

# CFRP/TC4 叠层板的钻削实验

胡立湘 李鹏南 牛秋林 邱新义

(湖南科技大学机电工程学院,湘潭 411201)

**文 摘** 采用硬质合金麻花钻对碳纤维复合材料-钛合金叠层板进行钻削试验,分析了钛合金层加工参数对刀具磨损的影响和刀具磨损机制。刀具磨损对孔入口处最大撕裂长度的影响。结果表明:磨损的主要区域是横刃和后刀面,前刀面磨损不明显。钛合金层的低转速和低进给量可以降低刀具磨损;此外随着钻孔数的增加,钛合金层转速越低、进给量越大碳纤维复合材料孔入口处孔质量更好。

**关键词** 钻削,CFRP/TC4 叠层板,刀具磨损机制,孔入口处撕裂

中图分类号:TH16

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.06.018

## Study of Drilling CFRP/TC4 Stacks

HU Lixiang LI Pengnan NIU Qiulin QIU Xinyi

(College Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

**Abstract** Through drilling on carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks with the carbide twist drill, this paper studied tool wear mechanisms, the influence of titanium layer processing parameters for tool wear and effects of cutting tool wear on the largest tear length of hole entrance. The results showed that the main area of wear is the horizontal and the flank, and the wear of the rake face is not obvious. When drilling the titanium alloy layer, low speed and low feed rate can be used to reduced tool wear. With the increase of the number of holes, the hole entrance of the titanium alloy layer is more stable.

**Key words** Drilling, CFRP/TC4 stacks, Tool wear mechanism, Entrance tear

### 0 引言

碳纤维复合材料-钛合金叠层板作为复合结构,具有较好的抗腐蚀性和韧性,在诸如飞机机翼、大型运载火箭舱段、导弹发射架等航空航天与国防军工新产品的研制与生产中正在得到越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>;但由于碳纤维复合材料和钛合金均属于难加工材料并且具有不同的机械和热学特性<sup>[2-3]</sup>,使得加工碳纤维复合材料-钛合金叠层板时刀具磨损、破损严重,加工孔质量不高。因此,一些专家学者对于上述问题进行了研究<sup>[4]</sup>。赵建设等<sup>[5]</sup>发现钻削碳纤维复合材料刀具磨损时主要原因是磨粒磨损;J.L.CANTERO<sup>[6]</sup>发现钻削钛合金刀具时主要磨损形式是后刀面不规则磨损和崩刃。目前有关文献资料主要局限于刀具几何参数和材料等对刀具磨损的影响<sup>[7]</sup>。M.SENTHILKUMAR<sup>[8]</sup>分析了不同钻顶角的麻花钻钻削叠层板时的刀具磨损,发现小钻尖角的刀具磨损更严重。DAVE.KIM<sup>[9]</sup>发现

钻削叠层板材料时,钛合金层主要是加速刀具后刀面的磨损,碳纤维复合材料层主要是损坏切削刃。KYUNG-HEE PARK<sup>[10]</sup>发现在加工碳纤维复合材料-钛合金叠层板时金刚石涂层刀具比硬质合金刀具寿命更长,加工孔质量更好。本文主要研究钻削碳纤维复合材料-钛合金叠层板时钛合金层加工参数对刀具磨损的影响及磨损机制及对孔质量的影响等。

### 1 实验

#### 1.1 材料和刀具

整体硬质合金麻花钻(K10),直径为6 mm,钻顶角为130°,螺旋角为25°。工件为碳纤维复合材料-钛合金叠层板材料(碳纤维为T700,钛合金为Ti6Al4V,厚度分别为3和10 mm,钛合金的抗弯强度为1 058 MPa,T700的拉伸强度为4 990 MPa。

#### 1.2 仪器设备

KV800 数控铣床,四川长征机床厂;Kistler

收稿日期:2016-01-13;修回日期:2016-08-25

作者简介:胡立湘,1991年出生,硕士,主要研究碳纤维复合材料-钛合金叠层板加工系列化刀具切削性能。E-mail:924079729@qq.com

9253B23 测力仪,频率设置为 8 kHz。日本基恩士超景深三维显微系统 (KEYENCE VHX-500FE)。

### 1.3 实验参数

钻削方式见图 1。

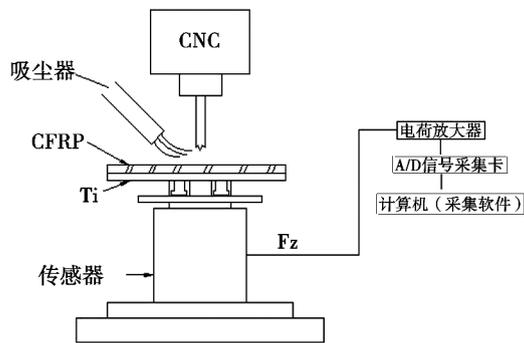


图 1 试验装置和数据采集系统

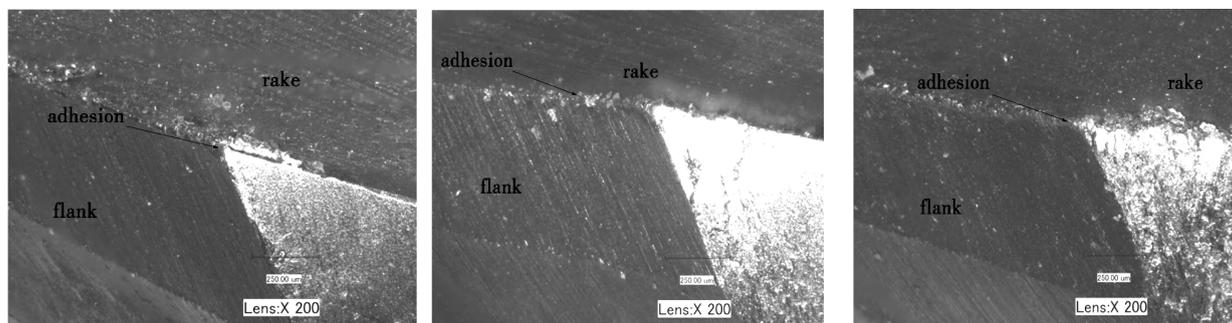
Fig.1 Schematic of test device and data acquisition system

碳纤维复合材料层参数固定: $n=2\ 000\ \text{r/min}$ , $f=0.025\ \text{mm/r}$ ;钛合金层参数为: $n=300\ \text{r/min}$ , $f=0.03\ \text{mm/r}$ (1<sup>#</sup>), $n=300\ \text{r/min}$ , $f=0.06\ \text{mm/r}$ (2<sup>#</sup>), $n=700\ \text{r/min}$ , $f=0.03\ \text{mm/r}$ (3<sup>#</sup>)。每钻削 4 个孔均对钻头磨损情况进行观测。钻削轴向力测试系统如图 1 所示,采用干式切削。

## 2 结果和分析

### 2.1 刀具磨损研究

刀具磨损的主要原因是切削力和切削温度共同作用下,由机械摩擦、粘结、化学磨损、崩刃、破碎以及塑性变形等引起的磨损。图 2 展示了碳纤维复合材料层参数固定和不同钛合金层加工参数下钻削 20 个孔后刀具的表面磨损和切屑的粘结等。结果表明磨损的主要区域是后刀面磨损和横刃磨损。



(a) 1<sup>#</sup>工艺参数

(b) 2<sup>#</sup>工艺参数

(c) 3<sup>#</sup>工艺参数

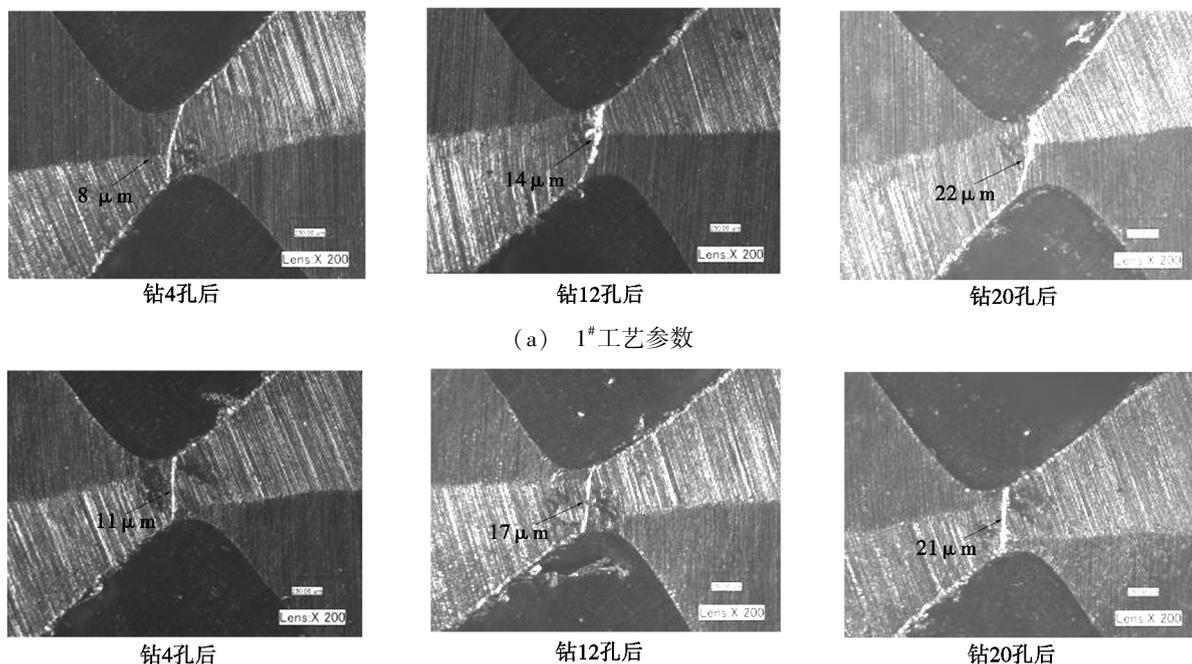
图 2 不同进给量下钻削 20 孔后刀具的形貌

Fig.2 Morphology of tool under different feed conditions after 20 holes

#### 2.1.1 横刃磨损

钛合金层的进给量越小会使得横刃磨损更低。图 3 展示了当碳纤维复合材料层参数固定时,不同钛合金层加工参数下不同钻孔数的横刃磨损图。随着

钻孔数的增加,横刃附近粘结的钛屑开始往复形成,而钛屑粘结的产生和消失会影响钻头的磨损。此外在高转速时横刃附近钛屑粘结的面积更大。



钻4孔后

钻12孔后

钻20孔后

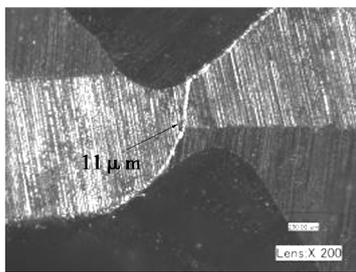
(a) 1<sup>#</sup>工艺参数

钻4孔后

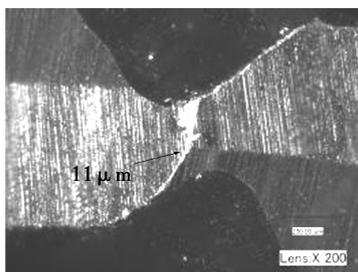
钻12孔后

钻20孔后

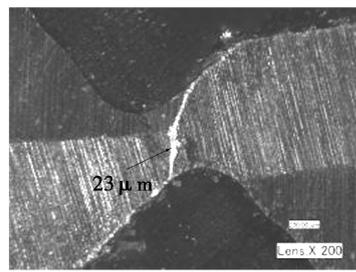
(b) 2<sup>#</sup>工艺参数



钻4孔后



钻12孔后



钻20孔后

(c) 3#工艺参数

图3 横刃磨损

Fig.1 Chisel edge wear

图4为不同钛合金层加工参数下横刃宽度随钻孔数的变化图。

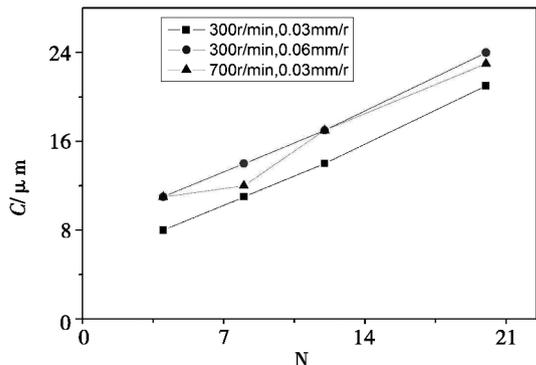


图4 横刃磨损曲线

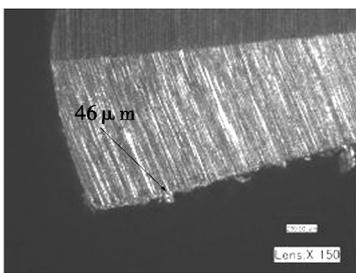
Fig.4 Chisel edge wear change regularity

横刃磨损会使得刀具越来越钝化从而导致轴向力越来越大。随着钛合金层进给量的增加横刃的磨损也会增加。当钛合金层转速为 300 r/min 时,在钻削第 4 个孔、第 8 个孔、第 12 个孔和 20 个孔后,每转进给量为 0.06 mm/r 的横刃宽度比每转进给量为 0.03 mm/r 的横刃宽度分别大了 37.5%、27.3%、

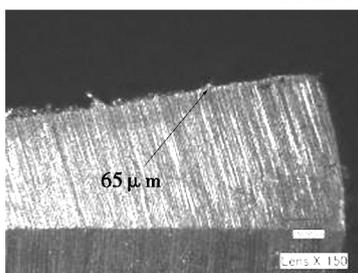
21.4%、9.1%。钛合金层转速为 700 r/min 下相比于钛合金层转速为 300 r/min 横刃的磨损更快。一方面,钛合金的黏附性导致在横刃处有钛切屑粘结,但是当粘结的钛切屑消失时横刃磨损明显增加。这是由于钛合金与大部分刀具材料具有高的化学亲附性<sup>[11]</sup>,而钛的化学活性随温度的升高而升高(钛合金的钻削温度随着进给量的增加而增加)。在横刃附近粘结的钛切屑在钛合金层转速为 700 r/min 下比在钛合金层转速为 300 r/min 下更易形成(图3)。另一方面,当横刃进入碳纤维复合材料层时,碳纤维复合材料中的纤维硬质点会不断挤压横刃。

### 2.1.2 后刀面磨损

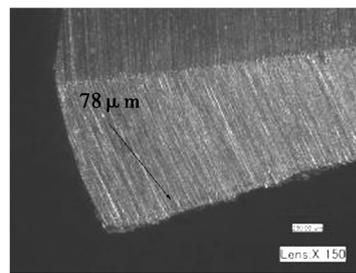
图5展示了不同钛合金层加工参数下不同钻孔数的后刀面磨损图。磨损的主要形式是磨粒磨损和粘结磨损。钛合金层的低进给量会导致后刀面磨损更小,这是因为低进给量时的横刃磨损最小导致钻削推力最小(麻花钻横刃对钻削推力的贡献占整个推力的 40%~60%<sup>[12]</sup>),而钻削推力的减小会减小后刀面的摩擦力。



钻4孔后

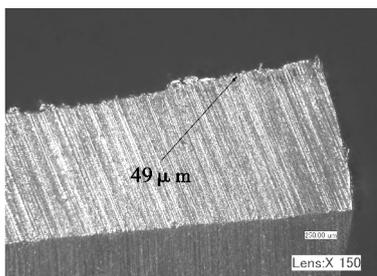


钻12孔后

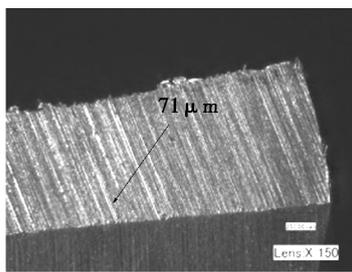


钻20孔后

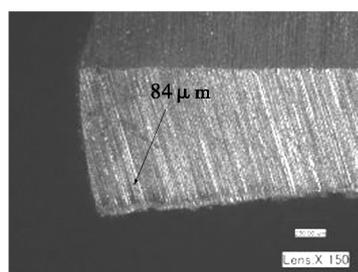
(a) 1#工艺参数



钻4孔后

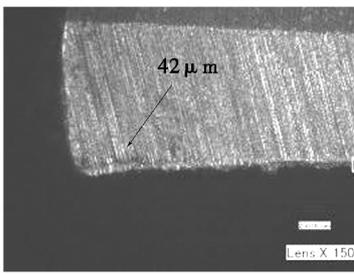


钻12孔后

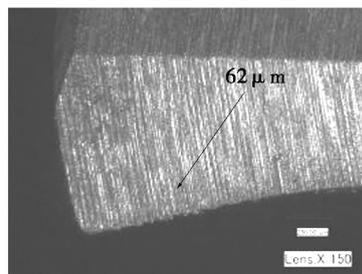


钻20孔后

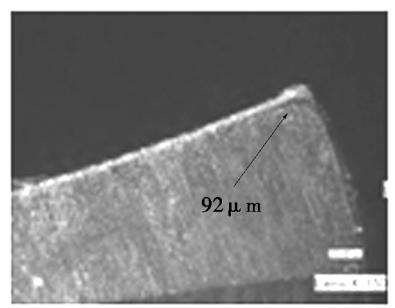
(b) 2#工艺参数



钻4孔后



钻12孔后



(c) 3#工艺参数

图5 后刀面磨损

Fig.5 Flank wear

图6为不同钛合金层加工参数下后刀面磨损随钻孔数的变化曲线。

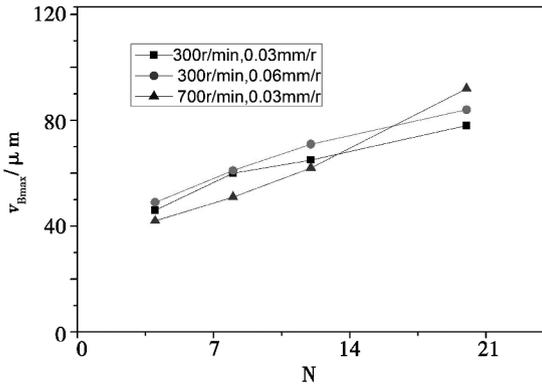


图6 后刀面磨损变化规律

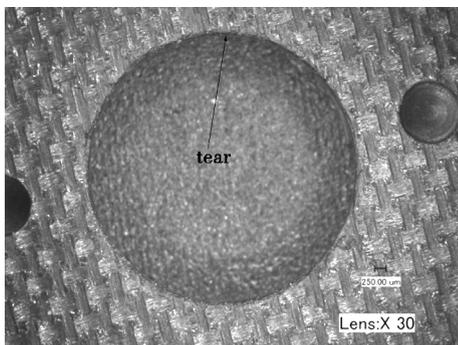
Fig.6 Flank wear change regularity

随着钻孔数的增加,后刀面的磨损逐渐增加,此时钛合金层转速为700 r/min 相比于钛合金转速为300 r/min 刀具磨损速度更快。相同孔数下钛合金层进给量越大后刀面磨损越严重。当钛合金层转速为300 r/min 时,在钻削第4个孔、第8个孔、第12个孔和20个孔后,每转进给量为0.06 mm/r 时的后刀面磨损最大值比0.03 mm/r 时的后刀面磨损最大值分别大了6.5%、3.4%、9.2%、7.7%。钛合金层对后刀面磨损有很大的影响。这是因为钻削钛合金层时,一方面钛合金中的硬质点会不断的刮擦后刀面;另一方面,当温度逐渐升高到钛切屑能够与硬质合金钻头发生粘附时(钛合金层进给量越大钻削温度越高<sup>[11]</sup>),此时在后刀面上开始粘附着钛切屑。当钻削下一个

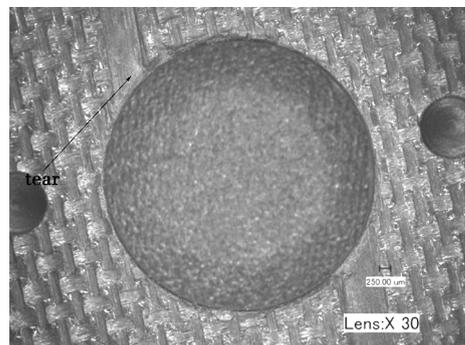
孔的碳纤维复合材料层时,此时粘结的钛切屑被除去的同时拉出了碳化物晶粒,加大了后刀面的磨损。而且钻削碳纤维复合材料层时,碳纤维复合材料中的硬质纤维会不断刮擦钻头的后刀面和损坏主切削刃。此外,在钛合金层进给量为0.03 mm/r 时,转速为700 r/min 相比于转速为300 r/min,在钻削12孔后后刀面磨损突然加剧,这可能是由于随着钻孔数的增加转速越大钻削过程越不稳定从而增加了后刀面的磨损。

## 2.2 刀具磨损对孔入口处撕裂的影响

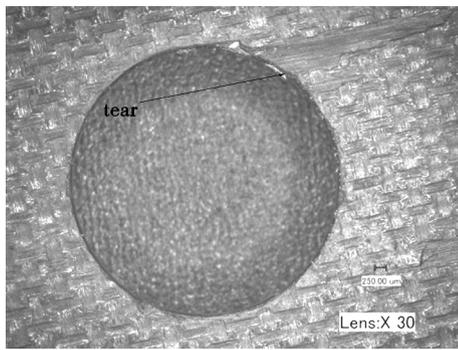
碳纤维复合材料钻削分层有钻孔入口的剥离分层和钻孔出口的推出分层<sup>[1]</sup>。考虑到碳纤维复合材料在钛合金板上方会大大减小出口的推出分层,因此,只考虑入口处的剥离分层。刀具磨损对孔入口处的撕裂影响很大。图7为不同钛合金层加工参数下不同孔数的碳纤维复合材料入口处形貌。图8为当钛合金层加工参数变化时,孔入口处的最大撕裂长度随钻孔数增加的变化趋势。结果表明撕裂的最大长度随钻孔数增加的变化趋势。结果表明撕裂的最大长度从0.2增长到6.84 mm。在3#参数时,比1#参数时的最大撕裂长度大了0.87 mm。这是由于高转速下的钻头磨损程度比低转速下更剧烈。钻削碳纤维复合材料时,轴向钻削推力是引起孔入口处撕裂的主要原因,而轴向钻削推力随着磨损的增加而增加。此外,随着钻孔数的增加,进给量越大入口处撕裂变化越小,在2#参数时,最大撕裂长度跳动比0.03 mm/r 的变化范围更小。因此,在加工此类叠层板时钛合金层加工参数应选择低转速和高进给量。



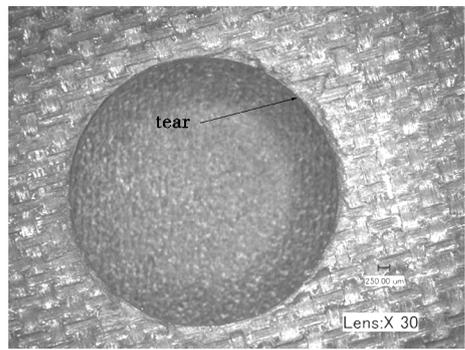
(a) 1#工艺参数(4孔)



(b) 1#工艺参数(8孔)



(c) 3<sup>#</sup>工艺参数(4孔)



(d) 3<sup>#</sup>工艺参数(8孔)

图7 碳纤维复合材料入口处形貌

Fig.7 Carbon fiber composite morphology at the entrance

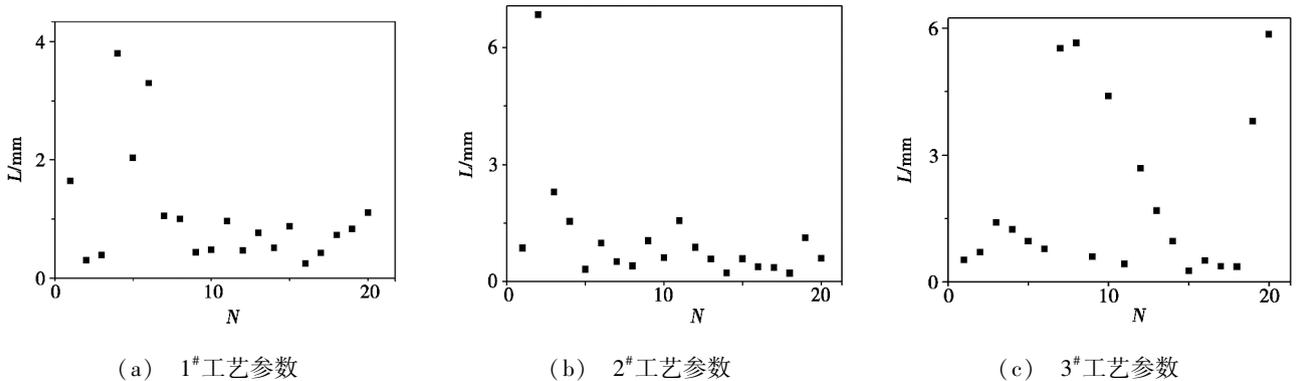


图8 最大撕裂长度  $L$  随钻孔数  $N$  变化

Fig.8 The largest tear length change with the number of drilling

### 3 结论

(1)从刀具磨损方面来说,在加工碳纤维复合材料-钛合金叠层板时钛合金层加工参数应选择低转速和高进给量。钛合金层进给量的增加会导致横刃磨损和后刀面磨损速率更快;在转速为 700 r/min 进给量为 0.03 mm/r,从第 12 个孔后后刀面磨损速度加快。

(2)从加工孔入口处的质量方面考虑,在加工碳纤维复合材料-钛合金叠层板时钛合金层加工参数应选择低转速和高进给量。在钛合金层转速为 700 r/min 每转进给量为 0.03 mm/r 比转速为 300 r/min 每转进给量为 0.03 mm/r 的平均最大撕裂长度大了 0.87 mm;随着钻孔数的增加,进给量越大碳纤维复合材料孔入口处撕裂变化越小。

#### 参考文献

[1] PAULO DAVIM J.复合材料制孔技术[M].陈明,安庆龙,明伟伟,译.北京:国防工业出版社,2013.  
 [2] 艾兴.高速切削加工技术[M].北京:国防工业出版社,2003:242.  
 [3] 王奔,高航,郭东明.树脂固化温度与纤维铺设方式对 C/E 复合材料制孔质量的影响[J].机械工程学报,2011(12):19-25.  
 [4] RAMULU M,BRANSON T,KIM D.A study on the drilling of composite and titanium stacks[J].Composite Structures,

2001(54):67-77.

[5] 赵建设,李仲平.碳/环氧复合材料钻孔刀具磨损机理研究[J].宇航材料工艺,2006,36(2):68-70.  
 [6] 师润平,王成勇,林升旭.碳纤维-钛超混杂复合材料孔加工刀具研究[J].机械设计与制造,2013(8):117-119.  
 [7] Dave KIM.A comparative study of carbide tools in drilling of CFRP and CFRP-Ti stacks;Proceedings of the Asme 2011 international manufacturing science and engineering conference MSEC2011,Corvallis,Oregon,USA June 13-17,2011[C].Copyright by ASME,2011:1-8.  
 [8] CANTERO J L,TARDIO M M,CANTELI J A.Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V[J].International Journal of Machine Tools & Manufacture,2005,45:1246-1255.  
 [9] SENTHILKUMAR M.Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer(CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks;International conference on design and manufacturing, Icondm,2013,India[C].Selection and Peer-review Under Responsibility of the Organizing and Review Committee of ICon DM,2013.  
 [10] KYUNG-HEE PARK,AARON BEAL,DAVE KIM.Tool wear drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools[J].Wear,2011,271:2826-2835.  
 [11] 金和喜,魏克湘,李建明.航空用钛合金研究进展[J].中国有色金属学报,2015(2):280-289.  
 [12] KHASHABA U A,SEIF M A,ELHAMID M A.Drilling analysis of chopped composite[J].Composite:Part A,2007,38:61-70.

# 《宇航材料工艺》征稿简则

## · 来稿要求

- 1 来稿不宜过长, 著作稿一般不超过 5000 字, 综述稿一般不超过 7000 字(包括图表在内)。
  - 2 来稿应有 100~300 字以内的中英文文摘、3~8 个关键词、中图分类号, 并附英文文题、作者姓名的汉语拼音、对外英文名称、英文图题、图注; 英文表题、表项等。
  - 3 来稿一律用 Word 文档, 外文字母、数学符号大小写、正斜体、上下角标要清晰可辨。
  - 4 严格采用国家最新颁布的法定计量单位, 数字后面单位均用符号表示(如 100 kg); 参考文献按 GB/T 7714-2015 标注。
  - 5 插图半栏一般为 80 mm×50 mm; 通栏最大尺寸不超过 170 mm×100 mm, 墨线及金相照片均为黑白图, 且均放在首次提到该图的正文后面, 用 \* .JPG 格式插入文中, 在插图正下方写出图号、图题和图注。物理量坐标标目以“物理量符号/单位符号”的形式表示, 例如速度的表示方法应为  $V/m \cdot s^{-1}$ , 表格中的量和单位也用同样的方法表示。
  - 6 表格一律用三线表, 表中数据的有效数字应保持一致, 表格应放在首次提到该表的正文后面。
  - 7 来稿务必在文稿的首页底注明第一作者的作者简介(姓名、出生年、学历职称、主要从事的研究工作)、E-mail 地址、联系电话(手机号码)等信息。
  - 8 来稿应附作者本人签署的《论文著作权转让书》, 默认所投稿为《宇航材料工艺》享有专有出版权, 可在 CA、IAA、METADEX 等国内外文摘刊物上及文摘型数据库中无偿摘录, 同时附本单位保密部门审批的保密审查证明。编辑部在收到《论文著作权转让书》和保密审查证明后方进行稿件审查。
  - 9 请勿一稿两投, 本编辑部收到稿件后即电邮回复作者, 三个月内决定取舍再告作者, 一经刊出即付一次性稿酬, 并赠当期刊物 3 本。
  - 10 文稿的著作权, 除《著作权法》另有规定外, 属于作者, 文责自负。对刊用稿, 编辑部有权删改, 作者若不允许, 请来稿时声明; 未刊用者恕不退稿, 请自留底稿, 顺致歉意。
- 本刊一律实行在线投稿, 投稿时请登录期刊网站: <http://www.yhclgy.com> 先注册再按要求填写相关信息后上传稿件。  
E-mail: 703@china.com 电话 010-68383269  
编辑部地址: 北京 9200 信箱 73 分箱 18 号, 邮编 100076  
· 编排格式(请登录本刊官网查看)

## 2017 年《宇航材料工艺》征订启事

《宇航材料工艺》(双月刊)创刊于 1971 年, 是经国家科委和国家新闻出版署批准出版的国家级技术类期刊, 中国科技论文统计用刊, 中国中文核心期刊, 已被国际宇航文摘(IAA)、美国化学文摘(CA)、金属文摘(METADEX)、《中国期刊网》、万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》等多种文摘和数据库收录。2002 年在第二届国家期刊奖评比活动中, 《宇航材料工艺》获百种重点期刊奖。

《宇航材料工艺》主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践, 内容丰富, 信息量大。除大量刊登学术类技术论文、研究报告、综述和专论外, 还刊登新材料、新工艺、新产品及技术改造、技术革新、生产经验、国外科技、科技见闻、成果简介及会议信息等。

刊号  $\frac{\text{ISSN1007-2330}}{\text{CN11-1824/V}}$

双月刊, 每期 20 元, 全年 6 期, 共 120 元/年 国外订价: 120 美元/年

帐户名称: 航天材料及工艺研究所 请注明: 订阅《宇航材料工艺》

开户银行: 北京市工商银行东高地支行

帐号: 0200006509008800374

邮汇: 北京 9200 信箱 73 分箱《宇航材料工艺》编辑部。 邮编: 100076

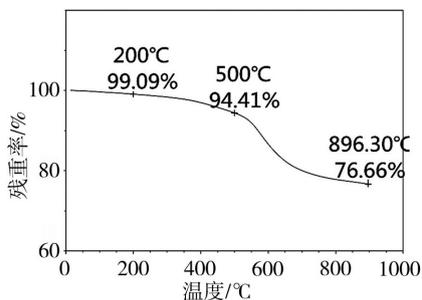
联系电话: (010)68383269 E-mail: rtao703@163.com

未收到订单的读者可信汇或直接邮汇至编辑部, 并将订户信息发至邮箱。订户信息需注明: 单位名称(开发票)、经办人及电话、订阅份数及汇款金额、汇款方式及日期、邮寄地址及邮编。

## 主要产品

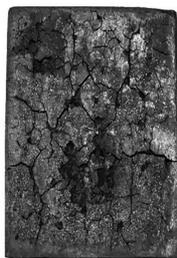
- 1 THC 系列热固性耐高温耐烧蚀洁净阻燃特种酚醛树脂
- 2 RFB 增韧且可调型热固性多功能树脂
- 3 D 系列低黏度多功能热固性特种树脂,用于复合材料的 RTM 成型工艺,灌封浇注等
- 4 R.RB.RBB 系列耐高温、耐烧蚀、阻燃、增韧多功能环氧固化剂
- 5 多功能溶液酚醛树脂
- 6 室温固化、中温固化三元体系耐高温、耐烧蚀、阻燃、增韧技术,用于轻质、隔热、耐烧蚀领域

**主要性能** 主链分解温度 550℃ 左右,900℃ 残碳率最高可达 77%。线烧蚀率为负值,氧指数 49,基本无烟无毒。具有强大的吸收中子射线功能,并对碳纤维等炭素材料具有优异的粘接性能。



低黏度 0226 的 TG 曲线

### 耐烧蚀涂层试片红外灯 500 s 烧蚀性能



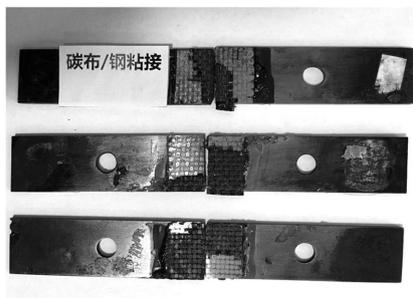
硬铝 4.3mm × 100mm × 100mm  
 涂层厚 8.30mm,背温 166.7℃  
 烧蚀后涂层膨胀 16.9%  
 失重 12.0%  
 热流量 660kW/m<sup>2</sup>

500 s 的红外灯烧蚀试片



THC-800 压制的复合材料烧蚀性能  
 1800℃, 40 s  
 线烧蚀率 -0.01 mm/s  
 质量烧蚀率 8~9 mg/s  
 1100℃, 80 s  
 线烧蚀率 1~3 μm/s  
 质量烧蚀率 2~3 mg/s

1800℃, 80 s, 40 s 的烧蚀试片



R 系列粘接碳布与钢的粘接试片  
(碳布破坏)



R 系列粘接橡胶与钢的试片  
(全部橡胶破坏)



粘接重型卡车的碳布同步器  
(500 万件/年 寿命超过国外同类产品)

已批量用于众多领域

欢迎合作! 深层次服务,有问必答!

地址:西安市阎良区国家航空基地蓝天路 5 号

电话/传真:029-88758316

网址:www.taihangchina.com

电子邮箱:shanxth@126.com

