

# 刀具材料对 CFRP 齿槽加工质量的影响

苏 飞<sup>1</sup> 袁军堂<sup>2</sup> 汪振华<sup>2</sup> 邓朝晖<sup>1</sup> 孙富建<sup>1</sup>

(1 湖南科技大学智能制造研究院,湘潭 411201)

(2 南京理工大学机械工程学院,南京 210094)

**文 摘** 采用硬质合金(YG6X)和PCD刀具分别对CFRP进行齿槽加工试验,探究刀具材料对齿槽加工质量的影响。结果表明:随着每齿进给量 $f_z$ 的增大,撕裂因子 $F_{sl}$ 呈明显的增大趋势;采用PCD铣刀铣制齿槽,其加工质量较为稳定,加工质量较理想。

**关键词** 碳纤维复合材料(CFRP),齿槽加工,加工质量,成型铣削

中图分类号:TQ327;V258+.3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.01.017

## Influence of Tool Materials on Machining Quality of CFRP Slots

SU Fei<sup>1</sup> YUAN Juntang<sup>2</sup> WANG Zhenhua<sup>2</sup> DENG Zhaohui<sup>1</sup> SUN Fujian<sup>1</sup>

(1 Intelligent Manufacturing Institute, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

**Abstract** A carbide slotting cutter and a PCD slotting cutter were used for the slotting of the carbon-cloth CFRP, respectively. Then, the effect of the tool material on the machining quality was studied. The delamination of the slot was increased as the feed per tooth increased. It showed that utilizing the PCD slotting cutter one would achieve a stable machining quality of the slots. And an ideal machining quality of the slots will be achieved.

**Key words** Carbon fiber-reinforced plastics(CFRP), Slotting, Machining quality, Forming milling

### 0 引言

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有比强度高、比模量大、可设计性强等优良特性,在航空航天等领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。由于CFRP的层间剪切和横向抗拉性能低,在机械加工过程中,碳纤维复合材料制品易产生毛刺、撕裂和层间分层等加工缺陷<sup>[4-5]</sup>。在碳纤维复合材料铣削加工方面,国内外专家学者做了较多研究。WOLF GANG等<sup>[6-7]</sup>研究了单向叠层CFRP不同纤维取向铣削加工缺陷,获得了缺陷的发生区、扩散区和无扩散区,并分析了碳布CFRP在纬向纤维取向为90°时的铣削加工缺陷,指出表层材料以单束纤维毛刺、分层的形式出现,而且,毛刺、分层与经、纬纤维编织结构及纤维的弯曲角度

相关;JAMAL等<sup>[8]</sup>采用多齿刃铣刀对碳布CFRP进行铣削试验,结果表明在高转速、低进给和细小切削厚度下能获得较好的加工质量;KARPAT等<sup>[9]</sup>使用两种不同的刀具对单向碳纤维复合材料进行铣削试验,研究了不同纤维取向下的切削力及其切削表面加工质量;YASHIRO等<sup>[10]</sup>采用3种测温法对CFRP的铣削温度进行分析,分析了切削温度对表面加工质量的影响规律,指出CFRP铣削应采用高速切削加工;AKIRA等<sup>[11]</sup>通过试验分析了立铣刀螺旋角对切削表面的影响规律;周井文等<sup>[12]</sup>通过铣削实验,分析了铣削加工缺陷的形成机制,指出纤维取向在0°~90°时出现崩边,在90°~180°时出现毛刺。

在碳纤维复合材料零部件的加工中,某些重要的

收稿日期:2017-04-21;修回日期:2017-10-11

基金项目:“十二五”国防预研课题(62201060402);博士启动基金(E56122)

第一作者简介:苏飞,1984年出生,博士,研究方向为先进制造工艺与装备。E-mail:sfeihe@163.com

通信作者:袁军堂,教授,博士生导师,研究方向为先进制造工艺与装备。E-mail:mc106@mail.njust.edu.cn

零部件需要切削大量的细小齿槽。在齿槽的切削过程中,同样存在较多缺陷,如最外层纤维出现大面积未被切除的现象、撕裂和分层缺陷等<sup>[13]</sup>。这些问题严重影响了此类零部件的加工质量和加工效率。目前,在碳纤维复合材料(CFRP)零部件上切削齿槽的相关研究仍鲜有报道。考虑到齿槽加工的实用性、易操作性,提出采用T型铣刀进行齿槽加工试验,对CFRP齿槽加工的切削质量进行研究。

## 1 试验方案

### 1.1 工件材料及刀具

实验所用的材料为碳布增强环氧树脂复合材料(T300/环氧树脂),其纤维直径为 $7\sim 8\ \mu\text{m}$ ,纤维体积分数为 $60\%\sim 65\%$ 。试件为 $120^\circ$ 圆弧棒状工件,外径 $D=120\ \text{mm}$ ,内径 $d=20\ \text{mm}$ ,厚度 $h=10\ \text{mm}$ ,如图1所示。

刀具为直柄钎焊硬质合金(YG6X)刀片和PCD刀片,简称T1和T2铣刀,刀齿的轮廓形状基本为梯形(刀具前角均为 $0^\circ$ ,后角均为 $11^\circ$ ,铣刀最大直径均为 $24\ \text{mm}$ ,刀柄直径均为 $180\ \text{mm}$ ,刀具长度均为 $73\ \text{mm}$ ),刀具实物和齿槽尺寸分别如图2所示。

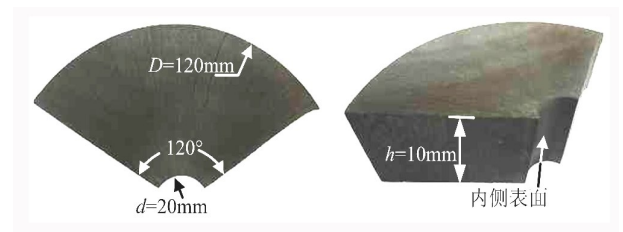


图1 工件形状

Fig.1 The shape of the part

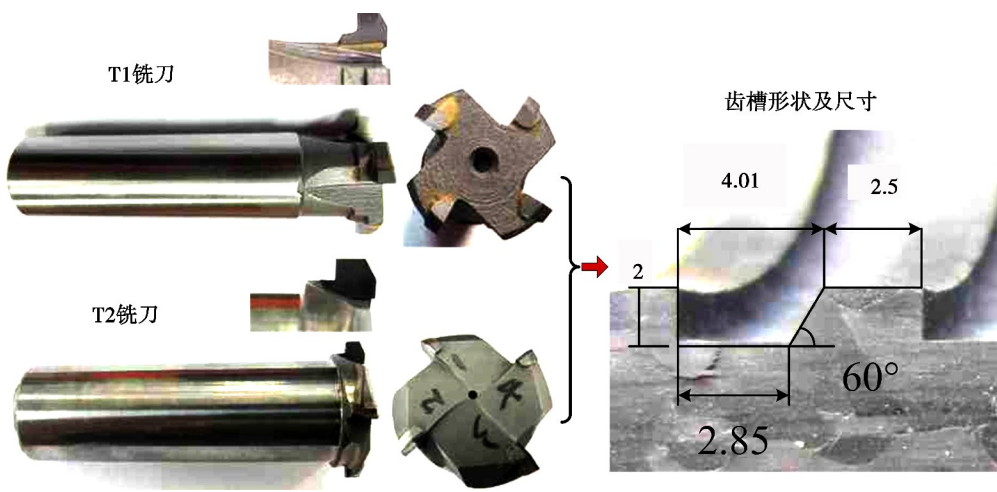


图2 刀具形状及齿形

Fig.2 The shapes of the cutters and the slots

### 1.2 试验方法

分别采用T1和T2铣刀对碳布CFRP进行齿槽加工试验。以切削速度 $V_c$ 和每齿进给量 $f_z$ 为变量进行单因素试验,切削速度 $V_c$ 在 $195\sim 345\ \text{m/min}$ 之间选取,间距为 $50\ \text{m/min}$ ;每齿进给量 $f_z$ 在 $0.011\ 3\sim$

$0.021\ 2\ \text{mm/tooth}$ 之间选取,间距为 $0.003\ 3\ \text{mm/tooth}$ 。试验均在KVC1050M立式加工中心上,采用无冷却方式进行对称铣削的齿槽加工试验,试验装置实物和工件装夹如图3所示。

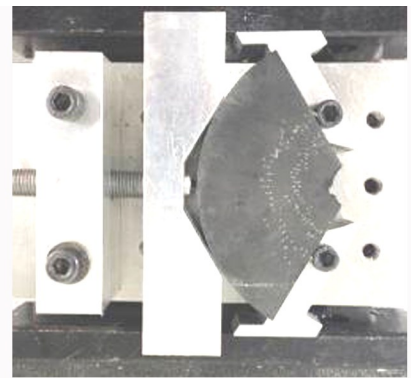


图3 试验装置和工件装夹

Fig.3 Experimental setup and clamp of workpieces

### 1.3 齿槽加工缺陷的评价方法

实践表明,在齿槽加工中出现分层、撕裂和外层

纤维未被切除等缺陷,其中齿槽切出侧最外层表面的撕裂缺陷最严重。因此,以撕裂因子  $F_{sl} = S_1$  来表征撕裂的情况 ( $S_1$  为齿槽切出侧最外层表面的撕裂面积,通过立体显微镜和图片处理软件测得),见图4。

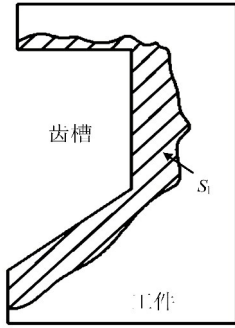


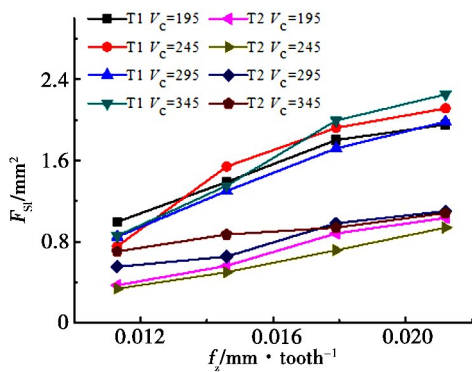
图4 齿槽撕裂因子

Fig.4 Delamination of the slot

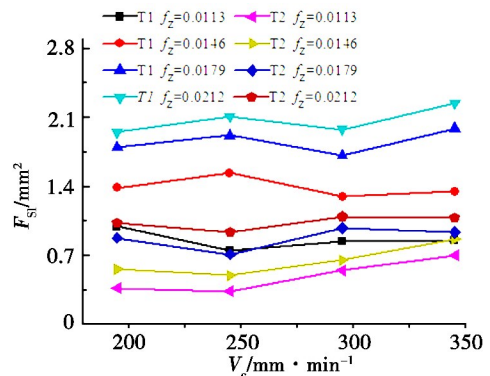
## 2 结果与分析

### 2.1 刀具材料对最外层表面加工质量的影响

分别采用 T1 和 T2 铣刀对碳布 CFRP 进行齿槽加工试验,并采用撕裂因子  $F_{sl}$  对齿槽最外层表面的加工质量进行表征,得到撕裂因子随每齿进给量  $f_z$  和切削速度  $v_c$  的变化曲线,如图5所示。由图5(a)可知,随着每齿进给量  $f_z$  的增大,撕裂因子  $F_{sl}$  呈明显的增大趋势。从图5(b)可见,随着切削速度  $v_c$  的增大,撕裂因子  $F_{sl}$  的变化趋势并不明显。此外,从图5(a)和(b)均可见,T1 铣刀的齿槽撕裂因子  $F_{sl}$  要明显高于 T2 铣刀的。图6(a)和(b)分别是采用 T1 和 T2 铣刀对平纹 CFRP 进行齿槽加工,所获得的齿槽切出侧最外层表面的加工形貌。



(a)  $F_{sl}$  与  $f_z$  的关系



(b)  $F_{sl}$  与  $v_c$  的关系

图5  $F_{sl}$  与  $f_z$  和  $v_c$  的相互关系

Fig.5 The relationship among  $F_{sl}$ ,  $f_z$  and  $v_c$



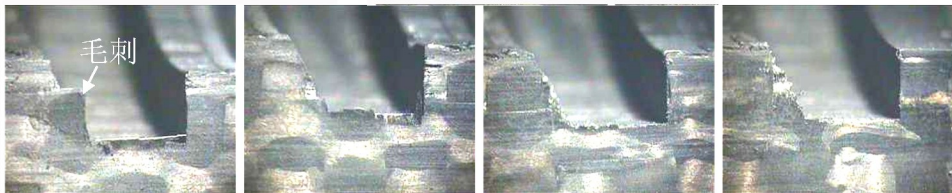
$f_z=0.0113$  mm/tooth

$f_z=0.0146$  mm/tooth

$f_z=0.0179$  mm/tooth

$f_z=0.0212$  mm/tooth

(a) T1铣刀齿槽出口侧表面



$f_z=0.0113$  mm/tooth

$f_z=0.0146$  mm/tooth

$f_z=0.0179$  mm/tooth

$f_z=0.0212$  mm/tooth

(b) T2铣刀齿槽出口侧表面

图6 齿槽最外层表面的加工质量 ( $v_c=295$  m/min)

Fig.6 Machining quality of the outermost layer of the slots

从图6可见,T1 铣刀齿槽切出侧最外层表面有较大的撕裂缺陷,其毛刺缺陷较小,且随着每齿进给

量  $f_z$  的增大,撕裂区域明显增大,与 T1 铣刀相比,T2 铣刀齿槽切出侧最外层表面的撕裂缺陷相对较小,但

残余纤维较为明显,同时,随着每齿进给量 $f_z$ 的增大,撕裂区域有增大趋势,残余纤维有减少趋势。

## 2.2 刀具材料对齿槽内侧切削表面微观形貌的影响

图7为T1及T2铣刀齿槽内侧加工表面的微观形貌。由图7(a)、(b)可见,采用T1铣刀铣制齿槽,其槽内侧加工表面存在大面积的树脂涂覆表面,有较明显的“凹坑”,且这些“凹坑”基本出现在经纬交织结构的界面上,随着进给速度的增大,这种“凹坑”有增大趋势。采用T2铣刀铣制齿槽,其槽内侧加工表面基本为树脂涂覆表面,切削表面较平整,没有明显的“凹坑”,而且随着进给速度的增大,其齿槽内侧的切削表面基本维持着这种特征。由此可见,采用T2铣刀铣制齿槽,其加工质量较为稳定,能获得较好的切削效果。

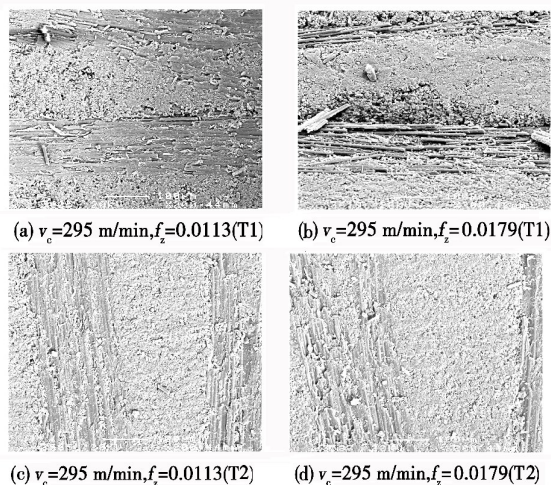


图7 齿槽内侧切削表面微观形貌

Fig.7 Cutting surface microstructure on the inside of the slots

## 3 结论

(1)随着每齿进给量 $f_z$ 的增大,撕裂因子 $F_{sl}$ 呈明显的增大趋势,而随着切削速度 $v_c$ 的增大,撕裂因子 $F_{sl}$ 的变化趋势不明显;

(2)采用YG6X铣刀铣制齿槽,齿槽切出侧最外层表面有较大的撕裂缺陷,而采用PCD铣刀铣制齿槽,齿槽切出侧最外层表面的撕裂缺陷相对较小;

(3)采用YG6X铣刀铣制的齿槽,其槽内侧切削表面存在较明显的“凹坑”,且随着进给速度的增大,“凹坑”有增大趋势。而采用PCD铣刀铣制的齿槽,其内侧切削表面基本被树脂涂覆,切削表面较平整,没有明显的“凹坑”,且随着进给速度的增大,切削表面质量较为稳定。

### 参考文献

[1] 陈燕,葛恩德,傅玉灿,等.碳纤维增强树脂基复合材

料制孔技术研究现状与展望[J].复合材料学报,2015,32(2):301-316.

[2] NORBERTO FEITO, ANTONIO DIAZ-ÁLVAREZ, CANTERO J L, et al. Experimental analysis of special tool geometries when drilling woven and multidirectional CFRPs[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016, 35(1): 33-55.

[3] GUO D M, WEN Q, GAO H, et al. Prediction of the cutting forces generated in the drilling of carbon fibre reinforced plastic composites using a twist drill[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(1): 28-42.

[4] XU Weixing, ZHANG Liangchi. Mechanics of fibre deformation and fracture in vibration-assisted cutting of unidirectional fibre-reinforced polymer composites[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 103: 40-52.

[5] LUO Bin, LI Yuan, ZHANG Kaifu, et al. A novel prediction model for thrust force and torque in drilling interface region of CFRP/Ti stacks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81: 1497-1508.

[6] WOLFGANG HINTZE, DIRK HARTMANN, CHRISTOPH SCHUTTE. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) an experimental study[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71: 1719-1725.

[7] WOLFGANG HINTZE, MARCEL CORDES, GREGOR KOERKEL. Influence of weave structure on delamination when milling CFRP[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 199-205.

[8] JAMAL SHEIKH-AHMAD, NEBU URBAN, HOSSEIN CHERAGHI. Machining damage in edge trimming of CFRP[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27: 802-808.

[9] YIIT KARPAT, ONUR BAHTIYAR, BURAK D E et al. Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 56: 79-93.

[10] TAKESHI YASHIRO, TAKAYUKI OGAWA, HIROYUKI SASAHARA. Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 70: 63-69.

[11] AKIRA HOSOKAWA, NAOYA HIROSE, TAKASHI UEDA, et al. High-quality machining of CFRP with high helix end mill[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63: 89-92.

[12] 周井文,陈燕,傅玉灿,等.纤维切削角对CFRP加工缺陷的影响规律[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(7):110-116.

[13] 苏飞,袁军堂,程寓.碳纤维增强复合材料T型齿槽加工缺陷的形成机制[J].复合材料学报,2014,31(5):1127-1133.