

引文格式: 郑华林, 王贵鑫, 宁海峰, 等. 基于有限元 CFRP 多次铣削过程中面下损伤研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(5): 36-42.

ZHENG Hualin, WANG Guixin, NING Haifeng, et al. Subsurface damage research of CFRP multiple milling process based on FEM simulation[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(5): 36-42.

基于有限元 CFRP 多次铣削过程中面下损伤研究*

郑华林, 王贵鑫, 宁海峰, 胡志伟

(西南石油大学, 成都 610500)

[摘要] 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)因其优越的性能被应用于航空航天领域。对于 CFRP 切削加工研究, 目前主要集中在单次铣削上, 但在实际加工中多次铣削策略被广泛应用, 而多次铣削对面下损伤的影响是不可忽略的。为了解决这个问题, 利用 VUMAT 子程序建立三维 Hashin 失效准则及 CFRP 多次铣削有限元模型。通过试验验证了仿真模型的准确性。利用该模型分析了切削力和面下损伤随纤维方向角的变化规律。结果表明, 多次铣削策略中第 2 次铣削切削力小于第 1 次, 且切削力遵循 $90^\circ > 135^\circ > 45^\circ > 0^\circ$ 的规律; 面下损伤低于单次铣削, 损伤因子随纤维方向角度的增大而增大, 其中纤维方向角为 0° 时损伤因子最小, 135° 时损伤因子最大, 面下损伤最严重。

关键词: 碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP); 多次铣削; 有限元仿真; 面下损伤; 纤维方向角

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.05.036



郑华林

教授, 博士生导师, 研究方向为先进制造工艺和智能制造。

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有质轻、耐疲劳性好、比强度和比刚度高的特点, 满足航空构件的需求^[1]。CFRP 不同于普通金属

材料, 是典型的各向异性材料, 由于这种特殊的性质, 在切削加工过程中材料会出现分层、毛刺、撕裂、面下损伤等缺陷, 严重影响工件的表面质量及使用寿命^[2]。纤维基体界面脱粘和开裂是造成面下损伤的主要原因, 随着切削载荷的增加, 裂纹会进一步扩展, 从而导致材料刚度、抗疲劳等性能下降。为了减小 CFRP 加工过程中面下损伤缺陷, 提高加工效率, 研究人员对其展开了深入研究。然而, 影响切削损伤的因素较多, 如果仅通过大量的试验来研究, 试验成本较高。于是研究人员开始利用有限元仿真模拟 CFRP 的切削损伤过程。Bhatnagar 等^[3]基于 Hashin 失效准则建立了二维正交切削有限元模型, 模拟刀具切削造成的面下损伤深度。Zenia 等^[4]基于 VUMAT 子程序建立刚度退化的渐进损伤二维有限元模型, 用于分析加工单向 CFRP

复合材料时切屑的形成和面下损伤。殷俊伟^[5]利用 ABAQUS 建立了单向 CFRP 切削有限元模型, 利用该模型分析纤维方向角、切削参数、刀具前后角对面下损伤的影响。Wang 等^[6]通过试验和 3D 有限元仿真模型, 研究主轴转速、切深、纤维方向角、切削力和面下损伤之间的相互关系; 另外, 其团队建立一维和二维损伤因子来定量表征层压工件的损伤。Zhang 等^[7]基于 VUMAT 编制的三维 Hashin 破坏准则和材料刚度退化模型建立了 CFRP 高速铣削切削力渐进损伤模型, 分析切削力随纤维方向角、切削参数的变化规律。

综上所述, 对于面下损伤有限元切削仿真的研究, 单次切削模型占绝大多数, 而在实际加工中, CFRP 常被用于大型飞机承力构件中, 对表面加工质量要求更加严苛。为了减少工件的加工损伤, 提高表面加工质量, 具

* 基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(19ZDZX0055)。

有渐进切削深度的多次铣削策略被广泛使用^[8],第1次铣削造成的加工缺陷对第2次铣削有较大的影响,然而对于多次铣削切削过程的面下损伤鲜少被研究。本研究利用宏观切削模型模拟 CFRP 多次铣削过程,对比不同纤维方向角下切削策略对切削力和面下损伤的影响,以及分析第1次铣削对后续切削造成的影响。

1 CFRP 多次铣削三维有限元模型

1.1 有限元几何模型

CFRP 属于脆性材料,切削仿真过程应变大、应变率高,刀具与材料的接触具有非线性特点,因此本研究选用 Abaqus 中 Explicit 模块对 CFRP 多次铣削过程进行仿真^[9]。将 CFRP 单向板定义为各向异性线弹性本构三维平面模型,建模所需要的材料性能参数如表 1 所示^[10]。纤维铺设方向是通过在有限元中建立局部坐标系的方式来完成,方向 1 为纤维方向,方向 2、3 垂直于纤维方向,通过改变方向 1 的指向来模拟不同的纤维方向角^[11]。图 1 为多次铣削策略示意图,纤维方向角 θ 为切削速度沿顺时针旋转至与纤维方向重合时转过的角度。图 2 为建立的有限元几何模型,模型包括 CFRP 和刀具两部分。由于较大的工件尺寸及切削厚度会导致网格数量增加,计算效率下降,故将 CFRP 的模型简化。CFRP 模型尺寸为 $3\text{mm} \times 2\text{mm} \times 0.4\text{mm}$,每层碳纤维厚度为 0.2mm ,共两层。网格的单元类型为 C3D8R,网格单元大小为 0.02mm 。工件下端完全固定,左右两端固定 x 方向的位移。刀具定义为刚体,刀具的前角为 5° ,后角为 10° ,刀具的钝圆半径为 0.03mm 。切削速度设置为 110.5m/min ,总径向切深 a_{e3} 为 0.5mm ,第1次切深 a_{e1} 为 0.25mm ,第2次切深 a_{e2} 为 0.25mm 。刀具与工件的接触设置为面面接触,将前后刀面设为主面,工件上的单元

格设为次表面,防止元件穿透。在切削模拟过程中,刀具与工件间的摩擦系数对仿真结果有重要的影响,依据

表 1 T700 单向碳纤维复合材料的主要性能参数^[10]
Table 1 Main performance parameters of T700 unidirectional carbon fiber composites^[10]

性能参数	数值	
弹性模量/GPa	E_{11}	138.0
	E_{22}	10.16
	E_{33}	10.16
泊松比	ν_{12}	0.28
	ν_{13}	0.28
	ν_{23}	0.30
剪切模量/GPa	G_{12}	5.86
	G_{13}	5.86
	G_{23}	4.79
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ	1540.0
拉伸强度/MPa	X_T	1548
	Y_T	856
压缩强度/MPa	X_C	37.5
	Y_C	218
剪切强度/MPa	S_{12}	79
	S_{13}	79
	S_{23}	60.5

Klinkova 等^[12]的研究将摩擦系数设为 0.4。

1.2 材料的性质及失效模型

在宏观模型中,CFRP 被视为正交各向异性材料,其应力与应变的本构关系为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ε_{ii} 为正应变; γ_{ij} 为剪切应变; σ_{ii} 为正应力; τ_{ij} 为剪应力; E_i 为弹性模量; G_{ij} 为剪切模量; ν_{ij} 为泊松比。

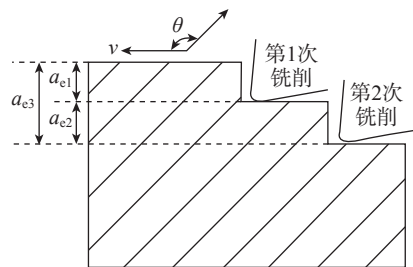


图 1 多次铣削策略示意图
Fig.1 Schematic diagram of multiple milling strategies

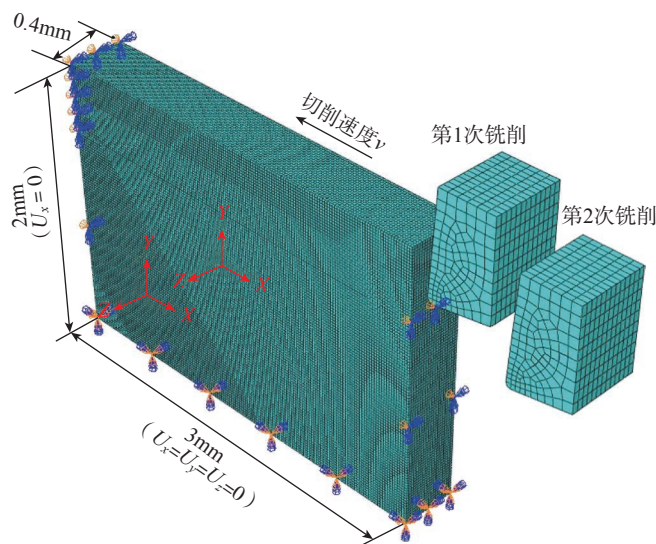


图 2 CFRP 铣削加工几何模型
Fig.2 Geometric model of CFRP milling

材料的失效准则对于面下损伤仿真结果的准确性有重要的影响,本研究选用 Hashin 失效准则。由于有限元软件中,只提供了平面内二维 Hashin 失效准则,因此本研究利用 Abaqus 中 VUMAT 子程序建立三维 Hashin 失效准则及材料刚度退化模型。三维 Hashin 失效准则具体表达式^[13]为以下4种。

纤维拉伸失效($\sigma_{11} \geq 0$):

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

纤维压缩失效($\sigma_{11} < 0$):

$$F_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2 \quad (3)$$

基体的拉伸失效($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$):

$$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{33}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{22} \times \sigma_{33}}{S_{23}^2}\right) + \left(\frac{\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2}{S_{13}^2}\right) \quad (4)$$

基体的压缩失效($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$):

$$F_{mc} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33}) \times Y_C}{4 \times S_{23}^2} - \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} + \left(\frac{1}{2S_{23}}\right)^2 (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 - \frac{\sigma_{22} \times \sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{1}{S_{12}}\right)^2 (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2) \quad (5)$$

式中, σ_{ii} 和 τ_{ij} 分别为正应力和剪切应力; X_T 和 Y_T 为沿纤维方向和垂直于纤维方向拉伸强度; X_C 和 Y_C 为沿纤维方向和垂直于纤维方向的压缩

强度; S_{ij} 为平面内的剪切强度。

当积分点满足失效起始条件后,材料将发生刚度退化,刚度退化系数演化规律遵循指数损伤演化规律。4种失效条件对应的4种损伤因子见表2^[14],其中, G_{ft} 、 G_{fc} 为纤维拉伸、压缩断裂能; G_{mc} 、 G_{mt} 为基体拉伸、压缩断裂能; ϵ_{ft}^f 、 ϵ_{fc}^f 为应变张量的分量。退化后的刚度矩阵计算公式^[14]为

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} (1-d_f)C_{11} & (1-d_f)(1-d_m)C_{12} & \\ & (1-d_m)C_{22} & \\ \text{sym} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $d_f = \begin{cases} d_{ft} & \sigma_1 \geq 0 \\ d_{fc} & \sigma_1 < 0 \end{cases}$, $d_m = \begin{cases} d_{mt} & \sigma_2 + \sigma_3 \geq 0 \\ d_{mc} & \sigma_2 + \sigma_3 < 0 \end{cases}$

本研究采用 VUMAT 子程序将用户自定义的材料参数代入到材料起始失效准则和损伤因子计算公式中,经过反复迭代计算得出结果。VUMAT 子程序程序框图如图3所示。

2 单向 CFRP 切削试验

为了验证仿真模型的准确性,使用搭载了西门子 828D 系统的 XK714D 立式数控加工中心对单向 CFRP 层合板进行铣削加工。图4为单向 CFRP 切削试验装置,刀具选用前角为 5°、后角为 10° 的双刃直槽 PCD 立铣刀,对 200mm×100mm×4mm 的碳纤维板同一边进行多次铣削,碳纤维板的

型号为 T700,共 20 层,每层厚度为 0.2mm。铣削速度和径向切削深度与仿真模拟值保持一致,具体的试验参数分别为:纤维方向角为 0°、45°、90° 和 135°,铣削速度 v 为 110.5m/min,第 1 次径向为切深 0.25mm,第 2 次径向切深为 0.25mm。使用 Kistler9272 三向测力仪分别测量 X、Y、Z 3 个方向的切削力。

3 分析与讨论

3.1 切削力

由于有限元模型 CFRP 的厚度与试验中的不同,得出的切削力不能直接进行比较,本研究采用换算后的切削力仿真值与试验值进行比较。假设在任意时刻,切削力沿轴向均匀分布,引入切削比能作为中间转换系数,具体的计算公式^[15]为

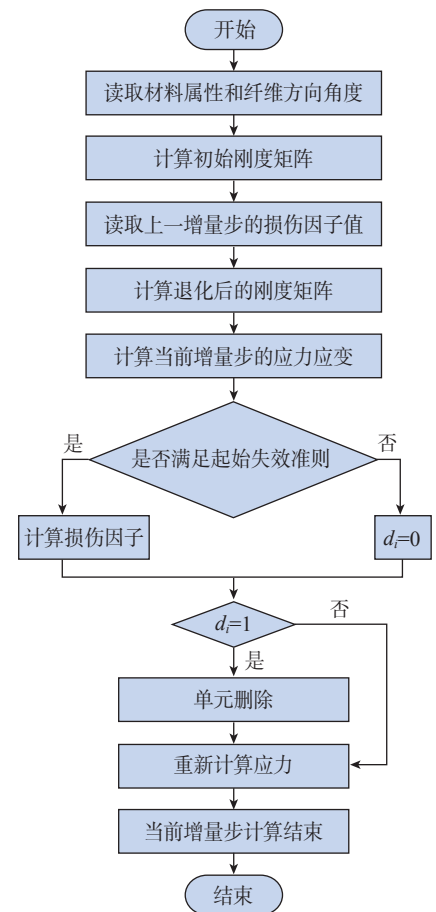


图3 VUMAT 子程序流程图
Fig.3 VUMAT subroutine flow chart

表2 4种失效对应的损伤因子^[14]

Table 2 Damage factors corresponding to four failures^[14]

损伤因子	表达式
d_{ft} (纤维拉伸失效)	$d_{ft} = 1 - e^{-\sigma_{11}^f \epsilon_{11}^f L^f (\sqrt{F_{ft}} - 1) / G_{ft} / \sqrt{F_{ft}}}$
d_{fc} (纤维压缩失效)	$d_{fc} = 1 - e^{-\sigma_{11}^c \epsilon_{11}^c L^c (\sqrt{F_{fc}} - 1) / G_{fc} / \sqrt{F_{fc}}}$
d_{mt} (垂直纤维拉伸失效)	$d_{mt} = 1 - e^{-\sigma_{22}^t \epsilon_{22}^t L^t (\sqrt{F_{mt}} - 1) / G_{mt} / \sqrt{F_{mt}}}$
d_{mc} (垂直纤维压缩失效)	$d_{mc} = 1 - e^{-\sigma_{22}^c \epsilon_{22}^c L^c (\sqrt{F_{mc}} - 1) / G_{mc} / \sqrt{F_{mc}}}$



图4 单向CFRP切削试验装置
Fig.4 Unidirectional CFRP cutting test device

$$F'_x(\theta) = K_x(\theta)A'_c(\theta) \quad (7)$$

$$F'_y(\theta) = K_y(\theta)A'_c(\theta) \quad (8)$$

式中, $F'_x(\theta)$ 、 $F'_y(\theta)$ 分别为 x 、 y 方向上的切削力模拟仿真值; $K_x(\theta)$ 、 $K_y(\theta)$ 为 x 、 y 方向上的切削比能; $A'_c(\theta)$ 为仿真中去除切屑的横截面积, 可通过式(9)计算出

$$A'_c(\theta) = a_c t' n' \quad (9)$$

$$A_c(\theta) = a_c t n \quad (10)$$

式中, a_c 为径向切削深度; t' 、 t 分别为仿真模拟与试验切削每层碳纤维

的厚度; n' 、 n 分别为仿真模拟与试验切削碳纤维的层数, 试验去除切屑的横截面积为 $A_c(\theta)$ 。通过式(7)~(10)得到与试验同厚度的切削力仿真值的计算公式

$$F_x(\theta) = \frac{F'_x}{A'_c(\theta)} A_c(\theta) \quad (11)$$

$$F_y(\theta) = \frac{F'_y}{A'_c(\theta)} A_c(\theta) \quad (12)$$

图5为不同纤维方向下多次铣削策略切削力试验值与换算后仿真值对比图, 可以看出, 切削力试验值

与仿真值变化趋势相同, 都随纤维方向角度的增加呈先增大后减小的趋势, 试验值与仿真值相对误差小于11%, 证明了该有限元模型的准确。

纤维方向角为 0° 时切削力最小, 90° 最大, 这与材料去除形式有较大的联系, 纤维方向为 0° 时进给方向与纤维方向相同, 材料去除形式主要是纤维/基体界面开裂、纤维与基体剥离, 界面强度低于纤维强度, 切削力低; 随着纤维方向角的增加, 材料的去除方式由纤维/基体界面的开裂转化为纤维基体的剪切断裂, 纤维基体剪切断裂所需的力要比界面开裂多, 且未切削材料的支撑作用逐渐增强, 所以切削力逐渐增大; 纤维方向角为 135° 时, 纤维主要因为弯曲而断裂, 需要的切削力 $< 90^\circ$ 。图5中切削力仿真值总是低于试验值, 造成这种现象的原因和材料失效单元删除有关, 在有限元模型中单元达到失效强度后会被完全删除, 而实际加工过程中部分切屑会残留在加工表面继续承受力的作用^[16]。第1次铣削力总是高于第2次, 这是因为第1次铣削对材料加工表面以及面下造成了一定的损伤, 第2次切削去除材料所需的切削力小于第1次。

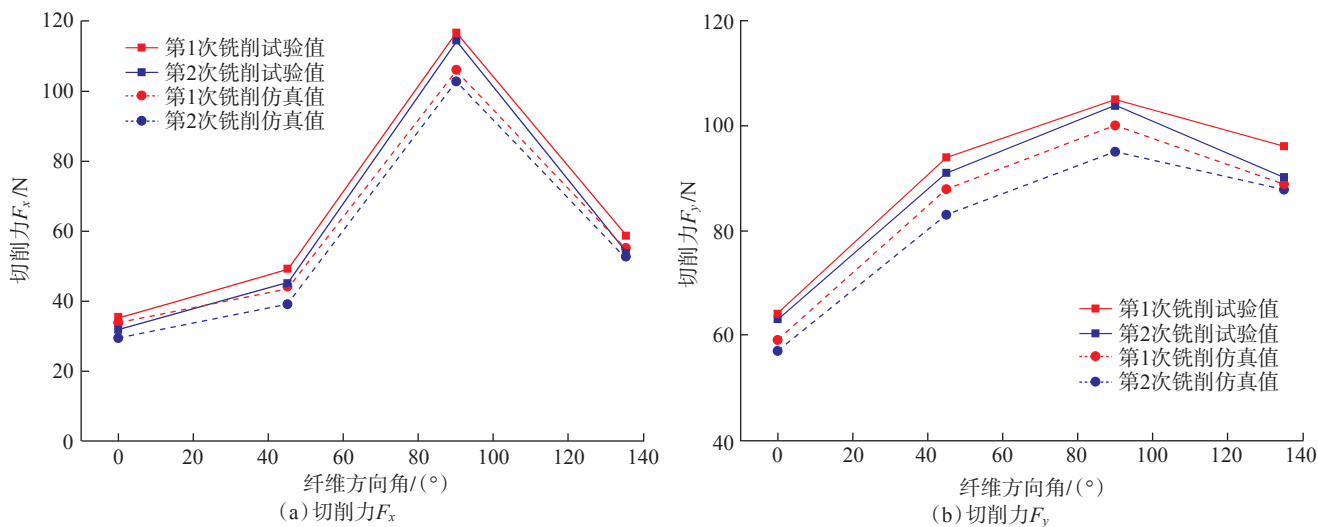


图5 纤维方向角与切削力之间的关系
Fig.5 Relationship between fiber direction angle and cutting force

3.2 面下损伤分析

为了便于对面下损伤进行定量分析,王东晓^[10]在分层损伤因子的研究基础上建立了正交切削面下损伤因子,本研究将其扩展应用到多次铣削策略下,其两次深度损伤因子的具体表达式如下。

第1次铣削面下损伤因子计算公式为

$$F_{dep1} = \frac{d_1 + a_{e3}}{a_{e3}} \quad (13)$$

第2次铣削面下损伤因子计算公式为

$$F_{dep2} = \frac{d_2 + a_{e3}}{a_{e3}} \quad (14)$$

式中, d_1 为第1次切削的面下损伤深度; d_2 为第2次切削面下损伤深度; a_{e3} 为总径向切削深度,如图6所示。

图7为典型纤维方向角下单次和多次铣削策略有限元仿真结果对比。结果表明,纤维方向角和铣削策略对面下损伤影响较大,面下损伤总是沿着纤维方向逐渐扩展。其中纤维方向角为 135° 时,刀具前刀面挤压纤维发生弯曲,造成加工表面下方基体界面开裂形成了面下损伤,面下损伤最严重;纤维方向角为 0° 时,其面下损伤因刀具后刀面压溃纤维基体而产生,面下损伤最小。

读取仿真结果面下损伤深度 d_1 和 d_2 , 记录在表3中,并将表3中的数据代入式(13)和(14),绘制了面下损伤因子,如图8所示,可知,面下损伤因子随纤维方向角的增大而增大,在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内损伤因子增幅较小,在 $90^\circ \sim 135^\circ$ 范围内损伤因子大幅度增加,这与殷俊伟等^[17]得出的结果相似,证明了有限元仿真的准确性。对比第1次铣削和第2次铣削面下损伤因子发现,纤维方向角为 0° 和 45° 时,第2次铣削的面下损伤因子均高于第1次 0.04,而 90° 和 135° 纤维方向角下,第2次铣削的面下损伤因子高于第1次 0.2 和 0.76,说

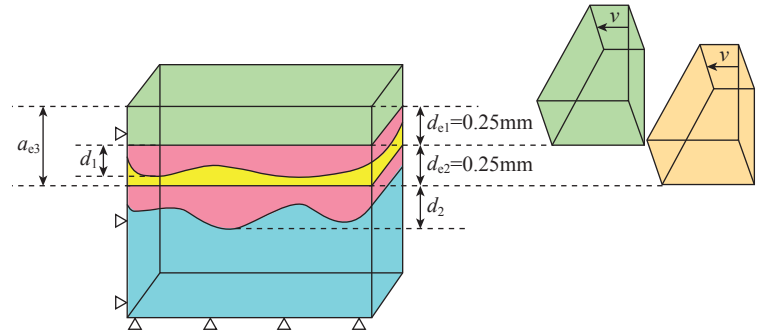


图6 多次铣削面下损伤因子表征示意图

Fig.6 Schematic diagram of multiple milling subsurface damage factor

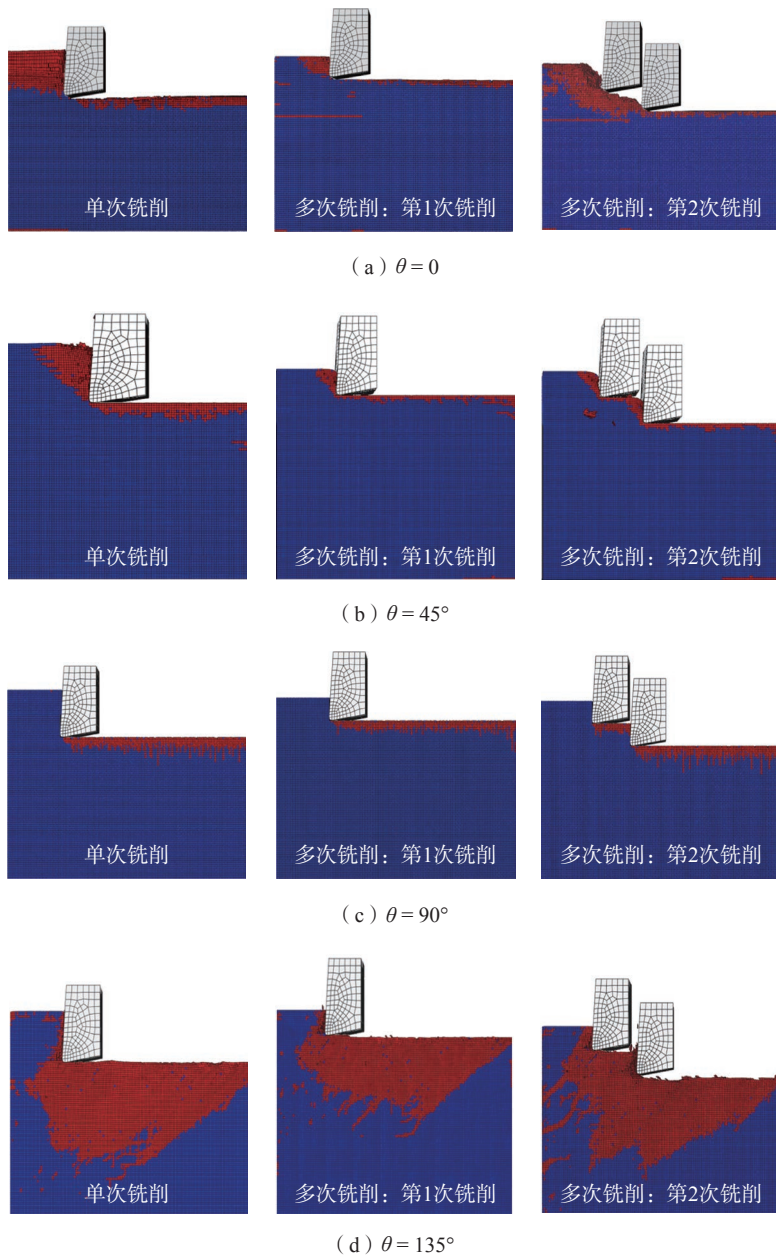


图7 不同纤维方向角下面下损伤的对比

Fig.7 Subsurface damage at different fiber direction angles

表3 面下损伤深度仿真值
Table 3 Simulation value of subsurface damage depth

纤维方向角 / (°)	单次铣削策略/mm	多次铣削策略	
		第1次面下损伤深度 d_1 /mm	第2次面下损伤深度 d_2 /mm
0	0.12	0.06	0.08
45	0.16	0.08	0.1
90	0.3	0.16	0.26
135	1.23	0.74	1.12

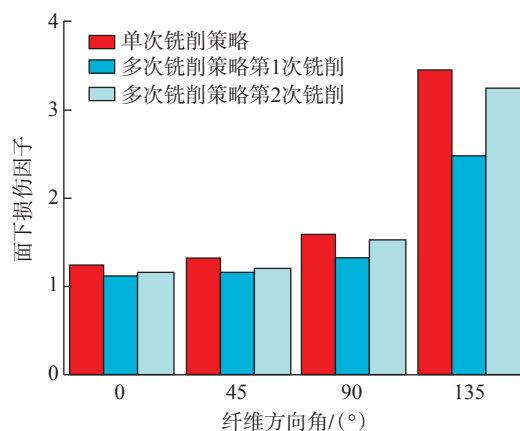


图8 不同纤维方向角下的损伤因子

Fig.8 Damage factors of different fiber direction angles

明前一次铣削产生的面下损伤会对第2次铣削面下损伤造成影响,在纤维方向角0~45°范围内,第1次铣削产生的面下损伤对第2次铣削影响较小,在90°~135°范围内影响较大。对比单次铣削策略和多次铣削策略:与单次铣削策略相比,不同纤维方向角下多次铣削策略面下损伤因子分别减小了6.5%、9.1%、5%、6.3%,表明多次铣削策略有利于减小加工损伤。此外,第1次和第2次铣削面下损伤因子低于单次铣削,说明在相同的切削参数下,径向切深越大,损伤因子越大。

4 结论

本研究建立了CFRP三维多次铣削有限元仿真模型,并通过试验验证了模型的准确性。利用该模型研究不同切削策略下纤维方向角对切削力和面下损伤的影响,得出以下结论。

(1) 切削力仿真值与试验值都随纤维方向角的增大呈现先增大后减小的趋势,且试验值与仿真值的相对误差小于11%,证明了有限元仿真模型的准确性。

(2) 在多次铣削CFRP策略下,第1次铣削的切削力总是高于第2次,且切削力遵循 $90^\circ > 135^\circ > 45^\circ > 0^\circ$ 的规律。

(3) 面下损害随纤维方向角的增大而增大,其中135°的CFRP面下损伤最严重,0°损伤最小。与单次铣削策略相比,多次铣削可降低5%~9%的面下损伤因子,有助于提高加工质量。90°和135°纤维方向角下第1次铣削的面下损伤对第2次影响较大。

参考文献

[1] 宁莉,杨绍昌,冷悦,等.先进复合材料在飞机上的应用及其制造技术发展概述[J].复合材料科学与工程,2020(5):123-128.

NING Li, YANG Shaochang, LENG Yue, et al. Overview of the application of advanced composite materials on aircraft and the development of its manufacturing technology[J]. Composites Science and Engineering, 2020(5): 123-128.

[2] 陈德雄.碳纤维复合材料正交切削过程损伤机理数值分析[D].福州:福州大学,2017.

CHEN Dexiong. Numerical analysis of damage mechanism of carbon fiber reinforced polymer in the orthogonal cutting process[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017.

[3] BHATNAGAR N, NAYAK D, SINGH I, et al. Determination of machining-induced damage characteristics of fiber reinforced plastic composite laminates[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2004, 19(6): 1009-1023.

[4] ZENIA S, AYED L B, NOUARI M, et al. Numerical prediction of the chip formation process and induced damage during the machining of carbon/epoxy composites[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 90: 89-101.

[5] 殷俊伟. CFRP 切削加工损伤成因及其评价方法[D].大连:大连理工大学,2018.

YIN Junwei. Mechanism of damage formation and damage evaluation method in machining of CFRP composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.

[6] WANG D Y, HE X D, XU Z H, et al. Study on damage evaluation and machinability of UD-CFRP for the orthogonal cutting operation using scanning acoustic microscopy and the finite element method[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2017, 10(2): 204.

[7] ZHANG L F, WANG S, QIAO W L, et al. High-speed milling of CFRP composites: A progressive damage model of cutting force[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(3-4): 1005-1015.

[8] LI H N, WANG J P, WU C Q, et al. Damage behaviors of unidirectional CFRP in orthogonal cutting: A comparison between single- and multiple-pass strategies[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 185: 107774.

[9] 齐振超,刘书暖,程晖,等.基于三维多相有限元的CFRP细观切削机理研究[J].机械工程学报,2016,52(15):170-176.

QI Zhenchao, LIU Shunuan, CHENG

Hui, et al. Research on the mesoscopic cutting mechanism of CFRP based on three-dimensional multiphase finite element models[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 170–176.

[10] 王冬晓. CFRP 正交切削中亚表面损伤量化表征及控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

WANG Dongyao. Study on quantitative characterization and controlling technology of sub-surface damage in orthogonal cutting of CFRP[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[11] 刘泉鹏. CFRP 切削的宏微观机理三维有限元分析与实验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2019.

LIU Xiaopeng. Three-dimensional finite element analysis and experimental study on macro-micro mechanism of CFRP cutting[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2019.

[12] KLINKOVA O, RECH J, DRAPIER S, et al. Characterization of friction properties at the workmaterial/cutting tool interface during the machining of randomly structured carbon fibers reinforced polymer with carbide tools under dry conditions[J]. Tribology International, 2011, 44(12): 2050–2058.

[13] 秦旭达, 唐心凯, 葛恩德, 等. CFRP 三维铣削仿真模型的建立及层间损伤分析[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(1): 22–29.

QIN Xuda, TANG Xinkai, GE Ende, et al. Establishment of 3D milling simulation model for CFRP and analysis of interlaminar damage[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(1): 22–29.

[14] YANG L, YAN Y, KUANG N H. Experimental and numerical investigation of aramid fibre reinforced laminates subjected to low velocity impact[J]. Polymer Testing, 2013, 32(7): 1163–1173.

[15] NING H F, ZHENG H L, ZHANG S

G, et al. Milling force prediction model development for CFRP multidirectional laminates and segmented specific cutting energy analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(9–10): 2437–2445.

[16] 王盛. 航空碳纤维复合材料高速铣削材料去除机理研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.

WANG Sheng. Study on material removal mechanism of aviation carbon fiber composites in high speed milling[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.

[17] 殷俊伟, 贾振元, 王福吉, 等. 基于 CFRP 切削过程仿真的面下损伤形成分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 58–64.

YIN Junwei, JIA Zhenyuan, WANG Fuji, et al. FEM simulation analysis of subsurface damage formation based on continuously cutting process of CFRP[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(17): 58–64.

Subsurface Damage Research of CFRP Multiple Milling Process Based on FEM Simulation

ZHENG Hualin, WANG Guixin, NING Haifeng, HU Zhiwei

(Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) are used in the field of aerospace due to their superior properties. At present, the researches on CFRP cutting mainly focus on single milling, but the multiple milling strategies are widely used in actual machining, the influence of multiple milling on subsurface damage cannot be ignored. In order to make up for this gap, VUMAT subroutine is used to establish three-dimensional Hashin failure criterion and CFRP multiple milling finite element model. The accuracy of the simulation model is verified by experiments. The model is used to analyze the variation of cutting force and surface damage with fiber direction angle (0° , 45° , 90° , 135°). The results show that the cutting force of the second milling is less than the first milling in the multiple milling strategies, and the cutting force follows the rule of $90^\circ > 135^\circ > 45^\circ > 0^\circ$. The subsurface damage is lower than that of single milling, and the damage factor increases with the increase of fiber direction angle. When the fiber direction angle is 0° , the damage factor is the smallest, and the fiber direction angle is 135° , the damage factor is the largest, the subsurface damage is the most serious.

Keywords: Carbon fiber reinforced polymers (CFRP); Multiple milling; Finite element simulation; Subsurface damage; Fiber direction angle

(责编 雷松)