

# KFRP 复合材料螺旋铣削工艺制孔质量

刘思南<sup>1,2</sup> 杨涛<sup>1,2</sup> 杜宇<sup>2</sup> 刘畅<sup>2</sup> 巩文东<sup>2</sup>

(1 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

(2 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

**文 摘** 凯夫拉纤维增强复合材料(KFRP)在钻削过程中会产生严重的分层、起毛等缺陷,难以满足装配工序的要求。本文将螺旋铣削工艺运用于KFRP复合材料制孔,进行了偏心距、主轴转速和刀具类型的单因素试验,以分层因子、起毛面积和孔径偏差表征KFRP复合材料螺旋铣削的制孔质量,深入研究不同工况下的缺陷抑制机理和制孔质量。结果表明,偏心距、主轴转速和刀具结构对制孔质量均有显著影响,采用波形四刃铣刀在偏心距0.5 mm和主轴转速4 000 r/min 工况下的制孔质量最好,分层因子和孔径偏差分别为1.27和1.2%,起毛面积比二刃铣刀下降了13.7%。

**关键词** 螺旋铣削, KFRP 复合材料, 加工缺陷, 制孔质量

中图分类号: TB33

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.015

## Hole Quality During Orbital Drilling of KFRP Composites

LIU Sinan<sup>1,2</sup> YANG Tao<sup>1,2</sup> DU Yu<sup>2</sup> LIU Chang<sup>2</sup> GONG Wendong<sup>2</sup>

(1 Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tianjin 300387)

(2 School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387)

**Abstract** Delamination and fuzzing defects during drilling of KFRP composites are too severe to meet the requirements in assembling process. Therefore, orbital drilling is proposed to drill KFRP composites in this study. Single factor experiments are conducted to investigate the hole quality and inhabitation mechanisms in different working conditions. Delamination factor, fuzzing area and diameter deviation are presented to characterize the hole quality. The experimental results indicate that there are close influences of eccentricity, spindle speed and cutter geometry on hole quality. When four-flute end mill with waved edges is used, hole quality is the best in working condition of  $e = 0.5$  mm and  $N = 4\ 000$  r/min. The delamination factor and diameter deviation are 1.27 and 1.2% respectively, and reduction of fuzzing area from drilling with two-flute end mill is 13.7%.

**Key words** Orbital drilling, KFRP composite, Defect, Hole quality

### 0 引言

凯夫拉纤维增强复合材料(KFRP)因其模量高、韧性好、强度高特点在国防军工和航空航天领域得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而,复杂的多相结构、较差的热导率和较低的层间结合强度使其成为典型的难加工材料<sup>[3-4]</sup>。复合材料在装配过程中通常需要螺接或铆接,然而KFRP复合材料层合板进行制孔时,极易出现起毛、撕裂和分层等表面缺陷,加工和装配精度不仅难以保证,疲劳寿命和承载能力也会明显下

降<sup>[5-6]</sup>。

分层缺陷是由于刀具轴向切削力超过了层合板的层间结合强度,进而导致铺层间的破坏分离情况。凯夫拉纤维呈丝絮状残留并堆积于表面称之为起毛缺陷,是KFRP复合材料最显著的加工缺陷形式<sup>[7]</sup>。当刀具即将穿透材料时,出口处剩余的未切削纤维铺层与基体间发生层间剥离并被拉裂撕扯的现象称为撕裂缺陷。

钻削过程中,采用群钻、PCD钻头、套料钻等特

收稿日期:2017-08-14

基金项目:国家自然科学基金(11372220)

第一作者简介:刘思南,1986年出生,硕士,研究方向为复合材料成型技术与装备。E-mail: lsn0214@126.com

通信作者:杨涛,1970年出生,教授。E-mail: yangtao@tjpu.edu.cn

殊结构刀具能够有效抑制加工缺陷的产生<sup>[8-9]</sup>。通过建立不同结构刀具的临界轴向推力模型, Hocheng 和 Tsao 得出在钻削过程中群钻、套料钻等钻头的分层轴向力阈值更大, 从而抑制了分层缺陷的产生<sup>[10]</sup>。

为了提高制孔质量, 国内外研究人员开展了针对难加工材料的螺旋铣削工艺研究。螺旋铣削制孔具有表面质量高、切削力小等优点<sup>[11]</sup>。通过分析螺旋铣动力学, 相关学者建立了预测螺旋铣削时的切削力解析模型<sup>[12-13]</sup>。王奔等利用传统钻削和螺旋铣削两种工艺对 C/E 复合材料的制孔质量、切削温度和切削力进行了对比研究, 结果显示较低的切削温度是螺旋铣孔工艺抑制缺陷的重要因素<sup>[14]</sup>。对 CFRP 复合材料螺旋铣孔的切削参数进行正交试验, 主轴转速、进给量和切削深度等切削参数也会对切削力、制孔缺陷产生重要影响<sup>[15-16]</sup>。此外, 针对 CFRP/钛合金层叠材料, Brinksmeier 等进行了螺旋铣孔研究, 较低的切削力和切削温度能够有效改善难加工材料的制孔质量<sup>[17]</sup>。

然而, 制孔研究大多集中在 CFRP 复合材料及其层叠材料, 鲜见对 KFRP 复合材料的研究, 切削参数和刀具类型对制孔质量的影响尚不明晰。碳纤维较脆, 而芳纶纤维韧性较大。所以机加工中强韧而不易碎折, 可加工性不好, 是最难加工的材料之一, 在机加过程中经过一定的塑性变形才能断裂<sup>[18]</sup>, 因此, 研究 KFRP 复合材料螺旋铣削制孔具有重要意义。本文主要开展 KFRP 复合材料螺旋铣削工艺制孔质量研究。

## 1 试验

### 1.1 螺旋铣孔切削运动轨迹分析

螺旋铣孔是以铣削原理为基础进行制孔的加工方法, 由 3 种运动复合形成, 包括铣刀的自转、围绕孔轴向中心线的公转以及沿着试件厚度方向的进给运动, 如图 1 所示。至少确定刀具的主轴转速  $N$ 、轨道转速  $\omega$ 、轴向进给速度  $f$  以及偏心距  $e$  等 4 项切削参数, 才能进行一次完整的螺旋铣孔切削<sup>[19]</sup>。偏心距应满足:

$$e = \frac{D_h - D_m}{2} \quad (1)$$

式中,  $D_h$  为加工孔径,  $D_m$  为铣刀直径。

螺旋铣孔切削时, 切削刃上任一点的切削速度为:

$$v = 2N\pi R_c + 2\omega\pi e \quad (2)$$

式中,  $R_c$  为切削刃上任意一点至刀具中心的距离。

轴向切削深度可表示为:

$$a_p = f/\omega \quad (3)$$

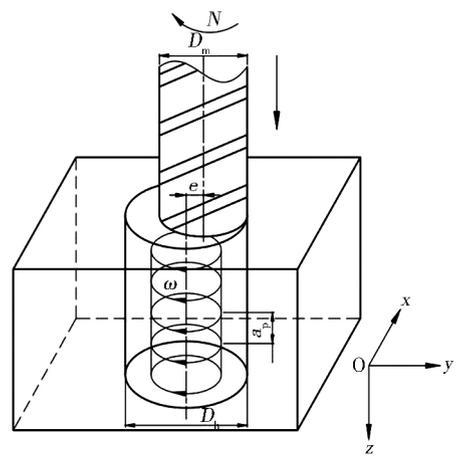


图 1 螺旋铣孔切削示意图

Fig.1 Schematic diagram of orbital drilling

### 1.2 试验设计

分别对偏心距、主轴转速和刀具类型进行单因素试验, 轴向切削深度和轴向进给速度分别固定在 1.0 mm/r 和 50 mm/min, 偏心距为 0.5 和 1 mm, 主轴转速分别为 4 000、5 000 和 6 000 r/min。每组切削参数下各螺旋铣孔 3 个。试验中分别采用二刃、三刃、四刃和波形四刃等 4 种整体硬质合金立铣刀进行螺旋铣孔, 刀具直径均为 4.0 mm。二刃、四刃和波形四刃铣刀均有 TiAlN 涂层; 而三刃铣刀的刃部无涂层, 刃口更为锋利; 波形四刃铣刀是在普通四刃铣刀的基础上改进而成, 将螺旋前刀面加工为波浪形螺旋面, 使之与后刀面相交成波浪形的切削刃。

### 1.3 试验条件

采用中航复合材料有限公司生产的凯夫拉纤维正交编织预浸料, 酚醛树脂基体含量为 38%。通过铺层及热压罐固化工艺制备为 KFRP 复合材料层板, 试件厚度为 4 mm。试验现场布置如图 2 所示, 试验平台为汉川 XK714D 型立式数控铣床。

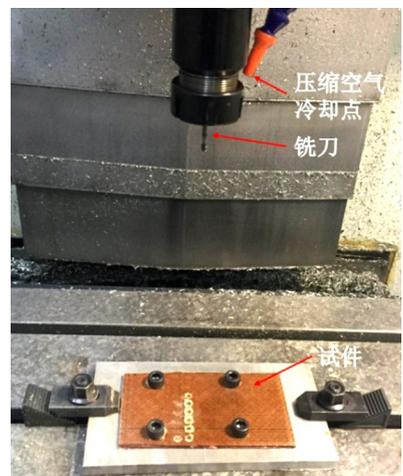


图 2 螺旋铣孔切削试验布置

Fig.2 Experimental setup

由于 KFRP 复合材料热导率较低而吸湿率较强, 不适宜喷淋冷却, 因此切削过程中通过吹扫压缩空气

进行冷却。试验人员在佩戴口罩的同时,利用吸尘器实时收集切屑,以减轻对呼吸系统的损害。

## 2 结果及讨论

### 2.1 制孔质量表征

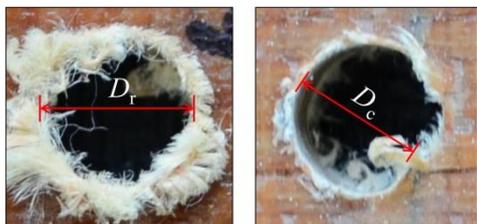
以分层因子、起毛面积和孔径偏差表征 KFRP 复合材料螺旋铣削工艺的制孔质量。如图 3(a) 所示,分层因子由  $D_f/D$  计算 ( $D_f$  为分层区域的最大直径,  $D$  为公称孔径)。KFRP 复合材料出口处分层区域有明显的颜色变化,易于视觉观测,因此采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测量  $D_f$ 。

由于残留的凯夫拉纤维呈丝絮状堆积于表面,形状不规则、长度不均匀,因此将其覆盖的面积定义为起毛面积以表征缺陷的严重程度。如图 3(b) 所示,利用图像分析软件 Image Pro Plus,将螺旋铣孔入口处的数码图像转换为二进制图像,能够获得起毛缺陷的面积。

孔径偏差则由  $D_r - D_c$  与  $D_r$  的比值来计算 ( $D_r$  为入口处直径,  $D_c$  为出口处直径)。图 3(c) 可见入口及出口处分别存在严重的起毛和撕裂缺陷,所需景深较大并遮挡了孔径,导致光学和电子显微镜无法进行有效成像,因此入口及出口处孔径均通过游标卡尺测量。为确保数据的准确性,在每组切削参数下各螺旋铣孔 3 个,每孔的分层因子、起毛面积和孔径偏差均被测量计算 3 次并取平均值,进而计算出相同切削参数下 3 个孔的平均值。



(a) 分层 (b) 起毛



(c) 孔径偏差

图 3 缺陷表征

Fig.3 Characterization of defects

### 2.2 偏心距

偏心距是螺旋铣孔工艺重要的切削参数,通过在合理范围内改变偏心距,同规格的刀具能够加工一系列的孔径。图 4 为采用二刃立铣刀以主轴转速 4 000 r/min 和不同偏心距切削时的制孔质量。图 5 表示偏心距对分层因子的影响。可以看出,偏心距 0.5

mm 时的出口处质量明显优于偏心距 1.0 mm,随着偏心距从 1.0 mm 降至 0.5 mm,分层因子由 1.36 降至 1.31。

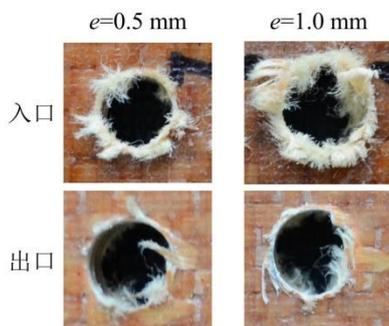


图 4 不同偏心距时的典型制孔质量

Fig.4 Hole quality with different eccentricities

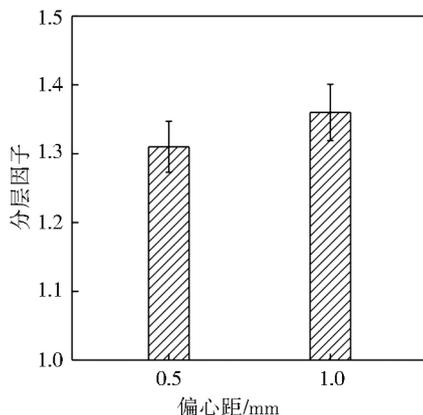


图 5 偏心距对分层因子的影响

Fig.5 Eccentricity influence on delamination factor

图 6 表示偏心距对起毛面积的影响,采用较大的偏心距切削时,大量凯夫拉纤维未能在切削刃的作用下发生剪切断裂,而是经过一定的塑性变形后发生拉伸或弯曲断裂,进而产生严重的起毛缺陷。与偏心距 1.0 mm 相比,偏心距 0.5 mm 时的入口处质量得到了显著提升,起毛面积下降了 55.3%。

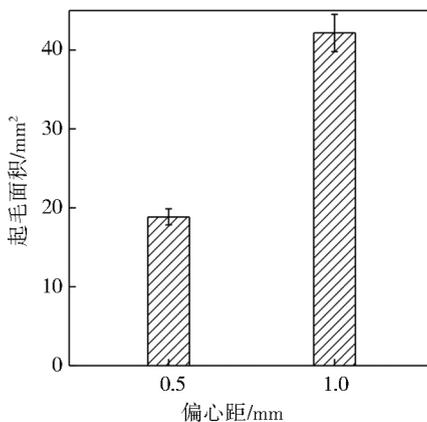


图 6 偏心距对起毛面积的影响

Fig.6 Eccentricity influence on fuzzing area

偏心距对孔径偏差的影响如图 7 所示,随着偏心距的增加,孔径偏差由 9.2% 升至 18.2%,偏心距 1.0 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 3 期

mm 时出口处已呈现明显的不规则形状。这是由于螺旋铣孔切削时,垂直于刀具轴向进给方向的切削力会导致铣刀发生弯曲变形,偏心距越大,弯曲变形越大,进而导致出口处明显的孔径偏差。

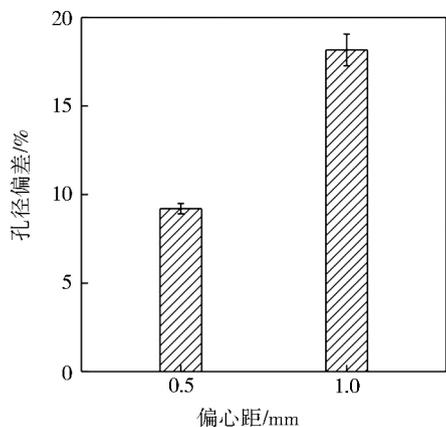


图7 偏心距对孔径偏差的影响

Fig.7 Eccentricity influence on diameter deviation

### 2.3 主轴转速

采用四刃立铣刀在偏心距 0.5 mm 的工况下,不同主轴转速时的制孔质量如图 8 所示。图 9 为主轴转速对分层因子的影响,分层因子随着主轴转速的增加而升高。主轴转速 6 000 r/min 时的出口处质量最差,分层和撕裂缺陷最严重,而主轴转速降至 4 000 r/min 时的制孔质量明显改善,分层因子下降了 7.4%。

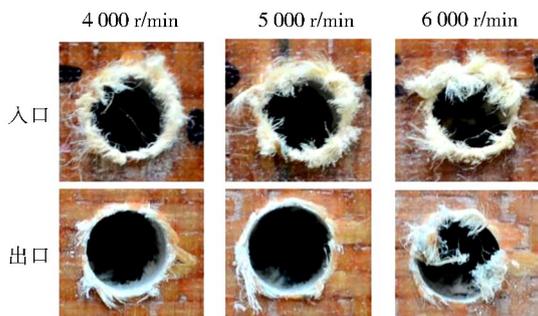


图8 不同主轴转速时的典型制孔质量

Fig.8 Hole quality with different spindle speeds

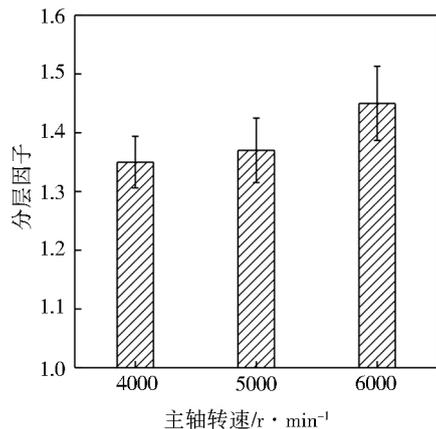


图9 主轴转速对分层因子的影响

Fig.9 Spindle speed influence on delamination factor

主轴转速对起毛缺陷的影响也呈现相同的趋势。如图 10 所示,主轴转速 4 000 r/min 时的起毛面积比 6 000 r/min 下降了 27.3%。切削过程中,纤维在树脂基体内有被压缩的趋势,加之凯夫拉纤维细密、拉伸强度高、韧性强<sup>[20]</sup>,难以在极短时间内被大量切断。因此在较高的主轴转速下,大量纤维没有被切削刃切断,而是在刀具的作用下发生了拉伸、挤压和弯曲变形,最终产生塑性断裂,残留在加工表面形成了严重的起毛缺陷。

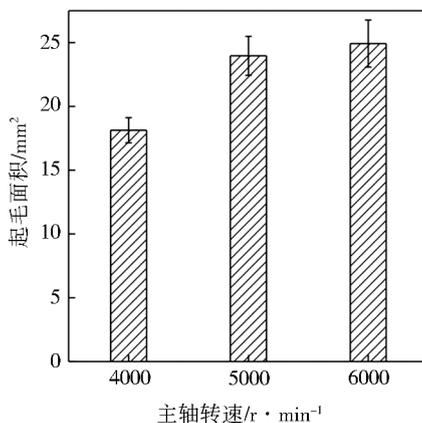


图10 主轴转速对起毛面积的影响

Fig.10 Spindle speed influence on fuzzing area

主轴转速对孔径偏差的影响如图 11 所示,虽然孔径偏差呈现随主轴转速的增加而升高的趋势,但均在 2% 上下浮动,增幅并不明显。

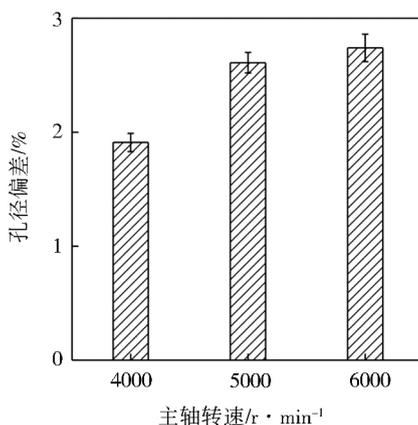


图11 主轴转速对孔径偏差的影响

Fig.11 Spindle speed influence on diameter deviation

### 2.4 刀具类型

在偏心距 0.5 mm 和主轴转速 4 000 r/min 的工况下,采用不同类型刀具时的制孔质量如图 12 所示。三刃铣刀的入口处质量最好,波形四刃铣刀次之,二刃和四刃铣刀的起毛缺陷更严重。而波形四刃铣刀的出口处质量最好,其余刀具的出口处均有明显的撕裂和分层缺陷。图 13 表示采用不同结构刀具螺旋铣孔时的分层因子,分层因子随着刀具刃数的增加而升高,而波形四刃铣刀的分层因子最小,仅为 1.27。

采用不同刀具类型切削的起毛面积如图 14 所示,三刃铣刀和波形四刃铣刀的起毛面积分别比二刃铣刀下降了 14.1%和 13.7%。主要原因是:三刃铣刀与二刃铣刀相比有更多的切削刃参与切削,每齿受到的切削抗力也有所减小;与四刃铣刀比较,更锋利的切削刃利于凯夫拉纤维剪切断裂,因此入口处质量最优。

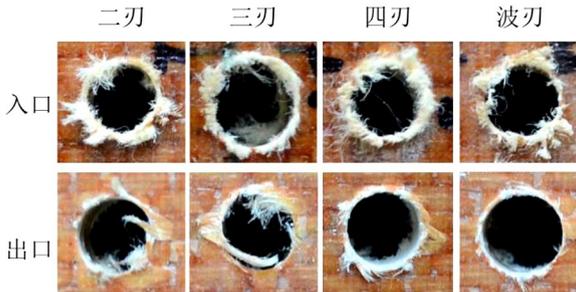


图 12 不同刀具类型时的典型制孔质量

Fig.12 Hole quality with different cutter geometries

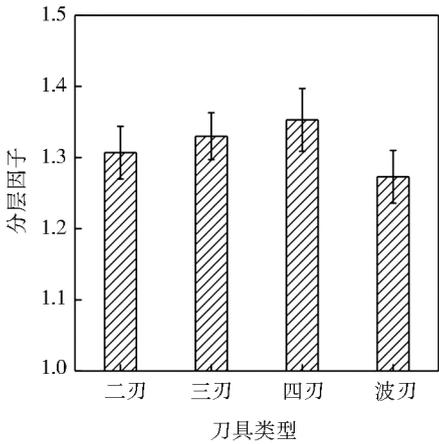


图 13 刀具类型对分层因子的影响

Fig.13 Cutter geometry influence on delamination factor

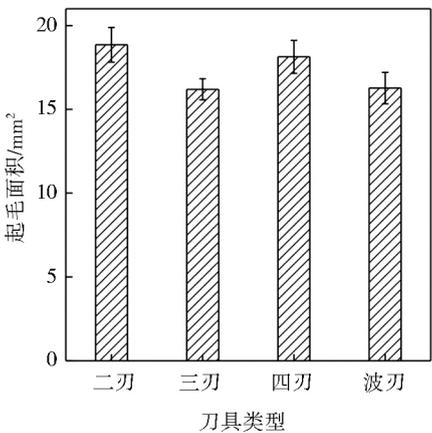


图 14 刀具类型对起毛面积的影响

Fig.14 Cutter geometry influence on fuzzing area

图 15 为刀具类型对孔径偏差的影响,波形四刃铣刀的孔径偏差最小,仅为 1.2%,而三刃铣刀切削的孔径偏差最大,达到 17.0%。由于三刃立铣刀的端面

中心有螺旋槽穿过,刃口未过刀具中心,当刀具切入材料时单边受力导致偏斜,因此在轴向进给过程中发生明显的裁刀现象,四刃铣刀因其刃口过中心,轴向进给过程更加稳定,所以孔径偏差较小。

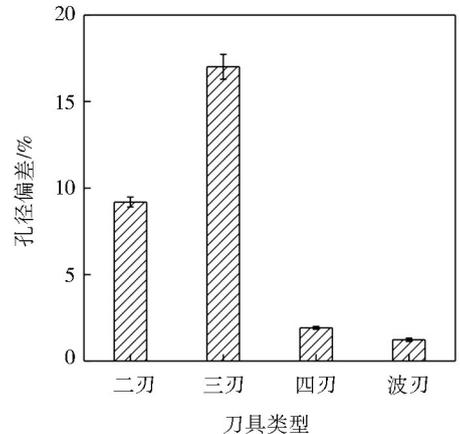


图 15 刀具类型对孔径偏差的影响

Fig.15 Cutter geometry influence on diameter deviation

因此,综合衡量分层因子、起毛面积和孔径偏差,波形四刃铣刀的制孔质量最好。主要原因是:波形刃铣刀属于粗加工刀具,与相同齿数的立铣刀相比其切削宽度显著减小,而切削刃的实际切削厚度增大,能够有效减少切削材料的变形程度,因此更适合 KFRP 复合材料的螺旋铣孔切削。

### 3 结论

(1) 随着偏心距的减小,分层因子、起毛面积和孔径偏差都随之降低,偏心距 0.5 mm 时的分层因子和起毛面积分别比 1.0 mm 时降低了 3.7%和 55.3%,孔径偏差由 18.2%降至 9.2%。因此,较小的偏心距能够有效抑制 KFRP 复合材料制孔缺陷。

(2) 由于凯夫拉纤维拉伸强度高、韧性好,在高主轴转速下,大量纤维难以被切断并发生塑性断裂。因此,分层因子、起毛面积和孔径偏差均随着主轴转速的升高而增加。主轴转速 4 000 r/min 时螺旋铣孔的质量最好,分层因子和起毛面积分别比 6 000 r/min 时降低了 7.4%和 27.3%。

(3) 三刃无涂层铣刀的入口处质量最好,但出口处缺陷严重,不适用于有轴向进给运动的螺旋铣孔切削。由于每齿受到的切削抗力随刃数的增加而减小,四刃铣刀的制孔质量优于二刃铣刀。波刃铣刀因其特殊的刃形,能够有效减少切削材料的变形程度。综合评定试验结果,在主轴转速 4 000 r/min 和偏心距 0.5 mm 的工况下,采用波形四刃铣刀的 KFRP 复合材料螺旋铣孔质量最好。

### 参考文献

[1] YE L, LU Y, SUZ, et al. Functionalized composite 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 3 期

structures for new generation airframes: a review[J]. Composites Science & Technology, 2005, 65(9):1436-1446.

[2] YILBAS B S, AKHTARS S. Laser cutting of Kevlar laminates and thermal stress formed at cutting sections[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2012, 50(2):204-209.

[3] KHASHABA U A, EL-KERAN A A. Drilling analysis of thin woven glass-fiber reinforced epoxy composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249:415 - 425.

[4] 郭丽. 高性能轻质装甲材料加工技术的研究[D]. 南京理工大学, 2006.

[5] 石文天, 刘汉良, 张加波, 等. 芳纶纤维复合材料切削加工缺陷研究[J]. 中国塑料, 2013, 27(4):71-74.

[6] PERSSON E, ERIKSSON I, ZACKRISSON L. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates[J]. Composites Part A, Applied Science & Manufacturing, 1997, 28(2):141-151.

[7] 庄原. 芳纶纤维复合材料切磨复合加工技术研究[D]. 大连理工大学, 2013.

[8] 刘汉良, 张加波, 王震, 等. 碳纤维与芳纶纤维复合材料机械加工刀具选用[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(4):95-98.

[9] DURÃO L M P, GONÇALVES D J S, TAVARES J M R S, et al. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates[J]. Composite Structures, 2010, 92(7):1545-1550.

[10] HOCHENG H, TSAO C C. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(12/13):1403-1416.

[11] DENKENA B, BOEHNKE D, DEGE J H. Helical

milling of CFRP-titanium layer compounds[J]. Cirp Journal of Manufacturing Science & Technology, 2008, 1(2):64-69.

[12] LIU C, WANG G, DARGUSCH M S. Modeling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(9-12):839-850.

[13] 王海艳. 难加工材料螺旋铣孔动力学研究[D]. 天津大学, 2012.

[14] 王奔, 高航, 毕铭智, 等. C/E 复合材料螺旋铣削制孔方法抑制缺陷产生的机理[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15):173-181.

[15] 刘刚, 张恒, 王亚飞, 等. 碳纤维增强复合材料螺旋铣孔切削力及加工质量研究[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5):1292-1299.

[16] 张硕, 胡永祥, 姚振强. 碳纤维复合材料螺旋铣孔出口缺陷试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014, (6):8-11.

[17] BRINKSMEIER E, FANGMANN S, RENTSCH R. Drilling of composites and resulting surface integrity[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(1):57-60.

[18] WAN Y Z, CHEN G C, HUANGY, et al. Characterization of three-dimensional braided carbon/Kevlar hybrid composites for orthopedic usage[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 398(1/2):227-232.

[19] 秦旭达, 陈仕茂, 刘伟成, 等. 螺旋铣孔技术在航空制造装配业中的发展应用[J]. 航空制造技术, 2009, (6):58-60.

[20] 靳晓丽. 轻质特种防护材料加工技术的研究[D]. 南京理工大学, 2004.