

引文格式:周兰,刘甜冰,安国升,等.考虑纤维方向角的CFRP螺旋铣孔加工表面质量多目标优化[J].航空制造技术,2026,69(8):25010111.

ZHOU Lan, LIU Tianbing, AN Guosheng, et al. Multi-objective optimization of machined surface quality in CFRP helical milling considering fiber orientation angle[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(8): 25010111.

考虑纤维方向角的 CFRP 螺旋铣孔加工 表面质量多目标优化

周 兰¹,刘甜冰¹,安国升²,李光奇¹,谷海成³,刘开宏³,庞 真³

(1. 兰州理工大学机电工程学院,兰州 730050;

2. 兰州理工大学材料科学与工程学院,兰州 730050;

3. 西百克科技(苏州)有限公司,苏州 215000)

[摘要] 纤维方向角对碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced plastic, CFRP)表面制孔质量具有显著影响,而采用传统试验或建立宏观有限元模型的方法难以结合纤维方向角优化加工工艺。为实现 CFRP 螺旋铣孔多个加工表面质量目标的提升,在采用宏观模拟获得最优切削效率的基础上,构建 CFRP 螺旋铣孔微观有限元模型,通过阐明不同纤维方向角对周向力(微观)、残余应力的影响规律,探究宏/微观结合的 CFRP 螺旋铣孔最优加工策略。结果表明:通过灰色关联分析方法,获得宏/微观结合 CFRP 螺旋铣孔最优工艺参数:自转转速 8000 r/min、公转转速 60 r/min、轴向进给量 0.24 mm。经过试验验证,采用该工艺制孔无分层缺陷,相比宏观优化,孔壁表面粗糙度降低 19.36%、孔径偏差减小 12.10%,入口、出口圆度分别提高 10.31% 和 7.52%,加工缺陷(毛刺与撕裂)分别减少 60.89% 和 20.15%。

关键词:加工表面质量;多目标优化;碳纤维增强复合材料(CFRP);螺旋铣;灰色关联分析

中图分类号:V2;TB332 文献标志码:A DOI:10.16080/j.issn1671-833x.25010111



周 兰

副教授,博士,研究方向为复合材料高性能切削技术、智能化专用刀具优化设计。

碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced plastic, CFRP)具有低密度、高比强度、高比模量、耐腐蚀与可设计性强等特性,符合飞机机翼、航天器舱体、导弹发射架等装备结构轻量化与高刚度的制造需求^[1-2]。例如,美国 F-22“猛禽”战斗机与 MQ-1“捕食者”无人机的机身都大量采用 CFRP 代替传统金属材料,通过有效减重实现了战机机动性能的大幅提升;我国先进战机与直升机通过使用 CFRP 实现了整装轻量化;国产大飞机 C919 上,CFRP

已应用于高温高压服役条件下的承力结构中,且占比达到 11.5%^[3]。由此可见,CFRP 在飞机上得到广泛应用,逐渐成为提升航空制造业核心竞争力的关键战略材料。然而,CFRP 结构件几何特征复杂,一次性成型困难,往往需要通过切割、制孔、修边等二次加工,甚至多道工序,才能完成飞机机翼、航天器舱体与导弹发射架等复杂结构件的制造^[4]。另外,作为典型难加工材料,CFRP 呈现显著各向异性,在制孔过程中其力学特性受刀具、加工工艺与参数、纤维方

收稿日期:2025-06-30;退修日期:2025-07-23;录用日期:2025-08-12

基金项目:国家自然科学基金(52265049);甘肃省科技重大专项(22ZD6GA008);甘肃省自然科学基金(25JRRA073,26JRRA519)

通信作者:安国升,副教授,博士,研究方向为先进加工与表面防护技术。

向角等多方面因素影响,易导致加工阶段产生切削力大、加工温度高与刀具磨损快的问题,严重影响 CFRP 的制孔质量与加工效率。

近年来,螺旋铣技术逐渐替代传统钻削,在航空制造领域成为 CFRP 的先进制孔工艺^[5]。其加工轨迹由刀具绕自身轴线自转、绕待加工孔轴线公转及轴向进给 3 部分构成,呈现出典型的偏心加工特征,可有效降低 CFRP 制孔过程的轴向力与切削热,大幅延长刀具服役寿命。但是,螺旋铣孔运动学过程复杂,工艺参数之间存在交互作用,且受 CFRP 纤维方向角的显著影响,导致在保证制孔效率的同时难以全面、均衡地提升螺旋铣孔的关键质量指标,使之成为一项有挑战性的工作。

CFRP 螺旋铣孔加工表面质量指标(孔壁质量、出/入口毛刺、分层等)与加工参数、纤维方向角、辅助工艺等因素紧密相关,是典型的加工过程中多目标优化问题。采用灰色关联分析法可对该多目标问题进行综合评价,以实现将多目标优化问题向单目标问题的转化,该方法已在切削加工工艺优化方面取得广泛应用。Thakur 等^[6]构建了灰色关联度排序评级系统,研究主轴转速与进给速度对 CFRP 加工表面粗糙度和分层系数影响;结果表明,CFRP 加工表面粗糙度随主轴转速的增加而降低,分层系数随进给速度的增加而增加。Liu 等^[7]采用灰色关联分析法对制孔质量和生产效率指标进行优化,结果表明,适宜的轴向进给量有利于提高已加工表面质量,而较小的切削厚度能有效降低切削力。Zhou 等^[8]建立三因素三水平正交试验,以轴向力和周向力为优化目标,通过改变加工参数,得出对加工表面质量影响程度的顺序为:主轴转速 > 轴向进给量 > 每齿进给量。高延峰等^[9]以孔径损伤误差度与分层损伤因子为优化目标,采用灰色关联分析法得到最

优加工参数为:转速 2000 r/min,进给量 0.02 mm/r,螺距 0.15 mm。综上所述,采用灰色关联分析法能够实现多目标优化,通过计算权重系数与灰色关联度可获得最优加工参数组合。然而,已有研究主要针对部分质量指标,完成宏观工艺参数的简单优化,缺乏对 CFRP 纤维方向角影响的考虑。

CFRP 纤维方向角对复合材料加工表面质量具有显著影响。Annadorai 等^[10]通过试验对不同纤维方向角的 CFRP 进行性能测试,结果表明,单向纤维取向板材的拉伸性能和弯曲性能更优,多向纤维取向层合板抗冲击性能更好。Böhland 等^[11]基于不同的碳纤维方向角度,通过试验研究纤维方向角对亚表面损伤深度的影响,发现当纤维方向角在 40°~60° 之间时,亚表面损伤深度最大。Kumar 等^[12]阐明了 CFRP 低温铣削过程加工表面成形机理,并证明纤维方向角为 135° 时表面粗糙度最低,45° 时表面粗糙度最高。李树健等^[13]基于 CFRP 成型过程形成的孔隙缺陷,研究了不同纤维排布的 CFRP 微观切削行为,发现 90° 纤维方向角对应的面下损伤深度最大。万敏等^[14]基于纤维切削方向角度的影响,面向刀具侧刃与底刃,构建了单向 CFRP 螺旋铣过程动态切削力预测模型,预测了不同纤维方向角下的动态切削力系数,验证了模型的准确性。学者们采用有限元模拟的方法对微观尺度下的 CFRP 加工损伤展开了大量研究^[15-18]。此外,Kaware 等^[19]建立宏观尺度下的有限元模型(Finite element modeling, FEM),研究低速冲击下不同纤维方向角的 CFRP 损伤形式,结果表明,45°/0° 界面的分层裂纹沿 0° 纤维方向扩展,90°/135° 界面沿 135° 纤维方向扩展,且 0° 和 90° 的能量吸收率更高。Mao 等^[20]建立宏观有限元模型来模拟 CFRP 加工过程中的分层损伤,对比分析不

同切削参数下的分层系数,得出结论:在一定范围内,较高的主轴转速和较小的切削深度有利于减少分层损伤。Wang 等^[21]建立微观尺度下的有限元模型,分析毛刺损伤受纤维方向角的影响规律,研究结果显示:毛刺损伤的平均长度随纤维方向角的增加而增加,且纤维方向角为 90° 和 135° 的 CFRP 有明显撕裂。当前,统筹考虑宏观尺度下加工参数及微观尺度下纤维方向角对 CFRP 螺旋铣孔过程损伤影响的研究较少,对分层、毛刺、表面粗糙度、孔径偏差等加工质量目标全面提升缺乏理论指导与试验支撑。

因此,本文以具有不同纤维铺层角度的 CFRP 层合板为研究对象,通过宏/微观有限元模拟、结合灰色关联分析法,旨在实现多个加工表面质量目标的综合优化。首先,构建 CFRP 螺旋铣孔宏观有限元模型,进行面向切削效率、协同轴向力与周向力(宏观)的参数优化,获得最优的轴向进给量;其次,着重考虑纤维方向角的影响,构建 CFRP 螺旋铣孔微观有限元模型,设定切削力为重要关联性目标,揭示基于不同纤维方向角的周向力(微观)与残余应力变化规律,进而通过分析二者在不同参数组合的灰色关联度,获得最优的自转与公转转速;最后,经试验验证,采用宏/微观结合的 CFRP 螺旋铣孔优化参数组合,能够大幅降低孔径偏差、全面提升孔壁质量、有效避免出口缺陷。上述工作为 CFRP 螺旋铣孔的质量全面提升提供理论参考,也为实现 CFRP 复杂结构件的优质高效加工提供数据支持。

1 螺旋铣孔运动学原理

螺旋铣孔运动分为刀具绕自身轴线的自转运动、绕待加工孔轴线的公转与轴向进给运动^[22],如图 1 所示。该制孔方式为偏心加工,只需调节偏心距即可加工不同尺寸和结构

的孔^[23-24]。

如图1中端刃切削示意图所示,在CFRP螺旋铣孔过程中,刀具端刃为持续加工,始终与工件保持接触,图中红色部分即为端刃所切削工件部分,切削层即为每公转轴向切深 a_p ,具体数值可由式(1)计算得到。

$$a_p = \frac{f_z}{n_g} \quad (1)$$

式中, f_z 为刀具轴向进给速度, n_g 为公转转速。

其轴向进给量 a 为

$$a = \frac{2\pi a_p}{Nn_z} \quad (2)$$

式中, N 为齿数, n_z 为刀具自转转速。

与端刃切削方式不同,在螺旋铣孔工艺中,铣刀侧刃随着切入角的瞬时变化实现断续切削。侧刃每齿切向进给量 f_t 与刀具公转转速 n_g 、偏心距 e 有关,由式(3)计算可得。

$$f_t = \frac{2\pi n_g e}{Nn_z} \quad (3)$$

切削刃上任意一点的切削速度 v_1 的计算公式为

$$v_1 = 2\pi n_g e + 2\pi n_z R \quad (4)$$

式中, R 为该点到刀具轴线的距离。

由于螺旋铣孔过程中的自转转速与公转转速相差一个数量级,故刀具切削速度的计算可近似不考虑公转转速的影响。因此,刀具切削速度 v 的计算公式为

$$v = 2\pi n_z R \quad (5)$$

2 CFRP螺旋铣孔宏观有限元建模与灰色关联分析

2.1 宏观有限元模型

2.1.1 几何模型与网格划分

在CFRP螺旋铣孔过程中,刀具与工件之间呈现出复杂的瞬时动态接触特性,使CFRP在切削加工阶段产生非线性失效演变。本文充分利用ABAQUS软件中的Explicit模块在求解非线性问题方面的优势,建立CFRP螺旋铣孔加工宏观有限元模

型。该模型中CFRP层合板的几何形状设定为圆柱,其直径为24 mm,厚度为4 mm;T700 CFRP预浸料的铺层方向为 $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$,如图2所示。其材料属性如表1所示。

模型中刀具为硬质合金专用铣刀,其几何结构复杂,可利用SolidWorks软件实现三维建模。刀具直径为12 mm,螺旋角为 40° ,前角为 5° ,后角为 12° ,视为刚体。为兼顾刀具在网格划分过程中的效率和精度,采用四面体单元(C3DM10),对参与切削的底刃和侧刃区域进行网格细化,设

置其网格尺寸为0.03 mm;同时,采用六面体单元(C3D8R)对待加工表面相邻区域进行网格细化,网格尺寸可达0.01 mm。进而对上述网格划分后的刀具和工件模型实施装配,并设置相应边界条件,实现CFRP螺旋铣孔的宏观有限元模型构建,如图3所示。

2.1.2 材料失效准则

CFRP材料失效准则主要包括最大应力准则、Hoffman准则与Hashin准则^[25]。本文基于Hashin失效准则,在兼顾正应力和剪应力的同时,采用

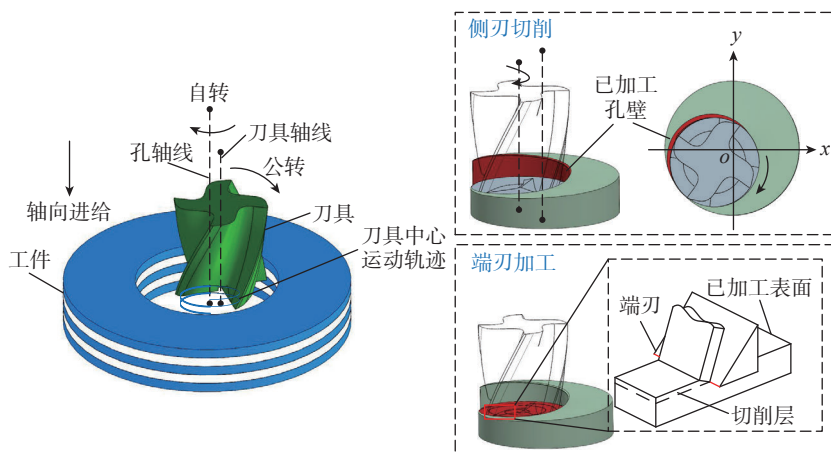


图1 螺旋铣孔运动示意图

Fig.1 Helical milling holes motion diagram

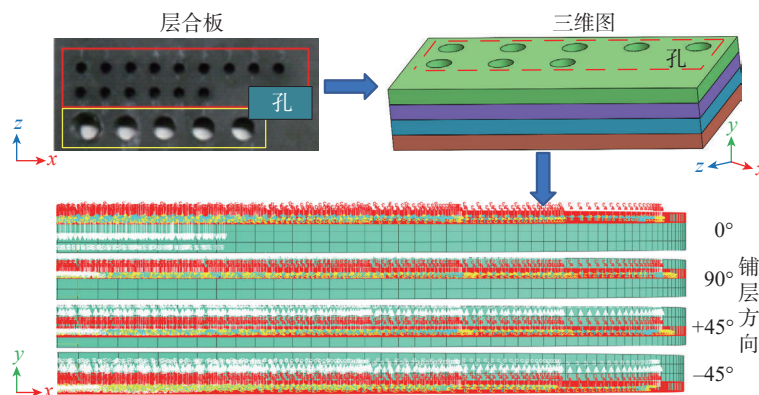


图2 CFRP的纤维铺层方向

Fig.2 Fiber layering method of CFRP

表1 CFRP的材料属性

Table 1 Material properties of CFRP

密度 / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	杨氏模量 / GPa	泊松比	剪切模量 / GPa
1.6	$E_1=163, E_2=E_3=90$	$\nu_{12}=\nu_{13}=0.3, \nu_{23}=0.35$	$G_{12}=G_{13}=35, G_{23}=4$

最大应力与 Hoffman 失效准则全面表征纤维和基体的多种失效模式。在不同加载情况下, Hashin 准则所定义的纤维和基体的失效形式为

$$\begin{cases}
 \text{纤维拉伸 } (\tilde{\sigma}_{11} \geq 1) \\
 F_f^t = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{11}}{X_T} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tilde{\sigma}_{13}}{S_{13}} \right)^2; \\
 \text{纤维压缩 } (\tilde{\sigma}_{11} < 1) \\
 F_f^c = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{11}}{X_C} \right)^2; \\
 \text{基体拉伸 } (\tilde{\sigma}_{22} + \tilde{\sigma}_{33} \geq 0) \\
 F_m^t = \left(\frac{\tilde{\sigma}_{22} + \tilde{\sigma}_{33}}{Y_T} \right)^2 + \frac{\tilde{\sigma}_{23}^2 - \tilde{\sigma}_{22}\tilde{\sigma}_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\tilde{\sigma}_{12}^2 - \tilde{\sigma}_{13}^2}{S_{12}^2}; \\
 \text{基体压缩 } (\tilde{\sigma}_{22} + \tilde{\sigma}_{33} < 0) \\
 F_m^c = \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{\tilde{\sigma}_{22}\tilde{\sigma}_{33}}{Y_C} \right) + \frac{(\tilde{\sigma}_{22} + \tilde{\sigma}_{33})^2}{4S_{23}^2} + \\
 \frac{\tilde{\sigma}_{23}^2 - \tilde{\sigma}_{22}\tilde{\sigma}_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\tilde{\sigma}_{12}^2 + \tilde{\sigma}_{13}^2}{S_{12}^2}
 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\tilde{\sigma}_{ij}$ 是应用分量; F_f^t 、 F_f^c 、 F_m^t 、 F_m^c 为纤维 (f 表示纤维) 和基体 (m 表示基体) 在受到拉伸 (t 表示拉伸) 与压缩 (c 表示压缩) 时的失效因子, 即损伤起始判据; X_T 和 Y_T 是许用拉伸强度, X_C 和 Y_C 是许用压缩强度; S_{12} 、 S_{13} 和 S_{23} 表示各个面上的许用剪切强度。

根据 CFRP 螺旋铣孔产生的实时应力, 可对以上 4 种失效模式进行逐一判断, 并获得有效应力。本文通过编写 VUMAT 用户子程序完成对三维 Hashin 失效准则相关参数的设置, 具体材料损伤参数如表 2 所示。

2.1.3 模型验证与结果讨论

基于 CFRP 螺旋铣孔宏观有限元分析, 设计加工参数并实施螺旋铣孔试验, 每组试验进行 3 次, 为减少误差, 选取各试验测得的平均值进行研究。该试验系统主要由工业机器人 (KUKA 360 型)、刀具、CFRP 层合板、测力仪、电荷放大器与数据记录仪组成^[26]。试验使用刚性铝合金夹具对层合板底部进行支撑, 以便于减少切削冲击产生的额外损伤; 由于试验所用层合板较薄, 产生的切削温

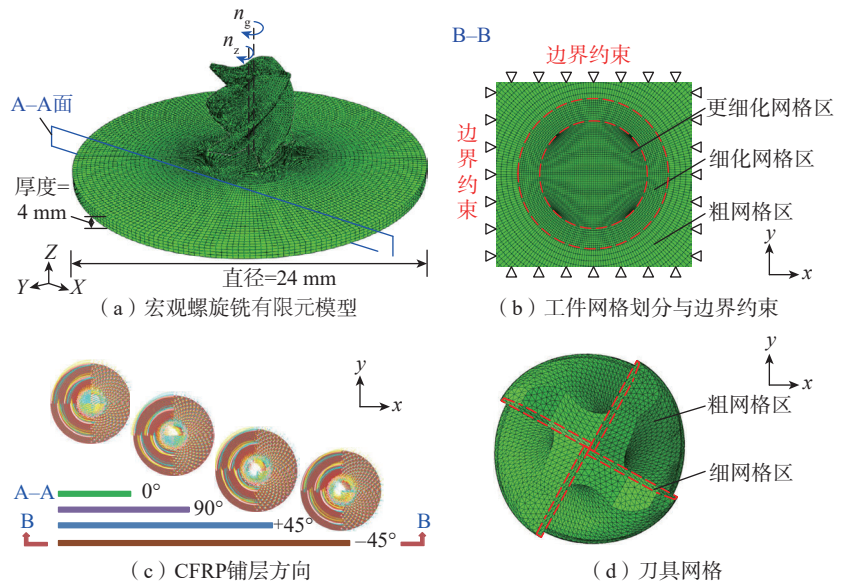


图 3 CFRP 螺旋铣孔的宏观有限元模型

Fig.3 Macroscopic FEM for helical milling holes CFRP

表 2 材料损伤参数

Table 2 Material damage parameters

纵向抗拉强度 /GPa	横向抗拉强度 /GPa	纵向抗压强度 /GPa	横向抗压强度 /GPa	纵向抗剪强度 /GPa	横向抗剪强度 /GPa
2.54	0.08	1.58	0.24	0.09	0.04

度较低, 为避免外在因素对试验结果产生影响, 未使用风冷或其他冷却方式。制孔专用刀具为硬质合金 YG8, 直径为 12 mm, 螺旋角为 40°, 前角为 5°, 后角为 12°。螺旋铣孔试验参数为: 自转转速 8000 r/min、公转转速 100 r/min、轴向进给量 0.20 mm。根据切削力测量值的变化规律, 对 CFRP 螺旋铣孔宏观有限元模型进行试验验证。

由 CFRP 螺旋铣孔宏观有限元模型得到的切削力变化规律与对比试验结果具有一致性。以典型的轴向力为例, 其仿真值与试验结果的对比如图 4 所示。在螺旋铣孔过程中, 轴向力随加工的进行呈现出迅速增长-稳定波动-平缓下降的变化趋势, 如图 4 (a) 所示。当加工时间 0.5~1.5 s 时, 轴向力迅速增长, 其变化趋势曲线的放大图如图 4 (b) 所示, 可进一步细分为初始阶段、上升阶段与稳定阶段。图 4 (c) 为采用有限

元方法得到的螺旋铣孔过程轴向力仿真曲线, 与图 4 (b) 相比较, 轴向力变化趋势一致, 当仿真进行到 1.2 s 后, 轴向力平均值稳定在 452.50 N。由于稳定加工阶段的轴向力变化特征显著且波动较小, 后续对不同加工参数下切削力变化规律的分析皆针对该加工阶段展开。

进而计算螺旋铣孔稳定加工阶段切削力仿真平均值, 并与试验结果对比, 可得误差 ΔF 为

$$\Delta F = \frac{\bar{F}_{\text{试验}} - \bar{F}_{\text{仿真}}}{\bar{F}_{\text{试验}}} \quad (7)$$

式中, $\bar{F}_{\text{仿真}}$ 为螺旋铣孔过程稳定加工阶段切削力的仿真平均值, $\bar{F}_{\text{试验}}$ 为切削力试验平均值。

根据公式 (7) 计算稳定阶段轴向力仿真值的误差, $\Delta F = (381.68 - 351.15) / 381.68 = 8\%$ 。

周向力 F_r 可由 F_x 和 F_y 计算得到, 其计算公式为

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (8)$$

基于 CFRP 螺旋铣孔宏观有限元模型,采用正交法分析切削力变化规律,如表 3 所示。

在 CFRP 螺旋铣孔过程中,自转转速、公转转速与轴向进给量对切削力的影响最为显著,如图 5 (a) 和 (b) 所示,当刀具公转转速为 60 r/min,轴向进给量为 0.12 mm 时,随着刀具自转转速由 6000 r/min 增至 12000 r/min,

每转的切削厚度减小,材料被高速旋转的刀具快速切除,轴向力与周向力均随自转转速的增大而减小,切削力的变化趋势与自转转速呈负相关。如图 5 (c) 和 (d) 所示,当刀具自

转转速为 6000 r/min,轴向进给量为 0.12 mm,刀具公转转速由 60 r/min 增至 120 r/min 时,单位时间内材料去除面积增加,刀具与工件之间的摩擦力上升,轴向力与周向力也随之增

表 3 宏观有限元仿真正交表

Table 3 Orthogonal table of macro finite element simulation

组号	自转转速 $n_z / (r \cdot \min^{-1})$	公转转速 $n_g / (r \cdot \min^{-1})$	轴向进给量 a / mm
1	6000	60	0.12
2	8000	80	0.16
3	10000	100	0.20
4	12000	120	0.24

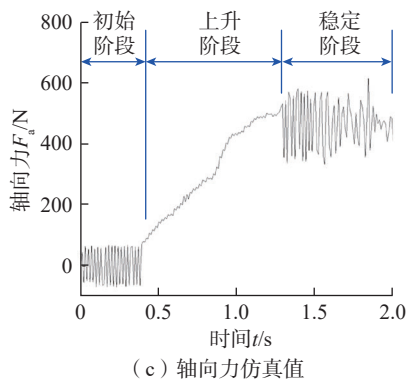
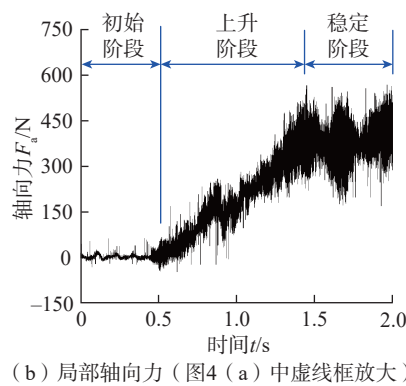
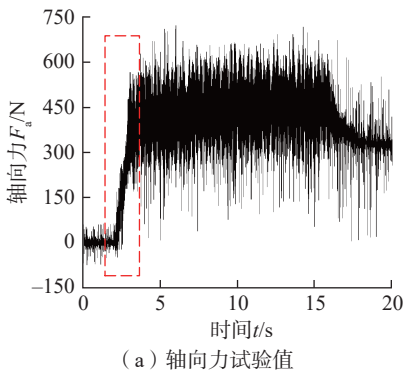
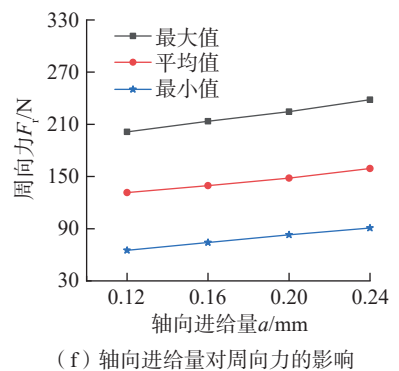
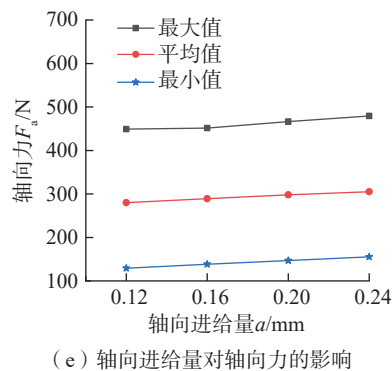
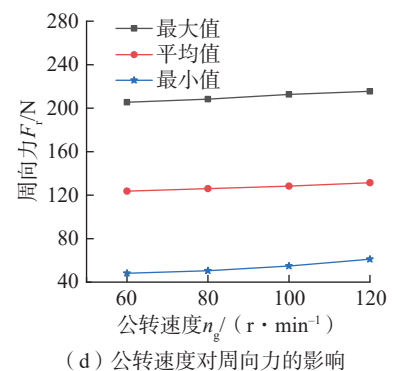
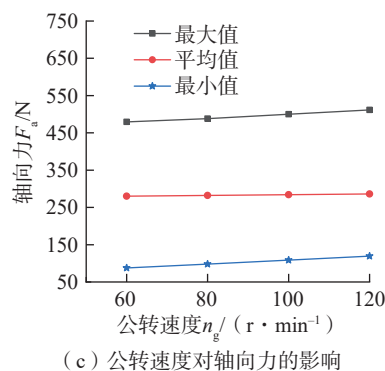
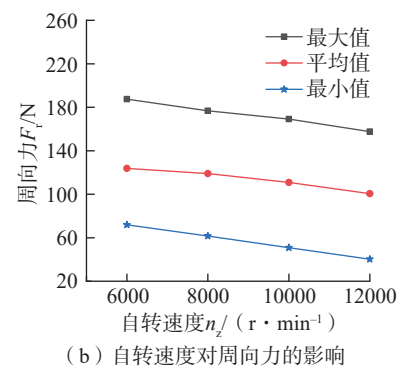
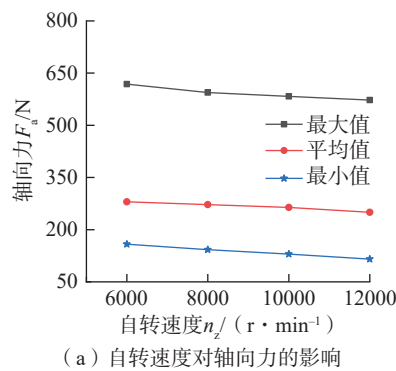


图 4 螺旋铣孔过程轴向力试验值与仿真值对比
Fig.4 Helical milling holes axial force experimental and simulation comparison results



(e) 轴向进给量对轴向力的影响 (f) 轴向进给量对周向力的影响

图 5 切削参数对切削力的影响

Fig.5 Influence of cutting parameters on cutting force

大,因此切削力的变化趋势与公转转速呈正相关。如图 5(e)和(f)所示,当刀具自转转速为 6000 r/min,刀具公转转速为 60 r/min,轴向进给量由 0.12 mm 增至 0.24 mm 时,材料去除量增大,工件对刀具的阻抗力变大,被去除材料变形严重,轴向力与周向力皆随轴向进给量的增大而增大,故切削力的变化趋势与轴向进给量呈正相关。

由于轴向力与周向力的变化与加工参数紧密相关,同时对 CFRP 螺旋铣孔质量的提高及有效抑制分层缺陷起到重要作用,因此选取周向力与轴向力为优化目标,并兼顾加工效率。

2.2 基于宏观有限元模型的灰色关联度分析

基于灰色关联理论对螺旋铣孔周向力、轴向力与加工效率进行多目标优化,目前常见的属性类型有效益型、成本型与区间型等^[27],以目标具有的不同属性类型为依据,选择成本型进行相关数据计算。由于螺旋铣孔加工过程中,较大的轴向力会导致孔进出口处出现分层缺陷,影响制孔表面质量,且使刀具磨损严重,降低刀具寿命,成本升高;周向力变大,会造成孔径误差增大。从刀具磨损方面出发,减小轴向力和周向力有利于降低生产成本,提高生产效益。因此,针对不同自转速度、公转速度和轴向进给量所对应的轴向力与周向力仿真结果进行数据预处理,并利用效益型公式对切削效率实施预处理,获得相应的灰色关联系数和灰色关联度,最终获得最优参数组合,实现宏观尺度下的多目标优化。

考虑到加工效率,本文以轴向力、周向力与切削效率为优化目标,选取成本型公式计算处理表 2 中参数下所获得的轴向力与周向力,得到

$$y_i(k) = \frac{\max x_i(k) - x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (9)$$

式中, i 为次数; k 为优化目标,即轴向力、周向力与加工效率; $x_i(k)$ 为

原始数列; $y_i(k)$ 为经过变换后得到的数列。

根据“加工效率越高,效益越好”及“企业效益最大”为原则,切削效率可用单位时间 CFRP 材料去除量 Q 表示,其计算公式为

$$Q = 1000 \times n_z \times f_t \times a \quad (10)$$

采用效益型公式对切削效率进行处理,得到

$$Q_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i(k)}{\max x_i(k) - \min x_i(k)} \quad (11)$$

基于式(9)和(11)对轴向力、周向力与切削效率进行数据预处理,进而研究灰色关联系数表征对比数列和参考数列的相关程度,其计算公式为

$$\xi_i = \frac{\Delta \min + \rho^* \Delta \max}{\Delta O_i(k) + \rho^* \Delta \max} \quad (12)$$

式中, $\Delta O_i(k) = A_0(k) - A_i(k)$ 为绝对差, $A_0(k)$ 为参考数列, $A_i(k)$ 为轴向力、周向力与切削效率数据处理后数列;轴向力与周向力变换后最优参数值均为 1,参考数列取为 [1, 1, 1]; $\Delta \min = \min \Delta O_i(k)$ 为最小差, $\Delta \max = \max \Delta O_i(k)$ 为最大差; ρ^* 为系数,为降低 $\Delta \max$ 过大而引起的失真并增强关联系数之间差异的显著性,将之设置为 0.5。

计算各个工艺目标关联系数的均值,记为关联度 R_i ,其计算公式^[28]为

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i \quad (13)$$

将利用成本型公式处理后的数据代入式(12),可计算得到加工参数对轴向力、周向力及切削效率影响的灰色关联系数;随后将之代入式(13),可求得加工参数对上述 3 个指标的灰色关联度。结果表明:当自转转速为 12000 r/min,公转转速为 60 r/min 时,选择轴向进给量 0.24 mm,可保证切削效率最高,同时兼顾轴向力与周向力水平偏低。由于从宏观模型得到的切削效率同样适用于微观分析,故在以下 CFRP 螺

旋铣孔微观多目标优化中,轴向进给量固定为 0.24 mm 不变。

综上所述,基于灰色系统理论分析,灰色关联度值越高,该组切削参数的优化效果与理想目标吻合度越好。因此,以轴向力、周向力与切削效率为宏观优化目标得到的最优参数组合为自转转速 12000 r/min,公转转速 60 r/min,轴向进给量 0.24 mm。

3 CFRP 螺旋铣孔微观有限元建模与灰色关联分析

3.1 微观有限元模型

3.1.1 RVE 模型与网格

相比于螺旋铣孔过程中的自转转速 6000~12000 r/min,公转转速 60~120 r/min 对切削刃各点切削速度的影响非常小,因此可忽略不计。在 RVE 模型中,螺旋铣孔可视为刀具切削刃任意微段的正交切削,其切削速度与切削刃任一点的方向呈 90°,如图 6 所示。将纤维方向角 θ 定义为纤维轴向顺时针旋转至与切削方向所转过的角度,有正负之分^[29]。

本文基于 ABAQUS 软件,建立了包含碳纤维、树脂基体及界面的螺旋铣孔微观有限元仿真模型。其中,基体 RVE 模型整体尺寸为 64 μm \times 16 μm \times 64 μm ,内嵌直径为 7 μm 的碳纤维。为进一步提高计算精度,采用整体全局细化布种的方法,选择六面体网格对模型进行划分,近似单元尺寸为 5 μm ,网格单元类型选用 C3D8R。上述 RVE 模型各组分材料的性能参数如表 4 所示。

3.1.2 本构模型与失效准则

为确保有限元模型准确度,以下针对碳纤维、树脂基体与界面分别构建相应的本构模型。

(1) 碳纤维。

将碳纤维定义为横向各向同性及线弹性材料,其本构模型^[30]为

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (14)$$

式中, σ_f 为纤维应力, ε_f 为纤维应变, E_f 为纤维弹性模量。

根据最大应力准则,当碳纤维单元在任意方向的主应力峰值突破其材料强度阈值时,该单元即被判定为失效并删除。纤维失效形式^[31]表示为

$$\begin{cases} r_t^f = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t^f}\right)^2 & (\sigma_{11} > 0) \\ r_c^f = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c^f}\right)^2 & (\sigma_{11} < 0) \end{cases} \quad (15)$$

式中, r_t^f 和 r_c^f 分别指纤维拉伸和压缩失效; X_t^f 和 X_c^f 分别是沿纤维方向的拉伸强度和压缩强度; σ_{11} 是纤维

的法向应力分量。

(2) 树脂基体。

将树脂基体定义为弹塑性和各向同性材料,它在拉伸和压缩载荷下的本构模型如图7所示。第1阶段由点O至点A,为线弹性阶段,树脂基体在卸载后会沿原应力-应变曲线返回原点,不发生变形。根据 Von Mises 屈服准则,OA 为塑性变形阶段,此时应力高于树脂基体屈服应力 σ_m^0 ,并逐步靠近B点的等效塑性应变 ε_0^p 。BC 段为损伤演化阶段,此时应力达到极限拉伸或压缩强度 σ_m^{y0} , ε_m^p

为最大损伤对应的等效塑性应变。

损伤状态 d_m 与树脂顺时应变 ε_m 有关,取值范围为 0~1,结合损伤标量的形状参数 n 和未发生损伤时的刚度 E_m ,可由式(16)计算。

$$d_m = 1 - e^{-\left[\frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_m \varepsilon_m^0}{\sigma_m^0}\right)^2\right]} \quad (16)$$

计算可得弹性模量 E_{md} 为

$$E_{md} = (1 - d_m) E_m \quad (17)$$

(3) 界面。

在复合材料界面建模中,本文以牵引力分离定律的零厚度内聚力行为方法为基础,通过引入 Cohesive 单元来表征碳纤维与树脂基体之间的界面,并采用二次应力损伤准则,对界面损伤起始进行预测。在载荷作用下,该单元首先呈现线弹性变形特征,当界面应力达到临界阈值后,单元出现刚度退化现象,最终导致单元失效被移除,纤维与基体之间发生开裂。将界面设置为 Cohesive 单元,其本构模型为

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} \quad (18)$$

式中, t_n 、 t_s 、 t_t 分别为界面法向与剪切方向的应力; K_n 、 K_s 、 K_t 为对应方向的刚度值; ε_n 、 ε_s 、 ε_t 代表相应的应变。

3.1.3 模型验证与讨论

采用第2.1.3节中的试验平台,实施 CFRP 螺旋铣孔试验。设定试验参数:自转转速 8000 r/min、公转转速 60 r/min、轴向进给量 0.25 mm。当纤维方向角取 90° 时,周向力仿真值与试验值分别为 173.01 N、191.51 N,二

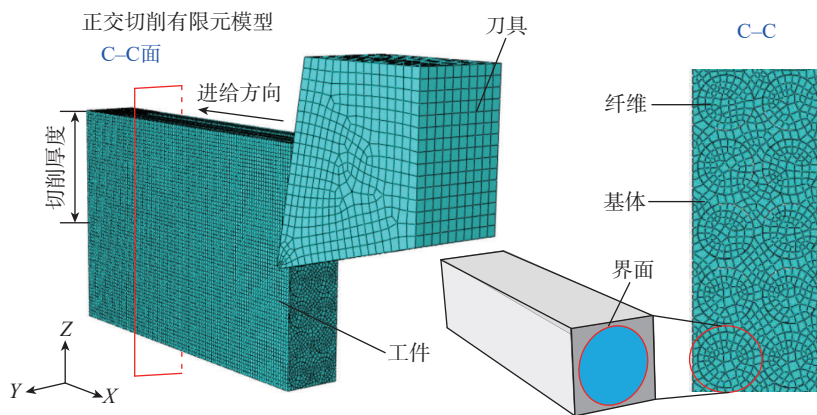


图6 CFRP螺旋铣过程的简化示意图

Fig.6 Simplified schematic diagram of CFRP helical milling process

表4 RVE模型各组分材料的性能参数

Table 4 Performance parameters of each component material in RVE model

材料类别	参数	数值
碳纤维	密度 / (g · cm ⁻³)	1.8
	杨氏模量 /GPa	$E_1=235, E_2=E_3=14$
	泊松比	$\nu_{12}=\nu_{13}=0.2, \nu_{23}=0.45$
	剪切模量 /GPa	$G_{12}=G_{13}=28, G_{23}=5.5$
	拉伸强度 /GPa	$X_t=4.62, Y_t=1.5$
	压缩强度 /GPa	$X_c=3.96, Y_c=3.34$
环氧树脂	弹性模量 /GPa	2.96
	泊松比	0.4
	屈服强度 /MPa	74.7
界面	法向强度 /MPa	167.5
	剪切强度 /MPa	25
	断裂能 / (N · mm ⁻²)	0.05

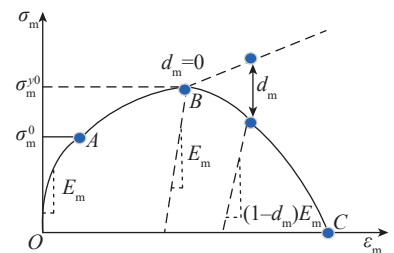


图7 树脂基体的本构模型

Fig.7 Constitutive model of resin matrix

者误差经由 $\Delta F = (191.51 - 173.01) / 191.51 = 9.66\%$, 计算达到最大值。

以上仿真值与试验值之间的误差主要源于有限元模型中失效单元被移除, 使得失效材料所形成切屑与刀具前刀面之间的挤压和摩擦作用未能体现。此外, 将刀具设定为刚体, 忽略了刀具-工件相互作用过程中的弹性变形。

基于 CFRP 螺旋铣孔过程微观有限元模型, 并利用公式(5), 将 CFRP 螺旋铣孔主轴转速转化为对应的切削速度, 采用正交法对不同参数产生的周向力(微观)与残余应力变化规律进行分析, 如表 5 所示。

当纤维方向角 θ 为 90° , 切削速度 251 m/min , 切削厚度 0.015 mm 时, 通过 CFRP 螺旋铣孔微观模型得到周向力(微观)波动曲线, 如图 8 所示。在 CFRP 螺旋铣孔过程中, 刀具开始接触工件的初始加工阶段, 周向力(微观)随时间增长而增大, 总体呈上升趋势; 刀具完全切入工件时为稳定加工阶段, 周向力在 170 N 上下浮动; 沿刀具切削方向的工件末端处发生断裂, 随之刀具切出工件时为出口加工阶段, 周向力(微观)迅速降低到 0。显然, 在近似 10^{-5} s 的加工时间内, 初始加工阶段与出口加工阶段的切削力幅值皆出现较大波动, 而稳定阶段周向力(微观)的平均波动范围未超过 200 N 。

图 9 为周向力(微观)与残余应力随切削厚度变化曲线。当切削厚度由 0.015 mm 增至 0.045 mm 时, 所有纤维方向角度的周向力(微观)与残余应力均随切削厚度的增加而增大。这是由于切削厚度增加, 单位时间内材料去除量增多, 刀具与工件的接触面积及其相互作用力增加, 最终导致周向力(微观)与残余应力上升。但切削厚度相同且 $\theta=0^\circ$ 时, 纤维断裂和基体分离较少, 呈现为弯曲失效方式, 此时切削力低于其余纤维方向角的切削力, 而周向力(微观)与残

余应力始终最小。

图 10 为周向力(微观)与残余应力随切削速度变化曲线。当切削速度由 125 m/min 增至 314 m/min 时, θ 为 45° 、 90° 及 135° 的周向力(微观)值呈现不同的变化趋势, $\theta=0^\circ$ 的周向力(微观)始终保持该切削速度范围内的最小值, 如图 10(a) 所示; 与此同时, 切削速度增加有利于增强刀具对材料的去除能力, 二者接触时间短, 摩擦降低, 所有纤维方向角度的残余应力值均随切削速度增加而减小, 其中 $\theta=0^\circ$ 时的残余应力在各个切削速度下均保持最小值, 如图 10(b) 所示。综上所述, 无论切削厚度与切削速度如何变化, $\theta=0^\circ$ 时的周向力(微观)与残余应力值最小。

3.2 基于微观有限元模型的灰色关联分析

CFRP 螺旋铣孔过程产生的残余应力对材料强度与抗冲击韧性产生重要影响, 本文基于微观有限元模型, 选择周向力与残余应力为优化目标, 进一步提高制孔精度和降低孔壁表面粗糙度。采用成本型公式对微观螺旋铣孔正交仿真结果所获得的周向力与残余应力进行预处理, 进而代入式(12)计算自转速度、轴向进给量与纤维方向角对周向力(微观)与残余应力影响的灰色关联系数, 并利用式(13)获得加工参数对上述指标的灰色关联度, 最终获得微观切削下的最优加工参数, 实现多目标优化。

基于微观模型仿真结果, 可计算得到灰色关联度最大值为 0.950 ($\theta=0^\circ$, 切削速度 187 m/min , 切削厚度 0.025 mm), 最小值为 0.340 ($\theta=90^\circ$, 切削速度 125 m/min , 切削厚度 0.035 mm)。由于灰色关联度越大, 对应切削参数的优化结果最好。因此, 当切削参数组合为切削速度 187 m/min 、 $\theta=0^\circ$ 、切削厚度 0.025 mm 时, 周向力(微观)与残余应力可获得极小值。考虑到上述 RVE 模型中的切削厚度为单位公转周期内轴向

表 5 微观有限元仿真正交表

Table 5 Orthogonal table of micro finite element simulation

组号	纤维方向角 $\theta / (^\circ)$	切削速度 $v / (\text{m/min})$	切削厚度 h / mm
1	0	125	0.015
2	45	187	0.025
3	90	251	0.035
4	135	314	0.045

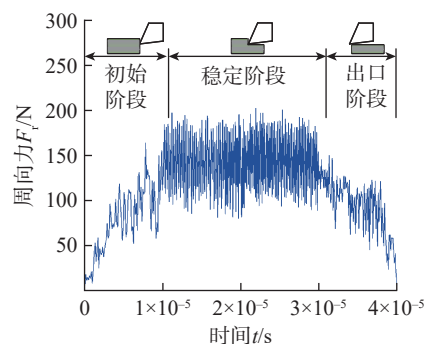
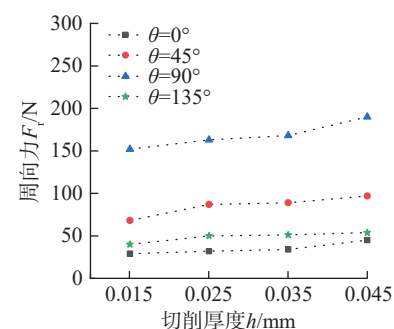
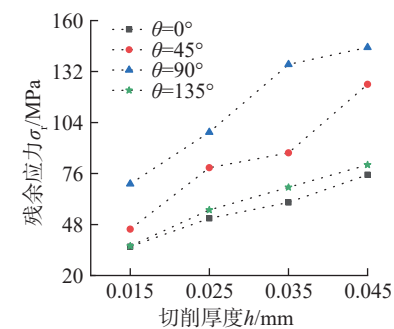


图 8 微观模型周向力波动曲线

Fig.8 Circumferential force fluctuation curve of microscopic model



(a) 周向力随切削厚度的变化规律



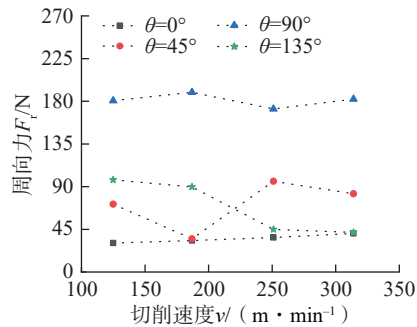
(b) 残余应力随切削厚度的变化规律

图 9 周向力与残余应力随切削厚度的变化规律

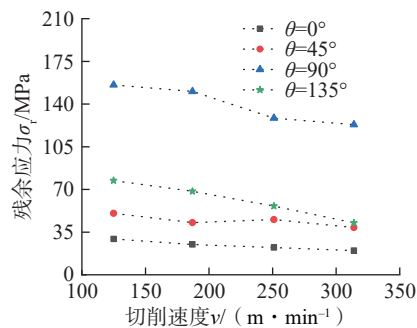
Fig.9 Variation law of circumferential force and residual stress with cutting thickness

切削量的 1/10,由式(4)和(5)计算得到相应的宏观切削参数为自转转速 8000 r/min,公转转速 60 r/min,轴向进给量 0.24 mm。

基于以上对宏观模型与微观模型的多目标优化分析,分别得到了两组工艺参数优化组合。第1组:自转转速 12000 r/min,公转转速 60 r/min,



(a) 周向力随切削速度的变化规律



(b) 残余应力随切削速度的变化规律

图 10 周向力与残余应力随切削速度的变化规律

Fig.10 Variation law of circumferential force and residual stress with cutting speed

轴向进给量 0.24 mm;第2组:自转转速 8000 r/min,公转转速 60 r/min,轴向进给量 0.24 mm。对以上参数组合实施螺旋铣孔试验,采用超声波探伤仪(型号 Sonatest Masterscan 380,英国 Sonatest 公司)与超景深显微镜(型号 Dino-lite Digital Microscope,荷兰 AnMo Electronics Corporation 公司)对制孔损伤与孔壁质量进行检测和观察分析。通过建立一维损伤因子,对制孔损伤进行表征,如图 11 所示。

$$C_d = \frac{S_d}{S_e} \quad (19)$$

式中, S_d 为制孔损伤区域面积, S_e 为孔面积。

由图 12 所示的损伤区域形貌及试验结果可知,宏/微观结合的第2组参数对应孔壁粗糙度为 1.2 μm ,入/出口的孔径偏差为 0.005 mm,入口、出口圆度分别为 0.0035 mm 与

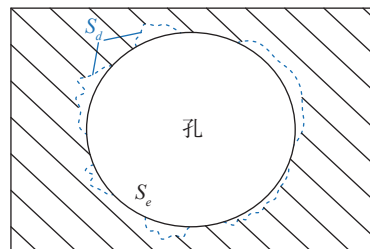


图 11 制孔损伤表征

Fig.11 Characterization of hole-making damage

0.0050 mm,无分层缺陷;与第1组宏观参数的结果相比,第2组参数的孔壁粗糙度降低了 19.36%、孔径偏差减小了 12.10%,入口、出口圆度分别提高了 10.31%、7.52%,出/入口毛刺、撕裂分别减少 60.89%、20.15%。

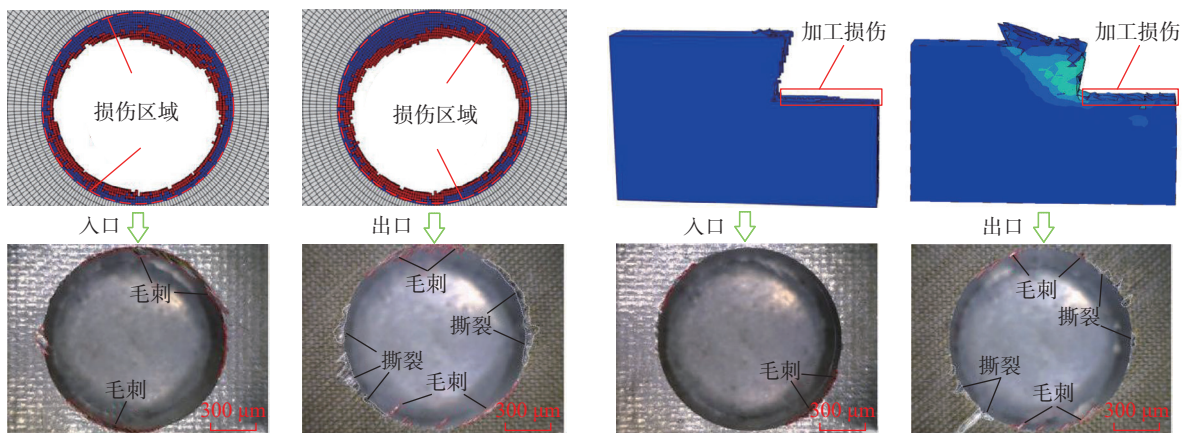
4 结论

本文面向不同纤维方向角的 CFRP 层合板,开展宏/微观结合模拟,通过灰色关联分析法与试验验证研究,最终获得了合理优化的螺旋铣孔加工工艺参数,进而均衡提升了制孔表面质量。通过研究得到以下主要结论。

(1)宏观方面,设定试验参数为自转转速 6000 r/min、公转转速 60 r/min,获得的切削力变化趋势与轴向进给量呈正相关,以优化切削效率为主,协调轴向力与周向力,得到最优的轴向进给量为 0.24 mm。

(2)微观方面,尽管不同纤维方向角度(0°、45°、90°、135°)的周向力(微观)与残余应力,随切削厚度与切削速度呈现不同的变化趋势,但是 $\theta=0^\circ$ 时的数值始终最小。

(3)结合宏/微观模拟结果与相应灰色关联优化计算,在设定的工艺参数范围内可实现 CFRP 螺旋铣孔多目标优化,获得最优工艺参数为自转转速 8000 r/min、公转转速 60 r/min、



(a) 宏观优化参数下的入/出口加工缺陷对比

(b) 宏/微观优化参数下的入/出口加工缺陷对比

图 12 宏观与宏/微观优化参数下的入/出口加工缺陷对比

Fig.12 Comparison of inlet/outlet processing defects under macro/micro optimization parameters

轴向进给量 0.24 mm。

(4) 试验结果表明, 相比传统宏观优化方法, 采用宏/微观结合的 CFRP 螺旋铣孔优化参数, 制孔无明显分层现象, 孔壁表面粗糙度降低了 19.36%、孔径偏差减小了 12.10%, 入口、出口圆度分别提高了 10.31% 和 7.52%, 加工缺陷(毛刺与撕裂)分别减少 60.89% 和 20.15%。

参考文献

- [1] 刘凤宇, 陈涛, 段振岩, 等. 变参数超声啄式钻削 CFRP/TC4 不同钻孔顺序试验研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(7): 92–99, 123.
- [2] LIU Fengyu, CHEN Tao, DUAN Zhenyan, et al. Experimental study on variable-parameters ultrasonic pecking drilling with different drilling sequences for CFRP/TC4 stacks[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(7): 92–99, 123.
- [3] 马志远, 宋鑫民, 张天旭, 等. 基于超声回波相位导数谱测量 CFRP 表面富树脂层厚度[J]. 航空制造技术, 2025, 68(9): 20–26.
- [4] MA Zhiyuan, SONG Xinmin, ZHANG Tianxu, et al. Thickness measurement of resin-rich layer solidified on CFRP based on ultrasonic echo phase derivative spectrum[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(9): 20–26.
- [5] 李欣, 宋绮梦, 张学强, 等. 激光加工碳纤维增强复合材料及其在航空航天领域应用[J]. 中国激光, 2024, 51(4): 9–30.
- [6] LI Xin, SONG Qimeng, ZHANG Xueqiang, et al. Laser processing of carbon fiber reinforced polymer composites and their application in aerospace field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(4): 9–30.
- [7] 周兰, 安国升, 李光奇, 等. 基于等效刃型矢量法的钛合金螺旋铣孔切削力机械模型研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 52–58.
- [8] ZHOU Lan, AN Guosheng, LI Guangqi, et al. Research on mechanistic model of cutting force in helical milling of titanium alloy based on equivalent cutting edge vector method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 52–58.
- [9] ZHOU L, ZHONG Y, AN G S, et al. Unified plastic limit analysis of the cap periphery formation in orbital drilling of titanium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(9): 4315–4328.
- [10] THAKUR R K, SINGH K K, KUMAR K. Investigation of milling characteristics in graphene-embedded epoxy/carbon fibre reinforced composite[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 33: 5643–5648.
- [11] LIU C L, REN J X, ZHANG Y L, et al. The effect of tool structure and milling parameters on the milling quality of CFRP based on 3D surface roughness[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2023, 24(6): 931–944.
- [12] ZHOU L, WANG Y L, AN G S, et al. Multi-objective grey correlation analysis based on CFRP Helical Milling simulation model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 135(3): 1565–1585.
- [13] 高延峰, 蒲景威, 方向恩. 基于灰色关联分析的 CFRP/Ti6Al4V 叠层材料螺旋铣孔工艺参数优化[J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 90–95, 102.
- [14] GAO Yanfeng, PU Jingwei, FANG Xiang'en. Multi-objective optimization of helical milling process for CFRP/titanium alloy stacks based on taguchi grey relational analysis[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 90–95, 102.
- [15] ANNADORAI M E, RAMAKRISHNA M, JYOTHI Y. Effect on mechanical properties of CFRP composites in different fiber orientations[J]. Interactions, 2024, 245(1): 198.
- [16] BÖHLAND F, HILLIGARDT A, SCHULZE V. Analysis of subsurface damage during milling of CFRP due to spatial fibre cutting angle, tool geometry and cutting parameters[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 281: 111533.
- [17] KUMAR D, GURURAJA S. Machining damage and surface integrity evaluation during milling of UD-CFRP laminates: Dry vs. cryogenic[J]. Composite Structures, 2020, 247: 112504.
- [18] 李树健, 周永超, 陈蓉, 等. 考虑孔隙缺陷的 CFRP 微观切削仿真与实验研究[J]. 复合材料学报, 2023, 40(1): 625–636.
- [19] LI Shujian, ZHOU Yongchao, CHEN Rong, et al. Simulation and experimental study of CFRP micro cutting considering voids defects[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1): 625–636.
- [20] 万敏, 杜宇轩, 张卫红, 等. 单向 CFRP 螺旋铣削力建模[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 524134.
- [21] WAN Min, DU Yuxuan, ZHANG Weihong, et al. Cutting force modeling in helical milling process of unidirectional CFRP[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 524134.
- [22] HAN L, ZHANG J J, LIU Y, et al. Finite element investigation on pretreatment temperature-dependent orthogonal cutting of unidirectional CFRP[J]. Composite Structures, 2021, 278: 114678.
- [23] HUI X Y, XU Y J, ZHANG W H. An integrated modeling of the curing process and transverse tensile damage of unidirectional CFRP composites[J]. Composite Structures, 2021, 263: 113681.
- [24] FU Q, WU S J, LI C H, et al. Delamination and chip breaking mechanism of orthogonal cutting CFRP/Ti6Al4V composite[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 183–196.
- [25] KHATIR A, CAPOZUCCA R, KHATIR S, et al. A new hybrid PSO-YUKI for double cracks identification in CFRP cantilever beam[J]. Composite Structures, 2023, 311: 116803.
- [26] KAWARE K, KOTAMBKAR M, SONTAKKEY A, et al. Finite element analysis of CFRP composite under low velocity impact to improve the impact strength[J]. International Journal of Crashworthiness, 2023, 28(6): 717–731.
- [27] MAO C J, LIU K Y, CEPEROMEJIAS F, et al. Numerical investigation on milling performance and damage response of UD-CFRP laminates[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2025, 32(12): 2842–2855.
- [28] WANG F J, GU T Y, WANG X N, et al. Analysis of burr and tear in milling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) using finite element method[J]. Applied Composite Materials, 2021, 28(4): 991–1018.
- [29] 徐捷, 冯平法, 颜键辉, 等. 超声纵振辅助螺旋铣削内壁形貌预测模型[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 72–79.
- [30] XU Jie, FENG Pingfa, YAN Jianhui, et al. Prediction model of inner wall morphology in ultrasonic longitudinal vibration assisted helical milling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 72–79.
- [31] 陈勇刚, 韩汪涛, 李斌, 等. 大直径交点孔螺旋铣精加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(13): 22–28.
- [32] CHEN Yonggang, HAN Wangtao, LI Bin, et al. Research on helical milling technology

of large diameter intersection holes[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(13): 22–28.

[24] GE J Y, CHEN G, SU Y X, et al. Effect of cooling strategies on performance and mechanism of helical milling of CFRP/Ti–6Al–4V stacks[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(2): 388–403.

[25] XU Y N, GAO Y K, WU C, et al. On design of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminated structure with different failure criteria[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 196: 106251.

[26] 周兰. 航空难加工材料螺旋铣制孔专用刀具设计及其质量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

ZHOU Lan. Dedicated cutting tool design and research on hole quality for orbital drilling of aeronautical difficult-to-cut materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[27] 王海艳, 陶克新, 王健宇, 等. 基于灰色系统理论的球头铣刀螺旋铣孔切削参数优化[J]. *中国工程机械学报*, 2020, 18(4): 348–353.

WANG Haiyan, TAO Kexin, WANG Jianyu, et al. Optimization of cutting parameters in ball helical milling process based on grey system theory[J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2020, 18(4): 348–353.

[28] 姚鑫宇, 林强, 丁昊昊, 等. 基于田口–灰色关联法的Ni60+WC激光熔覆涂层工艺参数优化[J]. *表面技术*, 2023, 52(11): 394–405, 465.

YAO Xinyu, LIN Qiang, DING Haohao, et al. Optimization of process parameters of Ni60+WC laser cladding coating based on taguchi-grey relation method[J]. *Surface Technology*, 2023, 52(11): 394–405, 465.

[29] 王福吉, 姜向何, 魏钢, 等. 碳纤维增强热塑性树脂基复合材料周铣过程中刀–

工–屑热量分配比例计算与切削温度预测[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(4): 2099–2110.

WANG Fuji, JIANG Xianghe, WEI Gang, et al. Calculation of the heat distribution ratio of tool–chip–workpiece and prediction of cutting temperature during the peripheral milling process of carbon fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(4): 2099–2110.

[30] YU F, GUAN Y C, FANG Y, et al. Experimental and numerical investigations of PVC–FRP confined concrete column–RC beam joint reinforced with core steel tube under axial load[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(12): 4671–4685.

[31] LI X, MA D Y, LIU H F, et al. Assessment of failure criteria and damage evolution methods for composite laminates under low-velocity impact[J]. *Composite Structures*, 2019, 207: 727–739.

Multi-Objective Optimization of Machined Surface Quality in CFRP Helical Milling Considering Fiber Orientation Angle

ZHOU Lan¹, LIU Tianbing¹, AN Guosheng², LI Guangqi¹, GU Haicheng³, LIU Kaihong³, PANG Zhen³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Material Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. CBAIC Technology (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

[ABSTRACT] The fiber orientation angle has a significant influence on the hole-making quality in helical milling of CFRP. It is difficult to optimize the processing technology by using traditional experimental or macroscopic finite element modelling methods when combining the fiber orientation angle. To improve multiple objectives of machining quality for CFRP helical milling holes, the optimal cutting efficiency was obtained via macroscopic finite element simulation. Based on this, a microscopic finite element model of CFRP helical milling holes was established, and the influencing laws of different fiber orientation angles on the circumferential force (micro) and residual stress were clarified, so as to explore the optimal machining strategy for CFRP helical milling process through macro-micro analyses. The results showed that, using the grey correlation analysis method, the optimal processing parameters in the macro-micro research for CFRP helical milling are a spindle speed of 8000 r/min, a revolution speed of 60 r/min, and an axial feed of 0.24 mm. Experiments verify that there is no delamination defect in helical milling hole-making processing. In comparison with macroscopic optimization, the surface roughness of hole wall is decreased by 19.36%, the deviation of the hole diameter is reduced by 12.10%, the roundness of the inlet and outlet is improved by 10.31% and 7.52%, and the machining defects (burrs and tears) are reduced by 60.89% and 20.15% respectively.

Keywords: Machined surface quality; Multi-objective optimization; Carbon fiber reinforced plastic (CFRP); Helical milling; Grey relational analysis

(黄编 逸飞)