

碳纤维复合材料小孔钻削工艺参数优化

温 泉, 赵 悦, 巩亚东, 邹 平
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用硬质合金麻花钻进行了碳纤维增强树脂基复合材料直径 3 mm 小孔的钻削试验,研究了工艺参数、刀具磨损对切削力和制孔质量的影响规律. 首先,通过钻削试验,测得了不同工艺参数下的钻削力,回归分析得到了钻削轴向力和扭矩与转速和进给速度之间的关系式. 然后,通过刀具磨损试验,获得了后刀面磨损量随制孔个数的变化曲线;对孔出口毛刺损伤进行测量统计和分析拟合,得到了毛刺面积与钻削扭矩间的关系式. 最后,以材料去除率最大为优化目标,以钻削后无分层且毛刺损伤满足要求为约束条件,建立了工艺参数优化模型,获得了最优转速和进给速度.

关 键 词: 碳纤维复合材料;小孔;钻削;毛刺;工艺参数;优化

中图分类号: TB 332; TG 506 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)07-0978-05

Optimization of Process Parameters for Small Hole Drilling of Carbon Fiber Reinforced Composites

WEN Quan, ZHAO Yue, GONG Ya-dong, ZOU Ping
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GONG Ya-dong, professor, E-mail: Gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The carbide twist drill was used for drilling experiments of 3 mm diameter small hole in carbon fiber reinforced resin matrix composites. The effects of process parameter and tool wear on the cutting force and the hole quality were studied. Firstly, the drilling force with different process parameters was measured by drilling test. The relationships between the thrust force, torque, rotational speed and feed speed were obtained by regression analysis. Then, the change curve of flank wear with the number of holes drilled was obtained using tool wear experiment. The relationship between burr area and drilling torque was obtained by measuring and fitting the hole exit burrs. Finally, the maximum material removal rate was regarded as the optimization goal, and drilling without delamination and burr damage meeting the requirements were chosen as the constraint conditions. The optimal rotational speed and feed speed were obtained by establishing the optimization model of drilling process parameters.

Key words: carbon fiber reinforced composites; small hole; drilling; burr; process parameter; optimization

碳纤维增强环氧树脂基复合材料(简称碳纤维复合材料)的制孔质量直接影响复合材料连接结构的力学性能与可靠性^[1-2]. 复合材料在制孔加工时刀具磨损严重,加工后易产生毛刺、分层等加工损伤,制孔质量和精度很难保证^[3-4].
复合材料的制孔过程受到很多加工参数的影响,比如钻削速度、钻头直径、刀具材料等. 这些参数的直接和相互作用会对加工效果即钻削力和制孔质量等产生影响. 李桂玉等^[5]以主轴转速、每转进给量和钻头横刃偏心系数为决策变量,建立了复合材料钻削加工的参数优化模型,得到在满足钻削质量条件下最大材料去除率时的钻削参数:主轴

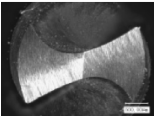
转速 15 000 r/min, 进给量 0.029 65 mm/r. Azmir 等^[6]采用 D-最优化方法进行工艺参数优化, 得出轴向力和分层随进给速度和主轴转速的增大而增大. Abhishek 等^[7]提出了一种集成的多响应优化理念, 得到转速 2 800 r/min、进给速度 50 mm/min 时的轴向力、扭矩和分层因子值最小. Krishnaraj 等^[8]针对复合材料高速钻削, 利用方差分析研究了制孔质量的影响因素, 并采用遗传算法进行多目标优化以求实现无缺陷钻削加工.

现有对碳纤维复合材料制孔加工的研究多为直径 5 mm 以上的常规尺寸, 而对小直径孔加工的研究较少, 试验数据和理论分析相对匮乏. 因此, 本文通过开展碳纤维复合材料直径 3 mm 小孔的钻削试验, 借助回归分析、刀具磨损状态和制孔质量检测等方法, 建立钻削工艺参数优化模型, 为碳纤维复合材料小孔钻削的切削力预测、钻削刀具寿命的评估和加工工艺参数的合理选择提供依据.

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料与刀具

试验采用的工件材料为 T300 碳纤维增强环氧树脂复合材料叠层板, 叠层铺设方式为 $[45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}]_{4s}$, 板厚 5 mm, 碳纤维体积分数约为 $60\% \pm 5\%$. 试验所用刀具为直径 3 mm 的 YG6 硬质合金麻花钻, 刀具主要参数如表 1 所示.

表 1 刀具主要参数				
Table 1 Main parameters of the drill				
顶角 ($^{\circ}$)	螺旋角 ($^{\circ}$)	横刃斜角 ($^{\circ}$)	横刃长度 mm	刀尖形貌
118	25	66	0.6	

1.2 试验设备与试验参数

钻削试验在德玛吉 DMC 635V eco 型立式加工中心上进行, 机床最高主轴转速 8 000 r/min. 采用 Kistler 9257B 动态测力仪对加工中的钻削力进行测量, 试验和测试系统原理如图 1 所示. 对加工后的刀具和复合材料孔的出口形貌采用 VHX-1000E 超景深显微镜进行观测.

通过设计工艺试验和磨损试验来分别研究工艺参数和刀具磨损情况对碳纤维复合材料小孔加工的影响, 具体试验参数如表 2 所示.

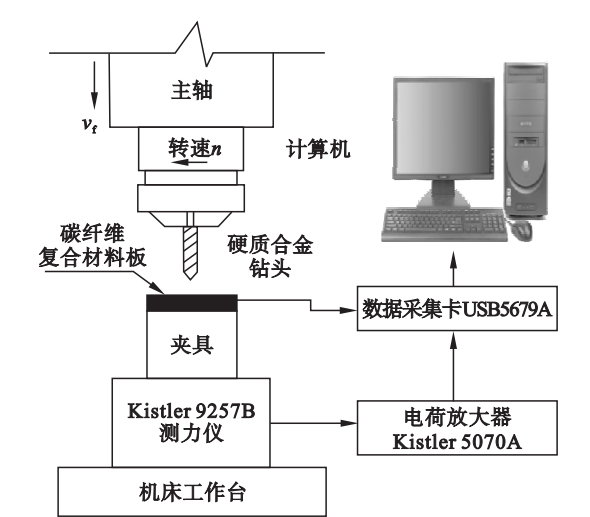


图 1 钻削加工和测试系统原理图
Fig. 1 Schematic diagram of the drilling and testing system

表 2 试验参数		
Table 2 Experiment parameters		
试验类型	主轴转速 $\times 10^{-3}$	进给速度
	$r \cdot \min^{-1}$	$mm \cdot \min^{-1}$
工艺试验	2, 4, 6, 8	20, 40, 60, 80
磨损试验	6	40

2 试验结果分析

2.1 工艺参数对钻削力的影响

2.1.1 工艺参数对钻削轴向力的影响

图 2 是不同进给速度下, 轴向力随转速的变化曲线. 从图中可以看出, 当进给速度分别为 20, 40, 60 和 80 mm/min 时, 随着主轴转速从 2 000 增大至 8 000 r/min, 轴向力均呈减小的趋势, 其减小的幅度略有不同, 分别为 45.89%, 49.15%, 49.95% 和 47.46%. 在试验研究的参数范围内, 进给速度为 20 mm/min 时的轴向力值相对较小.

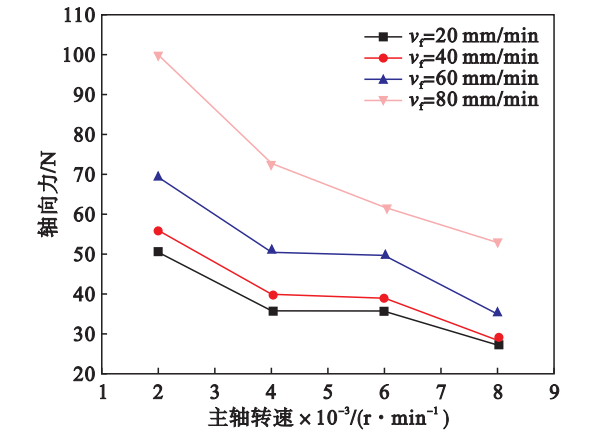


图 2 轴向力随主轴转速的变化曲线
Fig. 2 Effect of spindle speed on thrust force

2.1.2 工艺参数对钻削扭矩的影响

图 3 是不同进给速度下,扭矩随主轴转速的变化曲线. 由曲线可得,随着主轴转速的增大,扭矩值略有下降. 在试验研究的参数范围内,进给速度为 20 mm/min 时的钻削扭矩值相对较小.

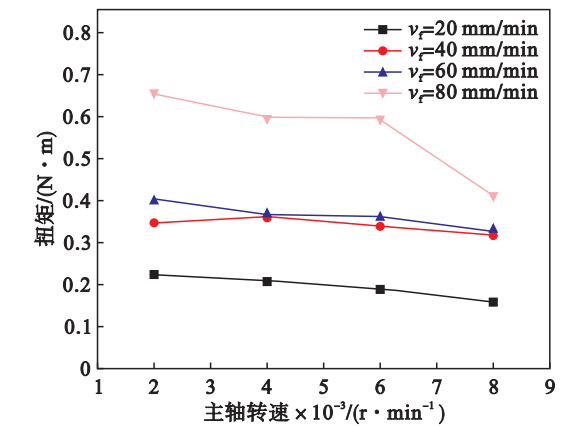


图 3 扭矩随主轴转速的变化曲线
Fig. 3 Effect of spindle speed on torque

2.2 钻削力回归模型的建立

通过上述工艺参数对钻削力影响的分析可知,碳纤维复合材料小孔加工时的轴向力 F 和扭矩 M 与转速 n 和进给速度 v_f 有关. 由金属切削理论,切削力与切削参数之间呈一定的指数关系. 因此,设钻削力与转速和进给速度间满足指数关系式:

$$F = C_F n^{k_1} v_f^{k_2}, \tag{1}$$

$$M = C_M n^{k'_1} v_f^{k'_2}. \tag{2}$$

式中, $C_F, C_M, k_1, k_2, k'_1, k'_2$ 为待求系数.

对式(1),式(2)两端求对数,得

$$\lg F = \lg C_F + k_1 \lg n + k_2 \lg v_f, \tag{3}$$

$$\lg M = \lg C_M + k'_1 \lg n + k'_2 \lg v_f. \tag{4}$$

设 $\lg F = y, \lg C_F = a_0, \lg n = x_1, \lg v_f = x_2$, 则有

$$y = a_0 + k_1 x_1 + k_2 x_2. \tag{5}$$

同理, 设 $\lg M = y', \lg C_M = b_0, \lg n = x_1, \lg v_f = x_2$, 则有

$$y' = b_0 + k'_1 x_1 + k'_2 x_2. \tag{6}$$

将实验数据代入数据分析软件 MATLAB 中进行多元线性回归, 可得相应的回归系数, 求得轴向力和扭矩的回归公式分别为

$$F = 358.5915 n^{-0.4358} v_f^{0.4310}, \tag{7}$$

$$M = 102.306 n^{-0.1688} v_f^{0.6915}. \tag{8}$$

对回归系数进行方差分析以证明回归公式的有效性, 如表 3 和表 4 所示. 可决系数 R 是判定回归关系式对试验数据拟合程度的指标, 可决系数越接近于 1 则拟合度越好. 本试验中, 轴向力和扭矩取对数后的可决系数 R 分别为 0.963 1 和

0.952 3, 说明回归变量对样本数据点的拟合程度比较好, 即上述建立的钻削力经验公式具有一定的实际应用价值.

表 3 轴向力的回归方差分析
Table 3 Regression variance analysis of the thrust force

方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F 值	F_α	显著性
转速	0.155 3	1	0.155 3	40.515 4	4.667 2	高度显著
进给速度	0.151 9	1	0.151 9	39.620 6	9.073 8	高度显著
回归	0.307 2	2	0.153 6	40.068 0	3.805 6	高度显著
误差	0.049 8	13	0.003 8	—	6.701 0	—
总和	0.357 0	15	—	—	—	—

表 4 扭矩的回归方差分析
Table 4 Regression variance analysis of the torque

方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F 值	F_α	显著性
转速	0.023 3	1	0.023 3	7.122 7	4.667 2	显著
进给速度	0.391 0	1	0.391 0	119.572 5	9.073 8	高度显著
回归	0.414 3	2	0.207 1	63.347 6	3.805 6	高度显著
误差	0.042 5	13	0.003 3	—	6.701 0	—
总和	0.456 8	15	—	—	—	—

2.3 刀具磨损对制孔毛刺的影响

碳纤维复合材料常见的制孔损伤有毛刺、分层和撕裂. 通过对小孔钻削试验中孔的出口形貌观察发现, 撕裂损伤并不多见, 而毛刺损伤在绝大部分试验孔中都存在. 毛刺损伤的产生是由于刀具切削刃不够锋利, 在制孔出口处未能将纤维沿孔边缘整齐切断而使其残留在材料表面而形成的. 因此, 可以通过刀具磨损试验来研究毛刺损伤的产生规律.

采用一把新的硬质合金钻头对碳纤维复合材料进行连续钻削试验, 用超景深显微镜观察刀尖形貌和孔出口形貌的变化情况, 如表 5 所示. 随着制孔个数的增加, 刀具磨损程度逐渐加重, 孔出口的毛刺在数量和损伤程度上也都有所加重, 制孔质量越来越差.

观察发现, 钻头后刀面的磨损带为由刀尖向横刃逐渐变窄的一狭长区域. 刀尖处由于散热条件差, 切削刃强度弱, 磨损速率最快. 因此, 以刀尖处的磨损量来评价刀具的磨损程度, 具体测量位

置如图 5 所示。

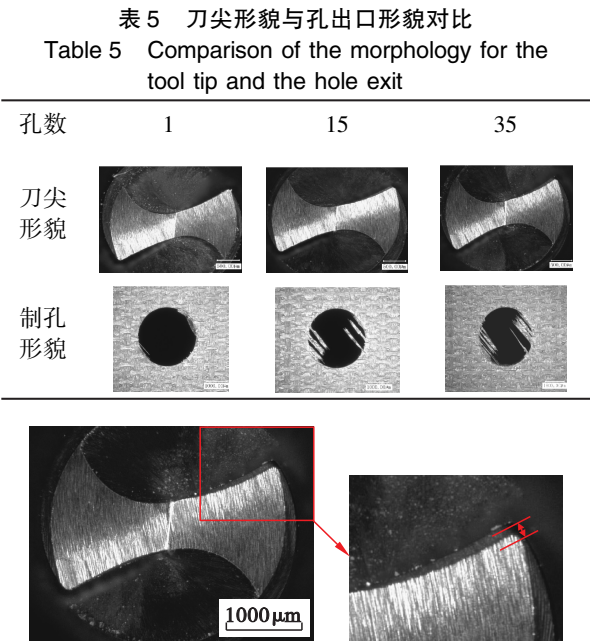


图 5 钻头磨损量的测量位置

Fig. 5 Measurement position of tool wear

试验中,每加工 2 个孔,用超景深显微镜测量麻花钻后刀面磨损量值。将两主切削刃后刀面磨损量值求和,得到其随制孔个数的变化情况,如图 6 所示。可以看出,随着制孔个数的增加,磨损量逐渐增大,拟合曲线符合常规刀具磨损曲线的 3 个阶段,即:在制孔个数小于 11 时,刀具磨损量迅速增大;随后磨损量曲线平缓上升,即稳定磨损阶段;当制孔个数大于 31 之后,磨损量超过 90 μm ,磨损曲线斜率增大,表明刀具进入剧烈磨损阶段,需重新刃磨或更换新刀。

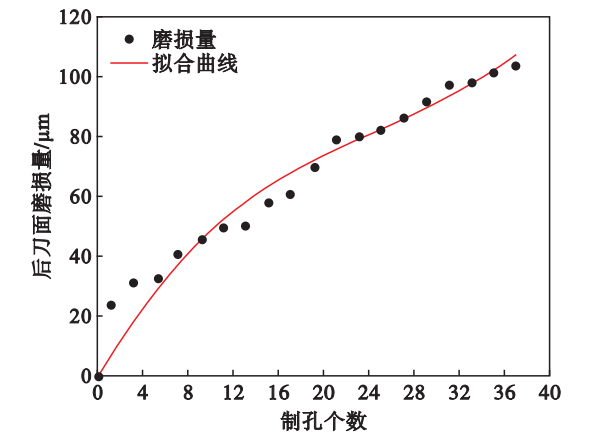


图 6 刀具后刀面磨损量随制孔个数的变化

Fig. 6 Change of tool wear with number of holes drilled

对制孔出口处的毛刺进行统计,计算每一部分的毛刺面积,记为 A_i ,将孔周所有毛刺的面积求和得到 $\sum A_i$, $\sum A_i$ 值反映毛刺损伤的严重程

度。随着刀具磨损量的加大,钻削扭矩值逐渐增大,图 7 是毛刺面积 $\sum A_i$ 与扭矩之间的关系图。图中,毛刺面积的分布有一定分散性,反映了碳纤维复合材料制孔毛刺的产生具有一定的随机性,但其总体趋势是随着扭矩值的增大而增大。

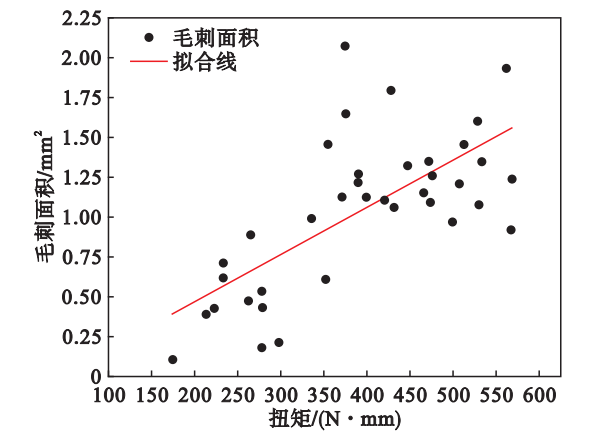


图 7 毛刺面积与扭矩的关系

Fig. 7 Relationship between burr area and torque

采用线性拟合描述毛刺面积与扭矩值之间的关系,得到毛刺面积的计算公式为

$$\sum A_i = -0.10622 + 0.0029247M. \quad (9)$$

3 钻削工艺参数优化

3.1 目标函数

为了提高钻削效率,以最大材料去除率 Q 为优化目标,即保证碳纤维复合材料钻削质量的前提下,通过优化钻削工艺参数以实现最大的加工效率,则优化目标函数可以表示为

$$Q = \pi a_p^2 n f. \quad (10)$$

其中: a_p 为切削深度,对于钻削加工其值为钻头直径的一半; n 为主轴转速; f 为刀具每转进给量。

3.2 约束条件

分层损伤会显著降低复合材料及其连接结构的力学性能,因此,保证碳纤维复合材料小孔的钻削质量意味着加工后不能产生分层损伤。另外,毛刺损伤虽无法避免,也要将其控制在一定的允许范围内。

1) 分层损伤。研究表明分层的产生是由于加工时轴向力超过一定数值即临界轴向力而引起的。因此,采用临界轴向力作为约束条件。麻花钻作用下各向异性复合材料板的临界轴向力 F_{cri} 为^[9]

$$F_{\text{cri}} = 8\pi \left(\frac{G_{\text{IC}} D}{\frac{1}{3} - \frac{D'}{8D}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

$$D = \frac{1}{8}(3D_{11} + 2D_{12} + 4D_{66} + 3D_{22}) \text{ . } \quad (12)$$

$$D' = \frac{D_{11} + D_{12}}{2} + \frac{D_{12} + D_{66}}{3} \text{ . } \quad (13)$$

$$|D_{ij}| = \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k \left(\frac{Z_k^3 - Z_{k-1}^3}{3} \right) \text{ . } \quad (14)$$

其中: G_{IC} 为 I 型裂纹的临界应变能释放率; D_{ij} 为弯曲刚度系数.

对于试验中采用的复合材料层合板,每单层厚度为 0.125 mm, G_{IC} 为 150 J/m^[9],计算得临界轴向力值为 167.166 N.代入轴向力与工艺参数的回归关系式(7),可得边界约束方程为

$$F = 358.5915n^{-0.4358}v_f^{0.4310} \leq 167.166 \text{ . } \quad (15)$$

2) 毛刺损伤.利用 2.3 节中建立的毛刺面积拟合式(9),将毛刺损伤程度作为一个约束条件.由磨损试验可知,刀具进入剧烈磨损阶段后制孔质量较差,不适用于实际应用.因此,选取刀具发生急剧磨损时孔周毛刺面积的统计值作为毛刺损伤的临界值.另外,为了减少毛刺产生的随机性的影响,取第 30,31,32 个孔的毛刺面积的平均值 1.287 作为约束边界,得到约束方程为

$$\sum A_i = -0.10622 + 0.0029247 \times 102.306n^{-0.1688}v_f^{0.6915} \leq 1.287 \text{ . } \quad (16)$$

将以上目标函数和边界约束方程导入 MATLAB 软件,借助 linprog 线性优化函数进行全局优化,结果如表 6 所示.

表 6 工艺参数优化结果
Table 6 Optimization results of the process parameters

主轴转速 r·min ⁻¹	进给速度 mm·min ⁻¹	材料去除率 mm ³ ·min ⁻¹
8 000	82.99	586.61

在本文的试验条件下,麻花钻钻削碳纤维复合材料的最大材料去除率为 586.61 mm³/min,对应的主轴转速为 8 000 r/min,进给速度为 82.99 mm/min.

4 结 论

1) 本文开展了碳纤维复合材料直径 3 mm 小孔钻削试验,通过对试验数据进行多元线性回归,得到了钻削轴向力、扭矩与转速、进给速度的关系式,并通过方差分析验证了回归关系式对试验数据的拟合程度较好.

2) 刀具磨损导致制孔质量变差,采用硬质合金钻头钻削碳纤维复合材料的制孔个数大于 31

时,磨损曲线斜率增大,刀具进入剧烈磨损阶段;制孔毛刺的产生具有一定的随机性,总体变化趋势是随着扭矩值的增大而增大.

3) 以材料去除率最大为优化目标,在钻削后无分层且毛刺损伤满足使用要求的约束条件下,获得了本文试验条件下麻花钻钻削碳纤维复合材料的最优工艺参数:主轴转速 8 000 r/min,进给速度 82.99 mm/min,对应的材料去除率为 586.61 mm³/min.

参考文献:

[1] 肖梦丽,张勇波,王治华,等. 分层损伤对含孔复合材料层合板剩余强度影响[J]. 航空动力学报,2016,31(5):1081-1086.
(Xiao Meng-li, Zhang Yong-bo, Wang Zhi-hua, et al. Effect analysis of delamination damage on the residual strength of notched composite laminates [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(5): 1081-1086.)

[2] Mishra R, Malik J, Singh I, et al. Neural network approach for estimating the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(6): 2790-2795.

[3] 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.
(Chen Yan, Ge En-de, Fu Yu-can, et al. Review and prospect of drilling technology for CFRP [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(2): 301-316.)

[4] Liu D F, Tang Y J, Cong W L. A review of mechanical drilling for composite laminates [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(4): 1265-1279.

[5] 李桂玉,汪海晋,孙杰,等. 基于复合材料钻削缺陷容差值的工艺参数优化[J]. 复合材料学报,2014,31(4):1022-1029.
(Li Gui-yu, Wang Hai-jin, Sun Jie, et al. Process parameter optimization based on the defects tolerance of drilling composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(4): 1022-1029.)

[6] Azmir M A, Sivasankaran P N, Hamedon Z. Experimental study on drilling process of CFRP composite laminate [J]. *Materials Science Forum*, 2010, 638/639/640/641/642: 927-932.

[7] Abhishek K, Datta S, Mahapatra S S. Optimization of thrust, torque, entry, and exist delamination factor during drilling of CFRP composites [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(1): 401-416.

[8] Krishnaraj V, Prabukarthi A, Ramanathan A, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(4): 1791-1799.

[9] Lachaud F, Piquet R, Collombet F, et al. Drilling of composite structures [J]. *Composite Structures*, 2001, 52(3): 511-516.