

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.08.015

# S30T 正交车铣 TC4 钛合金磨损形貌及机理分析

石莉<sup>1,2</sup>, 巩亚东<sup>1</sup>, 姜增辉<sup>2</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳理工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 利用 Mazak Integrex 200Y 车铣复合加工中心, 速度范围  $v = 100 \sim 250$  m/min, 在干式条件下, 采用涂层硬质合金 S30T 刀具对钛合金 TC4(Ti-6AL-4V) 进行正交车铣(顺铣)试验. 结果表明: 前刀面产生积屑瘤和月牙洼磨损, 涂层出现不同程度磨损及破损, 严重时产生层片状剥落, 后刀面由于黏结作用产生凹坑、沟槽及崩刃. 刀具磨损的主要原因为黏结磨损、氧化磨损及涂层剥落. 通过 X 射线电子能谱(XPS)证明氧化磨损中有  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoO}$  等氧化物生成.

**关键词:** 涂层硬质合金; 正交车铣; 磨损机理; 电子能谱 XPS

**中图分类号:** TG 506      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2017)08-1133-04

## Experimental Analysis Toward Wear Characteristics and Mechanisms for S30T Tools Through Orthogonal Turning-Milling on TC4 Titanium Alloy

SHI Li<sup>1,2</sup>, GONG Ya-dong<sup>1</sup>, JIANG Zeng-hui<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China. Corresponding author: SHI Li, E-mail: 811029556@qq.com)

**Abstract:** Orthogonal turning-milling experiments toward S30T tools machining on TC4 titanium alloy under dry cutting conditions with 100 – 250 m/min cutting speeds were performed with Mazak Integrex 200Y machining center. The results indicated that BUE (build-up edge) and crater wear occurred, as well as coating wear and delamination on the rake face after dry cutting. On the flank face, tips, groove and tipping were observed. The main causes of the tool wear were adhesion wear, oxidation wear and delamination of coating. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) observation showed that a lot of oxides, such as  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoO}$  etc were generated in the oxidation.

**Key words:** coated cemented carbide; orthogonal turning-milling; wear mechanism; X-ray photoelectron spectroscopy

钛合金低温性能好, 强度高, 在航空航天领域应用广泛; 但切削时高的切削温度、较大回弹量及强化学活性, 使钛合金成为难加工材料. 目前, 常采用车削方法加工钛合金回转体, 但断屑困难, 黏结磨损比较严重<sup>[1-6]</sup>. 车铣技术能有效解决切屑的断屑问题, 但国内外关于车铣加工钛合金刀具的磨损形态及机理的资料不多, 为了延长 S30T 硬质合金刀具正交车铣钛合金时刀具使用寿命、

减小刀具磨损及推广车铣加工技术在钛合金加工中的应用, 有必要对其正交车铣钛合金时刀具的磨损形态和磨损机理进行研究.

### 1 切削试验

切削试验选用的工件材料为 TC4 钛合金, 棒料, 直径为 168.7 mm.

收稿日期: 2016-03-28

基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2012ZX04003-061); 辽宁省教育厅一般项目(L2015463).

作者简介: 石莉(1977-), 女, 山东曹县人, 东北大学博士研究生, 沈阳理工大学副教授; 巩亚东(1958-), 男, 辽宁本溪人, 东北大学教授, 博士生导师; 姜增辉(1971-), 男, 黑龙江山人, 沈阳理工大学教授.

机床: Integrex 200Y 车铣复合加工中心; 刀具: 山特维克直柄圆柱可转位铣刀杆 R390 - 025A25 - 11L, 刀片为涂层刀片 S30T, 型号为 R390 - 11 T308M - PL, PVD 涂层, 具有锋利的切削刃。

试验过程中保持不变的参数有: 轴向进给量  $f_a = 9.8 \text{ mm/r}$ , 每齿进给量  $f_z = 0.1 \text{ mm/z}$ , 偏心距  $e = 11 \text{ mm}$ , 切削深度  $a_p = 0.4 \text{ mm}$ . 试验条件为干式顺铣正交车铣切削, 切削速度分别为 100, 150, 200 和 250 m/min.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 切削速度对刀具寿命的影响

图 1 为不同切削速度下刀具后刀面磨损曲线。可以看出, 随着切削速度的增大, 刀具磨损速率迅速增大, 刀具寿命急剧下降。

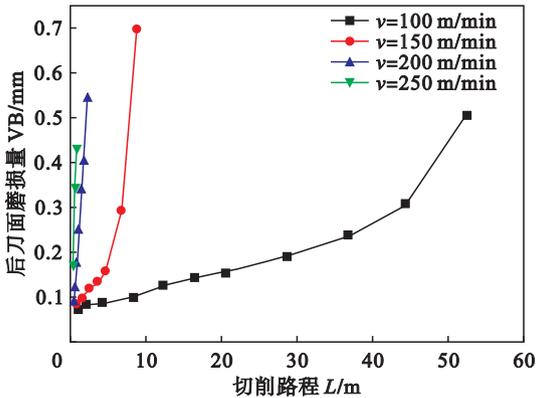


图 1 不同切削速度刀具磨损曲线

Fig. 1 Tool wear at different cutting velocities

### 2.2 磨损及破损形貌分析

图 2 是在超景深三维显微系统中观察到的刀具磨损及破损形貌。

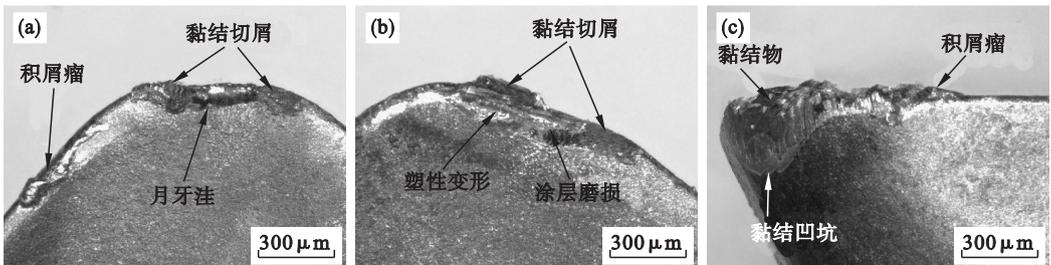


图 2 干切削条件下刀具磨损及破损形貌

Fig. 2 Characteristics of wear and failure of tool in dry cutting

(a) —  $v = 100 \text{ m/min}$ ,  $L = 20.5 \text{ m}$ ; (b) —  $v = 150 \text{ m/min}$ ,  $L = 6.7 \text{ m}$ ; (c) —  $v = 150 \text{ m/min}$ ,  $L = 8.8 \text{ m}$ .

### 2.3.2 氧化磨损

氧化磨损是刀具磨损的重要原因, 但关于刀具氧化磨损的深入研究并不多, 徐锦涛等<sup>[7]</sup>在研究钛合金氧化磨损时, 主要通过刀具能谱(EDS)

由图 2 可以看出, 干式切削时, 在正常磨损阶段, 前刀面, 特别是靠近刀尖圆弧处, 有明显的黏结切屑, 在主切削刃和刀尖圆弧处, 有积屑瘤产生, 前刀面产生明显的月牙洼磨损和涂层破损, 后刀面主要以黏结磨损为主。在急剧磨损阶段, 前刀面产生严重的涂层剥落, 后刀面黏结物明显增多, 黏结磨损加剧。

## 2.3 刀具磨损及破损机理

### 2.3.1 黏结磨损

初期磨损阶段, 由于涂层刀具良好的耐磨性和抗黏结性, 刀具材质和工件材料亲和性较小, 因此减小了刀具和工件间黏吸作用, 切屑黏结物较少。正常磨损阶段, 由于高温的作用, 在切屑与刀具界面上, 涂层表面的一些 Al 元素和空气中的 O 元素发生氧化反应, 生成非结晶的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜, 使刀具在高温下保持了较高的工作温度和硬度、化学稳定性和抗黏结性能; 但随着切削继续, 不断流出的切屑逐渐擦去刀具表面的氧化膜和吸附膜, 使刀具与切屑间的冷焊面积逐渐增大, 并由于钛合金亲和力强, 在摩擦和高温高压作用下, 切屑底层金属停滞和积聚在刀口附近, 形成积屑瘤。如图 2a 和 2c 所示, 随着切削继续, 由于磨粒磨损的作用, 刀具后刀面与工件和切屑不断摩擦和挤压, 在刀具后刀面形成一定宽度的磨损带, 切屑流出时, 切屑底层金属黏结在切削刃口处, 黏结物的体积不断增大, 在切削力作用下从刀具表面脱落, 并从表面撕下刀具材料并带走, 形成黏结凹坑, 黏结物在断续切削过程中不断脱落且又重新形成, 从而加剧刀具磨损。

在扫描电镜下对黏结物作能谱分析, 见图 3。能谱显示, 表面主要元素为 Ti, Al 及 V 等工件材料元素, 证明黏结物来自钛合金工件。

分析, 根据能谱图中氧元素判断切削过程中是否存在氧化磨损。李友生等<sup>[8]</sup>利用电阻炉对硬质合金刀片加热保温, 通过衍射谱(XRD)对硬质合金刀具在不同温度场下的氧化性进行研究, 但刀具

所处条件并不是真实的切削加工条件.

本文通过 X 射线电子能谱 (XPS) 对顺铣干切削,  $v = 150 \text{ m/min}$  车铣加工过的刀片进行表面元素分析. 由刀具破检获知涂层主要元素为 N,

Al, Ti, 基体主要元素为 W, Co, Ti; 根据涂层及基体含有的元素, 对主要元素进行全谱和精细谱扫描, 对主要谱线分峰处理. 图 4 为主要元素分峰处理后的电子能谱图.

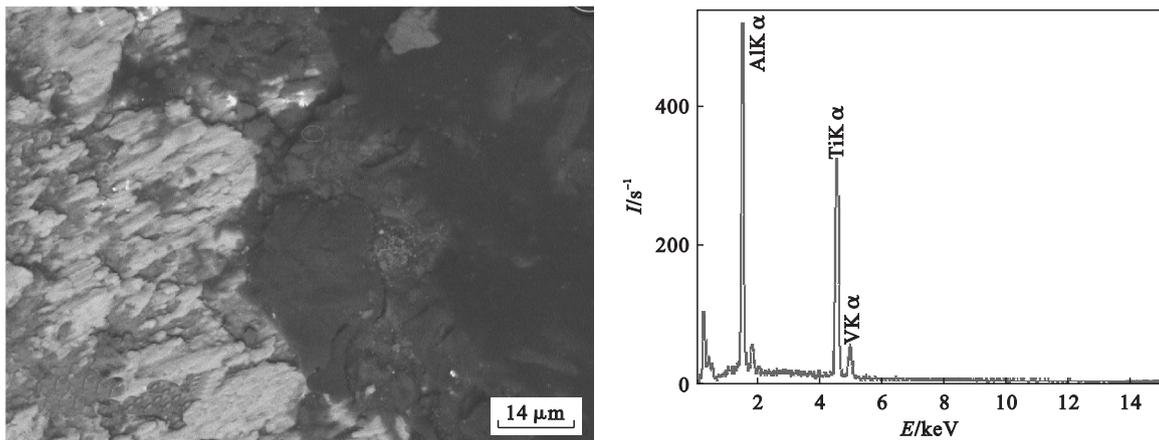


图 3 刀具黏结物微观组织及能谱图

Fig. 3 Microstructure and EDS of adhered material on tool

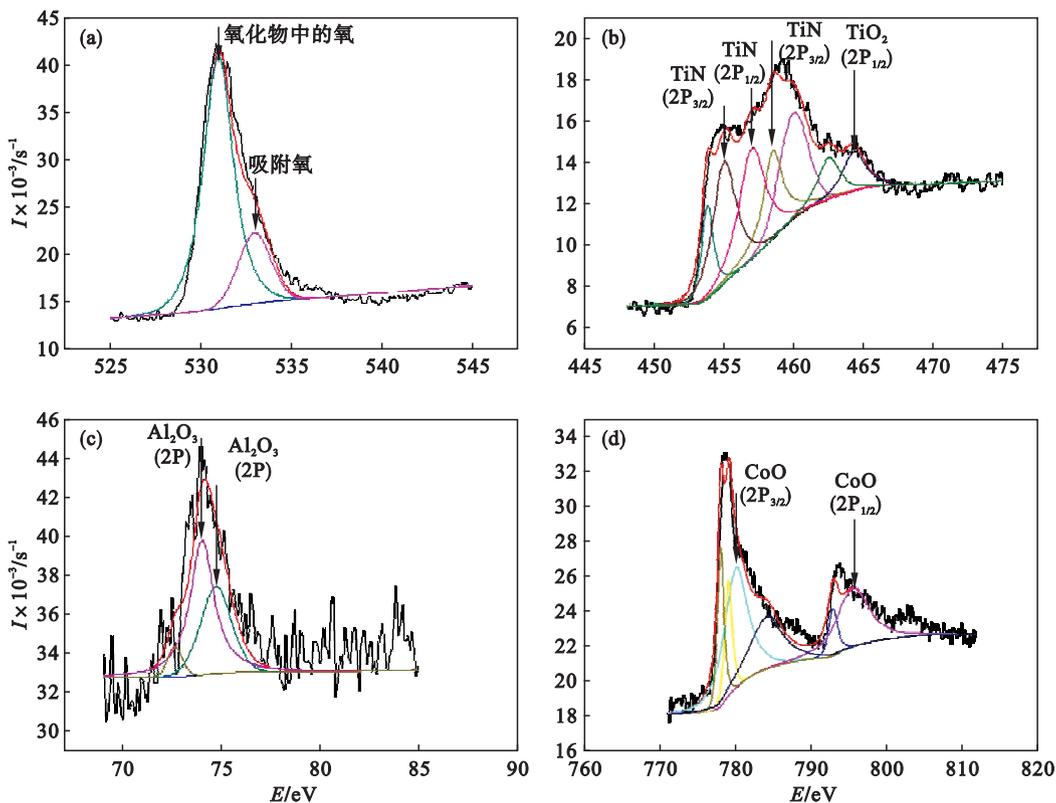


图 4 刀具精细谱图

Fig. 4 Fine spectra of tool

(a)—O 1S; (b)—Ti 2P; (c)—Al 2P; (d)—Co 2P.

根据元素的单质态及氧化态结合能不同, 通过分析可知, 正交车铣切削钛合金 TC4 过程中, 有  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoO}$  等物质生成. 刀具材料或黏结物中 Ti 元素在切削高温作用下与空气中 O 元素反应, 生成  $\text{TiO}_2$ , 其使刀具表面材料变脆, 刀体

材料更易脱落.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  化学稳定性好, 具有抗氧化性能, 生成的氧化薄膜覆盖在刀具表面, 对刀具具有一定的保护作用, 但脱落后会加速刀具磨损. Co 为硬质合金基体材料的黏结剂, 在电子能谱图中检测到 Co 和  $\text{CoO}$ , 说明电子扫描区域硬质合金

涂层已经被严重破坏,硬质合金基体裸露出来.由于刀具在加工过程中被污染,在扫描前应用氩离子( $\text{Ar}^+$ )对表面进行溅射剥离,导致高价态的氧化物,如  $\text{Co}_3\text{O}_4$  等,被还原为低价态的氧化物  $\text{CoO}$  等,因此,刀具磨损区域只检测到  $\text{Co}$  和  $\text{CoO}$ ,没有  $\text{Co}_3\text{O}_4$ .  $\text{CoO}$  或  $\text{Co}_3\text{O}_4$  是一种组织疏松的氧化物,改变了刀具材料表面成分和性能,使其中的硬质相颗粒易于被切削或工件摩擦破坏掉并粘走,从而加剧刀具磨损.由以上分析可知,涂层硬质合金正交车铣 TC4 钛合金过程中,有氧化反应发生,在高温下生成不同的氧化物,对刀具磨损产生重要影响.

### 2.3.3 涂层剥落

干式切削时,在刃口附近,特别是靠近刀尖圆弧处,出现轻微的涂层磨损,继续切削,磨损扩展.图 5 为切削速度为  $200 \text{ m/min}$  干式切削时涂层剥落的发展过程.试验中切削深度小于刀尖圆弧半径,刃口圆弧和副切削刃或底刃承担主要的切削工作,受到的冲击、挤压和剪切作用最大,从图中看出,早期的涂层磨损从刀尖圆弧切削刃口及副切削刃开始,逐渐在刀具前刀面上形成月牙洼磨损,随着月牙洼逐渐向前、向后的扩大,当其前缘与切削刃之间的棱边很窄时,切削刃强度降低,导致刃口破损,刃口破损降低了涂层与基体材料的结合强度.刃口破损使切削刃变钝,增加了刀具与工件之间的摩擦与挤压,切削过程产生更多的热量,切削区的切削温度升高,破损的刃口区域产生微裂纹,使破损沿着副切削刃方向和前刀面方向扩展,形成更大面积的破损.

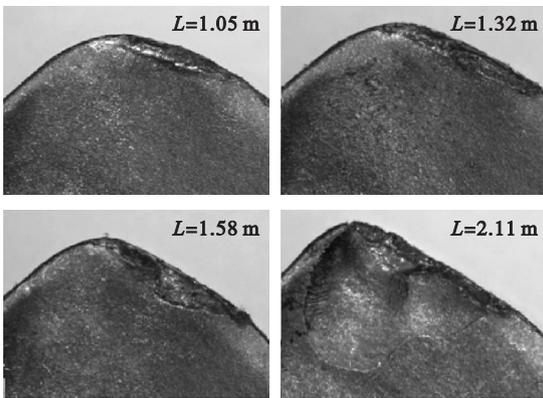


图 5 涂层脱落发展过程  
Fig. 5 Process of coating peeling

## 3 结 论

1) 干式切削时前刀面产生积屑瘤和月牙洼

磨损,涂层出现不同程度磨损及破损,严重时产生层片状剥落,后刀面由于黏结作用产生凹坑、沟槽及崩刃.

2) 刀具磨损的主要原因为黏结磨损、氧化磨损和涂层剥落.

3) 通过电子能谱(XPS)精细谱图分析,证明正交车铣加工钛合金过程中发生了氧化反应,生成  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CoO}$  或  $\text{Co}_3\text{O}_4$  等氧化物.不同的氧化物对刀具磨损的影响不同.

### 参考文献:

- [1] An Q L, Fu Y C, Xu J H. Experiment study on turning of TC9 titanium alloy with cold water mist jet cooling [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51: 549 - 555.
- [2] Xu J Y, Liu Z Q, An Q L, et al. Wear mechanism of high-speed turning Ti-6Al-4V with TiAlN and AlTiN coated tools in dry and MQL conditions [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 497: 30 - 34.
- [3] Ayed Y, Germain G, Ammar A, et al. Tool wear analysis and improvement of cutting conditions using the high-pressure water-jet assistance when machining the Ti17 titanium alloy [J]. *Precision Engineering*, 2015, 42: 294 - 301.
- [4] da Silva R B, Machado A R, Ezugwu E O, et al. Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213 (8): 1459 - 1464.
- [5] Nouari M, Makich H. Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti-6Al-4V and Ti-555 [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, 41: 259 - 269.
- [6] Wang Z G, Rahman M, Wong Y S, et al. Study on orthogonal turning of titanium alloys with different coolant supply strategies [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 42: 621 - 632.
- [7] 徐锦洪, 郑小虎, 安庆龙, 等. 高速铣削 TC6 钛合金的刀具磨损机理 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46 (7): 1037 - 1042.  
(Xu Jin-yang, Zheng Xiao-hu, An Qing-long, et al. Wear mechanisms of tool in high-speed milling of titanium alloy TC6 [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 46 (7): 1037 - 1042.)
- [8] 李友生, 邓建新, 张辉, 等. 硬质合金刀具材料的抗氧化性能研究 [J]. 材料工程, 2009 (2): 34 - 37.  
(Li You-sheng, Deng Jian-xin, Zhang Hui, et al. Oxidation resistance of cemented carbide tools [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009 (2): 34 - 37.)