

# 镗削碳纤维复合材料时切削用量对 切削力及孔出口撕裂的影响

董 星 李 嫚 董 海 张弘弢

(大连理工大学机械工程学院,大连 116023)

**文 摘** 采用 PCD 刀具对碳纤维复合材料(CFRP)进行了镗削加工试验,分析了切削用量对切削力、孔出口撕裂因子(撕裂值与孔直径的比值)的影响规律。试验结果表明,三向切削力随背吃刀量、进给量、切削速率的增大而增大。经分析认为,切削速率的增大引起待加工材料的屈服应力增大。由于刀尖圆弧半径较大,试验中出现背向力大于主切削力的现象;撕裂因子与背吃刀量基本无关;进给量与撕裂因子呈线性正相关;当切削速率增大时撕裂因子呈减小趋势,并且减小到一定程度后基本不变;采用 PCD 刀具镗削加工该材料能够有效地减小孔出口撕裂程度。

**关键词** PCD 刀具,CFRP,镗孔加工,切削力,撕裂

## Influence of Cutting Parameters on Cutting Forces and Hole Exit Tear in Boring CFRP

Dong Xing Li Man Dong Hai Zhang Hongtao

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

**Abstract** In this paper, some experiments were carried out by using PCD tool to bore carbon fiber reinforced plastics (CFRP) and the influence of cutting parameters on cutting force and hole exit tear factor(the ratio of tear size and hole diameter) was analyzed. The testing results showed that 3-D components of cutting forces increase along with the increasing of the cutting depth, feed rate and cutting speed. It is indicated that the raise of cutting speed results in the increasing of yield-stress of the material. Large corner radius causes the highest radial force, followed by the main cutting force and axial force;Tear factor is almost independent of cutting depth, but there is a linear positive correlation between the factor and feed rate. When increasing the cutting speed the value of tear factor shows a tendency to decrease and then kept essentially constant. Boring CFRP using PCD tool can effectively reduce tear degree of hole exit.

**Key words** PCD cutting tool,CFRP,Boring,Cutting force,Tear

### 0 引言

碳纤维复合材料(CFRP)具有比强度和比刚度高、抗疲劳性能好、耐热性能良好等优点,其强度高、导热能力差,因而在进行切削加工时,刀具的磨损严重;容易产生分层、撕裂等缺陷,这在钻孔时尤为明显,文献[1]指出,钻削力的大小直接影响着孔的质量。有研究表明<sup>[2-3]</sup>,采用金刚石刀具切削能够有效地减小切削力,进而提高材料表面的加工质量。考虑

到钻削时切削条件恶劣,切屑不易排出,切削热量难以散失导致刀具磨损严重,使孔的加工质量不高,本文采用镗削加工,利用超硬 PCD 刀具对 CFRP 进行了切削试验,对比不同的切削用量对切削力及孔出口撕裂大小的影响,并对三向切削力进行拟合,以期得出对生产实际具有指导作用的切削力与切削用量三要素之间的经验公式。

### 1 切削试验

收稿日期:2011-01-12

作者简介:董星,1985 年出生,硕士研究生,主要从事难加工材料研究。E-mail:dongxing051@163.com

切削试验在 CA6140 普通车床上进行,采用瑞士产 Kistler9257B 测力仪、Kistler5807A 电荷放大器 and 计算机组成的切削力数据采集系统进行三向切削力的测量。

所用的工件为热压成型的树脂基碳纤维增强复

合材料。在材料的压实过程中,为了减少层间孔隙,在加热加压的同时注入树脂材料,使塑性树脂在纤维层间流动以达到减少孔隙的目的。经检测,制得的板材孔隙率为 1.5%,密度为 1.65 g/cm<sup>3</sup>,具体的其他参数如表 1 所示。

表 1 试验用碳纤维复合材料的参数

Tab.1 Parameters of CFRP in the experiment

增强材料	基体材料	铺层角度/(°)	碳纤维体积分数/%	板材尺寸(长×宽×厚)/mm
碳纤维 T300,直径 7μm	环氧树脂 AG-80	[+45/0/-45/+45/0/+90/-45/0/+90/0] <sub>s</sub>	60	160×100×12

所采用的刀具为 PCD 镗刀(将 PCD 刀片焊接在高速钢刀杆的前端),具体的几何参数为:前角  $\gamma_0 = 0^\circ$ ,后角  $\alpha_0 = 10^\circ$ ,主偏角  $\kappa_r = 40^\circ$ ,副偏角  $\kappa_r' = 10^\circ$ ,刀尖圆弧半径  $r_s = 0.4 \text{ mm}$ ,切削过程中无切削液。

为了研究切削用量对切削力及孔出口撕裂的影响,本文分别对切削速率、进给量和切削深度进行了单因素试验,采集的切削力数据有:进给力( $F_x$ )、背向力( $F_y$ )、主切削力( $F_z$ )。具体的切削用量如表 2 所示。

表 2 CFRP 镗孔加工的切削用量表

Tab.2 Cutting parameters in boring CFRP

切削速率 $v_c/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	进给量 $f/\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	背吃刀量 $a_p/\text{mm}$
18.98	0.10	0.10, 0.15, 0.20 0.30, 0.36
28.44	0.10, 0.15, 0.20, 0.24	0.15
15.88, 19.39, 24.54 29.26, 44.65	0.15	0.15

## 2 结果与分析

### 2.1 切削用量对切削力的影响

如图 1 所示,随背吃刀量的增加,三向切削力呈增大趋势,这一规律与切削普通金属材料时相同。

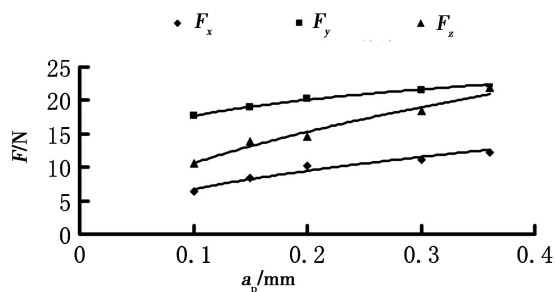


图 1 切削力随背吃刀量的变化曲线

Fig.1 Variety curves of cutting forces at different cutting depths

与切削金属相比,切削 CFRP 时,背吃刀量对切削力的影响并不成正比关系。这是因为 CFRP 是由高强度高硬度的碳纤维增强体和质软的树脂基体复合而成的,由于两者的强度极限相差甚大,所以在切削树脂时的切削力要比切削碳纤维小得多,故而背吃刀量与切削力不成正比。

从图 2 可以看出,加工 CFRP 时进给量对切削力的影响趋势与加工普通金属材料时是类似的。进给量增大,切削力也随之增大。

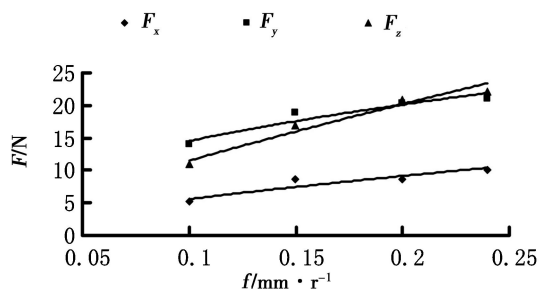


图 2 切削力随进给量的变化曲线

Fig.2 Variety curves of cutting forces at different feed rates

从图 3 可看出,随切削速率的提高,切削力整体上呈增大趋势。当切削速率提高时,被加工材料的应变率及应变量增大,进而使材料的屈服应力也跟着增大<sup>[4]</sup>。

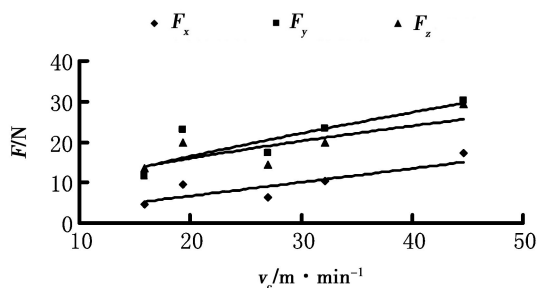


图 3 切削力随切削速率的变化曲线

Fig.3 Variety curves of cutting forces at different cutting speeds

从图 1 ~ 图 3 还可以看出,由于所用刀具的刀尖圆弧半径较大( $r_e=0.4\text{ mm}$ ),致使  $F_y>F_z$ 。当采用小的刀尖圆弧半径( $r_e=0.08\text{ mm}$ )时,依表 2 的切削用量镗削加工 CFRP 时出现了主切削力大于背向力的情况(刀具的其他几何参数与本文的相同)。这是因为当刀尖圆弧半径较大时,刀尖部分“变钝”,刀具对工件的挤压作用大于剪切作用,而小的圆弧半径使刀具更加锋利,切削时不易产生振动。

## 2.2 切削力的拟合

### 2.2.1 拟合公式

根据经验公式,切削力与切削用量之间的关系为

$$F = K a_p^x f^y v_c^n$$

式中, $F$  为切削力, $K$  为系数, $a_p$  为背吃刀量, $f$  为进给量, $v_c$  为切削速率。

根据文献[5]可得出系数  $K$  及切削用量的指数的公式:

$$X = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

式中, $X = (\ln K, x, y, n)^T$ ,  $B = (1, \ln a_p, \ln f, \ln v_c)$ ,

通过上述计算,得到如下三个分力公式:

$$F_x = 2.0668 a_p^{0.6226} f^{0.2363} v_c^{0.9774}$$

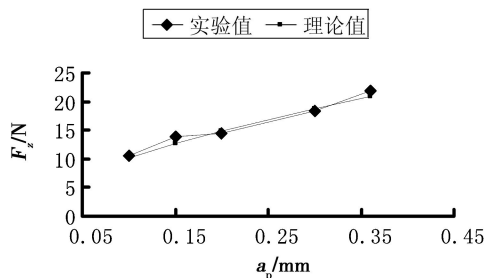
$$F_y = 4.9377 a_p^{0.2741} f^{0.1443} v_c^{0.6947}$$

$$F_z = 24.2491 a_p^{0.5668} f^{0.6670} v_c^{0.6457}$$

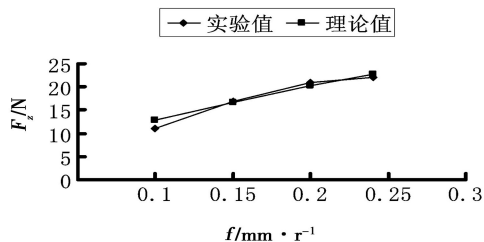
### 2.2.2 对比验证

把表 2 中的数据分别代入以上三个分力公式得到三向力的理论值,将其与实验值进行对比,对比图如图 4 所示(这里仅列出主切削力  $F_z$  的对比图)。

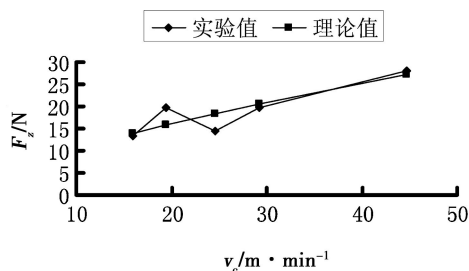
从图 4 可以看出主切削力  $F_z$  的实验值与理论值很接近,这说明  $F_z$  与切削用量三要素之间的关系式拟合得较好。



(a)  $a_p$



(b)  $f$



(c)  $v_c$

图 4 主切削力  $F_z$  的实验值与理论值对比图

Fig. 4 Comparison of experimental and theoretical values ( $F_z$ ) at different cutting parameters

### 2.3 孔出口撕裂

CFRP 材料的难加工特性之一就是,当对其进行切削加工时孔出口侧材料由于受到刀具的挤压作用会出现撕裂等缺陷。撕裂是沿孔出口侧最外层纤维方向伸展,这对碳纤维复合材料构件实际使用中的负面影响较大,所以对孔出口缺陷的研究以撕裂为主。

#### 2.3.1 撕裂大小评价指标

撕裂以孔两侧沿纤维方向孔直径部位最大,如图 5 所示<sup>[6]</sup>,撕裂大小取这两撕裂尺寸的和,考虑到镗削加工后孔的尺寸不同,所以将撕裂尺寸的和与孔的名义直径的比值(命名为撕裂因子  $S$ )作为撕裂大小的评价指标。即

$$S = \frac{l_1 + l_2}{D}$$

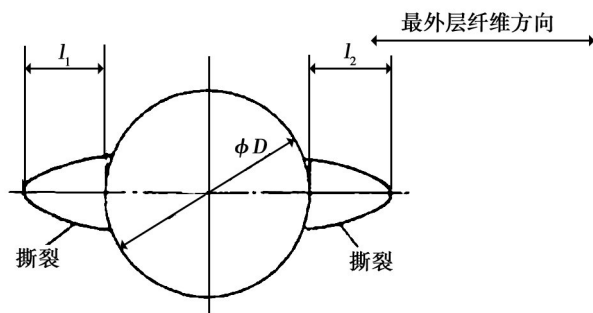


图 5 孔出口撕裂示意图

Fig. 5 Schematic diagram of hole exit tear

#### 2.3.2 切削用量对撕裂大小的影响

从图 6 中可以看出,当背吃刀量从  $a_p = 0.1 \sim 0.36\text{ mm}$  的整个变化过程中,撕裂因子基本保持在 0.16 左右,这说明背吃刀量对撕裂因子基本没有影响。

从图 7 可看出,随着进给量的增加,孔出口撕裂因子呈增大趋势。这是因为,在刀具即将切出孔时,由于待切除材料很薄,而且 CFRP 的层间强度很低,最外层纤维对刀具的挤压作用比较敏感,所以采用大的进给量会使出口侧纤维撕裂尺寸变大。

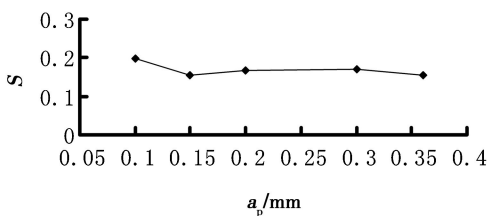


图6 背吃刀量对撕裂因子的影响曲线

Fig. 6 Tear factor change due to cutting depth

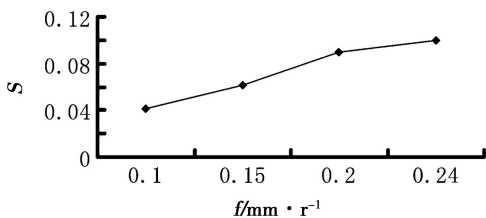


图7 进给量对撕裂因子的影响曲线

Fig. 7 Tear factor change due to feed rate

从图8中可以看出,撕裂因子随着切削速率的提高呈减小趋势,当切削速率大于 $v=24.54$  m/min时,撕裂因子基本不变。这是因为随着切削速率的提高,变形系数减小,在刀具即将切出孔时,出口侧最外层的材料由于来不及沿纤维方向扩展形成撕裂而被刀具切除;由于CFRP是脆性材料,当切削速率继续增大时,变形系数变化不明显,因而撕裂因子基本不变。从以上分析可知,提高切削速率能够减小孔出口撕裂程度,但切削速率不能太大,否则容易引起材料开裂,这对材料本身的性能将产生影响<sup>[7]</sup>。

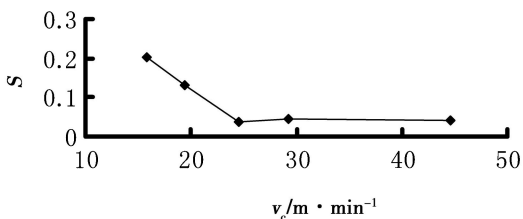


图8 切削速率对撕裂因子的影响曲线

Fig. 8 Tear factor change due to cutting speed

在文献[6]中,作者采用 $\Phi 5.5$  mm的硬质合金四平面钻尖钻头对多向CFRP进行了钻削加工试验,发现撕裂值随着机床主轴转速的提高、进给速率的减小而减小。当 $n=24$  kr/min,  $v_f=24.0$  mm/min时,撕裂值为0.5 mm(换算成撕裂因子为0.09),而在 $n < 10$  kr/min,采用 $v_f=24.0 \sim 120.8$  mm/min时,撕裂值都大于1 mm(换算成撕裂因子为0.18),也就是说要想获得较小的撕裂因子就必须提高机床主轴转速或减小进给速率,而减小进给速率会降低加工效率。在进给量方面,撕裂值与进给量成线性正相关,当 $f=0.04$  mm/r时,撕裂值为4.66 mm(换算成撕裂因子为0.85),这远远大于本文进行的镗削加工后的数据。在钻头直径方面,撕裂值随钻头直径的增大而增大,采用 $\Phi 6$  mm的硬质合金钻头,  $n=3$  kr/min,小的

进给速率 $v_f=24$  mm/min加工CFRP后的撕裂值为4 mm(换算成撕裂因子为0.73)。综上所述,在CFRP上制孔时,可以先采用小直径的硬质合金钻头钻孔,在此基础上再用PCD刀具对其进行镗削扩孔,这既能减小机床消耗功率同时还能保证孔出口加工质量。

需要说明的是,本文采用的是无垫板镗削。在对CFRP进行孔加工时,孔出口出现撕裂的根本原因是在刀具即将切出孔时,由于出口侧的纤维层已很薄,承载能力较差,再加上纤维层间强度较低,当刀具不够锋利或者切削参数不合理时,刀具对材料的挤压作用使得最外侧材料沿纤维方向扩展而形成撕裂。因此,在结构件敞开的情况下,可以在复合板出口侧添加垫板以提高其承受强度,故在同等切削条件下,采用增加垫板的方法能够使孔出口侧的撕裂程度减小。但是在复合板的实际应用中,有些产品受结构的影响无法在出口侧增加垫板,因此基于这样的考虑,本文进行了无垫板镗削试验。

### 3 结论

- (1)随着背吃刀量与进给量的增大,三向切削力增加;当切削速率增大时,三向切削力整体上呈增加的趋势;
- (2)较大的刀尖圆弧半径导致背向力最大,主切削力次之,轴向力最小;
- (3)通过三向力拟合公式得到的理论值与实验值吻合较好;
- (4)背吃刀量对撕裂因子基本没有影响;撕裂因子随着进给量的增大呈线性增大;切削速率增大时,撕裂因子呈减小趋势并且当其减小到一定程度后基本不随切削速率的变化而变化,适当的提高切削速率能够减小孔出口撕裂程度;
- (5)采用PCD刀具对CFRP进行镗削扩孔能够有效的减小孔出口撕裂程度,提高加工质量。

### 参考文献

- [1] 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
- [2] Ferreira J R, Coppini N L, Levy Neto F. Characteristics of carbon-carbon composite turning[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109, 65-71
- [3] 张厚江.碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究[D].北京航空航天大学,1998
- [4] 黄桥平,赵桂平,李杰.碳纤维/环氧树脂复合材料动态拉伸试验研究与损伤分析[J].复合材料学报,2009,26(6):143-149
- [5] 丁克良,沈云中,欧吉坤.整体最小二乘法直线拟合[J].辽宁工程技术大学学报(社会科学版),2010,29(1):44-47
- [6] 张厚江,陈五一,陈鼎昌.碳纤维复合材料(CFRP)钻孔出口缺陷的研究[J].机械工程学报,2004,40(7):150-155
- [7] Aronson, Robert B. Machining composites[J]. Manufacturing Engineering, 1999, 122(1):51-59

(编辑 任涛)