

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.03.002

## CFRP 铣削力建模研究

万敏 李少恩 原恒 杜宇轩

(西北工业大学机电学院, 710072, 西安)

**摘要:** 碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer/plastic, CFRP)由于其不均匀性和各向异性的材料特性,在铣削加工过程中容易出现各种缺陷。铣削力建模有助于探究 CFRP 的铣削力变化规律、优化加工参数,进而减少缺陷的产生。本文基于多元非线性回归的方法,建立了铣削力系数关于 4 种影响因素(纤维切削角、瞬时未变形切屑厚度、主轴转速和轴向切深)的函数关系。经过单向 CFRP 铣削力实验和多向 CFRP 铣削力实验验证,所建模型可以较准确地预测铣削力变化规律。

**关键词:** 碳纤维复合材料;铣削力建模;纤维切削角;瞬时未变形切屑厚度;主轴转速;轴向切深

中图分类号: TG501.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2019)03-0272-09

## Cutting Force Modeling in Milling of CFRP

WAN Min, LI Shaoen, YUAN Heng, DU Yuxuan

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China)

**Abstract:** Carbon fiber reinforced polymer / plastic (CFRP) has the properties of anisotropy and inhomogeneity, which can easily lead to processing defects during milling of CFRP. Modeling of milling force is helpful to explore the changing law, optimize processing parameters, and then reduce the appearance of defects. Based on the nonlinear multiple regression method, the paper establishes the functional relationship between the milling force coefficient and the four influencing factors, i. e. the fiber cutting angle, the instantaneous uncut chip thickness, the spindle speed and the axial depth of cut. Results of unidirectional and multidirectional CFRP milling experiments show that the established model can accurately predict the variations of milling forces.

**Key words:** Carbon fiber reinforced polymer / plastic (CFRP); milling force modeling; fiber cutting angle; instantaneous uncut chip thickness; spindle speed; axial depth of cut

碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer/plastic, CFRP)是一种先进的结构材料,诞生于 20 世纪 60 年代<sup>[1]</sup>。CFRP 具有优于常规金属材料的许多性能优势,包括高比强度、高比模量、耐腐蚀和耐冲击等<sup>[2]</sup>,在航空航天、风力发电、体育休闲、船舶制造和车辆制造等多个领域得到了大量的应用。例如空客公司制造的世界最大的客机空客

A380,碳纤维复合材料占了其结构质量的 22%<sup>[3]</sup>。

CFRP 构件一般采用一次整体成型的制造工艺,在成型后,为了保证设计要求的制造精度和装配精度等,经常需要进行铣削加工等二次加工。CFRP 的铣削加工主要为轮廓铣削加工,例如飞机的碳纤维复合材料壁板和蒙皮等都要求很高的轮廓精度,需要大量的轮廓铣削加工<sup>[4]</sup>。CFRP 材料

**基金项目:** 国家自然科学基金(51675440)资助项目。

**收稿日期:** 2018-12-10; **修订日期:** 2019-3-19

**作者简介:** 万敏,男,教授,博士生导师,国家教育部新世纪优秀人才,陕西省青年科技新星,从事专业为航空宇航制造工程,研究方向为先进制造工艺中的基本力学问题。

**通信作者:** 万敏, E-mail: m.wan@nwpu.edu.cn。

**引用格式:** 万敏,李少恩,原恒,等. CFRP 铣削力建模研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 272-280. WAN Min, LI Shaoen, YUAN Heng, et al. Cutting Force Modeling in Milling of CFRP[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3): 272-280.

由材料特性差异巨大的增强相材料和基体材料混合而成,具有不均匀性和各向异性的材料特性。所以在铣削加工过程中,CFRP极易产生各类缺陷,如毛刺、材料分层等,严重影响加工表面质量和构件的力学性能。铣削力和铣削加工的稳定性、刀具的磨损速度、工件加工质量等有着密切的关系。铣削力预测模型的建立有助于优选工艺参数、优化刀具设计,从而提高加工稳定性和加工效率。因此,很多研究者针对CFRP的铣削力建模进行了深入的研究。

针对CFRP铣削过程,研究者通过实验探究了CFRP铣削过程中铣削力和进给速度、纤维方向和材料类型等的关系。Hocheng等<sup>[5]</sup>通过实验研究了铣削力、铣削质量和刀具磨损在不同切削条件下的变化规律。研究发现,和纤维方向平行时的切削力小于垂直于纤维方向的切削力。Inoue等<sup>[6]</sup>实验研究了不同种类的铣刀在铣削CFRP过程中的刀具寿命及加工质量,实验发现聚晶金刚石(Polycrystalline diamond,PCD)刀具比涂层刀具和高速钢刀具的寿命更长,加工质量更好。王志超等<sup>[7]</sup>研究了基体种类和纤维方向对铣削力的影响。通过对比实验,发现随着CFRP基体强度的提高,切削力也随之均匀上升。实验也发现纤维方向对铣削力的影响具有方向性,即顺纤维方向的切削力大于逆纤维方向。

工程实际中使用最多的是多向CFRP层合板,而多向CFRP层合板由单向CFRP铺层叠加而成。铺层顺序不同,多向CFRP层合板的力学性能不同,铣削加工中切削力也不同。多向CFRP铣削力建模方法可以分为考虑铺层方式和不考虑铺层方式两类。不考虑铺层方式的模型将多向CFRP视为匀质材料,直接采用金属材料铣削力经验模型建模方法。徐宏海等<sup>[8]</sup>以CFRP铣削过程中的平均最大铣削力为研究对象,借助多元线性回归分析建立了铣削力关于主轴转速及每齿进给量两个影响因素的经验公式。康永峰等<sup>[9]</sup>利用具有人字形正反螺旋结构的铣刀对CFRP进行了高速铣削实验研究,采用多元线性回归方法,建立了切削力和主轴转速、轴向切深和进给速度之间的函数关系。禹杰等<sup>[10]</sup>采用中心复合响应曲面法建立了多向CFRP铣削力和主轴转速、轴向切深及进给速度之间的函数关系,成功预测了铣削力。

不考虑铺层方式的多向CFRP建模方法不具有通用性,即一个模型适用于一种铺层方式的多向CFRP层合板,这导致一次实验所建立的铣削力预测模型无法扩展到其他铺层不同的CFRP层合板的铣削力建模。在工程实际中为了达到不同的力学性能,会设计不同的多向CFRP层合板的铺层顺

序,因此建立具有广泛适应性的多向CFRP层合板铣削力预测模型更有利于工程应用,这类模型称为考虑铺层方式的铣削力预测模型。考虑铺层方式的模型以单向CFRP铣削力建模为基础,首先建立单向CFRP层合板铣削力预测模型,再扩展至多向CFRP层合板铣削力预测模型,这种模型适用于任意铺层方式的CFRP层合板的铣削力建模。Sheikh-Ahmad等<sup>[11]</sup>对比了人工智能神经网络和多元回归模型在建立CFRP铣削力预测模型中的效果,发现两种方法都可以准确地预测铣削力,其中人工智能神经网络具有更好的非线性。两种模型考虑了纤维方向和切屑厚度对铣削力系数的影响,建立了铣削力系数的预测模型,进而预测单向CFRP和多向CFRP在直刃铣刀铣削过程中的铣削力。庆华楠等<sup>[12]</sup>将CFRP铣削过程中直齿铣刀的底刃切削作用考虑在铣削力建模中,以纤维切削角、瞬时未变形切屑厚度和切削速度为输入量,铣削力为输出量,建立了反向传播(Back propagation,BP)神经网络模型。经过实验验证,该模型相对于不考虑底刃切削的模型,预测结果更为精确。利用人工智能神经网络,Kalla等<sup>[13]</sup>基于金属切削力学建模方法建立了螺旋立铣刀铣削CFRP的铣削力预测模型。该模型通过人工智能神经网络建立了切削力系数和纤维方向及瞬时未变形切屑厚度之间的关系,并将切削力系数从直角切削转化为斜角切削来预测螺旋切削刃的铣削力。Karpal等<sup>[14]</sup>结合金属铣削力建模方法建立了单向CFRP和多向CFRP铣削力模型。为了简化公式,利用正弦函数建立了切削力系数和纤维切削角之间的函数关系。韩胜超等<sup>[15]</sup>通过先求解4种典型纤维方向( $45^\circ, 0^\circ, -45^\circ$ 和 $90^\circ$ )下的单向CFRP的切削力系数,再利用力学矢量叠加原理,获得多向CFRP铣削力系数,最终得到多向铺层CFRP的铣削力模型。

通过现有的研究可以发现,考虑铺层方式的CFRP铣削力建模方法具有更好的适应性和应用价值。所以可首先建立单向CFRP层合板的瞬时铣削力预测模型,再利用叠加原理得到多向CFRP层合板瞬时铣削力预测模型。单向CFRP层合板的瞬时铣削力建模时,针对切削力系数和影响因素之间的非线性关系,可以采用人工智能神经网络或多元回归的方法。然而,当前的研究多采用简化关系式<sup>[14]</sup>或者仅考虑部分影响因素<sup>[11-13]</sup>的方法来建立铣削力系数和影响因素之间的关系,缺少全面考虑影响因素的相关研究。当前研究考虑的影响因素主要包括纤维切削角、进给速度和主轴转速等,不够全面,没有考虑轴向切深的影响。轴向切深作为影响切削力的重要因

素,对切削力系数也有一定的影响,本文通过实验证实了这一现象的存在。所以本文建模思路为:以单向CFRP层合板瞬时铣削力预测模型为基础,建立多向CFRP层合板瞬时铣削力预测模型。首先将轴向切深对铣削力系数的影响考虑在内,综合考虑了纤维切削角、瞬时未变形切屑厚度、主轴转速和轴向切深对切削力系数的影响,利用多元回归的方法建立了单向CFRP切削力系数和影响因素之间的函数关系。然后再利用叠加原理建立多向CFRP铣削力预测模型。

## 1 CFRP 铣削实验与铣削力建模方法

### 1.1 实验设备及材料

铣削实验在数控加工中心GX710PLUS上进行,机床主要参数如表1所示。

表1 数控加工中心关键参数表

Tab. 1 Key parameters of NC machining center

最大主轴功 率/kW	最大主轴扭 矩/(N·m)	最大主轴转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	定位精 度/mm
7.5	47.7	10 000	0.01

实验用CFRP增强相材料为国产碳纤维T800,树脂类型为环氧树脂Ae531。CFRP层合板分为纤维铺层方向相同的单向CFRP层合板和纤维铺层方向不同的多向CFRP层合板。层合板每层预浸料厚度为0.15 mm,单向CFRP共40层,厚度为6 mm,工件尺寸为200 mm×170 mm×6 mm。多向板铺层方式为[45/135/90/45/0/45/0<sub>2</sub>/135/0<sub>3</sub>]<sub>3</sub>/45/0/135/[90/135/45/0<sub>3</sub>/135/0<sub>2</sub>/45/0/45]<sub>3</sub>,厚度为11.25 mm,工件尺寸为200 mm×35 mm×11.25 mm。

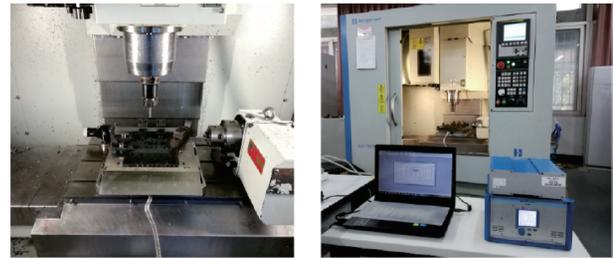
实验所用刀具为定制的双齿直槽PCD铣刀,刀具直径为8 mm,前角为0°,后角为10°,刀具如图1所示。相对于硬质合金刀具,PCD刀具具有耐磨性高、摩擦系数低(摩擦系数仅为硬质合金的0.25~0.75)和热膨胀系数小的特点<sup>[16]</sup>。



图1 PCD双齿直槽铣刀

Fig.1 PCD double-tooth straight groove milling cutter

测力装置为Kistler 9255B型测力仪(见图2(a)),测力仪测得的测量信号经过电荷放大器放大后传送到数据采集卡(见图2(b)),采集卡读取信号后将信息输入计算机中,整个测量过程如图3所示。



(a) Workpiece installation

(b) Measuring equipment

图2 实验测试装置

Fig.2 Experimental test setup

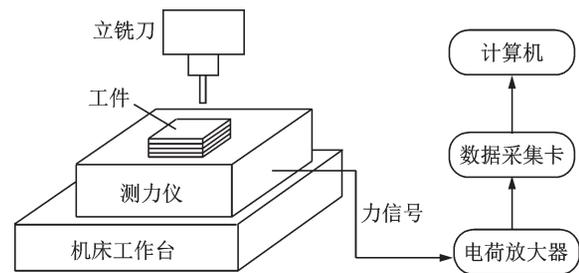


图3 铣削力测量过程示意图

Fig.3 Schematic view of milling force measurement process

### 1.2 铣削力预测模型建模方法

#### 1.2.1 纤维切削角定义

在单向CFRP铣削过程中,以铣刀进给方向为起始位置,逆时针转动至纤维平行方向,转过的夹角称为纤维方向角 $\lambda$ 。瞬时齿位角 $\phi$ 为刀齿从切入位置转动至任意位置时,转过的夹角。以刀齿切削速度方向为起始位置,逆时针转动至纤维平行方向,转动过的夹角称为纤维切削角 $\theta$ 。当纤维方向角为0°时,刀齿在切削过程中,各个位置处的纤维切削角 $\theta$ 和瞬时齿位角 $\phi$ 之间的对应关系如图4所示。对于任意纤维方向角 $\lambda$ ,纤维切削角 $\theta$ 都可以

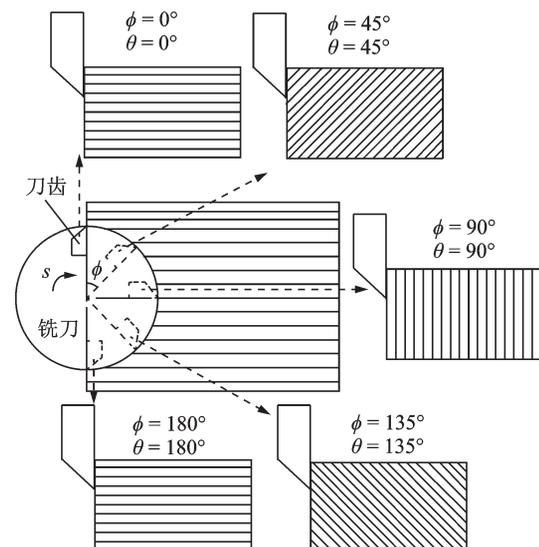


图4 纤维切削角和瞬时齿位角关系

Fig.4 Relationship between fiber cutting angle and instantaneous immersion angle

表示为

$$\theta = \begin{cases} \lambda + \phi & \lambda + \phi > 180^\circ \\ \lambda + \phi - 180^\circ & \lambda + \phi \geq 180^\circ \end{cases} \quad (1)$$

### 1.2.2 单向 CFRP 瞬时铣削力建模方法

由金属材料经典铣削力模型<sup>[17]</sup>可知,在双齿直槽铣刀铣削过程中,铣刀刀齿(编号  $j$ )始终只有一个刀齿与工件接触,所受瞬时轴向力为 0,瞬时径向力  $F_r$ 、瞬时切向力  $F_t$  如图 5 所示。对于一个刀齿,瞬时齿位角  $\phi$  满足  $\phi_{st} < \phi < \phi_{ex}$  时,该刀齿参与切削,瞬时铣削力可以表示为刀齿瞬时齿位角  $\phi$  的函数,即

$$\begin{cases} F_r = [K_{re}h(\phi) + K_{rc}]a_p \\ F_t = [K_{te}h(\phi) + K_{tc}]a_p \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $a_p$  为轴向切深。  $K_{tc}$  和  $K_{rc}$  分别为切向切削力系数和径向切削力系数。  $K_{te}$  和  $K_{re}$  分别为切向刃口力系数和径向刃口力系数。  $h(\phi) = f \sin \phi$ ,  $f$  为每齿进给速度。

瞬时径向力  $F_r$  和瞬时切向力  $F_t$  与  $F_x$  和  $F_y$  之间的关系如图 5 所示,可以表示为

$$\begin{cases} F_x = F_r \sin \phi + F_t \cos \phi \\ F_y = F_r \cos \phi - F_t \sin \phi \end{cases} \quad (3)$$

由于刃口力大小远远小于切削力,本文在计算中不考虑刃口力的影响,所以铣削力为

$$\begin{cases} F_r = K_r f a_p \sin \phi \\ F_t = K_t f a_p \sin \phi \end{cases} \quad (4)$$

式中  $K_r = K_{rc}$ ,  $K_t = K_{tc}$ 。

所以根据式(3),可以将实验测得的铣削力  $F_x$  和  $F_y$  转化为铣削力  $F_r$  和  $F_t$ 。根据式(4),通过实验测得的铣削力  $F_r$  和  $F_t$  可以求得铣削力系数

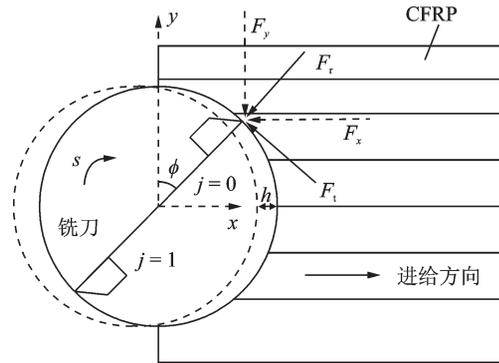


图 5 铣削力示意图

Fig.5 Schematic view of milling force

$K_r$  和  $K_t$ 。

单向 CFRP 材料的铣削力系数  $K_r$  和  $K_t$  受到瞬时未变形切屑厚度、主轴转速、轴向切深和纤维切削角等参数的影响,在铣削过程中随着刀具的转动而变化。基于实验确定出 CFRP 铣削力系数和影响因素的函数关系,可以求得铣削过程中的瞬时铣削力系数  $K_r$  和  $K_t$ 。将瞬时铣削力系数  $K_r$  和  $K_t$  代入式(4)可以计算得到瞬时铣削力  $F_r$  和  $F_t$ 。

### 1.3 单向 CFRP 铣削实验

单向 CFRP 铣削实验分为铣削力系数拟合公式未知参数标定实验和铣削力模型验证实验,实验材料为单向 CFRP 层合板,具体材料信息见 1.1 节。

#### 1.3.1 标定实验

影响铣削力的因素除了金属中常见的进给速度、轴向切深和主轴转速,还包括纤维方向角这一复合材料特有的影响因素,所以本文设计了 3 组单向 CFRP 铣削实验,来全面研究各个因素对瞬时铣削力的影响规律,实验安排如表 2 所示。

表 2 铣削实验参数

Tab. 2 Experimental parameters of milling

实验组号	主轴转速 $s/(r \cdot \min^{-1})$	轴向切深 $a_p/mm$	进给速度 $f/(mm \cdot \text{齿}^{-1})$	纤维方向角 $\lambda/(^\circ)$
1	4 000	2	0.02/0.03/0.04	0/45/90/135
2	2 000/4 000/6 000/8 000	2	0.02	0/45/90/135
3	4 000	1/2/3	0.02	0/45/90/135

第 1 组实验可以研究进给速度和纤维方向角对铣削力的影响规律,第 2 组和第 3 组实验分别探究了主轴转速和轴向切深对铣削力的影响。这 3 组实验综合探究了 4 种研究因素(进给速度、轴向切深、主轴转速和纤维方向角)对径向力和切向力的影响,实验结果作为拟合公式所用数据,可以反映出相关因素对切削力的影响规律。

#### 1.3.2 验证实验

改变实验参数,设计了单向 CFRP 铣削验证实验,对下文所建立的单向 CFRP 铣削力预测模型进

行验证。实验安排如表 3 所示。

### 1.4 多向 CFRP 铣削实验

多向 CFRP 铣削实验分为标定实验和验证实验。标定实验用于建立多向 CFRP 铣削力预测模型,验证实验用于验证所建立的多向 CFRP 铣削力预测模型的准确性。实验材料为纤维铺层方向不同的多向 CFRP 层合板,具体材料信息见 1.1 节。

#### 1.4.1 标定实验

标定实验的实验参数如表 4 所示。

表3 单向CFRP铣削力模型验证实验

Tab. 3 Verification experiments of unidirectional CFRP milling force model

实验序号	主轴转速 $s/(r \cdot \text{min}^{-1})$	轴向切深 $a_p/\text{mm}$	进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{齿}^{-1})$	纤维方向角 $\lambda/(\circ)$
1	4 500	2.0	0.025	0
2	5 000	2.5	0.025	120

表4 多向CFRP铣削实验

Tab. 4 Milling experiments of multidirectional CFRP

实验组号	主轴转速 $s/(r \cdot \text{min}^{-1})$	轴向切深 $a_p/\text{mm}$	进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{齿}^{-1})$
1	4 000	2.5	0.025
2	5 000	3.0	0.025

1.4.2 验证实验

改变轴向切深和进给速度,设计了多向CFRP铣削力预测模型验证实验,如表5所示。

表5 多向CFRP铣削力模型验证实验

Tab. 5 Verification experiments of multidirectional CFRP milling force model

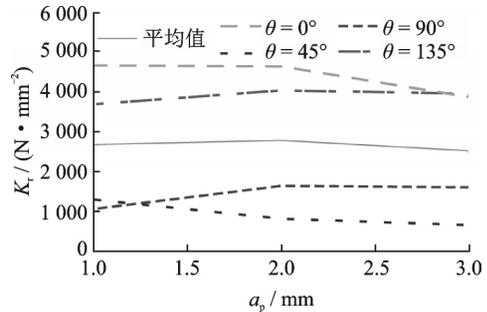
实验序号	主轴转速 $s/(r \cdot \text{min}^{-1})$	轴向切深 $a_p/\text{mm}$	进给速度 $f/(\text{mm} \cdot \text{齿}^{-1})$
1	4 000	2.0	0.02
2	5 000	3.5	0.03

2 基于实验的CFRP瞬时铣削力预测模型

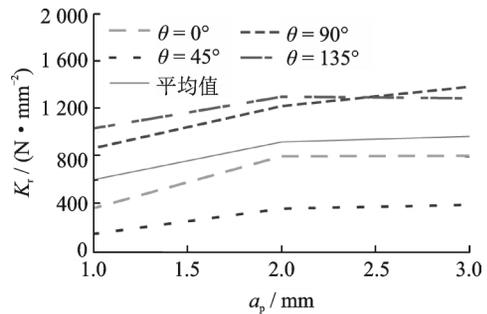
2.1 单向CFRP瞬时铣削力预测模型

在金属铣削力预测模型中,切削力系数会受到瞬时未变形切屑厚度、切削速度和刀具磨损的影响。为了减少刀具磨损对铣削力系数的影响,对实验所用刀具进行了预磨损,在磨损稳定后进行铣削实验。Sheikh-Ahmad<sup>[11]</sup>研究发现,除了上述因素外,对于纤维复合材料,纤维切削角也是影响切削力系数的重要因素。另外,本文还将轴向切深对切削力系数的影响考虑在模型中。实验发现轴向切深对切削力系数的影响规律如图6所示,可以看出在4种不同纤维切削角 $\theta$ ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 $135^\circ$ )下,当轴向切深小于2 mm时,切向切削力系数随着轴向切深的增加明显增加,平均值增加约1/3。综上所述,切削力系数预测模型的建立需要考虑的因素为纤维切削角、瞬时未变形切屑厚度、主轴转速和轴向切深。模型建立可以分为以下步骤:

(1) 将测力仪测得的切削力关于时间的图像导出,即得到各个瞬时齿位角下的瞬时切削力 $F_x$ 和 $F_y$ ,如图7所示,黑色点为周期起始点,一个周期内切削力图像即对应瞬时齿位角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间的单齿切削力图像。



(a) Effect of  $a_p$  on radial force coefficient



(b) Effect of  $a_p$  on tangential force coefficient

图6 轴向切深对铣削力系数影响

Fig.6 Effect of axial cutting depth on milling force coefficients

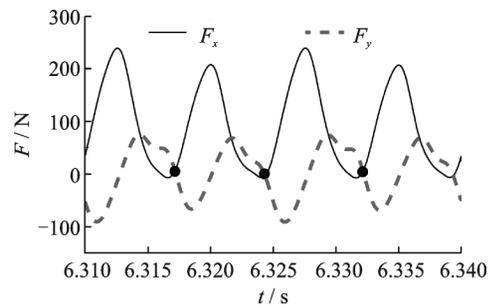


图7 铣削力 $F_x$ 和 $F_y$

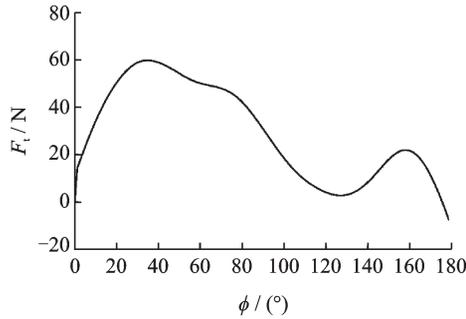
Fig.7 Milling forces  $F_x$  and  $F_y$

(2) 利用式(3)将瞬时切削力 $F_x$ 和 $F_y$ 转化为瞬时径向力 $F_r$ 和瞬时切向力 $F_t$ ,如图8所示。

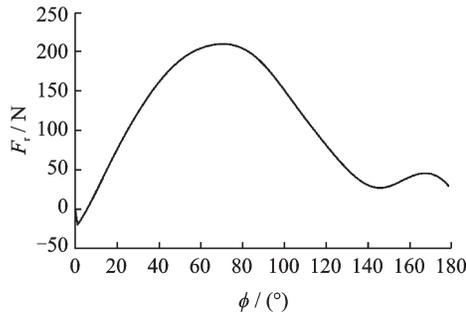
(3) 利用式(4)可以求出各个瞬时齿位角下对应的瞬时切削力系数 $K_r$ 和 $K_t$ 来作为拟合所用的数据。需要指出的是,每个求出的 $K_r$ 和 $K_t$ 都对应于4个影响因素在该时刻的瞬时值。

(4) 建立切削力系数拟合公式,求解公式中系数。

本文通过不断的实验建立了切削力系数关于纤维切削角 $\theta$ 、瞬时未变形切屑厚度 $h$ 、主轴转速 $s$ 和轴向切深 $a_p$ 的非线性回归模型,得到了拟



(a) Tangential force  $F_t$



(b) Radial force  $F_r$

图 8 铣削力  $F_r$  和  $F_t$

Fig.8 Milling forces  $F_r$  and  $F_t$

合函数为

$$K_q = e_q f(h) f(\theta) f(s) f(a_p) \quad q = t, r \quad (5)$$

式中:  $f(h) = \sum_{n=0}^5 a_{n,q} \cdot h^n$ ,  $f(\theta) = \sum_{n=0}^6 b_{n,q} \cdot \theta^n$ ,  $f(s) = c_{0,q} \cdot s^{c_{1,q}}$ ,  $f(a_p) = d_{0,q} \cdot a_p^{d_{1,q}}$

式中:  $q$  为  $t$  或  $r$ ,  $t$  代表切向,  $r$  代表径向。将式(5)代入式(4)便可以得到瞬时铣削力预测公式

$$F_q = K_q f a_p \sin \phi \quad q = t, r \quad (6)$$

通过多元非线性回归,得到了函数  $K_q$  的未知系数如表 6 和表 7 所示。

表 6 切向力预测模型标定结果

Tab. 6 Identification results of tangential force prediction model

$n$	$e_t$	$a_{n,t}$	$b_{n,t}$	$c_{n,t}$	$d_{n,t}$
0	0.005 0	0.000 5	142 014 640.869 6	5.010 9	5.021 5
1		-0.007 0	-1 487 181.014 9	-0.201 6	0.391 9
2		-3.456 6	-71 954.781 6		
3		268.945 9	2 407.724 0		
4		-7 212.166 3	-19.109 5		
5		65 906.048 4	0.045 6		
6			0.010 0		

表 7 径向力预测模型标定结果

Tab. 7 Identification results of radial force prediction model

$n$	$e_r$	$a_{n,r}$	$b_{n,r}$	$c_{n,r}$	$d_{n,r}$
0	0.002 2	5.204 9	306 175 537.142 0	0.218 1	0.218 1
1		65.027 4	-3 637 929.134 4	-0.390 7	-0.055 7
2		-22 638.272 9	-159 709.611 7		
3		863 348.699 7	3 938.972 0		
4		-8 017 159.559 9	-26.147 6		
5		-41 990 441.829 9	0.054 6		
6			0.100 0		

### 2.2 多向 CFRP 瞬时铣削力模型

根据叠加理论,多向 CFRP 的铣削力大小等于各单向铺层铣削力之和。由于多向 CFRP 各层力学性能的差异,层间结合强度和单向 CFRP 层间结合强度之间的差异等原因,实际铣削力和叠加得到的铣削力预测值存在差异,故引入了修正系数  $G_q$  进行修正。所以多向铺层 CFRP 瞬时铣削力  $F_{M,q}$  可以表示为

$$F_{M,q} = G_q (F_{\lambda_1,q} + F_{\lambda_2,q} + \dots + F_{\lambda_n,q}) \quad q = t, r \quad (7)$$

式中:  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  为组成多向 CFRP 的各个单向铺层的纤维方向角;  $F_{\lambda_n,q}$  为纤维方向角为  $\lambda_n$  时的单向 CFRP 的瞬时铣削力;  $G_q$  为修正系数;  $q$  表示  $t$  或  $r$ 。

所以在本实验中,铣削力  $F_{M,q}$  可以表示为

$$F_{M,q} = G_q (F_{0,q} + F_{45,q} + F_{90,q} + F_{135,q}) \quad q = t, r \quad (8)$$

根据多向 CFRP 铺层顺序,可得到不同轴向切深下参加切削的单向 CFRP 的种类和层数(不足一层厚度的取小数),如表 8 所示。

表 8 参与切削的各单向 CFRP 层数

Tab. 8 Number of unidirectional CFRP layers involved in cutting

轴向切深 $a_p$ /mm	$\lambda = 0^\circ$	$\lambda = 45^\circ$	$\lambda = 90^\circ$	$\lambda = 135^\circ$
2.5	5.7	6	2	3
3	8	7	2	3

根据统计情况,求出各纤维方向的轴向切深,代入式(5,6),计算出各纤维方向的单向 CFRP 的瞬时铣削力  $F_{\lambda_n,q}$ 。将计算出的各个瞬态的铣削力和实验值代入式(8),求出各个瞬态的修正系数

$G_{1,q}, G_{2,q}, \dots, G_{n,q}$  则修正系数  $G_q$  为

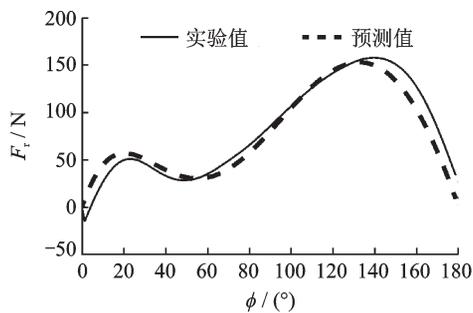
$$G_q = \frac{1}{n} (G_{1,q} + G_{2,q} + \dots + G_{n,q}) \quad q = t, r \quad (9)$$

经过计算,径向力修正系数  $G_r$  为 0.828 9,切向力修正系数  $G_t$  为 1.497 5。

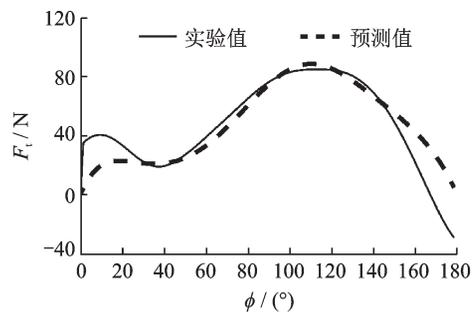
### 3 CFRP 瞬时铣削力预测模型实验验证

#### 3.1 单向 CFRP 铣削力预测模型实验验证

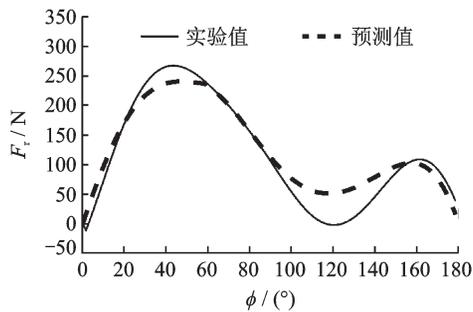
实验 1 的径向力和切向力数据分别见图 9(a, b)。实验 2 见图 9(c, d)。由图 9 可知,预测模型计算得到的铣削力变化曲线和实验得到的铣削力变化曲线的趋势吻合良好,经过式(10)计算,得到的 4 组平均误差(图 9(a—d))分别为 9.3, 8.5, 20.2 和 16.4 N, 误差较小,表明模型预测效果良好。



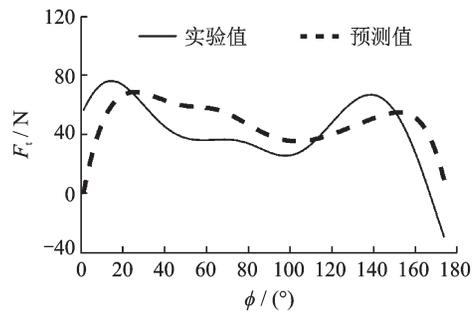
(a) Prediction results of radial force in experiment 1



(b) Prediction results of tangential force in experiment 1



(c) Prediction results of radial force in experiment 2



(d) Prediction results of tangential force in experiment 2

图9 单向CFRP铣削力预测模型验证结果

Fig.9 Verification results of unidirectional CFRP milling force prediction model

#### 3.2 多向 CFRP 铣削力预测模型实验验证

实验 1 的径向力和切向力数据分别见图 10(a, b)。实验 2 见图 10(c, d)。由图 10 可知,预测值变化趋势和实验值变化趋势吻合良好。通过式(10),同样计算出图 10(a—d)中预测值和实验值的平均误差分别为:8.0, 6.9, 21.5 和 17.0 N。误差值较小,说明所建立的多向 CFRP 铣削力预测模型具有良好的预测精度。误差存在的原因除 3.1 节所述原因外,采用叠加方法计算多向 CFRP 瞬时铣削力的方法本身为近似等效的方法,这也导致了误差的存在。

$$\bar{\varepsilon}_q = \frac{\sum_{i=1}^n |F_{m,q}^i - F_{e,q}^i|}{n} \quad q = t, r \quad (10)$$

式中  $\bar{\varepsilon}_q$  为铣削力的平均误差;  $n$  为测量数据点个数;  $F_{m,q}^i$  为测量值;  $F_{e,q}^i$  为预测值。

需要指出的是,预测模型中,瞬时齿位角为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时,由于瞬时未变形切屑厚度为 0,故铣削力大小为 0。然而实际实验中,由于毛刺、刀具形状偏差,材料对刀具的回弹挤压等原因,导致铣削力并不为 0,这是误差产生的原因之一。在铣削过程中,刀具可能从 CFRP 层合板的层间切削,也可能从层内切削,两者的切削系数很显然会有差异。另外,对测得的力信号进行滤波处理的方法可能导致部分信号特征丢失,从而导致误差产生。

## 4 结 论

(1) 本文综合考虑了瞬时未变形切屑厚度、主轴转速、轴向切深和纤维切削角 4 个因素对铣削力系数的影响,建立了基于多元非线性回归分析方法的碳纤维增强复合材料瞬时铣削力预测模型。通过实验验证,发现该模型可以较好地描述单向 CFRP 铣削力变化规律。

(2) 通过叠加理论,将单向 CFRP 铣削力模型成功推广至多向 CFRP 铣削力预测中,预测结果和实验结果吻合程度良好。根据加工参数,可以预测任意铺层的同种 CFRP 材料的瞬时铣削力。

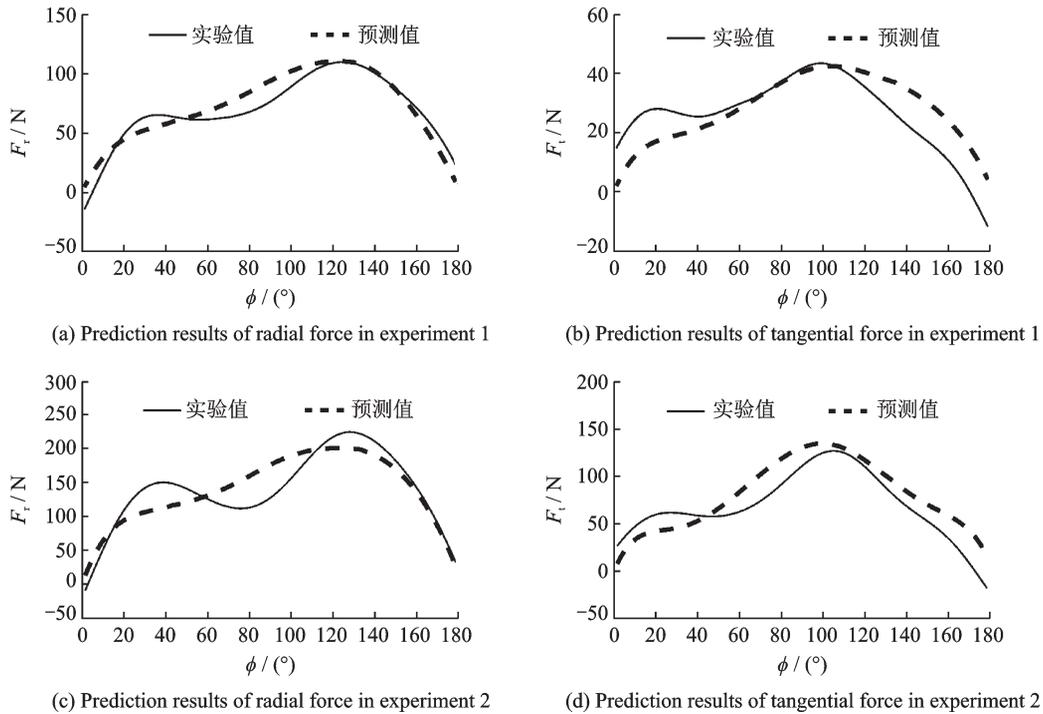


图 10 多向 CFRP 铣削力预测模型验证结果

Fig.10 Verification results of multidirectional CFRP milling force prediction model

(3)对于同种 CFRP 材料,本文通过直齿双刃铣刀建立的瞬时铣削力预测模型适用于直齿多刃铣刀瞬时铣削力的预测。其他种类 CFRP 材料,可参照本文方法建立相应铣削力预测模型。

参考文献:

[1] 李威,郭权锋.碳纤维复合材料在航天领域的应用[J].中国光学,2011,4(3):201-212.  
LI Wei, GUO Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 201-212.

[2] 龚佑宏,韩舒,杨霓虹,等.纤维方向对碳纤维复合材料加工性能的影响[J].航空制造技术,2013,443(23):137-140.  
GONG Youhong, HAN Shu, YANG Nihong, et al. Effect of fiber orientation on machining performance of carbon fiber-reinforced plastics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2013, 443(23): 137-140.

[3] 赵稼祥.碳纤维复合材料在民用航空上的应用[J].高科技纤维与应用,2003,28(3):1-4.  
ZHAO Jiexiang. Application of carbon composite materials for civil aviation [J]. High Technology Fiber and Application,2003, 28(3):1-4.

[4] 康永峰,陈树巍,袁士平,等.大型碳纤维复合材料壁板轮廓数控铣削工艺技术[J].航空制造技术,2013,435(15):70-73.  
KANG Yongfeng, CHEN Shuwei, YUAN Shiping, et al. NC milling technology for large carbon fiber composites panel contour[J]. Aeronautical Manufacturing

Technology, 2013, 435(15): 70-73.

[5] HOCHENG H, PUW H Y, HUANG Y. Preliminary study on milling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastics [J]. Composites Manufacturing, 1993, 4: 103-108.

[6] INOUE T, HAGINO M, MATSUI M, et al. Cutting characteristics of CFRP materials with end milling [J]. Key Engineering Materials, 2009, 407 / 408: 710-713.

[7] 王志超,林有希,林华.涂层刀具高速铣削碳纤维复合材料的铣削力研究[J].工具技术,2017,51(8):34-36.  
WANG Zhichao, LIN Youxi, LIN Hua. Study on milling force of coated cutting tool in high-speed milling CFRP[J]. Tool Engineering, 2017, 51(8): 34-36.

[8] 徐宏海,徐倩,刘东.碳纤维复合材料高速铣削实验研究[J].机械设计与制造,2009(12):167-169.  
XU Honghai, XU Qian, LIU Dong. Experimental study on the high speed milling of carbon fiber reinforced polymer [J]. Machinery Design and Manufacture, 2009(12): 167-169.

[9] 康永峰,王文理,王晓丽.碳纤维复合材料高速开槽铣削试验研究[J].航空制造技术,2010,440(22):82-85.  
KANG Yongfeng, WANG Wenli, WANG Xiaoli. Experimental study on high-speed groove-milling of CFRP [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 440(22): 82-85.

[10] 禹杰,林有希,林华.基于响应曲面法的CFRP高速铣削切削力试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学

- 版), 2017, 40(4): 438-442.
- YU Jie, LIN Youxi, LIN Hua. Experimental study of cutting force in high-speed milling of CFRP by response surface methodology [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2017, 40(4): 438-442.
- [11] SHEIKH-AHMAD J, TWOMEY J, KALLA D, et al. Multiple regression and committee neural network force prediction models in milling FRP [J]. Machining Science and Technology, 2007, 11: 391-412.
- [12] 庆华楠, 和延立, 张圣光, 等. 考虑刀具底刃切削的CFRP铣削力精确建模研究 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37(4): 560-567.
- QING Huanan, HE Yanli, ZHANG Shengguang, et al. Research on precise modeling of CFRP milling force considering bottom edge of tool [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(4): 560-567.
- [13] KALLA D, SHEIKH - AHMAD J, TWOMEY J. Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50: 882-891.
- [14] KARPAT Y, BAHTIYAR O, DEGER B. Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 56: 79-93.
- [15] 韩胜超, 陈燕, 徐九华, 等. 多齿铣刀侧铣加工多层CFRP铣削力的建模与仿真 [J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1375-1381.
- HAN Shengchao, CHEN Yan, XU Jiuhua, et al. Modeling and simulation of milling forces in side milling multi-layer CFRP with multi tooth cutter [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1375-1381.
- [16] 段春争, 李朋欣, 张方圆, 等. 不同材料刀具铣削CFRP磨损机理 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(10): 1-7.
- DUAN Chunzheng, LI Pengxin, ZHANG Fangyuan, et al. Wear mechanism of tools with different materials in milling CFRP [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(10): 1-7.
- [17] ALTINTAS Y. Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and cnc design [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

(编辑: 陈珺)