

CFRP 钻削有限元仿真研究现状与展望

葛恩德¹,唐文亮²,陈磊¹,李汝鹏¹,陈燕²

(1. 上海飞机制造有限公司 航空制造技术研究所,上海 201324;

2. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:有限元仿真技术已成为研究 CFRP 制孔缺陷形成机理的重要手段。阐述了 CFRP 钻削过程中的主要加工缺陷;介绍了目前 CFRP 钻削常用的有限元仿真方法,并基于此构建了材料本构模型;综述了有限元仿真技术在研究 CFRP 宏观钻削和细观材料失效方面的应用和发展;分析了复合材料有限元仿真研究存在的不足,并对 CFRP 钻削仿真技术的发展进行了展望。

关键词:CFRP;有限元分析;切削机理;钻削;现状;展望

中图分类号:V261 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2019)05-0080-05

Present Situation and Prospect of CFRP Drilling Finite Element Simulation

GE Ende¹, TANG Wenliang², CHEN Lei¹, LI Rupeng¹, CHEN Yan²

(1. Institute of Aeronautical Manufacturing Technology, Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:The finite element simulation technology becomes an important way to study the formation mechanism of CFRP hole defects. This paper expounds the main machining defects appearing in the process of CFRP drilling, introduces the current finite element simulation methods commonly used in CFRP drilling, and based on the material model of this construction, summarizes the application and development of the finite element simulation technology in the study of the CFRP macro drilling and the failure surface of the meso material, makes the complex analysis, discusses the shortcomings of the finite element simulation of composite materials and looks forward to the future development of CFRP drilling simulation technology.

Keywords:CFRP; finite element analysis; cutting mechanism; drilling; present situation; prospect

0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料具有比模量高、比强度高、耐腐蚀性好、热膨胀系数低、结构设计灵活等诸多优良的性能,因此被广泛应用于航空航天、汽车、体育、医疗、建筑等领域^[1-2]。在飞机结构方面,CFRP 需要通过数以万计的螺栓孔与其他材料进行装配使用。钻孔通常作为材料加工中的最后一道工序,在所有材料成型加工中可以占到 50%。制孔质量的好坏直接影响部件之间的装配精度。据统计,实际应用中 60% 的 CFRP 零件报废是由于制孔质量不合格引起的^[3]。

CFRP 在结构上的特殊组成,使得其材料去除机理十分复杂,高质量制孔技术一直是制约其高效精密加工的一个关键因素^[4-5]。因此,随着航空制造业对装配质量要求的逐步提高,如何针对 CFRP 的特性,获得良好的加工质量一直是航空制造人员必须面对的一大技术难题,同时也迫切需要对 CFRP 制孔技术展开更深入的研究。CFRP 制孔缺陷主要有出口分层、入口撕裂(分层)、孔径误差、孔壁

毛刺、热损伤等问题^[6],如图 1 所示,其中出入口分层被认为是导致部件报废的主要缺陷。

广泛的工艺实验必须以大量的人力物力投入为基础,但研究结果只能反映规律性的影响,而无法充分解释材料缺陷形成机理的缺点,并且复合材料结构的多样性以及钻削本身复杂的半封闭式加工方式,给复合材料钻削机理的分析带来了诸多的困难。因此,需要寻求新的方法来研究 CFRP 的缺陷形成机理。近年来,有限元仿真技术已经在复合材料加工方面获得了广泛的应用,成为研究 CFRP 制孔缺陷形成机理的重要手段。

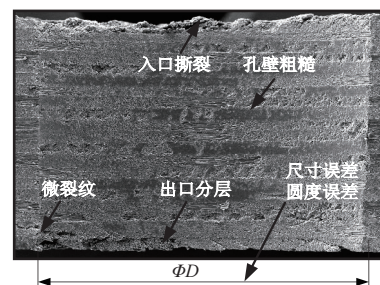


图 1 CFRP 主要制孔缺陷

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2014CB046504);国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金(2017-36732)

作者简介:葛恩德(1982—),男,上海人,博士后,研究方向为航空材料加工与装配技术。

1 CFRP 钻削仿真模型

切削加工过程有限元仿真技术最初在金属切削领域得到了广泛的应用,常用于研究金属切削过程中弹塑性大变形问题、加工参数对于切屑形态及材料去除机理问题以及刀具和工件的应力场与温度场分布。基于金属切削仿真技术,国内外学者对复合材料加工过程中的切削力、材料去除机理和加工缺陷的有限元仿真进行了广泛研究。但是,CFRP 钻削加工的特点对有限元仿真的建立提出了较高的要求,包括:1)相比各向同性的金属材料而言,CFRP 多相各向异性的特点使得本构模型难以准确建立;2)钻头相比车刀结构复杂,增加了计算收敛的难度;3)钻削加工的材料去除机理复杂。

目前在众多的有限元分析软件中,Abaqus 在复合材料仿真分析中应用最广^[7]。根据研究目标和侧重点的不同,CFRP 钻削有限元仿真分析主要有宏观建模和细观建模方法两种。Pecat 等^[8]建立了二维情形下,宏观切削 CFRP 模型和细观多相切削模型,基于宏观切削模型预测了切削力,基于细观多相切削模型研究了材料去除过程中基体和纤维的微观失效形式,部分仿真结果如图 2 所示。

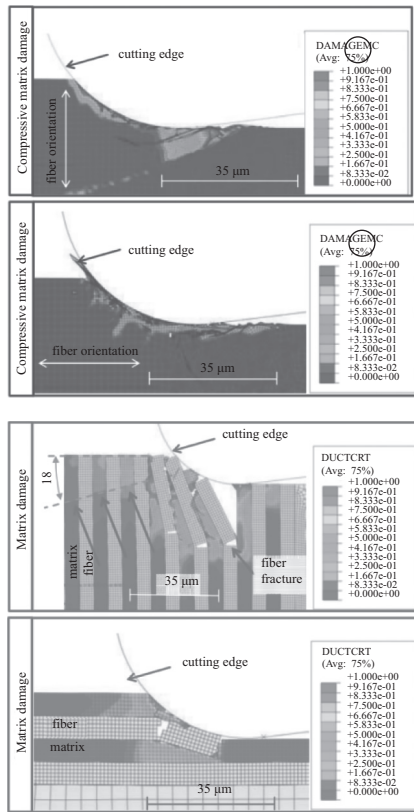


图 2 宏观模型和细观模型下的有限元仿真结果

需要指出的是,为了得到较为准确的仿真结果,需要建立精确的材料本构模型。本构模型描述了材料在外载荷作用下产生变形甚至失效时的应力应变关系,体现了材料产生弹性变形、塑性变形以及最终破坏的力学特征。采用不同的建模方法,主要涉及到不同的材料本构模型的建立。

1.1 CFRP 钻削宏观建模

研究制孔缺陷宏观表征、预测钻削力和制孔缺陷之间的影响,一般采用宏观建模的方法。宏观模型即从宏观上建立整个钻头和工件模型,通过有限元后处理能够输出一些宏观物理量。尽管这种建模方法可以反映材料的各向异性,但材料在组成上的差别难以体现在模型中。

宏观有限元分析模型中,复合材料最初被视为均质各向异性材料。在该种建模方式下,复合材料被作为整体,本构只反映材料的宏观材料属性,忽略组成特点,从而研究切削力特征。正交各向异性材料有 3 个相互正交的弹性对称面,具有 9 个独立的弹性常数。宏观材料本构中材料失效准则主要采用 Hashin 失效准则,该准则包含 4 种不同的损伤模式:纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸和基体压缩失效。

1.2 CFRP 钻削细观建模

研究制孔缺陷形成过程中纤维相、基体相以及界面相的具体失效形式一般采用细观建模的方法。钻头的主切削刃切削和副切削刃切削可以分别看作是斜角切削过程和直角切削过程。因此,将复杂的钻削材料去除过程简化为直角切削和斜角切削,是一种研究钻削机理相对简单的方法并被广泛应用于制孔缺陷形成机理的分析^[9-13]。细观模型能够体现材料的多相结构,并且一般建模尺度小,约 1 000 μm 左右。因此从细观的角度建立完整的钻削模型将会导致后期网格单元数量过多,并带来极大的计算量。为了减少计算量,细观有限元模型的建立一般以直角切削模型和斜角切削模型为主。

2 CFRP 钻削仿真分析研究现状

2.1 宏观有限元仿真研究

在宏观尺度上,对复杂钻削过程整体仿真建模已经有学者作了许多尝试。Phadnis 等^[14]利用用户材料子程序分别定义 Hashin 纤维失效准则和 Puck 基体失效准则,同时运用粘结界单元定义界面材料,建立了宏观钻削 CFRP 有限元仿真模型(图 3)。该模型能够实现对入口损伤的形状和尺寸的预测。对比了不同进给速度下的入口损伤,表明进给量越大入口损伤越严重。此外,探究了通过 CFRP 的仿真模型对比普通钻削和振动钻削 2 种加工方式,结果表明,随着转速提高,振动钻削减小轴向力的效果越明显^[15]。

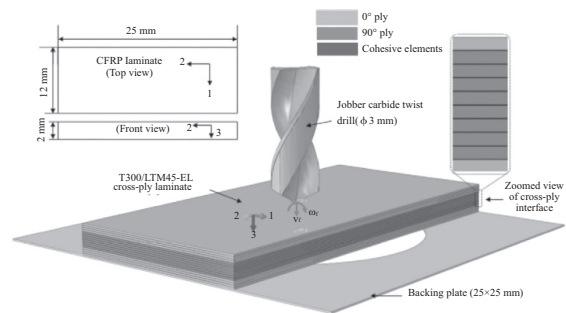


图 3 宏观钻削 CFRP 示意图

Isbilir 等^[16-17] 基于复合材料的宏观 Hashin 失效准则建立了钻削 CFRP 三维有限元模型(图 4)。该模型能够较准确地预测出入口分层区域,同时仿真研究了阶梯钻几何形状对入口损伤的影响,得出直径比较大的阶梯钻可以降低轴向力、转矩,减少入口损伤区域的结论,选择直径合适的阶梯钻可以控制分层缺陷,其研究成果对通过有限元方法优化刀具形状有一定的指导意义。

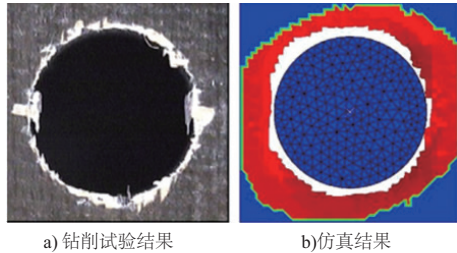


图 4 宏观钻削仿真入口分层对比

Feito 等^[18] 分别建立了钻头挤压 CFRP 简化模型(不考虑钻头旋转运动)和钻削 CFRP 复杂模型(图 5),考虑到仿真计算成本,通过挤压简化模型研究了材料铺层方式、钻削轴向力和工件下表面支撑等因素对入口分层损伤的影响,并从入口分层、钻削轴向力、钻削转矩 3 个方面验证了仿真模型的正确性。结果表明:随着钻削轴向力增大,入口分层呈现先增大后稳定的趋势。当钻削轴向力增大至 250 N 后,入口分层损伤变化保持稳定,受轴向力的影响较小。

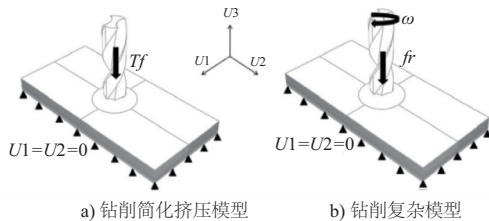


图 5 CFRP 模型

2.2 细观有限元仿真研究

纤维铺层的方向性是影响 CFRP 制孔缺陷的主要因素之一,为了统一表征切削不同铺层方向纤维时的切削行为,许多学者将切削速度和纤维铺层方向相结合定义了纤维切削角,如图 6 所示^[19]。在不同的纤维切削角位置进行切削,所需要的切削比能不同,切削力和加工质量也有显著差异^[20]。

为了研究纤维和基体在损伤形成过程中的微观失效,许多学者通过细观建模的方法分析不同纤维切削角度下的材料去除过程和失效形式。Rao 等^[21-22] 将切削过程假定为平面应变状态和准静态过程,建立了二维细观切削模型,分析了不同纤维铺层方向时纤维的失效破坏形式。二维模型在一定程度上反映材料去除机理,但同时也放弃了工件及刀具部分几何信息,无法分析三维情形下基体、纤维的失效以及切屑的形成。为了揭示 CFRP 切削加工过程中材料的细观破坏,齐振超等^[23-24] 建立了三维细观切削模型,研究了各种纤维切削角下的切削机理,阐述了不同纤维切削角切削后表面粗糙度不同的根本原因。Wang 等^[25] 建立了包含纤维相、基体相、界面等效均质相组成的

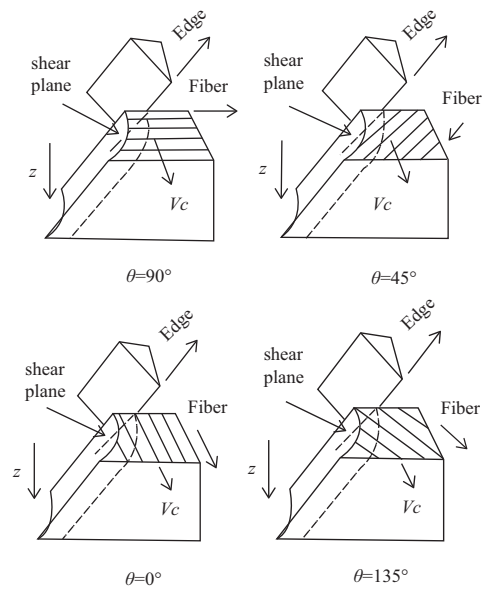


图 6 纤维切削角的定义

CFRP 细观有限元模型,将纤维看作是正交各向异性材料,基体作为各向同性弹性材料,界面采用粘结单元模拟界面的开裂,研究了不同纤维切削角下细观破坏机理。

Cheng 等^[26] 建立了 CFRP 细观热力耦合模型,该模型考虑了基体、正交各向异性纤维、界面相,分析了切削单向 CFRP 时不同纤维角度下各相材料的失效变形和应力分布特征。为了研究铣削 CFRP 时的缺陷形成和切削力变化规律,Gao 等^[27] 利用类似的 CFRP 三维细观直角切削热力耦合模型,如图 7 所示,研究了 4 种典型纤维切削角下切屑形成机理,分析了不同切削参数下表面质量的差异,并与实际的表面轮廓变化进行了对比。

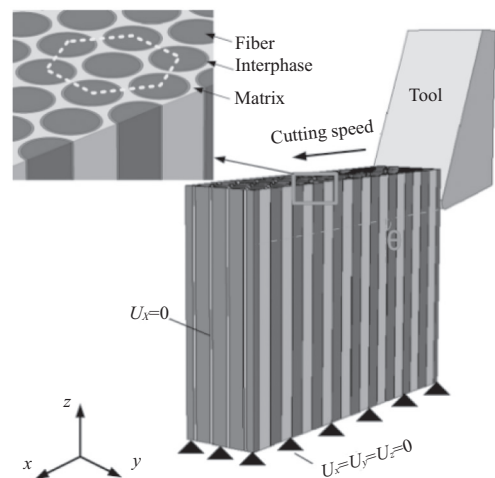


图 7 细观多相切削模型

Xu 等^[28-29] 针对超声切削加工进行了仿真和实验研究,建立了单向 CFRP 的三维多相直角切削模型。经研究发现,椭圆振动切削的特殊运动形式可以使纤维的断裂更加局部化,能够减少亚表面损伤的产生,获得更好的表面加工质量。Calzada 等^[30] 建立了二维三相细观切削模型(图 8),以界面相基于正应力和切应力共同作用下的失效形式定义损伤萌生及演化,对比了不同纤维切削角下单位

切削力的变化以及不同切深下的切屑形成过程,得出大前角、小钝圆的刀具可以减小 45° 纤维切削的切削力和 135° 纤维切削的亚表面损伤的结论。

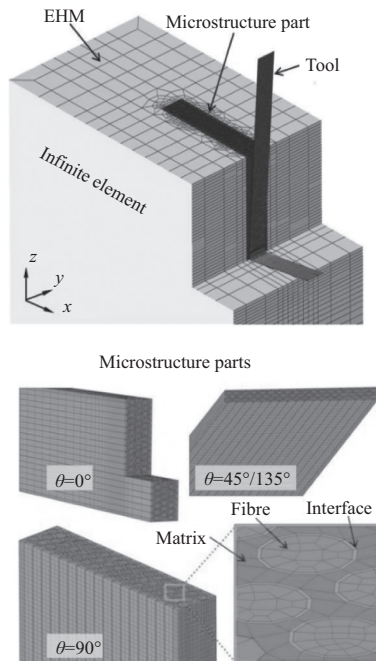


图8 椭圆振动切削中的细观多相切削模型

Abena 等^[31-32]针对 CFRP 界面相进行了深入研究,运用零厚度粘结单元、小厚度粘结单元和粘结面接触 3 种不同的粘结单元建模方法对纤维和基体之间的界面相进行建模,提出了一种新的界面相建模方法,解决了网格畸变、接触分析困难等问题。

3 复合材料有限元仿真技术展望

综上所述,考虑到 CFRP 材料复杂的内部结构和力学性能,目前建立的几何与损伤模型仍有待进一步完善,尤其是 CFRP 钻削加工的仿真模型。宏观钻削建模能够模拟宏观的钻削过程,但是无法反映材料细观缺陷的形成。细观模型作为简化的钻削模型,为研究钻削 CFRP 时材料的微观失效机理提供了更为简单的方法。然而,由于仿真计算效率和成本问题,三维细观多相仿真模型的尺度依然有限,这也制约了有限元仿真的精度。此外,兼顾材料组成特征以及钻削过程,将细观建模与宏观建模相结合的仿真建模也因计算量的限制无法得到广泛应用。随着计算机运算能力的提高以及参数化精确建模技术的发展,减少建模的假设条件,最大程度贴近“真实”,建立有限元分析模型,提高模拟结果的准确性是未来有限元仿真分析的一个必然趋势。

参考文献:

[1] Dandekar C R, Shin Y C. Modeling of machining of composite materials: A review[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, 57(2):102-121.

[2] Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(2):143-151.

[3] Santiuste C, Olmedo A, Soldani X, et al. Delamination prediction in orthogonal machining of carbon long fiber-reinforced poly-

mer composites[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2012, 31(31):875-885.

- [4] Che D, Saxena I, Han P, et al. Machining of carbon fiber reinforced Plastics/Polymers: A literature Review [J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2014, 136(3): 34-36.
- [5] 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.
- [6] 王志超,林有希,林华.碳纤维复合材料孔加工缺陷的研究进展[J].机械制造与自动化,2018,47(1):7-9.
- [7] Wang G D, Melly S K. Three-dimensional finite element modeling of drilling CFRP composites using Abaqus/CAE: a review [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1/2/3/4):599-614.
- [8] Pecat O, Rentsch R, Garbrecht M, et al. Modeling and simulation of the machining of unidirectional CFRP[J]. Advanced Materials Research, 2014, 907:55-62.
- [9] 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(7):1823-1828.
- [10] Luo B, Li Y, Zhang K, et al. A novel prediction model for thrust force and torque in drilling interface region of CFRP/Ti stacks [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9/10/11/12):1497-1508.
- [11] Lazar M B, Xirouchakis P. Mechanical load distribution along the main cutting edges in drilling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(2):245-260.
- [12] Naisson P, Rech J, Paris H. Analytical modeling of thrust force and torque in drilling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(10):1430-1441.
- [13] Turki Y, Habak M, Velasco R, et al. Highlighting cutting mechanisms encountered in carbon/epoxy composite drilling using orthogonal cutting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92: 685-697.
- [14] Phadnis V A, Makhadmeh F, Roy A, et al. Drilling in carbon/epoxy composites: Experimental investigations and finite element implementation [J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2013, 47(1):41-51.
- [15] Phadnis V A, Makhadmeh F, Roy A, et al. Experimental and numerical investigations in conventional and ultrasonically assisted drilling of CFRP laminate [J]. Procedia CIRP, 2012, 1(7): 455-459.
- [16] Isbilir O, Ghassemieh E. Finite element analysis of drilling of carbon fibre reinforced composites[J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(3/4):637-656.
- [17] 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.
- [18] Feito N, López-Puente J, Santiuste C, et al. Numerical prediction of delamination in CFRP drilling[J]. Composite Structures, 2014, 108(1):677-683.
- [19] An Q, Ming W, Cai X, et al. Study on the cutting mechanics characteristics of high-strength UD-CFRP laminates based on orthogonal cutting method [J]. Composite Structures, 2015, 131:374-383.

- [20] Bonnet C, Poulachon G, Rech J, et al. CFRP drilling: Fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 2015, 94:57-64.
- [21] Rao G V G, Mahajan P, Bhatnagar N. Micro-mechanical modeling of machining of FRP composites—Cutting force analysis[J]. *Composites Science & Technology*, 2007, 67(3/4):579-593.
- [22] Rao G V G, Mahajan P, Bhatnagar N. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism[J]. *Composites Science & Technology*, 2007, 67(11/12):2271-2281.
- [23] 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.
- [24] 齐振超. CFRP/金属叠层结构钻削力建模与分层控制方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2015.
- [25] 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 & Composites*, 2017, 36(8):555-562.
- [26] 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 & Technology*, 2017, 153(14):18-31.
- [27] Gao C, Xiao J, Xu J, et al. Factor analysis of machining parameters of fiber-reinforced polymer composites based on finite element simulation with experimental investigation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(5/6/7/8):1113-1125.
- [28] Xu W, Zhang L, Wu Y. Effect of tool vibration on chip formation and cutting forces in the machining of fiber-reinforced polymer composites[J]. *Machining Science & Technology*, 2016, 20(2):312-329.
- [29] Xu, W, Zhang L. A finite element analysis of fibre fracture in a polymer composite during vibration-assisted cutting[C]. 8th Australasian Congress on Applied Mechanics, 2014:1013-1020.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Abena A, Soo S L, Essa K. A finite element simulation for orthogonal cutting of UD-CFRP incorporating a novel fibre-matrix interface model[J]. *Procedia CIRP*, 2015, 31:539-544.

收稿日期:2018-05-02

(上接第 79 页)

- [2] Gu L, Wang M, Duan C. On adiabatic shear localized fracture during serrated chip evolution in high speed machining of hardened AISI 1045 steel[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 75(4):288-298.
- [3] Ye G G, Xue S F, Ma W, et al. Onset and evolution of discontinuously segmented chip flow in ultra-high-speed cutting Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1/2/3/4):1-14.
- [4] Ma W, Chen X, Shuang F. The Chip-flow behaviors and formation mechanisms in the orthogonal cutting process of Ti6Al4V Alloy[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 2016, 98:245-270.
- [5] Tönshoff H K, Arendt C, Amor R B. Cutting of hardened steel[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2000, 49(2):547-566.
- [6] Jomaa W, Mechri O, Lévesque J, et al. Finite element simulation and analysis of serrated chip formation during high-speed machining of AA7075-T651 alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 26:446-458.
- [7] Guo Y B, Yen D W. A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155-156(6):1350-1356.
- [8] Yang D, Liu Z, Ren X, et al. Hybrid modeling with finite element and statistical methods for residual stress prediction in peripheral milling of titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, 108-109:29-38.
- [9] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]// *Scientific Research*, 1983, 19:541-547.
- [10] 王凌云, 黄红辉, 谢志江. 航空铝合金薄壁零件高速加工铣削力[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017(7):1756-1761.
- [11] Wang B, Liu Z. Investigations on deformation and fracture behavior of workpiece material during high speed machining of 7050-T7451 aluminum alloy[J]. *Cirp Journal of Manufacturing Science & Technology*, 2016, 14:43-54.
- [12] 李林, 蔡安江. 基于 ABAQUS 的航空叶轮铣削变形机理研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2016(5):36-38.
- [13] Saanouni K, Lestriez P, Labergère C. 2D adaptive FE simulations in finite thermo-elasto-viscoplasticity with ductile damage: application to orthogonal metal cutting by chip formation and breaking[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2011, 20(1):23-61.
- [14] Zaghbani I, Songmene V. A force-temperature model including a constitutive law for Dry High Speed Milling of aluminium alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(5):2532-2544.
- [15] Ye G G, Chen Y, Xue S F, et al. Critical cutting speed for onset of serrated chip flow in high speed machining[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 2014, 86(6):18-33.
- [16] Zaghbani I, Songmene V. A force-temperature model including a constitutive law for Dry High Speed Milling of aluminium alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(5):2532-2544.
- [17] Jomaa W, Songmene V, Bocher P. Surface finish and residual stresses induced by orthogonal dry machining of AA7075-T651[J]. *Materials*, 2014, 7(3):1603-1624.
- [18] 龚滢, 徐锋, 徐俊华, 等. 航空薄壁结构件铣削加工变形数值模拟分析[J]. *机械制造与自动化*, 2013, 42(4):16-20.

收稿日期:2018-06-26