

纤维增强复合材料切削仿真 研究进展*

徐锦泐,密思佩,明伟伟,安庆龙,陈 明

(上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240)

[摘要] 纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)具有高比模量、高比强度、良好的抗腐蚀性和低热膨胀系数等优点,在航空航天和汽车领域获得了广泛的应用。由于FRP力学性能上的各向异性及组织上的非均质特性,使其成为一种典型难加工材料。为揭示FRP切屑去除机理及表面缺陷形成机制,近年来以离散元方法和有限元方法为主的仿真技术逐渐应用到该材料切削研究领域。本文总结了近年来国内外学者在FRP切削仿真领域的研究现状与进展,重点阐述了宏观机械模型、微观机械模型和微宏观机械模型有限元建模方法在FRP切削仿真中的应用,并指明了未来复合材料及其叠层结构切削仿真研究的重点与关注点。

关键词: 纤维增强复合材料;切削加工;离散元方法;有限元方法;数值仿真

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.22.016



徐锦泐

上海交通大学特别副研究员、博士生导师,主要从事复合材料精密切削加工、微细加工及切削有限元仿真等研究。主持参与了国家自然科学基金、国家科技重大专项、上海市浦江人才计划、上海航天科技创新基金等多项科研项目。发表期刊与会议论文50余篇,并担任多个国际学术期刊和国际学术会议的特约审稿人。

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)如碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)、玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)、凯夫拉纤维增强复合材料(Kevlar Fiber Reinforced Polymer, KFRP)等具有高比模量、高比强度、良好的抗腐蚀性和低热膨胀系数等优良性能^[1-2],广泛应用于航空航天和汽车制造领域。FRP主要由质软而黏性大的基体材料和高强度、高硬度的纤维增强材料混合而成,其物理力学性能主要受纤维体积含量、纤维铺层方式、纤维/基体材料类型等因素影响。

由于FRP具有硬度高、各向异性、层间剪切强度低等特性,在切削

过程中极易产生分层、毛刺、撕裂等缺陷^[3-5],进而直接影响零件的服役性能;同时,FRP切削时刀具磨损较快,寿命低,致使其加工效率低、生产成本高。在FRP切削加工性能方面,国内外学者已开展了大量试验研究工作。Koplev等^[6-7]最早通过正交试验方法研究了纤维增强复合材料的切屑去除机理并发现脆性断裂为纤维/基体主要去除模式。明伟伟等^[2]针对纤维增强复合材料难加工特性,从专用制孔刀具设计与开发方面进行了国内外研究现状综述。此外,许多试验研究^[8-11]还揭示了不同加工方式下(如正交切削、铣削、钻削等)纤维铺层角、切削参数及刀具几何结构对FRP切削力、表面损伤与加工质量的影响规律。单晨伟和吕晓波^[12]也从铣削和钻削两个方面总结了提高碳纤维增强复合材料加工质量的工艺方法。通过试验研究FRP切削过程无法揭示微细观尺度

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51705319);上海市浦江人才计划(A类)资助项目(17PJ1403800);上海航天科技创新基金重点项目(SAST2017-060)。

下复合材料切屑去除机理、纤维/基体破坏机制、应力场及切削热分布等信息,难以指导FRP高效精密加工专用刀具设计与工艺优化。近年来,随着计算机建模与仿真技术的发展,以离散元和有限元为首的数值仿真技术逐渐应用到FRP切削研究领域,为复合材料微细观切削、刀具拓扑几何结构设计及加工工艺参数优化等提供了新的研究手段。

纤维增强复合材料 切削加工性

与传统金属合金材料不同,纤维增强复合材料具有各向异性且不均质性,在加工过程中,其成屑机理与纤维/基体断裂损伤模式受纤维铺层角、纤维体积含量及刀具几何角度影响,切屑去除以压缩剪切、弯曲剪切、纤维/基体界面脱粘及纤维断裂为主^[13]。

FRP在实际应用过程中常以近净成型方式实现整体结构制造,但为满足零部件最终形状和尺寸要求,传统的机械加工方式如车削、铣削和钻削仍是不可避免的。由于FRP具有各向异性、非均匀性、层间结合强度低等特点,纤维/基体在切削过程中常会出现各种断裂损伤形式。此外,高硬度纤维的摩擦刻划作用易加剧刀具磨损和刃口钝化^[14-15],从而导致纤维切削质量下降,引发严重的表面缺陷。在车削加工中,许多研究表明进给量、切削深度、切削速度、刀具几何角度为影响FRP切削表面质量

的关键因素。Rajasekaran等^[16]应用模糊逻辑方法评估了CFRP车削表面质量情况,得出进给量、切削速度和切深对复合材料表面粗糙度有显著影响。Palanikumar^[17]认为高切削速度、大切深和低进给量能保证良好的加工表面质量。而Lee^[18]提出进给量的增加会增大表面粗糙度,但是切削速度和切深不会影响复合材料表面粗糙度等。在铣削加工中,复合材料主要缺陷类型包括毛刺、纤维拔出、表面微裂纹、脱粘及热损伤等,而影响铣削加工质量的因素主要有纤维铺层方向、刀具几何结构参数及加工工艺^[19]。在钻削加工中,孔进出口分层、纤维拔出、树脂剥落、微裂纹、基体烧伤等为FRP常见损伤形式^[20-21]。

纤维增强复合材料 切削仿真研究

目前,以离散元和有限元为首的数值仿真技术逐渐应用到FRP切削机理与工艺改进研究中。表1总结了近年来有限元仿真技术在FRP切削加工中的应用情况。

1 离散元方法 (DEM)

离散元方法(Discrete Element Method, DEM)最早由Cundall和Strack于20世纪70年代提出并应用于岩石力学和土力学的研究^[46]。DEM的基本思想是把不连续体分离为刚性元素的集合,使各个刚性元素满足运动方程,并用时步迭代方法求解各刚性元素的运动方程,继而求得

不连续体的整体运动形态。离散元方法允许单元间有相对运动,不需满足位移连续和变形协调条件,故计算速度快,所需存储空间小,尤其适合求解大位移和非线性的问题^[47]。近年来,许多研究者已采用离散元方法与其他数值分析方法相结合的手段来探究一些复杂工程应用问题,如Ismail等^[48]将离散元法应用于单向铺层纤维增强复合材料横向拉伸时的微观失效机理研究。

Iliescu等^[49]首次将离散元法应用到碳纤维增强复合材料正交切削仿真研究中。作者在建模时运用微机械颗粒相互作用定律来定义材料属性,并通过设定颗粒几何物理参数及颗粒排布方向建立了不同铺层碳纤维增强复合材料模型。仿真选取无涂层刀具进行正交切削研究,通过牛顿定律和集成算法获得颗粒的速度、加速度与位置信息。仿真结果表明^[49]:当纤维角为0°时,纤维断裂分离主要由压缩、弯曲与分层等模式所主导,如图1(a)所示;当纤维角为45°时(如图1(b)所示),随着刀具进给,已加工表面纤维易发生回弹进而对刀具后刀面产生严重的刮擦作用,加剧后刀面的磨粒磨损。当纤维角为90°时,纤维受压缩与弯曲应力作用,易产生分层损伤(如图1(c)所示);而当纤维角为-45°时,纤维断裂主要由刀具挤压弯曲所引起,刀具磨损较小,但复合材料易发生纤维拔出、基体压裂等缺陷,故已加工表面质量较差。此外,文献[49]

表1 有限元仿真技术在FRP切削加工中的应用

Table 1 Application of finite element simulation technology in FRP cutting process

加工方式	材料	参考文献
正交切削	FRP	Arola 和 Ramulu ^[22] ; Venu Gopala Rao 等 ^[23] ; Mkaddem 等 ^[24-25] ; Santiuste 等 ^[26] ; Lasri 等 ^[27] ; He 等 ^[28]
	CFRP 或 CFRP/Ti	路冬等 ^[29] ; 秦旭达等 ^[30] ; Calzada 等 ^[31] ; Wang 等 ^[32] ; Abena 等 ^[33] ; Cheng 等 ^[34] ; Wang 等 ^[35] ; Xu 和 EL Mansori ^[36-37]
	GFRP	Nayak 等 ^[38] ; Venu Gopala Rao 等 ^[39]
钻削	FRP	Rakesh 等 ^[40] ; Isbilir 和 Ghassemieh ^[41] ; Phadnis 等 ^[42] ; Feito 等 ^[43] ; 金晓波等 ^[44]
铣削	CFRP	Rentsch 等 ^[45]

还表明离散元仿真所得切削力值在纤维角为 90° 和 -45° 时要比试验结果高,但是切削力和切深抗力随时间变化的整体趋势与试验测量结果基本保持一致。

2 有限元方法 (FEM)

目前,复合材料有限元实体建模方法主要包括3类:即宏观机械模型(Macro-Mechanical Model)^[22, 28-30, 32, 38]、微观机械模型(Micro-Mechanical Model)^[23, 31-32, 34]和微宏观机械模型(Micro-Macro Mechanical Model)^[24, 39, 45]。其中宏观机械模型将复合材料假设为等效均质材料(Equivalent Homogeneous Material, EHM)进行有限元仿真。微观机械模型适用于研究材料微观去除机理,可用于揭示纤维/基体损伤与表面缺陷等形成机制。而应用微观与宏观模型相结合的方法即微宏观模型可研究纤维铺层方向对FRP切削力、切屑形成、纤维损伤程度、基体损伤与脱粘的影响作用。建模时将切削区材料设定为微观模型而将远离切削区材料简化为EHM模型,可获得较好的仿真预测结果并极大地降低了仿真运算成本。目前复合材料切削有限元仿

真常用失效准则主要包括最大应力准则、Tsai-Hill破坏准则、Hashin损伤准则和Hoffman损伤准则等,如表2所示。

截至当前,国内外学者在纤维增强复合材料切削有限元仿真方面已开展了大量的研究工作,并取得了阶段性的研究成果。早在20世纪90年代Arola和Ramulu^[22]即已开展了针对FRP正交切削的有限元分析研究。随后Nayak等^[38]针对单向铺层GFRP正交切削进行了有限元仿真研究。作者运用宏观机械模型将GFRP定义为等效均质材料,并通过销盘试验确定了不同纤维铺层复合材料与刀具之间的摩擦系数。仿真所获结果与Arola和Ramulu^[22]的研究结论相一致。然而,由于EHM模型无法准确描述复合材料内部实际结构特征而导致切深抗力预测值与试验结果偏差较大,如图2所示^[38]。此外,He等^[28]应用宏观机械模型分别模拟了Hashin准则和最大应力准则下FRP三维损伤现象,仿真结果与传统二维模型^[22, 38]所获结果相一致:即复合材料亚表面损伤随着纤维铺层角的增大而呈增大趋势;但

由于宏观机械模型的局限性,在较大纤维角的情况下仿真结果与试验值之间存在显著差异。

Nayak等^[38]较早地提出了基于GFRP微观建模的方法并应用于复合材料切削仿真研究。复合材料微观建模时需分别考虑纤维和基体的不同特性并各个建模(如图3所示^[38]),仿真所获结果明显优于宏观机械模型,其预测的切削力与切深抗力值基本与试验结果相吻合,并可揭示不同纤维角下GFRP切屑形态。Mkaddem和El Mansori^[25]在Nayak等^[38]所建模型基础上采用自适应网格技术来开展GFRP切削仿真研究,其仿真结果比Nayak等^[38]所获结果更接近试验值。Cheng等^[34]应用微观机械建模方法建立了单向铺层CFRP正交切削力热耦合模型,在微观尺度范围内揭示了CFRP切削变形与切削力变化规律,取得了与试验相一致的观察结果,但是微观建模方法对CPU性能要求极高,仿真效率较低。由此可见:微观机械模型在FRP建模时需要建立多个纤维增强体和基体,故能较客观地模拟和预测纤维/基体在切削力作用下的挤压、

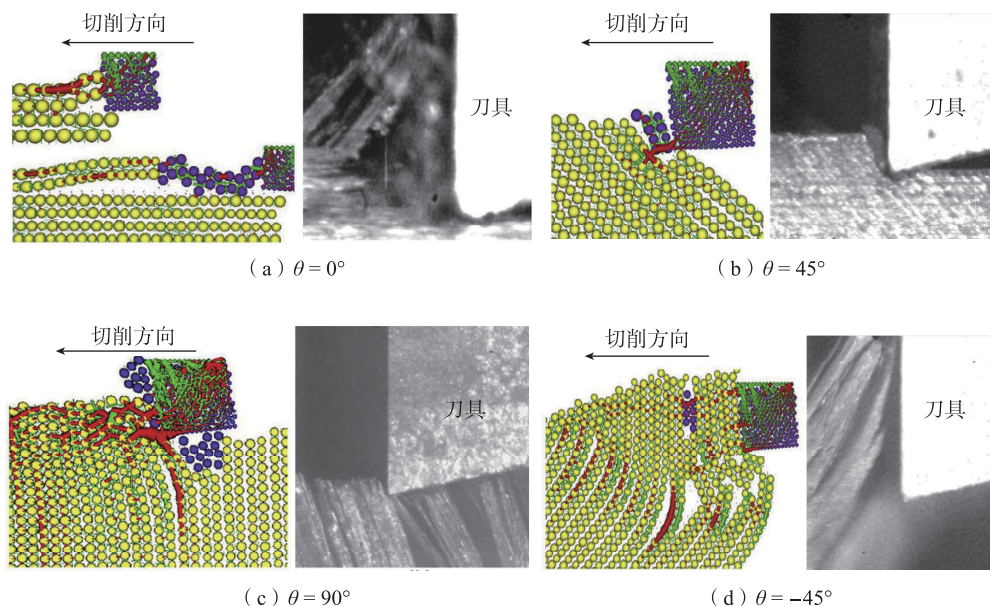


图1 正交切削不同纤维铺层角CFRP时切屑去除过程

Fig.1 Chip formation during orthogonal cutting of CFRP composites with different fiber orientations

表2 FRP切削仿真常用失效准则
Table 2 Common failure criteria for FRP cutting simulation

失效准则	判别式	国内外文献应用情况	
最大应力准则	$ \sigma_{ij} \geq \sigma_{ij(crit)} $	Arola 和 Ramulu ^[22] ; Venu Gopala Rao 等 ^[23, 39] ; Lasri 等 ^[27] ; He 等 ^[28] ; Usui 等 ^[50]	
Tsai-Hill 破坏准则	$\left[\frac{\sigma_{11}}{X}\right]^2 - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \left[\frac{\sigma_{22}}{Y}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{12}}{S}\right]^2 \geq 1$	Arola 和 Ramulu ^[22] ; Mkaddem 等 ^[24-25] ; Nayak 等 ^[38]	
Hashin 损伤准则	纤维拉伸失效 ($\sigma_{11} > 0$)	$D_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_L}\right)^2$	Santiuste 等 ^[26] ; Lasri 等 ^[27] ; He 等 ^[28] ; 路冬等 ^[29] ; 秦旭达等 ^[30] ; Wang 等 ^[35] ; Xu 和 El Mansori ^[36-37] ; Rakesh 等 ^[40] ; Phadnis 等 ^[42] ; Feito 等 ^[43] ; 金晓波等 ^[44] ; Rentsch 等 ^[45]
	纤维压缩失效 ($\sigma_{11} < 0$)	$D_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_C}\right)^2$	
	基体拉伸失效 ($\sigma_{22} > 0$)	$D_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_L}\right)^2$	
	基体压缩失效 ($\sigma_{22} < 0$)	$D_{mc} = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_L}\right)^2$	
Hoffman 损伤准则	$e_{Hoffman} = -\frac{\sigma_{11}^2}{X_T X_C} + \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X_T X_C} - \frac{\sigma_{22}^2}{Y_T Y_C} + \frac{X_T + X_C}{X_T X_C \sigma_{11}} + \frac{Y_T + Y_C}{Y_T Y_C \sigma_{22}} + \frac{\sigma_{12}^2}{S_C^2}$	Lasri 等 ^[27]	

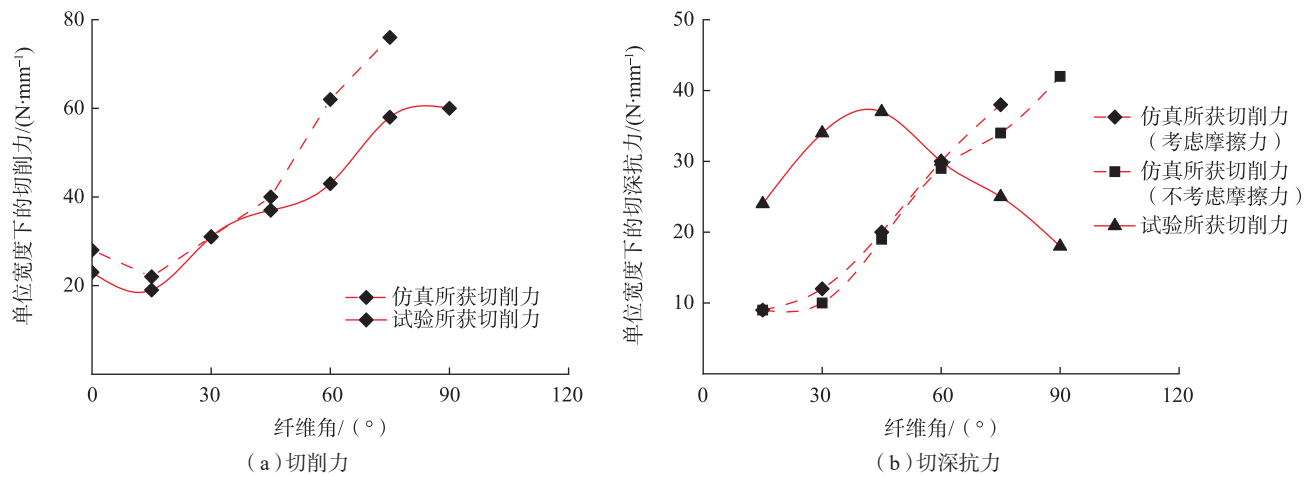


图2 试验数值与仿真数值的对比 (前角=10°; 切深=0.2mm)

Fig.2 Comparison of experimental and simulated force values

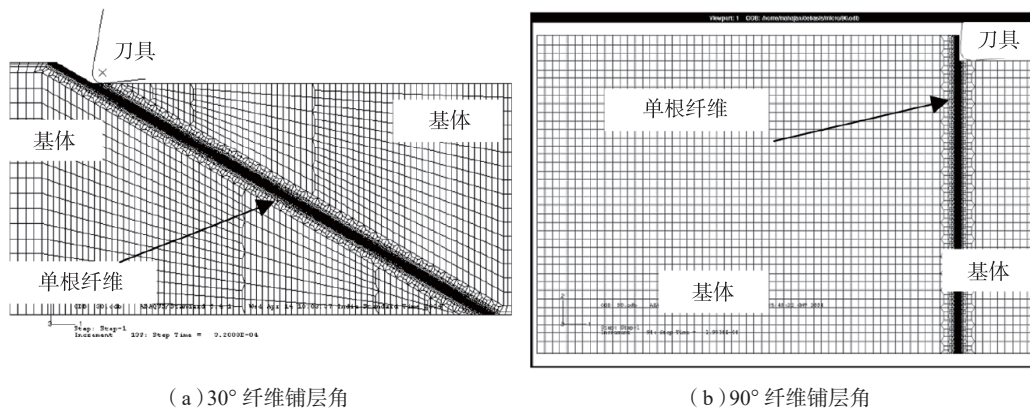


图3 单根纤维和周围基体的有限元网格划分

Fig.3 Finite element mesh of a single fiber with surrounding matrix

弯曲、剪切与断裂等模式,如图4所示^[31]。相比之下,宏观机械模型将被加工材料定义为等效均质材料,故可有效提高有限元运算速率且能对已加工表面缺陷进行有效预测。例如,路冬等^[29]的研究发现应用宏观模型和Hashin失效准则能够较好地揭示纤维增强复合材料切削过程中基体损伤演化、基体破坏及次表层损伤机制。秦旭达^[30]等的研究同样表明宏观机械模型和Hashin失效准则的准确使用能够揭示CFRP已加工表面力损伤行为。

结合微观和宏观机械模型的优势,Venu Gopala Rao等^[39]建立了GFRP正交切削微宏观有限元模型。建模时分别建立两层纤维模型和三层基体模型并用内聚力模型(Cohesive Zone Model, CZM)连接,同时将其余材料简化为等效均质材料,如图5所示^[39]。仿真过程中将纤维假设为弹性材料并定义其失效服从最大应力准则而将基体定义为弹塑性材料并服从von Mises屈服准则。通过仿真可获得不同纤维铺层角、切深及刀具前角条件下纤维失效与基体损伤演化过程,并可预测纤维失效、基体损伤与界面脱粘的位置。Mkaddem等^[24]建立了基于Tsai-Hill失效准则的GFRP微宏观有限元模型,结果表明:仿真所获切削力和切深抗力数值比Nayak等^[38]微观模型下所获结果更接近试验值,如图6所示^[24]。与此同时,Rentsch等^[45]建立了基于Hashin失效准则的CFRP微宏观有限元模型,获得了与实际相符的材料去除过程。综上所述:宏观机械模型有限元运算时间较短,但是不能准确描述复合材料纤维/基体界面特性,仿真过程中切深抗力与试验值严重不符;相比之下,微观机械模型通过单独建立纤维和基体模型故能较好地预测复合材料切削机理,但是有限元运算时间较长;而微宏观模型

则综合了宏观与微观机械模型的优点,为FRP有限元切削仿真研究提供了一个比较折中的解决方案。

当前,国内外学者在FRP切削仿真方面的研究已由二维正交切削仿真拓展到三维切削仿真。Feito等^[43]应用简化三维模型和完整三维模型分别研究了CFRP钻孔分层现象。参照Phadnis等^[42]的模型参数,两种模型均约束钻头Z向(轴向)运动,并仅在直径为16mm的

区域设置为Z向自由,进而允许分层损伤的发生。简化模型仅设置钻头进给运动,而完整模型同时设置钻头的旋转与进给运动。完整模型的仿真过程如图7所示^[43]。对比两种仿真方法,简化模型的计算量小,但是仿真结果不如完整模型更接近试验值。

综合来看,当前FRP切削仿真研究热点仍主要集中在切屑去除机理、切削力及因力而造成的损伤预测

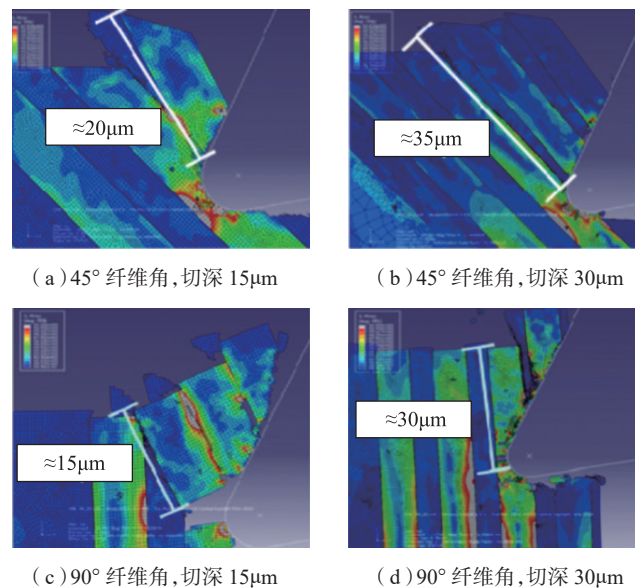
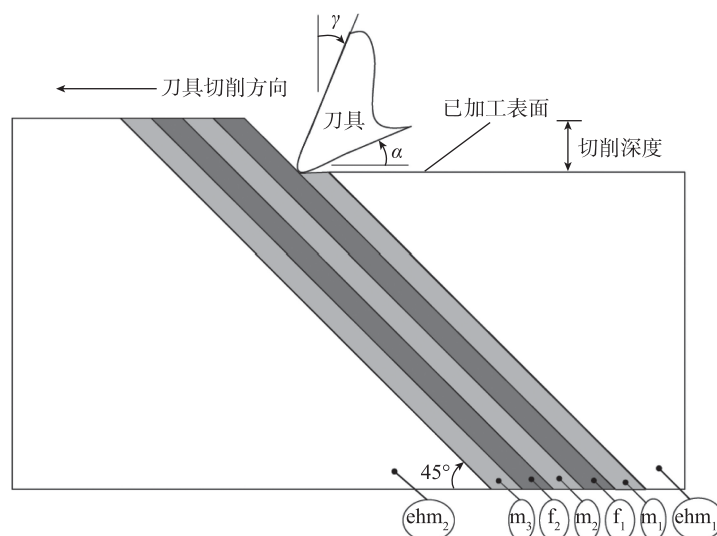


图4 基于微观机械模型的单向铺层CFRP正交切削模型

Fig.4 Micro-mechanical models for orthogonal cutting of unidirectional CFRP laminates



注: f—纤维; m—基体; ehm—等效均质材料。

图5 基于45°纤维铺层角的纤维、基体及等效均质材料的有限元模型

Fig.5 Finite element model incorporating fibers, matrix and EHM domains for case of a 45° FRP

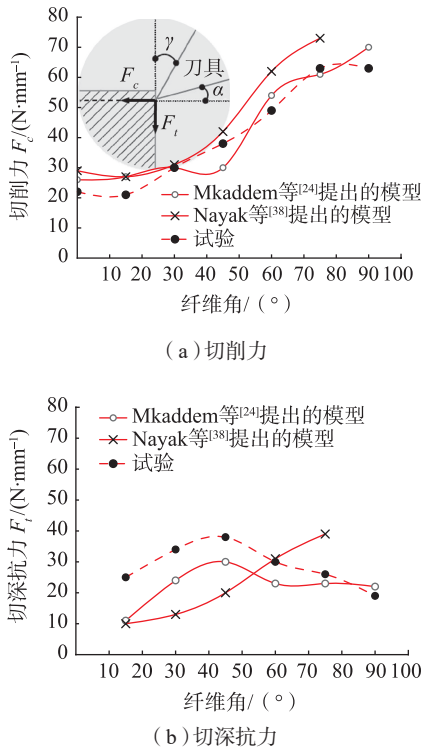


图6 试验测量和仿真预测 (前角 $\gamma=10^\circ$, 切深 $a_p=0.2\text{mm}$)
Fig.6 Measured and predicted values

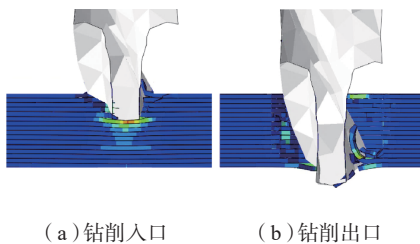


图7 完整模型的CFRP钻削过程仿真
Fig.7 CFRP drilling process simulated using the complete model

方面,对于复合材料热传递、切削温度场分布、热损伤及玻璃化转变等微观热现象的研究偏少。

复合材料叠层结构切削有限元仿真

在现代航空工业中,纤维增强复合材料除单独使用外,还常与金属合金(如钛合金、铝合金等)组成叠层结构,在减轻重量的同时利用材料的不同特点获得更优异的综合力学性能。叠层结构仿真需要综合考

虑复合材料、金属合金及界面层的本构建模及失效准则选取。对于各向同性的金属合金材料常用 Johnson-Cook (JC) 模型或改进的 JC 模型进行本构描述,而对于复合材料-金属合金界面则常用内聚力模型来预测叠层界面区域的撕裂与分层。金晓波等^[44]采用钛合金、碳纤维增强复合材料分开建模的方式研究了切削参数对叠层结构钻孔轴向力和加工质量的影响。Xu 和 El Mansori^[36-37]通过分别定义碳纤维增强复合材料层、钛合金层及界面层本构模型,并应用牵引力分离线弹性准则、线性软化准则及 Benzeggagh-Kenane (BK) 损伤准则来描述叠层界面切削响应特性。仿真研究了不同切削顺序下 CFRP/Ti 切屑去除机理、切削力、表面损伤随切削参数的变化规律,取得了一定精度的预测结果,并揭示了切削顺序对叠层结构加工质量的影响规律以及高速、低进给量参数有利于叠层结构切削质量的提高。然而,以上研究却未考虑复合材料及叠层界面热传递行为以及切削热对复合材料、叠层界面性能与表面损伤的影响作用。这是因为叠层结构 CFRP/Ti 切削过程涉及复杂的两相材料力热传递与力热耦合影响效应。例如在由钛合金钻向复合材料过程中,当刀具切至叠层界面时,因钻削钛合金而产生的高温高热极易烧伤界面及复合材料层基体,引起复合材料的玻璃化转变。传统的内聚力模型和基于应力损伤的复合材料失效准则虽可较好地模拟叠层界面分层现象,但是却不能预测界面及复合材料层因切削热而造成的损伤行为。

结论

纤维增强复合材料因其优异的物理力学性能在航空航天和汽车领域获得了广泛的应用,同时其各向异性的结构特性也给切削加工带来了巨大的挑战。本文总结了近年来国

内外学者在 FRP 切削仿真领域的研究现状与进展,可得结论如下:

(1) 以离散元和有限元为首的数值仿真技术可实现 FRP 切削过程仿真及切屑去除机理的研究,切削力与表面损伤的预测,并可取得较好的仿真预测精度。

(2) 当前针对 FRP 的有限元建模方法主要包括宏观、微观及微宏观机械模型三种,且微宏观模型能够同时兼顾有限元计算效率及仿真预测精度。此外,现有的 FRP 切削仿真研究仍主要集中在切屑去除机理、切削力及因力而造成的损伤预测方面,对于复合材料切削热传递及热损伤行为的研究偏少。

(3) 针对航空航天领域新出现的复合材料/合金叠层结构,传统的基于应力损伤的复合材料准则已不适用于叠层结构切削仿真研究。为此,研究者亟需对传统的基于应力损伤的复合材料本构模型进行改进,建立新的考虑复合材料纤维-基体各向异性传热特性的力热耦合损伤模型以更好地预测复合材料/合金叠层结构切削过程中的热损伤现象,此为未来 FRP 切削仿真研究的重要方向之一。

参考文献

[1] 陈明, 安庆龙, 明伟伟, 译. 复合材料制孔技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
CHEN Ming, AN Qinglong, MING Weiwei, Trans. Drilling of composite materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
[2] 明伟伟, 王昌赢, 魏莹莹, 等. 纤维增强复合材料制孔刀具技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2013, 56(14): 34-37.
MING Weiwei, WANG Changying, WEI Yingying, et al. Research progress of hole-making cutting tool on fiber reinforced plastic[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(14): 34-37.
[3] TETI R. Machining of composite materials[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(2): 611-634.
[4] LIU D, TANG Y, CONG W L. A review of mechanical drilling for composite

- laminates[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(4): 1265–1279.
- [5] BEN SOUSSIA A, MKADDEM A, EL MANSORI M. Rigorous treatment of dry cutting of FRP – interface consumption concept: A review[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 83: 1–29.
- [6] KOPLEV A, BUNSELL A. Cutting of CFRP with single edge tools[C]//3rd International Conference of Advances in Composite Materials, 1980: 1597–1605.
- [7] KOPLEV A, LYSTRUP A, VORM T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP[J]. *Composites*, 1983, 14(4): 371–376.
- [8] WANG X M, ZHANG L C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(10): 1015–1022.
- [9] VOß R, HENERICHS M, RUPP S, et al. Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibre[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2016, 12: 56–66.
- [10] HINTZE W, HARTMANN D, SCHÜTTE C. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) – An experimental study[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(15): 1719–1726.
- [11] HOCHENG H, TSAO C C. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(12–13): 1403–1416.
- [12] 单晨伟, 吕晓波. 碳纤维增强复合材料铣削和钻孔技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(15): 34–41.
- SHAN Chenwei, LÜ Xiaobo. Research progress of milling and drilling on carbon fiber reinforced plastic[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(15): 34–41.
- [13] GORDON S, HILLERY M T. A review of the cutting of composite materials[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L – Journal of Materials Design and Applications*, 2003, 217(1): 35–45.
- [14] WANG X, KWON P Y, SCHROCK D, et al. Friction coefficient and sliding wear of AlTiN coating under various lubrication conditions[J]. *Wear*, 2013, 304(1–2): 67–76.
- [15] WANG X, KWON P Y, STURTEVANT C, et al. Tool wear of coated drills in drilling CFRP[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, 15(1): 127–135.
- [16] RAJASEKARAN T, PALANIKUMAR K, VINAYAGAM B K. Application of fuzzy logic for modeling surface roughness in turning CFRP composites using CBN tool[J]. *Production Engineering*, 2011, 5(2): 191–199.
- [17] PALANIKUMAR K. Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fiber reinforced plastics by PCD tooling[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 36(1–2): 19–27.
- [18] LEE E S. Precision machining of glass fibre reinforced plastics with respect to tool characteristics[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17(11): 791–798.
- [19] 王昌赢, 文亮, 明伟伟, 等. 碳纤维增强复合材料铣削加工技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(14): 76–80.
- WANG Changying, WEN Liang, MING Weiwei, et al. Research progress in milling of carbon fiber reinforced polymer[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(14): 76–80.
- [20] CHE D, SAXENA I, HAN P, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: A literature review[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering – Transactions of the ASME*, 2014, 136(3): 034001.
- [21] XU J, LI C, MI S, et al. Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 1076–1087.
- [22] AROLA D, RAMULU M. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: A finite element analysis[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1997, 39(5): 597–613.
- [23] VENU GOPALA RAO G, MAHAJAN P, BHATNAGAR N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites – Cutting force analysis[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(3–4): 579–593.
- [24] MKADDEM A, DEMIRCI I, EL MANSORI M. A micro-macro combined approach using FEM for modelling of machining of FRP composites: Cutting forces analysis[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(15–16): 3123–3127.
- [25] MKADDEM A, EL MANSORI M. Finite element analysis when machining UGF-reinforced PMCs plates: Formation, crack propagation and induced-damage[J]. *Materials and Design*, 2009, 30(8): 3295–3302.
- [26] SANTIUSTE C, MIGUÉLEZ H, SOLDANI X. Out-of-plane failure mechanisms in LFRP composite cutting[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(11): 2706–2713.
- [27] LASRI L, NOUARI M, EL MANSORI M. Modelling of chip separation in machining unidirectional FRP composites by stiffness degradation concept[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(5): 684–692.
- [28] HE Y L, DAVIM J P, XUE H Q. 3D progressive damage based macro-mechanical FE simulation of machining unidirectional FRP composite[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 31(1): 51.
- [29] 路冬, 李志凯, 融亦鸣, 等. 基于宏观各向异性碳纤维增强树脂基复合材料的切削仿真[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3): 584–590.
- LU Dong, LI Zhikai, RONG Yiming, et al. Cutting simulation of carbon fiber reinforced resin matrix composite materials based on macroscopic anisotropy[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 584–590.
- [30] 秦旭达, 李永行, 王斌, 等. CFRP纤维方向对切削过程影响规律的仿真研究[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(3): 472–476.
- QIN Xuda, LI Yonghang, WANG Bin, et al. Simulation of effect of fiber direction on cutting process of CFRP[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2016, 35(3): 472–476.
- [31] CALZADA K A, KAPOOR S G, DEVOR R E, et al. Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced polymer composites[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(2): 141–149.
- [32] WANG F, WANG X, YANG R, et al. Research on the carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) cutting mechanism using macroscopic and microscopic numerical simulations[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, 36(8): 555–562.
- [33] ABENA A, SOO S L, ESSA K. Modelling the orthogonal cutting of UD-CFRP composites: Development of a novel cohesive zone model[J]. *Composite Structures*, 2017,

168: 65–83.

[34] CHENG H, GAO J, KAFKA O L, et al. A micro-scale cutting model for UD CFRP composites with thermo-mechanical coupling[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 153: 18–31.

[35] WANG D, HE X, XU Z, 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*, 2017, 10(2): 204.

[36] XU J, EL MANSORI M. Numerical modeling of stacked composite CFRP/Ti machining under different cutting sequence strategies[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2016, 17(1): 99–107.

[37] XU J, EL MANSORI M. Numerical studies of frictional responses when cutting hybrid CFRP/Ti composite[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(1): 657–675.

[38] NAYAK D, BHATNAGAR N, MAHAJAN P. Machining studies of UD-FRP composites part 2: Finite element analysis[J]. *Machining Science and Technology*, 2005, 9(4): 503–528.

[39] VENU GOPALA RAO G, MAHAJAN P, BHATNAGAR N. Machining of UD-GFRP composites chip formation

mechanism[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(11): 2271–2281.

[40] RAKESH P K, SHARMA V, SINGH I, et al. Delamination in fiber reinforced plastics: A finite element approach[J]. *Engineering*, 2011, 3(5): 549–554.

[41] 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: 126–133.

[42] PHADNIS V A, MAKHDUM F, ROY A, et al. Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation[J]. *Composites Part A – Applied Science and Manufacturing*, 2013, 47(1): 41–51.

[43] FEITO N, LÓPEZ-PUENTE J, SANTIUSTE C, et al. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling[J]. *Composite Structures*, 2014, 108(1): 677–683.

[44] 金晓波, 康万军, 曹军, 等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层板钻孔有限元仿真研究[J]. *工具技术*, 2015, 49(1): 24–28.

JIN Xiaobo, KANG Wanjun, CAO Jun, et al. Finite element analysis of drilling of carbon fiber reinforced plastics and titanium stack[J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(1): 24–28.

[45] RENTSCH R, PECAT O, BRINKSMEIER E. Macro and micro process modeling of the cutting of carbon fiber

reinforced plastics using FEM[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 1823–1828.

[46] 徐泳, 孙其诚, 张凌, 等. 颗粒离散元法研究进展 [J]. *力学进展*, 2003, 33(2): 251–260.

XU Yong, SUN Qicheng, ZHANG Ling, et al. Research progress of particle discrete element[J]. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(2): 251–260.

[47] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法研究的评述 [J]. *力学进展*, 2003, 33(4): 483–490.

LIU Kaixin, GAO Lingtian. A review of the study of discrete element method[J]. *Advances in Mechanics*, 2003, 33(4): 483–490.

[48] ISMAIL Y, SHENG Y, YANG D, et al. Discrete element modelling of unidirectional fibre-reinforced polymers under transverse tension[J]. *Composites Part B – Engineering*, 2015, 73: 118–125.

[49] ILIESCU D, GEHIN D, IORDANOFF I, et al. A discrete element method for the simulation of CFRP cutting[J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(1): 73–80.

[50] USUI S, WADELL J, MARUSICH T. Finite element modeling of carbon fiber composite orthogonal cutting and drilling[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 14(14): 211–216.

通讯作者: 徐锦洪, E-mail: xujinyang@sjtu.edu.cn。

Research Advances in Cutting Modeling of Fiber Reinforced Polymer Composites

XU Jinyang, MI Sipei, MING Weiwei, AN Qinglong, CHEN Ming

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] Fiber reinforced polymer (FRP) composites are characterized by superior mechanical/physical properties including high specific modulus, high specific strength, good corrosion resistance, low thermal expansion coefficient, etc., which enable them to be widely used in the aerospace and automotive fields. However, the inherent anisotropy in properties and heterogeneity in architectures lead the FRP composites to fall into the category of typical difficult-to-cut materials. To reveal the mechanisms dominating the chip separation and defect formation of FRPs, simulation techniques such as discrete element method and finite element method have been gradually applied to the research field of machining these composite materials in recent years. The present paper summarizes the state-of-the-art advances achieved by both domestic and foreign scholars in the field of cutting modeling of FRP composites. A particular focus is put on the illustrations of the use of finite element methods including the macro-mechanical model, micro-mechanical model and micro-macro mechanical model in the cutting simulation of FRP composites. Several new perspectives concerning the future research significance and focus of cutting modeling of FRP composites and their related multilayer stacks are put forward.

Keywords: Fiber reinforced polymer; Cutting process; Discrete element method; Finite element method; Numerical simulation

(责任编辑 铃兰)