

# 低烧蚀碳/碳复合材料切削刀具适应性研究

陈旭辉 王新永 徐亮 韩军 雷磊

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 通过对切削规律进行系统实验和深入分析的基础上,探讨切削低烧蚀碳/碳复合材料过程中的切削温度、刀具耐用度、刀具的磨损等方面的基本规律。结果表明,低烧蚀碳/碳复合材料较普通碳/碳复合材料增加了难熔金属化合物颗粒,该颗粒极大改变了材料的切削特性;切削温度略有上升,但远低于金属材料的切削温度,不会影响刀具寿命;所添加的颗粒硬度极高,对刀具有明显的硬质点划擦磨损,造成刀具耐用度急剧下降;各种刀具磨损以硬质点磨损为主,同时存在不同的磨损和破损形式。

**关键词** 低烧蚀碳/碳,切削性能,切削温度,刀具磨损

中图分类号:TH16, TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.05.018

## Tool Applicability of the C/C Composite With Low Ablation Rate

CHEN Xuhui WANG Xinyong XU Liang HAN Jun LEI Lei

(Aerospace Research Institute of Material & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** To improve oxidation resistance, the granule of refractory metal compound is intermingled with carbon-carbon composite. The change of matrix influences the mechanical property greatly. The cutting temperature increased slightly, which was lower than the temperature of common metal obviously. The influence of the cutting temperature for the tool life is minimal. However the high hardness of the granule of refractory compound caused the abrasive increas dramatically, and the decreased of tool life. The dominant wear mechanism was abrasive wear, meanwhile there was different form of tool wear and tool breakage.

**Key words** Carbon-carbon composite with low ablation rate, Cutting performance, Cutting heat, Tool wear

### 0 引言

低烧蚀碳/碳复合材料是在原有碳/碳复合材料的基础上,通过在基体内添加锆、钨、钽、硼、硅等化合物的精细粒子等抑制剂,改进材料的抗氧化性能<sup>[1]</sup>,其已成功应用于以航天飞机为代表的高超声速再入飞行器和以 X-43A 为代表的高超声速技术验证器的鼻锥帽、翼前缘等高温部位<sup>[2-4]</sup>。

随着低烧蚀碳/碳复合材料基体材质的改变,这使得其切削加工性能有了极大的变化。一方面,切削加工过程中的切削力显著增大;另一方面,刀具耐用度急剧下降,提高了生产成本,降低了零件精度。

本文通过对切削规律进行系统实验和深入分析的基础上,探讨切削低烧蚀碳/碳复合材料过程中的

切削温度、刀具耐用度、刀具的磨损等方面的基本规律,积累基本的工艺实验数据及相应的加工机理,为工业实际生产提供理论和实验依据。

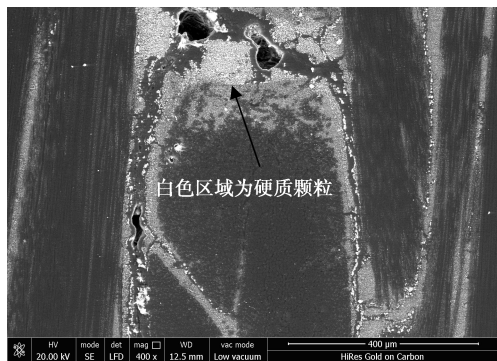
### 1 材料添加难熔金属化合物后的变化

由于引入难熔金属化合物,纤维的强度在处理过程中下降较多,反映在材料上,低烧蚀碳/碳复合材料的力学性能较之于碳/碳复合材料略有下降。

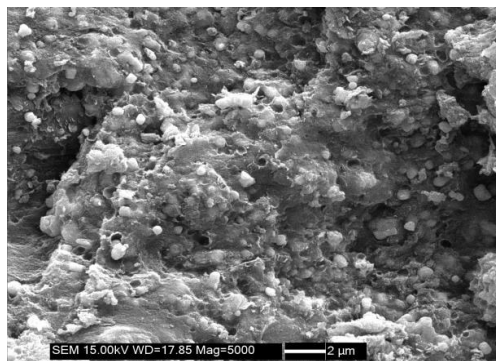
所添加的难熔金属化合物以颗粒的形式分布在基体中。颗粒的硬度高,达到 2 600 kg/mm<sup>2</sup> (HV)。图 1 为低烧蚀碳/碳复合材料中的难熔金属化合物颗粒图,图 1(a)可见,难熔金属化合物颗粒分布在基体富集区域。图 1(b)可见,颗粒的粒径在 1 μm 以下,均匀分散在基体中。

收稿日期:2015-04-15

作者简介:陈旭辉,1981 年出生,高级工程师,主要从事功能复合材料加工方面的研究。E-mail:13811977871@163.com



(a) 难熔金属化合物颗粒 400×



(b) 熔金属化合物颗粒 5 000×

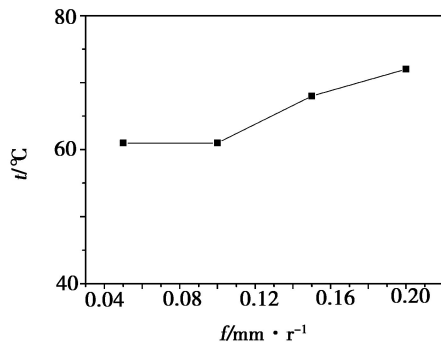
图1 低烧蚀碳/碳复合材料中的难熔金属化合物颗粒

Fig.1 Granule of refractory metal compound in the carbon-carbon composite with low ablation rate

## 2 切削温度

使用红外热像仪测量切削温度,对切削速度,背吃刀量和进给速度三个参数做了单因素试验,切削过程不使用冷却液。刀具参数为: $\gamma_0 = 0^\circ$ ,  $\alpha_0 = 5^\circ$ ,  $K_r = 45^\circ$ ,  $\lambda_s = 0^\circ$ ,  $r_g = 1 \text{ mm}$ 。测试结果见图2。测试温度在所选参数范围内在  $50 \sim 72^\circ\text{C}$  变化。切削速度对切削温度的影响较小,进给速度和背吃刀量对温度的影响较为明显。

整体上低烧蚀碳/碳复合材料的切削温度要远远小于钢材的切削温度。以45#钢为例,切削温度一般达几百度,在此次试验中,切削温度最高为  $72^\circ\text{C}$ ,远小于钢材的切削温度。

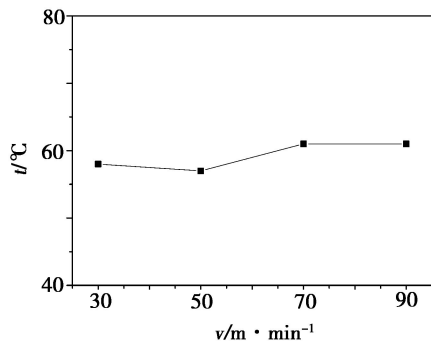


(c) 进给速度

$\alpha_p = 0.5 \text{ mm}$ ,  $v = 70 \text{ m/min}$

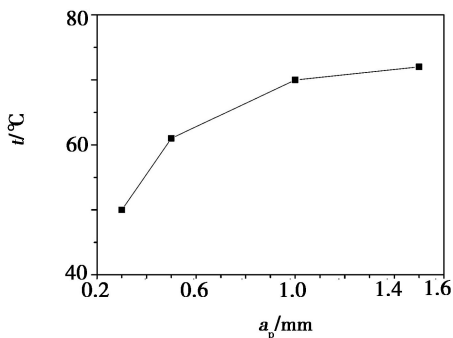
图2 加工参数对切削温度的影响

Fig.2 Curves between cutting temperature and parameters



(a) 切削速度

$f = 0.05 \text{ mm/r}$ ,  $\alpha_p = 0.5 \text{ mm}$



(b) 背吃刀量

$f = 0.05 \text{ mm/r}$ ,  $v = 70 \text{ m/min}$

切削温度跟剪切滑移强度相关。低烧蚀碳/碳复合材料的剪切强度远远小于钢材的剪切强度(碳/碳材料的剪切强度为  $60 \text{ MPa}$  左右,45#钢材的剪切强度为  $358 \text{ MPa}$ ),故其切削温度较低。

较低的切削温度使材料适用于干切削,可防止切削液对于材料的污染。同时,较低的切削温度有利于发挥刀具的性能,一方面没有刀具在高温下性能降低的问题,一方面也避免镶片刀具或者镀层刀具因粘结失效而报废。

## 3 刀具耐用度

分别使用硬质合金刀具、涂层硬质合金刀具、PCBN(立方氮化硼)刀具和PCD(聚晶金刚石)刀具对低烧蚀碳/碳材料做刀具耐用度试验。不使用冷却液,刀具参数为: $\gamma_0 = 0^\circ$ ,  $\alpha_0 = 5^\circ$ ,  $K_r = 107.5^\circ$ ,  $\lambda_s = 0^\circ$ ,  $r_g = 0.4 \text{ mm}$ 。

图3为硬质合金刀具在不同切削速度下切削碳/碳复合材料和低烧蚀碳/碳复合材料时刀具耐用度对比曲线。采用硬质合金刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料的刀具耐用度明显低于该刀具切削普通碳/碳复合材料的刀具耐用度,前者约为后者的  $1/5$ 。

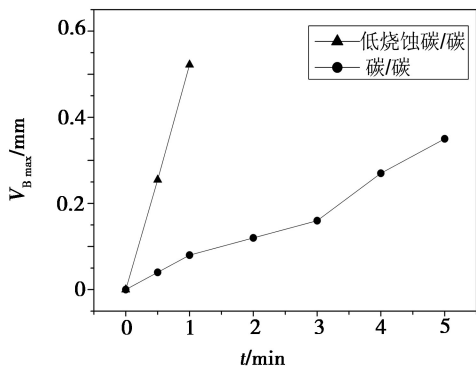


图3 刀具耐用度对比曲线

Fig. 3 Contrast curves of tool life

$v=70$  m/min,  $f=0.1$  mm/r,  $a_p=0.1$  mm。

图4 是不同刀具切削低烧蚀碳/碳耐用度对比曲线。硬质合金刀具、涂层硬质合金刀具、PCBN 刀具和 PCD 刀具的耐用度依次上升。硬质合金刀具 2 min 达到磨钝标准,涂层硬质合金刀具时间略长,3 min 达到磨钝标准,PCBN 刀具 5 min 达到磨钝标准,PCD 刀具明显优于其它刀具,23 min 达到磨钝标准。

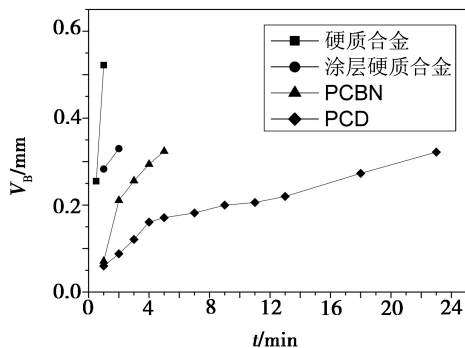


图4 不同刀具切削低烧蚀碳/碳耐用度对比曲线

Fig. 4 Tool life of cutting C/C composite with low ablation rate with different tools

$v=70$  m/min,  $f=0.1$  mm/r,  $a_p=0.1$  mm。

用 PCD 刀具车削低烧蚀碳/碳复合材料。切削参数仍选  $a_p=0.1$  mm,  $f=0.1$  mm/r, 切削度分 3 档,  $v=50, 70, 90$  m/min, 干切。取刀具磨钝标准为  $VB=0.3$  mm, 得到  $T-v$  曲线如图 5 所示。

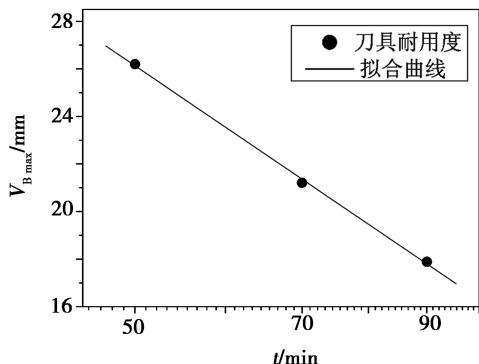


图5 PCD 刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料时的  $T-v$  曲线

Fig. 5  $T-v$  curve of cutting C/C composite with low ablation rate with PCD

相应的泰勒 (Taylor) 方程为:  $vT^{1.543}=7751$ 。PCD 刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料速度在 90 m/min 下时,耐用度在 18 min 以上,满足绝大多数情况下的切削应用。

#### 4 刀具磨损形态及磨损原因

##### 4.1 切削碳/碳复合材料磨损形态

图 6 为硬质合金刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料后刀面磨损区的微观形貌。刀具无破损,前刀面和边界无磨损,后刀面磨损严重。刀具无沟槽、划痕。

在图 6 中可以观察到刀具磨损区有一定量的黏结物存在,由 EDS 分析可知,该黏结物主要是工件 C 材料。硬质合金刀具的主要成分为 (WC, Co) 复合材料,由于刀具和工件新加工表面的化学活性较大且刀具和工件均包含同质 C 元素,因而刀具与被切削材料亲和力较强,黏结磨损也是该刀具的磨损形式之一。

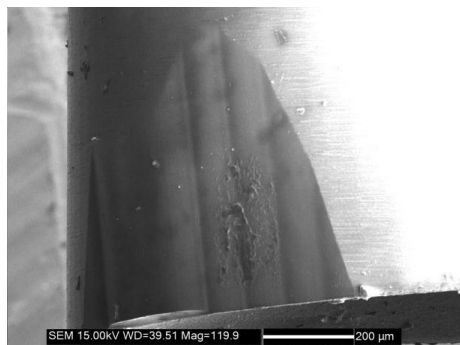


图6 硬质合金刀具切削碳/碳复合材料后刀具的微观形貌

Fig. 6 Microstructure of carbide tool after cutting C/C composite

##### 4.2 切削低烧蚀碳/碳复合材料磨损形态

硬质合金刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料后刀面磨损区的微观形貌如图 7 所示,刀具无破损,前刀面和边界无磨损,后刀面磨损严重。

切削低烧蚀碳/碳复合材料的刀具表面能谱显示,刀刃附近无难熔金属元素,无氧元素,碳元素含量无明显变化,表明不存在扩散磨损和化学磨损。

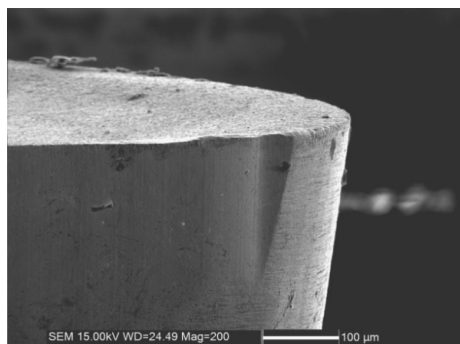


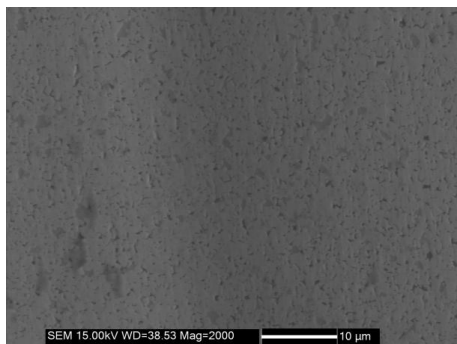
图7 切削低烧蚀碳/碳复合材料后刀面磨损图

Fig. 7 Microstructure of carbide tool after cutting C/C composite with low ablation rate

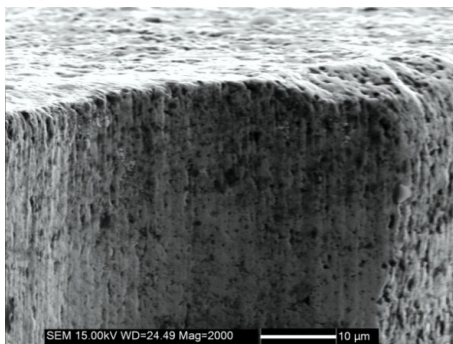
### 4.3 材料添加难熔金属化合物颗粒后刀具的磨损形态变化

对比图 8 中刀具分别切削碳/碳复合材料和低烧蚀碳/碳复合材料可以看出,前图表面平整,后图表面沿切削方向布满沟槽,沟槽深度由前刀面向下逐渐变浅,明显为硬质点滑擦造成。由此可见:碳纤维硬度

较低,加工碳/碳复合材料的刀具磨损后的表面光滑平整;添加难熔金属化合物后,其颗粒造成刀具后刀面的硬质点磨损大大增加,颗粒对刀具既有刮擦作用,又有冲击作用,是刀具磨损速度急剧加快的主要原因。



(a) 碳/碳材料



(b) 低烧蚀碳/碳

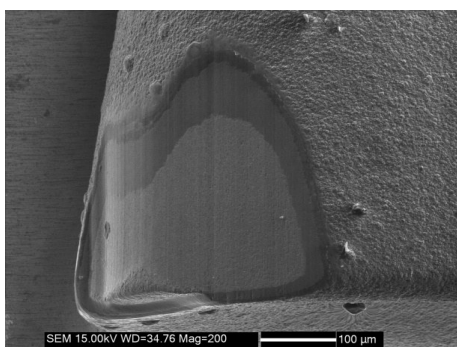
图 8 硬质合金刀具切削两种材料后刀具微观形貌的对比图 2 000×

Fig. 8 Microstructure of carbide tool after cutting the two kind of materials

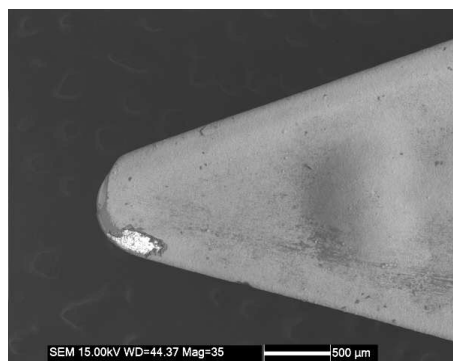
### 4.4 涂层硬质合金切削低烧蚀碳/碳复合材料磨损形态

涂层硬质合金刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料磨损区的微观形貌如图 9 所示,后刀面无材料黏结,前刀面明显破损,表层硬质合金涂层大面积剥落,前刀

面和边界无磨损,后刀面磨损严重。涂层在切削初期磨损后与基体同步磨损,后期并不能起到对基体的保护作用。所选的涂层硬质合金刀具涂层表层为氮化钛,其抗弯强度低于一般硬质合金,故在加工硬度较高的材料时容易破损。



(a) 后刀面磨损区 200×



(b) 前刀面崩碎区 35×

图 9 涂层硬质合金刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料磨损图

Fig. 9 Microstructure of coated carbide tool after cutting C/C composite with low ablation rate

### 4.5 CBN 刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料磨损形态

CBN 刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料磨损区的微观形貌如图 10 所示,无材料黏结,刀具崩刃,前刀面和边界无磨损。后刀面磨损严重,后刀面磨损区域布满沿切削方向的沟槽,应为硬质点划擦造成。CBN 刀具的抗弯强度较低,故在加工硬度较高的材料时易出现崩刃现象。

### 4.6 金刚石刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料磨损形态

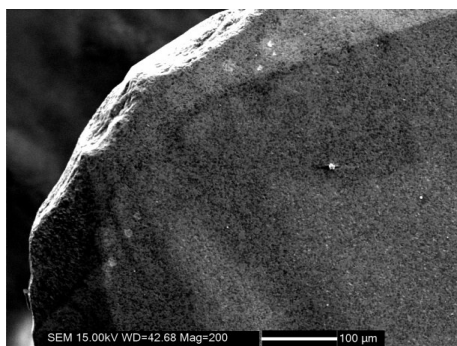
由图 11 可以看出,金刚石刀具无破损,金刚石

刀具在后刀面磨损严重的情况下,前刀面几乎没有磨损。低烧蚀碳/碳复合材料的切削力较小,刀具所受的机械应力较小,切削温度较低,刀具所受的热应力也较小,故刀具无破损现象。低烧蚀碳/碳复合材料切削过程与脆性材料相似,切屑崩碎后随即与刀具分离,对前刀面几乎没有挤压作用,故前刀面几乎无磨损。

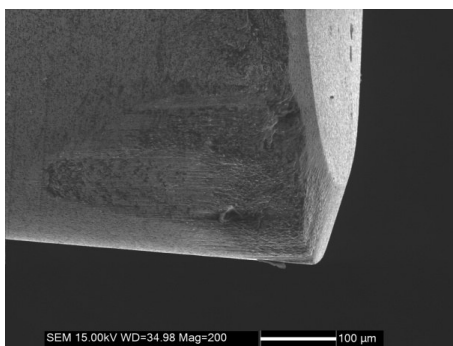
后刀面在长时间车削后沿切削方向有明显的磨损纹路,为硬质点磨损的特征。刀具表面整洁,无工件材料黏结。分析后刀面的元素能谱,发现仅含有碳

元素,说明刀具在切削过程中无扩散磨损和化学磨

损。



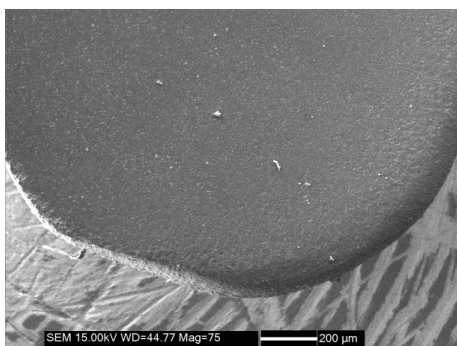
(a) 前刀面磨损区



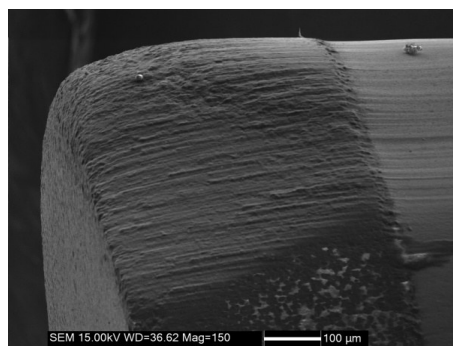
(b) 后刀面磨损

图 10 CBN 刀具切削低烧蚀碳/碳复合材料磨损图 200×

Fig. 10 Microstructure of CBN tool after cutting C/C composite with low ablation rate



(a) 前刀面磨损区 75×



(b) 后刀面磨损区 150×

图 11 金刚石刀具磨损图

Fig. 11 Microstructure of PCD tool

## 5 结论

低烧蚀碳/碳复合材料较之普通碳/碳复合材料基体中增加了难熔金属化合物颗粒,其颗粒硬度极高,在切削的过程中,对刀具具有明显的硬质点划擦磨损,改变了材料的切削特性,增加了加工难度。

(1) 切削温度略有上升,但远远低于金属切削的温度,切削温度对于刀具寿命的影响可以忽略;

(2) 刀具耐用度因硬质点的划擦作用而急剧下降。硬质合金刀具磨损迅速,可作为粗加工刀具选用。由于涂层在切削初期就已经磨损,后期不能起到对刀具的保护作用,故在生产中选用硬质合金刀具时,涂层是不必要的。在试验的各种刀具中,金刚石刀具最适合切削此种材料,能够满足多数情况下的切削要求。

(3) 各种刀具磨损以硬质点磨损为主,同时存在不同的磨损和破损形式。

## 参考文献

- [1] 许正辉, 张中伟, 王俊山, 等. 抗烧蚀组元对低烧蚀炭/炭复合材料微观结构的影响研究[C]. 第八届全国新型炭材料学术研讨会论文集, 2009: 391-395
- [2] 程家, 张中伟, 许正辉, 等. 添加难熔金属化合物 C/C 复合材料的微观结构[J]. 宇航材料与工艺, 2010, 40 (2): 106-108
- [3] Fitzer E, Manocha L M. Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites[M]. Berlin: Springer, 1998: 71-95
- [4] 尹健, 张红波, 熊翔, 等. 不同预制体结构炭/炭复合材料烧蚀性能[J]. 复合材料学报, 2007(2): 40-44

(编辑 任涛)