

# 双锋角钻头钻削碳纤维增强树脂基复合材料研究

刘洋 李鹏南 陈明 邱新义 胡立湘

(湖南科技大学机电工程学院,湘潭 411201)

**文 摘** 采用双锋角钻头和普通麻花钻对 T700 碳纤维复合材料(CFRP)进行钻削试验,从钻削轴向力、制孔出口质量和表面粗糙度等方面分析双锋角钻头在不同加工参数下制孔特点,并与普通麻花钻进行对比。试验结果表明:与普通麻花钻对比,双锋角钻头钻削 CFRP 时钻削轴向力减小约 20%,制孔出口质量更好,孔壁的表面粗糙度值减小,体现优异的切削性能更适合 CFRP 的制孔加工。

**关键词** 双锋角钻头,CFRP,钻削轴向力,出口质量,孔壁表面粗糙度

中图分类号: TG52

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.06.012

## Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics With Double Cone Drill

LIU Yang LI Pengnan CHEN Ming QIU Xinyi HU Lixiang

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

**Abstract** The double cone drill and twist drill were used to drill T700 carbon fiber reinforced plastics (CFRP). The drilling axial force, hole exit quality and surface roughness were used to analysis the double cone drill hole making features under different processing parameters. Compared with carbide twist drill, the double cone drill performed excellent cutting performance because of its drilling axial force reduced by about 20%, the hole exit quality is better, and the hole surface roughness is smaller. So, the double cone drill is more suitable for drilling CFRP.

**Key words** Double cone drill, CFRP, Drilling axial force, Hole exit quality, Surface rough degree

### 0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有高强度、高阻尼等优异的性能,有显著的各向异性,沿纤维轴方向表现出很高的强度,在航空航天工业等领域应用广泛,CFRP 制孔是航空工业复合结构装配过程一项常见而重要的加工工艺<sup>[1]</sup>。CFRP 的难加工,钻削制孔是 CFRP 料制造过程中最繁重的机械加工工序之一,制孔合格率直接关系到产品的质量的生产周期<sup>[2]</sup>。国内外的学者研究发现钻削 CFRP 分层等制孔缺陷与钻削轴向力密切相关,减小轴向力可以有效减低出口分层缺陷的发生<sup>[3-4]</sup>。张厚江等<sup>[5]</sup>提出选择合适的加工参数可降低钻削轴向力从而达到孔出口无撕裂现象,进一步选择合适的钻头刃形,则更容易达到孔出口无撕裂的目标。目前国内外不少研究者通过改变刀具结构来提高制孔质量。Velayudham

和 Krishnamurthy<sup>[6]</sup>采用三种不同刃形的钻头进行了钻削试验。其中硬质合金三尖钻的孔的出、入口缺陷和分层最小,由于特殊的三尖结构导致中心部分没有切削刃,相当于是一个点,确保了钻孔的定位。鲍永杰等<sup>[7]</sup>对电镀金刚石钻头钻削 C/E 复合材料进行了研究,其研究表明电镀金刚石钻头的加工孔的质量较好,钻削轴向力降低了 30% - 50%,更适合于 C/E 复合材料的加工。张鹏等<sup>[8]</sup>针对 CFRP 加工大深度不贯通的方孔,提出来先钻后磨专用的加工工艺。贺虎等<sup>[9]</sup>对钎焊金刚石套料钻削 CFRP 进行了研究,结果表明,采用钎焊金刚石套料钻加工 CFRP 钻削轴向力减小,加工质量也得到了改善。王震等<sup>[10]</sup>采用 PCD 涂层钻头钻削和 PCD 铣刀铣削方式对 CFRP 进行加工,试验结果表明 PCD 铣刀铣削制孔质量好于 PCD 涂层钻头钻削制孔。关于双锋角钻头钻削

收稿日期:2015-08-03

基金项目:国家自然科学基金(51275168);国家科技重大专项资助(2012ZX04003031)

作者简介:刘洋,1990 年出生,硕士研究生,主要从事碳纤维复合材料制孔技术研究工作。E-mail: 18711346265@163.com

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 6 期

CFRP 的相关研究较少。

本文针对 CFRP-T700 材料加工特点,以双锋角钻头为研究对象并与普通麻花钻进行对比,分别对钻削轴向力、制孔出口质量和孔壁粗糙度等方面的特点进行分析。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料与设备

采用 CFRP 板为试验材料,进行钻削试验研究。该 CFRP 的基体材料为 LT-03A 型环氧树脂,增强材料为 T700 型碳纤维,纤维体积含量为 60%。材料规格为 200 mm×300 mm,厚度为 3 mm。

钻削试验在钻削试验平台进行。该试验平台由 KVC800/1 立式加工中心、夹具、计算机、吸尘器和钻削轴向力测量系统组成。如图 1 所示钻削轴向力测

量系统包括 5080 型电荷放大器、PCIM-DAS1602/16 数据采集卡、kistler 9253B23 三向压电式测力仪和切削力采集软件 Dyno Ware。根据 HB/Z223. 21—2003,飞机装配工艺第 21 部分:复合材料的铆接,在碳纤维构建上钻孔时,应在出口面加垫板夹紧,可以很好预防出口出现撕裂、分层等缺陷<sup>[11]</sup>。因此本次试验采用 CFRP 材料板下加了硬质塑料垫板对 CFRP 最外层起到很好的支撑作用,来提高孔出口的质量。孔的出口形貌采用超景深三维显微系统型号为 KEY-ENCE VHX-500FE 进行检测。孔壁表面粗糙度的测量和评定采用德国 Mahr 公司的 Mar Surf M 300 表面结构测量仪,属于便携型表面结构测量仪,最大测量范围为 350 μm(-200 ~ +150 μm)。

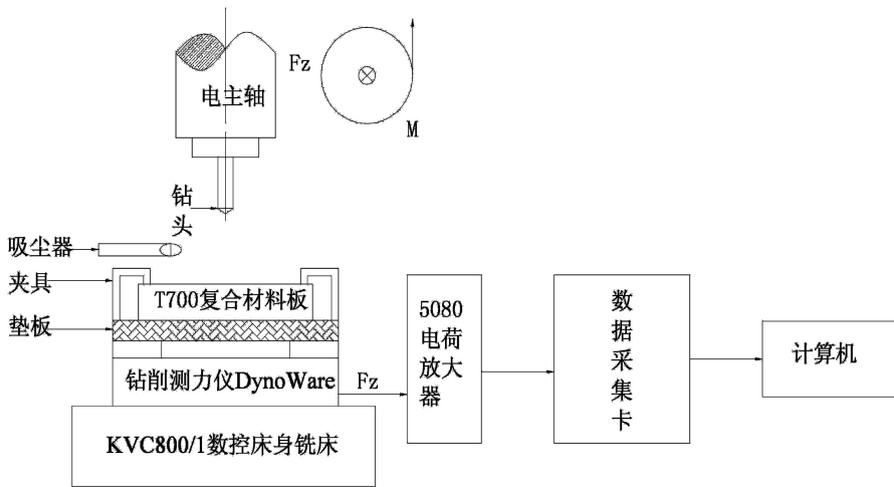
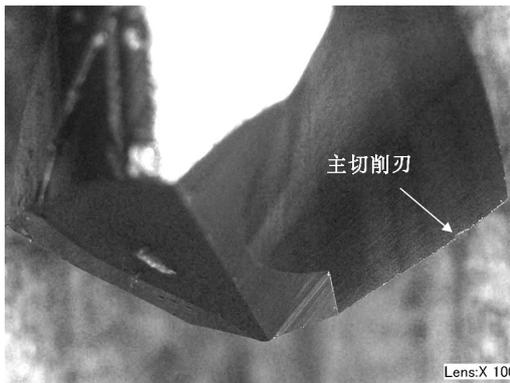


图 1 钻削轴向力测试系统

Fig. 1 Testing system of drilling axial force

图 2 所示试验所用钻头形貌,采用牌号为 ST12F,直径为 6 mm 超细晶硬质合金棒料,在 ANCA-RX7 五轴磨床自行精磨出的钻头。双锋角钻头第二主切削刃( $L_2$ )与第一主切削刃( $L_1$ )之比为 1,试验

所用的两种钻头其他各刀具几何角度参数都相同,两种钻头横刃均采用了齿隙修磨来控制更短的横刃长度。两种钻头具体的刀具几何角度参数见表 1。



(a) 普通麻花钻



(b) 双锋角钻头

图 2 钻头形貌

Fig. 2 Morphology of the drill  
宇航材料工艺

表1 刀具几何角度参数

Tab.1 Geometric parameters of cutting tools

刀具	直径 /mm	顶角 $2\alpha$ /( $^{\circ}$ )	顶角 $2\beta$ /( $^{\circ}$ )	横刃长度 /mm	螺旋角 /( $^{\circ}$ )	第二切削刃/ 第一切削刃
双锋角钻头	6	120	70	0.153	35	1
普通麻花钻	6	120	0	0.153	35	

## 1.2 方法

钻削试验采用全因子试验进行设计,选取进给速度  $f=50,70,90,110,130,150$  mm/min,主轴转速  $n=4\ 000,4\ 500,5\ 000,5\ 500$  r/min 对 CFRP 进行钻削。

## 2 结果与分析

### 2.1 钻削轴向力

图3和图4分别为双锋角钻头和普通麻花钻在转速4 000 r/min、进给速度70 mm/min时实际钻削轴向力随时间变化曲线。双锋角钻头是在普通麻花钻基础上改变主切削刃的刃形,实际钻削轴向力随时间变化曲线和普通麻花钻存在差别。

图3为双锋角钻头钻削CFRP过程示意图,垫板为硬质塑料垫板。

A阶段为还未开始进行钻削加工,钻削轴向力为0。

A-B阶段为钻头横刃进行钻削加工钻削轴向力急剧增加,轴向力增加速率最快阶段。

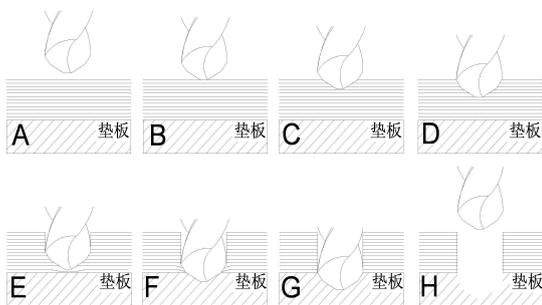


图3 双锋角钻头转速4 000 r/min 进给速度70 mm/min 钻削力随时间变化关系曲线

Fig.3 Diagram of drilling axial force variation with time for double cone angle drill ( $n=4\ 000$  r/min,  $f=70$  mm/min)

图4为普通麻花钻钻削CFRP过程示意图,垫板为硬质塑料垫板。

A-B阶段与双锋角麻花钻相同,横刃进行制孔加工,钻削轴向力急剧增大。

B-C阶段为主切削刃进行制孔加工,切削体积增加轴向力增加,增加的速率比A-B阶段横刃作用速率低。主切削刃全部钻入CFRP时轴向力达到最大值。

B-C阶段为第一主切削刃进行钻削加工,钻削轴向力随着第一切削刃切入,切削体积增加,轴向力增加,增加的速率比A-B阶段横刃作用时增加速率低一些。

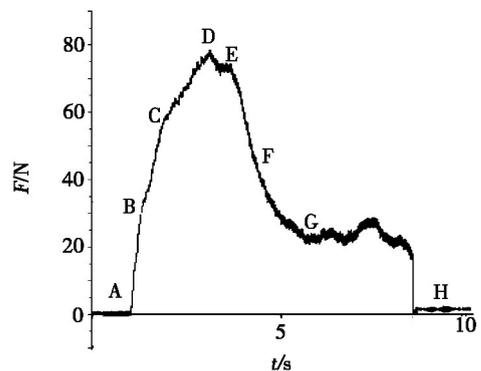
C-D阶段为钻头第二主切削刃进行钻削加工,钻削轴向力呈增加趋势,由于第二顶角减小,减薄外刃的切削厚度,钻削轴向力的增加速率比B-C阶段第一主切削刃作用增加速率低,第二切削刃全部钻入被加工材料时钻削轴向力达到最大值。

D-E阶段钻头切削刃都在作用于CFRP材料中,由于被加工材料CFRP未切削厚度变得越来越薄,层间承载能力下降,克服碳纤维和环氧树脂层弹性变形的抗力减小,因此钻削轴向力呈的减小趋势。此阶段持续时间的长短由CFRP板的厚度、切削刃垂直长度和进给速度的大小而决定。

E-F阶段为钻头横刃和第一主切削刃钻出CFRP材料,由于横刃和第一主切削刃钻出了CFRP材料,切削体积减小,钻削轴向力急剧降低。

F-G阶段为钻头第二主切削刃钻出CFRP材料,钻削轴向力呈减小的趋势且减小的速率降低,双锋角钻头主切削刃完成CFRP制孔过程。

G-H阶段为钻头作用于垫板,随着切削刃的钻入钻削轴向力比较平稳。H点钻头退刀,钻削轴向力突变为0。



C-D阶段与双锋角钻头D-E阶段相似,由于普通麻花钻的主切削刃垂直高度比双锋角钻头短,因此普通麻花钻在此阶段持续时间比双锋角钻头长一些。

D-E阶段为钻头横刃和主切削刃钻出CFRP材料,钻削轴向力急剧下降。

E-F阶段与双锋角钻头G-H阶段相似。由于不同的切削刃刃形导致钻削硬质塑料垫板力的变化规律有一定差异,F点钻头退刀,钻削轴向力突变为0。

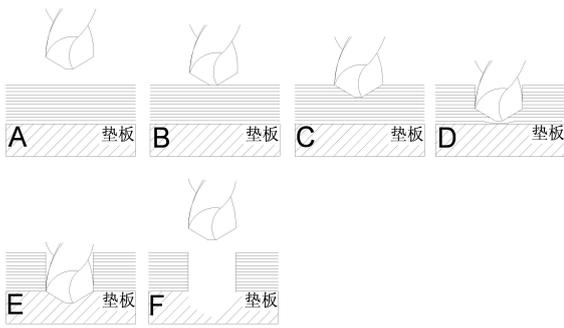


图4 普通麻花钻转速4 000 r/min 进给速度70 mm/min 钻削力随时间变化关系曲线

Fig.4 Diagram of drilling axial force variation with time for twist drill ( $n=4\,000\text{ r/min}$ ,  $f=70\text{ mm/min}$ )

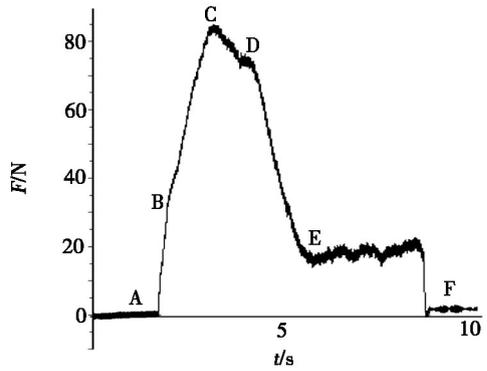
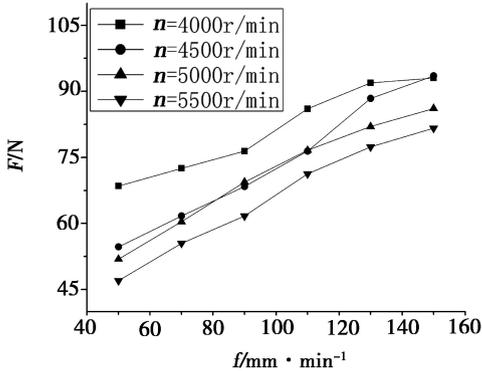
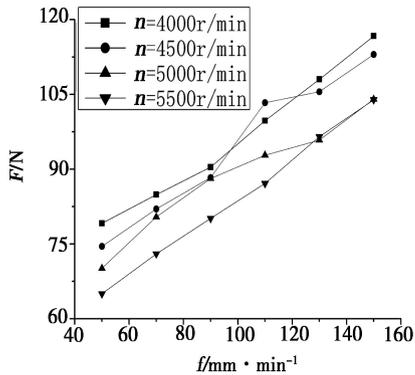


图5 所示为两种钻头主轴转速  $n$ 、进给速度  $f$  与轴向力之间  $F$  的关系曲线。



(a) 双锋角钻头



(b) 普通麻花钻

图5 主轴转速、进给速度与轴向力的关系

Fig.5 Curves indicating relationship between rotational speed, feed rate and axial force

由图5可见,双锋角钻头和普通麻花钻钻削CFRP材料 $n$ 、 $f$ 与 $F$ 的线性关系基本相同。在相同转速下,随着进给速度的增加,每转的切削深度增大,钻头每转一圈切除的材料体积增加,克服CFRP的钻削阻力也随着增大,从而导致钻削轴向力明显增加。进给速度不变的情况下,随着主轴转速的增加,每转切削厚度减小,钻头后刀面摩擦力减小,因此轴向力呈减小的趋势。图5(a)可见双锋角钻头在进给速度50、

70、90、110、130和150 mm/min情况下主轴转速4 000 r/min增加到5 500 r/min时轴向力分别减小21、17、15、14、14、11 N,可见双锋角钻头在进给速度越大时,改变主轴转速对轴向力的影响幅度越小。在主轴转速为4 000、4 500、5 000和5 500 r/min情况下进给速度50 mm/min增加到150 mm/min时轴向力分别增加了26、39、34、35 N。由图5(b)可见普通麻花钻在进给速度50、70、90、110、130和150 mm/min情况下主轴转速4 000 r/min增加到5 500 r/min时轴向力分别减小了14、12、10、12、12、13 N。主轴转速4 000、4 500、5 000和5 500 r/min情况下进给速度50 mm/min增加到150 mm/min时轴向力分别增加了37、38、34、39 N。表明采用双锋角钻头和普通麻花钻钻削CFRP时,加工参数变化对改变轴向力的幅度大小可知,进给速度对钻削轴向力的影响大于主轴转速对轴向力的影响。

图6为两种钻头不同加工参数下钻削轴向力的对比图。由图可见,在相同的加工参数条件下,双锋角钻头钻削CFRP产生的钻削轴向力约比普通麻花钻钻削轴向力小20%,这是由于双锋角钻头双主切削刃加工特点,根据公式(1)(2)可知主切削刃的切削厚度与进给速度和顶角成线性关系,如图7所示第二主切削刃顶角 $\beta$ 减小,减薄第二主切削刃 $t_{AB}$ 的切削厚度,因此双锋角钻头第二主切削刃产生的钻削轴向力分力 $F_{z2}$ 减小。且加大外缘转点的刃尖角,提高了切削刃外缘转点处的强度,使单位长度负荷降低。对主轴转速5 500 r/min下进行具体分析,与普通麻花钻对比,双锋角钻头在进给速度50、70、90、110、130和150 mm/min时钻削轴向力降低了27.7%、24.0%、22.9%、18.3%、19.8%、21.5%。

$$t_{OA} = (f/2) \sin\alpha \quad (1)$$

$$t_{AB} = (f/2) \sin\beta \quad (2)$$

式中, $t_{OA}$ 第一切削刃的切削厚度, $t_{AB}$ 第二切削刃的切削厚度, $f$ 实际加工进给速度, $\alpha$ 第一顶角, $\beta$ 第二顶角。

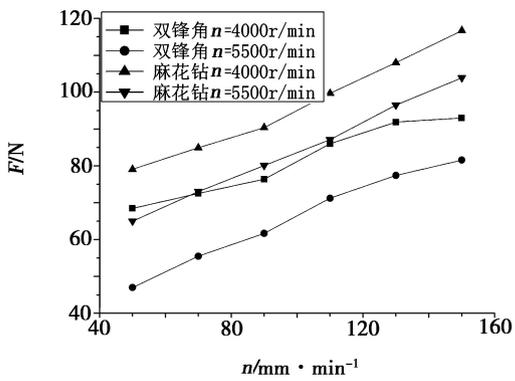


图6 两种钻头加工参数与钻削力的关系对比

Fig. 6 Comparison of the drilling thrust between two drills

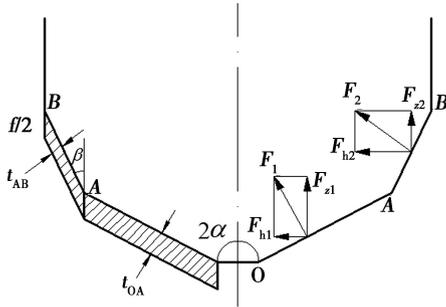
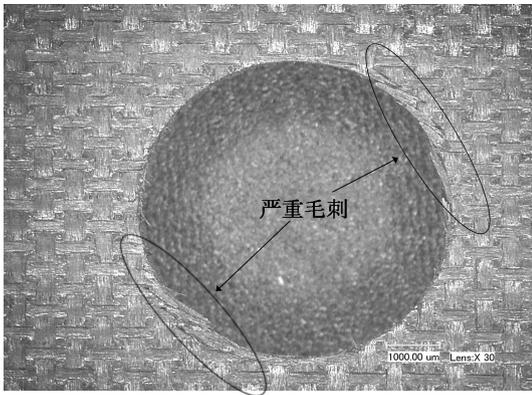
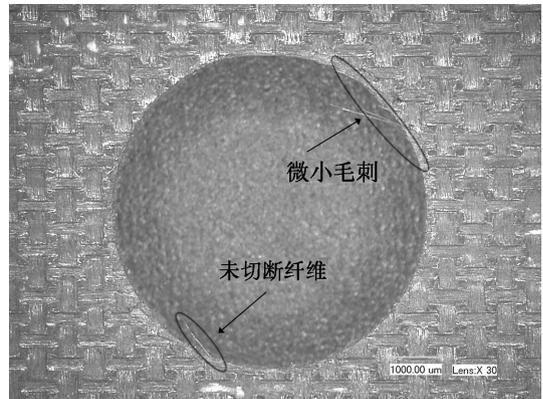


图7 双锋角钻头结构示意图

Fig. 7 Double cone angle drill geometry



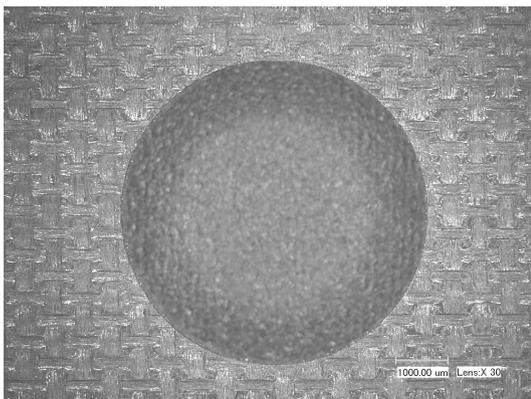
(a) 主轴转速 4 000r/min、进给速度 150 mm/min



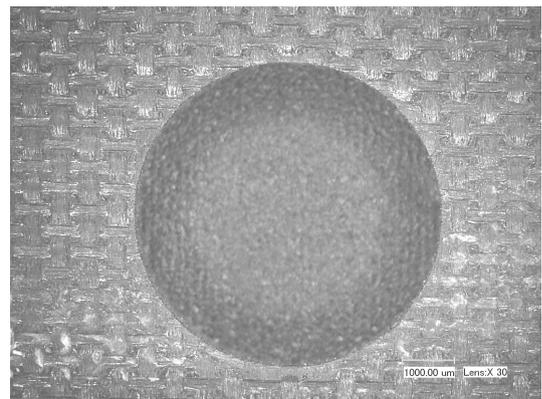
(b) 主轴转速 5 500r/min、进给速度 50 mm/min

图8 普通麻花钻钻削 CFRP 出口形貌

Fig. 8 Morphology of exit drill CFRP by twist drill



(a) 主轴转速 4 000r/min、进给速度 150 mm/min



(b) 主轴转速 5 500 r/min、进给速度 50 mm/min

图9 双锋角钻头钻削 CFRP 出口形貌

Fig. 9 Morphology of exit drill CFRP by double cone angle drill

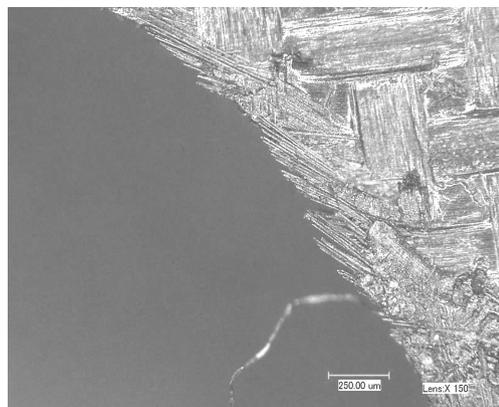
## 2.2 出口质量

试验所用两种钻头钻削 CFRP 时孔入口质量都很好,未出现撕裂等缺陷。出口分层损伤是加工复合材料最重要的缺陷之一,由于分层是不可修复的,因出口分层损伤造成在航空制造领域的报废率高达 60% 以上<sup>[12]</sup>。因此本文针对两种钻头钻削 CFRP 的出口质量进行对比分析。

图 8(a)可见在主轴转速 4 000 r/min、进给速度 150 mm/min 条件下,普通麻花钻出口出现了明显的毛刺、啃边和碳纤维未被切断现象,出口毛刺现象严重可以明显看到分层现象产生,加工质量非常不理想。图 8(b)为主轴转速 5 500 r/min、进给速度 50 mm/min 加工参数下钻削 CFRP 的出口形貌图,对比图 8(a)孔的毛刺现象明显减小,可见提高主轴转速和减小进给速度有利于提高钻孔质量。

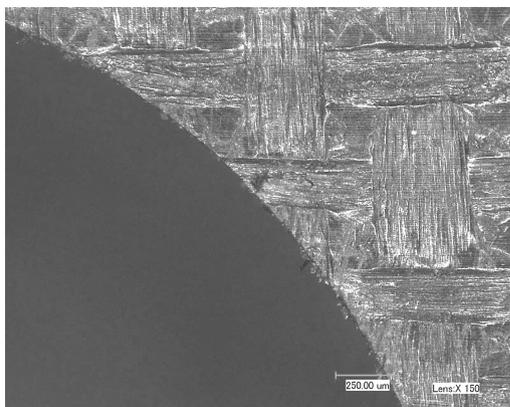
图 9 为双锋角钻头在主轴转速 4 000 r/min、进给速度 150 mm/min 和主轴转速 5 500 r/min、进给速度 50 mm/min 加工参数下钻削 CFRP 的出口形貌图。

如图9可见,在相同的加工参数下双锋角钻头钻削 CFRP 的出口质量明显好于普通麻花钻。双锋角钻头的出口形貌光滑、整齐未出现毛刺和撕裂等缺陷,实现了出口无撕裂现象的目标。这主要原因是双锋角钻头双主切削刃加工特点,在钻削 CFRP 出口的过程中,双锋角钻头第二主切削刃的顶角减小,降低了出口轴向分力,减小凸变形纵向分层长度,有效抑制了出口撕裂、毛刺等缺陷产生,减薄外刃的切削厚度,第二主切削刃相当于有精切和精修作用对推挤出的碳纤维进行切除,从而得到较好的出口质量。



(a) 普通麻花钻钻头

图10为试验两种钻头在超景深三维显微系统放大150倍情况下主轴转速4000 r/min、进给速度130 mm/min 钻孔孔边缘同纤维角度的出口形貌图。由图10(a)可以看出,普通麻花钻钻孔时,孔边缘碳纤维切除能力较差,碳纤维随着切削刃作用拔出却未完全被切断导致形成了锯齿形状出口形貌。而图10(b)所示双锋角钻头钻孔,孔边缘碳纤维切除能力明显提高,在第二主切削刃精切和精修作用下拔出纤维都被切除孔出口光滑、整齐。



(b) 双锋角钻头

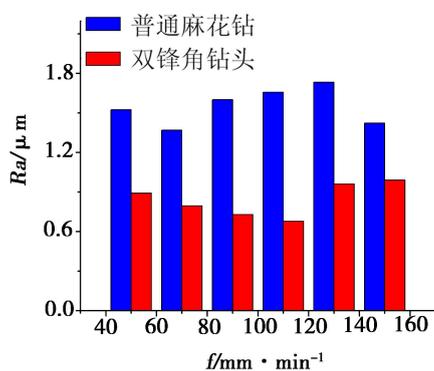
图10 孔边出口形貌对比

Fig. 10 Morphology of hole drilled by two drills

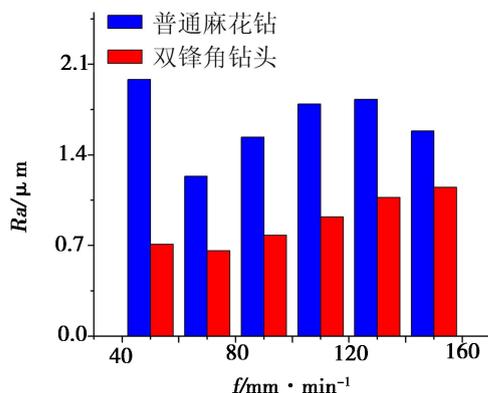
### 2.3 孔壁表面粗糙度

图11为双锋角钻头和普通麻花钻在不同钻削加工参数条件下加工 CFRP 孔壁表面粗糙度。可见,在试验参数范围内,相同的加工参数条件下双锋角钻头钻削 CFRP 的孔壁表面粗糙度值明显小于普通麻花钻钻削的。由图11(a)(b)(c)可见在主轴转速为4000、4500、5000 r/min 时,双锋角钻头产生的孔壁表面粗糙度约为普通麻花钻的一半。由图11(d)可见在主轴转速为5500 r/min 时双锋角钻头钻削 CFRP 产生的孔壁粗糙度和普通麻花钻所产生的孔壁粗糙

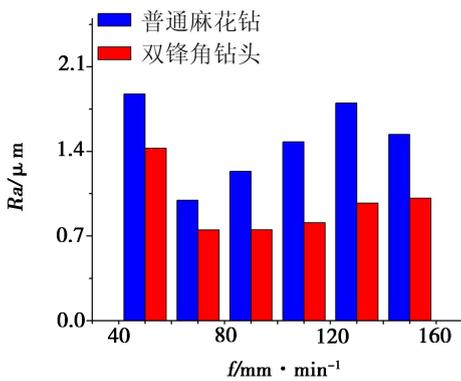
度值很接近,在进给速度为150 mm/min 时双锋角钻头产生的孔壁粗糙度大于普通麻花钻。表明在试验加工参数范围内,与普通麻花钻对比主轴转速小于或等于5000 r/min 时,双锋角钻头有利于降低孔壁表面粗糙度,提高制孔质量,体现了双锋角钻头优异的切削性能;主轴转速为5500 r/min 时双锋角钻头减小孔壁表面粗糙度优势明显降低。对比两种钻头钻削 CFRP 时,从减低孔壁表面粗糙度值考虑,应优先选择双锋角钻头,且双锋角钻头在钻削 CFRP 时应选择主轴转速小于或等于5000 r/min。



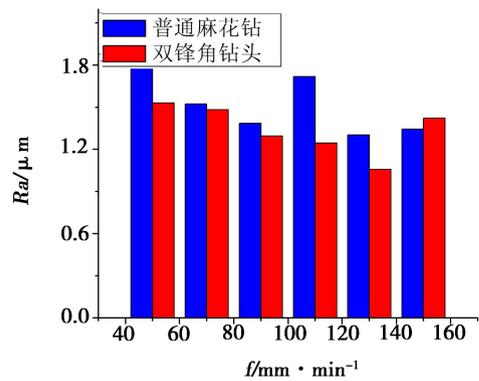
(a) 主轴转速 4 000 r/min



(b) 主轴转速 4 500 r/min



(c) 主轴转速 5 000 r/min



(d) 主轴转速 5 500 r/min

图 11 两种钻头进给速度、主轴转速与孔壁表面粗糙度的关系图

Fig. 11 Curve indicating relationship between rotational speed, feed rate and surface roughness by two drills

### 3 结论

(1) 钻削 CFRP 时随进给速度增加钻削轴向力呈增大趋势, 主轴转速增大有利于减小钻削轴向力, 且进给速度对钻削轴向力的影响大于主轴转速对轴向力的影响; 在相同加工参数下, 双锋角钻头钻削轴向力明显小于普通麻花钻钻削轴向力; 在试验加工参数范围内双锋角钻头比普通麻花钻产生的钻削轴向力降低了约 20%。

(2) 在相同的加工参数条件下, 双锋角钻头的出口质量明显好于普通麻花钻; 在试验加工参数范围内普通麻花钻出现了明显的出口毛刺、撕裂等现象, 而双锋角钻头钻削 CFRP 出口形貌整洁、光滑, 实现出口无撕裂目标, 体现了双锋角钻头优异的切削性能。

(3) 在相同的加工参数条件下, 双锋角钻头加工孔壁表面粗糙度小于普通麻花钻加工孔壁表面粗糙度; 在主轴转速  $\leq 5\ 000\ r/min$  时双锋角钻头产生孔壁表面粗糙度约为普通麻花钻的 1/2。主轴转速等于 5 500 r/min 时两种钻头加工孔壁表面粗糙度值很接近。因此, 以降低孔壁表面粗糙度为目的, 应优先选择双锋角钻头, 且主轴转速应  $\leq 5\ 000\ r/min$ 。可见两种钻头在相同加工条件下钻削 CFRP, 双锋角钻头的钻削轴向力小, 出口质量好, 孔壁粗糙度小, 更适合对 CFRP 进行制孔加工。

#### 参考文献

[1] 王奔, 高航, 郭东明, 等. 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, 47(12): 19-25

[2] Davim J P 著. 陈明, 安庆龙, 等, 译. 复合材料制孔技

术[M]. 北京: 国防工业出版社. 2013: 1-5, 95-96

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

[4] Tsao C C. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill[J]. Materials and Design, 2008, 29(9): 1740-1744

[5] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料(CFRP) 钻孔出口缺陷的研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 150-155

[6] Velayudham A, Krishnamurthy R. Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites[J]. Materials Processing Technology, 2007(185): 201-209

[7] 鲍永杰, 高航, 李凤全. C/E 复合材料“以磨代钻”制孔工艺[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(4): 47-49

[8] 张鹏, 杨柳, 谭朝元, 等. 碳纤维复合材料方孔加工工艺[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(5): 80-84

[9] 贺虎, 苏宏华, 陈燕, 等. 钎焊金刚石套料钻钻削 CFRP 的孔质量研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011(2): 13-16

[10] 王震, 刘汉良, 李亮. 碳纤维复合材料孔加工质量试验研究[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(6): 88-90

[11] HB/Z223. 21-2003, 中华人民共和国航空行业标准-飞机装配工艺[S]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003

[12] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料钻削孔分层缺陷的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(22): 1978-1 980

(编辑 任涛)