

基于碳纳米纸的CFRP制孔 质量控制*

王共冬^{1,2}, 李南¹, 种强¹, 周丽¹

(1. 沈阳航空航天大学航空航天工程学部, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136)

[摘要] 进行了钻削预埋碳纳米纸薄膜传感器碳纤维复合材料的试验, 钻削结果采用超声波扫描显微镜进行检测。试验结果表明: 层间预埋碳纳米纸, 可以实时监测钻头位置, 根据钻头位置改变进给率, 实现对制孔质量的精确控制。采用 ABAQUS 对试验方案进行模拟仿真, 模拟的结果与试验结果很好地吻合, 证明了该方法的有效性。

关键词: 碳纤维增强树脂基复合材料; 分层; 碳纳米纸; 进给率; 轴向力

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.1/2.032



王共冬

工学博士, 副教授。主要从事飞机数字化制造技术及树脂复合材料成型工艺、复合材料叠层钻孔加工研究。主持博士启动基金一项, 参与航空科学基金、省教育厅基金各 1 项, 近年发表学术论文 10 余篇。

碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 以高比强度、比模量, 较好

的耐高温、耐磨、耐腐蚀和耐疲劳等性能特点, 在航空航天领域获得广泛的应用。在碳纤维复合材料的实际应用中, 不可避免地要进行大量的机械加工, 其中孔加工为主要的加工工艺。由于 CFRP 层间强度低, 呈各向异性, 在钻削加工时容易发生分层、撕裂、毛刺等缺陷^[1], 而在所有的缺陷中, 分层是影响整体结构性能的主要缺陷。因此, 对钻孔过程的精确控制, 抑制分层的发生, 是提高复合材料装配件整体性能的关键所在。

国内外学者从改变切削参数、改进加工方法、建立力学模型等方面来控制 and 减小分层。王慧锋等^[2]研究了不同参数对孔分层影响的大小, 并通过多元线性回归, 得出分层和参数之间的函数关系, 通过选择合适参数使孔的质量最优。Phadnis 等^[3]从试验和数值分析方面对切削参数和钻削过程中的轴向力和转矩进行研究, 建立了复合材料钻削三维有限元模型; 试验结果采用 X 射线进行断层扫描, 试验结果和有限元模拟结

果吻合很好。在钻削复合材料层合板时, 出口处添加支撑可以减少分层。Hocheng 等^[4]使用一种电磁铁类的混合物在钻削出口处产生磁性支撑力, 可很好地抑制钻削碳纤维零件制品的分层。在有限元模型方面, Durão 等^[5-6]基于线弹性断裂力学和复合材料力学, 建立了预测临界轴向力模型来模拟轴向力和分层。另外, 出孔处分层临界轴向力的数学模型也在其他类型钻头上得到了应用^[7-8]。

目前, 对分层缺陷的描述, 国内外的学者们大都用分层因子或改进的分层因子进行表征。常用分层因子为 $L_d=L/D$, 其中 L 为最大分层区的直径, D 为孔的公称直径, 如图 1 所示。

由 Chen^[9] 建立的分层因子是反应孔质量最直接的测量变量。Voß 等^[10] 在总结了他人的研究^[10-12] 后, 提出一个评价质量的综合数学模型, 其可靠性通过一系列钻削试验得到证实。另外, Durão^[5] 建立的分层临界轴向力力学模型(式(1)和图 2^[5]), 从

* 基金项目: 总装预研基金项目“××××容差分配与仿真编程系统”(JZ2013002)。

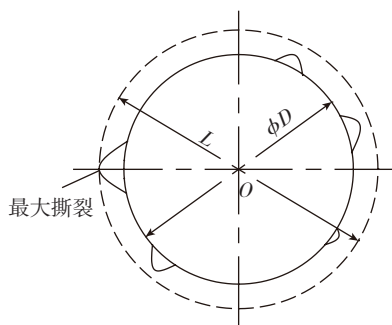


图1 分层因子示意图

Fig.1 Schematic of the delamination factor

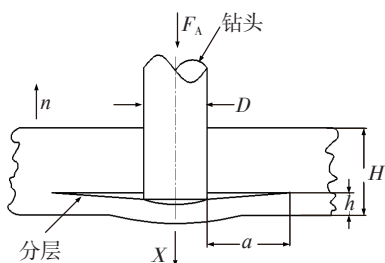


图2 分层分析模型

Fig.2 Model for delamination analysis

宏观上对分层条件进行了分析。

$$F_{crit} = \pi \left(\frac{8G_{1c}E_1h^3}{3(1-\nu_{12}^2)} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中, F_{crit} 是分层开始的临界轴向力, G_{1c} 是层间断裂韧性, E_1 是弹性模量, ν_{12}^2 是单向板的主泊松比, h 是未切削层厚度。为避免发生分层, 轴向力不能超过其计算值。

上述大部分研究集中在临界轴向力模型、切削参数等方面, 而对精确控制钻孔过程分层的研究较少。因此, 本文提出了预埋碳纳米纸薄膜传感器的复合材料层合板钻削方案, 分析钻头位置、进给率对分层的影响, 建立层合板层数和进给率的关系, 根据钻头位置适时改变进给率, 进而控制钻削质量。

预埋碳纳米纸的钻削技术方案

钻削复合材料层合板时, 层间界面脱粘为最主要的分层形式。钻削过程中(图 3^[13]), 入口处钻头的震动引起钻削中心偏移和层合板表面纤维拉拔, 易形成分层; 钻削到中部时, 轴向力不足以克服板的弯曲刚度

和余下层间界面结合强度的耦合, 因此不易发生分层; 钻削到出口附近时, 轴向力的冲击需要克服的仅仅是未钻削板的弯曲刚度和界面结合强度的耦合, 因此易发生分层。目前, 大部分研究中都是采用固定转速或固定进给率进行的, 而进给率越大, 轴向力越大, 越容易产生分层; 尤其是在出口处, 轴向力较大时不是以剪切为主要形式进行切削加工, 而更接近于冲压方式进行。故为减小出口处分层, 一般在出口处时应采用较小的进给率。如何精确确定钻头在层合板中的位置, 根据所处的位置来改变进给率是本文研究的重点。

1 预埋碳纳米纸的复合材料钻削试验流程

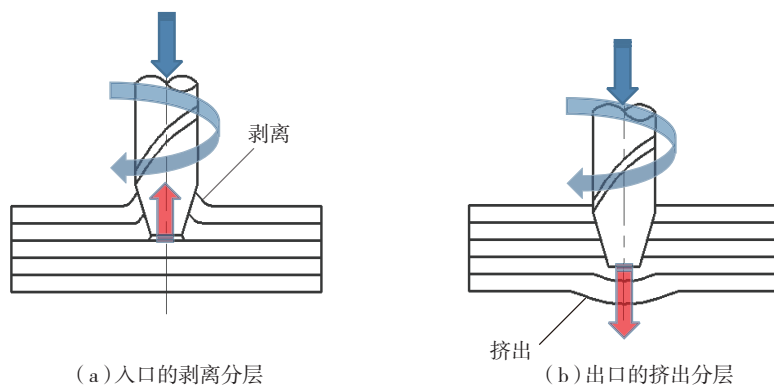


图3 孔的出入口分层

Fig.3 Delamination at hole entrance and exit

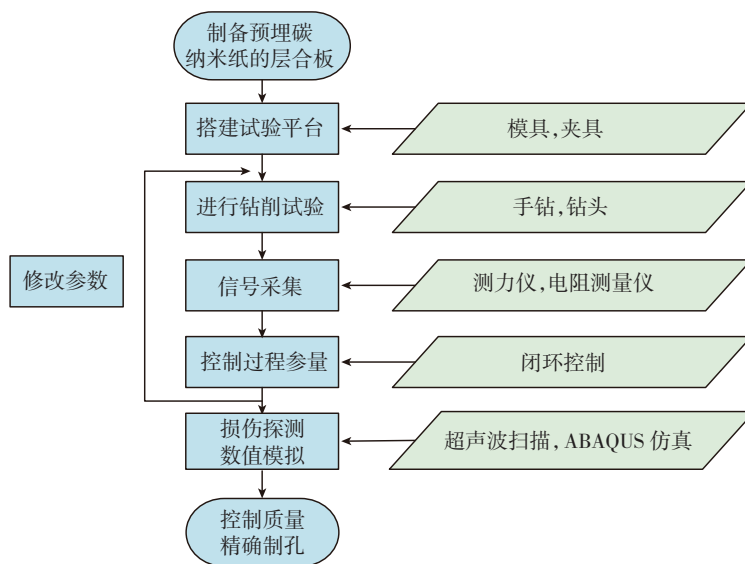


图4 钻削试验流程图

Fig.4 Flow diagram of drilling experiment

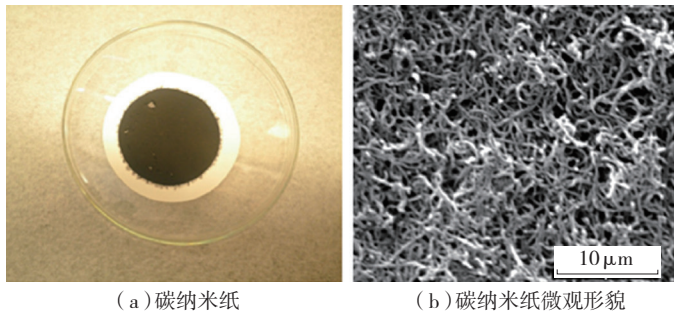


图5 碳纳米纸及其微观图像

Fig.5 Carbon nanotube Buckypaper and its microgram

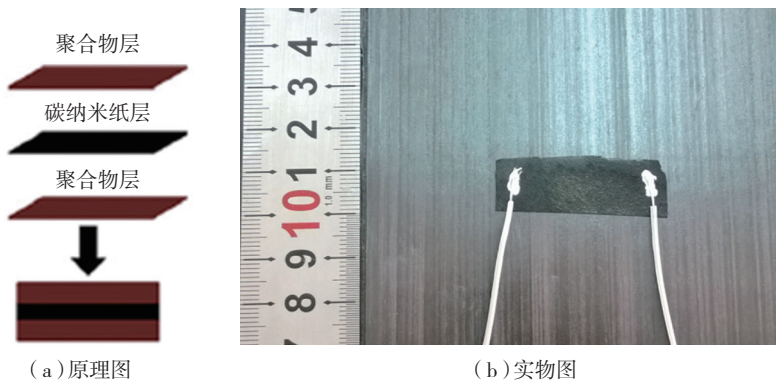


图6 预埋碳纳米纸的原理图和实物图

Fig.6 Schematic and original photos of precast carbon nanotube buckypaper

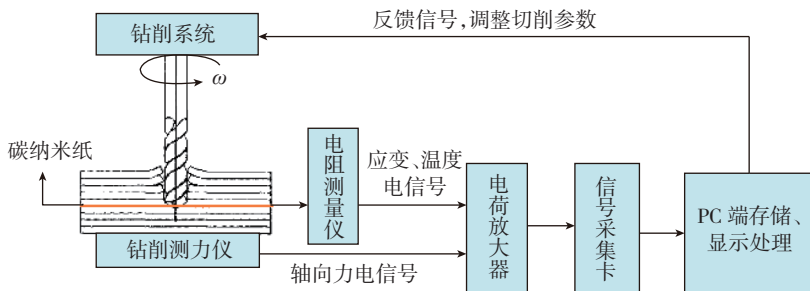


图7 钻削试验平台
Fig.7 Experiment platform for drilling

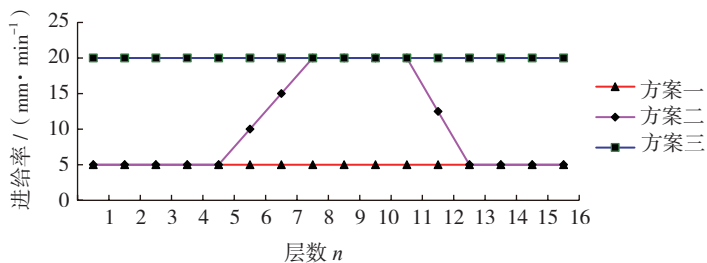


图8 不同进给率和层数之间的关系
Fig.8 Relationship of various feed rate and number of layers

处的挤出分层和入口处的拉出分层,选取入口和出口处的前6层的层间预埋碳纳米纸来检测钻削过程中的电阻值变化,以判断钻头位置。

本文选用 T300 型碳 / 环氧树脂基纤维预浸料铺设 16 层,铺层时将碳纳米纸放置在层间(图 6),与预浸料一起加压固化,得到界面增强的层

合板。

3 钻削试验设备和方案

设备:设计钻削试验平台如图 7 所示,对预埋碳纳米纸的复合材料层合板进行钻削试验。该平台由台钻、夹持装置、钻削测力仪、电阻测量仪、电荷放大器、信号采集卡和一台计算机组成。试验过程中产生的轴向力通过钻削测力仪、电荷放大器和信号采集卡传输到 PC 端;钻头钻入碳纳米纸时产生的电信号,通过外接型四探针电阻测量仪经由信号放大、信号采集后传输到 PC 端。

方案:选用直径 5mm 的类金刚石涂层硬质合金麻花钻,以 3000r/min 转速和 3 种进给率进行,其中方案一为低进给率 5mm/min,方案三为高进给率 20mm/min,方案二为变进给率。先采用低进给率,随着钻削过程进行,增加进给率,在接近出口处采用低进给率进行钻削试验(图 8)。

试验结果分析

采用变进给率进行钻削时,取出口处第五层的结果为分析对象,信号通过电阻信号测量仪进行采集、转换到 PC 终端,得到钻头位置响应曲线(图 9)。

图 9 中 AB 段表示钻头开始放置在层合板的指定位置,碳纳米纸感受压力变化,开始出现响应信号;BC 段表示开始钻削层合板,此时碳纳米纸的阻值浮动不断变大,这说明钻削过程中切削力不断增大,引起了层合

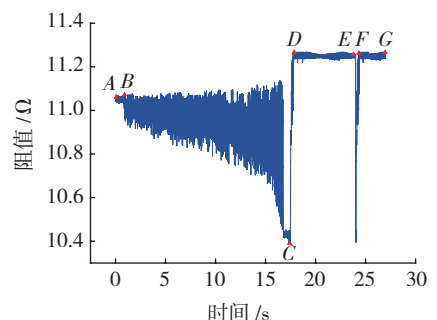


图9 钻头位置响应曲线
Fig.9 Response curve of drill bit position

板的形变,板内的碳纳米纸随之变形,引起了电子的转移;*CD*段表示钻头横刃接触到碳纳米纸,碳纳米纸被破坏引起了电阻的升高,出现电阻信号的阶跃;*DG*段表示钻头完全钻出层合板的过程,除了*EF*段的碳纳米纸破坏过程中的一些噪点信号引起了阻值的变化外,信号无明显变化。

二的制孔质量相近,方案三的质量最差。因此,采用变进给率切削时得到的制孔质量,与同条件其他方案相比,好于高进给率的制孔质量,而近于低进给率的制孔质量。

因此,在改进的试验方案中加入反馈系统,在切削过程中实时监测钻头位置,及时修改切削参数,改善制

孔质量,达到了降低分层、提高工作效率的目的。采用变进给率钻削预埋碳纳米纸的层合板时,通过结合每一层钻头位置发生阶跃响应对应的时(表1)和轴向力随时间的变化曲线(图12),可以得出钻削到每一层时的轴向力大小(图13)。

结论

本文在复合材料层合板中预埋碳纳米纸薄膜传感器,来实时监测钻削过程中钻头的位置,通过添加反馈

表1 不同层间的阶跃响应时间

层数	1	2	3	4	5	11	12	13	14	15
时间/s	1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	17.5	18.5	20	22	24

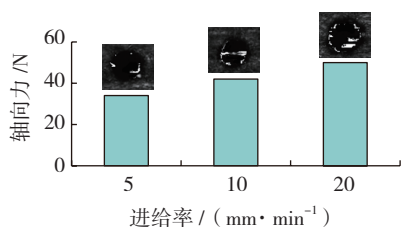


图10 进给率和轴向力、制孔质量之间的关系
Fig.10 Relationship of feed rate and thrust force, drilling quality

将钻头进入入口和出口处的前6层层间时阶跃信号发生的时间一一记录,如表1所示。采用单因子变量法进行多次钻削,并用超声波扫描电子显微镜检测制孔质量,得到了同一转速下进给率和轴向力、制孔质量之间的关系(图10)。

从图10中可以看出,相同条件下,进给率越大,产生的轴向力越大,造成的分层缺陷也越严重。

基于上述验证结果,综合考虑制孔质量和生产效率,采用变进给率切削方案进行对比试验(图8),并对3种钻削方案进行有限元仿真。

如图8中方案二所示,当钻削到每一层预埋的碳纳米纸时,信号通过电阻信号测量仪进行采集、转换到PC终端,PC终端对应出现阶跃响应。对比碳纳米纸阻值的变化判断阶跃响应的有效性,并按照变进给率方案相应地手动增减进给率,直到钻削完成,试验结束后观察出口质量。

根据图11所示,方案一和方案

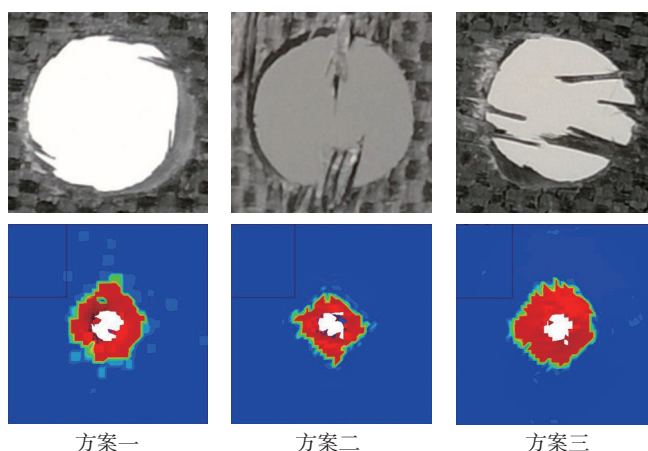


图11 不同进给率下的出口质量:实物图和模拟图

Fig.11 Original and simulation photos of drilling quality in different feed rate

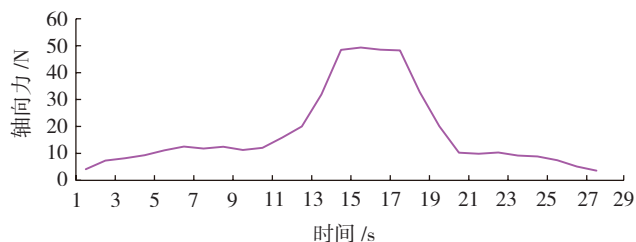


图12 轴向力与时间之间的关系

Fig.12 Relationship of thrust force and time

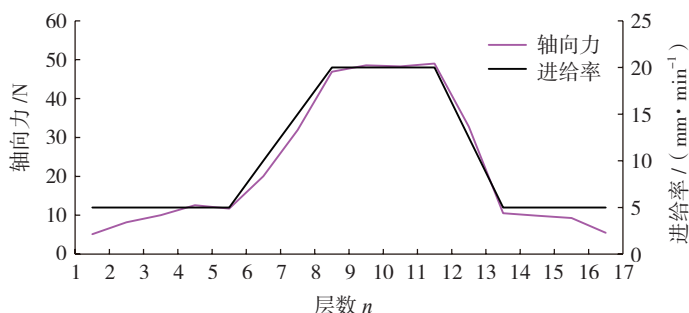


图13 轴向力、进给率与层数之间的关系

Fig.13 Relationship of thrust force, feed rate and the layers

系统来适时地改变进给率,并结合有限元模拟和超声波扫描进行辅助分析。模拟和试验结果验证了采用碳纳米纸作为传感器监测钻削过程、控制制孔质量的有效性。

参考文献

[1] 魏威, 韦红金. 碳纤维复合材料高质量制孔工艺[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(S1):115-118.
WEI Wei, WEI Hongjin. High quality hole drilling process for carbon fiber composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(S1): 115-118.

[2] 王慧锋, 曹增强. 复合材料制孔分层试验研究分析[J]. 现代制造工程, 2008(7):60-62.
WANG Huifeng, CAO Zengqiang. Drilling carbon fiber reinforced plastics experimental and statistical study[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(7):60-62.

[3] 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 & Manufacturing, 2013, 47: 41-51.

[4] HOCHENG H, TSAO C C, LIU C S, et al. Reducing drilling-induced delamination in composite tube by magnetic colloid back-up[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 85-88.

[5] DURÃO L M P, MOURA M F S F D, MARQUES A T. Numerical prediction of

delamination onset in carbon/epoxy composites drilling[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(9): 2767-2778.

[6] QI Z, ZHANG K, LI Y, et al. Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks[J]. Composite Structures, 2014, 107: 604-609.

[7] RAHME P, LANDON Y, LACHAUD F, et al. Delamination-free drilling of thick composite materials[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2015, 72:148-159.

[8] 蔺小军, 崔栋鹏, 单晨伟, 等. C/C 复合材料钻削轴向力研究[J]. 航空制造技术, 2015(15): 60-64.

LIN Xiaojun, CUI Dongpeng, SHAN Chenwei, et al. Experimental study on thrust force in drilling carbon/carbon composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(15): 60-64.

[9] CHEN W C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1997, 37(8): 1097-1108.

[10] VOß R, HENERICHS M, RUPP S, et al. Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science & Technology, 2015, 12:56-66.

[11] DAVIM J P, RUBIO J C, ABRAO A M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates[J]. Composites Science & Technology, 2007, 67(9): 1939-

1945.

[12] TSAO C C, KUO K L, HSU I C. Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59(5): 617-622.

[13] 陈明, 安庆龙, 明伟伟. 复合材料制孔技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 3187-3194.

CHEN Ming, AN Qinglong, MING Weiwei. Drilling of composite materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 3187-3194.

[14] 卢少微, 冯春林, 聂鹏, 等. 喷射吸滤成型法制备碳纳米纸及其应变/温度传感特性[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3187-3194.

LU Shaowei, FENG Chunlin, NIE Peng, et al. Fabrication of carbon nanotube buckypaper by spray-vacuum filtration method and its strain and temperature sensing properties[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(9): 3187-3194.

[15] DÍEZ-PASCUAL A M, GUAN J, SIMARD B, et al. Poly (phenylene sulphide) and poly (ether ether ketone) composites reinforced with single-walled carbon nanotube buckypaper: II-Mechanical properties, electrical and thermal conductivity[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2012, 43(6): 1007-1015.

通讯作者: 王共东, E-mail: cadcam119@126.com。

Drilling Quality Control of CFRP Based on the Carbon Nanotube Buckypaper

WANG Gongdong^{1,2}, LI Nan¹, CHONG Qiang¹, ZHOU Li¹

(1.School of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2.Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

[ABSTRACT] This paper conducted the drilling experiments of carbon fiber reinforced polymer of precast carbon nanotube buckypaper, then the results of the drilling are detected by the ultrasonic scanning machine. The experimental results indicated that the carbon nanotube buckypaper in the interlaminates can monitor the position of the drill bit in real-time. Subsequently, the feed rate can be controlled according to the position of the drill, and the holes quality can be accurately realized. The process of drilling is simulated by ABAQUS, and the simulation result is found to be in a good agreement with the experimental result, which demonstrates the effectiveness of the method.

Keywords: Carbon fiber reinforced polymer; Delamination; Carbon nanotube buckypaper; Feed rate; Thrust force

(责编 谷雨)