

钻削参数对碳纤维复合材料钻孔质量的分析

王天宇 金成哲 邵雍博

(沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 碳纤维复合材料(CFRP)由于其层间强度低,各向异性等特点,极易出现加工损伤,而钻削参数的选取,对钻孔质量有着很大的影响。利用有限元软件建立钻削 T300 碳纤维复合材料仿真模型,选择不同切削用量进行钻削加工仿真,分析切屑及其形成原因。采用正交试验法进行钻削加工试验,将得到的钻孔毛刺、撕裂、分层损伤和孔壁损伤等几种损伤试验结果,与仿真结果进行对比验证并分析其产生原因。结果表明:对 T300 碳纤维复合材料钻孔时,孔出口处撕裂缺陷远大于孔入口处缺陷,即入口处钻孔质量要好于出口处钻孔质量。对孔出、入口处撕裂值影响程度最大的是钻头直径,切削速度次之,进给量影响最小;而对孔径尺寸误差影响最大的是钻头直径,进给量次之,切削速度影响最小。

关键词: 钻削;碳纤维复合材料;钻孔质量;钻削参数

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.08.006

Analysis of drilling parameters on drilling quality of carbon fiber reinforced plastics

WANG Tianyu, JIN Chengzhe, SHAO Yongbo

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, CHN)

Abstract: Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) have the characteristics of low interlayer strength and complex anisotropy, which are prone to machining damage. The selection of cutting parameters has a great influence on the quality of drilling. The finite element software was used to establish a machining simulation model for drilling T300 carbon fiber reinforced plastics, and different cutting parameters were selected for drilling simulation, and the chips and their formation reasons were analyzed. Orthogonal test method is selected for drilling processing test. The obtained damage test results such as burr, tearing, delamination damage and hole wall damage are compared with the simulation results to verify and analyze their causes. The results show that when drilling the T300 carbon fiber composite the tear defects at the exit of the hole are much larger than those at the entrance of the hole. That is, the quality of the entrance drilling is better than that of the exit drilling. The largest impact on the exit and the entrance tear value is the diameter of the drill bit, the cutting speed is the second, and the feed rate has the least effect. However, the diameter of the drill bit has the greatest influence on the hole size error, followed by the feed rate, and the cutting speed has the least effect.

Keywords: drill; carbon fiber reinforced plastics; drilling quality; drilling parameters

碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)由于其“轻质高强”等优良特点,被广泛应用于航空航天等重要领域^[1]。而碳纤维复合材料在生产过程中主要采用螺栓或铆钉的连接方式,因此装配质量受到钻孔质量的影响^[2]。

目前,国内外学者对碳纤维复合材料钻孔加工质量方面的研究日益增多。Tsao C^[3]针对钻削参数和钻头的几何参数对于分层损伤的影响进行了研究。

发现通过增大进给速度和钻头直径会减轻分层损伤现象的出现。Gaitonde V N^[4]通过对刀具的刃倾角方向研究,发现减小刃倾角,孔分层现象减小,能够有效提高孔的加工质量。孙鸿洋等^[5]在复合材料切削机理的基础之上,研究了不同切削角度对制孔表面质量的影响。林盛坤等^[6]选择不同工艺用量和不同的刀具几何参数,进行钻削碳纤维复合材料的实验,分析出口和入口侧的撕裂分层影响,发现出

口侧的撕裂情况优于入口侧的撕裂，各因素对出、入口侧撕裂的显著性有所不同。李远霄等^[7]采用高低频复合振动钻削和超声钻削与普通钻削 CFRP/钛合金复合材料进行了研究，对比得出最佳的加工方式。王共冬等^[8]使用 Memetic 算法对铺层顺序进行计算，得出铺层角度对制孔质量的影响。贾振元等^[9]建立了虑及纤维所受法向及切向约束，且兼虑树脂及界面温变特性的单纤维切削模型，为后续有关损伤抑制的研究提供理论依据。Onawumi P Y 等^[10]选择超声振动对钻削 CFRP/Ti 进行辅助，得出超声振动可以减小切削力。Hussein R 等^[11]选择低频振动对钻削 CFRP/钛合金叠层辅助，结果发现由于钻削温度降低，CFRP 的分层缺陷得到良好的解决。Jia Z^[12]分析了切削速度，进给量对 CFRP/Ti 钻孔质量的影响规律，结果表明，钻削临界区域时，钻削温度达到峰值，钛合金层的孔径始终大于 CFRP 层的孔径，随着主轴转速升高分层损伤增大。

本文将通过钻削加工仿真和钻削试验两种分析方法进行对比验证，对钻削碳纤维复合材料钻孔质量进行研究，得出不同切削用量对钻孔质量的影响规律，为选择钻削碳纤维复合材料的切削用量提供参考依据。

1 钻削 T300 碳纤维复合材料仿真

1.1 钻削仿真模型及方案

工件材料为 T300 碳纤维复合材料，工件材料本构模型选择三维工程常数的材料本构，损伤准则为 Hashin 准则。刀具模型采用硬质合金刀具，螺旋角均为： $\beta=30^\circ$ ，顶角 $\varphi=140^\circ$ ；直径分别为： $d=4\text{ mm}$ ， $d=10\text{ mm}$ ， $d=16\text{ mm}$ 。刀具材料物理性能参数如表 1 所示，工件材料物理性能参数如表 2 所示。三维工程常数材料本构模型参数如表 3 所示，T300 碳纤维复合材料的 Hashin 损伤参数如表 4 所示^[13]。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_1 & -\gamma_{21}/E_2 & -\gamma_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\gamma_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma_{13}/E_1 & -\gamma_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中： E 为杨氏模量，MPa； G 为剪切模量，MPa； γ 为泊松比； ε 为应变。

表 1 刀具物理性能参数表

牌号	硬度/ HRA	抗弯强度/ MPa	密度/ (g/cm ³)	杨氏模量/ (kN/mm ²)	热膨胀系数/ ×10 ⁻⁶ °C	抗压强度/ MPa
YG8	89.5	1 600	14.5	600	4.5	4 470

表 2 工件材料物理性能参数表

材料	密度 ρ /(kg/mm ³)	强度 σ /GPa	弹性模量 E /GPa
碳纤维 (T300)	1.75	3.59~7.00	225~228
环氧树脂	1.1~1.3	0.060~0.095	3~4
单向 CFRP	1.6	1.5(纵向) 0.06(横向)	134(纵向) 8.6(横向)

表 3 三维工程常数材料本构模型参数表

	杨氏模量 E /MPa	泊松比 γ	剪切模量 G /MPa
1	144 000	0.312	4 680
2	9 300	0.312	4 680
3	9 300	0.320	4 000

表 4 T300 碳纤维复合材料的 Hashin 损伤参数表

	拉伸强度/MPa	压缩强度/MPa	剪切强度/MPa
横向	53.8	232	90
纵向	1 633	1 021	80.4

在这个三维工程常数柔度矩阵形式中，等号左侧的部分表示应变，等号右侧分别表示柔度矩阵和应力。其中 E_1 、 E_2 、 E_3 分别表示 3 个方向的杨氏模量， G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 分别表示 3 个方向的剪切模量， γ_{12} 、 γ_{13} 、 γ_{23} 分别表示 3 个方向的泊松比。简化为二维平面应力正交各向异性材料本构^[14]为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_1 & -\gamma_{12}/E_1 & 0 \\ -\gamma_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

工件尺寸为 100 mm×100 mm，每层 0.25 mm，共 8 层，采用 0°/90°/45°/-45°/-45°/45°/90°/0°铺层方式，将上述材料属性进行设定后，将工件刀具进行装配如图 1 所示，设置分析步，载荷设定，采用普通壳单元，四节点缩减积分并带沙漏控制 (S4R) 六面体网格划分。工件网格设置和铺层设置如图 2 和图 3 所示，设置完成提交作业。

1.2 仿真结果及分析

如图 4 为钻削 T300 碳纤维复合材料时钻削应力变化仿真图，可以看出，从时间 $t=0\text{ s}$ 到 $t=0.9\text{ s}$ 时应力的分布范围随时间增长而逐渐扩大，因为随着钻头的下压，压力越来越大所以应力的范围越来越

越大。而从 1.2 s 之后随着时间的增长而应力的面积逐渐缩小，因为随着钻头的钻入，去除材料的材料越来越多，所以应力的分布面积就越来越少。因此在钻削碳纤维复合材料的过程不仅仅是钻头的推力导致的弹性形变，还有钻头的剪切作用。

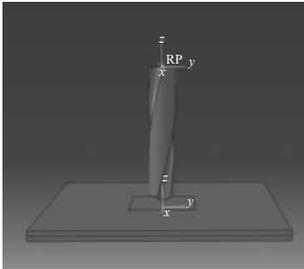


图 1 刀具与工件仿真装配图

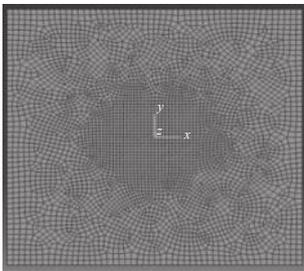


图 2 工件网格划分

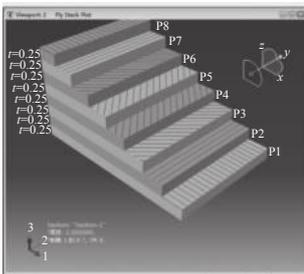
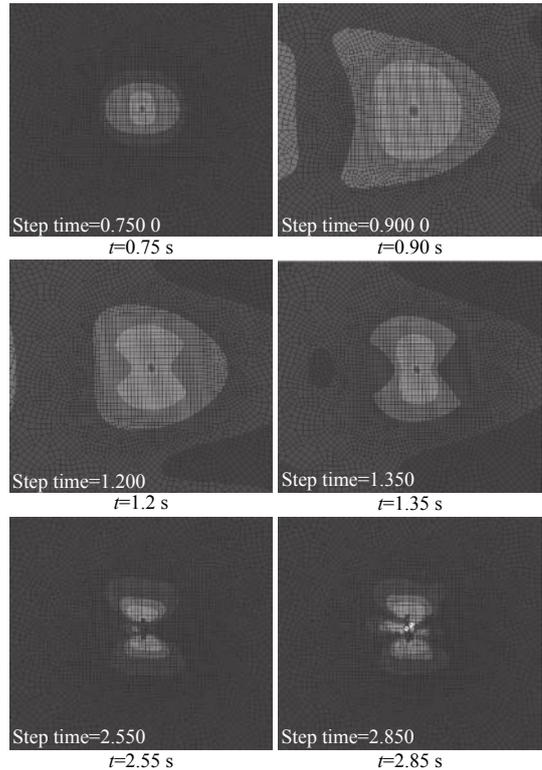


图 3 工件铺层

T300 碳纤维复合材料属于脆性材料，具备各向异性，在进行切削加工时，不同的切削角度会对钻孔质量造成影响。将切削速度方向与未切削层纤维方向所成的夹角定义为切削角 θ ，如图 5 所示。在钻削过程中，假设纤维的排布方向一致，那么切削角度也会随着钻头的旋转而发生改变，如图 6 所示。

在钻削过程中，不同的切削角对纤维的切削破坏机理不同。当切削角为 $\theta=0^\circ$ ，进行切削时，切削刃起剥离作用，前刀面推开被剥离的纤维层，得到平整光滑的平面，如图 7a 所示。当切削角 $\theta=45^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 时，切削刃对纤维起属于剪切作用，当剪切应力大于纤维本身的强度极限时其会被切削刃切断，如图 7b 和 c 所示。当切削角 $\theta=135^\circ$ 时，前刀面推挤纤维，使得纤维发生弯曲变形，当刀具继续向前

挤推，纤维弯曲达到最大弯曲极限，纤维发生断裂，被切削刃切除，如图 7d 所示。



(切削条件：钻头直径为 10 mm，切削速度为 70 m/min，进给量为 0.02 mm)

图 4 T300 碳纤维复合材料钻削应力变化仿真图

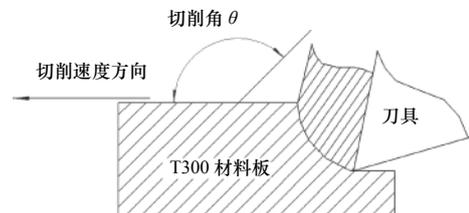


图 5 切削角 θ 的定义示意图

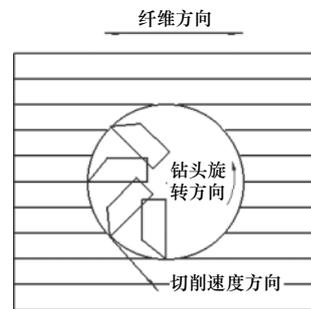


图 6 钻削过程中切削角示意图

2 钻削 T300 碳纤维复合材料试验

2.1 试验方案

为验证仿真模型准确合理性以及进一步研究 T300 碳纤维复合材料钻孔质量，进行钻削加工试

验。试验工件材料选取 T300 碳纤维复合材料的单向板，长度和宽度均为 100 mm，厚度为 6 mm，如图 8 所示；试验刀具选用外冷型整体硬质合金麻花钻如图 9 所示，其参数如表 5 所示。

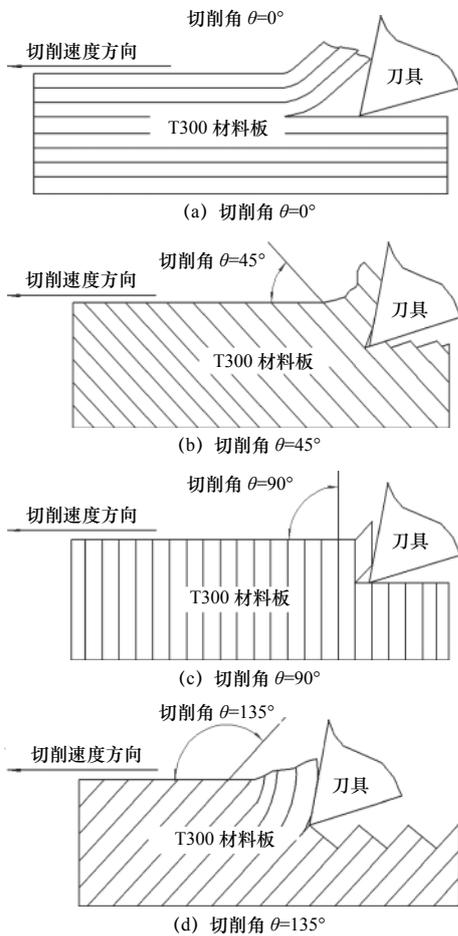


图 7 不同切削角的切削示意图



图 8 T300 碳纤维复合材料的单向板



图 9 整体硬质合金麻花钻

表 5 外冷型整体硬质合金麻花钻参数

钻头直径 d/mm	4、10、16
顶角 $\phi/(\text{°})$	140
螺旋角 $\beta/(\text{°})$	30
铲磨后角 $\lambda/(\text{°})$	8~10
有效刃长 mm	24

如图 10 所示为 VMC850E 立式加工中心钻削试验设备进行钻削试验时，使用专用夹具将工件固定在工作台上，麻花钻安装到机床主轴上（如图 11 所示），采用表 6 所示的正交试验参数进行钻削试验。



图 10 VMC850E 立式加工中心

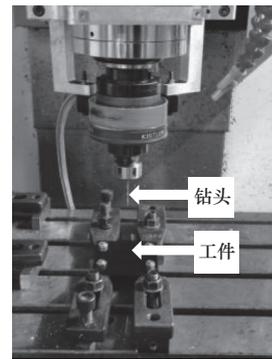


图 11 钻削试验现场

表 6 钻孔正交试验参数

	钻头直径 d/mm	切削速度 $v_c/(\text{m}/\text{min})$	进给量 $f/(\text{mm}/\text{r})$
1	4	40	0.02
2	4	70	0.05
3	4	100	0.08
4	10	40	0.05
5	10	70	0.08
6	10	100	0.02
7	16	40	0.08
8	16	70	0.02
9	16	100	0.05

2.2 试验结果及分析

使用 VHX-1000C 超景深三维显微放大镜（如

图 12 所示) 对将试验完成后的工件出口和入口处的破损及毛刺进行测量, 对采集的切屑进行宏观观察。

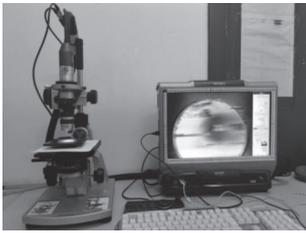


图 12 VHX-1000C 超景深三维显微放大镜

2.2.1 钻孔切屑及形成原因

由于碳纤维材料脆性强的特点, 在切削 CFRP 过程中由于受到挤压、拉伸、弯曲、剪切的作用, 碳纤维发生脆性断裂, 形成粉末状切屑。图 13 和图 14 分别为试验中采集切屑和仿真得到切屑样态。(钻削参数的选取为: 钻头直径为 16 mm, 切削速度为 100 m/min, 进给量为 0.05 mm/r。

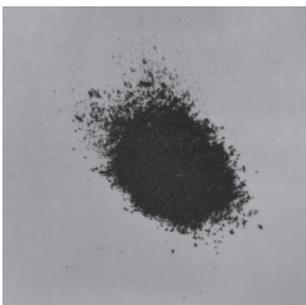


图 13 试验采集的切屑

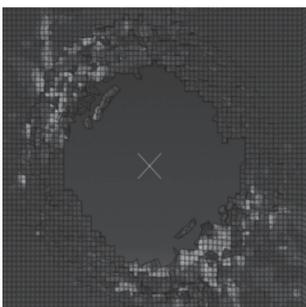


图 14 仿真得到切屑样态

2.2.2 孔入、出口处加工状况

根据正交试验所选参数钻削加工得到的孔的出、入口处的加工状况, 如图 15 和图 16 所示。由于钻头钻削出口位置时, 轴向力大于待切削材料层间结合力, 导致层合板弯曲变形出现毛刺甚至分层, 钻削质量较差, 使得孔的入口处加工质量远好于出口处的加工质量。

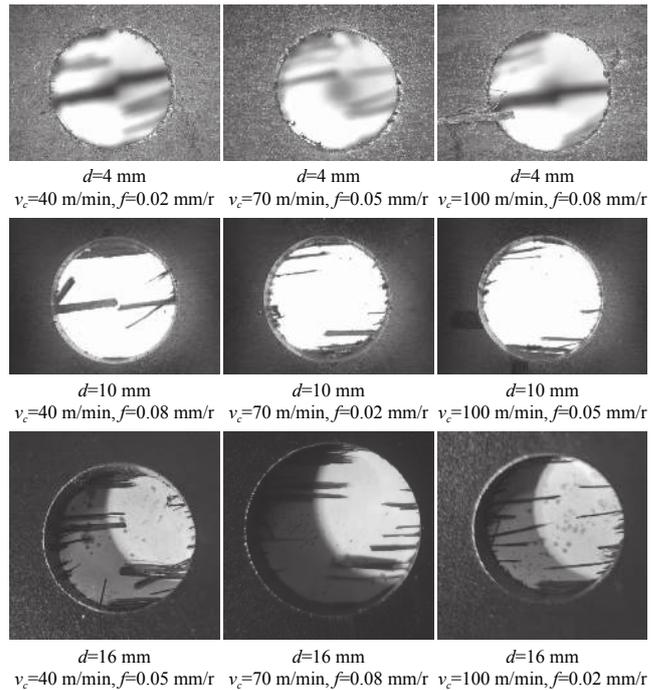


图 15 孔入口处毛刺损伤

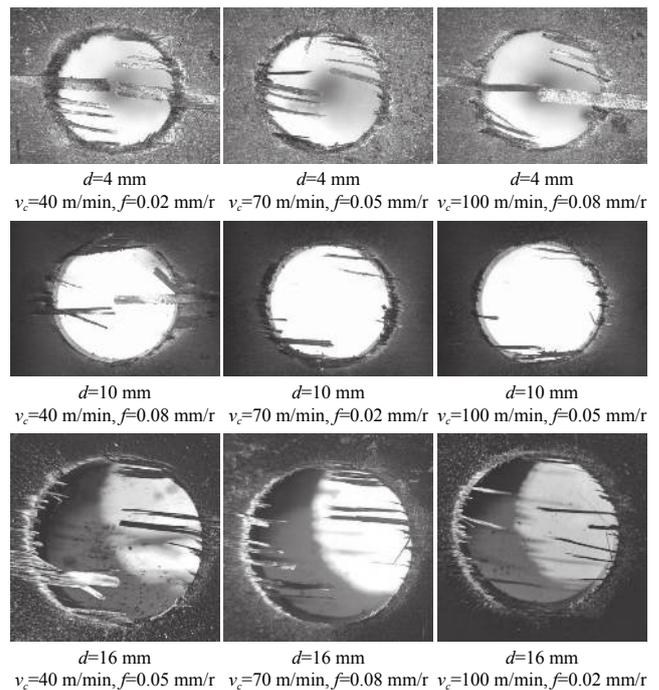


图 16 孔出口处毛刺损伤

3 孔加工损伤类型的仿真和试验对比

对于 T300 碳纤维复合材料钻孔加工, 易产生毛刺、分层和孔壁损伤等加工缺陷。其中分层缺陷是最常见的缺陷之一。此外, 在孔的出、入口处和孔壁的加工损伤会严重削弱结构的抗破坏性。

3.1 分层损伤

分层损伤是 T300 碳纤维复合材料钻孔加工最

常见的破损形式之一，常出现在孔出、入口处，还有一部分出现在孔壁附近。选取钻削参数为：钻头直径 $d=16\text{ mm}$ 、切削速度为 $v_c=40\text{ m/min}$ 、进给量 $f=0.08\text{ mm/r}$ 的钻削试验和仿真得到的分层现象进行对比，分别如图 17 和图 18 所示。分层损伤主要原因是树脂粘合层的粘度较小，对纤维层的粘着束缚力减少，在钻孔时，钻削轴向力大于层间粘着束缚力，材料层间出现分离，造成分层现象。除了钻削轴向力，在钻削时也会出现钻头与孔壁之间的摩擦，带动碳纤维层的旋转滑动，出现分层现象。

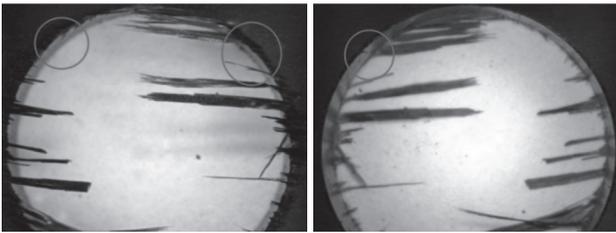


图 17 试验碳纤维复合材料钻削分层现象

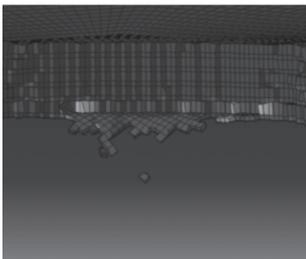


图 18 仿真碳纤维复合材料钻削分层现象

3.2 毛刺和撕裂

毛刺和撕裂损伤形式较为明显并且常见，主要出现在孔的出入口处，尤其在出口处较为常见。选取钻削参数为：钻头直径 $d=16\text{ mm}$ 、切削速度为 $v_c=100\text{ m/min}$ 、进给量 $f=0.05\text{ mm/r}$ 的试验与仿真进行对比，如图 19 为毛刺和撕裂的试验结果，图 20 为毛刺和撕裂的仿真结果。其产生原因为钻削时由于在钻削加工的过程，由于存在刀具的磨损，刀具切削刃的锋利程度不断降低以及转速较低等原因不能完全将纤维切断，这些纤维，随着钻头旋转，被瞬间撕开，形成毛刺和撕裂。

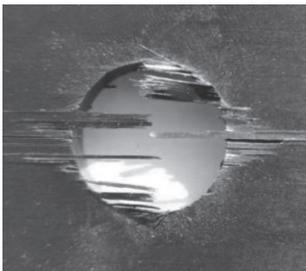
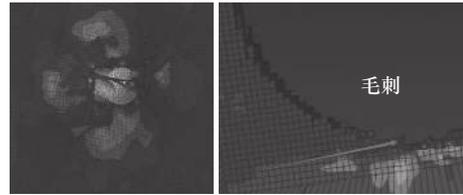


图 19 毛刺和撕裂的试验结果

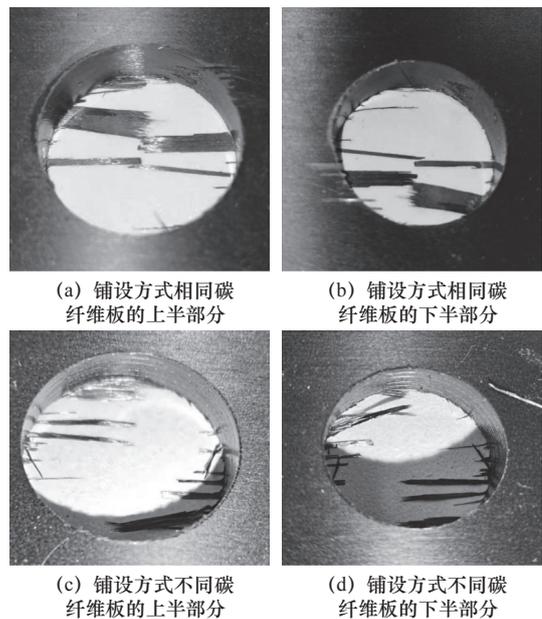


(a) 二维仿真图 (b) 三维仿真图

图 20 毛刺和撕裂的仿真结果

3.3 孔壁损伤

在钻削碳纤维复合材料的过程中，除了分层损伤，撕裂和毛刺，孔壁处常会出现微裂纹，而纤维取向角的方式排列是造成孔壁损伤的主要原因。图 21 为铺层方式全为 0° 和不同铺层方式的孔壁损伤情况比较。图 22 为孔壁损伤仿真结果（选取为钻削参数为：钻头直径 $d=16\text{ mm}$ 、切削速度为 $v_c=70\text{ m/min}$ 、进给量 $f=0.05\text{ mm/r}$ ）。在钻孔过程中，如 1.2 节所述，加工材料为同一种纤维取向角的方式排列，但由于钻头的切削方向发生变化，造成切削角度不同，导致同层孔壁的粗糙度不同，在同种铺层方式的碳纤维复合材料板上，在切削角度为



(a) 铺设方式相同碳纤维板的上半部分 (b) 铺设方式相同碳纤维板的下半部分 (c) 铺设方式不同碳纤维板的上半部分 (d) 铺设方式不同碳纤维板的下半部分

图 21 孔壁损伤的试验结果

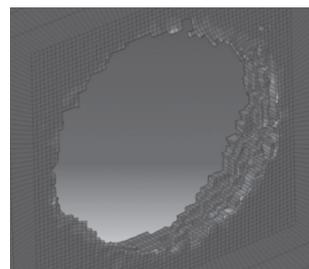


图 22 孔壁损伤的仿真结果

135°附近的孔壁损伤最为严重。而在采用不同铺层角度纤维板的孔壁损伤较小。此外,高温或者刀具磨损也会造成的孔壁损伤。

4 孔的出入口撕裂程度及孔径误差分析

为对钻孔出入口撕裂程度进行分析,使用最大撕裂即出入口撕裂的最大值对其进行表示,碳纤维复合材料钻孔后的出入口的撕裂示意图如图23所示,其中 ϕL 表示以钻孔中心到最大撕裂为半径为圆的直径, ϕD 为理想钻削加工下孔的直径,孔的最大撕裂值为最大撕裂值的直径 ϕL 减理想加工情况下孔的直径 ϕD 。

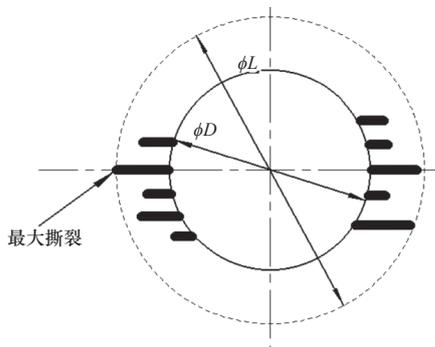


图 23 孔的最大撕裂示意图

4.1 孔出口处最大撕裂值分析

在进行碳纤维复合材料的钻削试验后,利用显微镜观察并测量出来出口处最大撕裂值,进行极差分析,如表7所示。由表7可知,钻削参数对出口处的最大撕裂值的影响程度为 $d > v_c > f$,即,钻头直径对出口处的最大撕裂值的影响最大,切削速度次之,进给量影响最小。当钻头直径选取4 mm、切削速度选取40 m/min和进给量选取0.02 mm/r时为最佳钻削参数。

4.2 孔入口处最大撕裂值分析

利用显微镜观察并测量入口处最大撕裂的数值,记录并作极差分析,如表8所示。由表8可知,钻削参数对入口处的最大撕裂值的影响程度为 $d > v_c > f$,即钻头直径对入口处的最大撕裂值的影响最大,切削速度次之,进给量影响最小,当钻头直径选取4 mm、切削速度选取40 m/min和进给量选取0.02 mm/r时为最佳钻削参数。

4.3 孔径尺寸误差值分析

以同样的方式,利用显微镜观察并测量出孔径尺寸,作极差分析,如表9所示。由表9可知,钻削参数对孔径尺寸误差的影响程度为 $d > f > v_c$,即,

钻头直径对孔径尺寸误差的影响最大,进给量次之,切削速度影响最小,当钻头直径选取4 mm、切削

表 7 孔出口处最大撕裂值正交试验结果及极差分析

序号	钻头直径 d/mm	切削速度 $v_c/(\text{m}/\text{min})$	进给量 $f/(\text{mm}/\text{r})$	出口处的最大 撕裂值/ μm
1	1	1	1	681.82
2	1	2	2	694.79
3	1	3	3	733.92
4	2	1	2	1 257.43
5	2	2	3	1 532.31
6	2	3	1	1 362.56
7	3	1	3	1 505.42
8	3	2	1	1 284.42
9	3	3	2	2 126.07
K_1	2 110.53	3 444.67	3 328.80	
K_2	4 152.30	3 511.52	4 078.29	
K_3	4 915.91	4 222.55	3 771.65	
k_1	703.51	1 148.22	1 109.60	
k_2	1 384.10	1 170.51	1 359.436	
k_3	1 638.63	1 407.52	1 257.22	
R	935.13	259.30	147.62	
因素	主→次	$d > v_c > f$		

本次试验的最优方案: $d_1 v_c f_1$

表 8 孔入口处最大撕裂值正交试验结果及极差分析

序号	钻头直径 d/mm	切削速度 $v_c/(\text{m}/\text{min})$	进给量 $f/(\text{mm}/\text{r})$	入口处的最大 撕裂值/ μm
1	1	1	1	214.73
2	1	2	2	260.76
3	1	3	3	278.64
4	2	1	2	281.11
5	2	2	3	365.64
6	2	3	1	289.96
7	3	1	3	526.06
8	3	2	1	502.75
9	3	3	2	624.31
K_1	754.04	1 021.90	1 007.44	
K_2	936.71	1 053.47	1 166.18	
K_3	1 653.12	1 192.91	1 170.34	
k_1	251.35	340.63	335.81	
k_2	312.24	351.16	388.73	
k_3	551.04	397.64	390.11	
R	299.69	57.01	54.30	
因素	主→次	$d > v_c > f$		

本次试验的最优方案: $d_1 v_c f_1$

速度选取 100 m/min 和进给量选取 0.02 mm/r 时为最佳钻削参数。

表 9 孔径尺寸误差正交试验结果及极差分析

序号	钻头直径 d/mm	切削速度 $v_c/(m/min)$	进给量 $f/(mm/r)$	孔径尺寸 误差值/ μm
1	1	1	1	2.30
2	1	2	2	7.36
3	1	3	3	8.74
4	2	1	2	184.93
5	2	2	3	189.04
6	2	3	1	181.24
7	3	1	3	365.59
8	3	2	1	355.58
9	3	3	2	360.78
K_1	18.40	552.82	539.12	
K_2	555.21	551.98	553.07	
K_3	1 081.95	550.76	563.37	
k_1	6.13	184.27	179.71	
k_2	185.07	183.99	184.36	
k_3	360.65	183.57	187.79	
R	354.52	0.7	8.08	
因素	主→次	$d > f > v_c$		

本次试验的最优方案： $d_1 v_c f_1$

5 结语

(1) 通过建立钻削 T300 碳纤维复合材料仿真模型，对钻削轴向力进行仿真，得到不同切削角度对钻孔质量的影响规律，切削角度为 135°附近的孔壁损伤最为严重。在钻削碳纤维复合材料过程中由于受到挤压、拉伸、弯曲和剪切的作用，碳纤维发生脆性断裂，形成粉末状切屑。

(2) 通过 T300 碳纤维复合材料的钻削仿真和试验结果分析，表明钻孔过程中易产生毛刺、分层和孔壁损伤等加工缺陷，孔出口处撕裂缺陷远大于孔入口处缺陷，即入口钻削质量要好于出口钻削质量。

(3) 钻削参数中对孔出口处撕裂值影响程度最大的是钻头直径，切削速度次之，进给量影响最小；对孔入口处撕裂值影响程度最大的是钻头直径，切削速度次之，进给量影响最小。而对孔径尺寸误差值影响程度最大的是钻头直径，进给量次之，切削速度影响最小。

参 考 文 献

[1] 安立宝, 张迎信. 碳纤维复合材料钻削仿真及轴向力预测[J]. 机械科

学与技术, 2018, 37(10): 1551-1558.

[2] 曹增强. 应对我国大飞机研制的装配连接技术[J]. 航空制造技术, 2009(2): 88-91.
 [3] Tsao C, Hong H C. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of polymer material[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(10): 1085-1090.
 [4] Gaitonde V N, Karnik S R, Rubio J C, et al. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2008, 203(1-3): 431-438.
 [5] 孙鸿洋, 李皓, 秦旭达, 等. 碳纤维复合材料钻孔加工表面影响层厚度研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 8(1): 1-6.
 [6] 林盛坤, 林有希, 林华. 碳纤维复合材料钻削孔分层影响分析[J]. 工具技术, 2015, 49(6): 30-36.
 [7] 李远霄, 焦锋, 张世杰, 等. 高低频复合振动钻削CFRP/钛合金叠层结构试验[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 344-357.
 [8] 王共冬, 种强, 周丽, 等. 铺层顺序对碳纤维复合材料钻削分层制孔的影响[J]. 航空制造技术, 2017(7): 101-104.
 [9] 贾振元, 毕广健, 王福吉, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料切削机理研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 199-208.
 [10] Onawumi P Y, Roy A, Silberschmidt V V, et al. Ultrasonically assisted drilling of aerospace CFRP/Ti stacks[J]. Procedia CIRP on SciVerse ScienceDirect, 2018, 77: 383-386.
 [11] Hussein R, Sadek A, Elbestawi M A, et al. Low-frequency vibration-assisted drilling of hybrid CFRP/Ti6Al4V stacked material[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(9): 2801-2817.
 [12] Jia Z, Chen C, Wang F, et al. Experimental study on drilling temperature and hole quality in drilling of carbon fiber reinforced plastic/titanium stacks[J]. Archive Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(13): 2662-2672.
 [13] Haszin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2): 329-334.
 [14] 张俊麒. 碳纤维复合材料钻削仿真试验研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.

第一作者: 王天宇, 男, 1997年生, 硕士研究生, 研究方向先进切削加工技术。E-mail: 1819492753@qq.com

通信作者: 金成哲, 男, 1971年生, 工学博士, 教授, 研究方向为先进切削加工技术和数控装备设计及应用, 辽宁省百千万人才工程千人入选, 已发表论文 60 余篇。E-mail: jinchengzhe71@163.com

(编辑 高扬)

(收稿日期: 2022-03-30)

文章编号: 20220808

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。