

碳纤维复合材料振动辅助制孔有限元仿真建模研究^{*}

卢 明,张 臣,王晓雪

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 碳纤维复合材料广泛应用于航空航天、国防、医疗等领域,针对碳纤维复合材料制孔过程中出现的入口剥离、出口分层、撕裂与毛边等质量问题,结合振动辅助切削对制孔工艺进行改进。为了有效预测碳纤维复合材料振动辅助制孔工艺的效果,结合碳纤维复合材料本构模型进行振动辅助制孔有限元仿真建模研究。借鉴已有的复合材料本构模型,构建了碳纤维复合材料力学模型;针对仿真碳纤维复合材料在制孔过程中的分层现象,提出了黏性层模型用于模拟复合材料层间损伤,并建立了有限元仿真模型;通过在刀具边界条件上施加振动模式,实现了振动辅助制孔的有限元仿真建模。将建立的有限元仿真模型的仿真结果与已有文献试验结果进行了比较,验证了所建的有限元仿真模型的正确性,并对比分析了普通钻削制孔与振动辅助钻削制孔的仿真结果。最后得出结论:采用振动辅助钻削碳纤维复合材料可以有效地降低轴向力,抑制毛刺和分层产生。

关键词: 碳纤维复合材料;振动辅助钻削;本构模型;有限元分析;失效准则;损伤演化

Finite Element Simulation Modeling of Vibration-Assisted Drilling CFRP

LU Ming, ZHANG Chen, WANG Xiaoxue

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) is widely used in the fields of aerospace, national defense and medical treatment. In the traditional process of drilling CFRP, there exist the problems of delamination at the entrance and exit, tearing and burrs. In the paper, the vibration assisted drilling process is used to improve the traditional process of drilling CFRP. In order to predict the effect of vibration assisted drilling of CFRP effectively, the modeling of finite element simulation of vibration assisted drilling is carried out by combining the constitutive model of CFRP. Firstly, the mechanical model of CFRP is established by considering the existing constitutive model while the cohesive element is used to simulate the interlayer damage. Then the influence of vibration is realized by applying the vibration movement to the boundary condition of cutting tool in the established model of finite element simulation. The finite element model is verified by comparing the simulation results with the experimental results. Finally, the simulation results of traditional drilling and vibration-assisted drilling are analyzed, which demonstrates that the latter one can effectively reduce the thrust force and suppress the burrs and delamination.

Keywords: Carbon fiber reinforced plastic; Vibration-assisted drilling; Constitutive model; Finite element analysis; Failure criteria; Damage evolution

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.17.085

碳纤维复合材料作为新型材料,具有比模量高、比强度大、耐腐蚀、耐高温、抗疲劳和设计自由度高等一系列优点,被广泛应用于航空航天、国防、医疗等领域。但在装配过程中,需要对复合材料工件进行预制孔处理来满足铆接或螺栓连接的要求。由于脆性大、层间

强度低、抗冲击能力差,复合材料在制孔过程中会出现入口剥离、出口分层、撕裂与毛边等缺陷^[1],碳纤维的高硬度也会加剧刀具的磨损,造成刀具寿命的加速损耗^[2]。这些问题都大大降低了零件的装配精度和使用寿命,严重制约了碳纤维复合材料的使用。相关研究发现导致上述缺陷产生的原因是钻削力过大,尤其是轴向力过大^[3]。对于碳纤维复合材料钻削过程中轴向

^{*} 基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(NS2016048);国家自然科学基金项目(51675277)。

力的研究,传统方法是通过大量的切削试验并依据分析结果优化加工参数,这种方式不但需要耗费大量的人力物力,而且试验结果应用范围比较局限。

随着计算机技术的不断发展和有限元分析软件的日益完善,采用数值模拟技术对难加工材料的加工过程进行仿真已经成为研究的重要手段,其模拟结果能够比较真实地反映切削过程中各因素的影响,这不仅大大降低了试验成本,也为切削参数优化提供了更有效的参考。Phadnis 等^[4]采用二维壳单元模拟 CFRP 层合板钻削过程并得到了材料表面的应力应变分布。Rakesh 等^[5]也做了类似的工作,其论文对比了 3 种刀具钻削后孔边的破坏缺陷。在国内,王明海等^[6]借助 CFRP 二维单元层合板对薄板钻和麻花钻进行对比,并指出采用麻花钻加工得到的孔周缺陷较大。在三维仿真方面,He 等^[7]建立三维 CFRP 层合板模型,研究了钻削过程中轴向力、扭矩与加工参数之间的关系。Isbilir 等^[8]利用三维 Hashin 准则研究了阶梯钻和麻花钻的加工质量,分析了阶梯钻的阶梯角对碳纤维复合材料加工质量的影响,并进行了试验验证。Feito 等^[9]采用 Hou 准则建立碳纤维钻削有限元模型来预测分层现象的产生。Phadnis 等^[10-11]在三维 Hashin 判据基础上结合 PUCK 准则,模拟振动辅助对碳纤维复合材料钻削的影响。国内,高汉卿^[12]针对碳纤维复合材料宏观切削过程进行了仿真研究。杨志超^[13]也对碳纤维复合材料分层现象进行仿真及预测。姚运萍等^[14]采用 ABAQUS 自带的复合材料模型对碳纤维钻削过程中的不同工艺参数进行模拟。高鑫^[15]则对碳纤维复合材料强度准则进行相关的总结,并采用二维壳体模型对碳纤维复合材料钻削过程进行了仿真分析。佟沐霖^[16]采用 Deform-3D 对碳纤维复合材料钻削过程进行仿真并建立起不同刀具的钻削力线性回归方程。王卫滨^[17]对比了普通钻削和轴向振动钻削仿真结果,并分析了振幅对振动钻削加工质量的影响。

综上所述,碳纤维复合材料钻削有限元仿真经历了一个从二维到三维的过程,其仿真结果也更加接近实际,但是目前的有限元仿真难以有效地模拟出碳纤维复合材料制孔中存在的出入口分层现象,且鲜有文章涉及对振动辅助制孔工艺的仿真分析。为了有效预测碳纤维复合材料振动辅助制孔工艺的效果,本文通过借鉴已有的复合材料本构模型,构建了碳纤维复合材料渐进失效力学模型,提出采用黏性层模型模拟复合材料层间损伤,并最终建立起碳纤维复合材料钻削有限元模型;通过在刀具边界条件上施加振动,实现了振动辅助制孔的有限元仿真建模;将建立的有限元仿真模型的仿真结果与已有文献结果进行了比较,验证了本文建立的有限元

仿真模型的正确性,并对比分析普通钻削制孔与振动辅助钻削制孔的仿真结果,验证了振动对碳纤维复合材料钻削具有一定的改善作用。

1 复合材料力学模型

在有限元仿真中,主要采用损伤力学模型来研究碳纤维复合材料的损伤过程,分析过程包括应力分析、失效判断、性能演化 3 个阶段(图 1)。首先进行应力计算,并将应力带入失效准则中进行判断,若满足失效条件,则根据具体的失效模式进行相应的刚度退化,更新应力应变进行循环计算直至仿真结束。损伤力学模型通常包含失效准则和损伤演化两部分。

1.1 失效准则

碳纤维复合材料的力学行为可以直接类比为正交各向异性材料,其存在 3 个性能对称平面,刚度系数只有 9 个,其应力-应变关系为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ & & C_{44} \\ & & & C_{55} \\ & & & & C_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, σ_{ij} 为应力张量分量, ε_{ij} 为应变张量分量, C_{ij} 指刚度矩阵分量。工程上通常采用弹性模量 E_i 、剪切模量 G_{ij} 以及泊松比 ν_{ij} 表征材料的刚度矩阵,具体公式为:

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{E_1(1-\nu_{23}\nu_{32})}{\Delta} & C_{12} &= \frac{E_2(\nu_{12}+\nu_{32}\nu_{13})}{\Delta} \\ C_{22} &= \frac{E_2(1-\nu_{13}\nu_{31})}{\Delta} & C_{13} &= \frac{E_3(\nu_{13}+\nu_{12}\nu_{23})}{\Delta} \\ C_{33} &= \frac{E_3(1-\nu_{12}\nu_{21})}{\Delta} & C_{23} &= \frac{E_1(\nu_{23}+\nu_{21}\nu_{31})}{\Delta} \\ C_{44} &= G_{12} & C_{55} &= G_{23} & C_{66} &= G_{13} \\ \Delta &= 1-\nu_{12}\nu_{21}-\nu_{23}\nu_{32}-\nu_{13}\nu_{31}-2\nu_{21}\nu_{13}\nu_{32} \end{aligned} \quad (2)$$

在定义碳纤维复合材料失效准则时,研究人员发现碳纤维复合材料具有一定的韧性,存在塑形力学行为,因此需要将塑形力学的相关准则引入碳纤维复合材料研究中。本文建立了采用 Hashin 准则与 PUCK 准则相结合的一种力学模型,即对纤维损伤判断采用 Hashin 准则而基体损伤判断采用 PUCK 准则,建立的力学模型为:

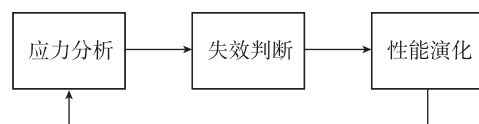


图1 损伤分析过程

Fig.1 Process of damage analysis

$$\begin{cases} d_f = (1-d_{ft}) \times (1-d_{fc}) \\ d_m = d_f \times (1-d_{mt}) \times (1-d_{mc}) \\ d_s = d_f \times (1-S_{mt} \times d_{mt}) \times (1-S_{mc} \times d_{mc}) \end{cases} \quad (8)$$

式中, S_{mt} 和 S_{mc} 为残余刚度系数。

2 黏性层单元 (Cohesive) 模型

为了仿真出碳纤维复合材料在制孔过程中出现的分层现象, 本文采用黏性层单元来模拟层间损伤。图4为 Cohesive 双线性本构模型, 它给出了材料达到强度极限前的线弹性段和达到强度极限后的刚度线性降低软化阶段。图4中纵坐标为应力, 而横坐标为位移, 因此线弹性段的斜率实际上是 Cohesive 单元的刚度, 曲线下的面积即为材料断裂时的能量释放率。当各个方向上的名义应力比的平方和等于1时, 损伤开始发生。

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (9)$$

式中, t_n 、 t_s 和 t_t 分别指层间的正应力和剪切应力的分量, t_n^0 、 t_s^0 和 t_t^0 指损伤发生时每个应力分量对应的峰值。

当损伤发生后, 刚度矩阵开始以基于能量的损伤演化规律进行折减, 具体如下:

$$\left[\frac{G_n}{G_n^c} \right]^2 + \left[\frac{G_s}{G_s^c} \right]^2 + \left[\frac{G_t}{G_t^c} \right]^2 = 1 \quad (10)$$

式中, G_n 、 G_s 和 G_t 分别指正向和切向的瞬时能量, G_n^c 、 G_s^c 和 G_t^c 分别指完全破坏时每个能量分量对应的临界值。表1给出了仿真所需的参数值。

3 有限元模型建立

3.1 子程序

ABAQUS 不但拥有丰富的材料模型库, 还为新型材料提供了用于编写本构模型的用户子程序, 通过在程序中定义材料的初始刚度矩阵、损伤判据与损伤演化, 并结合合适的模型, 可以保证仿真结果的准确性, 子程序的调用机制如图5所示。

3.2 几何模型与网格参数

图6为钻削模型3D装配图, 蓝色部分为普通麻花钻, 直径6mm, 顶角为118°, 螺旋角为21°, 通过SolidWorks建模并导入ABAQUS (为了节约计算资源, 只截取刀具前端)。在网格类型的选取上, 由于刀具材料的杨氏模量要远远高于碳纤维复合材料, 本文将刀具设定为离散刚体, 网格类型为R3D4。图6中的绿色部分为碳纤维复合材料层合板, 尺寸为10mm × 10mm × 2mm, 共分为8层, 每层的厚度为0.25mm, 纤维方向均为0°, 这里采用ABAQUS中自带的材料方向命令定义纤维方向。在网格划分方面, 由于工件表面与刀具的前刀面、后刀

面之间有很大的相对运动, 且钻削过程中会导致板材中心处出现大变形, 因此本文中采用C3D8R (8节点热力耦合6面体单元) 对工件板进行网格划分, 该单元可以实现以较小的计算代价来获得较高的计算精度。为了平衡计算时间与计算精度, 在低变形区的网格尺寸为0.4mm × 0.4mm, 而在工件与刀具接触的区域, 即大变形区, 网格的尺寸为0.1mm × 0.1mm。

层与层之间的黏性层单元通过网格偏移形成, 厚度为0, 网格类型为COH3D8, 损伤临界值设定为0.9, 一旦黏性层网格变形程度达到0.9, 网格即会失效去除。

3.3 材料属性

本文中所仿真的碳纤维复合材料的材料参数见表2, 结合上文讨论的碳纤维复合材料本构模型, 采用

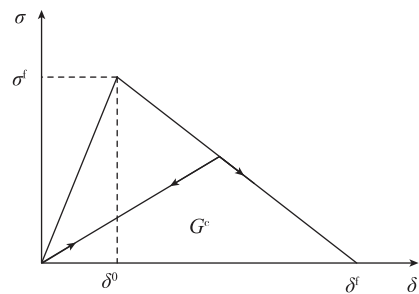


图4 Cohesive双线性本构模型
Fig.4 Bilinear constitutive model of Cohesive

表1 黏性层单元材料参数值

$G_n^c / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$G_s^c = G_t^c / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	t_n^0 / MPa	$t_s^0 = t_t^0 / \text{MPa}$
0.2	1	60	90

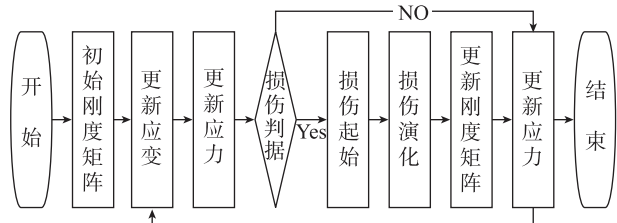


图5 子程序调用机制
Fig.5 Call mechanism of VUMAT

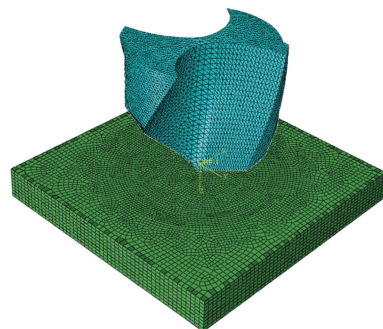


图6 3D模型
Fig.6 3D model

FORTRAN 语言编写用户自定义材料子程序 VUMAT, 运用均质化建模方法对所建的三维碳纤维板赋予材料属性。

关于黏性层单元材料属性定义, 本文通过 ABAQUS 中的材料定义命令建立黏性层材料, 选择相应的失效准则和刚度退化准则, 并依照表 1 填入相应的数值。

3.4 边界属性及接触属性

刀具与碳纤维复合材料层合板之间的接触通过 ABAQUS 中自带的通用接触算法进行定义, 摩擦系数 μ 选为 0.3。

在对工件的边界进行定义时, 为了防止其在钻削过程中发生移动和偏移, 需要对工件的 6 个自由度都进行固定约束。

对于刀具载荷的定义, 在建模过程中首先定义普通钻削的加工参数, 如表 3 所示, A 组为固定刀具转速, 改变进给速度; B 组为固定进给速度, 改变刀具转速。而在振动辅助钻削模型中, 加工参数为 2000r/min、60mm/min, 选择不同形式的振动, 其中轴向振动频率为 20kHz, 径向振动频率为 5.18kHz, 具体参数见表 4。

表2 碳纤维复合材料属性表

属性	数值	属性	数值
E_{11}/GPa	127	G_{23}/GPa	4
E_{22}/GPa	9.1	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1580
E_{33}/GPa	9.1	X_{1c}/MPa	1870
ν_{12}	0.31	X_{1t}/MPa	45
ν_{13}	0.31	X_{2c}/MPa	1026
ν_{23}	0.45	X_{2t}/MPa	156
G_{12}/GPa	5.6	S_{12}/MPa	87
G_{13}/GPa	5.6	—	—

表3 钻削方案参数表

方案	转速 / ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	进给速度 / ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
A	2000	20, 40, 60
B	2000, 3000, 4000	60

表4 振动加工方案参数表

方案	振幅 / μm			频率 / kHz
	轴向	径向 1	径向 2	
1	10	—	—	20
2	0	10	10	5.18
3	10	10	10	20, 5.18

4 有限元仿真结果与讨论

4.1 有限元仿真模型验证

为了验证碳纤维复合材料有限元模型的准确性, 本文进行了相同参数的试验并与仿真进行对比。图 7 所示为刀具转速 2000r/min、进给速度 60mm/min 的轴向力的变化趋势, 可以看出仿真与实际的轴向力的变化趋势基本一致, 随着进给量不断加大, 刀具与工件的接触面积不断增加, 轴向力呈现一个上升的趋势并在切削部分完全进入工件内时达到最大值, 此后便一直下降至 0, 但在钻入期间略有不同, 原因可能是在钻入过程中复合材料工件板发生了一定的振动, 导致实际钻削过程中轴向力波动较为剧烈。图 8 所示为不同进给速度、刀具转速下的轴向力, 可以看出轴向力随着进给速度的增大而增大, 随着刀具转速的增大而减小。且仿真与实际相比误差约为 7.51%~10.4%, 在可接受范围内, 造成这一现象的原因是由于在实际加工过程中切削会堵塞刀具、降低切削刃的锋利程度从而提高了轴向力。图 9 为普通钻削不同阶段的应力云图, 可以看出在钻入与钻出时有明显的分层现象, 这也与碳纤维复合材料在实际钻削过程中类似^[19]。

4.2 轴向力对比

图 10 为普通钻削与振动辅助钻削的轴向力对比图, 相较于普通钻削, 采用一维振动、二维振动和三维振动情况下的轴向力分别减小了 27.3%、25.8% 和 32.1%。这表明相较于传统钻削, 振动辅助钻削可以明显降低轴向力, 这是由于振动的引入致使刀具在与工件接触时会产生摩擦力反转的情况。此外, 采用三维振动辅助加工轴向力最小, 而其他振动加工方式轴向力基本相同。

4.3 分层对比

定义孔的缺陷因子 $F = (D_{\max} - D) / D$, 其中 D_{\max} 为

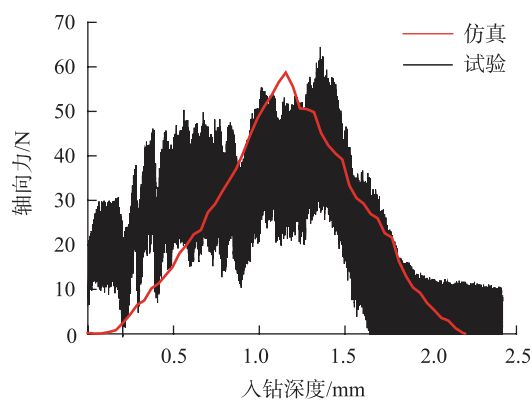


图7 轴向力对比

Fig.7 Comparison of thrust force

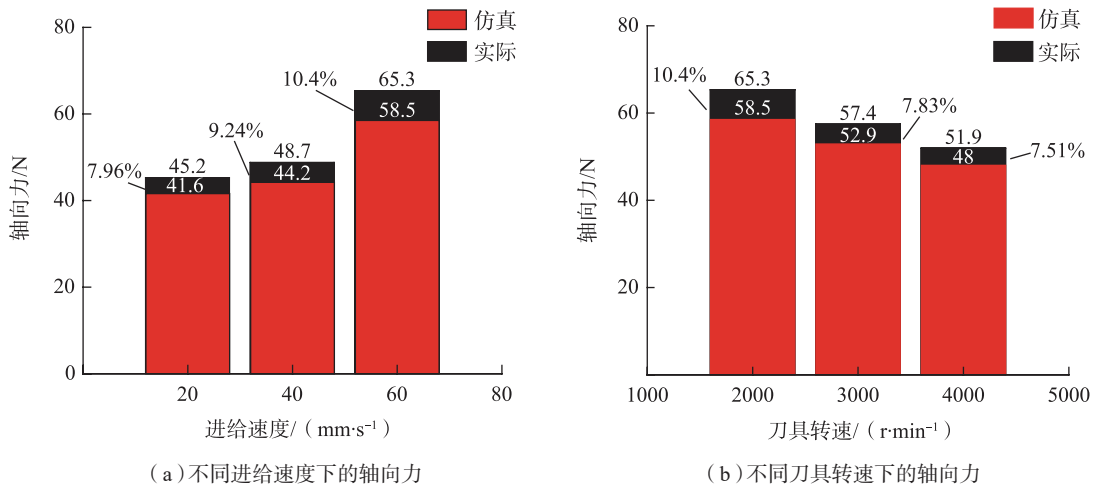


图8 仿真与实际中轴何力的对比
Fig.8 Comparison of thrust force between experimental and FE result

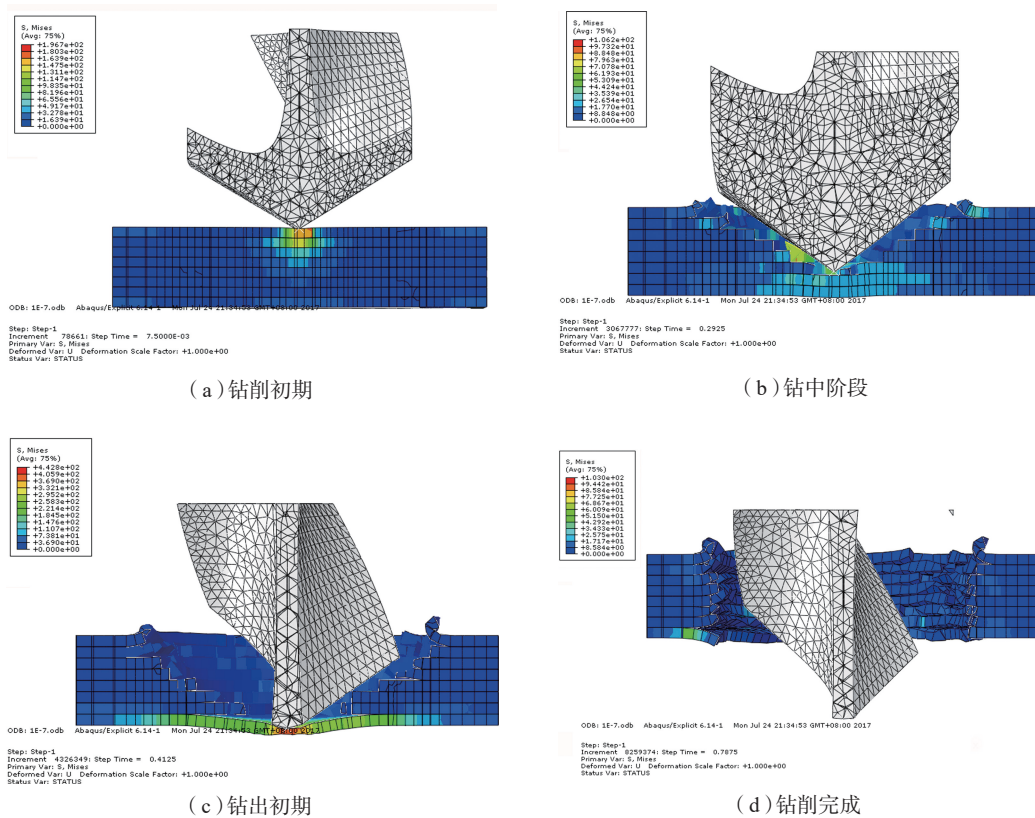


图9 普通钻削仿真应力分布
Fig.9 Stress distribution of common drilling

孔壁最大缺陷处的直径尺寸, D 为加工刀具尺寸, 本文中为 6mm。图 11 为出入口的缺陷因子图。

图 11 (a) 是不同钻削方式下的碳纤维复合材料入口缺陷因子图, 可以看出相比于传统的钻削工艺, 采用振动辅助钻削对入口缺陷有着良好的改善作用, 其中一维轴向振动方式改善尤为明显, 其次是三维, 最后是二维。造成这一现象的原因是由于轴向振动的引入降

低了刀具横刃对材料的吸附作用, 而径向振动没有这一效果。在出口部分, 如图 11 (b) 所示, 采用二维振动辅助加工方式的出口缺陷因子最小, 其他依次是三维振动辅助加工、一维振动辅助加工和普通加工。这是由于径向上的振动使得刀具在与孔壁附近的材料接触时有一个撞击作用, 使得这一部分的材料更容易被去除。

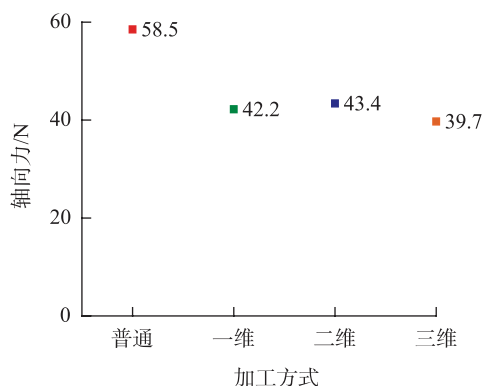
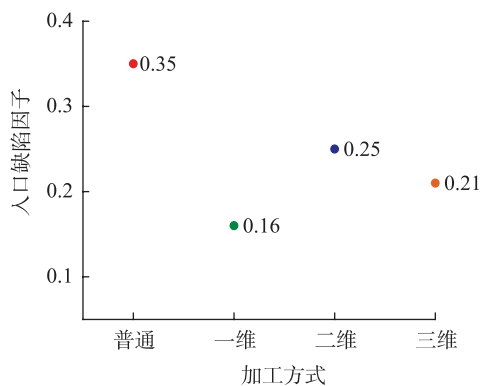
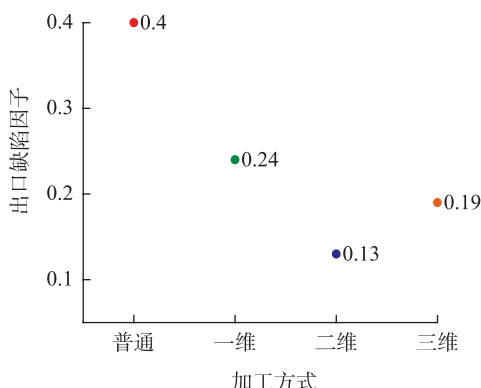


图10 振动与普通钻削轴向力对比

Fig.10 Comparison of thrust force between different processes



(a) 入口缺陷因子



(b) 出口缺陷因子

图11 碳纤维复合材料孔缺陷因子

Fig.11 Damage variable of CFRP hole

5 结论

本文针对碳纤维增强复合材料制孔过程中出现的入口剥离、出口分层、撕裂与毛边等质量问题,结合振动辅助切削进行制孔工艺改进。为了有效预测碳纤维复合材料振动辅助制孔工艺的效果,结合碳纤维复合材料本构模型进行振动辅助制孔有限元仿真建模研究,取得的主要成果有:

(1) 借鉴已有的复合材料本构模型,构建了碳纤维

复合材料力学模型,用于碳纤维增强复合材料的有限元仿真建模。

(2) 为了仿真碳纤维复合材料在制孔过程中的分层现象,提出了黏性层模型用于模拟复合材料层间损伤,基于此建立了有限元仿真模型。

(3) 通过在边界层施加振动模式的方式,实现了振动辅助制孔的有限元仿真建模。

(4) 将建立的有限元仿真模型的仿真结果与已有文献进行比较,验证了本文有限元仿真模型的正确性;并对比分析普通钻削制孔与振动辅助钻削制孔的仿真结果,表明采用振动辅助钻削碳纤维复合材料可以有效降低轴向力,抑制毛刺和分层产生。

参考文献

- [1] 鲍永杰. C/E 复合材料制孔缺陷成因与高效制孔技术 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
BAO Yongjie. The formation mechanism of disfigurements during drilling and the high-efficiency techniques of drilling C/E composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [2] 刘强. 碳纤维复合材料在航空航天领域的应用 [J]. 科技与企业, 2015(22): 221.
LIU Qiang. Application of CFRPs in aeronautics and astronautics[J]. Technology and Business, 2015(22): 221.
- [3] HO-CHENG H, DHARAN C K H. Delamination during drilling in composite laminates[J]. Journal of Engineering for Industry, 1990, 112(3): 236-239.
- [4] PHADNIS V A, MAKHDUM F, ROY A, et al. Drilling-induced damage in CFRP laminates: experimental and numerical analysis[J]. Solid State Phenomena, 2012, 188: 150-157.
- [5] RAKESH P K, SHARMA V, SINGH I, et al. Delamination in fiber reinforced plastics: a finite element approach[J]. Engineering, 2011, 3: 549-554.
- [6] 王明海, 孙国强. 薄板钻加工碳纤维复合材料仿真研究 [J]. 机床与液压, 2013(23): 120-124.
WANG Minghai, SUN Guoqiang. Study on finite element analysis of effects of core drill on drilling CFRP[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013(23): 120-124.
- [7] HE Y L, ZHANG G P, XUE J P. Finite element analysis on drilling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic (CFRP)[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 455: 228-231.
- [8] ISBILIR O, GHASSEMIEH E. Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites[J]. Composite Structures, 2013, 105(8): 126-133.
- [9] FEITO N, LÓPEZ-PUENTE J, SANTIUSTE C, et al. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling[J]. Composite Structures, 2014, 108(1): 677-683.
- [10] PHADNIS V A, MAKHDUM F, ROY A, et al. Experimental and numerical investigations in conventional and ultrasonically assisted

drilling of CFRP laminate[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 455–459.

[11] PHADNIS V A, ROY A, SILBERSCHMIDT V V. A finite element model of ultrasonically assisted drilling in carbon/epoxy composites[J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 141–146.

[12] 高汉卿. 碳纤维增强树脂基复合材料宏细观切削过程仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

GAO Hanqing. The macro and micro simulation of cutting carbon fibre reinforced plastic composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[13] 杨志超. 基于应变监测的CFRP层合板钻孔分层缺陷机理研究[D]. 广州: 广州大学, 2016.

YANG Zhichao. Study on mechanism of holes defects in drilling of CFRP laminates based on strain monitoring[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016.

[14] 姚运萍, 吴梦培, 徐雯. 碳纤维复合材料麻花钻轴孔轴向力的数值模拟[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 107–110.

YAO Yunping, WU Mengpei, XU Wen. Numerical simulation on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(1): 107–110.

[15] 高鑫. 玻璃纤维增强复合材料加工机理研究及有限元分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.

GAO Xin. Glass fiber reinforced composite materials processing mechanism research and finite element analysis[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.

[16] 佟沐霖. 碳纤维复合材料钻削过程仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.

TONG Mulin. Research on finite element analysis and experiment of drilling of carbon fiber reinforced polymer composites[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.

[17] 王卫滨. 碳纤维复合材料超声振动辅助制孔数值模拟及实验研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.

WANG Weibin. Numerical simulation and experimental study of ultrasonic vibration assisted drilling of carbon fiber composite material[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.

[18] 张承承, 王建军. 基于刚度退化的复合材料结构损伤研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(21): 8–13.

ZHANG Chengcheng, WANG Jianjun. Research advances in damage of composite strictures on stiffness degradation[J]. Materials Review, 2016, 30(21): 8–13.

[19] 陈燕, 葛恩德, 傅玉灿, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 301–316.

CHEN Yan, GE Ende, FU Yucan, et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 301–316.

通讯作者: 张臣, 博士、教授, 研究方向为数字化设计与制造、加工过程仿真、超声椭圆振动辅助切削技术、减阻结构设计与制造技术, E-mail: meeczhang@nuaa.edu.cn.

(责编 逸飞)

(上接第84页)

参考文献

[1] 于建华. 航空发动机叶片加工变形控制技术[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2016: 4–10.

YU Jianhua. Study on the distortion control technology for the machining of aero-engine blades[D]. Beijing: Beihang University, 2016: 4–10.

[2] 崔海军, 张明岐. 航空发动机叶片抛光技术现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 128–131.

CUI Haijun, ZHANG Mingqi. Current situation and development trend of aircraft engine blade polishing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(11): 128–131.

[3] 黄云, 黄智. 现代砂带磨削技术及工程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2009: 12–16.

HUANG Yun, HUANG Zhi. Modern abrasive belt grinding technology and application in engineering[M]. Chongqing: Chongqing University press, 2009: 12–16.

[4] XIAO G J, HUANG Y. Constant-load adaptive belt polishing of the weak-rigidity blisk blade[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9–12): 1473–1484.

[5] XIAO G J, HUANG Y, YIN J C. An integrated polishing method for compressor blade surfaces[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5–8): 1723–1733.

[6] 黄云, 肖贵坚, 邹莱. 整体叶盘抛光技术的研究现状及发展趋势[J]. 航空学报, 2016, 37(7): 2045–2064.

HUANG Yun, XIAO Guijian, ZOU Lai. Current situation and development trend of polishing technology for blisk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(7): 2045–2064.

[7] 刘树生, 杨建中. 叶片六轴联动数控砂带磨床与数控砂带磨削单元化[J]. 航空制造技术, 2010, 53(4): 32–37.

LIU Shusheng, YANG Jianzhong. 6-axis hybrid NC belt-grinding machine for blade and unitization of NC belt grinding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(4): 32–37.

[8] 段继豪, 史耀耀, 张军锋, 等. 航空发动机叶片柔性抛光技术[J]. 航空学报, 2012, 33(3): 573–578.

DUAN Jihao, SHI Yaoyao, ZHANG Junfeng, et al. Flexible polishing technology for blade of aviation engine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 33(3): 573–578.

[9] 宋瑞祯. 复杂母线柔性抛光工具研制及抛光工艺参数优化[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017: 8–11.

SONG Ruizhen. Development of flexible polishing tool with complex generatrix and optimization of polishing parameters[D]. Beijing: Beihang University, 2017: 8–11.

[10] 陈志同. 一种具有局部增强结构的复杂母线抛光轮及其制作方法: 201610168879.X[P]. 2016–03–23.

CHEN Zhitong. A complex bus polishing wheel with local reinforcing structure and manufacturing method: 201610168879.X[P]. 2016–03–23.

通讯作者: 陈志同, 教授、博士生导师, 研究方向为航空发动机叶轮叶片磨削与抛光、复杂曲面自适应加工、测量与数控编程等, E-mail: ztchen@buaa.edu.cn.

(责编 逸飞)