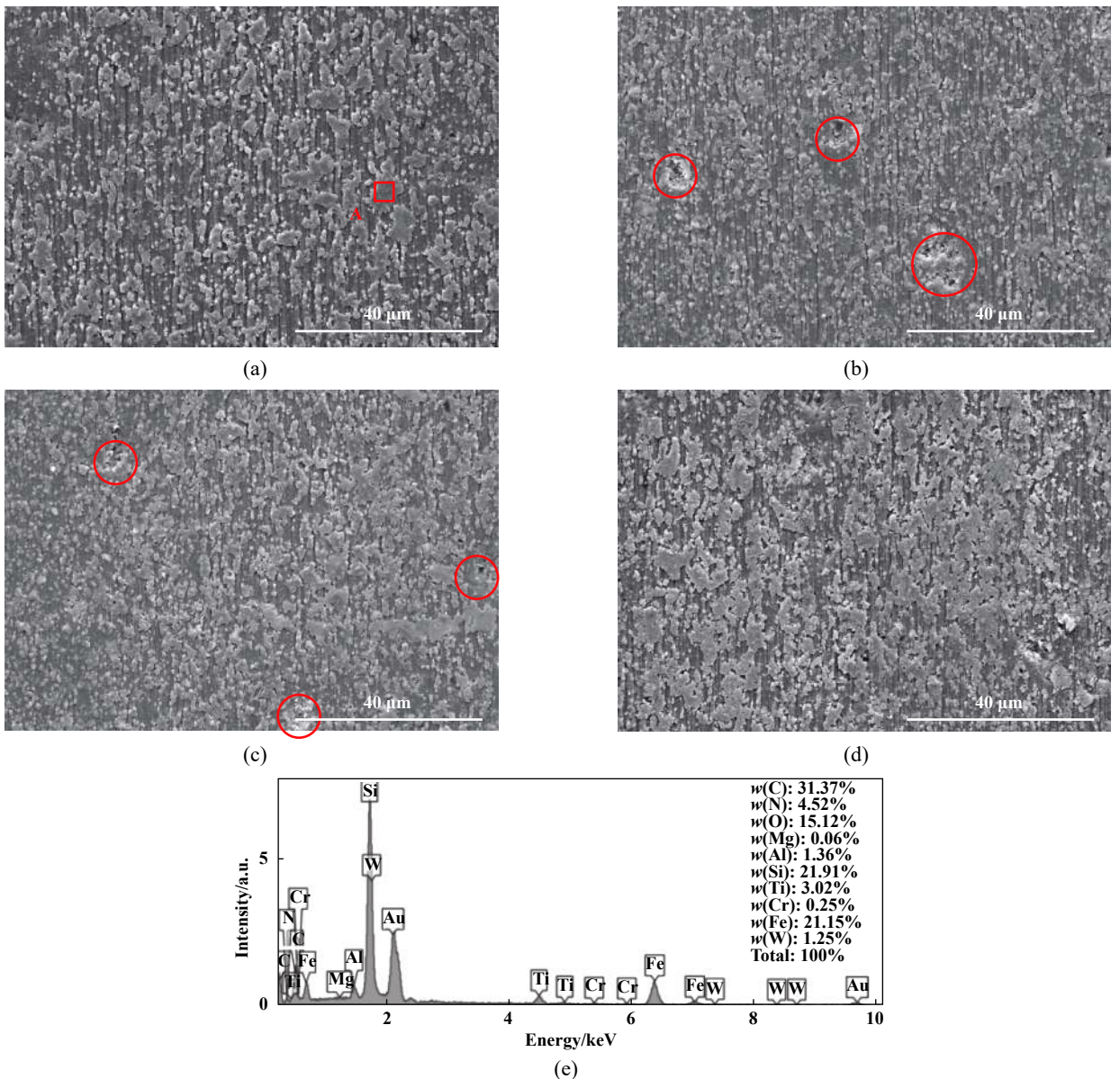


Fig. 5 SEM micrographs of the wear tracks of Si₃N₄- based ceramic sliding against bearing steel GCr15 under the applied loads of (a)10 N, (b)20 N, (c)30 N, (d)40 N and (e) the EDS spectrum of the area A

图 5 (a)10 N、(b)20 N、(c)30 N和(d)40 N载荷下氮化硅基陶瓷与轴承钢球对摩后磨损表面形貌图和(e)区域A的元素分析X射线衍射图

生剥落^[23]. 在黏着与剥落双重作用下, 磨痕表面质量下降造成摩擦系数突然增大. 但随着载荷进一步增大, 黏着现象加剧, 对磨介质发生变化, 使得摩擦系数减小, 磨损率也减小.

2.4 与商品氮化硅陶瓷刀具耐磨性比较

对微波烧结制备的SWTCN氮化硅基复合陶瓷刀具和商业氮化硅陶瓷刀具(科宇SNGN120408)的耐磨性进行比较试验, SNGN120408氮化硅陶瓷硬度为

16.92±0.58 GPa, 断裂韧性为6.61±0.50 MPa·m^{1/2}. 对磨介质均为氮化硅球, 摩擦速度为100 mm/s. 结果列于表2中, 在10~40 N载荷下, SWTCN的摩擦系数在0.50~0.55范围内, SNGN120408摩擦系数在0.50~0.60范围内, 比较而言, 微波烧结制备的SWTCN氮化硅基陶瓷摩擦系数相对较小; 在磨损率方面, 两者有明显的差别, SWTCN磨损率比SNGN120408降低了14.17%~59.49%, 且载荷越大磨损率降低的越明显.

表2 不同载荷下SWTCN和SNGN120408与氮化硅球对摩擦系数和磨损率表

Table 2 Friction coefficient and wear rate of SWTCN and SNGN120408 sliding against Si₃N₄ under the different applied loads

Applied load/N	Friction coefficient		Wear rate×10 ⁶ /[mm ³ /(Nm)]	
	SWTCN	SNGN120408	SWTCN	SNGN120408
10	0.513	0.552	4.18±0.33	4.87±1.24
20	0.519	0.560	4.40±0.20	7.46±0.51
30	0.542	0.503	7.35±0.50	11.99±0.46
40	0.519	0.599	14.2±0.28	35.05±0.57

3 结论

a. 微波烧结的氮化硅基陶瓷刀具材料与氮化硅球对摩时, 在磨合期摩擦系数受载荷影响较大, 进入稳定期后摩擦系数受载荷的影响并不是很明显; 其磨损率随载荷增大急速增大, 在摩擦过程中出现脆性剥落现象, 加速了材料磨损. 与商业氮化硅陶瓷刀具SNGN120408相比, 其摩擦系数略有降低, 磨损率降低了14.17%~59.49%.

b. 与硬质合金对摩时, 摩擦系数受载荷影响较大, 载荷增大到40 N时摩擦系数突然增大且磨合期较长. 在10 N载荷下磨损以磨粒磨损为主, 20 N载荷时磨粒磨损加剧, 并发生轻微的疲劳磨损, 随载荷继续增大, 疲劳磨损加剧降低磨损表面质量使得磨损率升高. 同时在摩擦过程中会发生WC的渗透及氮化硅的化学氧化反应, 使其摩擦系数略低.

c. 与轴承钢对摩时, 磨痕表面出现黏着现象, 随载荷增大黏着加剧, 磨损率减小. 载荷增至20 N时, 出现少量的黏着磨损, 导致摩擦系数增大. 随载荷继续增大黏着材料增多, 对磨介质发生变化导致摩擦系数和磨损率同时减小.

参考文献

[1] Bocanegra-Bernal M H, Matovic B. Mechanical properties of silicon nitride-based ceramics and its use in structural applications at high temperatures[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(6): 1314–1338. doi: 10.1016/j.msea.2009.09.064.

[2] Liu C, Huang J. Tribological characteristics of Si₃N₄-based composites in unlubricated sliding against steel ball[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2004, 384(1-2): 299–307. doi: 10.1016/S0921-5093(04)00853-6.

[3] Zheng G, Zhao J, Jia C, et al. Thermal shock and thermal fatigue resistance of Sialon-Si₃N₄ graded composite ceramic materials[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 35: 55–61. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2012.04.003.

[4] Guo W, Wu L, Ma T, et al. Rapid fabrication of Si₃N₄ ceramics by reaction-bonding and pressureless sintering[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36(16): 3919–3924. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.06.007.

[5] Alem A, Pugh M D, Drew R A L. Reaction bonded silicon nitride foams: The influence of iron disilicide on microstructure and mechanical strength[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(3): 4966–4974. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.12.060.

[6] Zhao Y, Zhang Y, Gong H, et al. Gas pressure sintering of BN/Si₃N₄ wave-transparent material with Y₂O₃-MgO nanopowders addition[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(8): 13537–13541. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.05.054.

[7] Guo W, Wu L, Ma T, et al. Chemical reactivity of hot-pressed Si₃N₄-ZrB₂ ceramics at 1 500–1 700 °C[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, 35(11): 2973–2979. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2015.04.031.

[8] Hu C, Li F, Qu D, et al. 8- Developments in hot pressing (HP) and hot isostatic pressing (HIP) of ceramic matrix composites A2- Low, I.M.[M]. *Advances in Ceramic Matrix Composites*, Woodhead Publishing, 2014:164–189.

[9] Jones A H, Dობედოე R S, Lewis M H. Mechanical properties and tribology of Si₃N₄-TiB₂ ceramic composites produced by hot

- pressing and hot isostatic pressing[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2001, 21(7): 969–980. doi: [10.1016/S0955-2219\(00\)00294-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(00)00294-6).
- [10] Ye C, Yue X, Ru H, et al. Effect of addition of micron-sized TiC particles on mechanical properties of Si₃N₄ matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 709: 165–171. doi: [10.1016/j.jallcom.2017.03.124](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.124).
- [11] Zou B, Huang C Z, Liu H L, et al. Preparation and characterization of Si₃N₄/TiN nanocomposites ceramic tool materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9): 4595–4600. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2008.10.025](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.025).
- [12] Zou B, Huang C, Chen M. Study on the mechanical properties, microstructure and oxidation resistance of Si₃N₄/Si₃N₄W/Ti(C₇N₃) nanocomposites ceramic tool materials[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, 27(1): 52–60. doi: [10.1016/j.ijrmhm.2008.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2008.03.003).
- [13] Suri J, Shaw L L. Liquid phase sintering of Si₃N₄/SiC nanopowders derived from silica fume[J]. Ceramics International, 2014, 40(7): 9179–9187. doi: [10.1016/j.ceramint.2014.01.135](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.135).
- [14] Zhao J, Ai X, Lü Z. Preparation and characterization of Si₃N₄/TiC nanocomposite ceramics[J]. Materials Letters, 2006, 60(23): 2810–2813. doi: [10.1016/j.matlet.2006.01.096](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2006.01.096).
- [15] Xu Weiwei, Yuan Juntang, Yin Zengbin, et al. Research status of silicon nitride ceramic materials sintered by microwave sintering[J]. Bulletin of the chinese ceramic society, 2017, (1): 71–76 (in Chinese) [徐伟伟, 袁军堂, 殷增斌, 等. 氮化硅陶瓷材料微波烧结研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2017, (1): 71–76].
- [16] Huang C, Zou B, Liu Y, et al. Study on friction characterization and wear-resistance properties of Si₃N₄ ceramic sliding against different high-temperature alloys[J]. Ceramics International, 2016, 42(15): 17210–17221. doi: [10.1016/j.ceramint.2016.08.013](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.013).
- [17] Hvizdoš P, Dusza J, Balázi C. Tribological properties of Si₃N₄-graphene nanocomposites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33(12): 2359–2364. doi: [10.1016/j.jeurceramsoc.2013.03.035](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.03.035).
- [18] Zheng G, Zhao J, Zhou Y. Friction and wear behaviors of Sialon-Si₃N₄ graded nano-composite ceramic materials in sliding wear tests and in cutting processes[J]. Wear, 2012, 290-391: 41–50.
- [19] Chen Wei, Gao Yimin, Chen Can. Tribological behavior of Si₃N₄-hBN ceramic materials against stainless steel under dry friction condition[J]. Tribology, 2010, 30(3): 243–249 (in Chinese) [陈威, 高义民, 陈灿. 干摩擦条件下Si₃N₄-hBN复合陶瓷与1Cr18Ni9Ti配副的摩擦学特性研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 243–249].
- [20] Xu W, Yin Z, Yuan J, et al. Preparation and characterization of Si₃N₄-based composite ceramic tool materials by microwave sintering[J]. Ceramics International, 2017, 43(18): 16248–16257. doi: [10.1016/j.ceramint.2017.08.209](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.08.209).
- [21] Gee M G, Butterfield D. The combined effect of speed and humidity on the wear and friction of silicon nitride[J]. Wear, 1993, 162-164: 234–245. doi: [10.1016/0043-1648\(93\)90506-H](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90506-H).
- [22] Hai Wanxiu, Chen Hao, Lv Jinjun, et al. Influences of velocity, load and counterpart material on the tribological behavior of ZrB₂-SiC composites[J]. Tribology, 2017, 37(5): 581–586 (in Chinese) [海万秀, 陈浩, 吕晋军, 等. 不同配副下ZrB₂-SiC复相陶瓷的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 581–586]. doi: [10.16078/j.tribology.2017.05.003](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.003).
- [23] Pan Wu, Gao Yimin, Li Xiuqing, et al. Tribological behavior of B₄C/hBN ceramic composites sliding against ductile iron in emulsion[J]. Tribology, 2016, 36(1): 61–69 (in Chinese) [潘武, 高义民, 李秀清, 等. B₄C/hBN复相陶瓷与球墨铸铁配副摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(1): 61–69]. doi: [10.16078/j.tribology.2016.01.010](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2016.01.010).