

麻花钻几何参数对碳纤维复合材料钻削性能的影响

陈浩¹ 李鹏南¹ 唐思文² 邱新义¹

(1 湖南科技大学机电工程学院,湘潭 411201)

(2 湖南科技大学,先进矿山装备教育部工程研究中心,湘潭 411201)

文 摘 采用不同几何参数硬质合金麻花钻对碳纤维复合材料(CFRP)进行钻削试验,研究了麻花钻几何参数对钻削轴向力、钻削温度、孔出口撕裂因子 L_d 及形貌的影响。结果表明:对CFRP进行钻削加工时,钻削轴向力随钻尖角的增大、螺旋角的减小及横刃长度的增大而增大。钻尖角和螺旋角对钻削温度无明显影响,随横刃长度的减小,钻削温度有所降低。小钻尖角和大螺旋角麻花钻制孔的出口撕裂因子 L_d 较小且形貌较好。综合考虑,钻尖角 2θ 选在 $90^\circ \sim 115^\circ$,螺旋角 β 选用 30° 甚至更大,横刃长度 b_ψ 修磨到 $0.2 \sim 0.6$ mm比较合适。

关键词 CFRP,麻花钻几何参数,钻削轴向力,钻削温度,撕裂因子

中图分类号: TG52

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.03.015

Effects of the Geometrical Parameter of Twist Drill on the Drilling Properties of Carbon Fiber Reinforced Plastics

CHEN Hao¹ LI Pengnan¹ TANG Siwen² QIU Xinyi¹

(1 College of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 Engineering Research Center of Advanced Mining Equipment, Ministry of Education, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) composite was drilled by different geometrical carbide twist drills. The effects of geometric parameter on drilling axial force, drilling temperature, hole exit tear factor L_d and morphology were studied. The results show that the axial force increased with the increase of point angle and the length of chisel edge, and the decrease of helix angle. Point angle and helix angle had not obviously effects on drilling temperature, but drilling temperature decreased with the decrease of the length of chisel edge. Using twist drill with small point angle and large helix angle can obtain smaller tear factor L_d and better morphology. In consideration, point angle 2θ election in the 90° to 115° , helix angle β choice 30° or even greater and the length of chisel edge b_ψ grinding to 0.2 to 0.6 mm are more appropriate.

Key words CFRP, Geometrical parameter of twist drill, Drilling axial force, Drilling temperature, Tear factor

0 引言

碳纤维复合材料,即CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic),以其高比硬度、高比强度、高阻尼、高抗腐蚀性和低热膨胀系数等诸多优点,已被广泛应用于航空、国防和交通运输结构件^[1]。在CFRP的应用领域中不可避免的要进行大量的制孔加工。复合材料的制孔过程中会遇到诸多难题,如在孔的入口处出

现毛刺以及出口处出现分层甚至撕裂。据统计,飞机在最后组装时因钻孔不合格而报废的零件数要占全部报废零件的60%以上^[2]。因此,CFRP钻削加工的研究对提高飞行器性能、减少材料浪费、延长连接部位的使用寿命具有重要的实际意义。

以往众多专家学者在改进碳纤维复合材料制孔工艺和改善加工质量等方面做了很多工作。Hocheng

收稿日期:2015-02-06

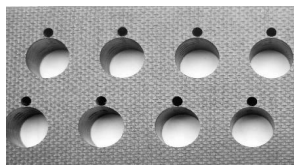
基金项目:"高档数控机床与基础制造装备"科技重大专项(2012ZX04003031);国家自然科学基金(No.51275168, No.51305134)

作者简介:陈浩,1989年出生,硕士研究生,研究方向为碳纤维复合材料加工系列化工具切削性能评价。E-mail:hnhc89@163.com

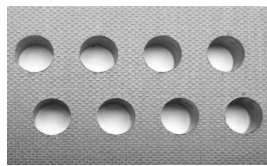
和 Tsao 通过试验手段得出了分层缺陷的形成机理,给出了分层缺陷和进给速度的关系,并研究了不同钻头和出口加垫板的方式对加工质量的影响^[3]。张厚江指出随着进给速度、钻头直径和轴向力等因素的增大,撕裂缺陷将变得严重;钻头转速的增大将使撕裂值变小;将切削速度与进给速度比值控制在 3 000~4 000 以下,可以有效地减小撕裂值^[4]。刘汉良介绍了几种适合于碳纤维和芳纶纤维复合材料机械加工的钻削和铣削刀具^[5]。王明海和孙国强通过有限元仿真表明小角度螺旋槽钻头加工 CFRP 时产生的轴向力小于麻花钻^[6]。李光等人选取主轴转速、进给速度、钻头螺旋角三因素建立了碳纤维复合材料钻孔入口缺陷 BP 网络预测模型^[7]。Tsao 对比分析了麻花钻和烛台钻的加工质量^[8]。从已公布文献来看,刀具几何参数对 CFRP 制孔加工质量影响缺少系统的研究。本文用不同几何参数麻花钻对 T700 碳纤维复合材料进行钻削试验,考察钻尖角、螺旋角和横刃长度对钻削力、钻削温度、孔出口撕裂因子及形貌的影响,以期为专用碳纤维复合材料钻头的开发提供理论参考。

1 试验方法与条件

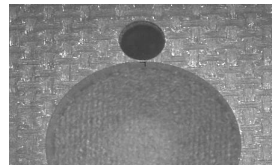
1.1 试验材料及设备



(a) 钻入面



(b) 钻出面



(c) 试验孔与埋丝孔的距离

图 1 埋丝小孔

Fig. 1 Buried wire holes

1.2 试验方法

使用上述钻头对 CFRP 进行钻削加工,其单因素试验方案如表 1 所示。每支钻头加工 5 个孔,加工参

本文以 T700 碳纤维复合材料板为试验材料,其基体材料为 LT-03A 型树脂,铺层形式为:[0/+90/-/0/0/+90/-/0/0/-/90/+0/0/-/90/+0] s,纤维体积比是 60%,材料厚 5.3 mm,大小为 200 mm×300 mm。钻削刀具采用牌号为 YG6X 的整体硬质合金棒料,用 ANCA 的 RX7 磨床精磨出 15 支钻头,其几何参数的取值范围如下: 2θ 为 80~140°, β 为 14~30°, b_ψ 为 0.2~1.0 mm。

钻削试验测力系统由 kistler 9253B23 三向压电式测力仪、5080 型电荷放大器、PCIM-DAS1602/16 数据采集卡和切削力采集软件 DynoWare 构成,设置采样频率为 10 kHz。钻削后采用 KEYENCE VHX-500 FE 超景深三维显微系统对不同钻尖角 2θ 、螺旋角 β 钻头第三次钻削 T700 后的出口形貌进行观察、拍照和测量。

试验采用热电偶法进行试验测温。在试件上钻直径为 1.4mm 盲孔,用于预埋热电偶,由于钻削碳纤维层合板温度最高出现在层合板厚度一半偏下的地方^[9],根据实验用碳纤维层合板厚 5.2 mm 来钻盲孔深度为 3.5 mm,埋入 K 型热电偶用于检测孔壁处切削区域的温度。实验孔和埋丝孔之间相隔 0.1 mm,如图 1 所示。

数为:主轴转速 $n=2\ 500\ \text{r/min}$,进给速度 $f=50\ \text{mm/min}$ 。分别取钻削第 1、第 3、第 5 孔所得最大轴向力 F_z 和所有 5 个孔最高温度的平均值 T 。

表 1 单因素试验方案

Tab. 1 Single factor test program

试验号	钻尖角 $2\theta / (^\circ)$	螺旋角 $\beta / (^\circ)$	横刃长度 b_ψ / mm	试验号	钻尖角 $2\theta / (^\circ)$	螺旋角 $\beta / (^\circ)$	横刃长度 b_ψ / mm
1	80			9		26	
2	95			10		30	
3	110	26	未修磨	11			0.2
4	125			12			0.4
5	140			13	118	26	0.6
6		14		14			0.8
7		18		15			0.1
8	118	22	未修磨				

2 结果与分析

用所得数据处理的一系列曲线图,找出钻尖角 2θ 、螺旋角 β 、横刃长度 b_ψ 对钻削轴向力 F_z 、钻削温度 T 、孔出口撕裂因子 L_d 及形貌的影响规律,并进行分析。

2.1 2θ 对 F_z 和 T 的影响

图2和图3分别给出了钻削T700时 F_z 、 T 随 2θ 的变化曲线。可以看出:当 2θ 增大, F_z 显著上升, T 略微增大。以第三个孔为例,当 2θ 从 80° 变为 140° , F_z 从54.8 N增加到74 N,增长了35%。

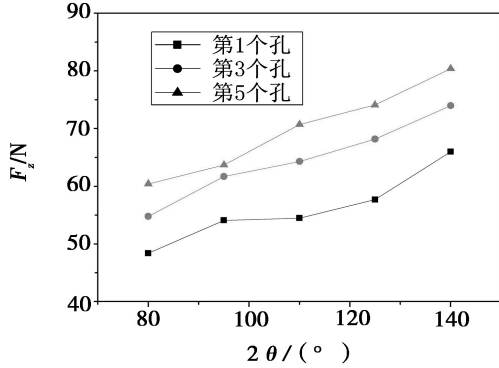


图2 轴向力随钻尖角的变化曲线

Fig.2 Variety curves of axial forces at different drill point angle

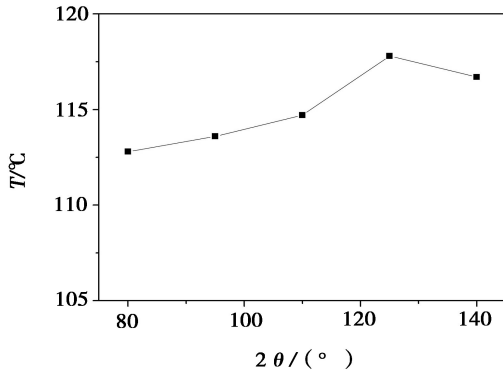


图3 温度随钻尖角的变化曲线

Fig.3 Variety curves of temperatures at different drill point angle

2θ 对钻头结构影响很大。改变 2θ 时,麻花钻的主切削刃1、前角 γ_o 、横刃长度 b_ψ 及后角 α_f 都会有一定变化,从而影响 F_z 的大小。主偏角随 2θ 增大而增大,如图4所示,所以主切削刃上的进给力 F_p 在主轴方向的分力 F_f 变大,从而 F_z 变大。 2θ 的变化对横刃也有明显影响。当 2θ 增大时,横刃斜角 ψ 会减小, b_ψ 增大,导致 F_z 增大。

此外,因为切削宽度 $a = d / (2 \sin \theta)$,所以随 2θ 增大切削宽度 a 会变小,即切屑变窄,不利于钻削热的扩散,从而钻削温度升高。实验中当 2θ 为 80° 时出现了微崩刃,造成孔壁粗糙。 2θ 小于 118° 时切削刃呈宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第3期

凸形,可以抑制毛刺的产生,并且有利于切屑沿螺旋槽滑移排出。

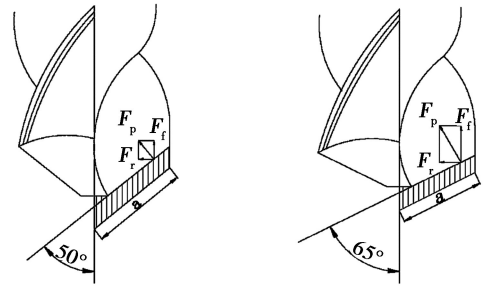


图4 不同钻尖角时钻削力的分配情况

Fig.4 Distribution of drilling force at different drill point angle

2.2 β 对 F_z 和 T 的影响

图5和图6分别给出了钻削T700时 F_z 、 T 随 β 的变化曲线。可以看出:当 β 增大时, F_z 平缓下降, T 无明显变化。以第三个孔为例,当 β 从 14° 变为 30° , F_z 从73 N减小到64.3 N,降低了12%。

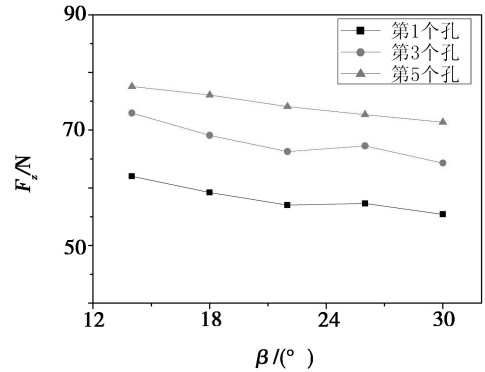


图5 轴向力随螺旋角的变化曲线

Fig.5 Variety curves of axial forces at different helical angle

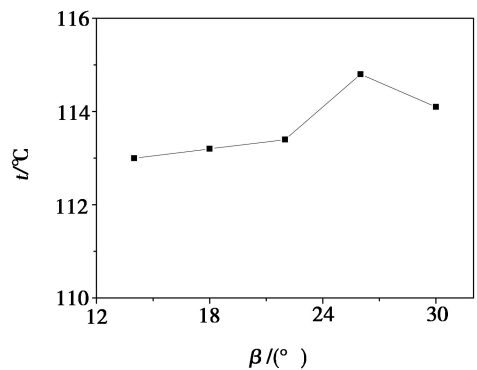


图6 温度随螺旋角的变化曲线

Fig.6 Variety curves of temperatures at different helical angle

β 为钻头外圆柱面和螺旋槽交线的切线与钻头轴线的夹角。而钻头前角由螺旋角形成。主切削刃上任一点前角 γ_{oy} 可用式^[9](1)计算:

$$\tan \gamma_{oy} = \frac{\tan \beta_y}{\sin \kappa_{ty}} + \tan \lambda_{ty} \cos \kappa_{ty} \quad (1)$$

式中, β_y 为任意点的螺旋角; K_{ry} 为任意点的主偏角; λ_{ty} 为任意点的端面刃倾角。

从式明显看出螺旋角越大, 则前角越大, 能使切削轻快, 降低了轴向力且有利于排屑。但若螺旋角过大, 则削弱了切削刃的强度、刚度和散热条件。钻削 CFRP 时可以考虑选用大螺旋角钻头。

2.3 b_ψ 对 F_z 和 T 的影响

图 7 和图 8 分别给出了钻削 T700 时 F_z 、 T 随 b_ψ 的变化曲线。可以看出: 当 b_ψ 增大时, F_z 持续增大, T 上升。以第三个孔为例, 当 b_ψ 从 0.2 mm 变为 1.0 mm, F_z 从 54 N 增加到 66 N, 增长了 22.2%。 T 从 108℃ 升高到 116℃, 增长了 7.4%。

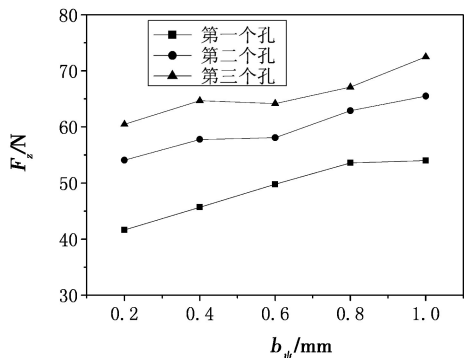


图 7 轴向力随横刃长度的变化曲线

Fig. 7 Variety curves of axial forces

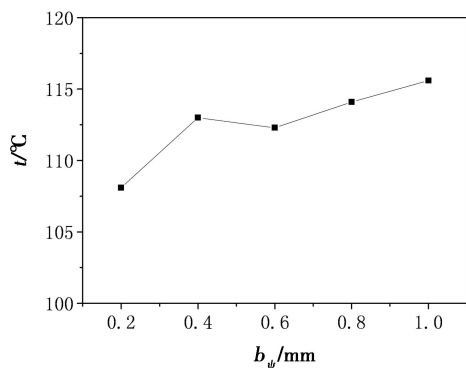


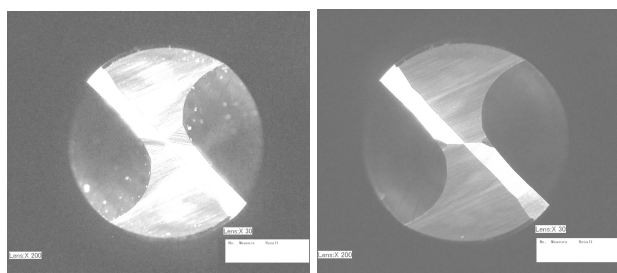
图 8 温度随横刃长度的变化曲线

Fig. 8 Variety curves of temperatures at different chisel edge length edge length

横刃是两个主后面的相交线, b_ψ 为横刃长度, 横刃前角 $\gamma_{o\psi}$ 为负值, 钻削时横刃处发生严重挤压而造成很大的轴向力。通常横刃的轴向力约占全部轴向力的 50% 以上^[11]。

5 支钻头分别用 45° 薄片砂轮沿原来的横刃外缘端进行修磨, 主要作用是将横刃缩短到 (0.03 ~ 0.17) d , 同时大大增加了修磨处的前角, 有利于分屑和断屑, 增大了钻芯部分的排屑空间 (图 9), 降低了横刃热源对钻削温度的影响。所以修磨横刃能显著降低轴向力, 同时一定程度上降低钻削温度。考虑到横刃

越长的麻花钻临界轴向力越小, 那么在加工过程中就越容易产生分层, 并且缩短横刃长度有利于减少切削抗力, 能够有效地提高刀具耐用度。但是无横刃钻头的定心不好、钻心强度不够, 故钻削 CFRP 时钻头横刃修磨到 0.2 ~ 0.6 mm 比较合适。



(a) 0.2mm

(b) 1mm

图 9 修磨后的横刃

Fig. 9 Grinded of chisel edge

2.4 2θ 和 β 对 L_d 及形貌的影响

碳纤维复合材料 (CFRP) 钻削出口缺陷主要包括分层、撕裂和毛刺。撕裂和毛刺均产生于孔的出口侧最外层, 并且撕裂缺陷有沿孔出口纤维方向扩展的特点。CFRP 钻削加工中, 孔出口的撕裂和毛刺是最直观的缺陷, 也是常见的缺陷, 对最终装配质量产生重要影响, 是评价制孔质量高低的重要指标。本文中, 采用撕裂因子法对孔出口缺陷进行评价: $L_d = D_{max}/D$, 其中 D_{max} 为最大撕裂区的直径, D 为孔的名义直径。图 10 和图 11 分别给出了不同 2θ 、 β 与第三个孔出口 L_d 之间的关系, 可以看到 L_d 随 2θ 的增大而增大, 随 β 的增大有减小的趋势。图 12 和图 13 分别为其第三次钻削 T700 后的出口形貌图。根据图可见, 小钻尖角钻头孔的出口质量明显好于大钻尖角钻头孔的出口质量; 大螺旋角钻头孔的出口质量好于小螺旋角钻头孔的出口质量。

撕裂缺陷主要由钻出阶段的轴向力引起的, 两者大小的变化规律相同。在钻孔过程中, F_z 一直施加在纤维板上, 使得复合材料层合板的每一层沿厚度方向上依次受到压力, 因而在孔壁周围的纤维层中产生层间应力。当此层间应力超出纤维间的粘接强度时, 会产生分层缺陷甚至于撕裂缺陷。 F_z 随 2θ 的增大和 β 的减小而增大, 所以小钻尖角和大螺旋角钻头孔出口 L_d 明显小很多。图中毛刺主要是由于钻头在旋转过程中主切削刃未能将纤维整齐切断, 小钻尖角钻头的主切削刃更长为凸形, 更容易切断纤维, 且参与切削的时间更长, 所以毛刺减少; 大螺旋角钻头主切削刃外缘端前角显著增大, 更容易整齐切断纤维, 且副切削刃能更好的修去毛刺, 所以毛刺更少, 形貌更好。综合考虑, 硬质合金麻花钻钻削 CFRP 时 2θ 选在 90° ~ 115° 比较合适, β 选用 30° 甚至更大比较合适。

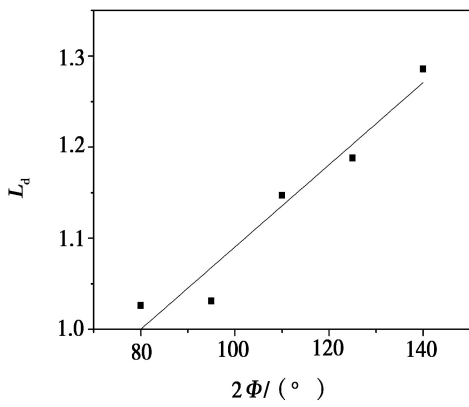


图 10 钻尖角对撕裂因子的影响

Fig. 10 Tear factor change due to drill point angle

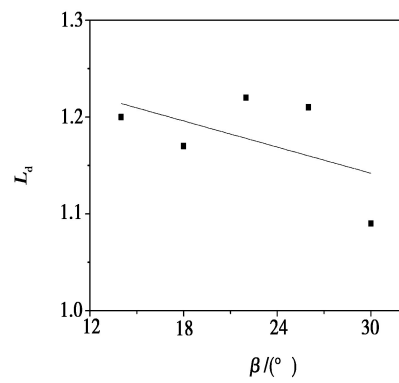


图 11 螺旋角对撕裂因子的影响

Fig. 11 Tear factor change due to helical angle

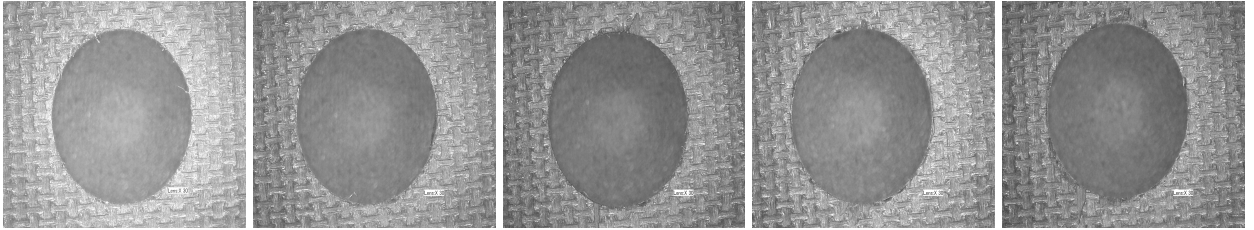


图 12 不同钻尖角钻头制孔出口 30×

Fig. 12 Drilling export

a-2θ为80°, b-2θ为95°, c-2θ为110°, d-2θ为125°, e-2θ为140°。

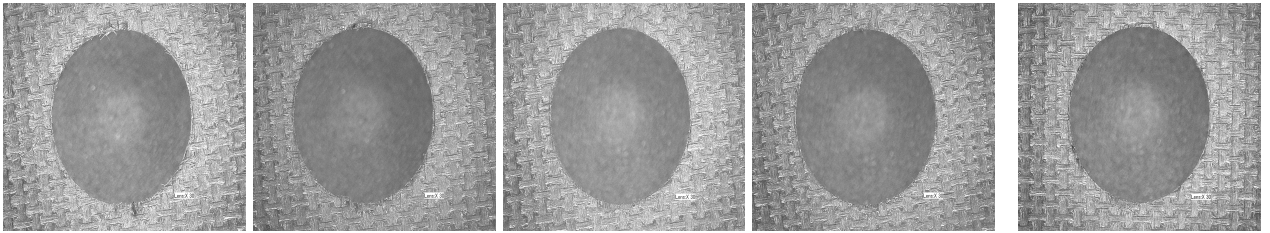


图 13 不同螺旋角钻头制孔出口 30×

Fig. 13 Drilling export

a-β为14°; b-β为18°; c-β为22°, d-β为26°, e-β为30°。

3 结论

(1) 对 CFRP 进行钻削加工时, F_z 随 2θ 的增大而增大, 随 β 的增大而减小, 随 b_ψ 的增大而增大。

(2) 对 CFRP 进行钻削加工时, 2θ 和 β 对 T 无明显影响; 随 b_ψ 的减小, T 有所降低。

(3) 选用小钻尖角和大螺旋角麻花钻对 CFRP 进行钻削加工时孔出口撕裂因子 L_d 较小且形貌较好。综合考虑, 2θ 选在 $90^\circ \sim 115^\circ$, β 选用 30° 甚至更大, b_ψ 修磨到 $0.2 \sim 0.6$ mm 比较合适。

参考文献

[1] Davim J Paulo 著. 陈明, 安庆龙, 等译. 复合材料制孔技术[M]. 国防工业出版社. 2013:1-3
 [2] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料的钻削加工[J]. 新技术新工艺. 1998(5):16-18
 [3] Tsao C C, Hocheng H. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using taguchi analysis and neural network. Journal of materials processing technology[J]. 2008, 203: 342-348

[4] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削出口缺陷的研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7):150-155

[5] 刘汉良, 张加波, 王震. 碳纤维与芳纶纤维复合材料机械加工刀具选用[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(4):95-98

[6] 王明海, 孙国强, 孙越. 小角度螺旋槽钻头加工复合材料的模拟研究[J]. 制造技术与机床, 2012(12):183-187

[7] 李光, 刘汉良, 张加波, 等. 基于 BP 网络的碳纤维复合材料钻削入口缺陷[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(1):127-130

[8] Tsao C C. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill [J]. Materials and Design, 2008, 29(9):1740-1744

[9] 李桂玉, 李剑峰, 孙杰, 等. 硬质合金钻头钻削碳纤维增强复合材料工艺[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2010, 15(6):580-585

[10] 袁哲俊, 刘华明. 孔加工刀具、铣刀、数控机床用刀具系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2009:3-5

(编辑 任涛)