三种钻头钻削CFRP的制孔损伤对比

邱新义[1]　李鹏南[1]　陈安华[2]　牛秋林[1]　刘　峰[1]

（1　湖南科技大学机电工程学院，湘潭　411201）

（2　湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室，湘潭　411201）

文　摘　采用二刃双锋角钻头、三刃双锋角钻头和圆弧形钻头在不同加工参数下钻削CFRP，对比分析了孔入出口质量（入口损伤、毛刺和出口撕裂），并采用毛刺存在角度来衡量毛刺的多少。结果表明：随着进给量的增大毛刺存在的角度（范围）α先减小后增大；综合考虑孔入口和出口质量（毛刺和撕裂因子），三刃双锋角钻头最适合钻CFRP。

关键词　毛刺，撕裂因子，CFRP，双锋角钻头

中图分类号：TB33　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2019.01.013

Comparison on Hole Damage of Drilling CFRP With Three Kinds of Drills

QIU Xinyi[1]　LI pengnan[1]　CHEN Anhua[2]　NIU Qiulin[1]　LIU feng[1]

（1　School of Mechanical Engineering，Hunan University of Science and Technology，Xiangtan　411201）

（2　Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment，Hunan University of Science and Technology，Xiangtan　411201）

Abstract　In this paper，the two-edged double point angle drill，three-edged double point angle drill and arc-shaped drill were used to drill UD-CFRP under different cutting parameters. The hole entry and exit quality（entrance damage，burr and exit delamination）were analyzed. And the burrs exist angle（α）was used to measure the number of burrs. The experimental results show that the angle α decreases first and then increases with the increase of the feed rate. Taking into account the quality of the entry and exit（burr and delamination factor），the three-edged double point angle drill is most suitable for drilling CFRP.

Key words　Burr，Delamination factor，CFRP，Double point angle drill

0　引言

CFRP的钻削加工容易在表面产生许多独特的特征，例如裂纹、毛刺、纤维拉出和分层等[1-2]，是一种公认的难加工材料[3]。孔入出口分层是最主要的损伤，这类型的损伤影响零件的装配质量和使用寿命[4]。

毛刺和撕裂通常发生在钻孔的入口和出口两处，毛刺和撕裂对装配精度影响较大[5-7]，近年来愈加引起研究者的兴趣。入口和出口分层的机理不同，分别为钻孔入口处的剥离和钻孔出口处的推出[8]。剥离是在钻头螺旋槽斜面产生的轴向剥离力作用下出现的，而推出分层是在轴向推力作用下产生的。推出分层比剥离分层严重很多。在过去的20年，许多学者对CFRP板的钻孔进行了大量研究，如各种类型的钻头（麻花钻[9]、阶梯钻[10]、三尖钻[9]、双锋角钻头[11]、匕首钻[7]）、刀具的几何参数（直径[12]、钻尖角[13]、螺旋角[14]、横刃长度[15]）及刀具的材料[16]对分层的影响。切削参数[4]对分层的影响主要集中在主轴转速和进给量的研究上，主轴转速对分层的影响较小，而进给量对分层的影响较大。横刃长度减少、钻尖角减少有利于减少孔出口损伤[15]。

在许多研究中发现双锋角钻头钻削CFRP有减小轴向切削力和分层的优势[10]。以往的研究主要关注的是二刃双锋角钻头钻削CFRP，对多刃双锋角钻头和多锋角钻头（圆弧形钻头）的研究很少。本文对比分析二刃双锋角钻头、三刃双锋角钻头和圆弧形钻头（相当于多锋角钻头）钻削CFRP单向板的孔质量（入口损伤、毛刺、出口撕裂），拟为复合材料专用

收稿日期：2018-10-16

基金项目：国家自然科学基金（No.51775184，No.51275168，No.51605161）；湖南省自然科学基金（No.2015JJ5028）

第一作者简介：邱新义，1987年出生，博士研究生，主要从事碳纤维复合材料加工技术研究工作。E-mail：xinyi_q@126.com

钻削刀具的开发提供理论基础。

1　实验设计

材料选用T800S/250F单向层合板，规格为200 mm×200 mm×4.9 mm，碳纤维的体积分数为60%。刀具是硬质合金钻头，钻头直径为6 mm。试验为全因素实验，主轴转速（n）的取值范围1 500~5 500 r/min，进给量（f）的取值范围10~55 μm/r。三种钻头的螺旋角为35°，钻尖角为120°。加工在四川长征机床厂生产的KVC800/1数控加工中心上完成实验。钻削后采用超景深三维显微系统（型号：KEYENCE VHX-500FE）来观测孔入出口质量。

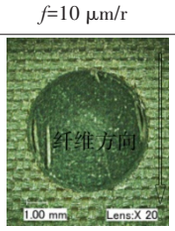
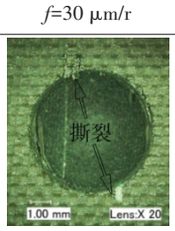
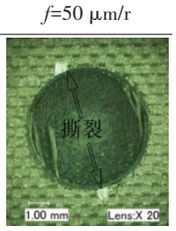
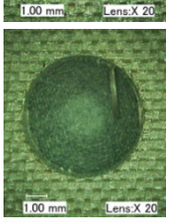
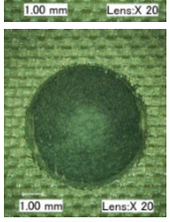
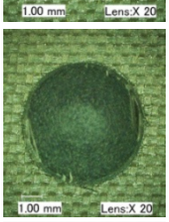
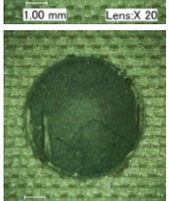
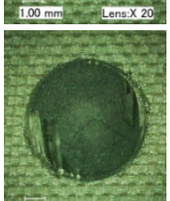
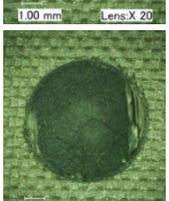
2　结果及分析

2.1　入口损伤

表1是三种钻头钻削孔入口形貌。定义θ为切削速度与纤维方向之间的夹角。二刃双锋角钻头在f≥30 μm/r时，孔入口侧出现了分层损伤，损伤出现在θ为90°~180°。f增大损伤的程度也增大。原因是f增大，被切削层厚度增大，主切削刃剥离开的碳纤维层厚度增大，不容易被切断，造成损伤增大。三刃双锋角钻头和圆弧形钻头的孔入口都没有出现损伤。其原因是三刃双锋角钻头的切削刃有三条，每转f相同的情况下，每齿f比二刃双锋角钻头的小，主切削刃剥离开的碳纤维层厚度小，因此不易形成损伤。

表1　三种钻头钻削孔入口形貌对比

Tab. 1　Comparsion of hole entry morphology

刀具	n=3500 r/min, f=10 μm/r	n=3500 r/min, f=30 μm/r	n=3500 r/min, f=50 μm/r
二刃双锋角钻头			
三刃双锋角钻头			
圆弧形钻头			

2.2　毛刺

用毛刺存在的角度（范围）来作为衡量孔出口质量的一个指标，如图1所示。α用来表示毛刺存在角度。图2是α与加工参数的之间的关系曲线。

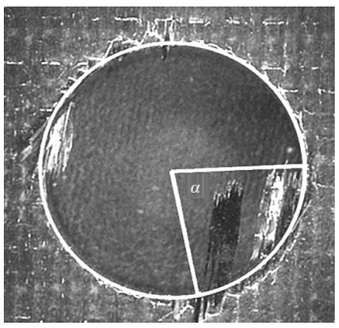
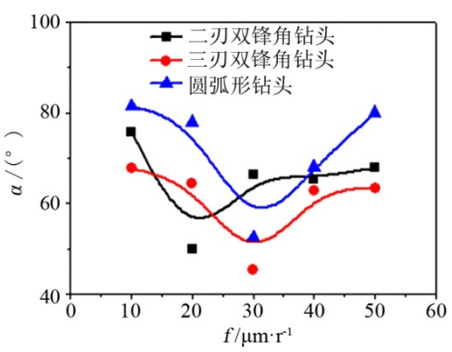
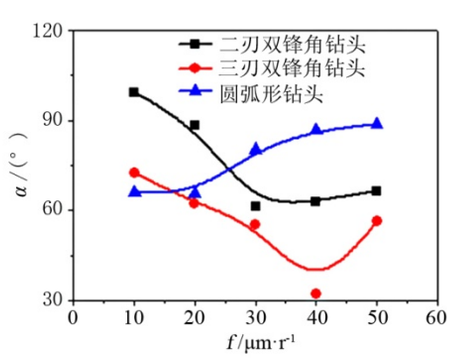


图1　孔出口毛刺存在角度

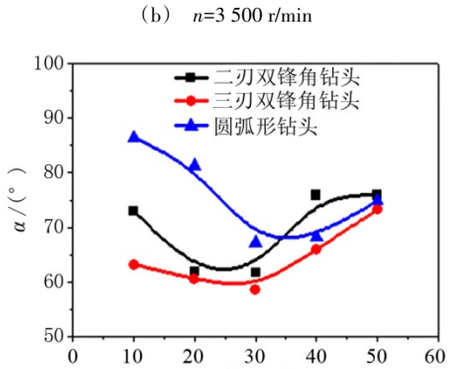
Fig. 1　Burr exist angle at the hole exit



（a）　n=1 500 r/min



（b）　n=3 500 r/min



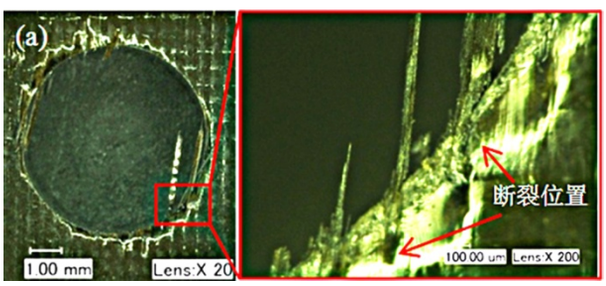
（c）　n=5 500 r/min

图2　孔出口毛刺存在角度与进给量的关系

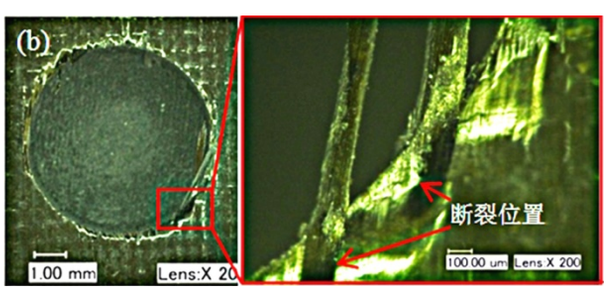
Fig. 2　Relationship between burrs exist angle and feed rate

可以发现，随着f的增大α先减小后增大。二刃双锋角钻头在n=1 500 r/min时，α最小的f为20 μm/r；当n>3 500 r/min时，α最小的f=30 μm/r。三刃双锋角钻头在n=1 500~5 500 r/min时，α最小在f=40 μm/r附近。圆

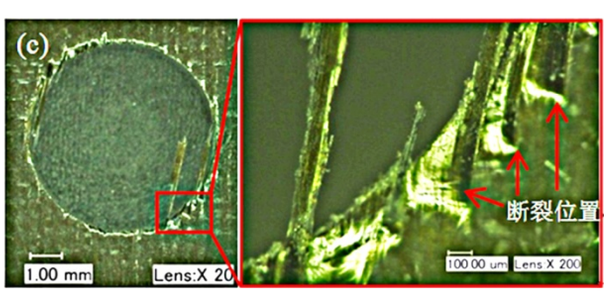
弧形钻头在n=1 500 r/min及5 500 r/min时，α最小的f=40 μm/r；而n=3 500 r/min时，α最小的f=20 μm/r。f>20 μm/r时，三刃双锋角钻头的α相比另外两种钻头要小，且在n=3 500 r/min，f=40 μm/r时，毛刺最少。图3是二刃双锋角钻头在不同f下孔出口处毛刺形貌。



（a） f=10 μm/r



（b） f=20 μm/r



（c） f=30 μm/r

图3 二刃双锋角钻头孔出口毛刺形貌(n=3 500 r/min)

Fig. 3 The morphology of burr exist of two-edged double point angle drill at hole exit

毛刺断裂的位置与孔壁之间的距离是随着f的增加而减少的。在f=10 μm/r时[图3(a)]，毛刺与工件连接的地方变得很小了，有明显断裂的趋势。而在f≥30 μm/r时[图3(b-c)]，毛刺与工件连接的地方依然强劲，没有断裂的趋势。因为f=10 μm/r，钻削轴向力较小，钻头突破孔底面时形成的未切削纤维厚度较小，在小轴向力下容易变形，导致纤维不易被切断而成为毛刺；同时，同样的钻削距离f小的刀具侧刃和外缘转角与毛刺接触的次数多，因此毛刺与工件连接链接的位置变小且有断裂的趋势。当f=50 μm/r时，钻削轴向力很大，钻头突破孔底面时形成的未切削纤维厚度增大，同样纤维不易被切断，最后形成毛刺。因此，f过小和过大都容易形成毛刺。

2.3 撕裂因子

图4是撕裂因子示意图。撕裂因子的计算方法是：F_d=D_{max}/D。图5是孔出口撕裂因子与进给量的关系。

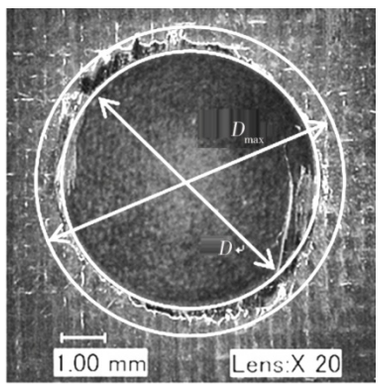
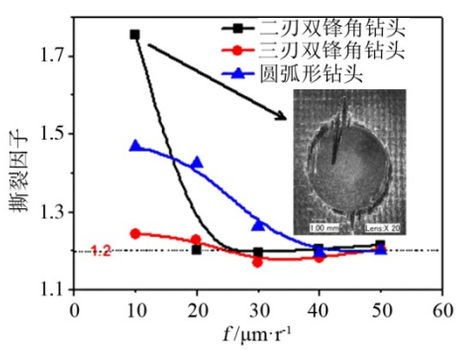
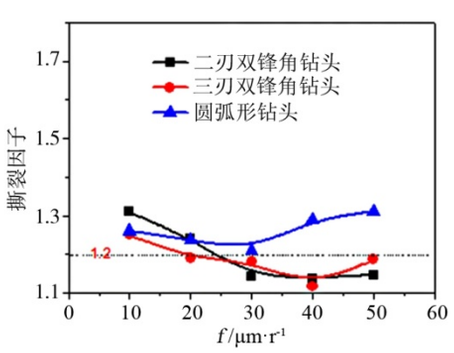


图4 撕裂因子示意图

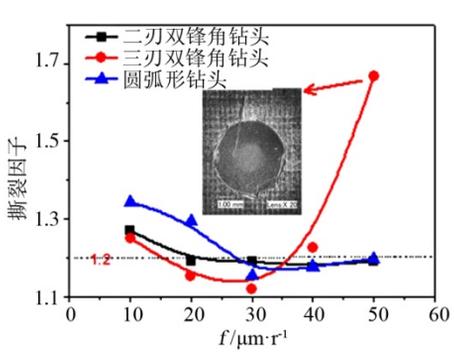
Fig. 4 Schematic diagram of delamination factor



（a） n=1 500 r/min



（b） n=3 500 r/min



（c） n=5 500 r/min

图5 孔出口撕裂因子与进给量的关系

Fig. 5 Relationship between delamination factor and feed rate

三种钻头孔出口的撕裂因子随着f的增大先减小后增大。双锋角钻头(二刃和三刃)孔出口撕裂因子最小值出现在f=30 μm/r附近;在n=1 500 r/min时,圆弧形钻头孔出口撕裂因子最小值在f=40 μm/r附近。f较小时,钻削轴向力较小,孔出口处容易成为毛刺,钻头往下钻削时因毛刺的影响,使得撕裂增大;而f较大时,钻削轴向力很大,导致撕裂很大。

从图5(b)可以知道,双锋角钻头在n=3 500 r/min和f=30~40 μm/r时撕裂因子较小,适合钻削CFRP复合材料。三刃双锋角钻头在n≤3 500 r/min时的孔出口撕裂因子都小于圆弧形钻头的,因此在此条件下三刃双锋角钻头较适合钻削CFRP复合材料。从图5(a)和(c)上发现,孔出口处撕裂因子大于1.4时,孔出口都存在毛刺,毛刺与工件链接的位置存在很长的撕裂,毛刺的位置在θ=90°。可见这种较大的撕裂都是因毛刺的形成而产生的。撕裂在低转速低进给量下容易出现的原因是刀具往下钻削的速度缓慢,刀尖不能有效的突破CFRP板底层碳纤维,形成毛刺,同时也产生较大的撕裂。而在高转速高进给量下出现的原因是刀具钻削轴向力过大,导致分层出现的位置离板底较大,同样不易突破板底,形成毛刺且伴随着较大的撕裂。

3 结论

(1)三刃双锋角钻头和圆弧形钻头的孔入口都没有出现损伤,而二刃双锋角钻头的孔入口有损伤。

(2)随着f的增大α先减小后增大。f>20 μm/r时,三种钻头中三刃双锋角钻头的毛刺最少。

(3)综合考虑孔入口质量和出口质量(毛刺和撕裂因子),三刃双锋角钻头最适合钻CFRP复合材料。

参考文献

[1] MISHRA R, MALIK J, SINGH I, et al. Neural network approach for estimate the residual tensile strength after drilling in un-directional glass fiber reinforced plastic laminates[J]. Mater. Des., 2010, 31(6): 2790-2795.

[2] 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):301-306.

[3] 钱宝伟,刘巍,贾振元,等. 双顶角钻头钻削CFRP复合材料的刀具磨损机制[J]. 复合材料学报,2017,34(4):521-529.

[4] 张厚江,陈五一,樊锐,等. 碳纤维复合材料高质量孔的钻削[J]. 航空制造技术,2004(3):55-57.

[5] 温泉,郭东明,高航,等. 基于划痕试验的碳纤维/环氧树脂复合材料制孔毛刺与撕裂缺陷形成机制[J]. 复合材料学报,2014,31(1):9-17.

[6] 周井文,陈燕,傅玉灿,等. 纤维切削角对CFRP加工缺陷的影响规律[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(7):110-116.

[7] XU J Y, AN Q L, CAI X J, et al. Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates[J]. Int. J. Precis. Eng. Manuf., 2013, 14: 1687-1696.

[8] DAVIM J P, REIS P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study[J]. Mater. Des., 2003, 24: 315-25.

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

[10] TSAO C C. Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206: 405-411.

[11] 刘洋,李鹏南,陈明,等. 双锋角钻头钻削碳纤维增强树脂基复合材料钻孔缺陷研究[J]. 宇航材料工艺,2016,46(5):54-61

[12] EL-SONBATY I, KHASHABA U A, MACHALY T. Factors affecting the machine-ability of GFR/epoxy composites [J]. Compos. Struct., 2004, 63(3/4): 329-338.

[13] KARNIK S R, GAITONDE V N, RUBIO J C. Delamination analysis in high speed drilling of CFPR using artificial neural network model[J]. Materials and Design, 2008, 29: 1768-1776.

[14] 陈浩,李鹏南,唐思文,等. 麻花钻几何参数对碳纤维复合材料钻削性能的影响[J]. 宇航材料工艺,2015,45(3):63-67.

[15] KHASHABA U A, SEIF M A, ELHAMID M A. Drilling analysis of chopped composites[J]. Composites: Part A, 2007, 38: 61-70.

[16] SAKUMA K, YOKOO Y, SETO M. Study on drilling of reinforced plastics-relation between tool material and wear behavior[J]. Bull. JSME, 1984, 27: 1237-1244.