

# 硬质合金高温性能对 TC4 钛合金高速铣削的影响研究

林凤添

厦门金鹭特种合金有限公司

**摘要:** 在高速铣削加工钛合金的过程中,硬质合金刀具承受较高的切削温度,导致刀具快速磨损和失效。通过添加 TaC(NbC)难熔金属碳化物制备新型 WC-Co 基硬质合金,采用高温硬度计检测新型硬质合金的高温硬度和高温断裂韧性,均较传统 WC-Co 基硬质合金有提升。将添加 TaC(NbC)的新型硬质合金材料制备成整体硬质合金立铣刀,并进行高速铣削钛合金 TC4 对比试验。结果表明:添加 TaC(NbC)的硬质合金刀具,可以有效提高刀具的耐磨性,降低裂纹的出现和扩展,从而提高硬质合金刀具在高速铣削钛合金时的使用寿命。

**关键词:** TC4 钛合金;硬质合金立铣刀;高温性能;刀具磨损

**中图分类号:** TG711

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2020.12.007

## Research on Effect of High Temperature Performance of Cemented Carbide on High Speed Milling of TC4 Alloy

Lin Fengtian

**Abstract:** In the process of high-speed milling Titanium alloy, due to its low thermal conductivity, the milling tool needs to bear higher temperature, which causes the tool life will to be reduced if the hardness and fracture toughness of the tool material are not maintained at high temperature. To solve this problem, a new type tool of cemented carbide based on WC-Co is prepared by adding TaC(NbC) refractory metal carbides. Compared with the traditional WC-Co based cemented carbide, the high temperature hardness and high temperature fracture toughness of the new cemented carbide are tested by high temperature hardness tester, which are greatly improved. The contrast test of high-speed milling Titanium alloy TC4 shows that the high-temperature hardness and fracture toughness of the new material are retained that it can improve the high temperature wear resistance of the tool effectively, reduce the appearance and propagation of cracks, and thus improve the tool life of the integral end mill under the condition of high-speed milling titanium alloy.

**Keywords:** TC4 Titanium alloy; cemented carbide tool; high temperature performance; tool wear

## 1 引言

TC4 钛合金具有良好的综合力学性能,具有比强度高、耐腐蚀和耐高温等特性,已广泛用于航空航天、化工和医疗等行业。但钛合金材料导热性差以及化学活性高,使刀具在切削加工中承受高温、热冲击和机械载荷,易加剧刀具磨损。加工钛合金的理想刀具材料必须同时具备较高的高温硬度、良好的韧性和耐磨性、高导热系数和较低的化学活性,在铣削时,刀具还应具备良好的抗冲击性<sup>[1]</sup>。

目前对于钛合金加工主要研究方向是通过优化加工策略或刀具几何参数,建立切削力模型和刀具磨损模型来提高钛合金材料的加工效率及刀具耐用度<sup>[2-4]</sup>。刀具几何参数、涂层和切削参数均会影响钛合金加工表面的晶粒尺寸,进而影响钛合金表面完整性<sup>[5]</sup>。同时,钝圆半径对刀具切削力和耐用度

影响显著,这也是提高钛合金加工用整体立铣刀使用寿命的主要方法<sup>[6]</sup>。同时,建立新型的冷却环境、降低加工钛合金实际切削温度也是提高刀具使用寿命的常用方法<sup>[7]</sup>。肖虎等<sup>[8]</sup>通过低温 CO<sub>2</sub> 射流降低切削温度,抑制了刀具磨损并提高钛合金表面质量。易湘斌等<sup>[9]</sup>利用微量油雾润滑减小切削力,提高了切削效率。裴浩等<sup>[10]</sup>研究发现,以氮气为切削介质可改善刀具的磨损状况和提高刀具的寿命。

另一些学者通过分析高速切削刀具材料的进展和应用,提高刀具材料的高温物理特性方面为切削钛合金提供发展方向<sup>[11,12]</sup>。姜增辉等<sup>[13]</sup>利用多种不同型号硬质合金立铣刀进行钛合金切削实验,分析了刀具材料中的合金成分对刀具磨损机理及特征的影响。Cheng Y. 等<sup>[14]</sup>研究了硬质合金的高温力学性能,并根据涂层性能综合设计刀具几何参数,为重型切削加工提供了解决方案。文献[15,16]研究了 TaC 含量对 WC-Co 基硬质合金高温硬度保持性的影响,证明适度添加 TaC(NbC)可以有效提高 WC-Co 基硬质合金的常温硬度和抗弯强度,并有助

于提高硬质合金的高温硬度。

本文通过添加 TaC(NbC) 难熔金属碳化物制备 WC-Co 基硬质合金基体材质,采用高温硬度计检测材料的高温硬度和高温断裂韧性,制备了相同几何参数的两种整体硬质合金立铣刀。为了排除刀具涂层对刀具磨损性能的影响,采用无涂层硬质合金刀具进行试验,研究硬质合金材质的高温性能对 TC4 钛合金高速铣削加工的影响。

## 2 试验条件与方案

通过添加 TaC(NbC) 难熔金属碳化物制备主元素含量一致的 WC-Co 基硬质合金材质,制备两种硬质合金材质 A 和 B,其成分见表 1。

表 1 两种硬质合金的成分

硬质合金	成分含量 (wt. %)			平均晶粒度
	WC	Co	TaC(NbC)	
A	~89.7	~10.3	<0.1	0.6μm
B	89.7	10.3	无	0.6μm

在硬质合金整体立铣刀切削钛合金的过程中,热冲击和机械载荷是刀具切削刃失效的主要因素,并且由于钛合金导热系数(100μm)较低,切削温度会比加工其它材料更高。因此,硬质合金材料在高温下的硬度和断裂韧性直接决定了刀具性能。

试验采用 HTV-PHS30 高温硬度计测量硬质合金材料的高温硬度。加载力为 10kgf,保持时间为 10s,每组温度下测量 3 次取平均值。试样加载完成后,可得压痕对角线长度  $2d$  和裂纹扩展长度  $l$  (见图 1)。硬质合金材料的高温断裂韧性可由下式计算得出

$$\left(\frac{K_{IC}\phi}{H\sqrt{d}}\right)\left(\frac{H}{E\phi}\right)^{0.4} = 0.035\left(\frac{l}{d}\right)^{-0.5} \quad (1)$$

式中, $l$  为裂纹长度; $d$  为压痕对角线长度的一半; $K_{IC}$  为断裂韧性; $H$  为硬度; $E$  为弹性模量; $\phi = 3$ 。

由图 2 和图 3 可知,当切削温度达 400℃ 时,硬质合金 A 比硬质合金 B 的高温硬度提升约 5%,高温断裂韧性提升约 4%;当切削温度达 800℃ 时,硬质合金 A 比硬质合金 B 高温硬度提升约 14.5%,高温断裂韧性提升约 10.2%。由此可见,通过在 WC-Co 基硬质合金中添加微量元素 TaC(NbC),可使硬质合金的高温性能得到显著提高。这是因为 TaC(NbC) 微量元素能够提高 WC 晶粒在 Co 粘结相中的固溶度,抑制 WC 晶粒在高温烧结过程中的晶粒增长,提高了 WC-Co 基硬质合金在高温下的硬度和断裂韧性<sup>[15]</sup>。

为进一步验证添加 TaC(NbC) 的 WC-Co 基硬质合金加工钛合金的实际效果,将 A、B 两种硬质合

金属材料以相同几何参数制备为两组整体硬质合金立铣刀,分别命名为刀具 A 和刀具 B。试验刀具的几何参数见表 2。

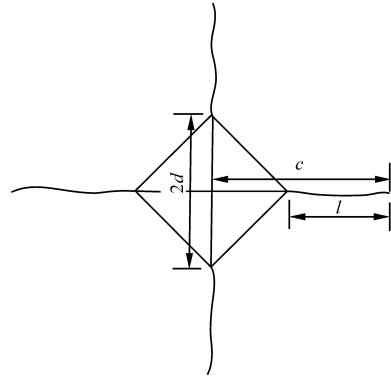


图 1 试样断裂韧性测量

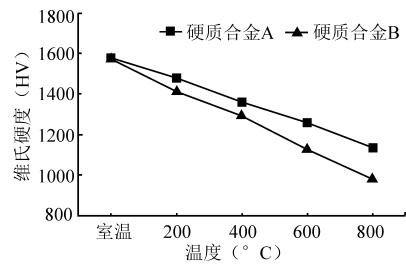


图 2 硬质合金维氏硬度随温度变化的曲线

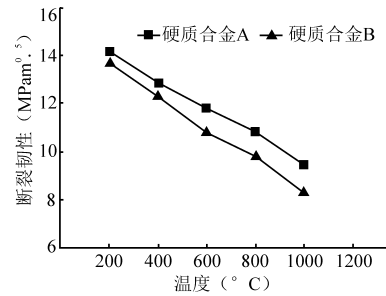


图 3 硬质合金断裂韧性随温度变化的曲线

表 2 试验刀具的几何参数

直径 (mm)	刃长 (mm)	周刃前角 (°)	周刃后角 (°)	螺旋角 (°)	涂层
4	11	7	10°	35°	无

试验工件材料为退火态 TC4 钛合金,硬度约为 28.2HRC;机床为 Mazak Nexus 430A-II 立式加工中心,试验方式采用方肩顺铣;水基乳化液冷却,使用热缩刀柄夹持保证加工状态的稳定性,加工参数见表 3。

表 3 TC4 钛合金铣削加工参数

主轴转速 (r/min)	进给速度 (mm/min)	轴向切削深度 (mm)	径向切削深度 (mm)
6350	760	8	0.08

试验过程中,以切削距离 10m 为测量基准,在切削距离相同的条件下,采用 Keyence VHX-950F 光

学显微镜观察试验铣刀 A 和 B 磨损情况,测量后刀面磨损宽度  $VB$ 。为了能更细致研究硬质合金高温性能对刀具磨损的影响,当试验刀具的后刀面磨损宽度达到  $0.05\text{mm}$  时即停止。

### 3 试验结果分析

在相同切削加工条件下,加工 TC4 钛合金的整体硬质合金立铣刀 A 和立铣刀 B 后刀面的磨损曲线如图 4 所示。

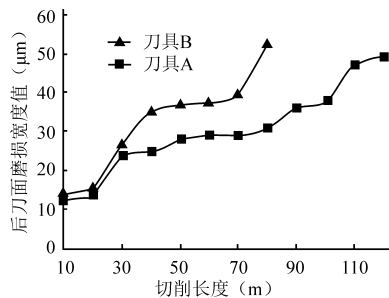
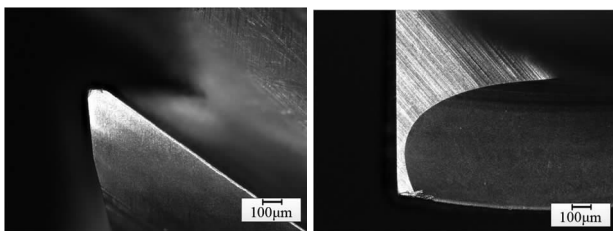


图4 铣刀 A 和 B 的后刀面磨损曲线

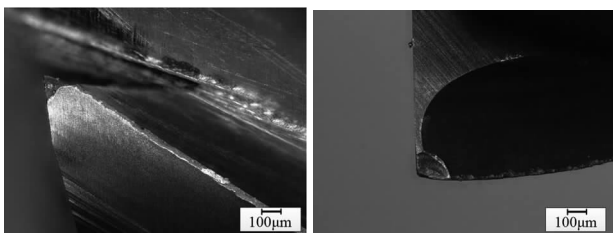
由图可知,当铣刀 A 切削长度为  $80\text{m}$  时,刀具后刀面磨损量为  $0.031\text{mm}$ ;铣刀 A 切削长度为  $120\text{m}$  时,刀具后刀面磨损量约为  $0.05\text{mm}$ ;而铣刀 B 切削长度为  $80\text{m}$  时,刀具后刀面磨损宽度超过  $0.05\text{mm}$ 。

铣刀 A 和 B 在切削长度约为  $40\text{m}$  时,刀具均进入均匀磨损阶段。由图 5 可知,铣刀 A 在切削长度为  $40\text{m}$  时,刀具前、后刀面显现出均匀磨损,刀具前刀面靠近刀尖位置基体有轻微剥落。由图 6 可知,铣刀 B 在切削长度为  $40\text{m}$  时,刀尖已出现明显崩刃,刀具前、后刀面出现明显磨损,且在刀具前刀面出现多处规则性的基体剥落。



(a) 后刀面 (b) 前刀面

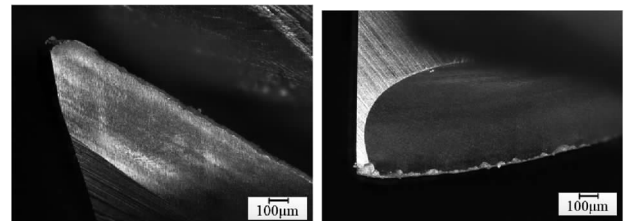
图5 铣刀 A 切削长度  $40\text{m}$  时刀具磨损形貌



(a) 后刀面 (b) 前刀面

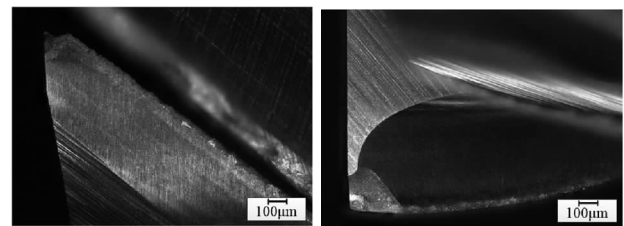
图6 铣刀 B 切削长度  $40\text{m}$  时刀具磨损形貌

由图 7 和图 8 可知:铣刀 A 在切削长度为  $80\text{m}$  时,刀具磨损加剧,刀尖出现微崩,刀具后刀面仍呈均匀磨损形式,刀具前刀面已出现多处规则性的基体剥落;铣刀 B 在切削长度达到  $80\text{m}$  时,刀尖崩刃持续扩大,后刀面出现多处崩刃,刀具前刀面由之前的多处基体剥落发展成连续的基体剥落,刀具磨损程度比铣刀 A 更严重。



(a) 后刀面 (b) 前刀面

图7 铣刀 A 切削长度  $80\text{m}$  时刀具磨损形貌



(a) 后刀面 (b) 前刀面

图8 铣刀 B 切削长度  $80\text{m}$  时刀具磨损形貌

### 4 刀具失效分析

为进一步研究硬质合金基体的高温性能对刀具磨损机理的影响,利用扫描电子显微镜 (SEM) 分别对铣刀 A 和铣刀 B 在切削长度  $40\text{m}$  时的刀具刃口进行检测,刀尖形貌结果见图 9 和图 10。

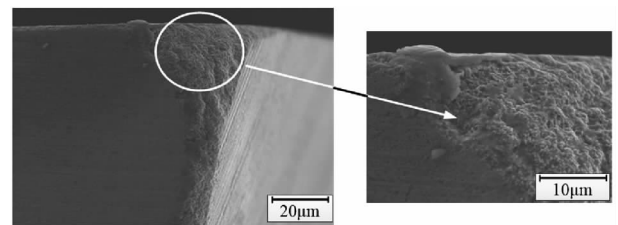


图9 铣刀 A 切削长度  $40\text{m}$  的刀尖磨损形貌

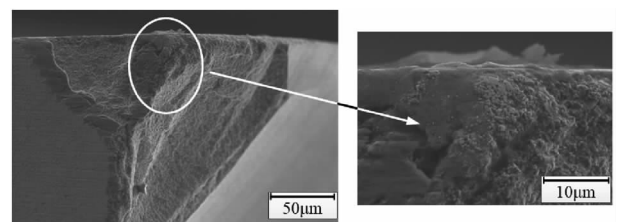


图10 铣刀 B 切削长度  $40\text{m}$  的刀尖磨损形貌

铣刀 A 在切削  $40\text{m}$  时刀尖处为均匀磨损,未发现显著的崩刃及基体断裂裂纹;铣刀 B 的刀尖出现

多块明显的基体剥落,将刀尖局部再放大,发现多条清晰可见的基体断裂裂纹。

由于铣刀 A 和铣刀 B 的基体高温性能不同,铣刀 A 基体材料有更高的高温硬度和高温断裂韧性。在高速铣削过程中,铣刀 A 不易出现基体断裂裂纹,从而呈现出刀具前、后刀面均匀的磨损形式,刀具刀口的保持性更优;铣刀 B 的高温硬度和高温断裂韧性较低,受机械冲击的作用,在刀具基体中容易产生微裂纹,随着切削持续,微裂纹易纵向扩展,使基体发生大块的剥落,加剧刀具磨损程度。

## 5 结语

(1)对于 WC-Co 基硬质合金,添加微量合金碳化物 TaC(NbC)可以有效提高硬质合金材料在高温下的硬度和断裂韧性的保持性。在 800℃时,高温硬度提高约 14.5%,高温断裂韧性提高约 10.2%。

(2)在相同条件下高速铣削 TC4 钛合金时,添加 TaC(NbC)的硬质合金整体立铣刀的刀具磨损比未添加 TaC(NbC)立铣刀的磨损更轻微,刀具寿命更长。

(3)由于添加 TaC(NbC)硬质合金材料的高温断裂韧性更高,高速铣削 TC4 钛合金时可有效缓解刀具裂纹的出现和扩展,降低了刀尖崩刃、基体剥落等问题的发生,防止刀具过早失效。

## 参考文献

- [1]杜敏,姜增辉,冯吉路. 钛合金切削加工特点及刀具材料选用[J]. 航空制造技术,2011(14):47-49.
- [2]谭靓,张定华,姚倡锋,等. 刀具几何参数对钛合金铣削力和表面完整性的影响[J]. 中国机械工程,2015,26(6):737-742.
- [3]耿国盛. 钛合金高速铣削技术的基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
- [4]陈五一,袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 航空制造技术,2010(15):26-30.
- [5]Arisoy Y M, Ozei T. Prediction of machining induced microstructure in Ti-6Al-4V alloy using 3-D FE-based simulations; effects of tool microgeometry, coating and cutting conditions[J]. Procedia CIRP, 2015, 220:1-26.
- [6]Dorlin T, Fromentin G, Costes J. Analysis and modeling of the contact radius effect on the cutting forces in cylindrical and face turning of Ti6Al4V Titanium alloy[J]. Procedia CIRP, 2015, 31:185-190.
- [7]Sui S C, Feng P F. The influences of tool wear on Ti6Al4V cutting temperature and burn defect[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9/12):2831-2838.
- [8]肖虎,李亮. TC4 钛合金在低温 CO<sub>2</sub> 冷却下的切削性能[J]. 中国机械工程,2017,28(8):883-887.
- [9]易湘斌,焦爱胜,常文春,等. 不同冷却润滑条件下 TB6 钛合金高速铣削切削力实验研究[J]. 润滑与密封, 2017,42(9):92-97.
- [10]裴浩,何宁,满忠雷. TC4 的铣削加工中铣削力和刀具磨损研究[J]. 航空精密制造技术,2003(3):30-33.
- [11]艾兴,刘战强,赵军,等. 高速切削刀具材料的进展和未来[J]. 制造技术与机床,2001(8):21-25.
- [12]张卫兵,刘向中,陈振华,等. WC-Co 硬质合金最新进展[J]. 稀有金属,2015.
- [13]姜增辉,王琳琳,石莉,等. 硬质合金刀具切削 Ti6Al4V 的磨损机理及特征[J]. 机械工程学报,2014,50(1):178-184.
- [14]Cheng Y, Liu L, Wu M, et al. High-temperature mechanical properties of a cemented carbide cutter during extra-heavy cutting process[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015,36(4):560-566.
- [15]林亮亮. WC<sub>x</sub>TaC-Co 硬质合金的结构性能及高温硬度的演变[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2018,38(4):50-55.
- [16]杨小璠,李友生,李凌祥,等. 硬质合金高温性能对碳纤维复合材料切削加工的影响研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2017,37(5):45-49.  
作者:林凤添,厦门金鹭特种合金有限公司,福建厦门 361100  
Author: Lin Fengtian, Xiamen Golden Egret Special Alloy Co., Ltd., Xiamen, 361100