

DOI: 10.12382/bgxb.2025.1108



UHMWPE 纤维复合材料超声振动套孔仿真及实验研究¹

宰金祺^{1,2}, 郑雷^{1*}, 王耀霆³, 徐正亚¹, 高超¹, 何智伟³

(1.苏州工学院 机械工程学院, 江苏 常熟 215500; 2.铜仁职业技术大学工学院, 贵州 铜仁 554300; 3.盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要: 超高分子量聚乙烯 (Ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE) 纤维复合材料具有低密度、高抗拉强度及高韧性等特点, 在装甲防护领域应用前景广泛。为了研究 UHMWPE 纤维复合材料制孔时的轴向力和损伤特征, 基于 Hashin 失效准则及 UHMWPE 纤维复合材料力学本构, 建立 0°/90°铺层的 UHMWPE 纤维复合材料三维仿真模型。采用钎焊/烧结薄壁金刚石套料钻, 进行 UHMWPE 纤维复合材料超声振动辅助套孔有限元仿真分析及实验研究, 建立了超声振动套孔磨粒运动学轨迹方程。研究表明, 超声振动加工中轴向高频振动延长了磨粒磨削轨迹, 断续切削的冲击效应有利于纤维去除, 纤维毛刺与分层损伤得到有效抑制, 孔壁粗糙度显著减小。研究相较于常规加工, 超声振动加工轴向力平均降低 9.38%, 扭矩平均降幅 13.63%, 分层比平均降幅 8.74%, 制孔质量明显改善。所得成果可为 UHMWPE 纤维复合材料的推广与应用提供有益参考。

关键词: 超高分子量聚乙烯; 超声振动; 仿真; 制孔质量

中图分类号: TB332; TG713 文献标志码: A

文章编号: 1000-1093(2026)08-251108-XXX

Simulation and Experimental Study on the Ultrasonic Vibration Trepanning of UHMWPE Fiber Composite Materials

ZAI Jinqi^{1,2}, ZHENG Lei^{1*}, WANG Yaoting³, XU Zhengya¹, GAO Chao¹, HE Zhiwei³

(1. School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Technology, Changshu 215500, Jiangsu, China; 2. School of Engineering, Tongren Polytechnic University, Tongren 554300, Guizhou, China; 3. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China)

Abstract: Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber composite materials are characterized by low density, high tensile strength, high toughness, etc., and have broad application prospects in the field of armor protection. In order to study the axial force and damage characteristics of UHMWPE fiber composite material during trepanning, a three-dimensional simulation model of UHMWPE fiber composite materials with 0°/90° layup is established based on the Hashin failure criterion and the mechanical constitutive model of UHMWPE fiber composite materials. The finite element simulation analysis and experimental research are conducted using brazed/sintered thin-walled diamond core drills, and a kinematic trajectory equation of abrasive grains in the process of ultrasonic vibration trepanning is established. The results indicate that the axial high-frequency vibration extends the grinding trajectory of abrasive grains in ultrasonic vibration processing. The impact effect of intermittent cutting is beneficial for fiber removal, effectively suppressing the fiber burrs and delamination damage, and significantly reducing the roughness of the hole wall. Compared to conventional processing, the average axial force is reduced by 9.38%, the average torque is reduced by 13.63%, the average delamination ratio is reduced by 8.74%, and the hole-making quality is significantly improved in ultrasonic vibration processing, which provides a useful reference for the promotion and application of UHMWPE fiber composite materials.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene; ultrasonic vibration; simulation; hole quality

收稿日期: 2025-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51575470、52575522)

*通信作者邮箱: alei611@163.com

0 引言

坦克装甲车辆的轻量化是现代装甲防护机械化、信息化复合发展的重要基础,采用高性能轻质材料成为控制车重与兼顾防护的有效途径^[1]。工程实践中,常采用成本较低、抗弹性能良好的玻璃纤维复合材料(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP)、芳纶或凯夫拉纤维复合材料用作背板材料^[2]。UHMWPE纤维复合材料的防弹性能比GFRP等可提升30%~40%,且纤维密度仅为0.97 g/cm³,轻量化优势显著,应用前景广阔^[3]。

然而,UHMWPE纤维复合材料在装甲披挂应用时通常需要进行装配,不可避免地需要进行二次孔加工^[4]。但UHMWPE纤维复合材料单丝强度高、比模量大,同时纤维层间结合力弱、导热性差,机械加工困难,孔加工过程中容易出现分层、纤维撕裂和毛刺等加工缺陷,严重影响装配连接区域的承载能力,制约了UHMWPE纤维复合材料的推广及应用^[5-6]。

对于纤维增强树脂基复合材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)材料,在钻削力和钻削温度作用下,常规加工工艺中分层、毛刺、撕裂等加工缺陷不可避免^[7-8]。为了改善FRP材料孔加工质量,研究人员对不同加工刀具及工艺参数进行了研究。Sun等^[9]探究了烛芯钻、麻花钻和匕首钻3种刀具对高强度碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)孔加工质量的影响,结果表明匕首钻在减少轴向力与扭矩方面优势明显,相较于烛芯钻降低65%,但存在单孔加工时间长且造成严重的入口撕裂损伤。部分学者采用“以磨代钻”的套料加工方式,结合金刚石套磨刀具进行孔加工。Cao等^[10]采用金刚石套料钻进行CFRP孔加工理论及实验研究,建立套料加工轴向力与分层损伤模型,研究了加工参数对分层、轴向力的影响,验证了模型的有效性。蒋朕琦^[11]探究了麻花钻、改进麻花钻、匕首钻以及金刚石套料钻4种刀具对CFRP孔加工分层影响,发现麻花钻、改进麻花钻和匕首钻均不可避免地产生了较大的出、入口损伤,套料钻制孔虽然能有效抑制分层损伤,但受加工参数影响较大。因此,以磨代钻的套料加工方式是FRP材料孔加工的可行办法,但受工艺参数影响显著,且尚未见UHMWPE纤维复合材料中应用。

此外,有学者发现,低频、超声振动加工工艺是GFRP材料高质量孔加工的可行办法,超声振动加工技术在纤维材料加工中有着显著工艺优势^[12-13]。Erfani等^[14]设计一种低频辅助钻削装置并针对高密度聚乙烯进行钻孔实验,结果表明低频振动加工工

艺可以减小切屑,改善表面质量,但仅适用于低速加工情形。Li等^[15]建立了CFRP纵扭旋转超声钻削刀具运动学轨迹模型,通过实验研究分析了加工参数对轴向力及分层损伤的影响,相较于传统加工,旋转超声加工的切削力降低了17.8%、最大分层系数降低了8.6%,但轴向力及分层面积极数值仍旧较大,且超声优势在高速下不明显。Lü等^[16]对CFRP进行了旋转超声套磨技术研究,结果表明纵向超声振动的叠加延长了磨粒轨迹、降低了轴向力,轴向力减小有利于减小分层损伤,但难以避免切屑粘结,切削热堆积。超声振动工艺可以有效降低FRP孔加工轴向力与温度,增强刀具排屑能力,延长刀具使用寿命,显著改善加工质量,抑制加工损伤,在UHMWPE纤维复合材料孔加工中应用前景广阔。

值得关注的是,一些学者通过仿真模拟的方式研究工艺参数对去除机理及加工缺陷的影响规律,为解决FRP孔加工难题提供了有效参考^[17-18]。傅国宇等^[19]以CFRP层压板为对象建立了跨尺度有限元模型,探究了加工参数与纤维角度对加工损伤影响规律,并验证了模型有效性。张勋等^[20]开展了CFRP大孔径钻削有限元仿真及实验研究,建立了轴向力、扭矩、分层形状预测模型,误差分别为15.0%、19.0%、12.4%。Zhou等^[21]建立了CFRP螺旋铣削的三维有限元模型,采用多目标优化分析方法确定了加工参数对轴向力、径向力和最小主残余应力的影响规律,验证了仿真模型的准确性。

综上所述可知,超声振动套孔工艺是FRP材料高质低损伤孔加工的有效手段,在降低钻削力、扭矩以及提高加工质量方面工艺优势显著,但有关UHMWPE纤维复合材料孔加工的研究却鲜有报道。鉴于此,本文结合钎焊/烧结薄壁金刚石套料钻,建立0°90°铺层的UHMWPE纤维复合材料孔加工三维模型,进行孔加工仿真及实验研究,探究超声振动套孔加工工艺对轴向力、加工缺陷、表面质量的影响规律,以期为UHMWPE纤维复合材料在装甲防护领域进一步应用提供有益参考。

1 有限元仿真

1.1 超声振动套孔运动学分析

超声振动辅助加工是一种将高频微小振动(频率20~40 kHz、振幅1~20 μm)施加在刀具或工件上,与传统加工技术相叠加的制造技术,使金刚石套料钻与工件持续接触转变为周期性的接触与分离,具备动态脉冲特性,从而降低轴向力,减小刀具磨损,改善加工质量。超声振动辅助套孔模型如图1所示。

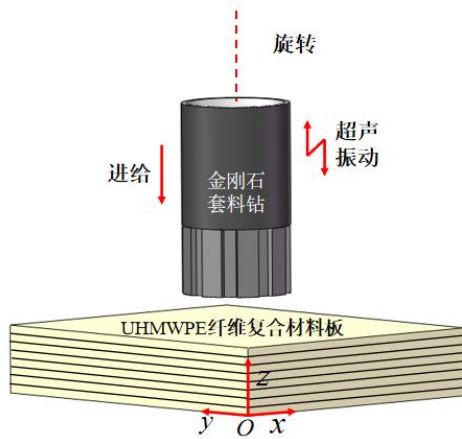


图1 超声振动辅助套孔模型

Fig.1 Model of ultrasonic vibration assisted trepanning
套料钻端面任意一颗磨粒运动轨迹如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} x(t) = R\cos(\omega t) = R\cos\left(\frac{n\pi}{30}t\right) \\ y(t) = R\sin(\omega t) = R\sin\left(\frac{n\pi}{30}t\right) \\ z_1(t) = -v_f t \\ z_2(t) = -v_f t + A\sin(2\pi f t) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为磨粒在 x 轴、 y 轴方向坐标； $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$ 分别为常规加工、超声振动加工 z 轴方向坐标； R 为套料钻直径； ω 为刀具角速度； t 为时间； n 为转速； v_f 为进给速度； A 为振幅； f 为振动频率。刀具的进给方向为负方向。

单颗磨粒运动轨迹如图 2 所示，超声振动使单颗磨粒运动轨迹转变为具有周期性轴向高频正弦振动的三维螺旋线，实际磨削距离延长。磨粒的周期性接触与分离产生瞬时冲击的“锤击”效应，有效促进纤维和环氧树脂基体的切断，降低轴向力，减少界面脱粘，从而改善孔加工质量。

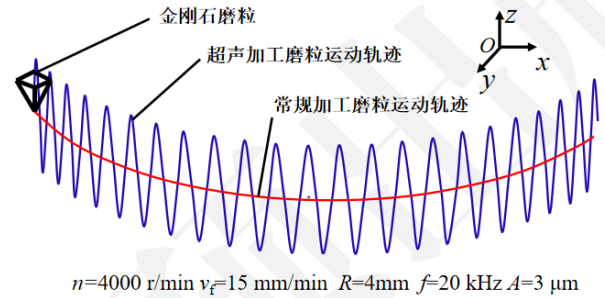


图2 磨粒运动轨迹

Fig.2 Motion trajectory of abrasive grain

1.2 三维模型建立

对刀具进行简化，只选取套料钻加工部分进行建模，直径为 8 mm，金刚石磨粒为六棱柱形状，不规则地分布在刀具的侧面和底部。UHMWPE 纤维复合材料单层板以 $0^\circ/90^\circ$ 依次铺层形成工件模型，长 12 mm、宽 12 mm、厚 2 mm，单层厚度为 0.25 mm，仿真模型如图 3 所示。

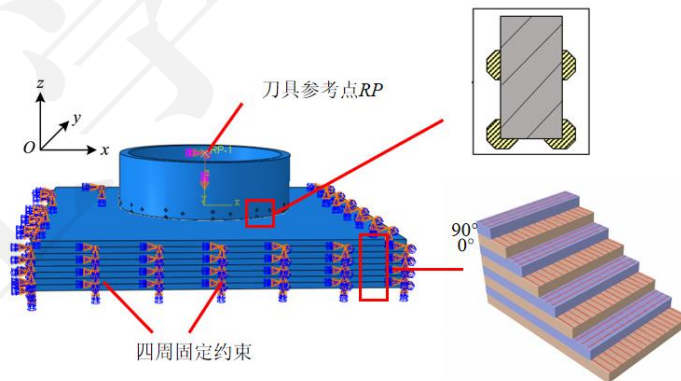


图3 仿真模型

Fig.3 Simulation model

表 1 磨粒参数

Table1 Abrasive grain parameters

密度/ (g cm^{-3})	弹性模量 /GPa	泊松比
3.521	1 171	0.07

套料钻采用四节点线性四面体单元 (C3D4)，单

元密度为 0.2 mm。UHMWPE 纤维复合材料采用线性六面体单元 (C3D8R)，单元密度为 0.1 mm，采用固定约束工件四周，相互作用类型为表面与表面切向罚接触，摩擦系数设为 0.1。通过周期型曲线的傅里叶级数建立超声振动幅值，施加超声振动频率 20 kHz，振幅为 3 μm ，如图 4 所示。

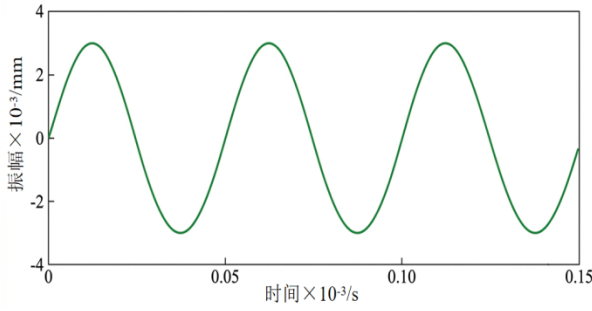


图 4 超声振动加工振幅曲线

Fig.4 Ultrasonic vibration processing amplitude curve

1.3 材料本构及损伤模型

UHMWPE纤维复合材料适用于各向异性弹性力学，应力-应变本构关系写成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 和 τ_{zx} 为应力不同方向

的分量； C_{11} 、 C_{22} 、 $\dots$ 、 C_{66} 为刚度系数； ε_x 、 ε_y 、

ε_z 、 γ_{xy} 、 γ_{yz} 和 γ_{zx} 为应变不同方向分量；

Hashin损伤准则包含以下四方面^[22]：

纤维拉伸失效， $\sigma_{11} \geq 0$ ：

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = 1 \quad (3)$$

纤维压缩失效， $\sigma_{11} < 0$ ：

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_C} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

基体拉伸失效， $\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$ ：

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_T^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = 1 \quad (5)$$

基体压缩失效， $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$ ：

$$\left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} \right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = 1 \quad (6)$$

式中： σ_{ij} 为应力不同方向分量； X_T 和 Y_T 为层压板

拉伸强度； X_C 和 Y_C 为层压板压缩强度； S_{12} 、 S_{13}

和 S_{23} 为面内剪切强度。具体参数见表 2。

表 2 UHMWPE 纤维强度参数^[23]

Table2 UHMWPE fiber strength parameters^[23]

参数	数值/GPa
X_{1t}	4.50
X_{2t}	0.70
X_{3t}	0.70
X_{1c}	4.50
X_{2c}	0.70
X_{3c}	0.70
S_{12}	0.34
S_{13}	0.18
S_{23}	0.18

UHMWPE纤维复合材料主要弹性力学参数如表3所示。

表 3 UHMWPE 纤维力学属性^[23]

Table3 Mechanical properties of UHMWPE fibers^[23]

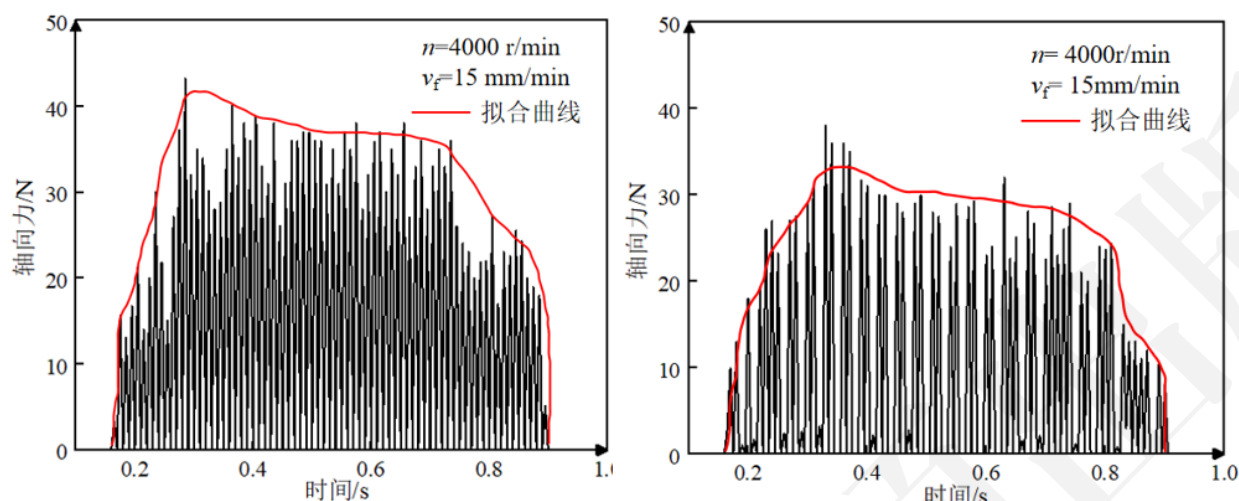
参数	数值
密度 $\rho/(\text{g cm}^{-3})$	0.98
杨氏模量 E_1/GPa	153
杨氏模量 E_2/GPa	113
杨氏模量 E_3/GPa	113
泊松比 ν_{12}	0.3
泊松比 ν_{13}	0.3
泊松比 ν_{23}	0.4
剪切模量 G_{12}/GPa	6
剪切模量 G_{13}/GPa	6
剪切模量 G_{23}/GPa	3.5

1.4 有限元仿真结果分析

图5所示为主轴钻速4 000 r/min、进给速度15 mm/min、超声频率20 kHz以及振幅为3 μm 工况下仿真与实验轴向力对比。由图5 (a)可知，受套料钻挤压影响，工件网格单元变形去除，产生间断的峰值，轴向力随钻头钻入急剧增大，然后趋于稳定加工，随着钻头钻出工件轴向力骤然减小。由拟合后轴向力变化曲线可知，仿真加工与实验加工轴向力变化趋势的一致性较好，仿真与实验轴向力数值误差在10%以内，同比文献[20]误差更小，表明本文的建模方式和子程序更加可靠。此外，在仿真过程中，超声加工轴向力断续性更为明显，振动冲击作用加速了单元网格失效删除，可以有效促进磨粒切断纤维，

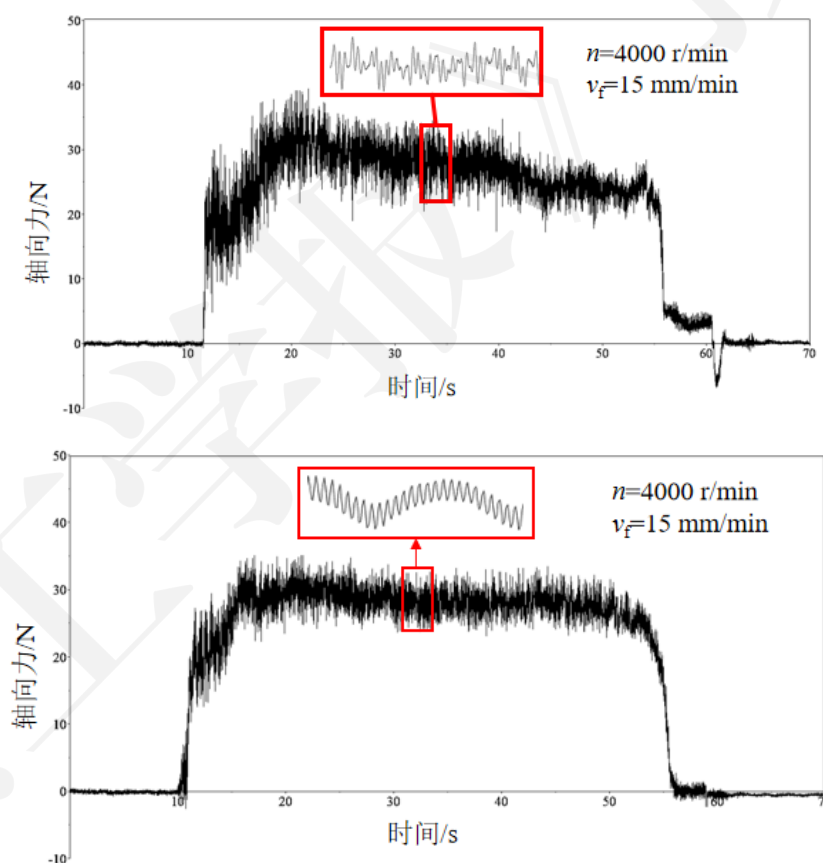
同时超声加工过程中的稳定钻削时间维持更久，轴

向力数值更低，加工稳定性较好。



(a) 仿真加工轴向力对比（左为常规加工，右为超声加工）

(a) Comparison of axial forces in simulated processing (left: conventional processing, right: ultrasonic processing)



(b) 实验加工轴向力对比（上为常规加工，下为超声加工）

(b) Comparison of axial forces of experimental processing (upper: conventional processing, below: ultrasonic processing)

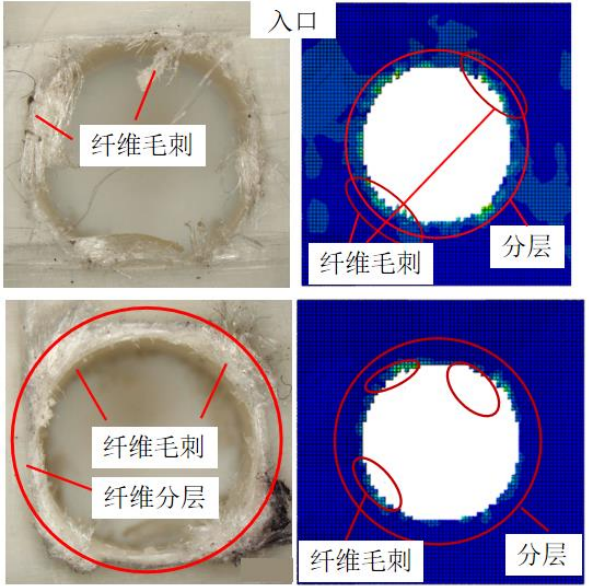
图 5 轴向力对比

Fig. 5 Comparison of axial forces

UHMWPE纤维复合材料仿真与实验孔加工出、入口结果如图6所示。由图6可见：入口处，常规加工的纤维毛刺集中在 $\pm 45^\circ$ 纤维方向、拉丝现象较为严重，散乱分布在孔四周，仿真结果也出现了较为明显的纤维毛刺现象，由于时间历程较短，轴向力

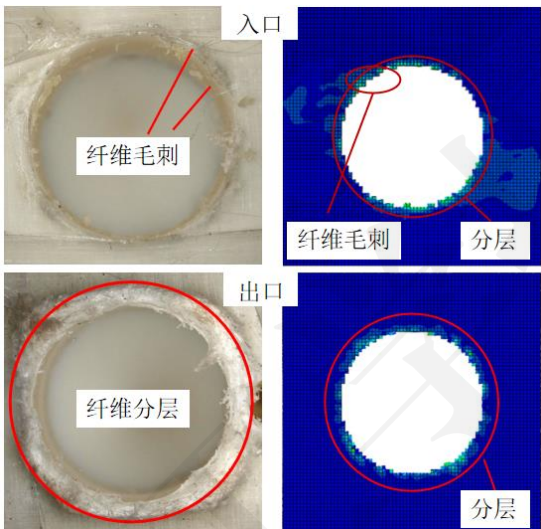
变化剧烈，在入口处也出现了轻微分层现象；出口处，超声加工方式纤维毛刺现象得到有效抑制，纤维束被有效去除。但两种加工方式均不可避免地出现了分层损伤，超声加工分层区域明显优于常规加工，仿真加工情形与之相符。这表明超声振动加工

能有效改善排屑情况,抑制出、入口损伤效果显著。



(a) 常规加工出、入口

(a) Conventional processing and packaging for export and import



(b) 超声加工出、入口

(b) Ultrasonic processing export and import

图 6 出、入口损伤对比

Fig.6 Export/import damage comparison

2 实验方案

加工材料及装置如图7所示,实验所用的材料由中国兵器工业集团第53研究所提供, UHMWPE纤维复合材料长200 mm、宽150 mm、厚10 mm, 密度为0.97 g/cm³, 弹性模量为100 GPa, 断裂强度为3.1 GPa。

实验所用的钎焊/烧结薄壁金刚石套料钻直径8 mm, 壁厚0.4 mm±0.1 mm。采用SMD级金刚石, 粒度为70/80、80/100和100/120目按1 : 1 : 1混合。

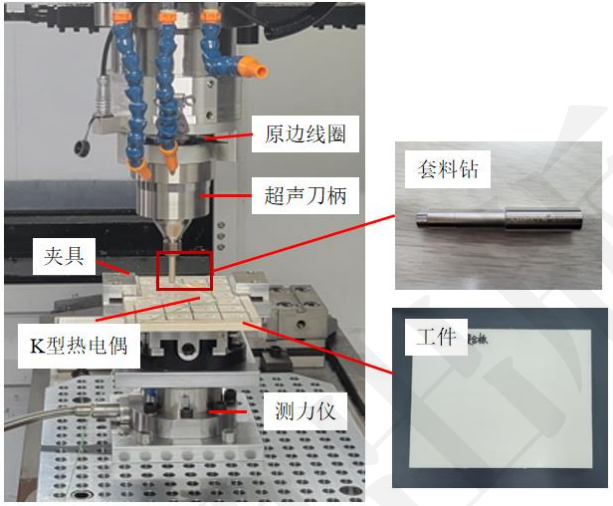


图 7 加工实验装置

Fig.7 Processing experimental device

加工设备为西格玛(中国)L850立式加工中心。使用奇石乐(瑞士) Kistler 9272四分量测力仪测量切削力及扭矩, 使用基恩士(中国) VK-X100激光显微镜观测孔表面形貌, 使用 Thermo Fisher Scientific公司(美国) Nova.SEM450场发射扫描电子显微镜观测孔壁微观形貌。经调试可知, 在超声频率20 kHz、振幅为3 μm时加工最稳定, 此次实验在此工况条件下进行。实验参数如表4所示。

表 4 实验参数

Table4 Experimental parameters

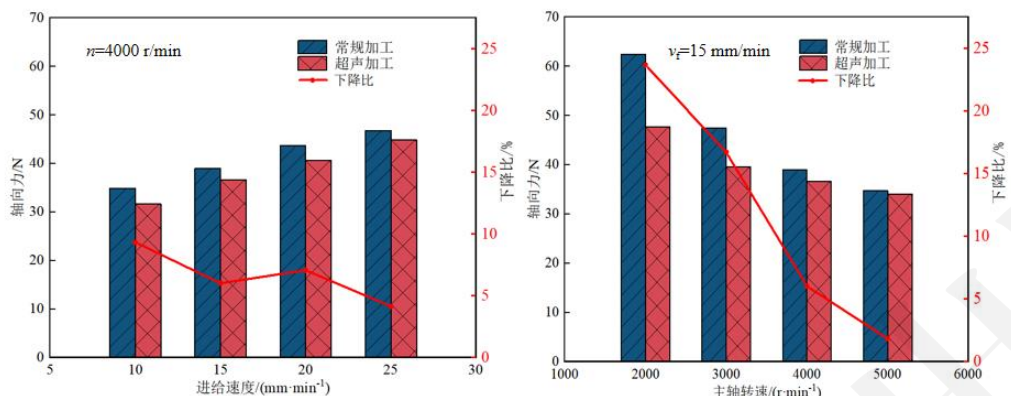
序号	主轴转速/ (r·min ⁻¹)	进给速度 (mm·min ⁻¹)	超声振幅 /μm
1	2 000, 3 000,	10, 15,	0
	4 000, 5 000	20, 25	
2	2 000, 3 000,	10, 15,	3
	4 000, 5 000	20, 25	

3 实验结果分析

3.1 轴向力及扭矩分析

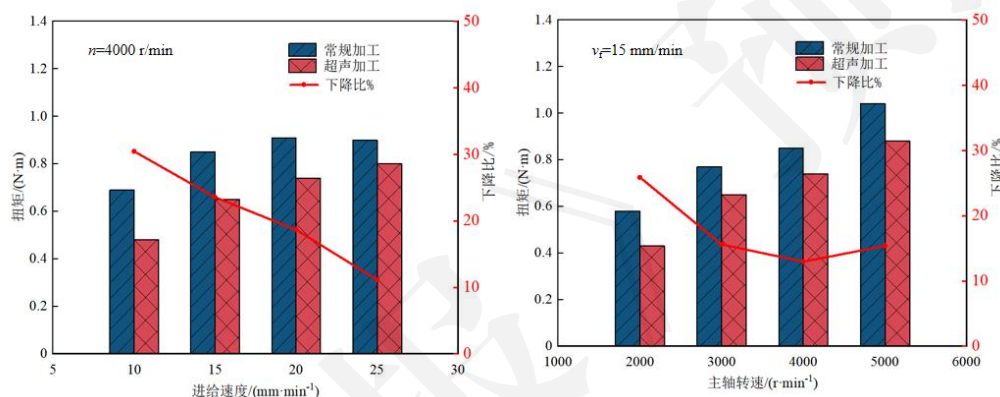
图8所示为轴向力及扭矩变化曲线。对比常规加工, 超声振动套孔加工降低轴向力及扭矩的效果显著, 轴向力平均降幅9.38%, 扭矩平均降幅13.63%。超声振动磨削加工过程中, 套料钻与工件由持续接触转变为高频的断续接触, 产生短暂的冲击效应, 加速了内部裂纹的扩展, 从而降低了轴向力。此外, 超声振动具有弹射效应, 减缓了切屑粘结, 减小了刀具的磨损, 保证了钻头的锋利, 从而降低了轴向力。在超声振动作用下, 金刚石磨粒对材料的磨抛作用增大, 增强了刀具切断材料的能力, 磨粒实际磨削轨迹加长, 同时高频振动利于切削液进入, 便于切削热排散, 有效减小刀具与切屑摩擦, 抑制纤

维粘结，从而降低扭矩。



(a) 单因素对轴向力影响规律 (左为进给速度, 右为主轴转速)

(a) The influence of a single factor on axial force (left: feed rate, right: spindle speed)



(b) 单因素对扭矩影响规律 (左为进给速度, 右为主轴转速)

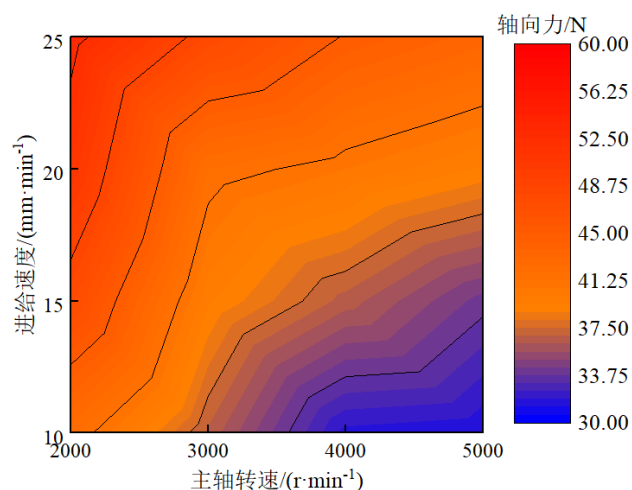
(b) The influence of single factors on torque (left: feed rate, right: spindle speed)

图 8 轴向力、扭矩变化曲线

Fig.8 Curves of axial force and torque variation

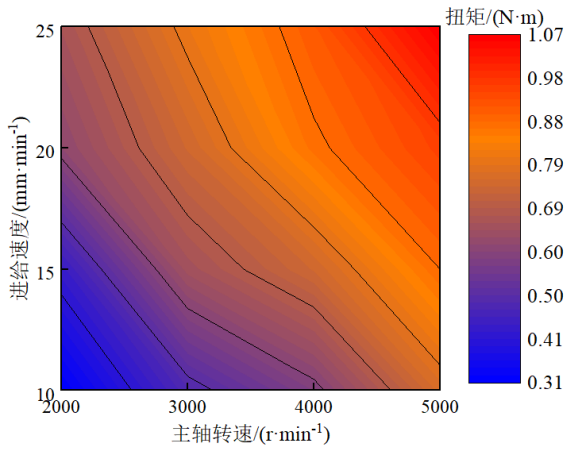
值得关注的是, 随着主轴转速的增加, 超声振动加工降低轴向力及扭矩的幅度明显下降。这是因为主轴转速过高时, 套料钻与工件产生相对划擦, 不能有效磨削, 从而影响了加工效果。

图9所示为超声加工中工艺参数对轴向力及扭矩影响规律。结合图8与图9可知: 轴向力随主轴转速的增大及进给速度的减小呈现减小趋势, 在高转速低进给参数下轴向力较小; 扭矩随主轴转速的减小及进给速度的减小呈减小趋势, 在低转速低进给参数下扭矩较小。究其原因, 是因为当转速增加时, 每转进给量不变, 参与磨削的磨粒数量增加, 磨粒对材料的磨抛作用增大, 导致扭矩增大; 同时金刚石磨粒对材料的锤击次数减少, 磨粒对工件锤击作用减小, 轴向力因此降低。当进给速度增加时, 材料的去除率增大, 轴向力和扭矩随之增大。虽然同比文献[16]中超声振动减小轴向力及扭矩的幅度略有下降, 但UHMWPE纤维复合材料断裂强度高, 超声振动仍然有效降低了轴向力及扭矩。



(a) 工艺参数对轴向力的影响

(a) The influence of process parameters on axial force



(b) 工艺参数对扭矩的影响

(b) The influence of process parameters on torque

图9 超声加工中工艺参数对轴向力及扭矩影响规律

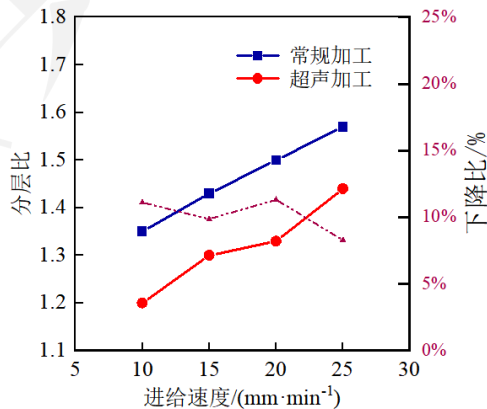
Fig.9 The influences of process parameters on axial force and torque in ultrasonic processing

3.2 孔加工质量分析

实际应用中，入口处的拉丝、毛刺缺陷经砂纸打磨后可正常进行装配。但出口撕裂、分层难以消除，是影响装配精度的主要因素。为了表征出口分层损伤的严重程度，本文定义分层发生的最大范围 $L_{\max}$ 与制孔直径 L_0 之比为分层比 γ ，

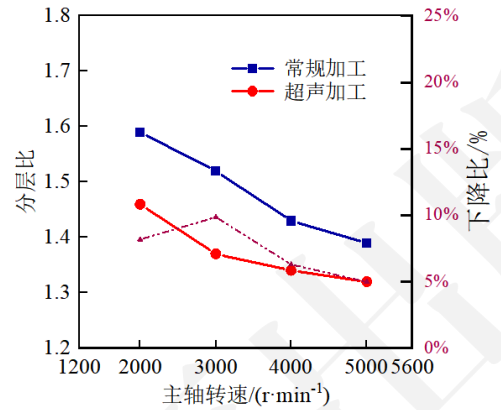
$$\gamma = \frac{L_{\max}}{L_0} \quad (7)$$

图10所示为工艺参数对分层损伤的影响规律。对比图8和图10可知，分层比变化与轴向力的变化规律相似，分层比均随着主轴转速的增大与随进给速度的减小呈减小趋势。与常规加工相比，超声振动加工轴向力更低更稳定，纤维与基体之间的应力更均匀分布，显著改善分层损伤，分层比平均降幅8.74%，对比文献[14]，超声振动工艺优势明显，显著降低了UHMWPE纤维分层损伤。综合轴向力、扭矩及损伤情形分析可知，UHMWPE纤维复合材料超声振动套孔加工应在高转速低进给工况下进行。



(a) 进给速度对分层比的影响

(a) The influence of feed speed on the layering ratio



(b) 主轴转速对分层比的影响

(b) The influence of spindle speed on the layering ratio

图10 分层比变化曲线

Fig. 10 Layering ratio variation curve

加工后的孔壁表面如图11所示。由图11可见：常规加工的孔壁残留大量毛刺，存在明显螺旋状划痕，表面纤维凌乱、纤维束未被有效切除，树脂基体存在明显涂覆的现象，纤维与树脂粘结成球状附着在孔壁上，出口方向纤维层间分层严重；超声加工孔壁表面光滑，纤维层间粘结紧密，分层得到有效抑制。由此可见，超声振动的冲击切削使得纤维被有效切断，毛刺显著减少，同时超声加工中磨粒切削轨迹更长，有效切断了纤维束，减小了划痕，使孔壁表面质量得到提升，表面更为平滑。

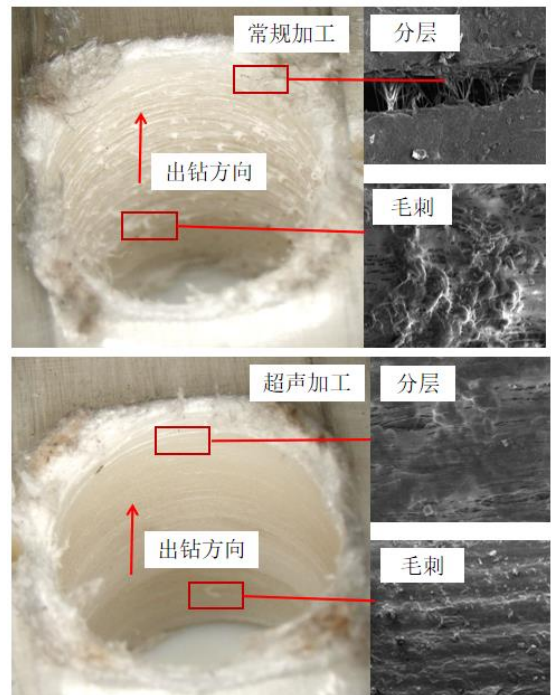


图11 孔壁表面形貌对比

Fig. 11 Comparison of hole wall surface topographies

本文采用薄壁金刚石套料钻, 结合超声振动加工技术, 建立了UHMWPE纤维复合材料孔加工有限元仿真模型并进行实验验证, 为超声振动套孔加工技术在UHMWPE纤维复合材料应用提供了参考。得出主要结论如下:

1) 基于Hashin失效准则及UHMWPE纤维复合材料力学本构, 建立了 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 铺层UHMWPE纤维复合材料的三维有限元模型。仿真与实验轴向力变化趋势一致且数值相近, 平均误差在10%以内, 验证了本文所提模型的有效性。

2) 建立了UHMWPE纤维复合材料超声振动套孔加工磨粒运动学轨迹模型, 对比仿真结果, 超声振动加工中磨粒实际磨削距离加长, 形成短暂的振动冲击效应, 孔出、入口分层面积显著减小, 有效抑制了孔四周毛刺与纤维撕裂。

3) 进行了UHMWPE纤维复合材料超声振动套孔实验, 在主轴转速2 000~5 000 r/min、进给速度10~25 mm/min条件下, 超声振动加工磨粒的冲击效应加速了裂纹扩展, 有效降低了轴向力与扭矩: 轴向力平均降低9.38%, 扭矩平均降低13.63%。

4) 观测孔壁表面形貌, 对比常规加工可知, 超声振动磨削加工有效抑制孔分层损伤, 分层损伤平均降幅8.74%, 孔壁无纤维残留, 表面质量显著提升。表明在高转速和低进给时, 本文所提超声振动套孔加工UHMWPE纤维复合材料工艺的优势显著。

参考文献 (References)

- [1] 代春泉, 矫维成, 金浩正, 等. 拼接式陶瓷复合装甲的研究现状及发展趋势[J]. 复合材料学报, 2026, 43 (4): 1927-1957.
DAI C Q, JIAO W C, JIN H Z, et al. Research status and development trends of modular ceramic composite armor[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2026, 43 (4): 1927-1957. (in Chinese)
- [2] 陈谦, 王朝辉, 张文武, 等. 不同应用场景下超高分子量聚乙烯/弹性体复合材料力学性能劣化规律[J]. 复合材料学报, 2023, 40(11): 6288-6298.
CHEN Q, WANG C H, ZHANG W W, et al. Degradation law of mechanical properties for ultra-high molecular weight polyethylene/elastomer composites at different application environments[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(11): 6288-6298. (in Chinese)
- [3] 甄泓, 肖李军, 杜成鑫, 等. 在弹道冲击条件下超高分子量聚乙烯纤维复合材料板破坏模式[J]. 兵工学报, 2025, 46 (7): 240725.
ZHEN H, XIAO L J, DU C X, et al. Damage modes of ultra-high molecular weight polyethylene fiber composite plates under ballistic impact conditions[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46 (7): 240725. (in Chinese)
- [4] 贾振元, 付饶, 王福吉. 碳纤维复合材料构件加工技术进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(19): 348-374.
JIA Z Y, FU R, WANG F J. Research advance review of machining technology for carbon fiber reinforced polymer composite components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(19): 348-374. (in Chinese)
- [5] 杨亮, 蔡桂喜, 刘芳, 等. 碳纤维复合材料制孔结构超声无损检测及评价[J]. 中国机械工程, 2023, 34(19): 2327-2332.
YANG L, CAI G X, LIU F, et al. Ultrasonic nondestructive testing and evaluation of CFRP hole-making structures[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(19): 2327-2332. (in Chinese)
- [6] FU C L, HUANG Y Y, JIANG Q R, et al. Drilling mechanism of temperature-sensitive non-directional UHMWPE fiber composites[J]. Polymer Composites, 2025, 46(8): 7595-7613.
- [7] XU J Y, GEIER N, SHEN J X, et al. A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 9677-9707.
- [8] MAHDI A, MAKHFI S, HABAK M, et al. Analysis and optimization of machining parameters in drilling woven carbon fiber reinforced polymer CFRP[J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105885.
- [9] SUN Z F, GENG D X, MENG F X, et al. High performance drilling of T800 CFRP composites by combining ultrasonic vibration and optimized drill structure[J]. Ultrasonics, 2023, 134: 107097.
- [10] CAO S Y, LI H N, HUANG W J, et al. A delamination prediction model in ultrasonic vibration assisted drilling of CFRP composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 302: 117480.
- [11] 蒋朕琦, 黄文健, 曹诗宇, 等. 不同刀具对超声辅助钻削CFRP 分层损伤的影响研究[J]. 复合材料科学与工程, 2022(2): 56-61.
JIANG Z Q, HUANG W J, CAO S Y, et al. Study on the effect of different tools on hole delamination of ultrasonic-assisted drilling CFRP[J]. Composites Science and Engineering, 2022(2): 56-61. (in Chinese)
- [12] MA G F, KANG R K, YIN S, et al. Effect of amplitude ratios on hole quality in longitudinal-torsional coupled ultrasonic-assisted drilling of CFRP composites[J]. The

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122(7): 2911-2926.
- [13] ZHANG S G, WANG W H, XIONG Y F, et al. Defect suppression mechanism of ultrasonic vibration-assisted drilling carbon fiber/bismaleimide composite [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(8): 366-380.
- [14] ERFANI A, GHANDEHA A, AFSHARFARD A. Experimental investigation and optimization of low-frequency vibration-assisted drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 123: 171-3182.
- [15] LI P Y, SUN J, LI J, et al. Study on drilling force and export defects of CFRP composites in RULTVD[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 134: 880-890.
- [16] LÜ D X, CHEN M D, YAO Y Q, et al. High-frequency vibration effects on the hole integrity in rotary ultrasonic drilling of carbon fiber-reinforced plastic composites[J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106448.
- [17] XU M R, CAO L C, LI J X, et al. Experimental, modeling, and numerical simulation of ultrasonic assisted drilling of CFRP/Ti stacks[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2025, 133: 97-117.
- [18] SHI W T, YAN T M, LIU Y D, et al. Simulation analysis of aramid fiber reinforced polymer hole machining and experimental study on delamination mechanism[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 125(1/2): 417-433.
- [19] 傅国宇, 李皓, 武卫洲, 等. 碳纤维增强复合材料钻削过程跨尺度三维数值建模及损伤形成机理研究[J]. 机械工程学报, 2025, 61(7): 144-155.
- FU G Y, LI H, WU W Z, et al. Three-dimensional multi-scale modeling and drilling process technology of carbon fiber reinforced polymer composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(7): 144-155. (in Chinese)
- [20] 张勋, 陈燕, 徐九华, 等. 大厚径碳纤维复合材料三维钻削有限元仿真及试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(2): 53-60.
- ZHANG X, CHEN Y, XU J H, et al. Finite element simulation of and experimental study on three-dimensional drilling of large diameter carbon fiber composites[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2020, 40(2): 53-60. (in Chinese)
- [21] ZHOU L, WANG Y L, AN G S, et al. Multi-objective grey correlation analysis based on CFRP Helical Milling simulation model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 135(3/4): 1565-1585.
- [22] MOHAPATRA D R, BEHERA S, MONDAL S. Modified Hashin criteria based 3D damage progression in bolted, bonded and hybrid single-lap joints of woven GFRP laminates[J]. Structures, 2025, 78: 109265.
- [23] 刘东旭, 温焱珂, 董方栋, 等. SiC/UHMWPE防弹插板在步枪弹侵彻下的动态响应研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(12): 264-273.
- LIU D X, WEN Y K, DONG F D, et al. A study on the dynamic response of the rifle bullet penetration into a SiC/UHMWPE ballistic plate[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(12): 264-273. (in Chinese)