

TiB₂ 增强 Al₂O₃ 陶瓷刀具高速 干切削摩擦磨损性能

邓建新, 张希华, 李剑峰, 孙高祚, 曹同坤

(山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 采用 TiB₂ 增强 Al₂O₃ 陶瓷刀具对淬硬钢进行高速干切削试验, 利用切削高温作用下的摩擦化学反应, 在刀具表面原位生成具有润滑作用的反应膜, 从而实现 Al₂O₃/TiB₂ 陶瓷刀具的自润滑。结果表明: 低速干切削时, Al₂O₃/TiB₂ 陶瓷刀具的磨损机制主要表现为粘着磨损和磨料磨损; 而在高速干切削时, 刀具的磨损机制主要表现为氧化磨损, 刀具表面经由氧化反应生成具有润滑作用的反应膜而起到固体润滑作用, 从而使刀具的耐磨性能提高。随着 TiB₂ 含量和切削速度的增加, 反应膜的减摩抗磨作用增强; 而在切削区通入氮气时, 由于刀具表面氧化膜形成受阻, 刀具的抗磨能力有所降低。

关键词: 陶瓷刀具; 高速切削; 干切削; 摩擦磨损性能

中图分类号: TQ 174

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2004)03-0197-05

由于能够极大提高生产效率、降低切削力、提高加工表面质量, 高速切削引起了研究者的广泛关注^[1~3], 代表了切削加工的发展方向。高速切削将产生大量的切削热, 为了避免切削热导致机床、工件和刀具的热变形, 高速切削机床大多采用高压大流量切削液进行冷却和润滑。然而, 大量使用切削液必然导致严重的环境污染, 因此有必要加强高速干切削技术的研究, 以避免切削液所造成的负面影响^[4,5]。在高速干切削过程中, 刀具与工件之间的摩擦加剧, 大量切削热导致切削温度急剧升, 从而使刀具寿命降低。为此迫切需要开发适用于高速干切削的新型刀具, 目前在这方面已取得了初步进展, 研制成功了新型涂层刀具、聚晶氮化硼(PCBN)和新型陶瓷刀具等适用于高速干切削工况的新型刀具^[2,5,6]。

高速干切削的切削温度很高, 刀具表面在高温作用下有可能发生摩擦化学反应。如果能有效利用这种摩擦化学反应, 在刀具表面原位生成具有润滑作用的反应膜, 将可能实现刀具的自润滑, 从而研制出适用于高速干切削的新型刀具。鉴于硼化物在摩擦过程中容易经由氧化而生成具有较低剪切强度的润滑膜^[7,8], 我们以 TiB₂ 作为增强相制备了 Al₂O₃/TiB₂ 陶瓷刀具, 并将所研制的刀具用于淬火钢高速干切削

试验, 分析了刀具表面摩擦化学反应机理以及自润滑膜的组成和结构, 探讨了刀具的减摩和抗磨机理。

1 实验部分

1.1 材料制备

所采用的氧化铝粉末为 α -Al₂O₃, 纯度 > 99.9%, 密度为 3.99 g/cm³, 粉末平均粒径 < 0.8 μ m。所采用的 TiB₂ 粉末纯度 > 99.8%, 密度为 4.5 g/cm³。TiB₂ 硬度极高, 使用前需经 250 h 强化球磨, 使其平均粒径小于 1.0 μ m。将 α -Al₂O₃ 粉末和球磨后的 TiB₂ 粉末按适当比例混合, 经干燥后在流动氮气中过筛。以氮气为烧结气氛, 采用热压烧结工艺制备 Al₂O₃/TiB₂ 陶瓷刀具, 烧结温度为 1500~1800 °C, 压力为 32 MPa, 保温时间为 10~50 min。将烧结陶瓷材料切割成 3 mm × 4 mm × 36 mm 的长条状试样, 采用排水法测量其密度; 用维氏硬度计测定试样的硬度; 用三点弯曲法测量试样的抗弯强度, 跨距为 30 mm, 加载速率为 0.5 mm/min; 采用压痕法测量试样的断裂韧性。力学性能测量结果列于表 1。

1.2 切削试验

在 CA 6140 型车床上进行高速干切削试验, 工件为 45# 淬硬钢 (45~50 HRC), 刀具为 Al₂O₃/TiB₂ 陶

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275088); 山东省中青年科学家奖励基金资助项目(0BS064); 教育部优秀青年教师资助项目(2055)。

收稿日期: 2003-05-20; 修回日期: 2003-07-09/联系人邓建新, e-mail: jxdeng@sdu.edu.cn

作者简介: 邓建新, 男, 1966年生, 博士, 教授, 博导, 目前主要从事切削加工、切削可靠性以及陶瓷材料摩擦学等方面的研究。

表 1 不同 TiB₂ 含量的 Al₂O₃/TiB₂ 陶瓷刀具的力学性能

Table 1 Mechanical properties of Al₂O₃/TiB₂ ceramic tools with different TiB₂ contents

Sample	TiB ₂ content /%	Relative density D /%	Bending strength σ_f /MPa	Fracture toughness K_{IC} /MPa $\cdot$ m ^{1/2}	Hardness HV/GPa
AB10	10	99.9	650	3.7	19.6
AB20	20	99.7	775	4.7	20.1
AB30	30	99.2	785	5.2	20.8
AB40	40	98.5	675	5.3	21.3

瓷刀具, 刀片规格为 SNGN 15608, 刀片几何参数为: $\gamma_0 = -5^\circ$, $\alpha_0 = 5^\circ$, $\lambda_0 = -5^\circ$, $K_r = 75^\circ$, $b_m \times r_{01} = 0.2 \times (-20)$. 切削试验条件为: 进给量 $f = 0.15$ mm/r, 切削深度 $a_p = 0.4$ mm, 切削时间 $t = 12$ min. 采用光学显微镜测量刀具后刀面磨损量(V_B)和前刀面磨损深度, 采用 Kistler 压电晶体测力仪测量切削力, 采用自然热电偶法测量刀具前刀面平均切削温度, 采用扫描电子显微镜(SEM)观察刀具磨损表面形貌

2 结果与讨论

采用不同 TiB₂ 含量的 Al₂O₃/TiB₂ 陶瓷刀具切削淬硬钢 图 1 示出了 TiB₂ 含量和切削速度对刀具

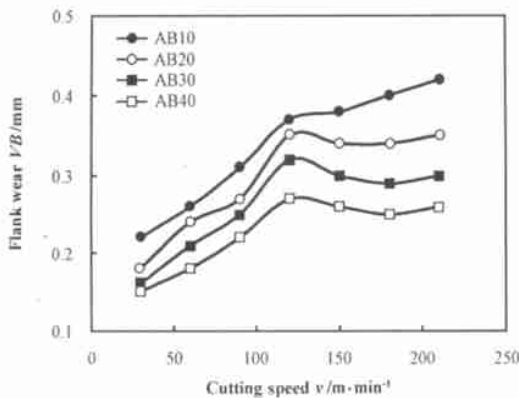


Fig 1 Effect of TiB₂ content and cutting speed on the flank wear of Al₂O₃/TiB₂ tool in dry cutting of hardened steel

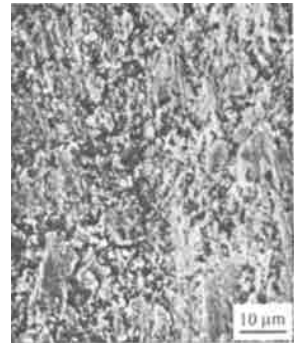
图 1 TiB₂ 含量和切削速度对 Al₂O₃/TiB₂ 陶瓷刀具后刀面磨损量的影响

后刀面磨损的影响 可以看出, 几种刀具的耐磨性能优劣顺序为: AB40> AB30> AB20> AB10 换言之, TiB₂ 含量越高, Al₂O₃/TiB₂ 陶瓷刀具的抗磨能力越强 与此同时, 随着切削速度的升高, 刀具后刀面磨损量的变化规律不同 除了 AB10 以外, 当切削速度 $v < 120$ m/min 时, V_B 值随 v 的增加而增大; 当 $v > 120$ m/min 时, V_B 值随着 v 的增加呈减小趋势

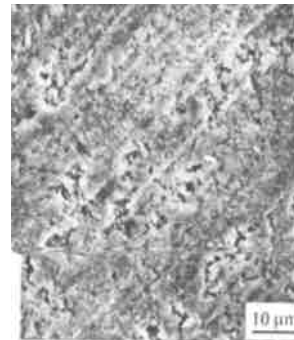
图 2(a)所示为 $v = 60$ m/min 时, AB30 陶瓷刀具



(a) Wear profile



(b) Crater wear



(c) Flank wear

Fig 2 SEM micrographs of the wear area of AB30 ceramic cutting tool

图 2 AB30 陶瓷刀具磨损区形貌的 SEM 照片

刀尖处的磨损表面形貌 SEM 照片 可见刀具前、后刀面均发生磨损, 其中前刀面发生严重的月牙洼磨损 图 2(b 和 c)所示分别为 AB30 陶瓷刀具前、后刀

面磨损区形貌的高倍 SEM 照片, 可见刀具前刀面磨损区呈现明显的粘着现象, 而后刀面存在犁沟, 呈现典型的磨粒磨损特征。据此可以推测, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TB}_2$ 陶

瓷刀具在低速干切削条件下主要发生粘着磨损和磨料磨损。

图3示出了 $\text{AB}30$ 陶瓷刀具在空气和氮气气氛

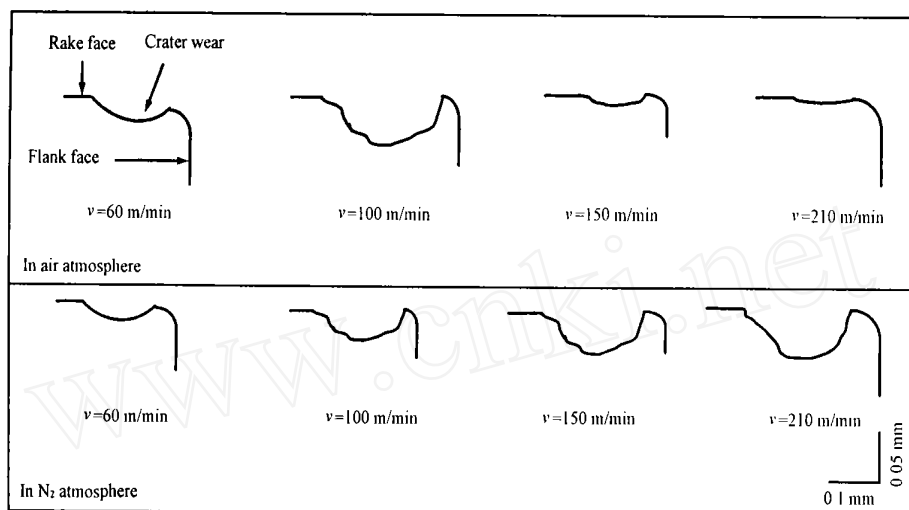


Fig 3 Schematic diagram of the crater wear profiles of AB30 tool in different atmospheres and cutting conditions

图3 在不同切削气氛中 $\text{AB}30$ 陶瓷刀具前刀面月牙洼磨损轮廓随切削速度变化的情况

瓷前刀面月牙洼磨损轮廓随切削速度的变化情况。可以看出, 在不同的切削气氛中, 刀具前刀面月牙洼磨损的变化规律不同。在空气中, 当 $v \leq 100 \text{ m/min}$ 时, 前刀面月牙洼磨损较显著, 而当 $v > 100 \text{ m/min}$ 时, 前刀面月牙洼磨损逐渐减轻, 当 $v = 210 \text{ m/min}$ 时, 前刀面月牙洼磨损几乎消失; 而在氮气中, 刀具前刀面月牙洼磨损随切削速度的增加而增大。

图4示出了切削速度对切削温度的影响。可见:

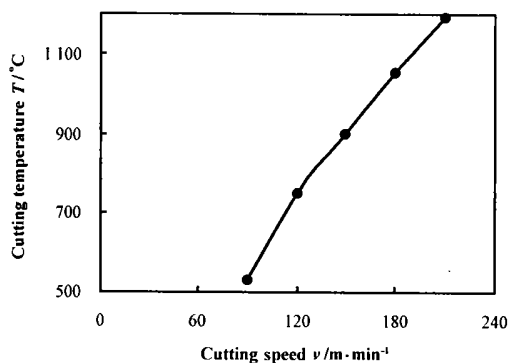


Fig 4 Effect of cutting speed on the cutting temperature of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TB}_2$ tool in dry cutting of hardened steel

图4 切削速度对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TB}_2$ 陶瓷刀具切削温度的影响

随着切削速度增加, 切削温度升高。当 $v > 120 \text{ m/min}$ 时, 切削温度大于 800°C ; 当 $v = 210 \text{ m/min}$ 时, 切削

温度达 1190°C 。由于所测切削温度为平均温度, 实际瞬时最高温度可能更高。在这样高的切削温度下, 刀具中的 TB_2 将发生氧化。针对 $\text{AB}30$ 陶瓷刀具切削前、后 ($v = 180 \text{ m/min}$) 前刀面磨损区的 XRD 分析结果表明, 切削后刀具磨损区 XRD 图谱出现了明显的 TiO_2 谱峰, 证实 TB_2 在切削高温作用下氧化生成了 TiO_2 和 B_2O_3 [9~11]。随着陶瓷刀具表面氧化膜的形成, 切削过程中的摩擦将发生于氧化膜表面 [12, 13]。由于 TB_2 的氧化产物 TiO_2 的弹性模量和硬度同刀具基体材料相比低得多, 其抗剪强度显著降低, 相应的摩擦系数亦明显降低。换言之, TB_2 的氧化产物 TiO_2 可在切屑和刀具前刀面之间起固体润滑作用, 从而减轻刀具与切屑之间的粘着, 减小切削力和刀具前刀面的平均摩擦系数, 减轻刀具的磨损, 提高刀具的耐磨性能。因此, 当 $v > 120 \text{ m/min}$ 时, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TB}_2$ 陶瓷刀具前刀面磨损逐渐转变为以氧化磨损为主的轻微磨损, 并表现出一定的固体润滑作用, 且 TB_2 含量越高, 固体润滑作用越显著。此时, 刀具的磨损量将随切削速度的增大而呈现降低趋势。

根据所测量的切削力可以计算刀具前刀面的平均摩擦系数 [14]。图5示出了不同 TB_2 含量的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TB}_2$ 陶瓷刀具前刀面与切屑间平均摩擦系数 (μ) 随切削速度变化的关系曲线。可见: 当 $v < 120 \text{ m/min}$ 时, μ 值变化不明显; 而当 $v > 120 \text{ m/min}$ 时, μ 值显著减小, 且 TB_2 含量越高, μ 值下降幅度越大。

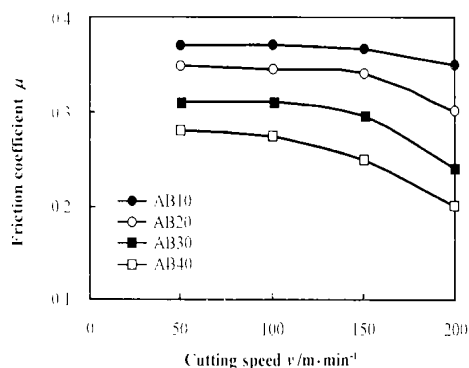
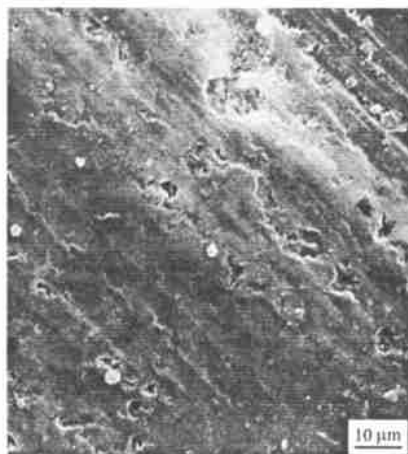


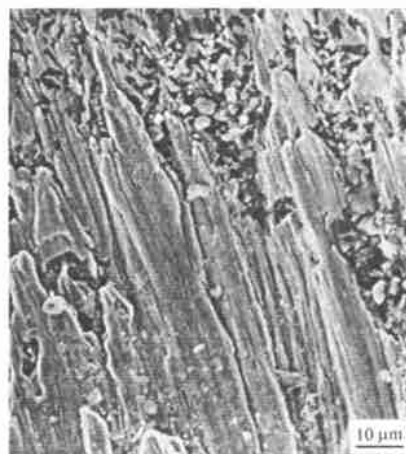
Fig 5 Effect of cutting speed on the friction coefficient of tool-chip against $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2$ tool in dry cutting of hardened steel

图5 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2$ 陶瓷刀具干切削淬硬钢时刀-屑间平均摩擦系数随切削速度变化的关系曲线

其原因在于, 随切削速度的升高, 切削温度增大, TiB_2 氧化速度加快, 氧化产物增多; 而在 v 值相同时, 刀具



(a) Air atmosphere



(b) N_2 atmosphere

Fig 6 SEM micrographs of the rake face of AB30 ceramic tool cutting steel in air and N_2

图6 AB30 陶瓷刀具在空气和氮气气氛中前刀面磨损区形貌 SEM 照片

应, 在刀具材料表面原位生成具有润滑作用的反应膜, 润滑膜的主要成分为 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2$ 陶瓷刀具中 TiB_2 的氧化产物, 其能够在刀具表面起到固体润滑作用, 提高刀具的耐磨性能

b 在低速干切削条件下, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2$ 陶瓷刀具主要表现出粘着磨损和磨料磨损特征; 在高速干切削条件下, 除 AB10 以外, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2$ 陶瓷刀具的耐磨性能随切削速度的增加呈增大趋势, 此时刀具的磨损逐渐转变为以氧化磨损为主的轻微磨损

c 在切削区通入氮气使得 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2$ 陶瓷刀具的抗磨能力降低, 这是由于氮气抑制了刀具表面氧化膜的形成所致

材料中的 TiB_2 含量越高, 氧化越容易进行。由于 TiB_2 氧化产物的润滑作用, 摩擦系数随切削速度和 TiB_2 含量增大呈减小趋势

从图 3 所示结果可以看出, 在氮气气氛中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiB}_2$ 陶瓷刀具的耐磨性能有所降低。这是由于氮气抑制刀具表面的氧化所致。图 6 示出了 AB30 陶瓷刀具分别在空气和氮气气氛中干切削(切削速度 $v = 210 \text{ m/min}$) 淬硬钢时前刀面磨损区形貌 SEM 照片。可以看出, 在空气中刀具前刀面磨损区比较光滑, 无明显粘着物, 但覆盖着具有一定强度的氧化膜(超声清洗或手擦洗难以去除); 而在氮气气氛中刀具前刀面磨损区存在明显的粘着物及大量犁沟(EDAX 分析结果证实粘着物主要成分为铁)。

3 结论

a 以 TiB_2 增强 Al_2O_3 陶瓷刀具对淬硬钢进行高速干切削, 可利用切削高温作用下的摩擦化学反

参考文献

- [1] Sandstrom D R, Hodowany J N. Modeling the physics of metal cutting in high-speed machining [J]. *Machining Science and Technology*, 1998, 22: 343-353
- [2] Dolinsek S, Sustarsic B, Kopac J. Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes [J]. *Wear*, 2001, 250-251: 349-356
- [3] Liu ZQ (刘战强), Ai X (艾兴). Wear characteristics of cutting tools in high speed machining (高速切削刀具磨损表面形态研究) [J]. *Tribology (摩擦学学报)*, 2002, 22(6): 468-471
- [4] Klocke F, Eisenblatter G. Dry cutting [J]. *Annals of the CIRP*, 1997, 46(2): 519-526
- [5] Kustas F M. Nanocoatings on cutting tool for dry machining

- [J]. CIRP, 1997, 46(1): 39-42
- [6] Klocke F, Krieg T. Coated tools for metal cutting—features and applications[J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(2): 515-525
- [7] Jeffrey R R. Mechanical properties of TiB_2 ceramic composites[J]. Journal of American Ceramic Society, 1985, 68(3): 78-84
- [8] Deng Jianxin, Ai Xing. Friction and wear behavior of Al_2O_3/TiB_2 ceramic composite against cemented carbide in various atmosphere at elevated temperature[J]. Wear, 1996, 195: 128-132
- [9] Matsushita Junichi, Hayashi Shinsuke. Oxidation of TiB_2/Al_2O_3 composites in air[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 1990, 98: 323-326
- [10] Deng Jianxin, Ai Xing. Wear behavior and mechanisms of alumina based ceramic tools in machining of ferrous and non-ferrous alloys[J]. Tribology International, 1997, 30(11): 807-813
- [11] Deng J X (邓建新), Ai X (艾兴). Study on the friction and wear behaviors of Al_2O_3 based ceramic tool material (一种陶瓷刀具材料的摩擦磨损性能研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 1996, 16(1): 35-40
- [12] Page R A. Development of self-lubricating ceramics using surface and bulk oxidizing species [M]. Advances in Engineering Tribology, Illinois: STLE Publication, 1991.
- [13] Sliney H E. Solid lubrication materials for high temperatures—a Review [J]. Tribology International, 1982, 15: 303-314
- [14] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992

Friction and Wear Behavior of TiB_2 Reinforced Al_2O_3 Ceramic Cutting Tool in Dry Cutting of Hardened Steel at High Speed

DENG Jian-xin, ZHANG Xi-hua, LI Jian-feng, SUN Gao-zuo, CAO Tong-kun

(Department of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Dry cutting tests at high speed were carried out with respect to hardened steel and TiB_2 reinforced Al_2O_3 ceramic cutting tools. Thus the friction and wear of the tool was reduced by in-situ forming an oxide film on the tool rake face, making use of the tribochemical reaction at high cutting temperature. The effect of the tool composition on the friction and wear behavior was investigated, and the morphologies of the rake face and rear face of the tool cutting the steel in air and nitrogen were observed on a scanning electron microscope. It was found that the Al_2O_3/TiB_2 tool was dominated by adhesive and abrasive wear in low speed dry cutting; while in high speed dry cutting, the tool was characterized by oxidation wear. An oxide layer of TiO_2 was formed by way of the oxidation of the reinforcing agent TiB_2 at a very much high cutting temperature, which contributed to greatly reducing the friction coefficient and increasing the antiwear life of the tool. Such a friction-reducing and antiwear behavior of the oxide layer was enhanced with increasing content of TiB_2 in the tool composite. However, the tool showed a relatively poorer wear resistance in N_2 than in air, because N_2 acted to retard the oxidation of the TiB_2 and the formation of the oxide layer on the tool rake face.

Key words: ceramic cutting tools; high speed cutting; dry cutting; friction and wear behavior

Author: DENG Jian-xin, male, born in 1966, Ph. D., Professor, email: jxdeng@sdu.edu.cn