

Ti(C, N)基金属陶瓷刀具的高速切削性能与磨损机理

李鹏南^{1,2}, 唐思文¹, 张厚安¹, 张永忠²

(1. 湖南科技大学 机电工程学院, 湘潭 411201;
2. 中国矿业大学 机电工程学院, 徐州 221008)

摘要: 使用不同 C 与 N 摩尔比的 Ti(C, N)固溶体粉末作为基体材料, 采用真空烧结工艺研制两种 Ti(C, N)基金属陶瓷刀片试样, 并考察两种刀片试样和日本住友 T1200A 在不同的切削速度下干式车削 20CrMn 工件的切削性能。利用扫描电子显微镜分析刀具前、后刀面的磨损形态和显微结构, 阐述 Ti(C, N)基金属陶瓷刀具高速切削磨损机理。结果表明: 高速切削时 Ti(C, N)基金属陶瓷刀具的主要磨损形式是粘结、氧化和扩散磨损; 减小 Ti(C, N)固溶体中 C 与 N 的比值可改善 Ti(C, N)基金属陶瓷刀具的耐磨损性。

关键词: Ti(C, N)基金属陶瓷; 刀具; 高速切削; 磨损

中图分类号: TG 711 文献标识码: A

Cutting performance and wear mechanism of Ti(C, N)-based cermets tools in high speed cutting

LI Peng-nan^{1,2}, TANG Si-wen¹, ZHANG Hou-an¹, ZHANG Yong-zhong²

(1. School of Mechatronic Engineering, Hunan University of Science and Technology,
Xiangtan 411201, China;
2. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221008, China)

Abstract: Two Ti(C, N)-based cermet samples were fabricated by using Ti(C, N) solid solution matrix with different molar ratios of C to N and vacuum sintering process. The cutting performance of sample A, sample B and T1200A in the dry cutting 20CrMn steel were studied. The morphologies and microstructure of crater and flank wear were observed by using a scanning electron microscope. The wear mechanism of Ti(C, N)-based cermet tools in high speed cutting was discussed. The results show that the Ti(C, N)-based cermet tools are dominated by adhesion, diffusion and oxidation wear in high speed cutting. And decreasing the ratio of C to N in Ti(C, N) solid solution is helpful to improve the resisting wear capability of Ti(C, N)-based cermet tools.

Key words: Ti(C, N)-based cermet; cutting tool; high-speed cutting; wear

Ti(C, N)基金属陶瓷具有较高的室温硬度、高温强度、良好的耐磨性、化学稳定性及与金属材料的摩擦系数小等优点, 已被广泛应用于金属材料的切削加工^[1-2]。此外, Ti(C, N)基金属陶瓷刀具的切削刃锋利且强度高, 在高速微进给小切深切削条件下, 有利于去除切屑和提高加工表面质量, 可用于高速半精加工

和精加工, 是高硬度工模具净成型加工的首选刀具材料^[3-5], 与电火花成型加工相比, 可大幅提高生产效率^[4]。近年来, 为了进一步提高 Ti(C, N)基金属陶瓷材料的性能和刀具的使用寿命, 使其更适合于高速精密切削的发展, 国内外学者作了大量的研究工作, 主要集中在如下几个方面: 1) 通过添加一定量纳米粉末和

晶粒抑制剂等可得到组织致密、晶粒细小的烧结体, 从而提高其力学性能^[6-9]; 2) 在给定的范围内调节和优化金属陶瓷的成分, 如控制硬质相WC的含量、TiCN固溶体中C与N的比值和粘结相中Co、Ni等措施可改善刀具的耐磨性^[1-2, 10-13]; 3) 研究金属陶瓷表面氮化处理技术, 即在真空烧结成型后直接在氮气中进行处理来获得具有表面梯度结构的材料, 氮化后材料表面的硬度和耐磨性有显著的提高^[14-15]。但是, 在高速切削过程中刀具承受较高的温度和压力, Ti(C, N)基金属陶瓷刀具不可避免地受到不同程度的磨损, 其磨损机理与普通切削过程有所不同。本文作者使用不同C与N比值的Ti(C, N)固溶体粉末作为基体, 采用真空烧结方法研制了Ti(C, N)基金属陶瓷刀片试样A和B, 通过切削实验研究Ti(C, N)基金属陶瓷刀具高速切削时磨损机理, 以期在实际应用中对Ti(C, N)基金属陶瓷刀具的选用、磨损控制以及新型Ti(C, N)基金属陶瓷刀具的研制和开发等方面起指导作用。

1 实验

1.1 刀具材料制备

切削实验用Ti(C, N)基金属陶瓷刀具材料是用市场上购买的TiC_{0.5}N_{0.5}和TiC_{0.7}N_{0.3}固溶体粉末(粒径3.0~4.0 μm)作为基体材料, 然后分别添加Co粉末(粒径<2.0 μm)、Ni粉末(粒径<2.0 μm)、WC粉末(粒径1.3~1.5 μm)、Mo₂C粉末(粒径2.0~2.5 μm)和TaC粉末(粒径1.0~1.5 μm), 按表1的组分进行混料。以正己烷作为介质, 在行星式球磨机上用WC-Co球湿磨48 h, 将湿磨料在90℃下进行真空干燥(1~2 h)后, 350 MPa下模压成型, 再经1400℃真空烧结2 h得到刀片的粗坯, 最后在工具磨床上加工成要求的刀片。

1.2 实验过程

实验在CD6140A型普通车床上采用干车削方式

进行, 工件材料为20CrMn棒料, 硬度为HB 220。在1) 切削速度v=200 m/min, 进给量f=0.18 mm/r, 切削深度a_p=1.0 mm; 2) 切削速度v=300 m/min, 进给量f=0.18 mm/r, 切削深度a_p=0.5 mm的切削条件下, 分别用自制刀片试样A、B和日本住友公司生产的T1200A金属陶瓷刀片进行干切削实验。在40倍工具显微镜下测量刀具后刀面的磨损量值。

采用扫描电子显微镜在背散射电子模式下观测刀具试样的显微组织和在二次电子模式下观察刀具磨损表面的形貌。

2 结果与讨论

2.1 刀具的显微组织与力学性能

实验用的金属陶瓷刀具材料的组成如表1所示。Ti(C, N)固溶体作为硬质相的主要作用是提高刀具的硬度和耐磨性, WC的作用是粘结TaC和TiC^[1], 并提高材料的密度, 改善刀具的断裂韧性^[16]; 粘结相Co和Ni, 以及Mo₂C可提高刀具的强韧性^[2]; TaC的作用是提高抗热冲击能力。刀具的显微组织如图1所示。由图1可知, 刀具由陶瓷硬质相和金属粘结相构成。硬质相由黑色块状的芯(Core)和周围灰色的壳(Rim), 其芯部成分是Ti(C, N)固溶体, 壳部成分主要是(Ti, Mo, Ta, W)(C, N)构成的固溶体, 而粘结相则由Ni、Co和Mo等组成的合金体^[7, 14], 自制刀片试样A和B的力学性能如表1所示。

2.2 刀具的切削性能

在切削实验过程中, 3种刀片均无崩刃现象出现, 前刀面月牙洼(Crater)磨损和后刀面(Flank)磨损均属正常磨损。观察刀具后刀面磨损量值(见图2)。由图可知, 随着切削速度的增加, 刀具的磨损将加快, 在300 m/min切削速度下切削20 min的磨损量就超过切削速度200 m/min时切削30 min的磨损量。比较3种刀片

表1 Ti(C, N)基金属陶瓷刀具试样的成分及力学性能

Table 1 Composition and mechanical properties of Ti(C, N)-based cermets insert

Sample	Matrix	Mass fraction/%					Porosity/%	Hardness, HRA	Bending strength/MPa
		WC	Mo ₂ C	TaC	Co	Ni			
A	50%TiC _{0.5} N _{0.5}	15.0	10.0	7.0	12.0	6.0	2.1	92.8	1 930
B	50%TiC _{0.7} N _{0.3}	15.0	10.0	7.0	12.0	6.0	2.2	92.6	1 750

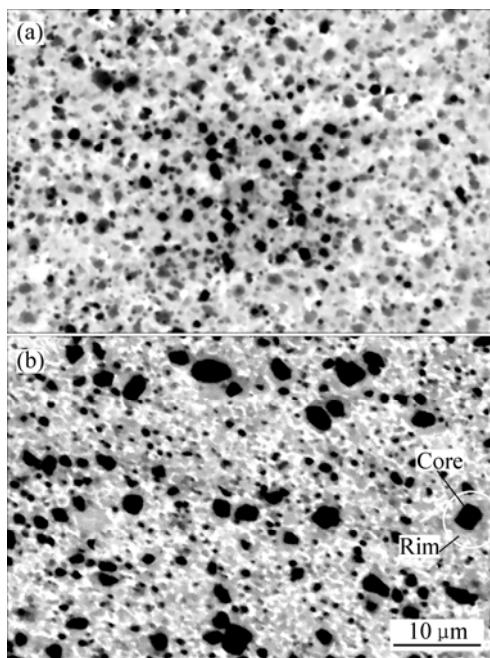


图1 刀具试样的显微组织

Fig.1 Microstructures of tool samples: (a) Sample A; (b) Sample B

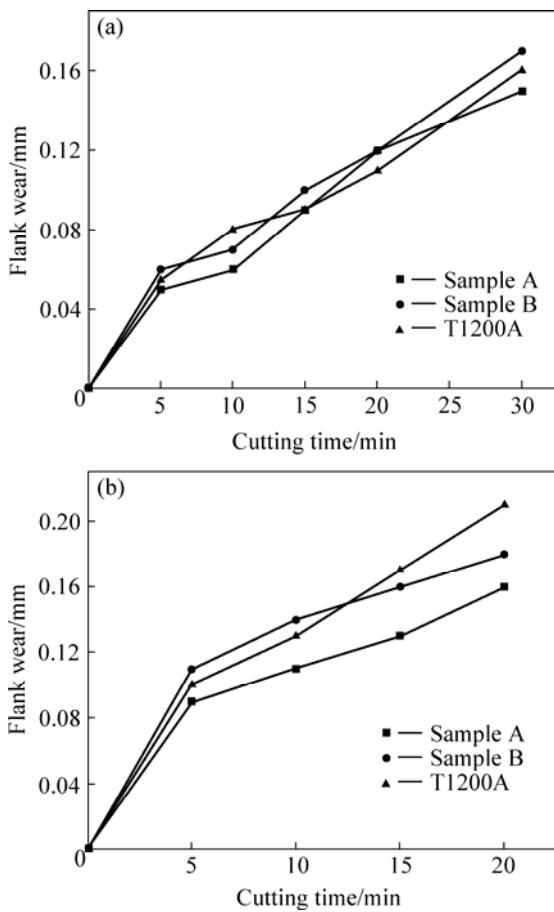


图2 后刀面磨损量与切削时间的关系

Fig.2 Relationship between wear evolution and cutting time on flank: (a) $v=200$ m/min; (b) $v=300$ m/min

的磨损曲线可知，自制刀片试样A的磨损量最小。

2.3 刀具磨损表面的形貌

2.3.1 后刀面的磨损

后刀面的磨损(见图3)主要与材料的抗热震性、硬度和抗氧化粘着能力有关。为了更清晰地描述金属陶瓷刀具后刀面磨损表面的形貌，将各试样的后刀面进行局部放大，并根据观察到的现象，将刀具后刀面的磨损面分成2个区域，如图4所示。其中区，即靠近切削刃的区域，其磨损特征主要是来自刀具与工件直接接触产生的磨损。其原因如下：1) 虽然工件的硬度低于刀具的硬度，但它们当中经常含有一些硬度极高的微小质点如 Fe_3C 等，可在刀具表面划出沟纹，造成磨粒磨损；2) 切削时，工件和后刀面之间，存在较大的压力和摩擦，因而它们之间会发生粘结，在摩擦副相对运动下，造成粘结磨损。区为远离切削刃的区域，高温时，空气中的氧与金属陶瓷中的Co与TiC

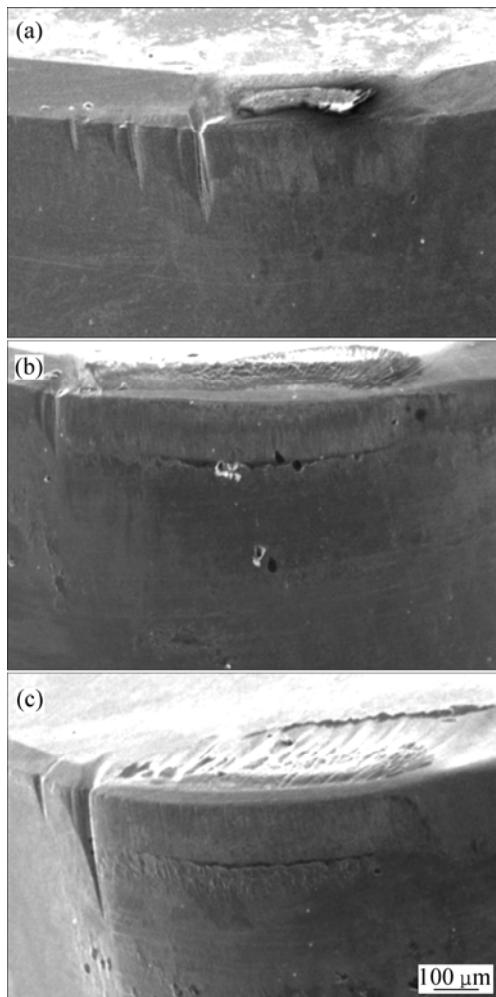


图3 后刀面的磨损形貌

Fig.3 Morphologies of flank wear: (a) Sample A; (b) Sample B; (c) T1200A

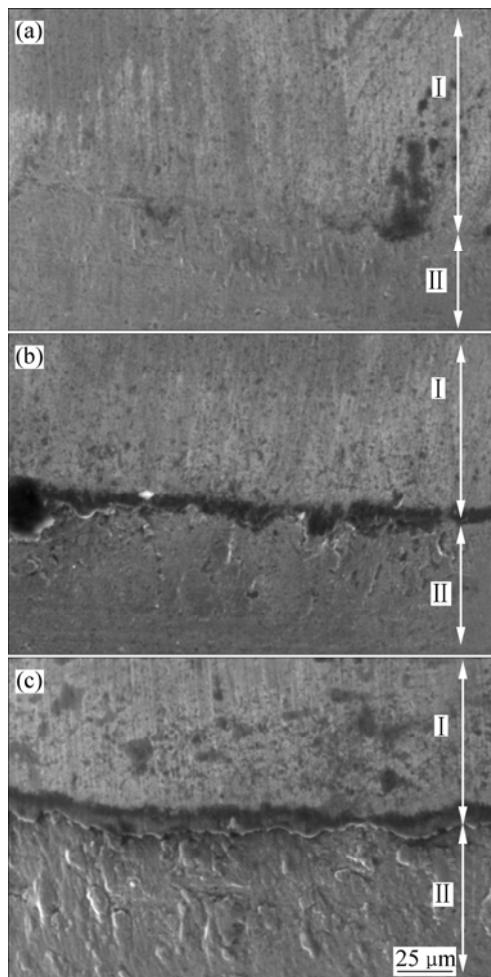


图4 后刀面磨损形貌的局部放大

Fig.4 Local magnify of flank wear: (a) Sample A; (b) Sample B; (c) T1200A

等氧化作用, 产生较软的氧化物(如 Co_3O_4 、 CoO 和 TiO_2 等), 被切屑或工件擦掉面形成磨损, 即氧化磨损。从区来看, 试样A和B的抗磨粒磨损能力强于T1200A; 从区来看, T1200A上有部分氧化粘着物, 试样A最光滑, 试样B出现剥落坑, 说明试样B的抗粘结磨损能力最差, 而试样A表现出最好的抗磨粒、氧化与粘结磨损性能。

2.3.2 前刀面的磨损

前刀面的月牙洼磨损主要与材料的耐热性、化学稳定性和抗扩散抗氧化性能有关。由于切削速度较高, 将产生大量的热量, 导致刀具与工件接触表面的温度升高, 可达1000以上。在高温下, 一方面刀具中的Co和Ni向工件、切屑中扩散加剧, 刀具由于粘结相减少, 脆性增大; 另一方面, 工件及切屑中的Fe向刀具中的扩散也加剧, 扩散至刀具中的Fe将形成新

的低硬度脆性相, 导致刀具的整体性能下降, 使刀具磨损加剧。对比T1200A、试样A和B的磨损形貌可知, 从月牙洼磨损来看, 抗月牙洼磨损性由强至弱的顺序依次为: 试样A>T1200A>试样B; 它们均有热震裂纹, T1200A的最深, 试样B的最浅, 说明抗热震性由强至弱的顺序依次为: 试样B>试样A>T1200A(见图5)。

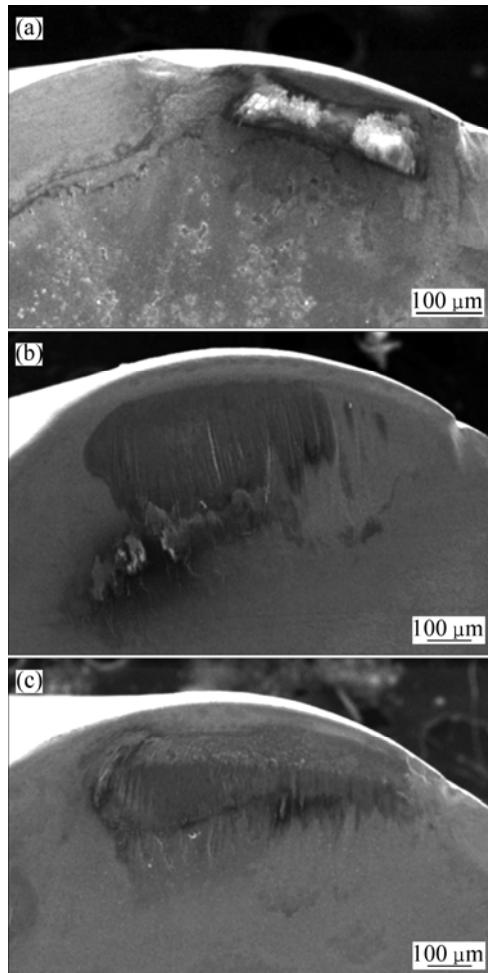


图5 前刀面的磨损形貌

Fig.5 Morphologies of crater wear: (a) Sample A; (b) Sample B; (c) T1200A

2.4 刀具的磨损机理

金属切削过程刀具的磨损形式主要是切削力作用下的机械磨损(包括磨料磨损和粘结磨损)和化学磨损(包括扩散和氧化磨损)。切削时, 刀具和工件表面之间产生很大的压力和强烈的摩擦, 会导致相互接触表面产生粘结现象, 随着摩擦副表面的相对运动, 造成粘结磨损。一般说来, 相对于Ti(C, N)基金属陶瓷刀具材料的硬度, 工件材料较软, 容易破裂。但是, 由

于高温和疲劳应力的作用,刀具表面会产生微观裂纹,加速刀具表面的氧化,进而会造成刀具表面微粒的剥落,导致刀具的磨损,同时,在粘结区还伴随着摩擦副表面间的扩散引起的磨损。这就是刀具前刀面的月牙洼磨损和后刀面的I区磨损的主要原因。

在高速切削时,刀具与工件接触表面的温度很高,可达1000以上,刀具和工件材料表面的化学元素在高温下会发生相互扩散。一方面,刀具中的Ni和Co向工件扩散,减少了粘结相,刀具的脆性会增大;另一方面,工件中的Fe向刀具表面扩散,在刀具中形成了新的脆性相。通过对试样A和B后刀面I区进行能谱分析(见表2)可知,刀具后刀面I区出现Fe元素,而且随着Ti(C,N)固溶体中C与N的比值的增大,Fe元素含量明显增大。扩散的结果导致刀具材料的力学和物理性能下降,加剧刀具的磨损。在高温下,金属陶瓷刀具材料中的C、Co、Mo、WC、TiC等物质容易与空气中的O₂发生作用生成N₂和CO/CO₂气体,在800时汽化的液态MoO₃和在800时挥发的固态WO₂等物质会发生相互反应生成新的氧化物,如Ta₂Mo₂O₁₁,其在超过800时就开始熔化^[17],从而导致刀具表面氧化区的Ta、Mo和W等元素含量减少,加速刀具的氧化磨损。因此,这可以解释刀具后刀面I区的磨损主要是氧化磨损。影响Ti(C,N)基金属陶瓷刀具的氧化磨损的主要因素是切削区的温度,而切削区刀具表面的温度主要取决于刀具材料的导热性。Ti(C,N)固溶体中C与N比值越高其导热性越差,更容易产生氧化磨损,因而C含量高的硬质相比N含量高的硬质相更容易发生氧化^[7]。由于试样A的基体为TiC_{0.5}N_{0.5}固溶体,而试样B的基体为TiC_{0.7}N_{0.3}固溶体,因此,试样A的后刀面磨损小于试样B的后刀面磨损(见图2和3)。可见,减少Ti(C,N)固溶体中C与N的比值可以提高Ti(C,N)基金属陶瓷刀具抗氧化磨损的能力,改善刀具的耐磨性。

表2 刀具后刀面I区的元素含量

Table 2 Composition of element contents in band of flank

Sample	Molar fraction/%		
	Fe	Co	W
A	0.42	14.92	11.67
B	3.37	13.44	12.93

3 结论

1) 使用不同C与N比值的Ti(C,N)固溶体粉末作为基体,采用真空烧结工艺研制了Ti(C,N)基金属陶瓷刀片试样A和B。对比自制刀片试样A、B和日本住友公司生产的T1200A金属陶瓷刀片在不同的切削速度下干切削20CrMn工件的实验结果,可以发现,自制Ti(C,N)基金属陶瓷刀片的切削性能已达到国际先进水平。

2) 随着切削速度的增加,刀具的磨损加剧。在高速切削下,Ti(C,N)基金属陶瓷刀具的磨损主要是粘结磨损和由扩散与氧化引起的磨损,其中氧化和扩散磨损占主导地位。

3) Ti(C,N)固溶体中C与N比值越高其导热性越差,更容易产生氧化磨损,因而C含量高的硬质相比含N量高的硬质相更容易发生氧化,所以,在一定范围内减少Ti(C,N)固溶体中C/N的比值可提高Ti(C,N)基金属陶瓷刀具抗氧化磨损的能力,改善刀具的耐磨性。

REFERENCES

- [1] KWON W T, PARK J S, KANG S. Effect of group IV elements on the cutting characteristics of Ti(C, N) cermet tools and reliability analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 144: 9-14.
- [2] KWON W T, PARK J S, KIM S W, KANG S. Effect of WC and group IV carbides on the cutting performance of Ti(C, N) cermet tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 341-346.
- [3] ETTMAYER P, KOLASKA H, LENGAUER W, DREYER K. Ti(C, N) Cermets-metallurgy and properties[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 1995, 13: 343-351.
- [4] URBANSKI J P, KOSHY P, DEWES R C, ASPINWALL D K. High speed machining of moulds and dies for net shape manufacture[J]. Materials and Design, 2000, 21: 395-420.
- [5] KOSKY P, DEWES R C, ASPINWALL D K. High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel(~58HRC)[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127: 266-273.
- [6] LIU N, CHAO S, YANG H D. Cutting performances, mechanical property and microstructure of ultra-fine grade Ti(C, N)-based cermets[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2006, 24: 445-452.
- [7] BELLOSI A, CALZAVARINI R, FAGA M G, ZANCOCO C,

- D'ERRICO G E. Characterization and application of titanium carbonitride-based cutting tools[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 143/144: 527–532.
- [8] 谢峰, 张崇高, 刘宁, 杨海东. Ti(C, N)基金属陶瓷刀具与纳米改性[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(12): 1062–1064.
XIE Feng, ZHANG Chong-gao, LIU Ning, YANFG Hai-dong. Ti(C, N) metal ceramic tool material and modifying its properties by nanotechnology[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(12): 1062–1064.
- [9] LIU W J, XIONG W H, ZHANG Y, SHI Z M, YE J J. Microstructure and cutting performance of Ti(C, N)-based cermets heat-treated in nitrogen[J]. *Rare Metals*, 2007, 26(4): 352–358.
- [10] ZHANG H A, TANG S W, YAN J H, HU X P. Cutting performance of titanium carbonitride cermet tools[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2007, 21(5/6): 440–444.
- [11] DIZAJI V R, RAHMANI M, SANI M F, NEMATI Z, AKBARI J. Microstructure and cutting performance investigation of Ti(C, N)-based cermets containing various types of secondary carbides[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47: 768–772.
- [12] ZHANG H A, YAN J H, ZHANG X, TANG S W. Properties of titanium carbonitride matrix cermets[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2006, 24: 236–239.
- [13] BELLOSI A, MONTEVERDE F, CALZAVARINI R, ZANCOLO C. Factors influencing the milling performances of Ti(C, N)-based tools against carbon steel[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2001, 19: 191–202.
- [14] 石增敏, 郑勇, 刘文俊, 袁泉. Ti(C, N)基金属陶瓷刀具的切削性能[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(5): 805–810.
SHI Zeng-min, ZHENG Yong, LIU Wen-jun, YUAN Quan. Cutting performance of Ti(C, N)-based cermet tools[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(5): 805–810.
- [15] KÖNIGSHOFER R, EDER A, LENGAUER W, DREYER K, KASSEL D, DAUB H W, BERG H. Growth of the graded zone and its impact on cutting performance in high-pressure nitrogen modified functionally gradient hardmetals[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, 366(1/2): 228–232.
- [16] KUMAR M, KUMAR J R, BASU B. Crater wear mechanisms of Ti(C, N)-Ni-WC cermets during dry machining[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2007, 25: 392–399.
- [17] MONTEVERDE F, BELLOSI A. Oxidation behavior of titanium carbonitride based materials[J]. *Corrosion Science*, 2002, 44: 1967–1982.

(编辑 龙怀中)