DOI: 10.3901/JME.2021.01.199

基于运动学及力热分析的CFRP超声振动辅助 螺旋铣孔质量影响机制*

陈 光^{1,2} 刘 见¹ 戈家影¹ 秦旭达^{1,2} 邹云鹤¹ 任成祖^{1,2}

(1. 天津大学教育部机构理论与设备设计重点实验室 天津 300354;
2. 天津大学天津市装备设计与制造技术重点实验室 天津 300354)

摘要: 碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer/plastic, CFRP)因其较高的比强度、耐腐蚀性、耐疲劳性等优异性能,被广泛应用于航空航天领域,但作为各向异性的难加工材料,制孔过程易产生损伤。针对 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔质量为研究内容,首先建立了轴向超声辅助螺旋铣孔的运动学方程,对与孔壁接触的侧刃的切削轨迹、速度、超声辅助螺旋铣孔过程侧刃的有效前角进行了求解。分析了有无超声振动条件下 CFRP 孔表面的纤维断裂及材料去除机理,在切削角度为 0~45° 范围内,螺旋铣纤维主要承受拉伸应力,而超声辅助螺旋铣条件下纤维承受变向剪切作用,纤维易断裂且与基体脱粘现象显著降低。此外,研究了工艺参数(轴转速、螺距、切向每齿进给量)对 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔切削力和切削温度的影响规律。结合切削力、热、切削刃与刀具的相对位移、运动速度及有效前角的变化,分析了工艺参数对毛刺、分层损伤及出入口孔径的影响机制。研究表明由于超声振动的存在,工艺参数影响刀具与工件的接触及分离属性、刀具的有效前角,从而影响切削过程中的力、热的变化,进而影响制孔质量。

关键词: CFRP 复合材料; 超声振动; 螺旋铣孔; 工艺参数; 制孔质量

中图分类号: TG156

Experimental Study on Ultrasonic Vibration Helical Milling of CFRP Based on Kinematic and Thermal-mechanical Analysis

CHEN Guang^{1,2} LIU Jian¹ GE Jiaying¹ QIN Xuda^{1,2} ZOU Yunhe¹ REN Chengzu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300354;
2. Tianjin Key Laboratory of Equipment Design and Manufacturing Technology,
Tianjin University, Tianjin 300354)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer/plastic (CFRP) composites are widely used in aerospace industry because of high specific strength, corrosion resistance, fatigue resistance and other excellent properties. However, as typical anisotropic difficult-to-cut material, damage easily occurred in the hole-making of CFRP. This work focused on the quality of hole-making process, kinematic equations for ultrasonic vibration assisted helical milling (UVHM) are established, and the movement trajectory, cutting speed and equivalent rake angle of peripheral edge are studied. Fiber damage and material removal mechanism with or without ultrasonic vibration in HM is investigated. It is found that within the range of 0-45° cutting angle, fibers mainly bear the tensile stress in helical milling, while in UVHM, fibers bear mainly shearing stress with variable directions, which make the fiber fracture easily and the debonding between the fiber and resin is reduced accordingly. The effects of spindle speed, axial and tangential feeds on the cutting temperature and forces in UVHM are also investigated. Based on the variation of cutting force, temperature, the relative movement, speed between the cutting edge and fibers, and the equivalent rake angle, the influence mechanism of process parameters on the bur formation, delamination, and hole diameter was investigated. Due to ultrasonic vibration, the processing parameters affect the

* 国家自然科学基金资助项目(51575384、51675369)。20200205 收到初稿,
20200713 收到修改稿

tool-workpiece contact behaviors, tool equivalent rake angle, leading to the variation of outting heat, forces, and finally, the quality of machined holes.

Key words: CFRP composites; ultrasonic vibration; helical milling; process parameters; hole quality

0 前言

碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer/plastic, CFRP)拥有比强度高,良好的耐腐蚀性及耐疲劳性等优异的性能,被广泛应用于航空航天、汽车、体育器械等领域^[1]。CFRP 作为零部件使用时,需要加工大量的孔以实现与其他结构件的机械连接,而多数航空零部件疲劳失效发生于孔连接处^[2]。CFRP 作为各向异性的难加工材料,在孔的加工过程中,常出现的损伤包括孔进出口处的毛刺、撕裂损伤,纤维层间分层损伤^[3],此外,在孔的已加工表面会经常出现纤维拔出、纤维脱粘、树脂基降解等表面损伤^[4],CFRP 制孔技术越发展成为各国迫切发展提高的一项关键技术。

传统的钻孔因其较高的切削力、较差的散热排屑情况,CFRP 孔质量一般较差^[5-6]。近年来,超声振动辅助加工应用于 CFRP 孔的加工中,GENG 等^[7-8]采用固结磨料工具将旋转超声椭球振动和旋转超声螺旋进给磨削技术应用到 CFRP 制孔过程,两种振动辅助磨削工艺能够有效降低切削力,改善孔的加工损伤。MAKHDUM 等^[9]进行了 CFRP 超声振动辅助钻孔对比实验,与传统的钻孔相比,超声振动钻孔的轴向力下降 60% 以上,分层显著减少,切屑呈连续的并且表现出脆性到韧性转变。ISHIDA 等^[10]采用超声振动辅助螺旋铣和低温刀具冷却的混合工艺对 CFRP 进行孔加工,发现振动能减少轴向推力,并能抑制分层损伤。高航等^[11]分析了超声振动辅助螺旋铣孔的加工原理,研究了加工参数对切削力、切屑以及孔的质量的影响规律。CHEN 等^[12]将超声振动辅助螺旋铣应用到钛合金制孔的研究中,建立了制孔过程材料的去除模型,发现超声振动辅助螺旋铣孔工艺能够降低轴向力,降低孔壁的粗糙度。对于金属材料超声振动主要通过切削刃与工件材料的相对运动改变材料的去除方式,实现切削力的降低及孔加工表面特定的物理力学性能^[13]。CFRP 作为各项异性材料,其切削加工性能与纤维切削角度具有直接关系。AN 等^[14]采用单向编织的 CFRP 材料的正交切削试验分析了纤维切削角度对纤维的断裂机理的影响机制。相比于传统切削过程,超声振动可以改变刀具与工件表面的接触状态、瞬时速

度、刀具与纤维的等效接触前角。因此,研究超声振动辅助螺旋铣孔机理、纤维的去除机制对于提高 CFRP 制孔质量具有积极的意义。超声辅助螺旋铣孔工艺条件下 CFRP 材料去除、制孔质量与切削刃与纤维及基体的相对运动直接相关。而目前尚无 CFRP 超声辅助螺旋铣孔工艺参数对刀具与工件相对运动以及材料去除影响的相关研究。

本文首先对超声振动辅助螺旋铣运动学进行建模分析,结合不同工艺参数条件下 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔试验研究,对 CFRP 超声辅助螺旋铣孔过程的切削力、热进行分析,揭示工艺参数对制孔质量的影响机制。

1 超声振动螺旋铣孔运动学分析

1.1 超声振动辅助螺旋铣运动学分析

如图 1a 所示,超声振动辅助螺旋铣是在螺旋铣加工过程中通过超声设备对刀具施加高频的轴向振动,为了研究超声振动辅助螺旋铣中切削刃的切削行为,以加工孔中心和刀具中心建立了坐标系,如图 1b 所示。以刀具侧刃和底刃的交点 P 为参考点,任意时刻 t 参考点 P 在螺旋铣过程中的坐标可由式(1)获得。引入轴向振动后,超声振动螺旋铣 P 点运动轨迹 x, y 坐标与螺旋铣坐标相同, z 坐标见式(2)。

图 1 轴向超声振动辅助螺旋铣示意图

$$\begin{cases} x_{\text{HM}} = \frac{D_t}{2} \cos\left(\frac{2\pi n_{\text{rot}} t}{60}\right) + e \cos\left(\frac{2\pi n_{\text{rev}} t}{60}\right) \\ y_{\text{HM}} = \frac{D_t}{2} \sin\left(\frac{2\pi n_{\text{rot}} t}{60}\right) + e \sin\left(\frac{2\pi n_{\text{rev}} t}{60}\right) \\ z_{\text{HM}} = -f_a t + h \end{cases} \quad (1)$$

$$z_{\text{UVHM}} = -f_a t + h + A \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

式中, D_t 为刀具的直径; e 为刀具中心和孔中心的偏心距; n_{rot} 为刀具的自转转速; n_{rev} 为刀具的轨道公转转速; f_a 为刀具轴向进给速度; h 为参考点初始位置在轴向方向上的坐标。在超声振动螺旋铣中, 由于轴向振动的存在, 在轴向方向上参考点在保持固定速度进给的同时, 以振幅 A 和频率 f 进行周期性振动。

由式(1)和(2)可得到螺旋铣和超声振动辅助螺旋铣切削刃参考点 P 的运动轨迹, 如图 1c 所示。螺旋铣削过程存在刀具自转及螺旋进给运动, P 点轨迹为一条平滑空间曲线; 超声辅助螺旋铣削条件下, 由于引入轴向高频振动, 以螺旋铣削 P 点轨迹线为中心呈现周期性正弦波动, 其中 $n_{\text{rot}}=6\,000\text{ r/min}$, $n_{\text{rev}}=76.43\text{ r/min}$, $D_t=6\text{ mm}$, $e=2\text{ mm}$, $f_a=11.46\text{ mm/min}$, $A=4\text{ }\mu\text{m}$, $f\approx 35\text{ kHz}$ 。

1.2 切削刃侧刃运动学分析

在螺旋铣孔的加工过程中, 孔壁材料的微观形貌主要与侧刃与孔壁的相对运动有关, 如图 2a 所示。因此, 需要对侧刃的运动轨迹及速度进行建模分析。为准确获得侧刃的瞬时切削速度, 依据侧刃运动轨迹建立二维坐标系 soz , 其中 os 方向为侧刃轨迹在 xy 平面投影沿其切线方向的展开, oz 方向为刀具轴线方向, 如图 2b 所示。根据图 2c 的几何关系, 侧刃沿 os 方向的瞬时速度表达为^[12]

(a) 侧刃去除材料示意图

(b) 侧刃速度分解示意图

(c) 侧刃周向速度求解示意图

图 2 soz 平面中侧刃去除材料和切削速度示意图

$$\begin{cases} v_s = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2 \cos \varphi} \\ v_1 = \omega_1 e \\ v_2 = \omega_2 r \\ \omega_1 = 2\pi n_{\text{rev}}/60 \\ \omega_2 = 2\pi n_{\text{rot}}/60 \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_s 为侧刃瞬时速度; v_1 为刀具中心的公转转速; v_2 刀具自转转速; ω_1 为公转角速度; ω_2 自转角速度; $r(=3\text{ mm})$ 为刀具半径; φ 为 t 时刻刀具轨道公转速度 v_1 和刀具自转速度 v_2 之间的夹角; 本文中 $e=2\text{ mm}$ 。

刀具的轨道公转转速 n_{rev} 可通过式(4)获得

$$n_{\text{rev}} = \frac{Z n_{\text{rot}} f_{zt}}{2\pi e} \quad (4)$$

式中, Z 为刀具的齿数, $Z=4$ 。在 soz 坐标系下, 切削刃侧刃的运动轨迹可表示为

$$\begin{cases} s = \int_0^t v_s dt \\ z = -\frac{Z n_{\text{rot}} a_p f_{zt} t}{120\pi e} + A \sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (5)$$

式中, a_p 为公转运动的螺距; f_{zt} 为切向每齿进给量。

为了研究侧刃对材料的作用情况, 将侧刃的速度分解为沿侧刃方向的速度 v_{T_h} 和垂直于侧刃方向的速度 v_{T_t} , 如图 2b 所示。通过速度分解可求得侧刃沿侧刃以及垂直于侧刃方向的速度。

$$\begin{cases} v_{T_h} = v_s \sin \delta - v_z \cos \delta \\ v_{T_t} = v_s \cos \delta + v_z \sin \delta \end{cases} \quad (6)$$

式中, δ 为刀具侧刃的螺旋角, $\delta=38^\circ$ 。 v_z 为侧刃沿 OZ 方向的速度, 可通过对式(5)求导进行计算, 即

$$v_z = \frac{dz}{dt} = -\frac{Z n_{\text{rot}} a_p f_{zt}}{120\pi e} + 2\pi f A \cos(2\pi f t) \quad (7)$$

在实际的加工过程中, 侧刃切削过程可视为斜角切削过程, 切削过程刀具的实际前角发生了变化, 称为有效前角。根据 STABLER 的研究^[15], 有效前角 α_e 可表达为

$$\sin(\alpha_e) = \sin^2(i) + \cos^2(i) \sin(\alpha_n) \quad (8)$$

式中, α_n 为侧刃的法向前角, $\alpha_n=5^\circ$; i 为切削过程中切削刃的倾斜角, 是侧刃和与合速度垂直的平面 P_n 之间的夹角, 由实际加工过程中侧刃运动情况决定, 如图 3 所示。在螺旋铣中, 侧刃按直线运动, 倾斜角为定值, 在超声振动辅助螺旋铣中, 侧刃随着运动轨迹时刻改变, 倾斜角可由式(9)计算

$$\begin{cases} i = \delta - \gamma \\ \tan \gamma = \frac{v_z}{v_s} \end{cases} \quad (9)$$

式中, γ 为合速度方向角。

图 3 侧刃实际倾斜角示意图

2 试验方案

2.1 超声振动辅助螺旋铣孔试验材料及装置

试验所用的 CFRP 复合材料层合板是由 40 层单向预浸料按照 $[45^\circ/0^\circ-45^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]_2$ 的角度逐层排布的, 每层预浸料的厚度为 0.125 mm, 工件的厚度为 5 mm。

图 4 试验装置

试验装置如图 4 所示, 超声振动设备安装固定在 DMU60 mono BLOCK® 五轴立式加工中心的主轴上, 超声振动设备产生振动的频率为 35 kHz 左右, 振幅通过激光位移传感器测得为 4~6 μm 。测

力仪(Kistler®9257A)被固定在机床上, CFRP 工件通过螺丝紧固在专用夹具后一同安装在测力仪上, 然后通过电荷放大器(5070)及 A/D 转换器, 连接笔记本, 试验过程中利用 Labview 软件实时测量螺旋铣孔过程中的切削力、切削温度。为了消除碳纤维切屑对机床及工作人员产生不良的影响, 采用工业吸尘器吸附加工过程中的切屑。

在接近孔的出口处, 利用的 K 型(OMEGA™)热电偶测量切削温度, 在保证不破坏工件结构强度的情况下, 温度测量点设置在距离孔的出口上方 1.6 mm 处, 距离孔壁 0.5 mm, 热电偶安装孔径 1.1 mm, 利用氧化铜无机胶固定, 如图 5 所示。

图 5 测温点示意图

2.2 CFRP 有无超声振动螺旋铣孔质量对比

螺旋铣和超声振动辅助螺旋铣两种工艺条件下 CFRP 加工孔的质量如图 6 所示, 其中 $n_{\text{rot}}=6\,000\text{ r/min}$, $a_p=0.15\text{ mm/r}$, $f_{\text{zt}}=0.04\text{ mm/r}$, $A=4\text{ }\mu\text{m}$, $f=35\text{ kHz}$ 。

图 6 螺旋铣与超声振动螺旋铣孔质量对比

在螺旋铣中, 孔出口处存在分层损伤, 在孔壁

加工表面,纤维与速度方向的夹角 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 范围内纤维有脱粘现象,在超声振动螺旋铣中,未看见明显的分层现象,且在相同位置的孔壁加工表面,纤维与树脂间更加致密。图 6 所示条件螺旋铣的轴向力为 44.5 N, 超声振动螺旋铣的轴向力为 28.7 N。振动的存在降低了轴向力,有利于减小分层损伤。第 1.2 节通过运动学分析得到了超声振动辅助螺旋铣中侧刃的运动轨迹、速度及有效前角的模型。有效前角随振动周期性的变化使纤维受力方向发生变化。此外,如图 6c、6d 所示,螺旋铣削条件下,纤维主要承受拉伸应力,产生拉伸断裂;而在超声振动螺旋铣削条件下,周期性的刀具振动会使纤维产生变向剪切作用,从而使得纤维更容易断裂,不易产生纤维与基体的剥离作用。

以上分析了超声振动对 CFRP 制孔质量的影响。工艺参数与振动参数的结合直接影响切削刃与工件的相对运动及切削行为,选择合理的螺旋铣削工艺参数对提高 CFRP 超声振动螺旋铣孔质量具有重要的意义。

2.3 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔试验工艺参数

根据式(3)和式(9)可知,自转速度远远大于公转速度,超声振动辅助螺旋铣中侧刃的周向速度和有效前角主要由自转转速决定。因此,主轴转速是影响切削刃切削行为的重要参数。

根据切削刃运动学分析结果,研究主轴转速、螺距和切向每齿进给量对切削力、切削温度以及孔的加工质量的影响,具体的工艺参数如表 1 所示。试验为单因素试验,每个试验条件重复三次,每组重复试验均采用新刀以消除刀具磨损对实验结果的影响。

表 1 超声辅助螺旋铣孔工艺参数

试验序列	主轴转速 $n_{\text{rot}}/(\text{r}/\text{min})$	螺距 $a_p/(\text{mm}/\text{r})$	切向每齿进给量 $f_{\text{zt}}/(\text{mm}/\text{r})$
1	2 000	0.15	0.04
2	3 000	0.15	0.04
3	4 000	0.15	0.04
4	5 000	0.15	0.04
5	7 000	0.15	0.04
6	5 000	0.10	0.04
7	5 000	0.20	0.04
8	5 000	0.25	0.04
9	5 000	0.30	0.04
10	5 000	0.15	0.02
11	5 000	0.15	0.03
12	5 000	0.15	0.05
13	5 000	0.15	0.06

3 切削力与切削温度的结果与讨论

3.1 工艺参数对 CFRP 超声振动辅助螺旋铣切削力的影响

计算三次试验加工过程中平稳阶段的 XY 平面合力和轴向力的平均值和标准差,XY 平面合力由式(9)计算得到,不同主轴转速、切向每齿进给量、螺距的切削力如图 7 所示。

图 7 不同工艺参数条件下的切削力

$$F_c = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (10)$$

由图 7a 可知,随着主轴转速的增加,水平合力平缓的增加,轴向力比水平合力大,随着转速的增加,轴向力增加后降低。轴向力随着主轴转速的持续增加出现下降的趋势,是因为主轴转速增加能够增加进给速度,减小了“刀-工件”的接触时间。

根据螺旋铣削运动几何关系,轴向每齿进给量 f_{za} 与螺距及切向每齿进给量之间满足关系

$$f_{za} = \frac{a_p f_{zt}}{2\pi e} \quad (11)$$

图 8 为螺旋铣削工艺不同参数条件下刀具旋转一周的材料去除体积示意图。由图 8b、8c 及式(11)可知,随着螺距的增加,轴向每齿进给量增大;随着切向每齿进给量的增加,轴向每齿进给量增大。由于螺距和切向每齿进给量的增加分别增大了切削刃每转在轴向和周向方向上未变形切屑的厚度^[16],加工过程中的水平合力和轴向力均呈增加的趋势。由表 1 所示,切向进给 0.04 mm/r 条件为第 4 个加工孔,刀具磨损略小于其他切向进给条件,故轴向力略小于整体趋势。

图 8 不同工艺条件下材料去除体积

在低转速时,随着主轴转速的增加,轴向力小幅度增加是切削刃的固有速度和振动速度之间的关系决定的。通过式(6)计算不同主轴转速的侧刃速度,当主轴转速为 2 000 r/min 时,由图 9a 可知,在每个振动周期内,垂直于侧刃的速度(v_{T_t})和平行于侧刃的速度(v_{T_h})均有一段时间内速度为负的情况(Δt_1 、 Δt_2),反映了切削刃和材料有短暂的分离的情况发生,所以切削力比较小。随着主轴转速的增加,如图 9b、9c 中的 3 000 r/min 和 4 000 r/min 时,这种短暂分离的情况逐渐消失,切削刃始终处于去除材料的状态,此时的切削力会增加,但随着速度的逐渐增大,切削温度升高会导致轴向力逐渐减小。

图 9 不同主轴转速侧刃的实际切削速度

3.2 工艺参数对 CFRP 超声振动辅助螺旋铣切削温度的影响

在获取孔的出口上方 1.6 mm 处温度信号时,借助轴向力的结果(图 10),其中 $n_{rot}=3\ 000\text{ r/min}$, $a_p=0.15\text{ mm/r}$, $f_{zt}=0.04\text{ mm/r}$ 。当开始加工时,切削刃底刃接触到材料,轴向力突然上升(图 10a),当轴向力为 0 时(图 10c),切削刃底刃不再去除材料,铣刀到达工件底面。识别温度信号时,以工件底面为基准,通过每个参数条件下的轴向进给速度和轴向力为 0 时的信号采样点,可以较准确地求解出孔的出口上方 1.6 mm 处温度信号采样点(图 10b)。

图 10 轴向力及测温结果

不同工艺参数下切削温度结果如图 11 所示。

(a) 主轴转速

(b) 螺距

(c) 切向每齿进给量

图 11 不同工艺参数条件下的切削温度

随着主轴转速的增加, 切削温度先升高, 因为增加了刀具和工件材料的总的接触面积, 摩擦作用产生的切削热更多, 在 CFRP 钻孔的研究中也能发现相同的情况^[6]。此外, 由式(4)、(12)可知, 随着转速进一步升高, 温度出现了轻微下降的趋势, 在保持螺距和切向每齿进给量不变的情况下, 主轴转速的增加会提高刀具的轴向进给速度 f_a , 由于加工孔轴向深度一定, 刀具-工件间接触时间降低, 加工过程积累的切削热也随之降低。

$$f_a = a_p n_{\text{rev}} = \frac{a_p Z n_{\text{rot}} f_{\text{zt}}}{2\pi e} \quad (12)$$

图 11b、11c 的结果显示随着螺距和切向每齿进给量的增加, 温度随着两者的增加都呈现降低的趋势。根据螺旋铣的轴向进给速度计算公式(12), 螺距和切向每齿进给量的增加会增加刀具的轴向进给速度, 减少刀具和工件材料间的接触时间和摩擦产生的切削热的累积, 所以切削温度随着螺距和切向每齿进给量的增加呈减小的趋势。

此外, 结合图 7 切削力的结果可知, 随着工艺参数的变化, 轴向力的变化趋势和温度的变化趋势基本相反, 这是因为在较低的切削温度时, 树脂基体的强度高, 需要更高的切削力, 而当温度升高时树脂强度降低, 切削力也会降低。

4 制孔质量的结果与讨论

4.1 工艺参数对 CFRP 超声振动辅助螺旋铣毛刺损伤的影响

不同工艺参数下的孔入口和出口的形貌采用 Keyence™ VHX-2000 超景深显微镜观察, 结果如图 12 所示。

孔的出口处毛刺损伤比入口处更严重。随着主轴转速的增加, 根据图 12a, 毛刺损伤无没有明显的变化。由图 12b、12c 可知, 随着螺距和切向每齿进给量的增加, 毛刺损伤均变的严重。由不同条件下侧刃和底刃的材料去除体积可知(图 8), 螺距和切向每齿进给量的增加会增大材料去除体积, 切削力随之增加, 从而导致切削刃对纤维的撕扯作用加剧。

(a) 主轴转速

图12 不同工艺参数条件下的毛刺损伤

不同转速条件下,入口和出口毛刺情况无明显区别,由式(4)~(9),计算不同转速条件下侧刃的运动轨迹和有效前角,结果如图13、14所示,其中 $a_p=0.15$ mm/r, $f_a=0.04$ mm/r, $A=4$ μ m, $f=35$ kHz。在低转速条件下,尽管轴向力比较大,但在相同的时间内,振动的轨迹更加“陡峭”,相应的,随着振动轨迹的变化,侧刃有效前角周期性的范围变化随之变大,周期内最大的有效前角接近 90° 。有效前角的增大使切削刃更加锋利,在毛刺损伤的区域内,纤维主要为拉伸断裂,而纤维的拉伸强度高,不易断裂,有效前角的增大有利于纤维发生剪切断裂,纤维的剪切强度更低,容易断裂,所以在低转速条件下毛刺损伤现象不明显。高转速时,在较小的轴向力下,对纤维的撕扯作用较小。此外,在CFRP螺旋铣孔的研究中^[17],转速的提高会增加对纤维的剪切作用。依据有效前角的计算公式,主轴转速对侧刃有效前角有影响,轴向进给及切向进给对有效前角的计算无明显的影响。

图13 不同主轴转速的侧刃轨迹

图14 不同主轴转速的侧刃有效前角

4.2 工艺参数对CFRP超声振动辅助螺旋铣孔分层损伤的影响

通过超声C扫装置测量不同工艺参数下的分层损伤,如图15所示。由式(13)计算不同工艺参数下超声振动辅助螺旋铣孔的分层因子。

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D_0} \quad (13)$$

式中, F_d 为分层因子; $D_{\max}$ 为分层损伤区域的最大直径; D_0 加工孔的名义直径。

图15 超声C扫测量结果

计算三次试验不同工艺参数分层因子的平均值和标准差,结果如图16所示。结合切削力和切削温度的结果分析分层损伤的情况,由图16a看出,分层因子随着主轴转速的增加而降低。由第4.1节有效前角的计算可知(如图14所示),随速度增大,侧刃有效前角的最大值由 88° 减小至 55° 。此外,一个振动周期内,有效前角小于 10° 的切削时间随速度的增大而减小。以上变化会周期性的影响侧刃锋利程度,进而影响分层损伤。而相同主轴转速条件下,最大有效前角不随轴向进给、切向每齿进给量变化而变化。由图16b结果可知,分层因子随着螺距的增加先是平缓的增加,到 0.3 mm/r时急剧增加,这主要和材料去除体积及轴向力增加有关,该条件出入口毛刺也由于材料去除体积的增大而变得更严重。图16c显示了分层因子随着切向每齿进给量增加在 $1.65\sim 1.8$ 范围略有降低。综上,CFRP的分层与切削刃的锋利程度、材料去除体积有关,而这些参数

的变化则会综合影响 CFRP 超声辅助螺旋铣孔过程中的切削力、切削热的变化。因此, 需要通过调节工艺参数实现对刀具有效前角及材料去除量的控制, 进而对切削力、热进行控制, 减小分层损伤。

图 16 不同工艺参数条件下的分层因子

4.3 工艺参数对 CFRP 超声振动辅助螺旋铣孔径的影响

利用三坐标测量仪对孔径进行测量, 测量位置为距离入口和出口 1 mm 处, 每个圆周上取八个点, 三次试验不同工艺参数孔径的平均值和标准差结果

如图 17 所示。

图 17 不同工艺参数条件下的孔径

孔的入口直径大于出口直径, 孔径均小于名义直径, 主要和螺旋铣孔的运动规律及工件弹性变形有关。刀具中心因公转运动绕螺旋线进给, 相邻的两个切削刃会在孔壁上形成微小的凸起纹理^[18], 因此孔径小于名义直径。图 17a 显示了随着主轴转速增加, 孔径先变小后变大。一方面切削速度的变化会引起侧刃有效前角大小及周期性分布的变化, 参见第 4.2 节讨论内容; 另一方面由图 9 所示, 在转速为 2 000 r/min, 3 000 r/min 时, 侧刃沿切削刃的速度最小值存在 $v_{T_h_min} < 0$ 的情况, 表明侧刃存在沿

切削刃方向(图 2b)的往复移动,这种往复移动有利于去除孔表面的微小凸起,从而使孔径增大,这也与图 17a 中结果一致。此外,孔径在高速条件下的增大还与切削力的减小及温度的升高有关。图 17b 显示了随着螺距的增加,孔径变小。主轴转速和螺距对于孔径误差的影响很小,变化规律和切削力基本一致,因为径向切削力会使刀具发生变形。如图 17c 所示,随着切向每齿进给量的增加,孔径变小的范围更大,除了切削力的升高使刀具发生变形的因素之外。切向每齿进给量的增加还会使相邻的两个切削刃在孔壁上形成的凸起纹理升高,孔径随之减小^[18],误差增大。综上,CFRP 超声辅助螺旋铣孔的孔径误差的变化主要与切削刃的有效前角及刀具与工件的几何运动轨迹有关。

5 结 论

(1) 分析了有无振动条件下螺旋铣切削刃的运动学机理及制孔质量的差别,超声振动辅助螺旋铣速度、轨迹及有效前角的周期性改变提高了 CFRP 制孔质量。

(2) 随着主轴转速的增加轴向力先增加后减小,在低转速条件下,超声振动侧刃在加工过程中出现速度为负的情况,即切削刃与材料存在分离的现象,随着转速的增加,这种现象消失。随着螺距和切向每齿进给量的增加,未变形切屑厚度增加,切削力随之增加。

(3) 随着主轴转速的增加温度先增加后下降,转速的提高增加刀具与材料间的摩擦热,同时也提高了进给速度,降低了刀具与材料间的接触时间,温度呈现一定程度下降。随着螺距和切向每齿进给量的增加,进给速度的增加降低了刀具与材料接触的时间,出现了温度下降的趋势。

(4) 孔的出口比入口毛刺损伤严重。在低转速条件下,超声振动使切削刃运动轨迹更加“陡峭”,振动周期内的最大有效前角接近 90° ,切削刃对纤维的剪切作用增强,降低了毛刺损伤。在高螺距和切向每齿进给量条件下,切削力的增加使刀具对纤维的撕扯作用增加,毛刺现象变得严重。

(5) CFRP 超声辅助螺旋铣孔分层与切削刃的锋利程度、材料去除体积有关。随速度的增加,侧刃最大有效前角减小,振动周期内,较小有效前角($<10^\circ$)的切削时间减小,分层损伤呈减小的趋势。

(6) 孔的入口直径大于出口直径,孔径均小于名义直径。超声振动螺旋铣削条件下,孔径变化与

有效前角的变化、切削力以及刀具与工件的相对运动有关;超声振动引起的侧刃沿切削刃方向的往复移动有利于去除孔表面材料、增大孔径。

参 考 文 献

- [1] HELMY M O, EL-HOFY M H, EL-HOFY H. Effect of cutting fluid delivery method on ultrasonic assisted edge trimming of multidirectional CFRP composites at different machining conditions[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 68: 450-455.
- [2] 李春奇,殷俊,傅玉灿,等. 航空叠层材料制孔技术研究现状与发展趋势分析[J]. *机械制造与自动化*, 2015, 44(3): 24-26.
LI Chunqi, YIN Jun, FU Yucan, et al. Research status and trend analysis of hole making technology of aeronautic stacked materials[J]. *Mechanical Manufacturing and Automation*, 2015, 44(3): 24-26.
- [3] 汪海晋. 树脂基复合材料钻削缺陷产生机理与控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
WANG Haijin. Investigation on generation mechanism and control strategy of defect in drilling of resin-based composite materials[D]. Jinan: Shandong Univeristy, 2016.
- [4] 周磊,罗卫强,楚英,等. 碳纤维增强复合材料钻削在不同切削方向角下的孔壁质量分析[J]. *机械设计与研究*, 2018, 34(4): 119-122.
ZHOU Lei, LUO Weiqiang, CHU Ying, et al. Study on hole wall quality of carbon fiber reinforced composites drilling under different cutting angles[J]. *Mechanical Design and Research*, 2018, 34(4): 119-122.
- [5] 陈明,邱坤贤,秦声,等. 高强度碳纤维增强复合材料层合板的钻削制孔过程及其缺陷形成分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(5): 667-674.
CHEN Ming, QIU Kunxian, QIN Sheng, et al. Study on drilling behaviors and defects forming process of high-strength CFRP laminates[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(5): 667-674.
- [6] WEINERT K, KEMPMANN C. Cutting temperatures and their effects on the machining behavior in drilling reinforced plastic composites[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(8): 684-689.
- [7] GENG Daxi, LU Zhenghui, YAO Guang, et al. Cutting temperature and resulting influence on machining performance in rotary ultrasonic elliptical machining of

- thick CFRP[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 123: 160-170.
- [8] GENG Daxi, TENG Yunda, LIU Yihang, et al. Experimental study on drilling load and hole quality during rotary ultrasonic helical machining of small-diameter CFRP holes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 270: 195-205.
- [9] MAKHDUM F, JENNINGS L T, ROY A, et al. Cutting forces in ultrasonically assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics[C]//Journal of Physics Conference Series. 2012.
- [10] ISHIDA T, NOMA K, KAKINUMA Y, et al. Helical milling of carbon fiber reinforced plastics using ultrasonic vibration and liquid nitrogen[J]. Procedia CIRP, 2014, 24: 13-18.
- [11] 高航, 孙超, 王焱. 复合材料超声辅助螺旋铣削试验研究[J]. 航空制造技术, 2016(3): 16-20.
- GAO Hang, SUN Chao, WANG Yan, Ultrasonic assisted helical milling experiment study on composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(3): 16-20.
- [12] CHEN Guang, REN Chengzu, ZOU Yunhe, et al. Mechanism for material removal in ultrasonic vibration helical milling of Ti-6Al-4V alloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 138: 1-13.
- [13] YANG Haojun, DING Wenfeng, CHEN Yan, et al. Drilling force model for forced low frequency vibration assisted drilling of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 146: 103438.
- [14] AN Qinglong, CAI Chongyan, CAI Xiaojiang, et al. Experimental investigation on the cutting mechanism and surface generation in orthogonal cutting of UD-CFRP laminates[J]. Composite Structures, 2019, 230: 111441.
- [15] STABLER G V. The fundamental geometry of cutting tools[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2006, 165(1): 14-26.
- [16] 许君. C/E 复合材料螺旋铣孔加工试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- XU Jun. The research on helical milling experiments of C/E composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [17] 陆翠. CFRP/Ti-6Al-4V 叠层结构螺旋铣孔过程工艺优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- LU Cui. The optimization research on helical milling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [18] CHEN Guang, ZOU Yunhe, QIN Xuda, et al. Geometrical texture and surface integrity in helical milling and ultrasonic vibration helical milling of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278: 116494.
-
- 作者简介: 陈光(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为航空材料切削机理、超声振动辅助切削技术。
E-mail: guangchen@tju.edu.cn