

# CFRP 旋刨刀几何结构设计及孔出口质量的分析

刘雪梅, 孙会来, 聂晓菊, 赵方方

天津工业大学

**摘要:** 为了提高碳纤维复合材料(CFRP)的制孔质量,对 CFRP 旋刨刀的几何结构进行设计。基于旋刨刀的前角为  $15^\circ$ ,利用有限元分析软件 ABAQUS 的 explicit 子模块,建立 CFRP 旋刨制孔的三维模型,分析仿真过程中的轴向力和孔的出口质量。在相同条件下进行钻削试验,记录钻削过程中的轴向力,观测孔的出口质量。试验和仿真结果吻合性良好,结合仿真和试验的结果,确定旋刨刀的后角为  $10^\circ$ 。

**关键词:** CFRP;有限元分析;旋刨刀;后角

**中图分类号:** TG61;TH161.3;TN249

**文献标志码:** A

## Analysis on Geometric Structure Design and Drilling Export Quality of CFRP Rotary Planer Cutter

Liu Xuemei, Sun Huilai, Nie Xiaojun, Zhao Fangfang

**Abstract:** In order to improve the drilling quality of carbon fiber composite material(CFRP), the geometric structure of CFRP rotary planer cutter is designed. With  $15^\circ$  rotary planer cutter's rake angle, the sub module is analyzed by using finite element analysis software ABAQUS, a three-dimensional model of the CFRP rotary planning drilling is established and the simulation and analysis in the process of axial force and drilling export quality are analyzed. Under the same conditions, the drilling experiments are carried out to record the axial force in drilling process and observe the drilling export quality. It is found that the results of experiment and simulation are in good agreement. According to the results of simulation and experiment, the rotary planer cutter's back angle is determined to be  $10^\circ$ .

**Keywords:** CFRP;finite element analysis;rotary planer cutter;back angle

## 1 引言

以碳为增强材料、树脂为基体的复合材料称为碳纤维复合材料(CFRP)。CFRP 具有极优越的物理性能和力学性能,广泛应用于航空、航天及汽车制造领域<sup>[1]</sup>。CFRP 的高比强度、高比模量、耐腐蚀和耐疲劳等优势,使其成为无人机减轻质量的最佳选择。目前,CFRP 在无人机总体结构上的应用占到了总质量的 60% - 80%,使机体质量减轻了 25% 以上<sup>[2]</sup>。

随着 CFRP 应用的范围扩大,对 CFRP 成型件的要求也越来越高,对二次加工的需求也越来越大。50% 的二次加工为钻孔,由于 CFRP 的层间剪切强度低、抗剥离性差等特点,制孔加工过程中常出现分层、毛刺和撕裂等缺陷,导致加工孔的报废率达到 60% 以上<sup>[3]</sup>。优化刀具几何结构和刀具材料,开发高质量、长寿命的制孔工具,成为解决 CFRP 高质量制孔的关键<sup>[4]</sup>。

后角主要对旋刨刀具的耐用度、CFRP 孔壁的

粗糙度和切削力产生影响,在已有旋刨刀具的基础上,利用 ABAQUS 建立 CFRP 旋刨制孔的三维模型,改变旋刨刀的后角并得到一个最佳值,之后进行钻削试验,测量钻削过程中的轴向力和孔的出口质量,确定旋刨刀的后角。

## 2 CFRP 层合板建模和参数设置

CFRP 层合板的建模类型为 3D - Solid - Deformable,尺寸为  $70\text{mm} \times 70\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。采用 Continuum Shell 为碳纤维复合材料层合板铺层,铺层形式为  $[0/90/0]_s$ ,铺层总数为 13 层。刀具和 CFRP 层合板的装配结构见图 1。

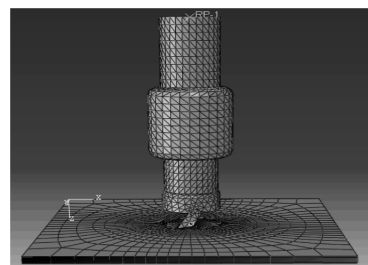


图 1 刀具和 CFRP 层合板装配

Continuum Shell 其实是三维单元,只是采用了

传统壳的本构模型,所以 ABAQUS 自带的三维 HASHIN 失效准则对于三维建模易损层仍然适用<sup>[5]</sup>,界面层采用 Cohesive 单元。力学性能参数见表 1,层合板的破坏强度参数见表 2, Cohesive 单元属性见表 3<sup>[6-9]</sup>。

表 1 碳纤维复合材料力学性能参数

$E_{11}$ (MPa)	$E_{22}$ (MPa)	$\nu_{12}$	$G_{12}$ (MPa)	$G_{13}$ (MPa)	$G_{23}$ (MPa)
13800	10500	0.3	6300	6300	3500

表 2 碳纤维复合材料破坏强度参数

$X_T$ (MPa)	$X_C$ (MPa)	$Y_T$ (MPa)	$Y_C$ (MPa)	$S_L$ (MPa)	$S_T$ (MPa)
2070	1360	86	196	102	90

表 3 Cohesive 单元属性

$K_{nn}$ (MPa)	$K_{ss} = K_{tt}$ (MPa)	$t_n$ (MPa)	$t_s = t_t$ (MPa)	$G_n$ (N/mm)	$G_s = G_t$ (N/mm)
2000	1500	60	90	0.287	1.833

### 3 CFRP 钻削过程仿真

根据工件加工表面的质量要求、切削层厚度和刀具强度,在不引起振动的情况下选取旋刨刀的后角分别为  $8^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $11^\circ$ 、 $12^\circ$  进行 ABAQUS 仿真。在 CFRP 钻削加工过程中产生的钻削力(特别是钻削轴向方向的力)直接影响制孔质量,所以在仿真过程中,主要通过测量钻削加工过程中的轴向力来判断 CFRP 的制孔质量。轴向力随时间的变化见图 2。

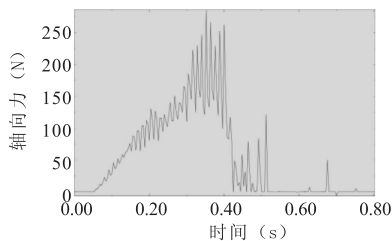


图 2 轴向力随时间的变化曲线

钻削仿真孔的出口质量见图 3。由图可知,当旋刨刀的后角为  $8^\circ$  时,孔出口处出现大量毛刺和啃边现象,孔周围的大量单元分层失效;后角为  $9^\circ$  时,孔周围出现少量毛刺;后角为  $10^\circ$  时,孔出口质量很好,几乎没有产生制孔缺陷;后角为  $11^\circ$  和  $12^\circ$  时,孔周围出现较多的毛刺。

### 4 制孔试验

选取刀具的前角  $15^\circ$  为定量,根据仿真结果,选取刀具的后角  $8^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $11^\circ$  和  $12^\circ$  作为试验变量。以碳纤维复合材料 T300 为试验材料,厚度为 2mm,

铺层形式为 13 层  $[0/90/0]$ 。试验证明,在主轴转速  $n = 5000\text{r}/\text{min}$ 、进给速度  $V_f = 150\text{mm}/\text{min}$  时,制孔质量最好,可以更好地避免碳纤维复合材料的制孔缺陷<sup>[10]</sup>。

试验主要依托汉川 XK714D 数控铣床和钻削力动态测量装置(见图 4),钻削力动态测量系统主要由 Kistle9257B 测力仪、5070A 型电荷放大器、5697A1 数据采集卡和微型计算机组成,计算机采用 Dyno Ware 软件对 X、Y、Z 三个方向的轴向力和力矩进行数据采集记录。

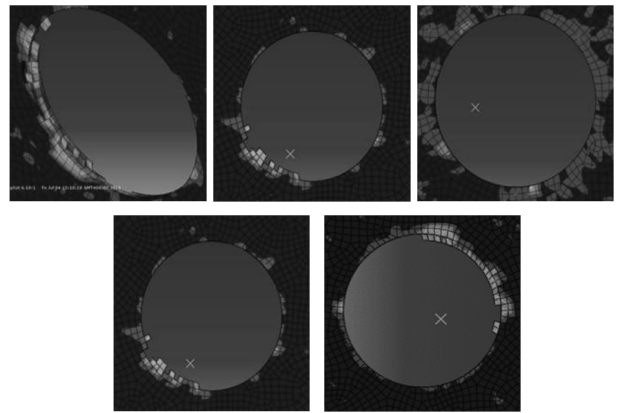


图 3 后角为  $8^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $11^\circ$ 、 $12^\circ$  时对孔出口质量的影响



图 4 数控铣床

#### (1) 仿真和试验过程轴向力的对比

在同等条件下进行制孔试验,通过测量制孔试验中的轴向力大小,使仿真的结果得到了极好的验证,仿真和试验轴向力结果的对比见图 5。

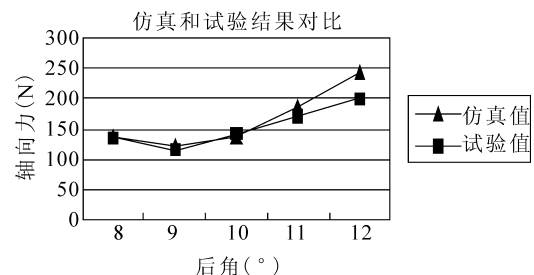


图 5 试验和仿真轴向力结果对比

从图 5 可知,试验和仿真结果有一定的偏差,这是因为在仿真过程中,刀具被设置成刚体而忽略了刀具的磨损量;其次是没考虑加工过程中温度对于

轴向力的影响。

## (2) 孔的出口质量

试验孔的出口质量随后角的变化见图6。由图可知,当旋刨刀的后角为 $8^{\circ}$ 时,孔出口处出现大量的制孔缺陷,如毛刺、啃边和分层等;后角为 $9^{\circ}$ 时,孔周围出现只出现了少量的毛刺、撕裂;后角为 $10^{\circ}$ 时,孔出口处几乎没有制孔缺陷,出口质量达到最好;后角为 $11^{\circ}$ 和 $12^{\circ}$ 时,孔周围出现较多撕裂与毛刺。

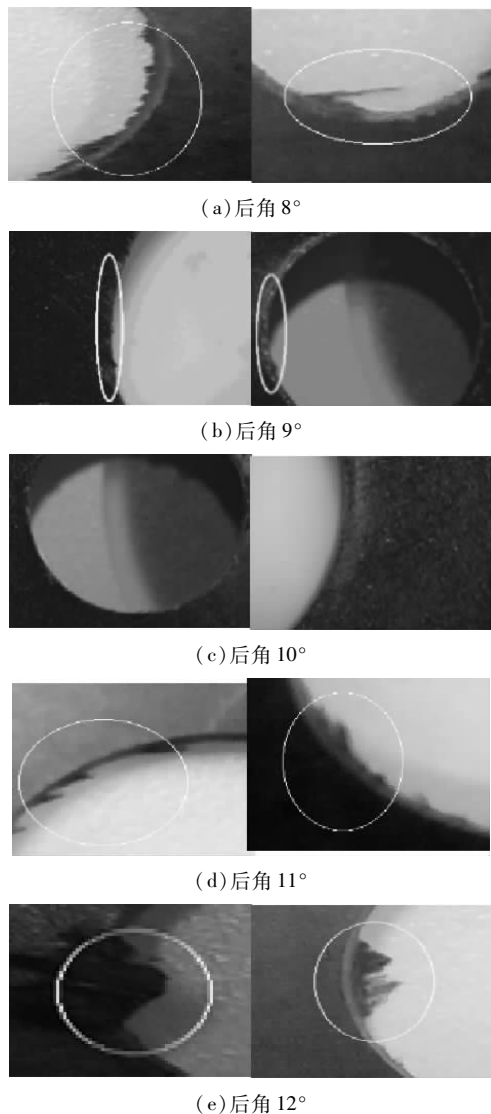


图6 孔出口质量随后角的变化

## 5 结语

(1) 利用 ABAQUS 有限元软件的显示分析模块,对 CFRP 旋刨制孔进行三维钻削仿真。通过改

变刀具的后角,得到了轴向力和孔出口质量随后角变化的规律:当后角临近或者等于 $10^{\circ}$ 时,轴向力达到最小,孔的出口质量也达到最好。

(2) 根据仿真结果,在相同条件下进行钻削试验,通过测量钻削过程中的轴向力和孔出口质量,发现仿真结果和试验结果吻合性良好,最终选取旋刨刀的后角为 $10^{\circ}$ 。

## 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] 赵凯,陈虹,张婧,等. 碳纤维复合材料在无人机上的应用[J]. 高科技纤维与应用,2015,40(4):39-43.
- [3] 魏威,韦红金. 碳纤维复合材料高质量制孔工艺[J]. 南京航空航天大学学报,2009,41(S1):295-296.
- [4] 张厚江. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究[D]. 北京:北京航空航天大学,1998.
- [5] 庄茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [6] Saeem M, Toubal L, Zitoune R, et al. Investigating the effect of machining processes on the mechanical behavior of composite plates with circular holes[J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing,2013,55(6):169-177.
- [7] Feito N, López-Puente J, Santiuste C, et al. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling[J]. Composite Structures,2014,108(1):677-683.
- [8] Ozden Isbilir, Elaheh Ghassemieh. Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites[J]. Composite Structures,2013,105(8):126-133.
- [9] T Vandellos, C Huchette, N Carrère. Proposition of a framework for the development of a cohesive zone model adapted to Carbon-Fiber Reinforced Plastic laminated composites[J]. Composite Structures,2013,105(105):199-206.
- [10] 孙会来,陈宁,于欣欣. 基于硬质合金开孔器对碳纤维复合材料的制孔[J]. 天津工业大学学报,2016,35(3):66-72.

第一作者:刘雪梅,硕士研究生,天津工业大学机械工程学院,300387 天津市

First Author: Liu Xuemei, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China