

PCD 刀具车削钛基复合材料刀具磨损研究*

任景刚¹, 李阳阳², 苏宏华², 宦海祥², 梁星慧³

(1. 西安航空动力股份有限公司机匣中心, 西安 710021;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

3. 上海航天精密机械研究所, 上海 200426)

[摘要] 使用 PCD 刀具对钛基复合材料进行切削速度单因素车削试验, 研究了 PCD 刀具的磨损形态和磨损机理。结果表明: 在 15 ~ 60m/min 范围内, 随着切削速度的增大, 切削力从 473N 逐渐减小到 367N, 切削温度从 274℃ 逐渐升高到 564℃; 刀具切削路程随着切削速度的增大从 390m 先增大到 702m 然后减小至 467m, 在切削速度为 45m/min 时达到最大值; PCD 刀具前刀面并未出现典型的月牙洼磨损, 而是前后刀面同时磨损, 后刀面均呈典型的带状磨损带, 且前后刀面均有犁沟出现和钛合金粘结; 刀具磨损的主要原因是磨粒磨损和粘结磨损, 随着切削速度的增大, 磨粒磨损减弱, 粘结磨损增强。

关键词: PCD; 钛基复合材料; 车削; 刀具磨损; 切削路程

Research on PCD Tool Wear in Turning Titanium Matrix Composites

REN Jinggang¹, LI Yangyang², SU Honghua², HUAN Haixiang², LIANG Xinghui³

(1. Xi'an Aero-Engine Plc, Xi'an 710021, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 200426, China)

[ABSTRACT] The single factor experimental method was used to the experiments of turning titanium matrix composites with PCD tools. The wear morphology and mechanism were studied. The results show that, within the cutting speed region of 15~60m/min, the cutting force gradually decreases from 473N to 367N, the cutting temperature increases gradually from 274℃ to 564℃; the cutting distance increases from 390 m to 702 m and then reduces to 467 m and achieved the maximum at the cutting speed 45 m/min; the tool wear take place on the rake and flank face at the same time instead of a typical crater wear on the rake face, the typical strip wear take place on the flank face, both furrow grooves and titanium alloy occur on the rake and flank face; the tool wear is believed to be caused mainly by the abrasive wear and the adhesive wear. With the increasing of cutting speed, abrasive wear gradually weakenes while the adhesion wear is obvious.

Keywords: PCD; Titanium matrix composites; Turning; Tool wear; Cutting distance

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.083

钛基复合材料是以钛合金为基体, 以碳化钛、硼化钛、碳化硅、氧化铝、氮化铝等颗粒、晶须或连续纤维为增强相, 由粉末冶金、自蔓燃高温合成反应、压力铸造、搅拌铸造、喷射沉积等方法制备而成^[1-2]。其具有高比强度、高比模量、耐磨、耐热、低热膨胀系数、耐冲击等优良性能^[3-4], 因此, 钛基复合材料在超音速航宇飞行器、航空发动机、国防武器装备和生物工程等方面具有

广泛的应用前景^[5-8]。但钛基复合材料切削时变形系数小、导热系数低、切削温度高, 钛合金基体易与刀具发生反应, 再加上增强相在切削过程中对刀具的刻划、摩擦, 导致切削时, 刀具磨损严重, 刀具耐用度低, 加工成本高, 严重阻碍了这类新材料的推广应用^[8]。

针对以上问题, 近年来有许多学者展开了一系列的研究。章宇和加拿大 Bejjani^[9-10] 等采用 PCD 刀具在切削速度为 100m/min 时, 对钛基复合材料分别进行铣削和车削试验研究, 边卫亮^[11] 采用 PCD 刀具在切削速度

* 基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST201326)。

为 60~120m/min 时对钛基复合材料进行了车削试验研究,结果表明:使用 PCD 刀具在 60m/min 以上的较高切削速度范围内对钛基复合材料切削时,刀具耐用度最高可以达到 11min,这在实际的工业生产中是可接受的^[12],但考虑到频繁换刀对加工精度的影响,刀具耐用度仍然偏低,不利于材料的推广应用。本研究在此基础上,采用 PCD 刀具,在切削速度为 15~60m/min 范围内对钛基复合材料进行单因素车削试验,分析了 PCD 刀具车削钛基复合材料时的刀具磨损形态和磨损机理,从而为进一步减小刀具磨损,优化工艺参数,提高刀具耐用度,降低加工成本提供参考。

1 试验条件

研究所用材料为经真空自耗熔炼和热锻技术制备的钛基复合材料(TiCp+TiBw)/TC4,增强相体分比为 10%,两种增强相摩尔比为 1:1,棒料规格为 $\phi 60\text{mm} \times 200\text{mm}$,其物理力学性能见表 1,显微组织如图 1 所示。

试验在 SK50P 卧式数控车床上进行,采用水基乳化液冷却。刀具为混合颗粒度(30+2) μm 的 PCD 刀片,工作前角 5°、后角 8°、刀尖圆弧半径 0.8mm。

工艺参数安排见表 2。

切削过程中使用 Hirox 公司的 KH-7700 三维视频显微镜对刀具前后刀面磨损及破损情况进行观察,并测量其后刀面磨损量;用 Kistler9272 动态测力仪对切削力进行测量;用自然热电偶法对切削温度进行测量。

表1 钛基复合材料的物理力学性能

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	弹性模量 /GPa	硬度 HRC
1102	1005	135	35~38

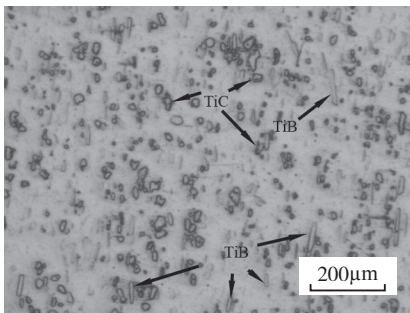


图1 (TiCp+TiBw)/TC4金相组织
Fig.1 Microscopic structure of the (TiCp+TiBw)/TC4

表2 切削参数

切削速度 $v/(m \cdot \text{min}^{-1})$	进给量 $f/(mm \cdot r^{-1})$	切削深度 a_p/mm
15、30、45、60	0.08	0.5

2 试验结果与讨论

2.1 切削力和切削温度

切削力和切削温度是导致刀具磨损的直接因素,对切削力和切削温度的研究为刀具磨损机理分析和切削参数选择提供了理论依据。PCD 刀具车削钛基复合材料时的切削力和切削温度,如图 2 所示。随着切削速度从 15m/min 增大到 60m/min,切削力从 473N 逐渐减小到 367N,且在 15~30m/min 时,切削力减小趋势比较明显,从 473N 减小到 389N,而在 30~60m/min 时,切削力减小趋势比较缓慢,从 389N 减小到 367N,减小幅度仅为 22N。在切削速度在 15~60m/min 范围内,随着切削速度的增大,切削温度从 274℃ 逐渐升高到 564℃。

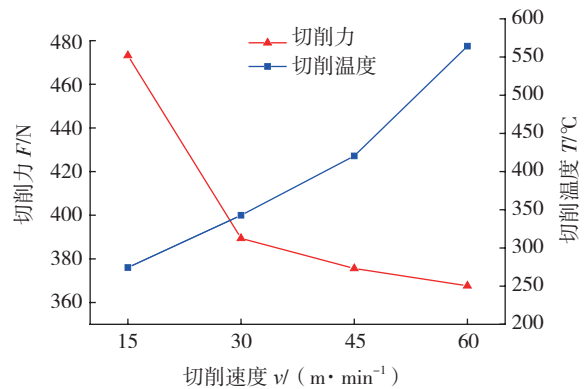


图2 不同切削速度下的切削力和切削温度
Fig.2 Cutting force and temperature under different speed

2.2 切削路程

在切削深度和进给量固定的情况下,刀具达到磨钝标准时的切削路程越长,切除的金属体积越大,也就是说切除单位体积金属时,刀具的相对磨损越小,因此,切削路程也常用于表征刀具的相对磨损量。PCD 刀具在 15~60m/min 的切削速度范围内后刀面磨损量 $VB=0.2\text{mm}$ 时的切削路程,如图 3 所示。随着切削速度

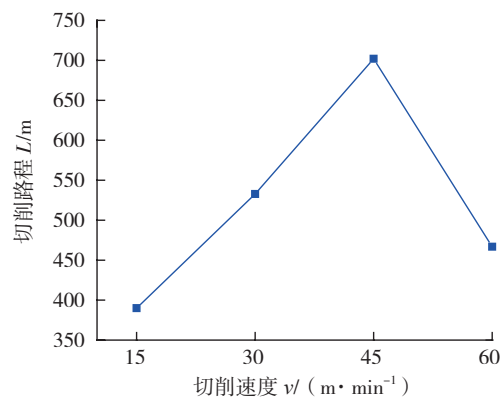


图3 不同切削速度下的切削路程($VB=0.2\text{mm}$)
Fig.3 Cutting distance under different cutting speed($VB=0.2\text{mm}$)

的增大,切削路程从 390m 先增大到 702m 然后减小至 467m,在切削速度为 45m/min 时达到最大值。在切削速度为 15m/min 时,刀具耐用度达到 26min,是相同磨钝标准下文献 [11] 的 2.4 倍。

2.3 刀具磨损

2.3.1 刀具磨损形态

(1) 前刀面磨损。

图 4 (a)~(d) 为 PCD 刀具在切削速度为 15~60m/min 范围内车削钛基复合材料,后刀面磨损量 $VB=0.2\text{mm}$ 时刀具前刀面的磨损形态。可以看出,前刀面磨损形态基本相似,都没有出现典型的月牙洼磨损,而是前后刀面同时磨损,前刀面磨损带直接与切削刃相连,而且前刀面还出现了平行于切屑流动方向的犁沟,随着切削速度的增大,犁沟越来越不明显,前刀面还存在钛合金粘着,如图 5 (图 4 框 A、B 的放大图) 所示。

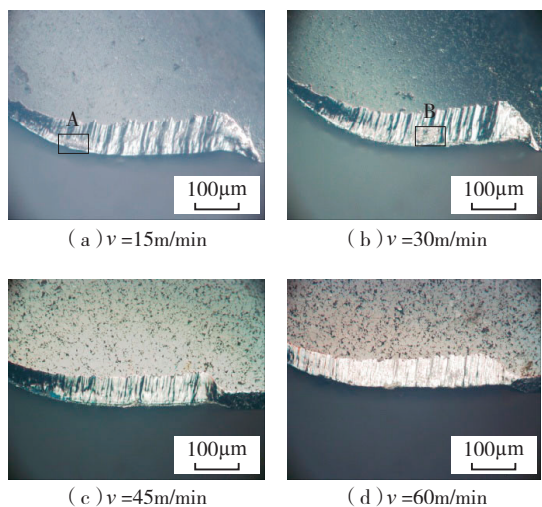


图4 PCD刀具在不同切削速度下前刀面磨损 ($VB=0.2\text{mm}$)
Fig. 4 Tool wear on the rake face under different cutting speed ($VB=0.2\text{mm}$)

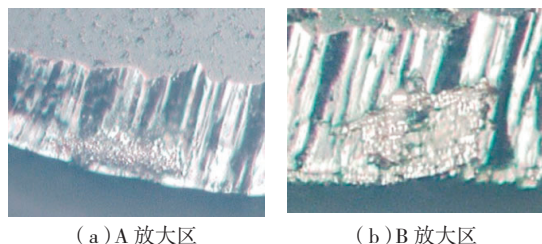


图5 PCD刀具前刀面的粘附磨损
Fig.5 Adhesion wear on the rake face

(2) 后刀面磨损。

钛基复合材料车削过程中,PCD 刀具虽然具有一定的后角,但是由于工件材料的回弹以及刃口圆弧的存在,工件的新鲜加工表面会与刀具后刀面接触,相互挤压摩擦引起后刀面磨损。图 6 为 PCD 刀具在切削速度

范围为 15~60m/min 内车削钛基复合材料,后刀面磨损量 $VB=0.2\text{mm}$ 时的后刀面磨损形态。可以看出,刀具后刀面均呈典型的带状磨损带,同前刀面一样,后刀面也出现了明显的犁沟,犁沟方向平行于切削方向。刀具表面还粘着了大量的钛合金,且在较低切削速度范围内,粘着较少,仅在刀具表面粘着了一层(如图 6 (b)和(d)所示),而在较高切削速度范围内,粘着较多,在刀具表面一层层叠加粘附(图 6 (f)和(h)所示)。

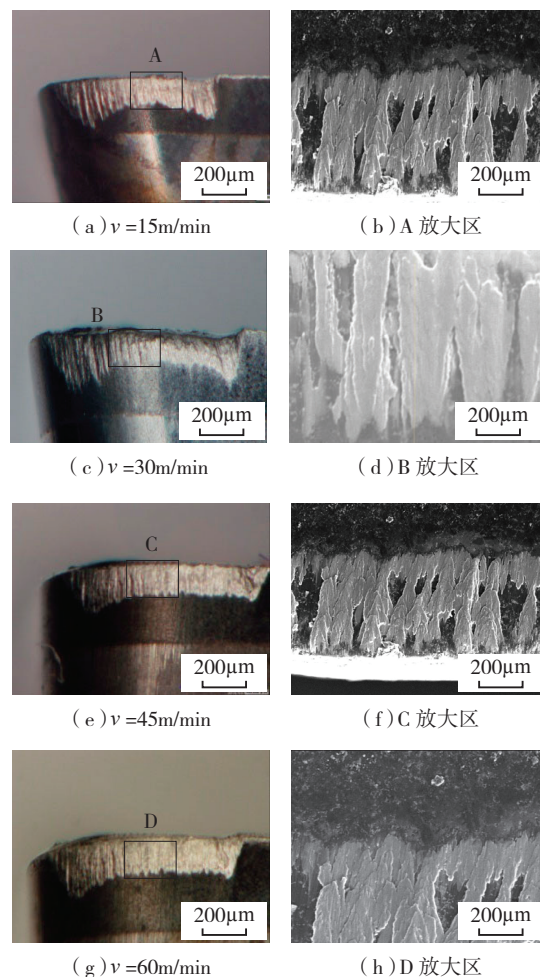


图6 PCD刀具在不同切削速度下的后刀面磨损
Fig.6 Tool wear on the flank face under different cutting speed

2.3.2 刀具磨损机理分析

车削钛基复合材料时,虽然钛合金基体硬度远低于 PCD 刀具,但工件材料中含有大量的 TiC 颗粒和 TiB 晶须增强相,在切削过程中,一方面,增强相不断的与刀具产生摩擦,使刀具中的粘结剂逐渐被磨耗掉,金刚石颗粒裸露出来,加上离散分布的增强相对刀具产生持续高频冲击,从而使 PCD 刀具表面金刚石颗粒脱落,导致磨粒磨损;另一方面,脱落的金刚石颗粒会夹杂在刀具与工件、刀具与切屑之间,随着工件的回转和切屑的流动,脱落的颗粒会首先在脱落处划出划痕,继而划痕逐渐延

伸,最后在刀具表面上划出明显的深沟,造成刀具的犁沟状磨粒磨损。

不同切削速度下车削钛基复合材料时,PCD 前后刀面都产生了犁沟状磨粒磨损(如图 4 和图 6 所示),且在切削速度较低时磨粒磨损较为明显。这是因为切削速度较低时,切削力较大,强化了脱落金刚石颗粒对刀具表面的刻划,在刀具表面形成的划痕较为明显,同时刀具粘结剂磨耗亦增加,金刚石颗粒脱落相对严重,产生了明显的犁沟。

另外,PCD 刀具车削钛基复合材料时,切屑和工件材料沿着刀具的前后刀面不断滑动,破坏了刀具表面层,大量刚从工件材料内部切削出来的钛合金基体在切削时产生的高温、高压作用下,粘结在刀具表面,当刀具与工件、切屑发生相对运动时,刀具材料会受拉或受剪而被工件或切屑带走,造成刀具的粘结磨损。

不同切削速度下车削钛基复合材料时,PCD 刀具后刀面均有钛合金粘结,如图 6 (b)、(d)、(f)、(h) 所示,且随着切削速度的增大,粘结量逐渐增多。这是由于切削温度是影响刀具和工件粘结倾向的重要因素,随着切削速度的增大,切削温度升高,粘结倾向增加,钛合金在刀具表面粘结也增多。粘结点破裂时,粘结磨损也更严重。

PCD 刀具在切削速度为 15~60m/min 的范围内车削钛基复合材料时的主要磨损原因是磨粒磨损和粘结磨损。切削速度较低时,切削力较大,刀具主要表现为典型的磨粒磨损特征,随着切削速度的增大,切削力逐渐减小,磨粒磨损减弱,切削路程逐渐增大。随着切削速度进一步增大,切削温度升高,刀具的粘结磨损逐渐显著,切削路程开始减小。因此,在切削速度为 45m/min 时,刀具磨粒磨损程度的弱化和粘结磨损程度的强化达到平衡,刀具切削路程最长。

3 结论

(1) 切削速度为 15~60m/min 的范围内,随着切削速度的增大,切削力从 473N 逐渐减小到 367N,且在 15~30m/min 时,减小趋势明显,30~60m/min 时减小趋势较缓;切削温度随着切削速度的增大,从 274℃ 逐渐升高到 564℃。

(2) 切削速度为 15~60m/min 范围内,随着切削速度的增大,切削路程从 390m 增大到 702m 然后减小至 467m,在 45m/min 时切削路程最长。

(3) 不同切削速度下的刀具磨损相似,前刀面均未出现典型月牙洼磨损,前后刀面同时磨损,前刀面磨损带直接与切削刃相连;后刀面均呈现典型的带状磨损带,且前后刀面均有犁沟出现,犁沟中有钛合金粘结。随着切削速度的增大,磨粒磨损减弱,粘结磨损增强。

参考文献

- [1] 张国定,赵昌正.金属基复合材料[M].上海:上海交通大学出版社,1996.
ZHANG Guoding, ZHAO Changzheng. Metal matrix composites[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1996.
- [2] 韩远飞,邱培坤,孙相龙.非连续颗粒增强钛基复合材料制备技术与研究进展[J].航空制造技术,2016(15):62-74.
HAN Yuanfei, QIU Peikun, SUN Xianglong. Progress and Fabrication Technology on Discontinuously Reinforced Titanium Matrix Composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(15): 62-74.
- [3] 胡宏楠,董明.颗粒增强金属基复合材料切削加工工艺的新进展[J].金属材料与冶金工程,2009,37(1):3-7.
HU Hongnan, DONG Ming. New development on cutting technology of particles enforcement metal matrix composites[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2009,37(1):3-7.
- [4] 王纯孝,尚波生,毛文峰.纤维增强钛基复合材料混杂结构制造技术[J].航空制造技术,2000(4):16-20.
WANG Chunxiao, SHANG Bosheng, MAO Wenfeng. Manufacturing technology of fibre reinforced TMC mixture structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2000(4): 16-20.
- [5] 罗国珍.钛基复合材料的研究与发展[J].稀有金属材料与工程,1997,26(2):1-7.
LUO Guozhen. Research and development of titanium matrix composites[J]. Rare metal materials and Engineering, 1997, 26(2):1-7.
- [6] ABKOWITZ S, ABKOWITZ SM, FISHER H, et al. Cerme Ti discontinuously reinforced Ti-matrix composites manufacturing, properties and applications[J]. Journal of Metals, 2004, 56(5):37-41.
- [7] 程秀全,刘晓婷.航空工程材料[M].北京:航空工业出版社,2008.
CHENG Xiuquan, LIU Xiaoting. Aeronautical engineering materials[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.
- [8] ARAMESH M, SHI B, NASSEF A O, et al. Meta-modeling optimization of the cutting process during turning titanium metal matrix composites(Ti-MMCs)[J]. Procedia CIRP, 2013,8: 576-581.
- [9] 章宇.钛基复合材料铣削刀具磨损研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
ZHANG Yu. Study on tool wear of milling titanium matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [10] BEJJANI R, SHI B. Laser assisted turning of titanium metal matrix composite[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011(60): 61-64.
- [11] 边卫亮.钛基复合材料车削加工试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
BIAN Weiliang. Experimental study on turning of titanium matrix composite[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [12] GE Y F, XU J H, FU Y C. High-Speed Turning of titanium matrix composites with PCD and carbide tools[C]//Advances in Materials Manufacturing Science and Technology XV. Switzerland: Trans Tech Publications INC., 2014:39-44.

通讯作者:苏宏华,博士、教授,研究方向为切削/磨削加工技术,精密/超精密加工技术,难加工材料与结构加工技术, E-mail: shh@nuaa.edu.cn.

(责编 大漠)