

DOI: 10.3901/JME.2021.05.273

基于磨料水射流的三维编织复合材料 铣削技术研究

尹东杨 陈晓川 鲍劲松

(东华大学机械工程学院 上海 201620)

摘要: 针对磨料水射流对三维编织复合材料的冲蚀过程, 利用 Hypermesh/Ls-Dyna 有限元分析软件建立磨料水射流冲蚀复材模型, 以射流压力、走刀速度、横向进给量为变量开展仿真分析, 得出不同工艺参数下材料的去除深度与质量以及材料的应力变化情况, 完成水射流铣削三维编织复合材料的工艺过程模拟。研究发现, 随着射流压力的增加, 复合材料平均铣削深度和 Z 向最大应力不断增加, 当射流压力超过 70 MPa 时材料被击穿; 随着走刀速度和横向进给量的增大, 平均铣削深度和材料 Z 向最大应力呈不断减小趋势; 材料铣削深度主要受射流压力的影响, 其次是走刀速度, 而横向进给量对深度影响较小; 铣削面质量主要受横向进给量的影响, 当横向进给量大于或小于喷嘴直径时, 铣削面会出现峰谷现象, 而等于喷嘴直径时铣削面质量较好。根据仿真结果开展试验研究, 将试验结果与仿真结果进行对比分析, 验证了仿真模型的可行性与有效性。

关键词: 磨料水射流铣削; 三维编织复合材料; Hypermesh/Ls-Dyna; 数值模拟

中图分类号: TG162

Research on Milling Technology of 3D Braided Composites Based on Abrasive Water Jet

YIN Dongyang CHEN Xiaochuan BAO Jinsong

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620)

Abstract: For abrasive water jet on the erosion process of 3d braided composites, Hypermesh/Ls-Dyna finite element analysis software is used to establish abrasive water jet erosion model of composites with jet pressure, feeding speed, the transverse feed as the variable to carry out the simulation analysis. The removal depth, milling surface quality and stress variation of the material under different process parameters are obtained, and the process simulation of waterjet milling 3D braided composites is completed. It was found that with the increase of jet pressure, the average milling depth and z-direction maximum stress of the composite material increased continuously. When the jet pressure exceeded 70 MPa, the material was broken down. With the increase of cutting speed and transverse feed, the average milling depth and the maximum stress in material Z direction are decreasing. The depth of material milling is mainly affected by the jet pressure, followed by the cutting speed, and the transverse feed has little influence on the depth. The milling surface quality is mainly affected by the transverse feed quantity. When the transverse feed quantity is greater than or less than the nozzle diameter, the milling surface quality will appear peak and valley phenomenon, while when it is equal to the nozzle diameter, the milling surface quality is better. Experimental research is carried out according to the simulation results, and the experimental results are compared with the simulation results to verify the feasibility and effectiveness of the simulation model.

Key words: abrasive water jet milling; 3D braided composite; Hypermesh/Ls-Dyna; numerical simulation

0 前言

三维编织复合材料是一种新型的纺织网状结构材料, 既保留了纤维预制体和基体的主要优点, 同时又避免了传统层合复合材料层间强度低、抗冲击

性能差等缺点, 提高了材料本身的强度和刚度, 具有良好的抗损伤性能, 已被广泛应用于航天航空、防护和医疗等领域。

目前三维编织复合材料主要以传统机械加工为主, 铣削是不可避免的后加工工艺, 其加工过程易出现钻头出入口处纤维抽出、基体烧灼等缺陷, 且散热质量差加速刀具磨损。磨料水射流技术是将纯

20200610 收到初稿, 20210105 收到修改稿

水通过加压器加压, 高速射流带动磨料粒子, 混合相从直径为 0.2~1.0 mm 的细小喷嘴射出, 直接作用于材料表面达到去除材料的目的, 具有加工精度高、效率高、质量好、应用范围广、环保无污染等优点, 在加工复合材料方面有较好的应用前景^[1]。

国内外学者在磨料水射流切割与应用方面获得了较多成果, 但在其铣削加工方面研究较少, 特别是有限元模拟领域。张文超等^[2]通过开展不同工艺参数下的磨料水射流铣削 45 钢的正交试验, 并对试验结果的表面粗糙度与材料去除率进行了数据分析, 得出了最优铣削工艺参数。刘丽等^[3]以不同工艺参数和工件表面粗糙度为研究对象, 开展了磨料水射流铣削试验, 建立了铣削表面粗糙度的 BP 神经网络模型。FRANCOIS 等^[4]通过开展磨料水射流铣削航空铝合金的试验, 建立了相关数学模型, 研究了射流压力、磨料流量、喷嘴直径对切削深度和进给速率的影响规律。郭嘉赫等^[5]采用单因素法和正交试验法研究了磨料水射流的不同工艺参数对混凝土切割性能的影响程度, 并通过多元线性回归分析得到了切割深度的预测模型。YAKUB 等^[6]通过试验法将磨料水射流技术应用于 Ti6Al4V 材料上, 研究了不同工艺参数对切割深度和粗糙度的影响, 为 Ti6Al4V 材料的铣削提供了一种有价值的方法。这些主要是通过对材料开展具体试验, 分析影响结果的因素, 得出磨料水射流铣削的工艺参数, 而在三维编织复合材料的水射流铣削建模与试验研究方面并不完善。将有限元法与水射流技术应用于三维编织复合材料的工艺研究, 可以显著降低传统机械加工成本, 提高加工效率, 也为该材料的加工提供一种新的思路。本文通过 Hypermesh/Ls-Dyna 软件, 建立磨料水射流铣削三维编织复合材料的有限元模型, 采用 ALE 算法对射流冲蚀过程进行流固耦合仿真, 在不同工艺参数下进行数值模拟, 得出不同的铣削深度以及材料在射流方向的最大应力变化情况, 通过开展试验并将仿真结果与试验结果进行对比分析, 验证了水射流铣削有限元模型的可行性与有效性。

1 水射流铣削有限元模型的建立

目前关于三维编织复合材料的建模方法主要有宏观和微观两种, 微观尺度主要用来研究复合材料内部纤维断裂以及界面失效机理; 宏观尺度主要用来研究材料受力变化以及宏观损伤模型^[7]。本文主要研究三维编织复合材料的水射流加工工艺, 因此采用宏观模型。

1.1 材料与射流仿真模型的建立

三维编织复合材料内部纤维束之间相互挤压, 树脂基体随机分布, 因此材料内部结构比较复杂, 在有限元计算中需要对模型进行简化, 所以在建立实体模型之前作如下假设。

(1) 将材料内部纤维束截面形状视为圆形截面, 且截面形状沿轴线方向保持不变。

(2) 材料内部纤维束具有相同的几何特征和物理性能。

(3) 编织和注塑工艺稳定, 树脂基体在纤维束之间均匀分布, 复合材料在一定长度范围内具有良好的连续性与均匀性^[8]。

有限元仿真模型的合理性在于既可以达到仿真所需精度, 同时又能降低时间成本^[9]。考虑到磨料水射流铣削复材时进入稳态过程较快, 因此本文仿真模型选择具有代表性的材料中心区域, 尺寸设置为长 4.5 mm, 宽 4 mm, 厚度为材料原始厚度 4.2 mm。在三维四向编织复合材料预制体结构中, 按区域可划分为体胞、面胞和角胞, 且单胞内部共有四个方向。在 Solidworks 中建立材料的体胞、面胞和预制体模型如图 1 所示。

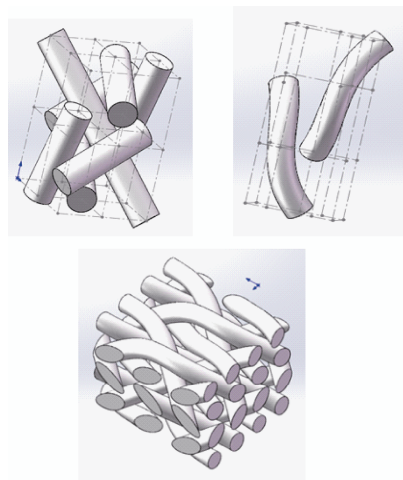


图 1 体胞、面胞和预制体结构实体模型

将树脂基体与编织预制体通过布尔运算组合得复合材料结构如图 2 所示。

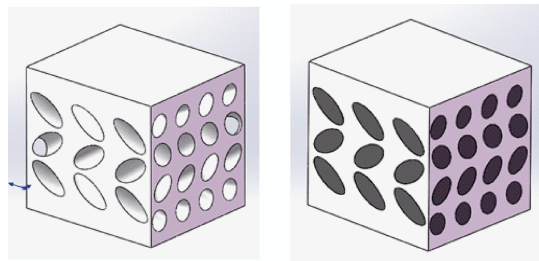


图 2 树脂与复合材料实体模型

将三维编织复合材料实体模型导入 Hypermesh 中,选择显示动力学 Ls-Dyna 模块进行前处理设置。为了提高仿真模型的计算速度与精度,对材料中心铣削主受力区域进行网格加密。在 Ls-Dyna 程序中,当涉及到有材料单元失效去除时,主部件网格尺寸需大于等于从部件网格尺寸,否则从部件会出现单元畸变无法去除、计算误差大等问题。在射流冲击模型中,喷嘴为主部件,材料为从部件。

选择喷嘴直径为 0.5 mm,经仿真试算可得,当喷嘴网格单元尺寸超过 0.1 mm 时,材料应力应变曲线会出现大波动现象且会出现局部网格畸变,计算精度较低;当喷嘴网格单元尺寸小于 0.065 mm 时,计算时间将呈指数型增加。因此设定喷嘴网格单元平均尺寸为 0.07 mm,而材料加密区域平均尺寸设定为 0.067 mm,未加密区域网格平均尺寸设定为约加密区域的两倍为 0.12 mm。加密后网格单元总数为 285 518 个。

由于三维编织复合材料内部结构比较复杂,因此纤维束和树脂之间设定为自动面面接触,水射流与材料之间为流固耦合接触。射流与材料之间通过空气网格单元进行力的传输,空气域设定为圆柱体,直径为 1.6 mm,高度为 10 mm,均为六面体网格。在流固耦合算法中,由于流体网格不能进行刚性运动,因此需要对材料边界进行四个自由度约束,使材料在 X 、 Y 方向做反方向走刀移动,走刀路径包括喷嘴移动方向和横向进给量。有限元网格模型与走刀路径如图 3 所示。

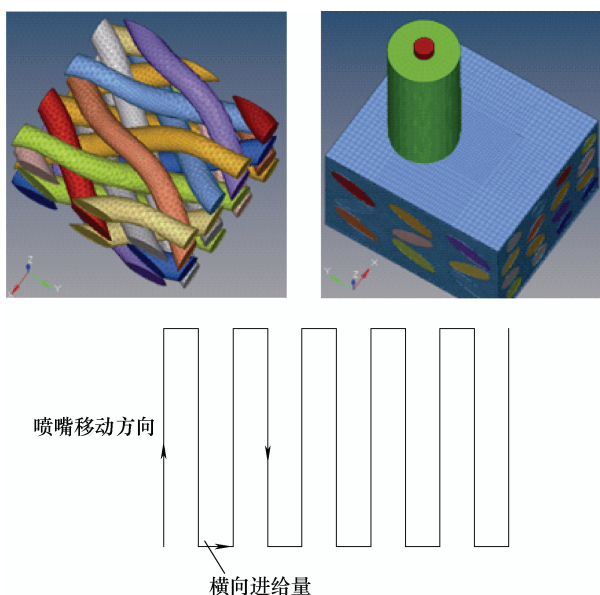


图 3 有限元网格模型与铣削走刀路径

1.2 材料属性

本文选择的材料是由碳纤维和环氧树脂构成的

三维四向编织复合材料,材料性能参数如表 1 所示。磨料水射流中水的密度为 998 kg/m^3 ,黏度为 $8 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$;磨料粒子选择石榴石,密度为 $3.4 \sim 4.3 \text{ g/cm}^3$,黏度为 $1 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$,莫氏硬度为 7.5 GPa,平均直径为 0.187 5 mm。

表 1 碳纤维和环氧树脂基本力学性能

材料	T300 碳纤维	环氧树脂
密度/(g/cm ³)	1.815	1.13
XY 面内泊松比	0.038 5	0.35
XZ、YZ 面内泊松比	0.035 2	0.35
X、Y 方向弹性模量/GPa	83.38	3.5
Z 方向弹性模量/GPa	91.63	3.5
XY 面内剪切模量/GPa	6.886	1.3
XZ、YZ 面内剪切模量/GPa	6.49	1.3

1.3 材料失效准则

在对三维编织复合材料受力计算时,采用不同的失效准则对计算结果有着不可忽视的影响。目前,国内外学者针对材料的不同受力因素提出了不同的失效准则。由于三维编织复合材料结构的特殊性,在磨料水射流冲蚀过程中纤维与基体受力不是单向的,因此采用三维 Hashin 失效模型比较适合模拟材料受力过程中的失效与破坏^[10]。三维 Hashin 失效准则包含纤维和基体的多种损伤模式判据,如表 2 所示,表中 σ^{11} 为纵向正应力; σ^{22} 为横向正应力; τ^{12} 为 xz 面的剪切应力; X_C 为材料的纵向压缩强度; X_T 为材料的纵向拉伸强度; Y_C 为材料的横向压缩强度; Y_T 为材料的横向拉伸强度; S_r 为剪切强度。

表 2 纤维与基体在外力下的失效准则

失效形式	失效模型
纤维拉伸断裂	$\left(\frac{\sigma^{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau^{12}}{S_r}\right)^2 \geq 1 \quad \sigma^{11} \geq 0$
纤维压缩屈服	$\left(\frac{\sigma^{11}}{X_C}\right)^2 \geq 1 \quad \sigma^{11} \leq 0$
基体拉伸开裂	$\left(\frac{\sigma^{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau^{12}}{S_r}\right)^2 \geq 1 \quad \sigma^{22} \geq 0$
基体压溃	$\left(\frac{\sigma^{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau^{12}}{S_r}\right)^2 \geq 1 \quad \sigma^{22} \leq 0$
基体和纤维剪切失效	$\left(\frac{\sigma^{11}}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau^{12}}{S_r}\right)^2 \geq 1$

1.4 水射流控制方程

在水射流冲蚀复材数值模拟过程中,高速射流在复合材料内部的应力分布通过控制方程来模拟,

水射流流动的控制方程如下^[11]。

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho_{ij}}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(2) 流体动量方程

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho u_i u_j \right] \quad (2)$$

(3) $k-\varepsilon$ 方程

$$\rho \left(u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中, C_1 , C_2 , σ_k , σ_ε 为经验常数, 分别取值为 $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ ^[12]。

1.5 模型边界条件与初始条件

在射流冲蚀复材有限元仿真中, 模型的边界条件包括射流入口边界、出口边界、非反射边界与固壁条件。

(1) 入口边界: 通过 Bernoulli 方程将入口射流压力转化为射流速度, 射流轴线垂直于流固耦合面。

(2) 出口边界: 喷嘴出口截面为出口边界, 为标准大气压。

(3) 非反射边界: 选取空气域边界单元节点, 建立节点组, 并通过关键字 *BOUNDARY_NON_REFLECTING 调用该节点组, 设置允许吸收的膨胀波和剪切波, 完成无限空气域状态的模拟。

(4) 固壁条件: 喷嘴出口截面与流固耦合边界为射流场的固壁条件, 均无热传导发生, 且采用单层壁面函数处理壁面边界。

在磨料水射流冲击模型中, 利用式(5)将射流压力转化为射流喷嘴处混合相的初始速度, 通过关键字 *INITIAL_VELOCITY_GENERATION 来实现, 并利用关键字 *SECTION_SOLID 中的 ELFORM 参数来实现射流的连续供给^[13]。

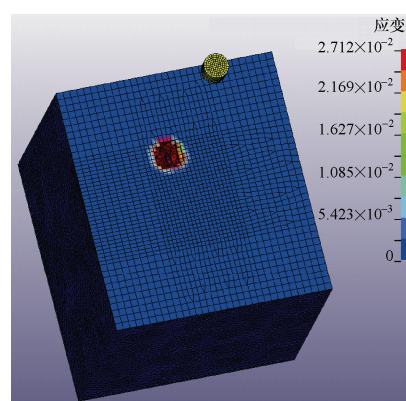
$$V = 44.7 \cdot \sqrt{P} \quad (5)$$

式中, V 为喷嘴射流速度, 单位是 m/s; P 为水射流压力, 单位是 MPa。

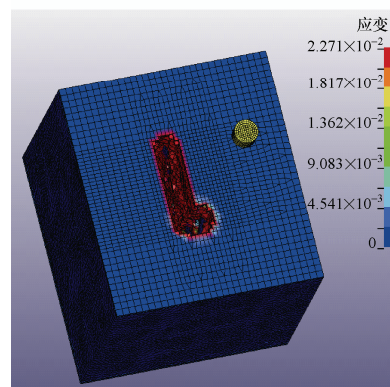
在前处理过程中设定网格单元、材料本构、状态方程、接触类型、控制卡片以及各工艺参数等内容, 导出关键字 K 文件并在 ANSYS/LS-DYNA 中进行仿真计算, 在后处理软件 LS-PrePost 中进行结果查看。

2 仿真结果分析

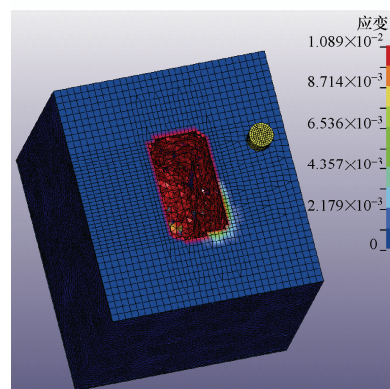
在仿真过程中保持其他工艺参数不变, 通过改变射流压力、走刀速度、横向进给量, 观察不同工艺参数下的仿真结果。当射流压力为 30 MPa、走刀速度为 5 000 mm/min、横向进给量为 0.5 mm 时的损伤应变过程如图 4 所示; 铣削过程材料 Z 向最大应力曲线如图 5 所示, 最大位移曲线如图 6 所示。



(a) 开始时刻



(b) 中间时刻



(c) 完成时刻

图 4 水射流铣削损伤应变过程

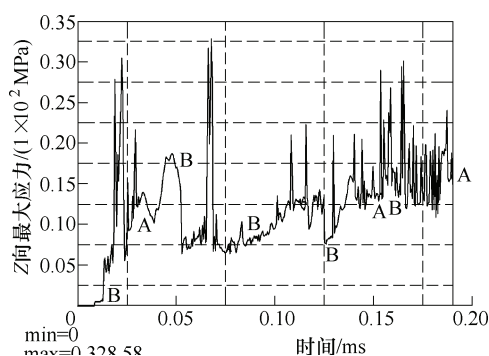


图5 铣削过程材料Z向最大应力曲线

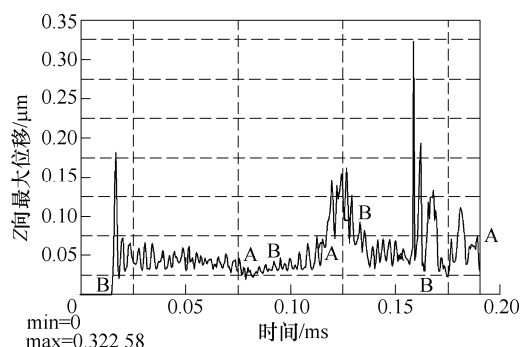


图6 铣削过程材料Z向最大位移曲线

在有限元仿真中, 选择低压参数范围分别为 70 MPa、50 MPa、30 MPa、20 MPa, 射流靶距为 5 mm, 切割速度为最大值 5 000 mm/min, 横向进给量选择与喷嘴直径相同为 0.5 mm, 磨料流量为 5 g/s, 射流冲刷角度为 90°, 其他参数设置为水射流设备默认工艺参数。得出不同射流压力时材料平均铣削深度与所受最大应力如表 3 所示。

表3 不同射流压力时材料铣削深度与Z向最大应力

射流压力/MPa	平均铣削深度/mm	最大应力/MPa
20	1.56	30.36
30	2.03	32.86
50	2.91	35.63
70	4.06	39.42

由表 3 可知, 对于 4.2 mm 厚的三维编织复合材料, 随着仿真射流压力的增加, 材料平均铣削深度逐渐增大, 当射流压力大于等于 70 MPa 时发生击穿甚至完全击穿现象, 且材料最大应力也在不断增加, 这与实际工况相符, 应力范围在 30.36~39.42 MPa 之间。

射流走刀速度同样对铣削深度有着不可忽视的影响。在有限元仿真中, 选择走刀速度分别为 3 500 mm/min, 4 000 mm/min, 4 500 mm/min, 5 000 mm/min, 射流压力为 30 MPa, 其他工艺参数不变。得出不同走刀速度时材料的平均铣削深度与所受最大应力如表 4 所示。

表4 不同走刀速度时材料铣削深度与Z向最大应力

走刀速度/(mm/min)	平均铣削深度/mm	最大应力/MPa
3 500	3.12	35.12
4 000	2.78	33.82
4 500	2.36	33.24
5 000	2.03	32.86

射流走刀速度的快慢代表着铣削过程中水刀与材料接触时间的长短, 走刀速度快则接触时间短, 磨料混合液对材料的切削能力就弱。由表 4 可知, 随着仿真走刀速度的增加, 材料铣削深度减小, 且材料最大应力也在不断减小, 应力范围在 32.86~35.12 MPa 之间。

本文射流喷嘴直径为固定参数 0.5 mm, 根据射流走刀路径重叠效应, 在有限元仿真中, 选择横向进给量参数分别为 0.4 mm, 0.5 mm, 0.6 mm, 射流压力为 30 MPa, 走刀速度为 5 000 mm/min, 其余工艺参数不变。得出不同横向进给量时材料平均铣削深度与所受最大应力如表 5 所示。

表5 不同横向进给量时材料铣削深度与Z向最大应力

横向进给量/mm	平均铣削深度/mm	最大应力/MPa
0.4	2.58	40.56
0.5	2.03	32.86
0.6	1.75	25.74

由表 5 可知, 随着横向进给量的增加, 材料平均铣削深度呈减小趋势, Z 向最大应力波动较大, 范围在 25.74~40.56 MPa 之间。已知横向进给量的大小代表着射流走刀路径是否有重叠, 横向进给量越小, 走刀路径重叠越多, 同一材料面积累计受冲击时间就越长, 铣削深度就越大, 材料 Z 向应力就越大; 若横向进给量较大则会造成材料单元受力不均, 材料去除不完整。

3 试验与结果分析

3.1 水射流铣削试验与结果检测

针对仿真中的工艺参数开展磨料水射流铣削试验, 采用单因素试验法, 铣削次数均为一次走刀, 射流喷嘴直径为 0.5 mm, 靶距为 5 mm, 磨料流量为 5 g/s, 其他试验参数安排如表 6 所示。铣削深度采用双向防震高精度游标卡尺来测量, 但由于铣削面较为粗糙且有起伏, 为了较为准确的测量, 在铣削面合理选择五个测量点, 其中铣削面的峰谷各取一点, 其余三点在较为平整处取点, 最后取五个测量值的算术平均值为最终结果^[14]。微观形貌利用扫

描电子显微镜 SEM 来观测。测量仪器如图 7 所示。



图 7 铣削试验结果测量仪器

表 6 单因素法水射流铣削试验参数设计

编号	射流压力 P/MPa	走刀速度 $V/(\text{mm}/\text{min})$	横向进给量 L/mm
1	20、30、50、 70	5 000	0.5
2	30	3 500、4 000、4 500、 5 000	0.5
3	30	5 000	0.4、0.5、0.6

3.2 各工艺参数对铣削深度的影响

整理不同射流压力时的试验测量数据与仿真结果如表 7 所示。

表 7 不同射流压力时的试验结果与仿真结果

射流压力/ MPa	仿真铣削深度 $/\text{mm}$	试验铣削深度 $/\text{mm}$	相对误差 (%)
20	1.56	1.65	5.5
30	2.03	1.91	-6.3
50	2.91	3.23	9.9
70	4.06	4.2	3.3

由表 7 可得,在水射流铣削试验过程中,随着射流压力的增加铣削深度也在不断增加,这是因为射流压力越大,射流速度就越大,磨料混合流的切削能力就越强,其中当压力大于等于 70 MPa 时,材料被完全击穿。与仿真结果对比可得,相对误差范围在 3.3%~9.9%之间。整理不同走刀速度时的试验测量数据与仿真结果如表 8 所示。

表 8 不同走刀速度时的试验结果与仿真结果

走刀速度/ (mm/min)	仿真铣削深度 $/\text{mm}$	试验铣削深度 $/\text{mm}$	相对误差 (%)
3 500	3.12	3.25	4
4 000	2.78	2.81	1.1
4 500	2.36	2.29	-3.1
5 000	2.03	1.91	-6.3

由表 8 可得,随着走刀速度的增加,铣削深度不断减小,这是因为走刀速度越大,磨料射流与材料接触的时间越短,切削能力就越弱。与仿真结果对比可得,相对误差范围在 1.1%~6.3%之间。整理不同横向进给量时的试验测量数据与仿真结果如表 9 所示。

表 9 不同横向进给量时的试验结果与仿真结果

横向进给量/ mm	仿真铣削深度 $/\text{mm}$	试验铣削深度 $/\text{mm}$	相对误差 (%)
0.4	2.58	2.61	1.2
0.5	2.03	1.91	-6.3
0.6	1.75	1.68	-4.2

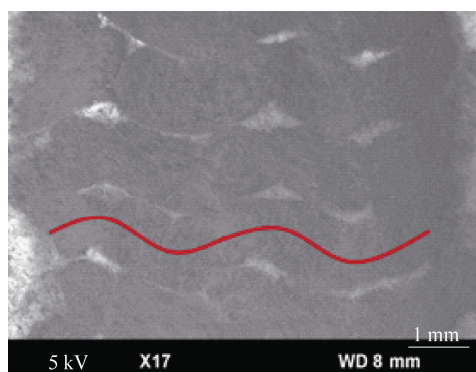
由表 9 可得,随着横向进给量的增加,铣削深度不断减小。这是因为横向进给量越大,磨料射流走刀路径重叠面积越小,同一材料区域受射流冲击力就越小。与仿真结果对比可得,相对误差范围为 1.2%~6.3%。

对比试验中各工艺参数下铣削深度的极差值得,三维编织复合材料的水射流铣削深度主要受射流压力的影响,其次是走刀速度,而横向进给量对深度影响较小。通过对比试验结果与仿真结果可得,试验值的波动幅度并非与仿真值的波动幅度保持了完全一致,但变化趋势是一致的,相对误差范围为 1.1%~9.9%,在一定程度上验证了仿真模型的合理性与可靠性。另外,导致这种现象的原因也与试验时的实际工况和工作环境有关。

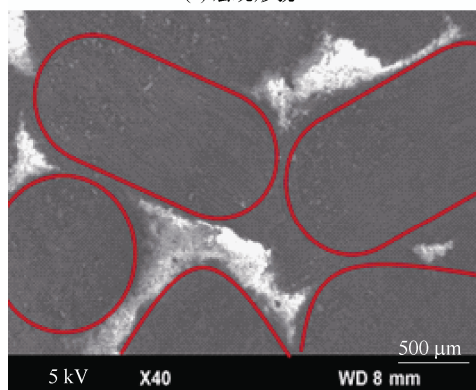
3.3 铣削表面质量分析

已知在水射流铣削过程中,射流压力和走刀速度主要影响材料的铣削深度,而铣削面的表面质量主要与射流角度和横向进给量有关。射流角度不同导致纤维和树脂受力方向不同,材料去除形貌则不同;横向进给量的不同则会引起铣削面是否有明显的峰谷出现。本文射流角度为 90° 不变,因此主要分析不同横向进给量时铣削面质量。当横向进给量等于喷嘴直径时,分析当射流压力为 30 MPa,走刀速度为 5 000 mm/min 时的铣削面质量,如图 8 分别为宏观、中观、微观尺度下的观测结果。

如图 8 所示,白色区域为不导电的树脂材料,黑色区域为导电性纤维束。由宏观形貌可得,当横向进给量为 0.5 mm 时,纤维束间的树脂基体沿编织方向呈规则的波浪形排布,表明纤维束断裂面一致性好,材料整体去除均匀性好;在中观形貌图中,每个框内为一个纤维束断裂面,观察可得纤维束断面之间吻合较好,表明材料在铣削过程中整体结构保持较好,未出现纤维束的错位或基体开裂情况;在微观形貌图中,箭头代表不同的纤维丝方向,观察可得纤维丝之间紧密贴合,未出现明显的大面积凹坑或纤维抽出现象,表明纤维丝在水射流铣削过程中去除稳定性较好。



(a) 宏观形貌



(b) 中观形貌

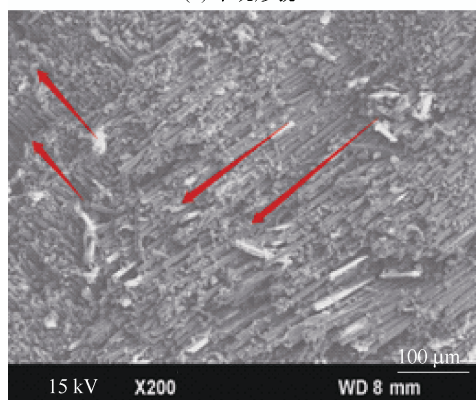


图 8 扫描电子显微镜观测结果

当横向进给量为 0.6 mm、射流压力为 30 MPa、走刀速度为 5 000 mm/min 时，如图 9 为仿真结果与试验结果的对比。观察试验图可得，当横向进给量大于喷嘴直径时，射流束路径之间有间隙，因此会

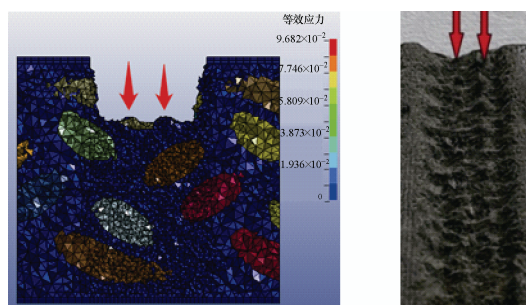


图 9 横向进给量为 0.6 mm 时的仿真与试验

造成路径之间的材料区域受冲击力减弱，形成明显的峰谷面，且铣削面较为粗糙，同时也验证了仿真模型的有效性。

4 结论

(1) 随着射流压力的增加，复合材料平均铣削深度和 Z 向最大应力不断增加，当射流压力超过 70 MPa 时材料被击穿；随着走刀速度和横向进给量的增大，平均铣削深度和材料 Z 向最大应力呈不断减小趋势。

(2) 水射流铣削深度主要受射流压力的影响，其次是走刀速度，而横向进给量对深度影响较小。

(3) 铣削面质量主要受横向进给量的影响，当横向进给量大于或小于喷嘴直径时，铣削面会出现峰谷现象，而等于喷嘴直径时铣削面质量较好。

参 考 文 献

- [1] 李增强, 赵佩杰, 宋雨轩, 等. 微磨料水射流加工技术研究现状[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(2): 134-144.
LI Zengqiang, ZHAO Peijie, SONG Yuxuan, et al. Research status of micro-abrasive water jet processing technology[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2016, 14 (2): 134-144.
- [2] 张文超, 武美萍, 宋磊. 磨料射流铣削工艺参数优化[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 190-197.
ZHANG Wenchao, WU Meiping, SONG Lei. Optimization of abrasive jet milling process parameters[J]. Surface Technology, 2017, 46 (11): 190-197.
- [3] 刘丽, 崔宣, 万庆丰. 基于 BP 神经网络的磨料水射流铣削质量研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(5): 130-132.
LIU Li, CUI Xuan, WAN Qingfeng. Study on milling quality of abrasive water jet based on BP neural network [J]. Modular Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2014(5): 130-132
- [4] CENAC F, ZITOUNE R, COLLOMBET F, et al. Abrasive water-jet milling of aeronautic aluminum 2024-T3[J]. Materials: Design and Applications, 2015, 229 (1): 29-37.
- [5] 郭嘉赫, 戚绪尧, 王栋, 等. 磨料水射流切割影响因素及切割深度预测模型[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1): 101-106.
GUO Jiahe, QI Xuyao, WANG Dong, et al. Influence

- factors of abrasive water jet cutting and prediction model of cutting depth[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2020, 30(1): 101-106.
- [6] YAKUB I M, IRFAN N, PETER M. Investigation and optimization for depth of cut and surface roughness for control depth milling in titanium Ti6AL4V with abrasive water jet cutting[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 28(2): 604-610.
- [7] SANTIUSTE C, OLMEDO A, SOLDANI X, et al. Delamination prediction in orthogonal machining of carbon long fiber-reinforced polymer composites[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2012, 31(31): 875-885.
- [8] 韩小进. 基于损伤理论的三维编织复合材料强度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- HAN Xiaojin. Study on the strength of 3D braided composite based on damage theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [9] 杨振朝, 杨福杰, 肖继明, 等. CFRP 铣削有限元模型建立及切削力仿真分析[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(3): 36-40.
- YANG Zhenchao, YANG Fujie, XIAO Jiming, et al. Finite element model establishment and simulation analysis of cutting force for CFRP milling[J]. Aerospace Materials Technology, 2019, 49(3): 36-40.
- [10] 韩小进. 基于损伤理论的三维编织复合材料强度研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- HAN Xiaojin. Research on strength of three-dimensional braided composites based on damage theory[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [11] 廖华林, 李根生, 罗学钊, 等. 超高压水射流冲击应力分布规律的数值分析[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(5): 8-12, 84.
- LIAO Hualin, LI Gensheng, LUO Xuezhao, et al. Numerical analysis of impact stress distribution of ultra-high pressure water jet[J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2004, 26 (5): 8-12, 84.
- [12] 徐立, 汪志明, 王瑞和, 等. 高速超高压水射流喷管内外端流流场的数值模拟[J]. 石油大学学报, 1997(4): 20-24, 115-116.
- XU Li, WANG Zhiming, WANG Ruihe, et al. Numerical simulation of internal and external turbulent flow field of high speed and ultra-high pressure water jet nozzle[J]. Journal of Petroleum University, 1997(4): 20-24, 115-116.
- [13] 蔡志刚. 基于水射流的碳碳复合材料孔加工工艺的研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- CAI Zhigang. Research on hole processing technology of Carbon-carbon composite materials based on water jet [D]. Shanghai: Donghua University, 2018.
- [14] 宋修和. 磨料水射流铣削钛合金试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- SONG Xiuhe. Experimental study on milling titanium alloy with abrasive water jet[D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2015.
- 作者简介: 尹东杨, 男, 1994 年出生。主要研究方向为复合材料加工。
E-mail: ydy537621@163.com
陈晓川(通信作者), 男, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为复合材料加工、纺织机械设计、面向成本的设计、人工智能等。
E-mail: xcchen@dhu.edu.cn

尹东杨,陈晓川,鲍劲松.基于磨料水射流的三维编织复合材料铣削技术研究. 机械工程学报, 2021, 57(5):273-280 . (EI 收录: 20212010360110)