

刀具材料及其磨损对钛基复合材料车削温度的影响

Influences of Material Tool and Tool Wear on Cutting Temperature of Turning Titanium Matrix Composites

南京航空航天大学机电学院 章宇 苏宏华 傅玉灿 徐九华 宦海祥

[摘要] 对钛基复合材料车削时的车削温度和刀具磨损形态进行试验研究,结果表明,在相同条件下,两类刀具的切削温度随切削速度上升而提高,且在较低速度范围内随切削速度增大车削温度上升趋势明显,较高速度范围内上升趋势较缓;随着刀具磨损量从 $V_B=0\text{mm}$ 上升至 $V_B=0.2\text{mm}$,虽然硬质合金 K313 刀具的切削温度上升幅度小于 PCD 刀具,但 PCD 刀具的切削温度始终远小于硬质合金 K313 刀具,且 PCD 刀具的耐用度远好于 K313 刀具;PCD 刀具的磨损形式以磨粒磨损为主,而 K313 刀具以粘结磨损为主。

关键词: 钛基复合材料 热电偶标定 车削温度 刀具磨损

[ABSTRACT] This paper deals with cutting temperature and tool wear. The experiment results indicate that under the same conditions, both the PCD and carbide tools' cutting temperature increases with the cutting speed increasing, and increases faster in the lower cutting speed with the improvement of cutting speed, but increases slower in the higher cutting speed; With the tool wear rising from 0mm to 0.2mm, though PCD tool's cutting temperature rises faster than carbide tool, the former is lower than the later, and PCD tool's life is much more than carbide tool's life; The main wear form of PCD tool is particle attrition, while carbide tool is adhesion wear.

Keywords: Titanium matrix composite Thermocouple calibrating Cutting temperature Tool wear

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、压力铸造、搅拌铸造、喷射沉积等方法制备而成^[1],具有高比强度、高比模量、耐磨、耐热、优良的导电、导热性、不吸潮、抗辐射、低热膨胀系数、高冲击性等优良性能^[2],因此钛基复合材料在超高音速航空飞行器、下一代先进航空发动机和汽车制造等方面具有广泛的应用前景^[3]。

但是钛合金作为钛基复合材料的基体材料,因其物理、化学和机械性能的特殊性以及这些性能的相互影

响,本身就是一种难车削的材料^[4-6],同时基体中分布的散的增强相具有高模量、高强度、高硬度以及良好的高温性能,对刀具造成严重的刻划和耕犁作用,使钛基复合材料更难以切削加工,表现为切削温度高,刀具磨损严重。因此如何控制切削温度、延长刀具寿命是该类材料应用中急需重点突破的关键问题。

本研究使用硬质合金刀具和 PCD 刀具,在 60~120m/min 车削速度范围内和不同刀具磨损状态下对 $(\text{TiC}_p+\text{TiB}_w)/\text{TC4}$ 钛基复合材料进行车削温度试验,对比两类材料刀具在不同车削速度和刀具磨损状态下的车削温度,观察刀具磨损形态,对钛基复合材料车削刀具选择、刀具磨损机理、加工工艺的优化等有重要意义。

1 试验条件

车削试验在 SK50P 卧式数控车床上进行,采用水基冷却液冷却,利用自然热电偶测温法获得车削温度的电势信号。

1.1 工件材料

工件材料选用经真空自耗熔炼和热锻技术制备的钛基复合材料 $(\text{TiC}_p+\text{TiB}_w)/\text{TC4}$,两种增强相的摩尔比为 1:1,增强相体分比为 10%,棒料规格为 $\phi 60 \times 200$ 。钛基复合材料详细信息见表 1, $(\text{TiC}_p+\text{TiB}_w)/\text{TC4}$ 的金相组织如图 1 所示。

表1 钛基复合材料的物理力学性能

增强相类型	体分比	增强相平均尺寸 直径、长度/ μm		硬度 HRC、HV	
		颗粒+晶须	10%	1.5~20	35~80

1.2 试验刀具

采用混合颗粒度 $(30+2)\mu\text{m}$ 的 PCD 刀具和细粒度硬质合金 K313 刀具进行车削试验,刀具主要几何参数见表 2。刀杆 ISO 代码为 PSSNR2525M12,刀杆本身前角 -8° 、后角 0° 、刃倾角 0° 、主偏角 45° 、副偏角 45° 。

1.3 切削加工参数

切削速度是影响车削温度的最主要因素,因此安排以切削速度为主的单因素试验,试验切削用量和刀具磨损条件如表 3 所示。

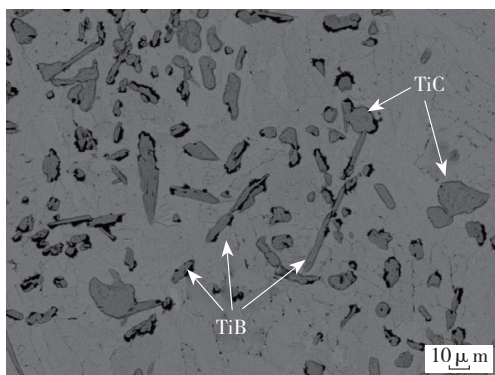
图1 (TiC_p+TiB_w)/TC4金相组织Fig.1 Microstructure of (TiC_p+TiB_w)/Ti-6Al-4V composites

表2 刀具主要几何参数

刀具种类	前角 / (°)	后角 / (°)	刃倾角 / (°)	刀尖圆弧半径 / mm
PCD	13	0	4	0.8
硬质合金	13	0	4	0.8

表3 切削用量和刀具磨损条件

切削速度 v / (m · min ⁻¹)	60, 80, 100, 120
进给量 f_r / (mm · r ⁻¹)	0.08
切削深度 a_p / mm	0.5
后刀面磨损 V_b / mm	0, 0.2

2 测温原理与热电偶标定

试验采用自然热电偶法对车削温度进行测量,其方法为:以“刀具-工件”为热电偶电极,组成一对自然热电偶,通过冷端和热端间温差产生的热电势测出车削温度。由于工件和刀具组成的这对自然热电偶不是标准热电偶,只有对其进行标定才能由测得的电势确定实际的车削温度,标定的原理图如图2所示。

自然热电偶的标定原理非常简单,但是想要获得准确可靠的结果却比较困难,特别是标定尺寸较小、导热系数较高的刀片材料。当加热设备对热端进行加热时温度会很快传导至刀片尾部,造成冷端引出部位的温升。因此,将标定试样设计为两部分,上部分为一段长约6mm、厚度约0.3~0.8mm的薄壁,用来作为加热部位和标准热电偶的公共热接点处;下部分结构通过线接触或点接触与上部分导通,这样就能充分增大热阻。

采用高频感应加热方式,迅速将标定试样加热到所需温度,然后关闭加热装置,在降温阶段进行标定,这样能消除电磁感应对数据采集系统的影响,提高标定结果精度。将两对热电偶连接至数据采集卡两对串口,同步记录两对热电偶所输出的热电势值,其中标准热电偶输出的电势值可以查询已知的分度表得到对应的温度值,从而得到待测热电偶输出的电势值与温度之间的对应

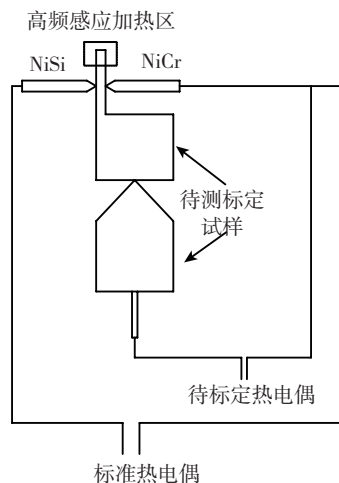


图2 标定原理图

Fig.2 Schematic diagram of temperature calibration

关系。由此可以得到PCD-NiCr、硬质合金K313-NiCr和(TiC_p+TiB_w)/TC4-NiCr 3组热电偶的标定曲线。

参考电极定律指出,由已知电极C与各种热电极如A、B配对时的热电势,则可以利用下式求出电极A和B组合时所产生的热电势。试验中所用的参考电极C为NiCr,而(TiC_p+TiB_w)/TC4、PCD和硬质合金K313为与其配对的电极。因此,可以获得(TiC_p+TiB_w)/TC4-PCD和(TiC_p+TiB_w)/TC4-硬质合金K313的标定曲线。

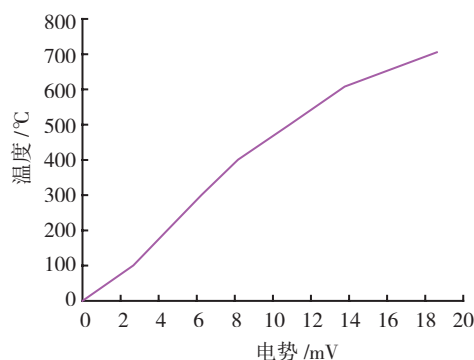
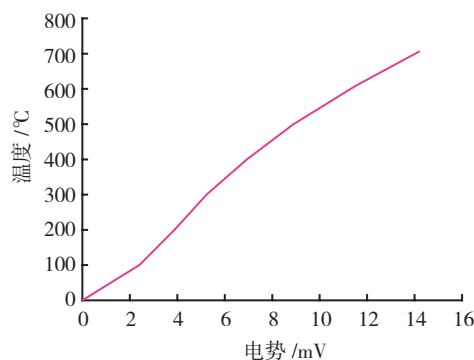
(a) (TiC_p+TiB_w)/TC4-PCD(b) (TiC_p+TiB_w)/TC4-硬质合金 K313

图3 热电偶标定曲线

Fig.3 Calibration curves of thermocouple

$$E_{AB}(T_0, T) = E_{AC}(T_0, T) - E_{BC}(T_0, T),$$

式中: $E_{AB}(T_0, T)$ 为 A 和 B 两热电极组成的热电偶在接点温度 (T_0, T) 时的热电势; $E_{AC}(T_0, T)$ 和 $E_{BC}(T_0, T)$ 为接点温度为 (T_0, T) 时, 热电极 A、B 分别与参考电极 C 配对时的热电势。

对 $(TiC_p+TiB_w)/TC4-PCD$ 和 $(TiC_p+TiB_w)/TC4-$ 硬质合金 K313 的热电偶热电特性的标定曲线见图 3。对标定曲线进行拟合, 结果为 $(TiC_p+TiB_w)/TC4-PCD$:

$$y = -7.225 + 43.521x + 1.241x^2 - 0.082x^3,$$

$(TiC_p+TiB_w)/TC4-$ 硬质合金 K313:

$$y = -7.776 + 47.144x + 2.672x^2 - 0.175x^3,$$

其中, x 为对应的热电势, y 为热接点温度。拟合公式精度: 判定系数 (R-Square) 分别为 0.99735 和 0.99621, 可以满足测温试验的精度要求。

3 试验结果和讨论

3.1 切削速度对车削温度的影响

由图 4 可知, PCD 和硬质合金刀具在刀具后刀面磨损量 $V_B=0mm$ 的磨损状态下, 在切削速度 $v=60\sim 120m/min$ 的范围内, 刀具切削钛基复合材料的温度随速度的增加而增加, K313 刀具车削温度从 $520^\circ C$ 上升到 $616.9^\circ C$, 而 PCD 刀具车削温度远远低于 K313 的车削温度, 从 $22.3^\circ C$ 上升到 $84.2^\circ C$; 且两类刀具在切削速度在 $60\sim 80m/min$ 的低速范围内, 温度随切削速度增大而升高的趋势大于切削速度在 $100\sim 120m/min$ 的高速范围内。

这是因为 PCD 的导热系数为 $700W/(m \cdot K)$, 为硬质合金 K313 的 8.8 倍, 热量传递更为迅速, 同时 PCD 较低的摩擦系数可使切屑更顺利排出, 有助于切削热的散发, 因此 PCD 刀具的切削温度远远低于硬质合金 K313 刀具的切削温度; 且由于切削速度的提高, 切屑与前刀面以及已加工表面与后刀面间的摩擦热增多, 引起切削温度升高, 但同时由于切削速度的提高, 切削层的金属变形程度减小, 因此切削温度的升高不与切削速度的升高成正比, 切削温度升高趋势变缓。

3.2 刀具磨损状态对车削温度的影响

(1) 刀具磨损形态。

图 5 为 PCD 刀具和硬质合金 K313 刀具前后刀面的磨损形貌。PCD 刀具前后刀面都存在沟犁状划痕, 这是因为钛基复合材料中的增强相对 PCD 刀具的刻划和耕犁造成, 是典型的磨粒磨损; K313 刀具前后刀面的磨损表面较为光滑, 磨损带较为均匀, 这是因为钛基复合材料中的钛

合金基体极易与刀具表面粘结, 粘结在刀具上的钛合金在一定程度上抑制了增强相对刀具材料的刻划和耕犁作用, 但随着粘结在刀具上的钛合金不断脱落, 造成了严重的粘结磨损。

(2) 刀具耐用度。

图 6 为切削速度 $120m/min$ 时, PCD 刀具和硬质合金 K313 刀具随刀具磨损增加的切削路程变化曲线。当达到刀具磨钝标准 $V_B=0.2mm$ 时, PCD 刀具的切削路程为 $70000mm$, 而硬质合金 K313 刀具的切削路程仅为 $50000mm$, 刀具耐用度远远低于 PCD 刀具。

(3) 刀具到达耐用度时的车削温度。

图 7 为 PCD 刀具和硬质合金 K313 刀具在刀具后刀面磨损量 $V_B=0.2mm$ 的磨损状态下的车削温度曲线。

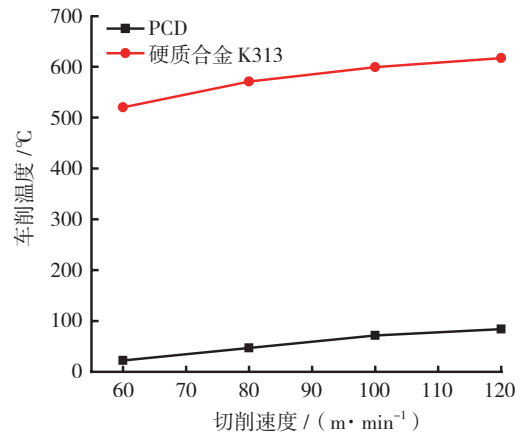
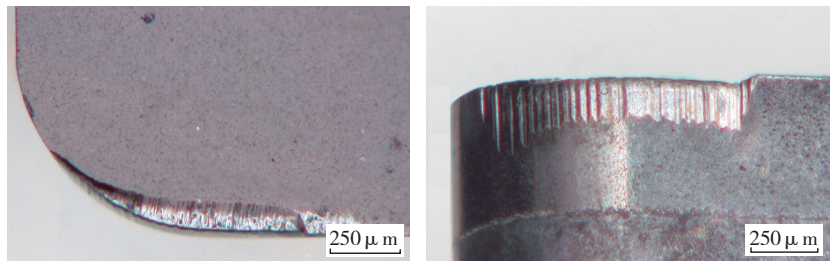
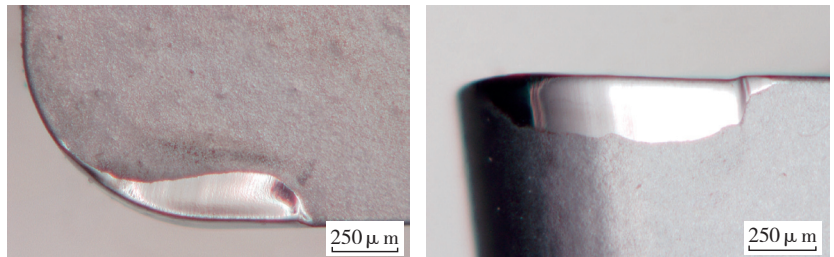


图4 不同切削速度车削温度对比
Fig.4 Comparisons of turning temperature under different turning speeds



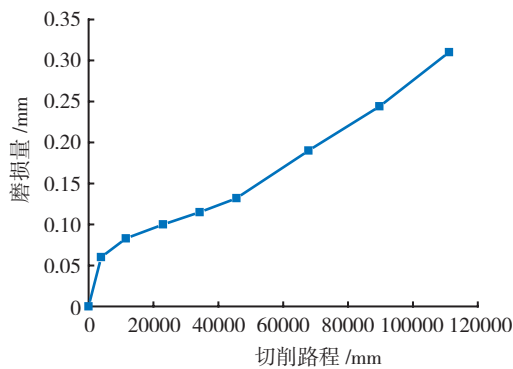
(a) PCD 刀具磨损形貌



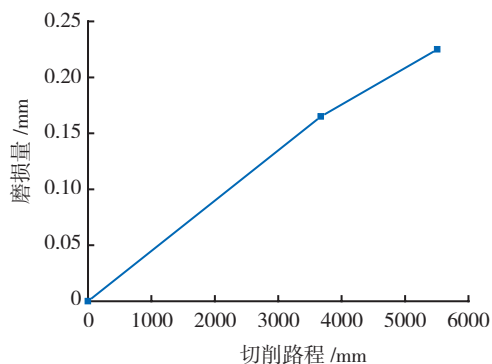
(b) K313 刀具磨损形貌

图5 刀具前后刀面磨损形貌

Fig.5 Tool wear morphology of rake and flank faces



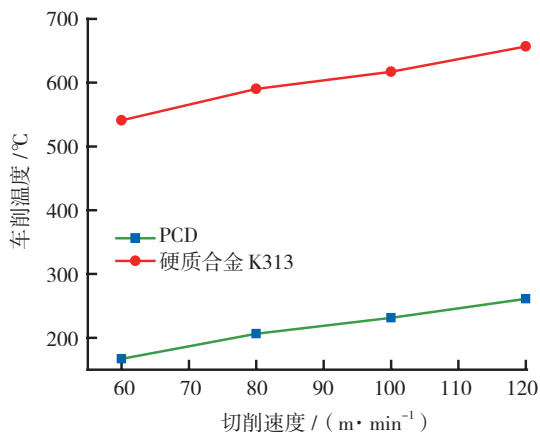
(a) PCD 刀具



(b) K313 刀具

图6 刀具切削路程随磨损量的变化

Fig.6 Variations of tool cutting distance with turning wear amount

图7 不同切削速度下 $V_B=0.2\text{mm}$ 磨损状态的车削温度Fig.7 Turning temperatures at $V_B=0.2\text{mm}$ under different turning speeds

在 $V_B=0.2\text{mm}$ 的磨损状态下, PCD 刀具的切削温度仍远远低于硬质合金 K313 刀具的切削温度, 对比图 4 可知, 刀具磨损是影响车削温度的一个显著因素, 当切削速度为 $120\text{m}/\text{min}$, 刀具后刀面磨损量 $V_B=0\text{mm}$ 上升到 $V_B=0.2\text{mm}$ 时, PCD 刀具随着刀具磨损量的上升, 车削温度显著上升, 车削温度由 84.2°C 上升到 261.1°C ; 而硬质合金 K313 刀具随着刀具磨损量的上升, 车削温度上升幅度较小, 车削温度由 616.9°C 上升到 656.7°C 。

两类刀具车削温度上升幅度的不同, 主要是因为试验所用 PCD 刀具是混合颗粒度 ($30+2$) μm , PCD 颗粒较大, 磨损后的 PCD 刀具易发生 PCD 颗粒脱落、突出和微崩刃等现象, 且前后刀面均存在钛基复合材料增强相的刻划和耕犁痕迹, 磨粒磨损是主要磨损形式, 且存在明显的边界磨损, 刀具的磨损带不均匀, 相比较新刀形貌差异较大, 造成磨损后车削温度升高幅度较大; 而试验所用 K313 刀具是细粒度硬质合金刀具, 刀具硬质颗粒相比较 PCD 刀具小, 磨损后的刀具形貌较难发生硬质颗粒的脱落、突出和微崩刃等现象, 且前后刀面无明显增强相刻划和耕犁痕迹, 粘结磨损是 K313 刀具的主要磨损形式, 因此虽然该类刀具的耐用度较低, 但是刀具的磨损带较为均匀相比较新刀形貌差异较小, 因此车削温度升高幅度较小。

4 结论

(1) 采用新型单节点标定装置获得 $(\text{TiC}_p+\text{TiB}_w)/\text{TC4-PCD}$ 和 $(\text{TiC}_p+\text{TiB}_w)/\text{TC4-}$ 硬质合金 K313 的标定曲线与拟合公式;

(2) 在试验用参数范围内车削钛基复合材料, PCD 刀具的车削温度远小于硬质合金 K313 刀具, 更适用于车削钛基复合材料;

(3) 在试验用切削参数范围内, 车削钛基复合材料的车削温度在 $60\sim 80\text{m}/\text{min}$ 的较低速度范围内上升较明显, 而在 $100\sim 120\text{m}/\text{min}$ 的较高速度范围内上升较缓;

(4) 在试验用切削参数范围内, 虽然 PCD 刀具随着刀具磨损增加, 车削温度升高幅度较大, K313 刀具幅度较小, 但 PCD 刀具切削温度仍远低于硬质合金 K313 刀具, 且 PCD 刀具的耐用度远好于硬质合金 K313 刀具;

(5) 在试验所用切削参数范围内车削钛基复合材料, PCD 刀具的磨损形式以颗粒磨损为主, 硬质合金 K313 刀具以粘结磨损为主。

参考文献

- [1] 张国定, 赵昌正. 金属基复合材料. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 3-6.
- [2] 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. 金属材料与冶金工程, 2009, 37(1): 3-7.
- [3] 罗国珍. 钛基复合材料的研究与发展. 稀有金属材料工程, 1997, 26(2): 1-7.
- [4] Ezugwu E O, Wang Z M. Titanium alloys and their machinability—a review. Journal of Materials Processing Technology, 1997(68): 262-274.
- [5] Rahmon M, Wong Y S. Machinability of titanium alloys. JSME, 2003, 46(1): 107-115.
- [6] 耿国盛. 钛合金高速铣削技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

(责编 杰一)