

碳纤维经编针织复合材料 钻孔过程有限元建模与实验研究

陈晓川¹, 卞显力¹, 韩森²

(东华大学机械工程学院智能制造研究所, 上海 201620)

摘要: 为了研究碳纤维经编针织复合材料的钻削加工过程, 通过分析经编针织物的细观结构, 利用有限元分析软件 ABAQUS 建立复合材料钻削有限元模型, 并联合用户子程序 VUMAT 定义复合材料的本构模型, 模拟钻削加工过程。仿真结果表明: Z 向轴向力与进给速度呈正相关, 与主轴转速呈负相关。通过对碳纤维经编针织复合材料进行钻削实验, 将实验结果与仿真结果进行对比, 验证了有限元模型的正确性。为碳纤维经编针织复合材料钻削加工过程的优化提供了理论依据。

关键词: 碳纤维经编针织复合材料; 钻削加工; 细观结构; ABAQUS; 本构模型; Z 向轴向力

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2021)09-0247-04

DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2021.09.055

Finite Element Modeling and Experimental Study on Drilling Process of Carbon Fiber Warp Knitted Composites

CHEN Xiaochuan¹, BIAN Xianli¹, HAN Sen²

(College of Mechanical Engineering Institute of Intelligent Manufacturing Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to study the drilling process of carbon fiber warp knitted composite material, the finite element model of the composite material drilling was established by analyzing the microscopic structure of the warp-knitted fabric with the finite element analysis software ABAQUS, and the constitutive model of the composite material was defined with the user subroutine VUMAT to simulate the drilling process. The simulation results show that the Z axial force is positively correlated with the feed speed and negatively correlated with the spindle speed. Through drilling experiments on carbon fiber warp knitted composites, the experiment results are compared with the simulation results to verify the correctness of the finite element model. It provides a theoretical basis for optimizing the drilling process of carbon fiber warp knitted composites.

Key Words: Carbon Fiber Warp Knitted Composite; Drilling Processing; Microscopic Structure; ABAQUS; Constitutive Model; Z-Direction Axial Force

1 引言

碳纤维经编针织复合材料是以双轴向经编针织物为增强相再经树脂复合而成。该材料不仅具有强度高、热容量小等特点。而且由于针织纱对碳纤维的束缚作用, 提高了复合材料的整体性能, 而且该材料剪切强度更高且不易出现分层^[1]。但该材料同时具有硬度大, 力学性能呈现各向异性等特点, 在切削加工过程中会加快刀具表面的磨损, 难以保证工件的加工质量^[2]。

在对碳纤维复合材料进行钻削试验的研究中, 文献^[3]通过对单向碳纤维增强复合材料进行切削试验研究, 发现纤维方向与刀具运动方向平行时, 会获得更好的工件质量。文献^[4]提出材料性质、切削参数、刀具几何参数等因素会影响碳纤维复合材料钻削

加工过程临界轴向力的大小。而临界轴向力的大小会影响材料的加工质量, 当临界轴向力小于钻削轴向力时, 材料会出现缺陷^[5,6]。文献^[7]通过对比不同的涂层刀具钻削加工试验, 发现涂层材料会影响钻削切削力的变化。在碳纤维复合材料钻削加工过程的研究中一般采用实验方法进行宏观分析, 也可以使用有限元方法模拟钻削加工过程。文献^[8]以小直径麻花钻为研究对象, 对钻削加工过程进行模拟分析, 分析了小直径麻花钻钻削时的受力和磨损情况, 并与实验结果进行对比验证模型的正确性。文献^[9]以碳纤维复合材料为研究对象, 通过使用有限元的方法探究其钻削加工过程, 得到钻削力的变化趋势。

为了提高碳纤维经编针织复合材料的加工质量和效率, 有

来稿日期: 2020-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475301)

作者简介: 卞显力, (1994-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要研究方向: 复合材料加工;

陈晓川, (1970-), 男, 吉林长春人, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 复合材料加工、纺织机械设计、面向成本的设计、人工智能等

必要对其钻削加工过程进行分析。通过对碳纤维经编针织复合材料的细观结构进行分析,利用有限元软件 ABAQUS 建立了其有限元模型,并分析钻削过程中转速与进给速度对轴向力的影响,最后与实验结果进行对比验证模型的可行性,为工程应用提供了仿真方法和依据。

2 碳纤维经编针织复合材料结构分析

2.1 复合材料细观结构

轴向经编针织物是由三部分组成,分别是经纱、纬纱和针织纱,其中经纬纱系统是由碳纤维束通过0°/90°的正交方式制成,而针织纱一般采用高强涤纶针织纱作为增强纱线,通过经编方式绑缚在碳纤维束铺层的0°,90°和±θ°(30°≤θ°≤90°)方向上。其功能主要是防止经纬纱出现厚度方向的相对滑移进而保证织物结构的稳定。通过复合工艺将轴向经编针织物与树脂进行复合,其中经纱、纬纱和针织纱将被树脂粘固在一起,进而碳纤维经编针织复合材料制备完成。其三维几何,如图1所示。

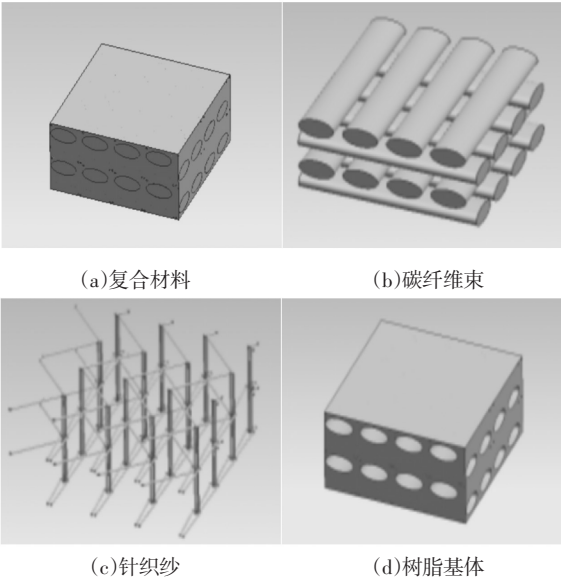


图1 碳纤维经编针织复合材料三维几何图
Fig.1 Three-Dimensional Geometrical Diagram of Carbon Fiber Warp Knitted Composite

2.2 细观结构简化

由于轴向经编针织物细观结构非常复杂,若直接采用细观结构进行有限元分析将会造成计算效率的降低,所以有必要对复合材料进行细观结构的简化。

(1)基本假设

对复合材料进行细观结构简化之前,需要作以下假设^[10]:

a 纱线中,纤维是连续的且相互平行的。

b 复合材料在复合成型时,其纱线完全浸润且均匀地分布在树脂基体之中。

c 纱线与基体粘结完善,无相对位移。

d 忽略残余应力应变和环境对复合材料的影响。

(2)简化方法

碳纤维经编针织复合材料是由4层轴向经编针织物采用正交的方法进行叠放后与树脂进行复合制成。在对复合材料进行细观结构建模时,可以把针织纱的力学性能转化到树脂上,进而

提升树脂对材料整体的力学作用。针织纱经转化后,其体积也相应的转入树脂内。由于针织纱以相同的铺排角绑缚在碳纤维束上,所以转化后的树脂(“基体”)其力学性能可以等效为单向复合材料进行求解。其细观结构简化分析思路,如图2所示。

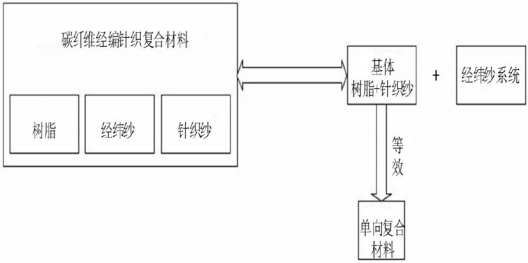


图2 碳纤维经编针织复合材料细观结构分析思路
Fig.2 Analysis on The Microstructure of Carbon Fiber Warp Knitting Composite

3 钻削有限元仿真

3.1 碳纤维经编针织复合材料钻削有限元模型建立

通过对复合材料细观结构的简化,可建立其有限元简化模型。通过使用ABAQUS用户子程序VUMAT定义材料本构模型,然后模拟碳纤维经编针织复合材料钻削加工过程。图3(a)为复合材料细观简化模型图,其中材料的尺寸为10mm×10mm×4mm,经纬纱为10mm×2mm×1mm,基体部分为10mm×0.5mm×1mm。钻头材料是直径为4mm的PCD麻花钻,根据实际尺寸建立钻头有限元模型,如图3(b)所示。

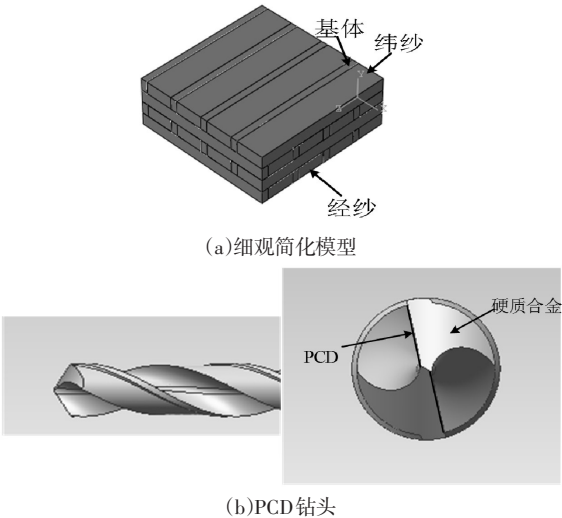


图3 碳纤维经编针织复合材料钻削有限元模型
Fig.3 Finite Element Model of Carbon Fiber Warp Knitting Composite Drilling

3.2 材料参数

碳纤维束,树脂以及PCD钻头的材料参数如表1、表2、表3所示,表4为转化后树脂(“基体”)的材料参数。

表1 碳纤维束的材料参数

Tab.1 Material Parameters of Carbon Fiber Bundle									
E_{11}/Gpa	E_{22}/Gpa	E_{33}/Gpa	G_{12}/Gpa	G_{23}/Gpa	G_{13}/Gpa	ν_{12}/Gpa	ν_{23}/Gpa	ν_{13}/Gpa	
207.3	24.42	24.42	11.63	8.82	11.63	0.29	0.31	0.29	

表2 树脂材料参数

Tab.2 Resin Material Parameters		
E/Gpa	G/Gpa	ν
3.0	1.1	0.35

表3 PCD钻头的材料参数
Tab.3 Material Parameters of PCD Drill Bits

$\rho/(g/cm^3)$	E/Gpa	ν
1.45	900	0.2

表4 “基体”的材料参数
Tab.4 Material Parameters of the "Matrix"

E_{11}/Gpa	E_{22}/Gpa	E_{33}/Gpa	G_{12}/Gpa	G_{23}/Gpa	G_{13}/Gpa	ν_{12}/Gpa	ν_{23}/Gpa	ν_{13}/Gpa
8.11	3.07	3.07	1.13	1.12	1.13	0.35	0.35	0.35

其中 E_{11} 、 E_{22} 、 E_{33} 是有限元模型中坐标方向为x,y,z的弹性模量,同理, G_{12} 、 G_{23} 、 G_{13} 是其xy、yz、xz方向二维平面内的剪切模量, ν_{12} 、 ν_{23} 、 ν_{13} 是其xy、yz、xz方向二维平面内的泊松比, ρ 是材料的密度。

3.3 材料失效准则

在材料失效过程中,碳纤维材料与金属材料有所不同,碳纤维复合材料在加工过程中经常伴随着基体开裂,当纤维受拉时会出现纤维的断裂破坏,当纤维受压时会出现纤维的弯曲破坏。本文以Hashin准则作为判断材料的失效标准,其失效参数如表5所示。

表5 碳纤维经编针织复合材料的Hashin失效准则参数
Tab.5 Hashin Failure Criterion Parameters of Three-Dimensional Biaxial Warp Knitted Composites

σ_{11}^f	σ_{11}^{fc}	σ_{22}^f	σ_{22}^{fc}	τ_{12}^f
1400	1100	180	206	186

3.4 有限元分析过程

钻削过程属于弹塑性分析,需要使用线性减缩积分单元,其中工件部分采用C3D4三维实体单元,钻头部分采用C3D8R刚体单元。为了方便读取数据以及设置边界条件,需在钻柄中间设置参考点,对其施加主轴转速和进给速度,相关切削参数如表6所示。钻头与复合材料的相互作用类型设置为“面面接触”,其中切向摩擦系数为0.3;将“基体”和碳纤维束之间的接触设置为粘结,碳纤维束之间的接触设置为“通用接触”。边界条件,如图4所示。



图4 边界条件设置图
Fig.4 Boundary Condition Setting Diagram

表6 切削参数的选择
Tab.6 Selection of Cutting Parameters

钻头材料	工艺参数	数值
PCD 钻头	主轴转速 $n/(r/min)$	500, 1000, 1500, 2000, 2500
	进给速度 $V_f/(mm/min)$	20, 50, 80, 110

3.5 有限元结果分析

根据钻削过程中钻头与工件的相互位置关系,可以将碳纤维经编针织复合材料钻削仿真分为四个阶段,如图5所示。

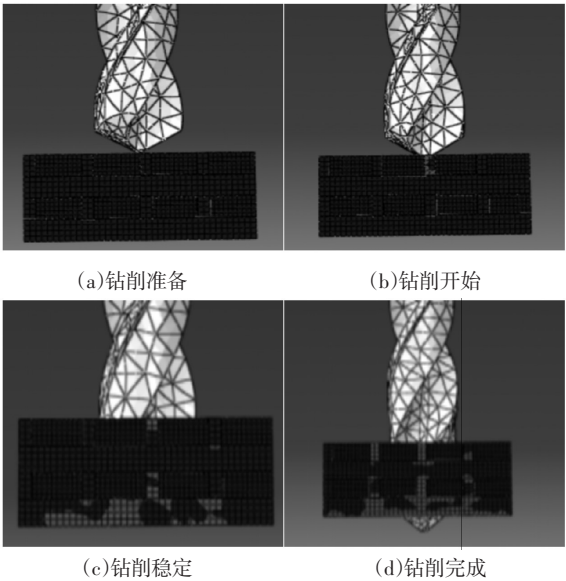


图5 钻削的各个阶段示意图

Fig.5 Schematic Diagram of Each Stage of Drilling

当主轴转速 $n=500r/min$,进给速度 $f=110mm/min$ 时,钻削过程中Z向轴向力变化曲线如图6所示,从图中可以看出:在a-b段,随着钻头逐渐钻进碳纤维经编针织复合材料,Z向轴向力曲线先增长剧烈,接着缓慢上升。这是因为在钻削过程的初始阶段只有钻头横刃进行切削,此时轴向力的50%以上集中在横刃处^[11];当钻头主切削刃完全进入复合材料中时,Z向轴向力曲线逐渐趋于稳定,如图中b-c段所示;c-d段为钻头穿透复合材料底层阶段,由于此时钻削过程中的会产生较大振动,其轴向力变化趋势具有较大的波动;d-e段为钻头完全穿透复合材料阶段,此时轴向力的不断降低直至为零。

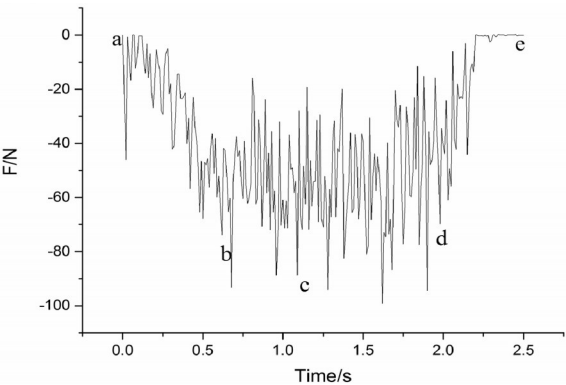


图6 仿真Z向轴向力随时间的变化

Fig.6 Simulation of Z-Direction Axial Force with Time

4 碳纤维经编针织复合材料钻削实验

4.1 钻削过程实验材料及数据采集过程

实验以碳纤维经编针织复合材料作为钻削对象,复合材料板厚度为4mm。实验刀具是直径为4mm的PCD标准麻花钻头,如图7所示。



图7 实验刀具
Fig.7 Experimental Tool

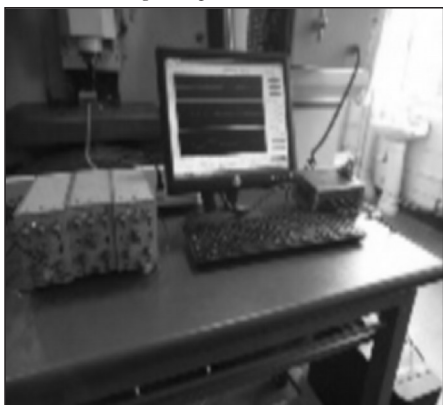


图8 轴向力测量系统
Fig.8 Axial Force Measurement System

加工设备采用了上海第四机床厂研发的XH714型立式加工中心,其轴向力测量系统分别由测力仪、电荷放大器以及数据采集卡组成。钻削过程中轴向力采集过程为:钻头产生的力信号通过测力仪转化为电信号,再由电荷放大器放大为可测量电信号,并由数据采集卡转换为计算机可识别的数字信号,其测量系统如图8所示。最终通过切削力显示系统记录钻削过程中X、Y、Z三个方向的轴向力数据。

4.2 实验结果与分析

主轴转速 $n=500\text{r/min}$,进给速度 $f=110\text{mm/min}$ 时,碳纤维经编织复合材料钻削实验所测轴向力曲线。通过对比图9和图6可以看出,仿真与实验轴向力曲线变化趋势一致,进而证明了仿真模型建立的准确性,如图9所示。

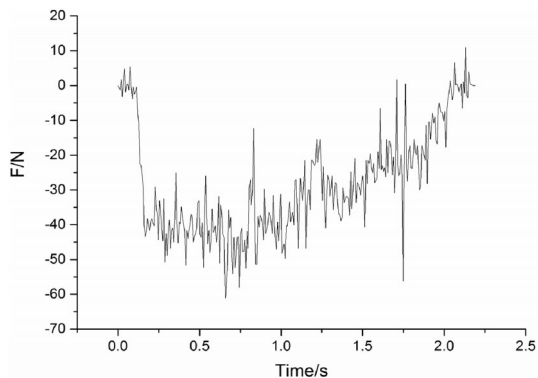


图9 实验Z向轴向力变化
Fig.9 Z-Direction Axial Force Variation in the Experiment

进给速度与主轴转速对碳纤维经编织复合材料钻削过程Z向轴向力的影响情况,通过对比分析可以看出进给速度与主轴转速均会影响轴向力的变化。当主轴转速一定时,轴向力的大小与进给速度呈正相关,当进给速度一定时,轴向力的大小与主轴转速呈负相关。在主轴转速为 500r/min 时,将进给速度为 20mm/min 时的轴向力平均值与进给速度为 50mm/min 、 80mm/min 、 110mm/min 作对比可以看出,轴向力分别减小了 13.4% 、 42.7% 、 55.7% ;而在进给速度为 20mm/min 时,将主轴转速为 500r/min 时的轴向力平均值与主轴转速为 1000r/min 、 1500r/min 、 2000r/min 、 2500r/min 作对比可以看出,轴向力分别增大了 8.5% 、 15.6% 、 21.4% 、 26.8% 。通过分析进给速度与主轴转速对轴向力的影响,可以看出,进给速度的影响要大于主轴转速。在实际加工过程中,可以通过调节进给速度的大小进而减缓钻削轴向力的变化趋势,更有助于提高加工效率和加工质量,如图10所示。

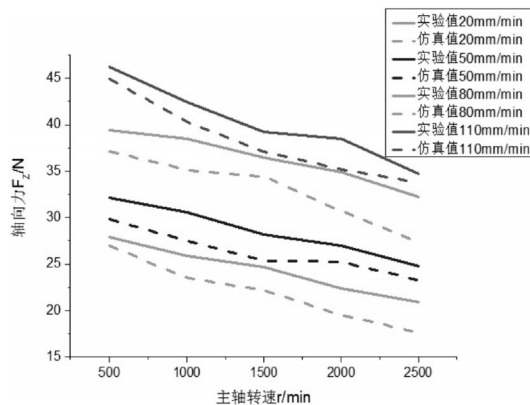


图10 进给速度和主轴转速对Z向轴向力的影响
Fig.10 Effect of Feed Rate and Spindle Speed on Z-Direction Axial Force

5 结论

利用有限元软件ABAQUS联合其子程序VUMAT建立了碳纤维经编织复合材料钻削有限元模型,采用Hashin Damage破坏准则进行钻削过程有限元仿真,并使用PCD麻花钻对该复合材料进行钻削实验,结果显示,有限元仿真Z向轴向力大小以及变化趋势与实验结果具有较好的一致性,验证了模型的准确性,对实际钻削具有一定指导作用。

参考文献

- [1] 李威,郭权锋.碳纤维复合材料在航空航天领域的应用[J].中国光学,2011,35(04):1-4.
(Li Wei, Guo Quan-feng. Application of carbon fiber composite materials in aerospace [J]. China Optics, 2011, 35(04): 1-4.)
- [2] 宋中权.玻璃纤维增强复合材料钻削加工试验研究[D].南京:南京理工大学,2011.
(Song Zhong-quan. Experimental study on drilling of glass fiber reinforced composite materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011.)
- [3] Koplev A, Lystrup T, Vorm. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP[J]. Composites, 1983, 14(04): 371-376.
- [4] Hocheng H, Tsao C C. Effects of special drill bits on drilling-induced

(下转第254页)

边缘位置依然存在较大毛刺。本次离线编程进行轨迹调整实验的去毛刺效果,如图8所示。

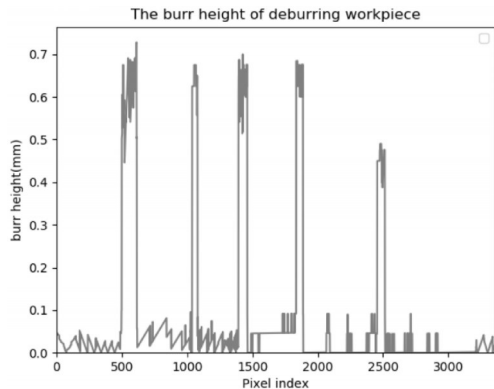


图7 未做轨迹调整的毛刺残余

Fig.7 Residual Burr without Trajectory Adjusted

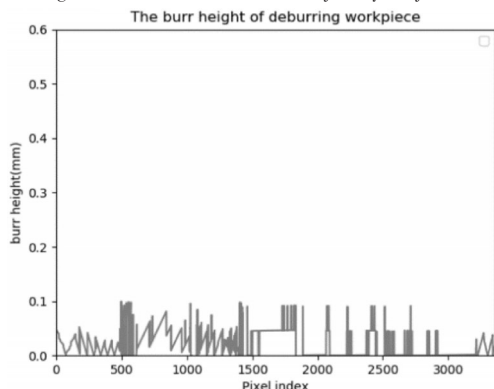


图8 轨迹调整后的毛刺残余

Fig.8 Residual Burr by Trajectory Adjusted

经过打磨前与打磨后的工件对毛刺高度的分析,在毛刺较厚的位置,未经过轨迹调整的打磨,工件依旧存在部分毛刺,且毛刺高度较大;毛刺已去除宽度与工件边缘路径的占比,即毛刺去除率约为90%,打磨效果较难满足生产要求;经过本次实验的离线编程轨迹调整之后,毛刺高度基本未超过0.1mm,毛刺基本去除,毛刺去除率接近99%,边缘光滑,基本满足生产要求。

6 结论

(1)结合视觉辅助,可以自动识别工件的边缘信息和毛刺信

息,从而利用离线编程自动生成路径并调整,不再需要手动示教等繁琐操作并排除了因铸造引起的形状偏差带来的影响。

(2)利用去毛刺的数学模型,根据毛刺高度调整机器人末端的进给速度,可以去除干净较大毛刺,从而提高去毛刺去除率,去除率提高将近9%。

实验证明,视觉辅助的离线编程去毛刺系统是一种有效的去毛刺方法。

参考文献

- [1] 王宪伦,王勇,薛云娜.机器人切除毛刺技术的进展[J].航空制造技术,2007(04):96-99.
(Wang Xian-lun, Wang Yong, Xue Yun-na. Progress in Robotic Deburring Technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007, (04):96-99.)
- [2] 王素玉,赵军,艾兴.高速切削表面粗糙度理论研究综述[J].机械工程师,2004,(10):3-6.
(Wang Su-yu, Zhao Jun, Ai Xing. Theoretical Research of Surface Roughness for HSM[J]. Mechanical Engineer, 2004, (10):3-6.)
- [3] 王孟飞,夏琴香,俞高峰.工业机器人自动去毛刺加工离线编程研究[J].机电工程技术,2017,(12):5-10.
(Wang Meng-fei, Xia Qin-xiang, Yu Gao-feng. Research on Off-Line Programming of Industrial Robot for Automatic Deburring Process [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(12):5-10.)
- [4] 舒服华.基于变形遗传算法的切削参数优化[J].机械工程师,2005(11):98-99.
(Shu Fu-hua. Optimization of cutting parameters based on deformation genetic algorithm [J]. Mechanical Engineer, 2005, (11):98-99.)
- [5] 赵东波,熊有伦.机器人离线编程系统的研究[J].机器人,1997,(4).
(Zhao Dong-bo, Xiong You-lun. Research on Robot Off-line Programming System [J]. Robot, 1997, (04):75-81.)
- [6] Alexander Kuss, Manuel Drust, Alexander Verl. Detection of Workpiece Shape Deviations for Tool Path Adaptation in Robotic Deburring Systems [J]. Procedia CIRP, 2016, 57:.
- [7] John J Craig. Introduction to Robotics: Mechanics and Control [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [8] 王连生.基于机器视觉的工业机器人去毛刺加工效率优化研究[D].浙江:浙江大学,2017.
(Wang Lian-sheng. Optimization of deburring efficiency of industrial robot based on machine vision [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2017.)

(上接第250页)

delamination of composite materials [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12-13):1403-1416.

- [5] Koenig W, Wulf C, Grass P. Machining of fiber reinforced plastics [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1985, 34(02):538-548.
- [6] Tsao C C. The effect of pilot hole on delamination when core drill drilling composite materials [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(12-13):1653-1661.
- [7] 魏良耀,程寓.涂层钻头钻削碳纤维复合材料的轴向力研究[J].制造技术与机床,2013(01):141-144.
(Wei Liang-yao, Cheng Yu. Study on axial force of coated bit drilling carbon fiber composites [J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2013(1):141-144.)
- [8] 贾晓鸣,李秋玥,张好强.小直径麻花钻的钻削仿真与实验研究[J].机

械设计与制造,2015(02):139-142+145.

- (Jia Xiao-ming, Li Qiu-yue, Zhang Hao-qiang. Experimental Research and Drilling Simulation of Small-Diameter Twist Drill [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(02):139-142+145.)
- [9] Gao F, Tian X, Liu S, et al. The Simulation on Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites [J]. Journal of Engineering Mathematics, 2012, 72(01):141-157.
- [10] Bogdanovich A E, Pastore C M. Mechanics of Textile and Laminated Composites with Application to Structural Analysis [J]. London: Chapman & Hall, 1996.
- [11] Jain S, Yang D C H. Delamination-free drilling of composite laminates [J]. Journal Of Engineering for Industry, 1994, 116(04):475-481.