

# TiB<sub>2</sub>-TiN-Ni-C<sub>sf</sub> 陶瓷刀具与 316L 奥氏体不锈钢间的干摩擦磨损性能研究

曹磊, 宋金鹏, 高杰

太原理工大学机械工程学院; 精密加工山西省重点实验室

**摘要:** 研究了 TiB<sub>2</sub>-TiN-Ni-C<sub>sf</sub> (TTNC) 陶瓷刀具材料与 316L 奥氏体不锈钢间的摩擦磨损性能, 结果表明: 当载荷为 65N 时, 随着滑动速度从 6m/min 增大到 15m/min, 对磨材料间的摩擦系数和 TTNC 陶瓷刀具材料的磨损率逐渐减小; 当滑动速度为 15m/min 时, 载荷由 55N 增加到 60N 时, 对磨材料间的摩擦系数和 TTNC 陶瓷刀具材料的磨损率增加缓慢; 当载荷由 60N 增加到 70N 时, 摩擦系数与磨损率急剧增加。磨损后的 TTNC 陶瓷刀具材料表面留有犁沟、片层结构、凹坑以及撕裂面, TTNC 陶瓷刀具材料的磨损机理为磨粒磨损和粘着磨损。

**关键词:** TiB<sub>2</sub>-TiN-Ni-C<sub>sf</sub> 陶瓷刀具; 摩擦系数; 磨损机理

**中图分类号:** TG711; TH161

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.03.005

## Tribological Properties of TiB<sub>2</sub>-TiN-Ni-C<sub>sf</sub> Ceramic Tool Material Sliding Against 316L Austenitic Stainless Steel

Cao Lei, Song Jinpeng, Gao Jie

**Abstract:** Tribological properties of TiB<sub>2</sub>-TiN-Ni-C<sub>sf</sub> (TTNC) ceramic tool material sliding against 316L austenitic stainless steel have been studied. The results show that when the load is 65N and the sliding speed increases from 6m/min to 15m/min, the friction coefficient between these two materials and wear rate of TTNC ceramic tool material decreased; when the sliding speed is 15m/min and the load increases from 55N to 60N, friction coefficient and wear rate increased slowly; however, when the load increases from 60N to 70N at the sliding speed of 15m/min, the friction coefficient and wear rate increases dramatically; ploughs, lamellar structure, pits and tearing surfaces are left in the wear surface of TTNC ceramic tool material; the wear mechanism of this ceramic includes abrasive wear and adhesive wear.

**Keywords:** TiB<sub>2</sub>-TiN-Ni-C<sub>sf</sub> ceramic tool; friction coefficient; wear mechanism

## 1 引言

陶瓷刀具具有高的硬度、良好的化学稳定性、优异的耐磨性和耐热性等优点, 适用于对材料进行高速切削、硬切削和干切削<sup>[1-3]</sup>。陶瓷刀具的最佳切削速度是硬质合金刀具的 2-10 倍, 有助于提高加工效率和加工质量, 且其原料来源相对广泛<sup>[4,5]</sup>。

随着难加工材料的不断增多及广泛应用, 采用传统刀具切削难加工材料时, 刀具对切削液的依赖性较强, 切削液的使用在一定程度上会对环境造成负面影响; 而干切削可以避免切削液的使用, 起到保护环境的作用<sup>[6]</sup>。传统刀具在干切削条件下, 由于其红硬性较低, 无法满足难加工材料的高速高效加工。陶瓷刀具较传统刀具具有更高的红硬性, 是高速高效干切削难加工材料的首选刀具。在干切削时, 由于切削温度高、切削力大, 刀具与被加工材料

间会发生剧烈的摩擦, 不合理的切削参数会加快陶瓷刀具材料的磨损, 严重影响刀具的使用寿命。因此, 研究陶瓷刀具在切削过程中的摩擦性能并分析其磨损机理, 对合理选择切削参数、有效延长刀具寿命具有十分重要的意义。

TiB<sub>2</sub> 基陶瓷刀具硬度高、熔点高、化学稳定性好, 在高速干切削难加工材料方面具有很大的潜力<sup>[7,8]</sup>。目前采用不同的工艺制备了多种性能良好的 TiB<sub>2</sub> 基陶瓷刀具, 但对其干摩擦磨损性能研究较少。基于此, 依据前期研制的具有良好力学性能的 TiB<sub>2</sub>-TiN-Ni-C<sub>sf</sub> (TTNC) 陶瓷刀具材料<sup>[9]</sup>, 本文主要研究其与 316L 奥氏体不锈钢的干摩擦磨损性能, 并分析其磨损机理。

## 2 试验方法

采用 CFT-I 型综合材料表面性能综合测试仪测试 TiB<sub>2</sub>-TiN-Ni-C<sub>sf</sub> (TTNC) 陶瓷刀具材料与 316L 奥氏体不锈钢对磨时的性能, 试验温度为室温 (25℃), 无润滑条件, 运动方式为往复式运动, 滑动

行程为5mm,测试时间为20min,刀具材料的表面粗糙度为 $0.02\mu\text{m}$ ,所选对磨球的材料为316L奥氏体不锈钢,对磨球的直径为5mm,表面粗糙度为 $0.03\mu\text{m}$ ,硬度为26HRC,屈服强度 $\geq 170\text{MPa}$ 。316L奥氏体不锈钢的化学成分见表1。

表1 316L奥氏体不锈钢化学成分 (wt.%)

元素	C	Si	Mn	P	S
含量	0.03	1.0	2.0	0.045	0.03
元素	Ni	Cr	Mo	Fe	
含量	10.0-14.0	16.0-18.0	2.0-3.0	余量	

将样条固定在CFT-I型综合材料表面性能综合测试仪的夹具上,采用往复式摩擦法测试对磨材料间的摩擦磨损性能。依据测试仪自动采集的瞬时摩擦系数曲线,获取对磨材料间的平均摩擦系数。通过测试仪附带的探针测试磨损量,测试3次并求平均值,以计算刀具材料的磨损率。利用扫描电镜测试陶瓷刀具材料磨损面的形貌,借助能谱分析仪测试磨损面的物质构成,分析磨损面的微观形貌,并揭示其磨损机理。

试验参数为:①当试验载荷为65N时,滑动速度分别为6m/min、9m/min、12m/min、15m/min;②当滑动速度为15m/min时,试验载荷分别为55N、60N、65N、70N。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 TTNC陶瓷刀具材料与316L奥氏体不锈钢间的摩擦系数及其磨损率

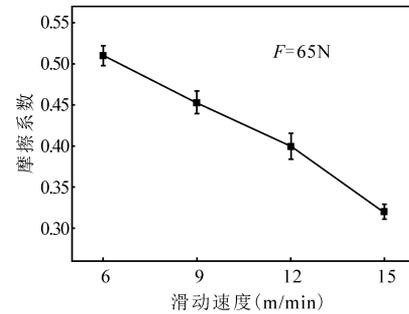
图1是两种对磨材料在不同载荷和滑动速度下的摩擦系数和TTNC陶瓷刀具材料的磨损率。由图1a可知,当载荷为65N时,对磨材料间的摩擦系数介于0.30-0.52之间,随着相对滑动速度的增加,摩擦系数逐渐减小。当滑动速度为6m/min时,摩擦系数最大,其值为 $0.51 \pm 0.01$ ;当滑动速度为15m/min时,摩擦系数最小,其值为 $0.32 \pm 0.01$ 。

由图1b可知,当载荷为65N时,TTNC陶瓷刀具材料的磨损率随着滑动速度的增加而逐渐减小。当滑动速度为6m/min时,磨损率最大,其值为 $1.67 \pm 0.05 \times 10^{-5} \cdot \text{mm}^3 / (\text{m} \cdot \text{N})$ ;当滑动速度为15m/min时,磨损率最小,其值为 $1.38 \pm 0.05 \times 10^{-5} \cdot \text{mm}^3 / (\text{m} \cdot \text{N})$ 。

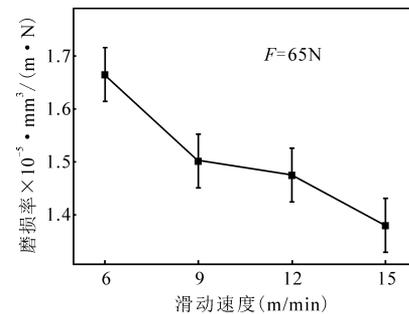
由图1c可知,当滑动速度为15m/min时,随着载荷由55N增加到70N,对磨材料间的摩擦系数不断增大。当载荷为55N时,它们间的摩擦系数最小,其值为 $0.30 \pm 0.01$ ;当载荷为70N时,它们间的

摩擦系数最大,其值为 $0.37 \pm 0.01$ 。

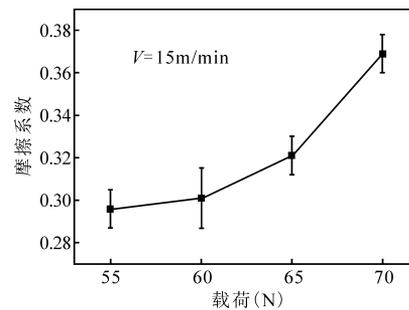
由图1d可知,当滑动速度为15m/min时,随着载荷的增加,TTNC陶瓷刀具材料的磨损率不断增大。当载荷为55N时,磨损率最小,其值为 $0.76 \pm 0.05 \times 10^{-5} \cdot \text{mm}^3 / (\text{m} \cdot \text{N})$ ;当载荷为70N时,磨损率最大,其值为 $1.43 \pm 0.07 \times 10^{-5} \cdot \text{mm}^3 / (\text{m} \cdot \text{N})$ 。



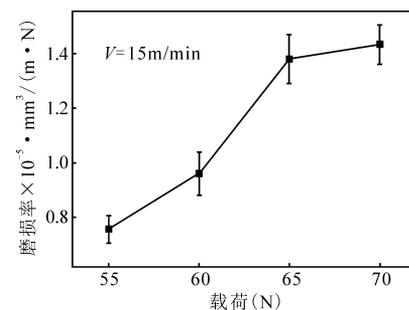
(a) 固定载荷下的摩擦系数



(b) 固定载荷下的磨损率



(c) 固定滑动速度下的摩擦系数



(d) 固定滑动速度下的磨损率

图1 TTNC陶瓷刀具材料与316L奥氏体不锈钢间的摩擦系数及其磨损率

图2是TTNC陶瓷刀具磨损面形貌和EDS图。图2a中,陶瓷刀具材料表面存在大量的往复磨痕,

并且材料表面存在大量的犁沟,图 2b 中存在大量凹坑、片层结构以及撕裂面。这两种材料在对磨过程中,其表面非绝对光滑,根据微凸体理论<sup>[10]</sup>,表面的微凸体在对磨过程中相互啮合,在挤压力和剪切力的作用下,微凸体从对磨材料表面剥落,形成磨屑。剥落的未能及时离开摩擦面的硬质磨屑在挤压力的作用下,被压入对磨面,在滑动作用下,将对刀具材料进行划擦,最终在刀具材料表面形成一道道犁沟。

由图 2b 可见,陶瓷刀具材料表面存在许多凹坑,这是由于陶瓷刀具材料表面的晶粒在交变应力作用下发生了疲劳破损,晶粒被剥落后形成。图 2c 为图 2b 中点 a 的 EDS,由其可知,磨损面上出现了一些非 TTNC 陶瓷材料含有的元素,比如 O、Cr、Mn、Fe 和 C,除 O 元素外的这些元素属于表 1 所列的 316L 奥氏体不锈钢中所含元素。这表明在对磨过程中,316L 奥氏体不锈钢的磨屑黏附到陶瓷刀具材料的表面。O 元素的存在说明在对磨过程中,陶瓷刀具材料发生了氧化反应。根据文献[11],可能发生的反应为

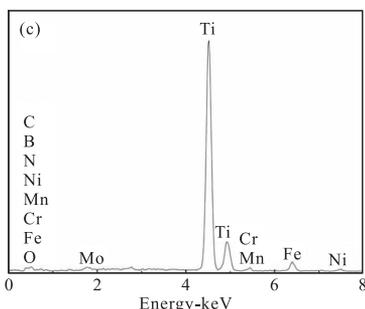
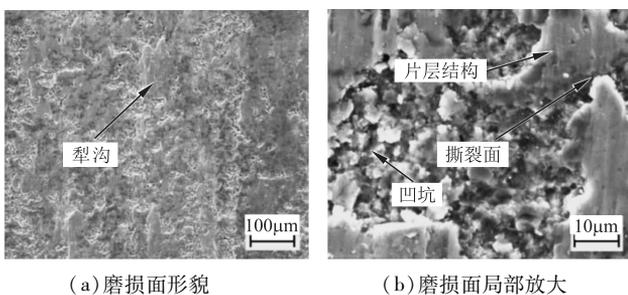
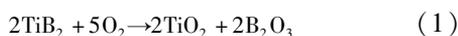


图 2 TTNC 陶瓷刀具材料的磨损面形貌和 EDS

在对磨过程中,由于温度升高导致对磨面发生氧化反应,并且形成氧化膜。形成的氧化膜能够有效防止陶瓷材料表面被破坏。此外,TTNC 陶瓷材料以及对磨球中都含有一定量的金属成分,对磨过程中随着温度的升高,金属软化并且粘附到对磨面形成粘附层。因此,图 2b 中的片层结构由对磨过程

中形成的氧化膜和粘附层构成。随着对磨过程的进行,粘附在陶瓷材料表面的物质逐渐增多,粘附层逐渐变厚,其在交变应力的作用将被撕裂形成撕裂面(见图 2b)。

### 3.2 TTNC 陶瓷刀具材料磨损机理

由图 1a 和图 1b 可知,当载荷不变,TTNC 陶瓷刀具材料与 316L 奥氏体不锈钢对磨时,随着滑动速度的增加,摩擦系数与磨损率都逐渐降低。这是因为在较低的滑动速度下,对磨面间产生的热量较少,陶瓷材料表面温度较低,产生的氧化物保护膜较少,且对磨球对刀具材料表面的粘附作用较弱,形成的氧化膜和粘附层对对磨面的润滑作用也较弱。此外,在对磨过程中,剥落的硬质磨屑未能及时离开摩擦表面,导致硬质磨屑介于对磨面间,当滑动速度较低时,摩擦系数较大。

在载荷压力作用下,加速了硬质磨屑对对磨面的作用,造成对磨面材料的大量脱落,最终导致高的磨损率。随着滑动速度的升高,对磨面间产生的热量增加,温度逐渐升高,导致对磨表面的氧化加剧,形成的氧化物保护膜变厚。同时,随着温度的升高,对磨材料间的粘附作用增强,更多的磨屑被粘附到对磨表面形成粘附层。在氧化物保护膜以及粘附层的润滑作用下,对磨面的粗糙度下降,对磨表面的晶粒脱落减少,从而导致摩擦系数与磨损率降低。

由图 1c 和图 1d 可知,当滑动速度不变,TTNC 陶瓷刀具材料与 316L 奥氏体不锈钢对磨时,随着载荷的增加,摩擦系数与磨损率都在逐渐增大。当载荷从 55N 增加到 60N 时,摩擦系数与磨损率的增加较为缓慢。这是因为在对磨过程中,当载荷较小时,对磨球对刀具材料表面的挤压力较小。随着载荷的增加,对磨球表面与陶瓷刀具材料表面的微凸体啮合程度加深,导致硬质磨屑增多,在干对磨条件下,剥落的硬质磨屑不能及时离开对磨面,导致对磨表面摩擦系数上升。

剥落的硬质磨屑在对磨过程中进一步磨损对磨表面,导致磨损率升高,同时,随着载荷的增加,对磨表面的温度逐渐升高,对磨面的氧化加剧,将在对磨面上形成氧化膜。氧化膜可以有效地润滑对磨表面<sup>[12]</sup>,使摩擦系数与磨损率的升高比较缓慢。当载荷从 60N 增加到 70N 时,摩擦系数与磨损率急剧增大。这是因为随着载荷的进一步增加,对磨球表面与陶瓷刀具材料表面的微凸体啮合程度加强,微凸体间受到的挤压力与剪切力增大,从而导致剥落的硬质磨屑增多。

在干对磨条件下,剥落的硬质颗粒不能及时离开对磨面,导致磨损加剧,使对磨材料间的摩擦系数急剧上升。同时,载荷较大时,对磨面温度较高,导致对磨面的粘附物增多以及氧化加剧,形成的氧化物薄膜与粘附层变厚。由于载荷较大,氧化膜和粘附层受到的挤压力与剪切力较大,氧化膜和粘附层上将产生微裂纹,经过长时间的对磨,微裂纹逐渐延伸扩大从而导致陶瓷材料表面撕裂而发生粘着磨损,最终导致陶瓷材料表面出现成片的剥落。因此,随着载荷的增加,摩擦系数与磨损率都在升高。

#### 4 结语

(1)当载荷为65N时,随着滑动速度从6m/min增大到15m/min,TTNC陶瓷刀具材料与316L奥氏体不锈钢间的摩擦系数和TTNC陶瓷刀具材料表面的磨损率逐渐减小。当滑动速度为15m/min时,摩擦系数和磨损率最小,分别为 $0.32 \pm 0.01$ 和 $1.38 \pm 0.05 \times 10^{-5} \cdot \text{mm}^3 / (\text{m} \cdot \text{N})$ ;当滑动速度为15m/min时,载荷由55N增加到60N时,摩擦系数和磨损率增加比较缓慢。

载荷由60N增加到70N时,摩擦系数和磨损率急剧增大;当载荷为55N时,摩擦系数和磨损率最小,分别为 $0.30 \pm 0.01$ 和 $0.76 \pm 0.05 \times 10^{-5} \cdot \text{mm}^3 / (\text{m} \cdot \text{N})$ 。

(2)TTNC陶瓷刀具材料与316L奥氏体不锈钢对磨后,陶瓷刀具材料表面留有犁沟、片层结构、凹坑以及撕裂面,TTNC陶瓷刀具材料的磨损机理为磨粒磨损和粘着磨损。

#### 参考文献

- [1]卫宏,郭晓磊,张清,等.陶瓷刀具铣削高密度纤维板的磨损分析研究[J].中南林业科技大学学报,2018,38(4):114-120.
- [2]周晨,杨巍.机械切削视域下的陶瓷刀具研究进展及趋势[J].山东陶瓷,2015,38(3):5-7.
- [3]殷增斌,袁军堂,黄雷,等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基多尺度颗粒复合陶瓷刀具材料的摩擦磨损性能[J].材料研究学报,2016,30(10):753-758.

- [4]张辉,邓建新,吴泽,等.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ 基陶瓷刀具材料的高温摩擦磨损性能研究[J].摩擦学学报,2011,31(4):369-374.
- [5]刘玉波,徐衍锋,冯准.陶瓷刀具高速铣削镍基高温合金的磨损机理[J].黑龙江科技大学学报,2017,27(2):172-175.
- [6]张辉,李桂玉,付增,等.切削刀具摩擦磨损的研究方法综述[J].制造技术与机床,2015(1):142-146.
- [7] Zengbin Yin, Juntang Yuan, Weiwei Xu, et al. Graphene-nanosheets toughened  $\text{TiB}_2$ -based ceramic tool material by sparkplasma sintering[J]. Ceramics International, 2018, 44: 8977-8982.
- [8] Jinpeng Song, Chuanzhen Huang, Bin Zou, et al. Microstructure and mechanical properties of  $\text{TiB}_2$ -TiC-WC composite ceramic tool materials[J]. Materials and Design, 2012, 36: 69-74.
- [9]高杰,宋金鹏,梁国星,等.碳纤维含量对  $\text{TiB}_2$ -TiN基复合陶瓷组织和性能的影响[J].工具技术,2017,51(12):67-70.
- [10] R C Simões, S J Valder, D H Johan, et al. Modal active vibration control of a rotor using piezoelectric stack actuators [J]. Journal of Vibration and Control, 2007, 13(1):45-64.
- [11] Golla Brahma Raju, Bikramjit Basu. Wear mechanisms of  $\text{TiB}_2$  and  $\text{TiB}_2$ - $\text{TiSi}_2$  at fretting contacts with steel and WC-6wt% Co [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2010, 7(1):89-103.
- [12]张诚,宋金鹏,梁国星. WC/TiC层状陶瓷刀具与316L不锈钢间的干摩擦磨损性能研究[J].现代制造工程,2017(9):13-16.

第一作者:曹磊,硕士研究生,太原理工大学机械工程学院,精密加工山西省重点实验室,030024 太原市

First Author: Cao Lei, Postgraduate, College of Mechanical Engineering and Key Laboratory of Precision Manufacturing, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

通信作者:宋金鹏,副教授,太原理工大学机械工程学院,精密加工山西省重点实验室,030024 太原市

Corresponding Author: Song Jinpeng, Associate Professor, College of Mechanical Engineering and Key Laboratory of Precision Manufacturing, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China