

双锋角钻头钻削碳纤维增强树脂基复合材料 钻孔缺陷的研究

刘 洋 李鹏南 陈 明 邱新义 唐玲艳

(湖南科技大学机电工程学院,湘潭 411201)

文 摘 针对碳纤维复合材料钻孔时易产生撕裂、毛刺等缺陷的特点,采用双锋角钻头为研究对象,从横刃、第一主切削刃和第二主切削刃对孔入、出口缺陷的影响和加工参数对撕裂因子的影响规律等方面分析双锋角钻头钻孔特点,并与普通麻花钻进行对比。结果表明:在相同的加工参数下,双锋角钻头双主切削刃加工特点降低了入、出口钻削轴向力,有效抑制了入、出口撕裂、毛刺等缺陷产生,更适合于钻削碳纤维复合材料。主轴转速增大有利于减小撕裂因子,随着进给速度的增加撕裂因子呈增大的趋势。采用多元线性回归方法建立了试验两种钻头钻孔入、出口的撕裂因子与加工参数之间的回归预测模型。

关键词 双锋角钻头,碳纤维复合材料,撕裂,加工参数

中图分类号: TG52

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.05.010

Defects in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics with Double Cone Drill

LIU Yang LI Pengnan CHEN Ming QIU Xinyi TANG Lingyan

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

Abstract Defects such as burrs and tear, often occur in the drilling of CFRP. Drilling characteristics of double cone drill was studied through analyzing the influence of chisel edge and primary drilling edge and secondary drilling edge on defects of hole's entrance and exit and the influence regularity of processing parameters on tear factor. The results were compared with those of twist drill. Results show that, compared with twist drill, double cone drill is more suitable for drilling CFRP. The characteristics of double main cutting edge reduced the drilling axial force at hole's entrance and exit, inhibited burrs and tear damages at hole's entrance and exit. High speed drilling is favorable for minimizing the tear factor, the tear factor increases with the feed rate increasing. Through multi-linear regression analysis method, the prediction model between tear factor which is used to test hole's entrance and exit of the two drill and process parameters were established.

Key words Double cone drill, CFRP, Tear, Process parameters

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有比强度高、性能优异的性能,在航空航天等领域中得到了广泛的应用^[1]。由于制孔缺陷的问题仍未得到完全的解决,严重影响了CFRP在航空航天领域中的高质量低成本制造^[2]。钻削CFRP材料,常见的加工缺陷有孔边撕裂和毛刺,主要产生在复合材料最上下表面的纤维铺层处^[3-4]。因此,选择合适的加工参数和钻

型,能提高制孔质量,更容易达到制孔无撕裂的目标^[5]。针对CFRP的特点,国内外研究人员通过对钻头结构进行设计和优化来提高制孔质量。VELAYUDHAM和KRISHNAMURTHY^[6]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^[7]采用电镀金刚石钻头钻削C/E复

收稿日期:2015-11-17

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

合材料, 研究表明电镀金刚石钻头进行制孔加工孔撕裂、毛刺缺陷减少。牟娟等^[8]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 减小了钻削轴向力, 加工质量得到了改善。李桂玉^[9]通过对不同钻尖角钻头钻削试验发现, 钻削 CFRP 材料应选择较小钻尖角的钻头进行试验加工。目前, 采用双锋角钻头钻削 CFRP 的研究很少, 本文针对 T700 CFRP 制孔特点, 以双锋角钻头为研究对象, 并与普通麻花钻头进行对比, 对加工过程中试验钻头的横刃、第一主切削刃和第二主切削刃钻孔入、出口缺陷影响和加工参数对撕裂因子的影响规律进行分析; 采用多元线性回归的方法, 建立试验所用钻头钻孔入、出口的撕裂因子与加工参数之间的回归预测模型。

1 试验

1.1 材料

试验采用 CFRP 板为试验材料, 进行钻削试验研究。该 CFRP 材料的基体材料为 LT-03A 型环氧树脂, 增强材料为 T700 型碳纤维, 纤维体积分数为 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。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、KISTLER9253B23 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^[10]。因此本次试验采用

CFRP 材料板下加硬质塑料垫板的方法对碳纤维板最外层起到很好的支撑作用, 来提高孔出口的质量。孔的入、出口形貌采用超景深三维显微系统 KEYENCE VHX-500FE 进行观察, 可放大倍率为 20~5000 倍, 能够观察和准确测量已钻削加工孔的形貌及撕裂情况。

图 1 为双锋角钻头刀具几何结构, 双锋角钻头是在普通麻花钻基础上改进了主切削刃刃形, 特点是有两个顶角和两个主切削刃。其刀具几何参数有第一主切削刃长度 L_{OA} 、第二主切削刃长度 L_{AB} 、横刃长度 L 、第一主切削刃垂直高度 h_1 、第二主切削刃垂直高度 h_2 、横刃垂直高度 h_0 、主切削刃总垂直高度 h 、第一主切削刃切削厚度 t_{OA} 、第二主切削刃切削厚度 t_{AB} 、横刃倾角 γ 、第一顶角 2α 、第二顶角 2β 、第一主切削刃水平切削范围 r_A 、第二主切削刃水平切削范围 (刀具半径) r_B 。试验所用的两种钻头的具体刀具几何参数如表 1 所示。

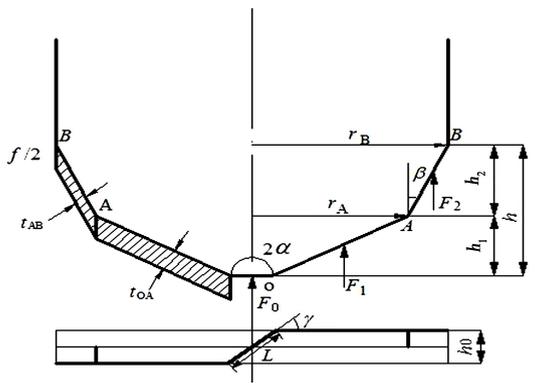


图 1 双锋角钻头刀具几何结构

Fig. 1 Double cone angle drill geometry

表 1 刀具几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of cutting tools

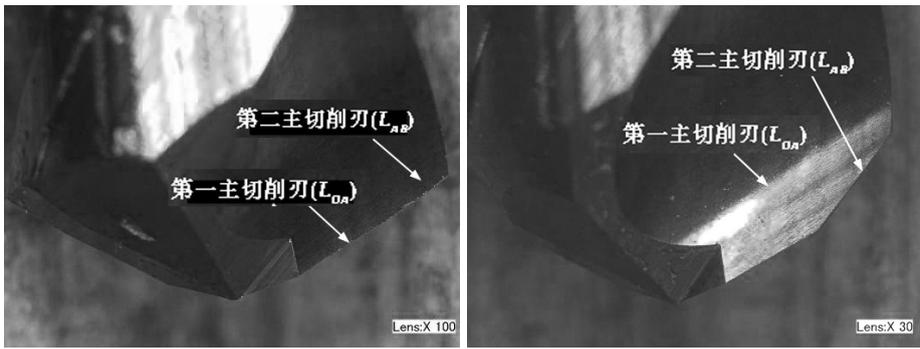
钻头	D/mm	$2\alpha/(\circ)$	$2\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	L_{OA}/L_{AB}	h_1/mm	h_2/mm	h_0/mm	L/mm	r_A/mm
普通麻花钻	6	120	0	50	无	1.024	1.678	0.211	0.153	2.262
双锋角钻头	6	120	70	50	1	1.024	0.327	0.211	0.153	2.262

图 2 所示试验所用钻头形貌, 采用牌号为 ST12F、直径为 6 mm 的超细晶硬质合金棒料, 在 ANCA-RX7 五轴磨床上自行精磨出的钻头。

在 ANCA-RX7 五轴磨床自带的专用钻头设计软件中, 双锋角钻头设计只能对 L_{AB} 长度进行控制, 为了精准地控制 L_{AB} 与 L_{OA} 之间比值关系, 可通过公式 (1) 进行计算, 设计出具有不同 L_{AB} 与 L_{OA} 比值关系的双锋角钻头。图 2(a) 所示为更好的体现双锋角钻头双主

切削刃的加工特点, 将普通麻花钻的主切削刃也分为第一主切削刃和第二主切削刃。普通麻花钻第一主切削刃长度与双锋角钻头第一主切削刃长度相等, 剩余的主切削刃长度为第二主切削刃。因此试验所用的两种钻头横刃和第一主切削刃的刀具几何结构是完全一致的。

$$L_{OA} = \frac{1}{\sin\alpha} \left(r_B - \frac{L \cos\gamma}{2} - L_{AB} \sin\beta \right) \quad (1)$$



(a) 普通麻花钻

(b) 双锋角钻头

图2 钻头形貌

Fig.2 Morphology of the drill

1.2 试验方案

钻削试验采用全因子试验进行设计,结合实际加工中常用的工艺参数范围,加工参数选择主轴转速 2 500、3 500、4 500、5 500 r/min,进给速度 50、70、90、110、130、150 mm/min 进行试验研究。为了进一步了解试验钻头的横刃、第一主切削刃和第二主切削刃在钻削 CFRP 制孔缺陷形成,因此对钻孔过程进行详细

的观察和分析。充分利用 ANCA-RX7 五轴磨床自带的专用刀具设计软件的测量功能,对不同切削刃的垂直高度进行精准的测量,精度为 0.001。根据各个切削刃的垂直高度对 CFRP 材料进行不同轴向深度钻削试验。如图 3 所示分为 8 (A-H) 个阶段进行制孔加工。

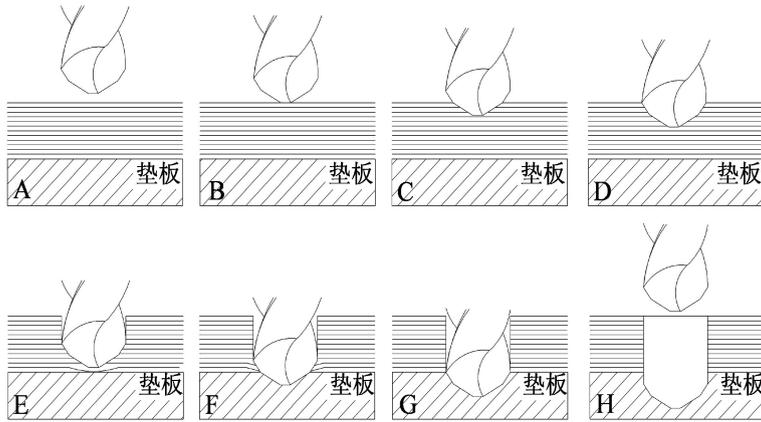


图3 分阶段钻孔示意图

Fig.3 Phased drilling schematic

2 结果与讨论

2.1 钻孔入口缺陷的观察与对比

横刃作用阶段:这一阶段由横刃接触 CFRP 最表层开始到横刃全部钻入被加工材料中结束。钻头横刃处的前角为很大的负值,切削过程中切削性能很差,刀刃难以切入材料,主要是横刃的推挤作用下将 CFRP 的最表层纤维树脂材料拉绞破坏。如图 4 所示,在试验加工参数下(2 500 r/min、110 mm/min)横刃作用时孔圆度较差,孔周边呈不规则的撕裂变形。随着横刃不断切入 CFRP,由于横刃处的排屑能力较差,横刃产生的切屑有部分被积压在孔中心。

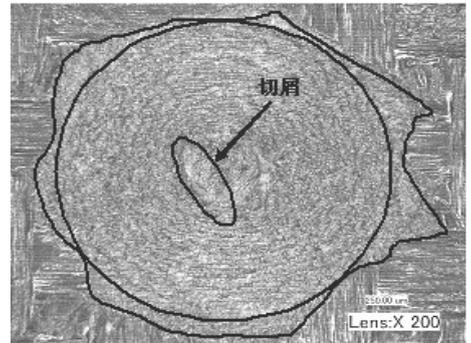


图4 横刃入口形貌

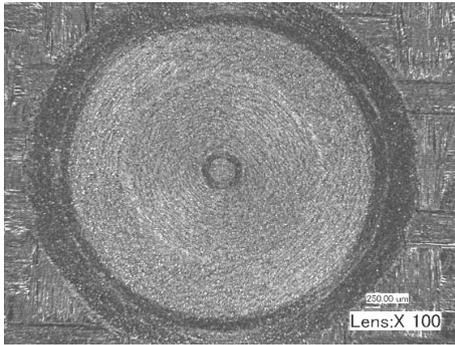
Fig.4 Chisel entrance morphology

第一主切削刃作用阶段:这一阶段由横刃全部钻

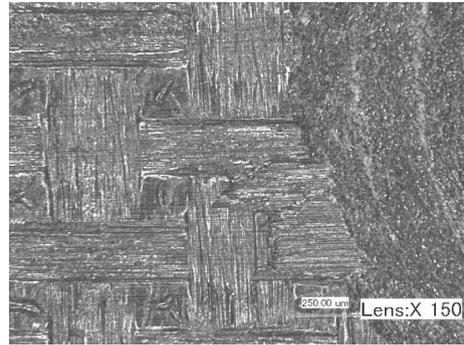
入 CFRP 材料开始到第一主切削刃全部钻入 CFRP 材料结束。第一主切削刃钻入 CFRP 主要表现两方面的作用,如图 5(a)所示一方面是第一主切削刃切入 CFRP 材料时,对横刃产生的不规则撕裂切除和孔圆度进行修整;如图 5(b)所示,另一方面随着第一主切削刃切入,切削体积逐渐增大,钻削轴向力随着增

大对 CFRP 也起着纵向剥离作用,被剥离的碳纤维层与相邻下面未被加工的 CFRP 材料产生了面外剪切应力,导致部分区域产生轻微撕裂现象。

第二主切削刃作用阶段:这一阶段由第一主切削刃全部切入 CFRP 材料开始到第二主切削刃全部切入 CFRP 材料结束。



(a) 部分第一主切削刃切入 CFRP



(b) 全部第一主切削刃切入 CFRP

图 5 第一主切削刃入口形貌

Fig. 5 Primary drilling edge entrance morphology

普通麻花钻第二主切削刃钻入 CFRP 进一步完成入口制孔加工,是形成入口最终制孔质量的重要阶段。如图 6 可见,普通麻花钻第二主切削刃继续对 CFRP 材料进行切断和剥离作用,在试验加工参数下主切削刃纵向剥离长度超出了钻头切除范围(钻头直径)则会有部分被剥离出的碳纤维不能被主切削

刃切断,将沿着钻头的螺旋槽向上牵引,由钻削过程产生的扭矩对其撕断,导致产生入口撕裂现象,撕裂严重处明显可以看出已发生分层现象。入口撕裂还会导致撕裂处周围的纤维材料性能下降,出现一定面积的碳纤维材料断裂的现象且断裂长度较长,严重影响了制孔加工质量。

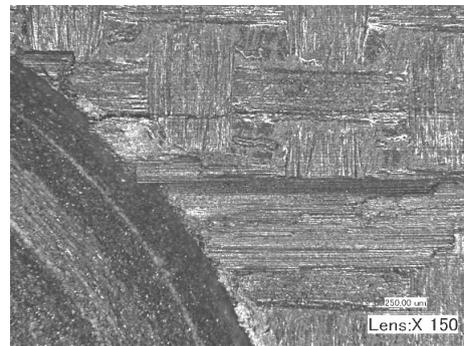
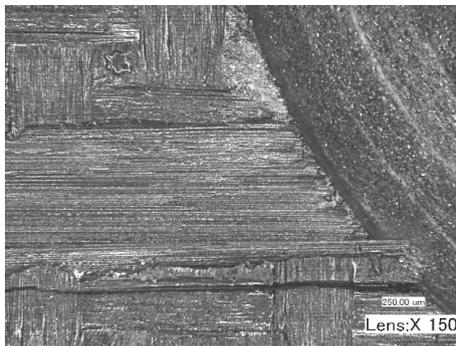


图 6 普通麻花钻第二主切削刃入口形貌

Fig. 6 Secondary drilling edge entrance morphology of twist drill

如图 7 所示双锋角钻头第二主切削刃对第一主切削刃产生的部分区域撕裂现象起到了很好的修复

作用,入口处未出现撕裂现象,只在部分区域产生了轻微的啃边现象不影响制孔的整体质量。

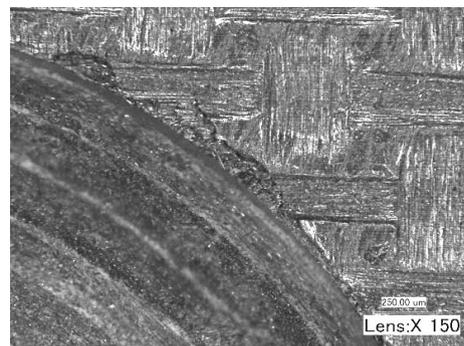
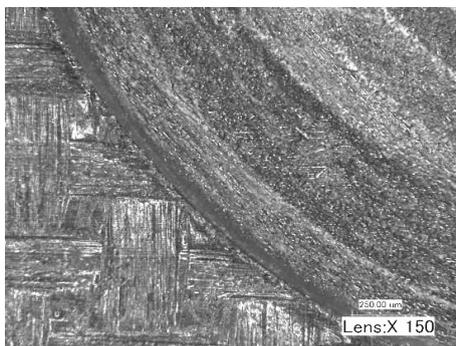


图 7 双锋角钻头第二主切削刃入口形貌

Fig. 7 Secondary drilling edge entrance morphology of double cone angle drill

如式(2)所示切削刃的切削厚度与进给速度和顶角成线性关系,双锋角钻头的第二主切削刃的顶角 β 减小,入口钻削轴向力分力也随之减小,减薄外刃的 t_{AB} 切削厚度,第二主切削刃相当于有精切和精修作用对纵向剥离的碳纤维进行切除。

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

2.2 钻孔出口缺陷

横刃、第一主切削刃作用阶段:这一阶段由横刃对出口最外层材料有推挤作用开始到第一主切削刃全部钻出 CFRP 材料结束。横刃主要是对 CFRP 产

生的推挤作用,使得出口处最外层纤维材料并不是被立即切断,而是在横刃产生的轴向力作用下向外退让,呈凸变形纵向扩展,扩展到一定程度最外层纤维断裂横刃钻出。随着第一主切削刃开始对出口作用,第一主切削刃主要是对横刃产生的毛刺进行切除和继续对 CFRP 材料推挤。如图 8(a)所示,在孔周边部分区域可明显观察到凸形变形。在孔的右上方和左下方明显观察到有被横刃和第一主切削刃推挤出的碳纤维材料未被切除,孔出口呈椭圆形。图 8(b)可见出口毛刺粗长呈锯齿形状,由上至下毛刺长度呈递减趋势。

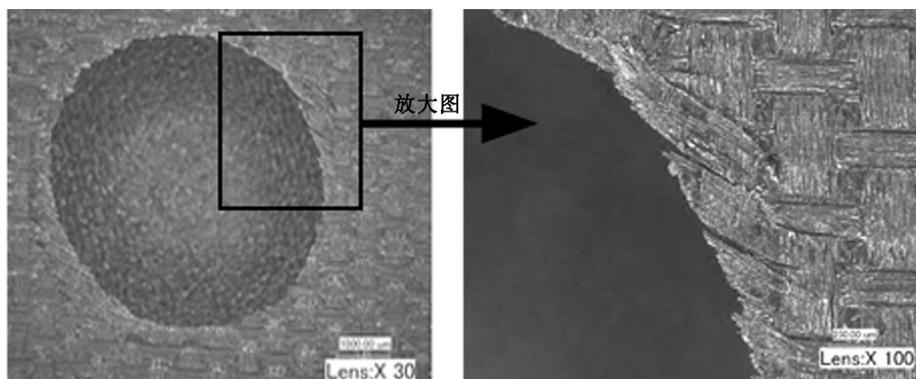


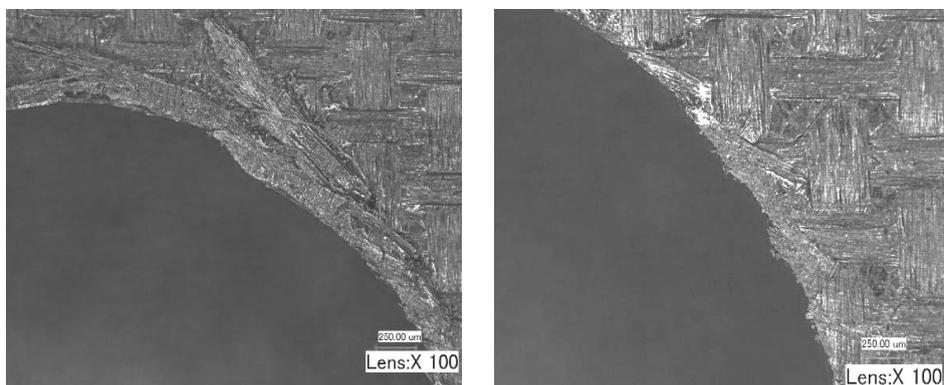
图 8 横刃、第一主切削刃出口形貌

Fig. 8 Morphology of the outlet of chisel edge and primary drilling edge export

第二主切削刃作用阶段:这一阶段由第一主切削刃钻出 CFRP 材料开始到主切削刃全部钻出 CFRP 材料时结束。

普通麻花钻的横刃和第一主切削刃产生的出口毛刺、撕裂等缺陷不是最终的。第二主切削刃继续对

撕裂的形成产生作用。主要表现两方面。一个方面是对横刃和第一主切削刃产生毛刺进行切除和对孔圆度进行修整;另一个方面是继续对 CFRP 最外层材料推挤和剥离作用。第二主切削刃出口形貌见图 9。



(a) 普通麻花钻

(b) 双锋角钻头

图 9 第二主切削刃出口形貌

Fig. 9 Secondary drilling edge entrance morphology

如图 9(a)所示在主切削刃完全钻出 CFRP 时不能完全对产生的毛刺进行切除,制孔过程中产生的毛刺长度超出了钻头的切除范围(钻头直径)导致最后

出口产生严重的毛刺现象,且毛刺的根部离孔最外圆都有一定的距离。

如图 9(b)可见,双锋角钻头钻削 CFRP 孔出口

光滑、整齐,只存在出口处细微的毛刺,与普通麻花钻对比,明显提高了制孔质量,有效的抑制了出口缺陷的产生。原因是双锋角第二主切削刃顶角 β 减小,降低了出口轴向分力,有效的减少对出口外层 CFRP 材料推挤和剥离作用,双锋角第二主切削刃相当于起精切和精修作用,对横刃和第一主切削刃产生的制孔毛刺进行有效切除。

图 10 为制孔出、入口三作用阶段撕裂长度的理论定性描述。OABC 为普通麻花钻撕裂扩展理论规律曲线,OABD 为双锋角麻花钻撕裂扩展理论规律曲线,OED 为普通麻花钻理想的无撕裂规律曲线。

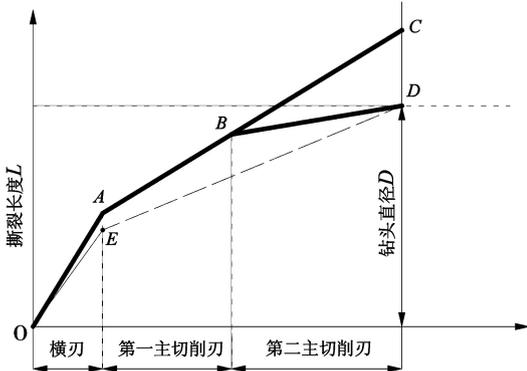


图 10 三作用阶段撕裂长度扩展情况

Fig. 10 Three effect stages tear propagation length of case

OA-AB 两阶段是试验所用两种钻头共同具有的阶段。

OA 阶段:撕裂长度扩展在横刃作用阶段扩展速率是最快的。AB 阶段:第一主切削刃作用阶段撕裂扩展速率明显下降了。

BC 阶段:保持着 AB 阶段相同的撕裂扩展速率继续,最终撕裂长度超过了钻头直径长度,形成了最终的制孔缺陷。如果选择合适的加工参数,减小钻削轴向力,降低各阶段撕裂扩展速率,最终普通麻花钻达到理想的无撕裂规律曲线 OED。

BD 阶段:双锋角钻头改变了主切削刃刃形,减小顶角,降低了轴向力分力,从而降低撕裂扩展速率,第二主切削刃能有效的对横刃和第一主切削刃产生的撕裂切除掉,形成无撕裂制孔目标。可见对比普通麻花钻,双锋角钻头更容易达到制孔出入口无撕裂、无毛刺的目标。

2.3 加工参数对入、出口 L_d 的影响规律

本文 L_d 评价标准采用 CHEN 提出的直径 L_d 作为撕裂缺陷的评价指标^[11]。如公式(3)所示, L_d 用制孔产生撕裂、啃边和毛刺破坏区域的最大直径 D_{max} 与被加工孔的理想直径 D_0 的比值来描述撕裂的严重程度,如图 11 所示。

$$L_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (3)$$

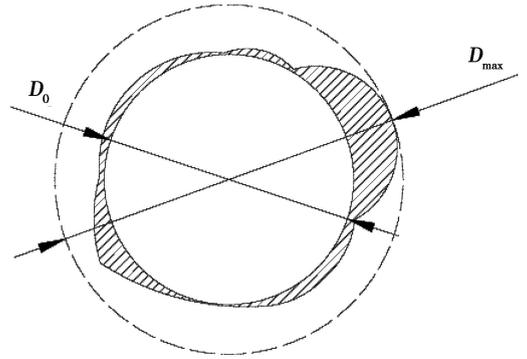


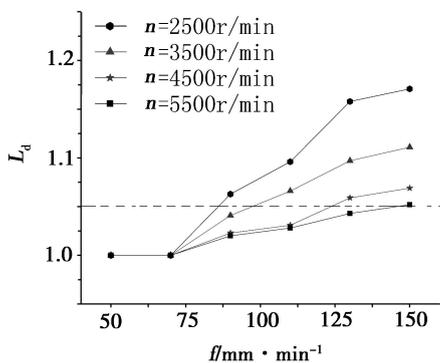
图 11 L_d 评价示意图

Fig. 11 Schematic tear factor assessment

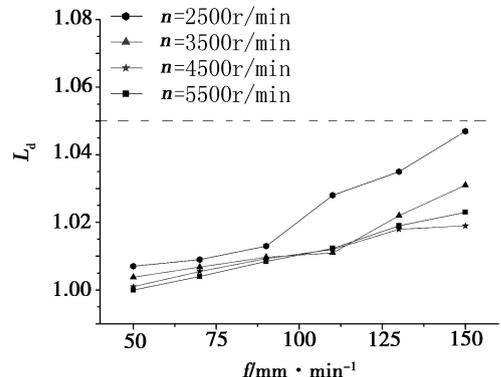
引用文献[12]提出的当 L_d 小于 1.05 (撕裂长度 0.3 mm) 时,孔的出入口缺陷为小范围的啃边现象;当 L_d 大于 1.05 时,孔出入口缺陷为撕裂、毛刺。

2.3.1 进给速度、主轴转速与入口 L_d 的关系

由图 12 可见,试验所用两种钻头钻削下,其主轴转速 n 、进给速度 f 与入口 L_d 成基本相同的线性关系。



(a) 普通麻花钻



(b) 双锋角钻头

图 12 入口 L_d 随进给速度、主轴转速的变化

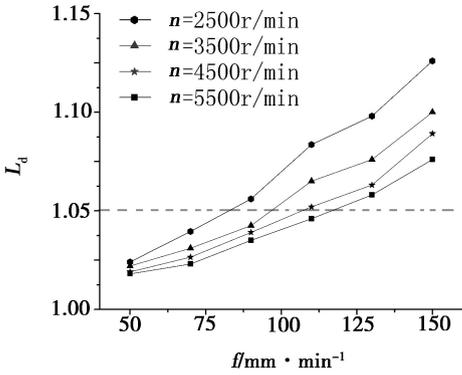
Fig. 12 Entrance tear factor measurements as a function of feed and speed

在保持主轴转速不变的情况下, f 增大, 单位时间钻头的切削面积增加, 轴向力增大, L_d 越大; 在相同的 f 下, 主轴转速 n 越高, 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, 轴向力呈减小的趋势, L_d 呈减小的趋势。

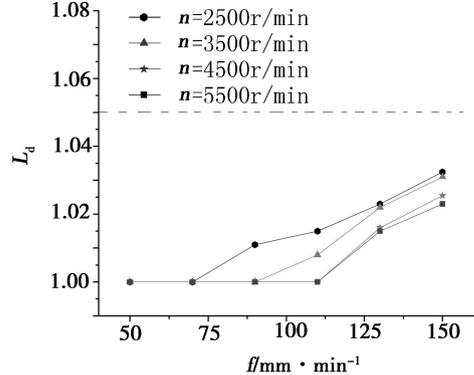
由图 12(a) 可见普通麻花钻在试验加工参数下有 10 个孔的入口 L_d 大于 1.05, 入口合格率 58.3%; 在低转速、高进给情况下 L_d 较大, 撕裂现象明显。图 12(b) 为双锋角麻花钻钻削 CFRP 加工参数与 L_d 关系, 可见试验加工参数下所有的孔的入口 L_d 都小于 1.05, 未出现入口撕裂现象, 入口合格率为 100%; 对比普通麻花钻, 双锋角钻头入口合格率显著提高。在进给速度为 50 和 70 mm/min 情况下普通麻花钻入口 L_d 均为 1, 未出现任何制孔缺陷; 双锋角钻头会有轻微的啃边现象产生, 轻微啃边对孔的整体质量产生的影响可以忽略不计。

2.3.2 进给速度、主轴转速与出口 L_d 的关系

由图 13 可见, 两种不同的钻头出口 L_d 与加工参数曲线关系图与图 12 入口相似, 在同样的 n 下, 随着 f 增大, L_d 增大; 在相同的 f 下, n 越高, L_d 呈减小的趋势。图 13(a) 可见, 普通麻花钻在试验加工参数范围内, L_d 小于 1.05 的孔有 12 个, 出口合格率 50%。由图 13(b) 可见, 双锋角钻头在试验参数范围内出口 L_d 最大为 1.0325, 出口合格率 100%; 且有 13 个孔出口质量实现了无撕裂、无毛刺、无啃边目标; 双锋角钻头的双主切削刃加工特点对提高出口质量有着明显的作用。综合考虑入口和出口的 L_d , 在试验加工参数范围内普通麻花钻合格率为 50%, 双锋角合格率为 100%; 双锋角钻头钻削 CFRP 材料无撕裂加工达到的 f 明显高于普通麻花钻, 在保证加工质量情况下能有效的提升加工效率, 体现了优异的切削性能。



(a) 普通麻花钻



(b) 双锋角钻头

图 13 出口 L_d 随 f 的变化

Fig. 13 Exit tear factor measurements as a function of feed and speed

2.4 L_d 回归模型的建立

分析试验所用两种钻头加工参数对 CFRP 钻削时孔入、出口 L_d 的影响, 对试验采集的数据进行方差分析, 并分别推导出普通麻花钻和双锋角钻头制孔入、出口 L_d 的回归预测模型。用所得到的预测模型代入相应的加工参数, 就可以计算出钻削过程产生孔入、出口的 L_d , 实现预测制孔缺陷大小的目的, 为选择合适的加工参数提供一定参考。

采用回归分析方法, 设定 L_d 与加工参数关系式为:

$$L_d = C \times f^a \times n^b \quad (4)$$

式中, C 、 a 、 b 为经验常数。

行二元线性回归处理, 计算得到相应的预测模型为:

普通麻花钻钻削 CFRP 入口的 L_d 预测模型:

$$L_d = 1.3715 \times f^{0.1267} \times n^{-0.1034} \quad (5)$$

普通麻花钻钻削 CFRP 出口的 L_d 预测模型:

$$L_d = 1.0377 \times f^{0.0637} \times n^{-0.0332} \quad (6)$$

双锋角钻头钻削 CFRP 入口的 L_d 预测模型:

$$L_d = 1.0367 \times f^{0.0254} \times n^{-0.0166} \quad (7)$$

双锋角钻头钻削 CFRP 出口的 L_d 预测模型:

$$L_d = 0.9546 \times f^{0.0304} \times n^{-0.0099} \quad (8)$$

相关系数 r^2 是检测线性回归方程拟合度的重要指标, 相关系数 r^2 越接近 1, 说明回归方程越显著。与 F 值对应的概率 $p < a$ ($a = 0.05$) 时, 回归模型成立。回归模型相关系数 r^2 和 F 值对应的概率 p 值见表 2

所示。 L_d 预测模型的相关系数 r^2 均大于 0.9, 说明该公式能较准确的对 L_d 进行预测。 F 值对应的概率 p 值均小于 0.05, 说明四个回归模型均成立。可根据 L_d 预测模型选择合适的加工参数进行试验加工。

表 2 多元线性回归模型系数检测表

Tab.2 Multivariate linear regression model coefficients checklist

系数	普通麻花 钻入口 L_d	普通麻花 钻出口 L_d	双锋角钻头 入口 L_d	双锋角钻头 出口 L_d
r^2	0.9340	0.9546	0.9018	0.9109
p	0	0	0	0

3 结论

(1) 试验钻头钻削 CFRP 钻孔入、出口撕裂形成过程包括三个作用阶段: 横刃作用阶段、第一主切削刃作用阶段和第二主切削刃作用阶段。第二主切削刃作用阶段对最终撕裂产生起决定性作用。在试验加工参数下, 普通麻花钻产生的入、出口撕裂现象均比双锋角钻头严重。

(2) 随着进给速度 f 的提高, 试验所用钻头产生的 L_d 均呈增大的趋势, 提高主轴转速 n 有利于减小 L_d 。在试验加工参数范围内, 普通麻花钻钻孔合格率(入、出口 L_d 小于 1.05) 为 50%, 双锋角钻头钻孔合格率为 100%。双锋角钻头双主切削刃加工特点更有利于达到钻孔无撕裂、无毛刺的目标, 在保证制孔加工质量的前提下能有效提高加工效率, 体现了优异的切削性能, 更适合于钻削碳纤维复合材料。

(3) 采用二元线性回归的方法结合试验检测结果, 建立了试验所用钻头产生入、出口 L_d 与加工参数之间的回归预测模型, 该预测模型可以正确的对钻孔入、出口 L_d 进行快速预测, 为选择合适的实际加工参

数提供一定参考。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-3.
- [2] LIM J, SOO S L, Aspinwall D K, et al. Influence of lay-up configuration and feed rate on surface integrity when drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites [J]. Proccenia CIRP, 2014, 13: 399-404.
- [3] 陈明, 安庆龙, 明伟伟. 复合材料制孔技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013, 70-81.
- [4] 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): 1978-1980.
- [5] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削孔出口缺陷的研究[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] 牟娟, 陈燕, 徐九华, 等. 钎焊套料钻削碳纤维增强复合材料层合板出口撕裂缺陷的成因分析 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(20): 2699-2704.
- [9] 李桂玉. 叠层复合材料钻削加工缺陷产生机制及工艺参数优化 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [10] 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, 9, 25.
- [11] CHEN W C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, 37: 1097-1098.
- [12] 贺虎. 碳纤维复合材料钻削力与孔质量研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.