

面向碳-碳复合材料的激光和水射流组合制孔工艺仿真建模和实验研究^{*}

朱超凡,陈晓川,鲍劲松
(东华大学机械工程学院,上海 201620)

摘要:针对碳-碳复合材料在孔加工过程中容易出现撕裂、分层等缺陷的问题,提出了碳-碳复合材料的激光和高压磨料水射流组合制孔工艺。先采用激光对碳-碳复合材料进行预制孔,再利用高压磨料水射流进行切割扩孔,对水射流直接冲击制孔和激光与水射流组合工艺制孔仿真过程中碳-碳复合材料内部应力和层间位移大小进行对比分析。结果表明,利用激光与高压磨料水射流组合制孔工艺,可以有效减少碳-碳复合材料在孔加工过程中受到的应力,从而减少其出现分层的现象,改善和提高了碳-碳复合材料孔的质量。通过开展相应的实验,验证了激光与水射流组合加工工艺去除碳-碳复合材料可获得较好的制孔效果,证实了模型的正确性。

关键词:高压磨料水射流; 碳-碳复合材料; ANSYS/LS-Dyna 软件

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-3133(2020) 01-0010-08

DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2020.01.002

Simulation modeling and experimental study on hole making process combined laser and water jet for carbon-carbon composite material

Zhu Chaofan, Chen Xiaochuan, Bao Jinsong
(Intelligent Manufacturing Institute of College of Mechanical Engineering,
Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the problems of defects such as tearing and delamination in carbon-carbon composite material during the punching process, a combination hole making process of laser and high-pressure abrasive water jet for carbon-carbon composite material was proposed. Firstly, the carbon-carbon composite material was pre-punched by laser, and then the high-pressure abrasive water jet was used for cutting and reaming. Contrasted and analyzed the internal stress and interlayer displacement of carbon-carbon composite material during the simulation of water jet direct impact hole making and combination of laser and water jet. The results show that by using the combination of laser and high-pressure abrasive water jet to make the hole, the stress of the carbon-carbon composite material during the hole processing can be effectively reduced, thereby reducing the occurrence of delamination of the carbon-carbon composite material, and improving the quality of the carbon-carbon composite material holes. By performing corresponding experiments to verify the combination of laser and water jet processing to remove carbon-carbon composite material, better hole processing results can be obtained, and the correctness of the model is confirmed.

Keywords: high-pressure abrasive water jet; carbon-carbon composite material; ANSYS/LS-Dyna software

0 引言

目前,碳纤维复合材料的孔加工仍然是以机械刀具加工为主。但刀具加工容易出现材料分层和刀具磨损现象,且加工效率较低是机械加工中普遍存在的问题。胡宝刚等人^[1]针对碳纤维复合材料的切割、钻

削制孔等加工方式,提出采用不同材料的刀具从不同方向、角度对碳纤维复合材料进行加工制孔,找出了不同工艺参数对制孔产生缺陷的影响规律。叶鹰等人^[2]运用数学模型的方法对碳纤维复合材料的钻削过程进行了研究,对不同工艺参数下切削钻孔的质量进行了预测,提出了提高孔的加工质量和加工效率的

^{*} 国家自然科学基金项目(51575352)

工艺方法。王福吉等人^[3]探究了对孔壁质量起主要作用的第二主切削刃钝化磨损的变化规律。

相比于传统机械加工方法,激光作为一种无接触和无切削力的特种加工方法有其独特的优势,因此有学者尝试将其应用到碳纤维复合材料的加工当中。宣佳锋等人^[4]基于 ANSYS 软件针对激光对碳纤维复合材料的作用开展研究,建立了激光作用于碳纤维复合材料时的瞬态热传导物理模型。于冬洋等人^[5]研究了激光切割碳纤维复合材料过程中碳纤维的铺设方向和树脂含量对激光能量传递方向以及切割质量的影响。朱德志等人^[6]开展了皮秒脉冲激光对碳纤维复合材料的铣削加工试验,并分析了工艺参数对加工质量和铣削深度的影响。章辰等人^[7-9]研究了激光切割碳纤维复合材料时切削参数对切割质量的影响,提出了水射流辅助激光切割 CFRP 的工艺方法,并通过对比实验验证了水射流辅助激光切割的可行性。水射流辅助激光切割的工艺方法是在高能激光束作用下材料温度逐渐升高,利用水射流的冷却和冲刷作用完成材料的去除,由于水射流会加速材料表面热量的散失,当加工汽化温度较高的碳-碳复合材料时该方法会明显降低加工效率;而且由于碳-碳复合材料具有各向异性的特点,采用激光加工时,材料各个方向上的传热程度不同,导致各个方向的材料去除程度也不相同,从而无法保证孔的加工精度和加工质量。Tangwarodomnukun 等人^[10]提出了一种新的针对单晶硅微沟槽复合加工的工艺模型,利用激光对材料进行加热和软化,并利用水射流去除软化后的材料;该技术可产生较小的损伤烧蚀。文献^[11]所用方法与文献^[12]的方法类似,也存在降低激光加工效率和加工质量的问题。

在前人研究的基础上,本文提出了激光和水射流组合制孔工艺,先采用激光对碳-碳复合材料进行预制孔,再通过高压磨料水射流进行切割扩孔,在最大程度上保留了高能激光束利用效率的同时,又通过水射流切割扩孔避免了激光加工时因材料各向异性导致的制孔精度不高的问题。

虽然激光加工没有刀具磨损问题,但其对材料有热影响。在特种加工中,高压磨料水射流技术是一种绿色环保的高新冷加工技术,因其具有适用性强、加工效率高等优点已逐渐应用于多种材料的加工当中。Hashish^[13]最先对水射流理论进行了研究,通过相关实验发现,磨料水射流适于多种材料的切割加工。李根生等人^[14]建立了岩石在水射流作用下的冲击模型,

并对岩石的破坏机理进行了研究。康灿等人^[15]对纯水射流的流束轮廓进行了分析,并对磨料水射流切割铝合金后的加工形貌进行了研究。苗新刚等人^[16]利用 ANSYS/LS-Dyna 软件对磨料水射流作用于高硬脆材料的过程进行了仿真。赵永赞等人^[17]研究了磨料水射流切割工程陶瓷的切割机理,分析了切割工艺参数对切割深度的影响特性。Yun 等人^[18]通过高速相机和多普勒测速仪对水射流的冲击作用进行了研究。宋拥政等人^[19]研究了典型材料的切削深度与水射流工艺参数之间的关系。Careddu^[20]将水射流应用于石板的切削及光整,实验结果表明加工效果在切削参数合适的情况下都比较理想。Thongkaew 等人^[21]研究了增强碳纤维聚合物在磨料水射流作用下的加工情况,结果发现,影响空洞缺陷的主要参数是水压。Kamlesh 等人^[22]研究了水射流加工过程中的工艺参数对碳纤维材料分层程度的影响。Schwartzentruber 等人^[23]建立了磨料水射流冲击碳纤维层合板的有限元模型,并通过实验发现,复合材料的损伤随着水射流压力和喷嘴尺寸的增加而逐渐加剧。

针对传统机械刀具加工碳-碳复合材料时容易出现材料分层、刀具磨损严重等现象,以及碳-碳复合材料的抗氧化性较差,在采用激光加工碳-碳复合材料时具有孔内壁容易发生氧化形成氧化层,影响孔的力学性能等问题,本文采用激光和高压磨料水射流组合制孔工艺,利用激光加工时无接触的优点对碳-碳复合材料进行预制孔加工,然后通过水射流在对该预制孔进行切割扩孔的同时又避免了激光加工时产生的氧化层对孔的力学性能产生影响的问题,希望该工艺能为碳-碳复合材料的加工提供一种新的思路。

1 激光加工的有限元模型

激光制孔是一个热物理特性变化比较复杂的非线性瞬态热传导问题。为建立激光对碳-碳复合材料进行制孔加工的热力学模型,需要通过 ANSYS 软件参数化设计语言 APDL 来建立激光加工的脚本程序;同时还需要运用生死单元技术“杀死”表面温度达到材料汽化温度的单元,从而实现对激光制孔进行温度场分析。

1.1 建立激光制孔的数学模型

非线性瞬态热传导微分方程^[24]为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + Q =$$

$$c(\theta)\rho(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中: θ 为材料温度; t 为激光加工时间; $k_x(\theta)$ 、 $k_y(\theta)$ 和 $k_z(\theta)$ 分别为材料沿 X 、 Y 和 Z 方向的热传导系数; Q 为内热源热量; $c(\theta)$ 为材料的比热容; $\rho(\theta)$ 为材料密度; x 、 y 和 z 分别为材料沿 X 、 Y 和 Z 方向上的空间坐标。

1.2 软件仿真设置

1.2.1 单元选择和网格划分

本文通过碳-碳复合材料层合板模型模拟碳-碳复合材料的各向异性,在激光热力学仿真模型中选择 8 节点六面体单元 Solid 70。考虑到计算过程产生的庞大数据,将模型尺寸设置为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$,铺层角设置为 0° 和 90° ,划分单元尺寸大小为 0.05 mm 。

1.2.2 热源的处理与施加

为简化计算,假设激光束在空间呈高斯函数分布,则光束功率密度 $I(R_f)$ 的计算公式^[2]如下:

$$I(R_f) = I_0 \exp(-0.6R_f/R_b)^2 \quad (2)$$

式中: R_f 为光束照射工件表面形成的光斑半径; I_0 为光斑的峰值功率密度; R_b 为光束半径。

由高斯函数计算出光斑范围内各节点的热流密度,将其存储在表参数数组中,然后通过表参数数组加载在各节点上。

1.3 计算结果

对模型施加高斯热源进行求解,得到加载高斯热源后的温度云图,如图 1 所示。从图 1 中可以看出,材料中心的最高温度达到 $12\ 177\text{ }^\circ\text{C}$,远远超出了碳-碳复合材料的汽化温度 $3\ 900\text{ }^\circ\text{C}$ 。

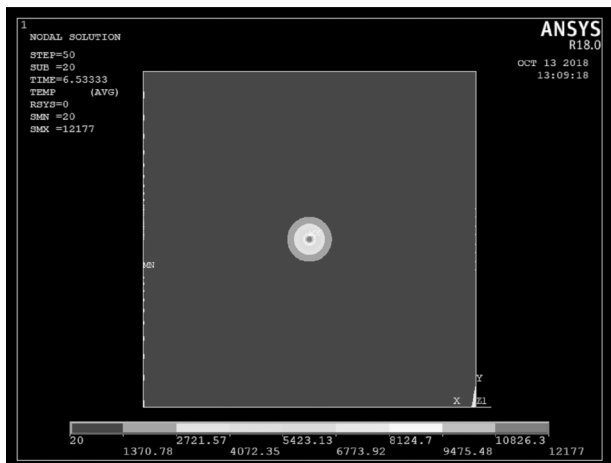


图 1 加载高斯热源后的温度云图

通过生死单元技术将图 1 中不低于碳-碳复合材料汽化温度的单元“杀死”,去除单元效果如图 2 所

示。由于材料的各向异性,孔径大小为 $1.8 \sim 2.0\text{ mm}$,从图 2 中可以看出,此时的最高温度为 $3\ 511\text{ }^\circ\text{C}$,略低于碳-碳复合材料的汽化温度 $3\ 900\text{ }^\circ\text{C}$ 。

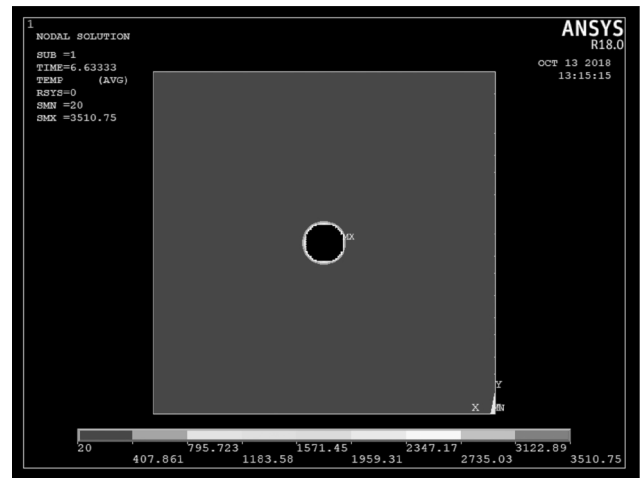


图 2 去除单元效果

2 水射流加工的有限元模型

2.1 碳-碳复合材料有限元模型的建立

本文选用 Solid 164 单元类型对水射流加工进行建模。初始的碳-碳复合材料共有 10 个单层,每层厚度为 0.2 mm ,第 1~第 5 层的铺层角分别设置为 0° 、 45° 、 90° 、 -45° 和 0° ,第 6~第 10 层的铺层角与前 5 层对称设置。

在数值模拟过程中,准确的材料力学性能参数可以提高仿真结果的准确性,查阅文献得到碳-碳复合材料的相关力学性能参数^[23],如表 1 所示。

表 1 碳-碳复合材料的相关力学性能参数*

参数	参数值
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.815
汽化温度/ $^\circ\text{C}$	3 900
X 、 Y 方向弹性模量/GPa	83.38
Z 方向弹性模量/GPa	91.63
XY 面内剪切模量/GPa	6.886
XZ 、 YZ 面内剪切模量/GPa	6.49
XY 面内泊松比	0.038 5
XZ 、 YZ 面内泊松比	0.035 2
X 、 Y 方向拉伸强度/MPa	224.4
X 、 Y 方向压缩强度/MPa	215.6
Z 方向拉伸强度/MPa	314.6
Z 方向压缩强度/MPa	331.1
XY 面内剪切强度/MPa	33.22
XZ 、 YZ 面内剪切强度/MPa	12.33

* X 、 Y 和 Z 方向如图 4 所示

由于模型几何形状较为规则,故选择六面体单元对水射流接触到的材料中心区域进行网格加密处理,

选择映射方式对网格进行划分。高压磨料水射流加工碳-碳复合材料是一种非线性显式动力学问题,由于水射流与碳-碳复合材料之间为高速碰撞,需要设置其为侵蚀接触;为了克服单元严重畸变引起的数值计算困难,需要在仿真过程中设置求解方法为任意拉格朗日-欧拉 (Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE) 进行求解,从而实现流体-固体耦合的动态分析。

图 3 所示为水射流冲击碳-碳复合材料层合板的网格划分模型,其包括 12 个部件和 93 312 个实体单元,对模型中心做局部网格加密处理,并将无反射边界条件设置在模型中心。

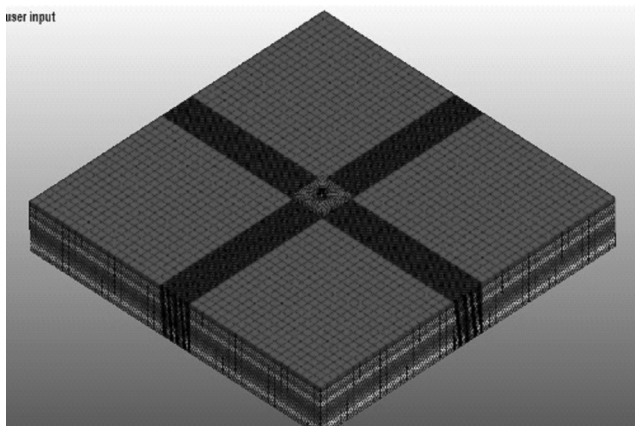


图 3 水射流冲击碳-碳复合材料层合板的网格划分模型

图 4 所示为水射流切割碳-碳复合材料层合板的网格划分模型,其包括 12 个部件和 256 512 个实体单元。

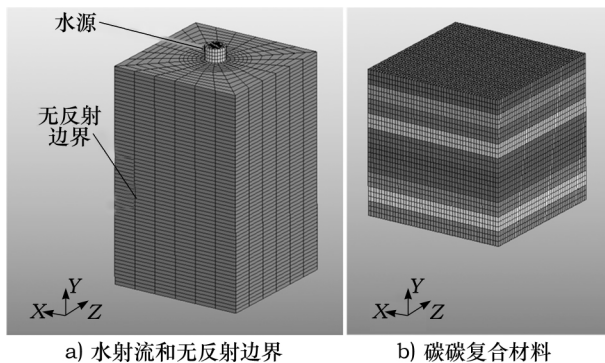


图 4 水射流切割碳-碳复合材料层合板的网格划分模型

2.2 边界条件设置

在对瞬态动力学问题进行数值分析时,往往需要定义模型的初始状态,如初始速度等。定义模型的约束和初始条件是进行有限元数值分析的重要环节,合理的定义不但可以提高计算效率,还可以提高模型的计算精度。本文水射流加工有限元模型的初始条件

和边界条件定义如下。

1) 初始条件: 设置水射流直径为 0.3 mm; 水射流的加工压力为 260 MPa; 加工角度为 90°; 碳-碳复合材料加工时常用的切割速度为 100~300 mm/min, 本文中的材料厚度为 2 mm, 设置切割速度为 250 mm/min。

2) 无反射边界条件: 通过选择无反射边界面, 创建无反射边界面节点组件来定义无反射边界区域, 区域大小为 2 mm×2 mm×3 mm; 然后, 通过添加并激活构建好的无反射边界区域, 使之在有限元模型中生效; 同时, 在对应的命令流中, 设置膨胀波吸收选项 AD 和剪切波吸收选项 AS 均为 1。

3 材料失效准则和破坏判据

碳-碳复合材料具有各向异性, 在有限元模型中要考虑失效问题, 当材料受到的初始损伤逐渐扩大, 大到损伤程度超过其强度极限时就会发生破坏。碳-碳复合材料的失效类型主要包括纤维的折断和基体的失效 2 个部分, 这 2 种失效情况有时是单个出现, 有时则是同时发生, 任何一种情况的出现都可判定为材料发生失效。学者们通过大量的研究, 认为 Hashin 失效模型比较适合碳-碳复合材料的失效模拟^[24], 故在本文模拟水射流加工碳-碳复合材料的过程中, 采用的是 Hashin 失效准则^[23], 包括纤维和基体的多种损伤模式。

基于 Hashin 失效准则的纤维和基体损伤模式如下。

1) 纤维拉伸断裂:

$$\left[\frac{\sigma^{11}}{X_T}\right]^2 + \alpha \left[\frac{\tau^{12}}{S_{12}}\right]^2 \geq 1 \quad \sigma^{11} \geq 0 \quad (3)$$

2) 纤维压缩断裂:

$$\left[\frac{\sigma^{11}}{X_T}\right]^2 \geq 1 \quad \sigma^{11} < 0 \quad (4)$$

3) 基体拉伸开裂:

$$\left[\frac{\sigma^{22}}{Y_T}\right]^2 + \alpha \left[\frac{\tau^{12}}{S_{12}}\right]^2 \geq 1 \quad \sigma^{22} \geq 0 \quad (5)$$

4) 基体压缩挤裂:

$$\left[\frac{\sigma^{22}}{2S_{23}}\right]^2 + \frac{\sigma^{22}}{2Y_C} \left[\left(\frac{Y_C}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right] \left[\frac{\tau^{12}}{S_{12}}\right]^2 \geq 1 \quad \sigma^{22} < 0 \quad (6)$$

5) 基体纤维剪切失效:

$$\left[\frac{\sigma^{11}}{X_C}\right]^2 + \left[\frac{\tau^{12}}{S_{12}}\right]^2 \geq 1 \quad (7)$$

式中: σ^{11} 、 σ^{22} 分别为 X 向和 Y 向正应力; τ^{12} 为 XZ 平面的剪切应力; X_C 和 X_T 、 Y_C 和 Y_T 分别为材料 X 向、Y

向的压缩强度和拉伸强度; S_{12} 和 S_{23} 分别为 XZ 和 YZ 平面内的剪切强度; α 为因子系数。

4 水射流冲孔和切割扩孔有限元仿真

在仿真过程中,水射流直径和加工角度保持不变,分别对高压磨料水射流冲击和切割碳-碳复合材料过程进行模拟分析,以获取不同工艺下碳-碳复合材料层合板的受力情况。

4.1 水射流冲孔有限元仿真

在 ANSYS/LS-Dyna 软件中设置无反射边界条件及求解时长等相关参数;在 LS-PrePost 软件中设置层合板各层的铺层角、流体-固体耦合、ALE 求解方法以及材料的失效准则和破坏判据;然后对模型进行求解,并在 LS-PrePost 后处理器中查看结果。不同时刻水射流冲孔冲蚀情况的 1/4 模型仿真效果如图 5 所示。

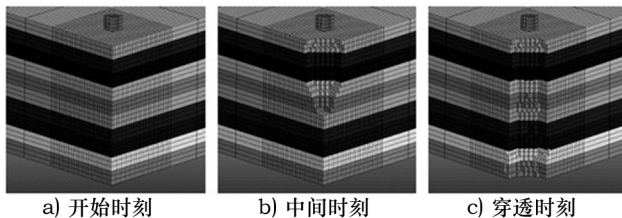


图 5 不同时刻水射流冲孔冲蚀情况的 1/4 模型仿真效果

图 6 所示为各层材料在冲孔过程中的最大等效应力曲线,图 6 中的不同曲线代表不同层碳-碳复合材料所受到的最大等效应力随冲孔时间的变化趋势。从图 6 中可以看出:每层材料受到的最大等效应力均不相同,并且在不同的时刻达到最大值;各层材料受到的最大等效应力所能达到的最大值相差较小。

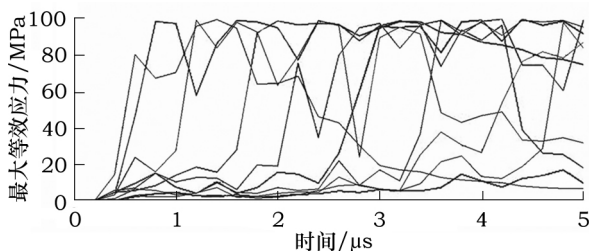


图 6 各层材料在冲孔过程中的最大等效应力曲线

为了方便与后续的水射流切割加工仿真结果进行对比,下面以第 1 层材料为分析对象,其在冲孔过程中的最大等效应力曲线如图 7 所示。由图 7 仿真结果可知,冲孔过程中第 1 层碳-碳复合材料的最大等效应力最大值约为 99.8 MPa。

图 8 所示为冲孔过程中材料在最大等效应力最大

值时刻对应的 Y 向位移。从图 8 中可以看出,当水射流冲击碳-碳复合材料层合板时,由于水射流压力的作用,产生的冲击力使碳-碳复合材料产生了较大的层间位移,最大位移值为 7.60×10^{-7} mm,并呈椭圆状向外扩散。

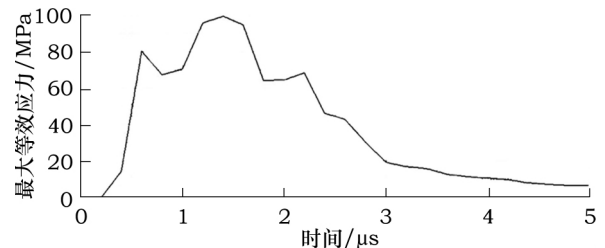


图 7 第 1 层材料在冲孔过程中的最大等效应力曲线

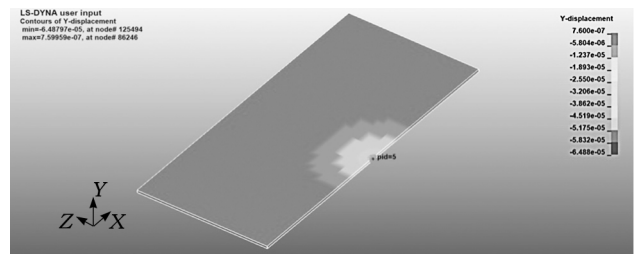


图 8 冲孔过程中材料在最大等效应力最大值时刻对应的 Y 向位移

4.2 水射流切割有限元仿真

在水射流冲击碳-碳复合材料有限元模型基础上,建立水射流切割碳-碳复合材料有限元模型,不同时刻水射流切割情况的 1/4 模型仿真效果如图 9 所示。

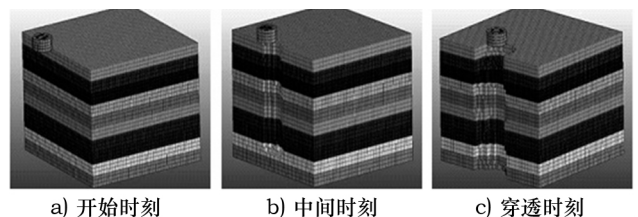


图 9 不同时刻水射流切割情况的 1/4 模型仿真效果

图 10 所示为各层材料在切割过程中的最大等效应力曲线。从图 10 中可以看出,各层材料最大等效应力中的最大值出现在第 1 层材料。

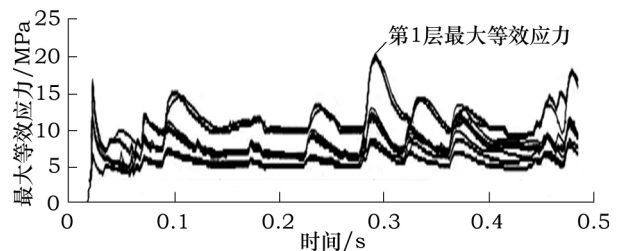


图 10 各层材料在切割过程中的最大等效应力曲线

以第 1 层材料为分析对象,其在切割过程中的最大等效应力曲线如图 11 所示。由图 11 仿真结果可知,切割过程中第 1 层碳-碳复合材料的受力较小,其最大等效应力最大值约为 20.6 MPa。

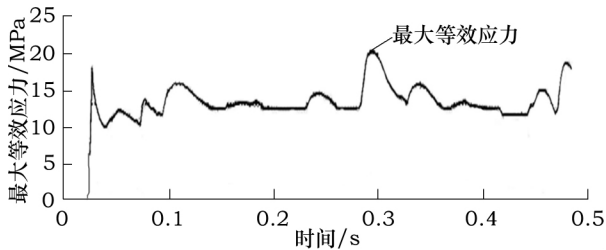


图 11 第 1 层材料在切割过程中的最大等效应力曲线

图 12 所示为切割扩孔过程中材料在最大等效应力最大值时刻对应的 Y 向位移,最大位移值为 4.17×10^{-7} mm。

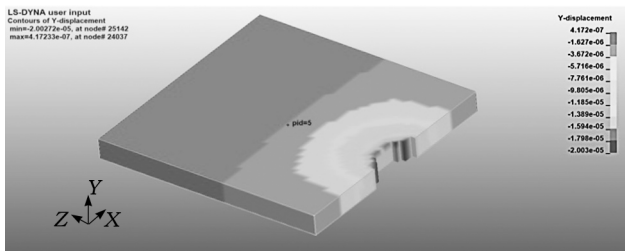


图 12 切割扩孔过程中材料在最大等效应力最大值时刻对应的 Y 向位移

通过与水射流冲击碳-碳复合材料的仿真结果(见图 7、图 8)进行对比可知,切割时碳-碳复合材料所受最大等效应力(见图 11)比冲击时低了 79.4%,层间发生的 Y 向位移(见图 12)比冲击时产生的 Y 向位移低了 45.1%。这是由于当高压磨料水射流冲击碳-碳复合材料时,二者之间是以弹性碰撞为主,能量较大的水射流冲击到材料表面时,速度发生突变,使得接触点材料内部的应力亦发生突变,当冲击压力超过碳-碳复合材料的抗拉强度时就会使其产生裂纹,在高压磨料水射流的作用下裂纹逐渐扩展延伸,导致加工出现分层、撕裂等缺陷;当高压磨料水射流切割碳-碳复合材料时,由于磨料水射流的侧向力较小,且磨料颗粒对碳-碳复合材料的作用为磨削冲击,材料微粒可以从本体中顺利分离出来,即可有效减少分层缺陷的出现。

5 实验验证与结果分析

5.1 实验验证

为了验证水射流的加工工艺与碳-碳复合材料孔产生分层之间是否有联系,本文进行了高压磨料水射流对碳-碳复合材料的加工实验,相关工艺参数设置如

下:采用蓝宝石喷嘴,喷嘴直径为 0.3 mm;水射流压力为 260 MPa;切割速度为 250 mm/min;砂管直径为 0.76 mm;混合腔长度为 8 mm;磨料流量为 10 g/s;加工角度为 90°。在利用激光对碳-碳复合材料层合板进行制孔(共加工 24 个孔)以及利用水射流对碳-碳复合材料层合板进行切割扩孔(共加工 24 个孔)时,以层合板上表面相同的基准点对孔中心进行定位,从而在水射流机床的 CNC 系统中输入和定位预制孔时相同的坐标值即可在不同机床中对层合板上所要加工的孔中心进行重复定位。

1) 激光制孔实验。

图 13 所示为激光制孔的实物外观,从图 13 中的实物外观来看,激光对碳-碳复合材料层合板进行孔加工的成形质量明显不够理想。造成这种情况的原因主要有:首先,碳-碳复合材料层合板本身的各向异性使得各个方向的材料去除程度并不完全相同,从而出现椭圆孔的现象;其次,碳-碳复合材料层合板的抗氧化性能较差,在激光高能束的作用下,孔内壁容易发生氧化反应;最后,激光的光束焦点具有一定的深度,在人工调焦的环境下,容易出现图 13 中所示的材料未完全去除的现象。

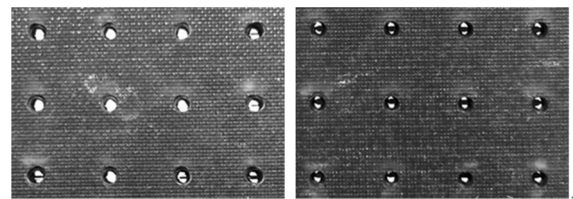
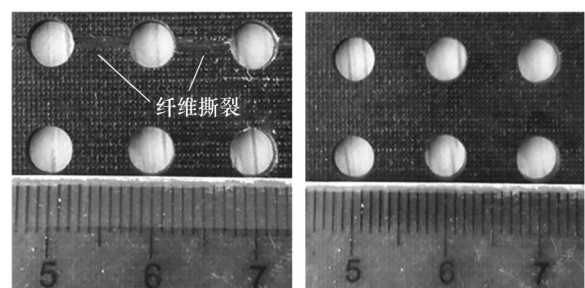


图 13 激光制孔的实物外观

2) 水射流制孔实验。

图 14 所示为不同工艺下水射流加工孔的实物外观。从图 14 中可看出:水射流冲击制孔(见图 4a)时,孔的表面会产生明显的纤维撕裂缺陷,随着加工过程的继续,撕裂现象愈加明显;当水射流对留有预制孔的碳-碳复合材料层合板进行切割扩孔(见图 4b)时,加工表面光洁无缺陷,加工质量较高。

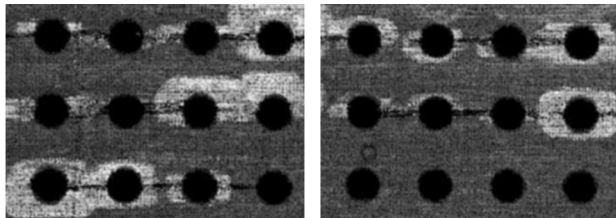


a) 水射流冲击制孔

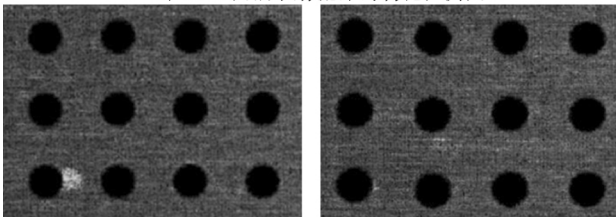
b) 水射流切割扩孔

图 14 不同工艺下水射流加工孔的实物外观

通过超声扫描显微镜 SAM 301 HD² 对水射流冲击和切割加工的孔分别进行 SAM 分层缺陷检测,成像结果如图 15 所示。图 15 中白色高亮区域为超声波遇到空隙(分层) 时发生的超声反射波,即意味着其中产生了分层缺陷。从图 15a 中可以明显看出,水射流冲击碳-碳复合材料层合板时有明显的白色高亮区域,即材料内部有分层,加工效果不理想;从图 15b 中可以看出,水射流对留有预制孔的碳-碳复合材料层合板进行切割扩孔时,白色高亮区域基本没有,成像特征一致,加工效果较好。通过对本文实验结果进行统计发现:当采用水射流对碳-碳复合材料层合板直接冲击制孔时,所加工的 24 个孔中有 20 个发生了分层或者撕裂缺陷,孔的分层率为 83.3 %;当采用水射流对碳-碳复合材料层合板预制孔进行切割扩孔时,24 个孔中仅有 1 个发生了分层,孔的分层率仅为 4.2 %。



a) SAM扫描水射流冲击制孔检测图



b) SAM扫描水射流切割扩孔检测图

图 15 不同工艺下 SAM 分层缺陷检测成像结果

5.2 实验结果分析

完成与数值模拟相对应的实验后,采用高精度影像测量系统对不同加工工艺下所制孔的基本尺寸及其外形精度(如圆度、锥度等) 进行检测与测量,该系统的测量误差可以达到亚像素级精度水平。通过使用高精度影像测量系统,对激光与水射流组合加工工艺所制孔的基本尺寸及其外形精度进行测量,结果如表 2 所示。

以上实验所制孔孔径的理论值为 4 mm,从表 2 中数据可发现,激光与水射流组合加工工艺所制得的孔径范围在 3.970 3~4.025 6 mm 之间,整体波动范围较小。

6 结语

本文通过有限元仿真软件 ANSYS/LS-Dyna 和 LS-

表 2 组合加工工艺所制孔的测量结果

孔编号	上表面 孔径/mm	下表面 孔径/mm	上表面 圆度/mm	下表面 圆度/mm	锥度
1	4.025 6	4.013 3	0.013 6	0.015 9	0.006 1
2	4.008 3	3.995 6	0.013 5	0.012 3	0.006 3
3	4.021 5	3.994 5	0.014 0	0.013 4	0.013 5
4	3.999 6	3.990 9	0.012 7	0.011 9	0.004 3
5	4.013 8	3.986 3	0.020 3	0.015 0	0.013 7
6	4.008 7	4.003 1	0.012 5	0.011 4	0.002 8
7	4.003 1	3.996 6	0.013 1	0.013 7	0.003 2
8	4.010 6	3.978 1	0.012 3	0.020 8	0.016 2
9	4.019 3	4.006 7	0.014 0	0.011 2	0.006 3
10	4.005 0	3.971 9	0.030 8	0.015 1	0.016 5
11	4.000 1	3.970 3	0.010 4	0.023 3	0.014 9
12	4.010 0	3.992 3	0.012 5	0.013 9	0.008 8
13	4.024 0	3.996 1	0.013 0	0.010 1	0.003 1
14	4.012 6	3.997 9	0.010 2	0.012 4	0.007 3
15	4.019 7	3.999 8	0.012 4	0.014 3	0.009 9
16	4.004 1	4.002 8	0.012 0	0.020 6	0.000 6
17	4.014 3	3.995 1	0.013 5	0.010 5	0.009 6
18	4.001 3	3.995 7	0.010 4	0.025 1	0.002 8
19	4.022 4	4.010 0	0.013 8	0.021 1	0.006 2
20	4.015 3	3.992 6	0.008 9	0.017 4	0.011 3
21	4.016 9	4.004 4	0.015 3	0.022 0	0.006 2
22	4.003 3	3.996 5	0.013 2	0.013 5	0.003 4
23	4.014 9	3.995 1	0.015 2	0.020 1	0.009 2
24	4.003 9	3.983 2	0.021 3	0.012 4	0.010 3

PrePost,建立了激光对碳-碳复合材料层合板进行制孔的热力学模型;完成了高压磨料水射流对碳-碳复合材料冲击和切割加工的数值模拟有限元仿真,仿真模型可以较好地反映碳-碳复合材料在高压磨料水射流作用下的破坏过程;进行了 2 种加工工艺下高压磨料水射流加工碳-碳复合材料的验证实验,可得如下结论。

1) 激光制孔的温度场分布规律为:热源中心温度最高,可达 12 177 ℃,且以中心向四周逐渐降低的规律分布。

2) 在相同水射流冲击压力和切割速度的前提下,冲孔过程中碳-碳复合材料承受的最大等效应力大于切割过程中的最大等效应力,即相对于冲击制孔而言,切割扩孔更不容易发生分层缺陷。

3) 在水射流切割速度为 250 mm/min,水射流压力为 260 MPa 的实验条件下,冲击制孔的分层率为 83.3 %,切割扩孔的分层率为 4.2 %。这表明切割扩孔可获得更好的孔加工效果,与仿真结果相吻合。

4) 通过对激光和水射流组合工艺加工碳-碳复合材料所制孔的相关特征进行测量,结果表明,该组合加工工艺可获得较好的制孔加工效果。

参考文献:

- [1] 胡宝刚,赵建设,李德茂.碳纤维复合材料的后加工工艺[J].宇航材料工艺,1995(1):31-34,44.
- [2] 叶鹰,李红卫,龚志强,等.碳纤维复合材料导弹舱段高效制孔方法研究[J].航天制造技术,2014(6):37-40.
- [3] 王福吉,钱宝伟,贾振元,等.钻削 CFRP 的双顶角钻头磨损及抑制新方法[J].机械工程学报,2018,54(15):171-179.
- [4] 宣佳锋,罗积军,徐军,等.基于 ANSYS 的激光对碳纤维复合材料作用的仿真研究[J].西安邮电学院学报,2011,16(S2):11-14.
- [5] 于冬洋,王续跃.单层碳纤维复合材料激光多向切割的温度场模拟[J].激光与光电子学进展,2017,54(11):258-266.
- [6] 朱德志,胡俊.皮秒激光加工碳纤维复合材料工艺试验[J].航空制造技术,2017(20):54-59.
- [7] 章辰,袁根福,丛后东,等.水射流辅助激光切割碳纤维复合材料的实验研究[J].激光杂志,2018,39(2):68-71.
- [8] 章辰,袁根福,丛后东,等.激光切割碳纤维复合材料的分析和预估[J].激光与红外,2018,48(7):821-826.
- [9] TANGWARODOMNUKUN V, WANG J, HUANG C Z, et al. Heating and Material Removal Process in Hybrid Laser-Waterjet Ablation of Silicon Substrates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 79(4): 1-16.
- [10] HASHISH M. Application of Abrasive Jets to Concrete Cutting[J]. International Symposium on Jet Cutting Technology, 1982, 10(8): 74-78.
- [11] 李根生,廖华林,黄中伟,等.超高压水射流作用下岩石损伤破碎机理[J].机械工程学报,2009,45(10):284-293.
- [12] 康灿,刘海霞,周亮,等.水射流冲击固体表面的能量因素与冲蚀机理[J].江苏大学学报(自然科学版),2014,35(2):154-159.
- [13] 苗新刚,武美萍,缪小进.磨料水射流冲蚀工件仿真及实验研究[J].液压气动与密封,2016,36(1):44-47.
- [14] 赵永赞,赵民,王军.后混合磨料水射流切割工程陶瓷的特性分析[J].金刚石与磨料磨具工程,2002(3):53-56.
- [15] YUN Ky Hong, KWAN Ho Moon. Experimental Research on a Waterjet to Simulate Erosion by Impact of a Water Drop[J]. Wear, 2016(s368/s369): 116-123.
- [16] 宋拥政,温效康,梁志强.磨料水射流等现代切割技术的研究与分析[J].锻压机械,1994(4):50-54.
- [17] CAREDDU Nicola. Rough Surface Finishing of Stone-Faced Sandwich Panels Using High Pressure Waterjet[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(7): 907-915.
- [18] THONGKAEW Kunlapat, WANG Jun, LI Wei. An Investigation of the Hole Machining Process on Woven Carbon-Fiber Reinforced Polymers(CFRPS) Using Abrasive Waterjet[J]. Advanced Materials Research, 2016, 4231(1136): 113-118.
- [19] KAMLESH P, RAMESH S, SANDIP P, et al. Delamination Characterization and Comparative Assessment of Delamination Control Techniques in Abrasive Water Jet Drilling of Cfrp[J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5: 521-535.
- [20] SCHWARTZENTRUBER J, SPELT J K, PAPINI M. Modeling of delamination due to hydraulic shock when piercing anisotropic carbon-fiber laminates using an abrasive water jet[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 132(9): 81-95.
- [21] 唐兴伦. ANSYS 工程应用教程(热与电磁学篇)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [22] 宋林森,史国权,李占国.利用 ANSYS 进行激光打孔温度场仿真[J].兵工学报,2006(5):879-882.
- [23] 樊建平,潘祖兴.对称角铺设层合板层间应力数值分析[J].中国科技论文在线,2009(6):849-857.
- [24] 李桂玉.叠层复合材料钻削加工缺陷产生机理及工艺参数优化[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [25] HASHIN Z, ROTEM A. A fatigue failure criterion for fiber-reinforced materials[J]. Journal of Composite Materials, 1973, 7(4): 448-464.

作者简介: 朱超凡, 硕士研究生, 主要研究方向为复合材料特种加工。

陈晓川, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为复合材料加工、纺织机械设计、面向成本的设计以及人工智能等。

E-mail: 1787044652@qq.com; xcchen@ dhu.edu.cn

收稿日期: 2019-06-03