

碳纤维复合材料(CFRP)钻孔出口缺陷的研究*

张厚江

(北京林业大学工学院 北京 100083)

陈五一 陈鼎昌

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

摘要: 对碳纤维复合材料(CFRP)钻孔出口的缺陷进行了试验研究, 对其典型形式进行了模型总结, 指出孔出口缺陷由撕裂和毛边两部分组成, 其中撕裂比毛边的尺寸大。撕裂的形成过程包括两个作用阶段即横刃作用阶段和主切削刃作用阶段, 其中横刃作用在撕裂形成中占主导成份。毛边缺陷通常出现在表层纤维被“顺向”切削的孔边缘部分。另外, 以孔出口两侧撕裂长度平均值作为撕裂评价参数, 在总结钻削试验结果的基础上探讨了钻削参数变化对撕裂大小的影响。指出随着进给速度、进给量、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。

关键词: 碳纤维复合材料(CFRP) 撕裂 毛边 钻削参数

中图分类号: TQ327

0 前言

出口缺陷是碳纤维复合材料钻削加工常见的缺陷之一, 也是最直观的缺陷之一; 出口缺陷的有无及大小常可代表制孔质量的高低^[1-6]。当使用高速钢钻头钻削 CFRP 板材时, 孔出口撕裂的大小随钻头进给速度的增大而增大, 而随钻头回转速度的增大而减小; 且前者的影响程度比后者大^[1,2]。钻削时在孔出口侧垫上铝板等支撑物能减小孔出口的撕裂^[1,4]。控制钻削力大小, 特别是将钻头横刃在即将钻出时轴向力的大小限制在一定范围内, 是减小孔出口缺陷的另一种有效方法^[4,6]。

从目前现有的国内外资料看, 以往对碳纤维复合材料钻孔出口缺陷形成机理、组成形式及其大小与钻削参数间的定量关系等问题的研究还不很透彻。拟针对这些问题展开工作, 并给出观点。

1 孔出口缺陷钻削试验方法

孔出口缺陷钻削试验在卧式高速钻削试验台上进行。钻头转速为 3 000~24 000 r/min, 取 6 个转速值进行试验; 进给速度为 24.0~120.8 mm/min, 取 5 个速度级进行试验; 钻头采用硬质合金四面钻, 直径取 4.8、5.5 和 6.0 mm 三个级别。试验中作为工件材料的碳纤维复合材料有多向和单向两种形式。

其他具体情况请见表 1 和表 2。另外, 为探讨孔出口缺陷大小与钻削力间的关系, 在同一试验条件下进行了钻削力测定试验^[5]。

表 1 试验钻削参数及条件

钻头转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	进给速度 $v_f/(mm \cdot \min^{-1})$	钻 头			切削液
		材料	几何形式	直径 D/mm	
3 000, 6 000, 9 000, 12 000, 18 000, 24 000	24.0, 44.0, 66.0, 91.2, 120.8	YG6X 整体硬 质合金	四面 钻尖	$\phi 4.8$, $\phi 5.5$, $\phi 6.0$	无 (干钻)

表 2 碳纤维复合材料性质

	多向 CFRP	单向 CFRP
增强材料	碳纤维 T300, 直径 7 μm	碳纤维 T300, 直径 7 μm
基体材料	环氧树脂	环氧树脂
铺层形式	[45/0/- 45/45/0/90/- 45/0/90/0] _s	[0] ₁₆
纤维体积分数 $w/\%$	60	60
厚度 δ/mm	2.5	2.0

为了对碳纤维复合材料钻削孔出口的形成过程进行详细的观察、分析和研究, 充分利用卧式高速钻削试验台结构优势, 对钻头钻出过程进行了实时拍摄。拍摄装置及位置见图 1, 照相机镜头对准钻头出口处, 在钻头钻出的瞬间实时拍摄。

撕裂评价参数采用孔出口两侧撕裂长度平均值 l , 如图 2 所示。孔钻出后对孔出口两侧的撕裂长度分别测量并记录, 然后计算出两者的平均值, 作为该孔撕裂大小的指标。即

* 人事部 2002 年度留学回国人员科技活动择优资助项目。20030630 收到初稿, 20040130 收到修改稿

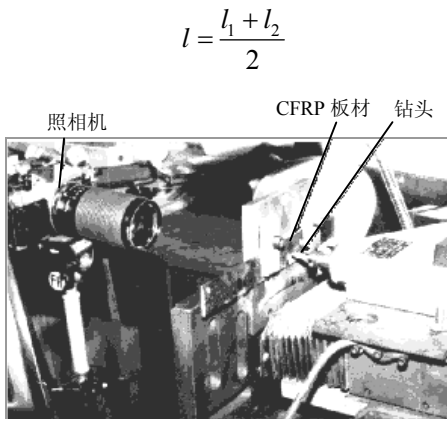


图 1 钻头钻出过程实时拍摄装置

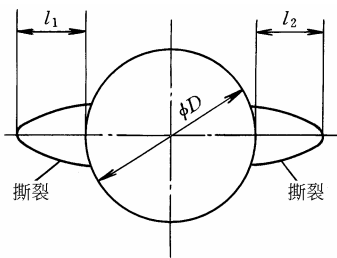


图 2 孔出口撕裂评价参数

2 钻孔出口缺陷的观察与讨论

孔出口缺陷包括撕裂和毛边等两种。撕裂比毛边的尺寸大，对碳纤维复合材料构件实际使用中的负面影响也比较大，所以对孔出口缺陷的研究以撕裂为主。

撕裂和毛边均发生在孔的出口侧的最表面一层，且撕裂沿孔出口侧最外层纤维方向伸展。

卧式高速钻削试验台在不安装精密钻削测力仪的情况下，很便于钻头钻出过程的观察与拍摄。经过仔细观察，发现孔出口撕裂的形成过程包括两个阶段：横刃作用阶段和主切削刃作用阶段。

(1) 横刃作用阶段。这一阶段由横刃对出口侧表层材料有推挤作用开始，到横刃钻出表层材料的时刻结束。钻头横刃在由 CFRP 材料内部向外切出过程中，对表层材料有强烈的推挤作用，表面纤维层首先以钻头轴线位置为中心发生小的凸起(图 3a)，然后凸起逐渐增大，并沿外层纤维铺层方向扩展。扩展到一定程度，表层纤维间裂开，横刃切出。

(2) 主切削刃作用阶段。这一阶段由横刃切出表层材料时刻开始，到主切削刃完全钻出表层材料结束。横刃形成的撕裂属于钻出过程中产生的撕裂，不是最终的。在横刃钻出工件表面后，主切削刃继续对撕裂的形成起作用。主切削刃的作用表现在两个方面：一方面与横刃一样有继续向外推挤作用(图 3b)，另一方面它因自身旋转有扭曲作用(图 3c)。撕裂在主切削刃作用下最终形成。

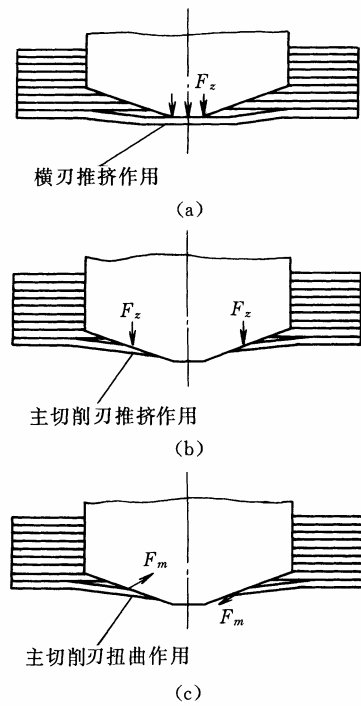
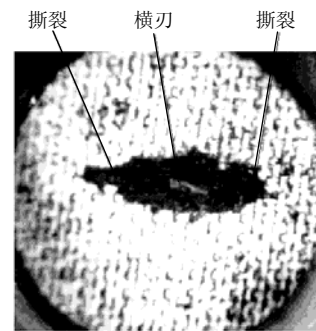
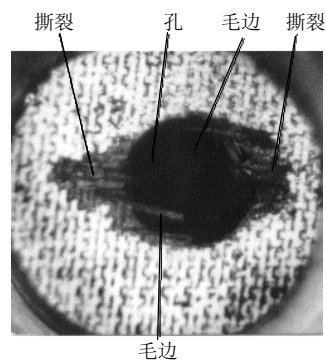


图 3 钻头对撕裂形成的作用
 F_z ——钻头对撕裂的轴向(z 向)作用力
 F_m ——主切削刃对撕裂的扭曲作用力

由于横刃是负前角切削，轴向力的 50%以上集中在横刃，所以在横刃和主切削刃两者中，横刃的作用占主导成分。据观察，在横刃钻出的瞬时，撕裂长度已达最终撕裂长度的 60%~70%以上。图 4a



(a) 横刃钻出瞬间撕裂 ×2.8



(b) 钻削后最终撕裂 ×2.8

图 4 孔出口撕裂情况照片

6 mm 硬质合金钻头， $n=3\ 000\ \text{r/min}$ ， $v_f=91.2\ \text{mm/min}$ ，多向 CFRP，表层纤维铺层方向 0°

为横刃钻出瞬间的撕裂情况照片,图 4b 为钻削后最终撕裂情况照片。从这两张照片可以清楚地看到这一点。

图 5 为两作用阶段撕裂(扩展)长度的定性描述。撕裂扩展速度在横刃作用阶段很快,到了主切削刃作用阶段就明显下降了。如果切削参数选择合适,例如进给量 f 控制在一定范围内,则钻削力尤其是轴向力将变得很小,横刃作用形成的撕裂将不超出钻头半径(孔半径),而主切削刃的切削作用将把横刃形成的撕裂切除掉,使最终形成的孔出口没有撕裂(如图中虚线所示)。当然若进一步选择合适的钻型,则更容易到达孔出口无撕裂缺陷的目标。

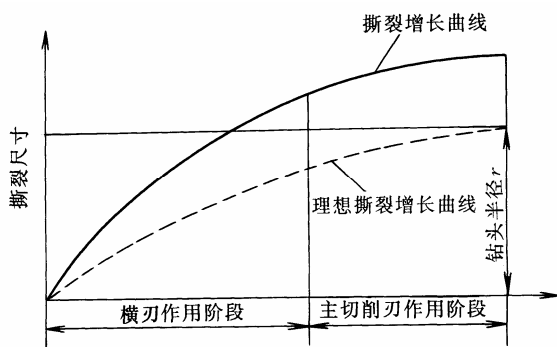


图 5 两作用阶段撕裂扩展情况

图 6 为孔出口撕裂模型图。这个模型图反映了有撕裂和毛边存在时出口缺陷的典型情形。撕裂以孔两侧沿纤维方向孔直径部位最大,撕裂大小即采用这两撕裂尺寸 l_1 、 l_2 的平均值来衡量。将孔两侧撕裂最大的区域称为主撕裂区。在钻头切削刃与纤维间处于“顺向”切削的部位,表层也存在着尺寸较小的撕裂,这一区域称为次撕裂区。无论主撕裂区还是次撕裂区,在孔边缘部分都经常存在有未完全切断的表层纤维毛边,这种现象称为起毛。

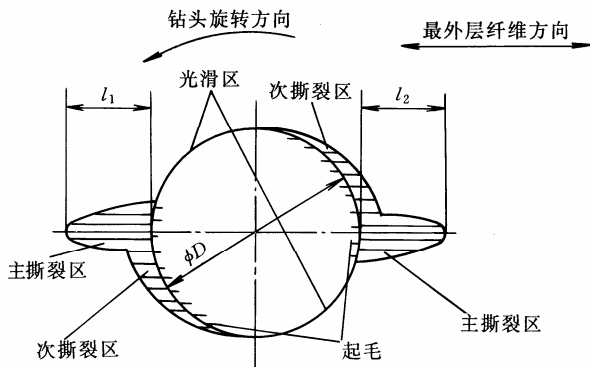


图 6 孔出口缺陷模型图

起毛现象(毛边)是由于以下几方面原因造成的: ①在“顺向”切削情况下纤维不容易被切断。

②表层纤维外侧为自由表面,没有约束。③钻头轴向推挤作用。而在钻头切削刃与纤维间处于“逆向”切削的部位,基本上没有起毛现象存在,这一区域称为光滑区。这里的“顺向”切削是指切削刃运动方向与纤维方向成锐角的切削,而“逆向”切削是指切削刃运动方向与纤维方向成钝角的切削^[5]。

孔出口撕裂和毛边多数情况下是同时存在的,两者的大小有着相同的变化趋势。撕裂越大,毛边也越大;撕裂越小,毛边也越小。当撕裂减小到一定程度时,毛边先行消失。

3 影响出口撕裂的主要因素

3.1 钻头(主轴)转速 n 与进给速度 v_f

图 7、图 8 分别为钻削多向 CFRP 和单向 CFRP 时钻头转速 n 、进给速度 v_f 与撕裂大小试验关系曲线,采用 5.5 mm 硬质合金四平面钻尖钻头。由两图可以看到,无论是多向 CFRP 还是单向 CFRP,钻头转速 n 越高,撕裂越小;进给速度 v_f 越大,撕裂越大。这一点与钻削力受钻头转速和进给速度的影响有相似之处。

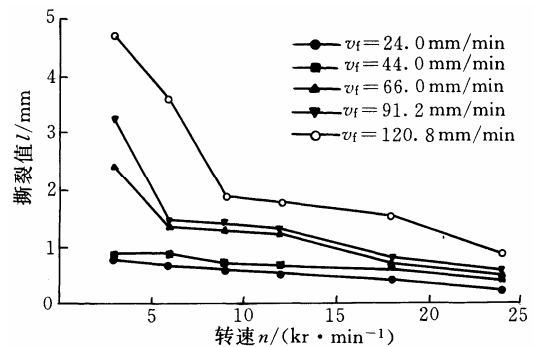


图 7 多向 CFRP 时主轴转速、进给速度与撕裂间的关系图

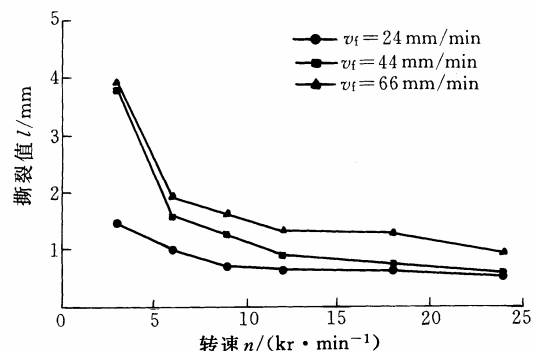


图 8 单向 CFRP 时主轴转速、进给速度与撕裂间的关系图

对多向 CFRP 来讲,在 $v_f=66.0\sim 120.8$ mm/min 较高进给速度下,随着钻头转速 n 增大,撕裂明显减小,尤其是在低转速阶段表现尤为突出;而在 $v_f=24.0\sim 44.0$ mm/min 较低进给速度下,随着钻头转速

n 增大, 撕裂的减小就很平缓了, 并且在任何钻头转速下撕裂值的大小始终没有超过 1 mm。这种现象单向 CFRP 也大体存在, 只是分界点的进给速度更低些。可见, 减小撕裂大小可以采取减小进给速度和提高钻头转速两种措施, 但减小进给速度会降低加工效率, 所以采用高速钻削应是首先考虑的方法。

另外, 比较两图可以发现, 在同样切削条件下单向 CFRP 的撕裂值要比多向 CFRP 的撕裂值大, 也就是说单向 CFRP 更容易发生撕裂。

3.2 切削速度 v_c 与进给量 f

图 9、图 10 分别为钻削多向 CFRP 和单向 CFRP 时切削速度 v_c 、进给量 f 与撕裂大小试验关系图, 采用 $\phi 5.5$ 硬质合金四平面钻尖钻头。由两图可以看到, 无论是多向 CFRP 还是单向 CFRP, 进给量 f 越大, 撕裂越大。并且, 进给量 f 变化引起撕裂值 l 变化的试验数据点都集中在一条直线附近, 这种现象在较低进给量下表现尤为突出。

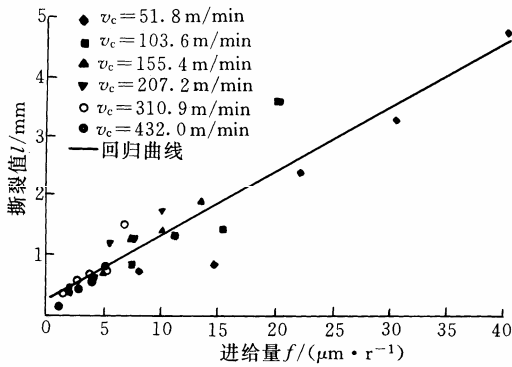


图 9 多向 CFRP 时进给量与撕裂间的关系图

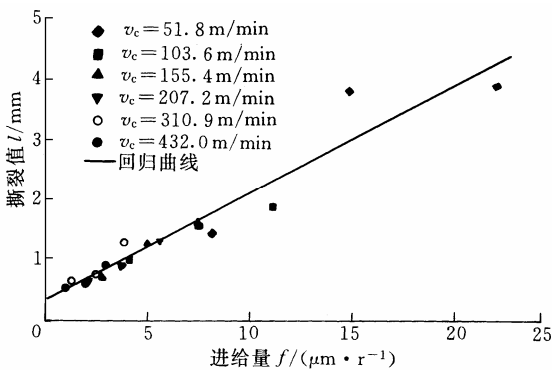


图 10 单向 CFRP 时进给量与撕裂间的关系图

由两图还可以看到, 不同切削速度对撕裂大小的影响非常小, 几乎小到可以忽略的程度。这种现象在钻削力方面也存在。前面已指出, 孔出口撕裂的形成分为两个作用阶段, 在这两个作用阶段中都是钻削力(轴向力和转矩)在起作用, 也就是说, 钻削力是形成撕裂的根本原因, 所以撕裂也和钻削力

一样几乎不受切削速度的影响是很自然的。在不考虑切削速度影响的前提下, 如果用线性回归图中试验数据点的话, 则得到如下经验公式。

多向 CFRP: $l=0.26+0.11 f$

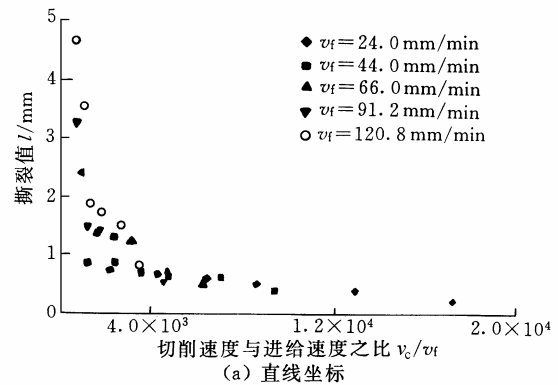
单向 CFRP: $l=0.34+0.18 f$

式中 l ——撕裂值(mm)

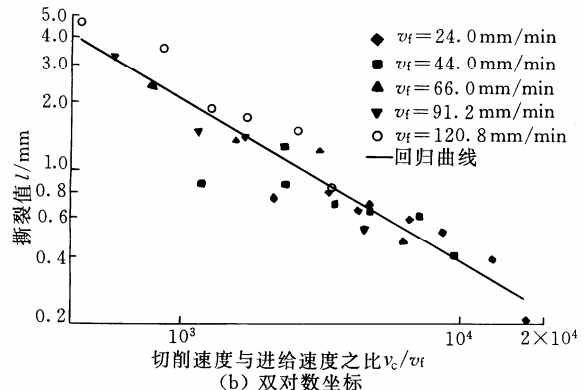
f ——进给量($\mu\text{m}/\text{r}$)

3.3 切削速度与进给速度之比 v_c/v_f

图 11、图 12 分别为钻削多向 CFRP 和单向 CFRP 时切削速度与进给速度之比 v_c/v_f 对撕裂的影响情况, 采用 5.5 mm 硬质合金四平面钻尖钻头。包括直线坐标和双对数坐标两种图。由图 11a 与图 12a 可以看到, 无论是多向 CFRP 还是单向 CFRP, 在各种不同进给速度下, 撕裂值 l 与 v_c/v_f 间关系的试验数据点都很有规律性, 基本集中在一条曲线的附近。在 $v_c/v_f \leq 3000 \sim 4000$ 时, v_c/v_f 增大撕裂值 l 下降极快; 在 $v_c/v_f > 3000 \sim 4000$ 时, v_c/v_f 增大撕裂值 l 下降很小, 也可以说在这个阶段, l 受 v_c/v_f 的影响非常小。有意思的是, 这种情形与 v_c/v_f 对钻削力影响的情形相似, 且两者形成分界点的 v_c/v_f “阈值”也相近。这一“阈值”同样对实际生产中选取钻削参数具有指导意义, 只要将钻削速度和进给速度选取在两者比值高于阈值范围, 那么钻削出的孔的出口撕裂将很小。



(a) 直线坐标



(b) 双对数坐标

图 11 多向 CFRP 时 v_c/v_f 与撕裂间的关系图

将 v_c/v_f 对撕裂值 l 影响的试验数据放在双对数坐标中(图 11b、图 12b), 则可明显地看到这些数据点基本集中在一条直线附近。如果用直线关系回归这些试验数据, 则有如下经验公式。

$$\text{多向 CFRP: } l=302 \times (v_c/v_f)^{-0.72}$$

$$\text{单向 CFRP: } l=288.4 \times (v_c/v_f)^{-0.66}$$

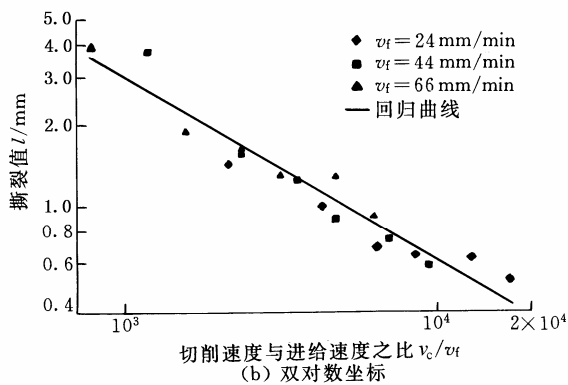
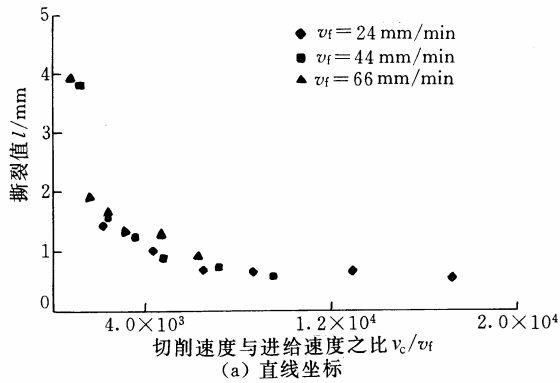


图 12 单向 CFRP 时 v_c/v_f 与撕裂间的关系图

3.4 钻头直径

如图 13 所示为钻头直径对孔出口撕裂影响情况, 其纵坐标为撕裂值 l , 横坐标为进给速度。试验中采用了 6.0、5.5 和 4.8 mm 三种不同直径的硬质合金四平面钻尖钻头。由图可见, 钻头直径越大, 钻削后所形成的孔出口撕裂越严重。无论主轴转速高低, 情形都是一样的。

钻头直径越大, 钻削过程中的钻削力也就越高。而钻削力越高, 撕裂值就越大, 所以有图 13 所示的孔出口撕裂值随钻头直径增大而增大的现象发生。

3.5 钻削力

钻削轴向力对多向 CFRP 钻孔出口撕裂的影响如图 14 所示。总的趋势是轴向力越大, 孔出口撕裂越严重。不过两者间的关系不是线性的, 在轴向力 F_z 由小向大增加过程中, 撕裂值 l 开始增大较慢, 随后逐渐加快, 随着 F_z 增加 l 增大速度越来越快。整个过程的趋势很像一条二次曲线。如果用二次多

项式拟合这些试验数据, 则可得如下经验公式

$$l=0.76-0.04F_z+0.001F_z^2$$

式中 F_z ——轴向力

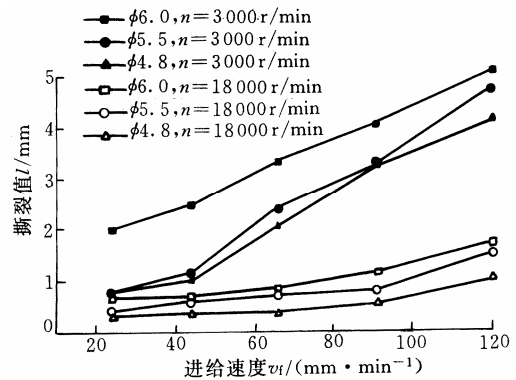


图 13 多向 CFRP 时钻头直径、进给速度与撕裂间的关系图

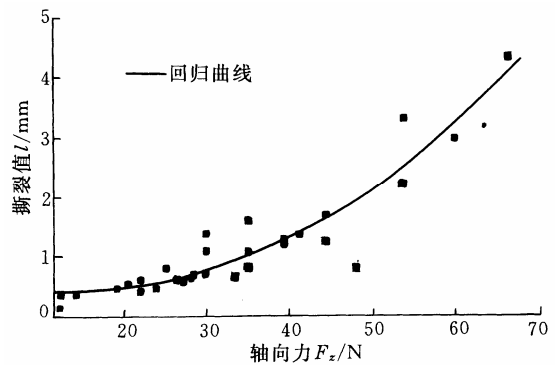


图 14 多向 CFRP 时轴向力与撕裂的关系图

4 撕裂经验公式

碳纤维复合材料孔出口撕裂的大小与多种因素有关, 其中最重要的是钻削力。而影响钻削力最重要的因素是钻头直径、进给速度及主轴(钻头)转速等。多向 CFRP 是实际生产中主要使用的碳纤维复合材料, 为在选取切削参数时做到事先对钻孔撕裂大小有一大概的估算, 特在总结大量试验数据的基础上, 经多元回归运算建立了多向 CFRP 钻削孔出口撕裂经验公式

$$\begin{aligned} \ln l = & 42.64 - 52.8 \ln D + 1.97 \ln v_f - \\ & 0.49 \ln n + 19.68 (\ln D)^2 + 0.12 (\ln v_f)^2 - \\ & 1.2 (\ln n)^2 + 0.85 \ln D \ln v_f - \\ & 0.87 \ln v_f \ln n + 0.28 \ln D \ln n \end{aligned}$$

式中 D ——钻头直径

5 结论

(1) CFRP 钻孔出口撕裂形成过程包括两个作用阶段即横刃作用阶段和主切削刃作用阶段, 其中

横刃作用在撕裂形成中占主导成分。

(2) 孔出口缺陷除撕裂外,在表层纤维被“顺向”切削部分,还经常存在起毛缺陷。在表层纤维被“逆向”切削部分,一般较整洁。

(3) 钻头(主轴)转速 n 越高,撕裂越小;进给速度 v_f 越大,撕裂越大。

(4) 切削速度 v_c 几乎对撕裂大小没有影响;进给量 f 对撕裂的影响基本成线性关系,进给量 f 越大,撕裂越大。

(5) $v_c/v_f \leq 3\ 000 \sim 4\ 000$ 时, v_c/v_f 增大撕裂值 l 下降极快;在 $v_c/v_f > 3\ 000 \sim 4\ 000$ 时, v_c/v_f 增大撕裂值 l 下降很小。 v_c/v_f 与撕裂值 l 间在双对数坐标上基本成线性关系。

(6) 在其他切削条件相同的前提下,钻头直径越大,撕裂越严重。

(7) 钻削轴向力 F_z 越大,撕裂越大,两者间基本是上升二次曲线关系。

参 考 资 料

- 1 汪裕炳,张全纯. 复合材料的结构连接. 北京:国防工业出版社,1992
- 2 König W, Grab P. Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets. *Annals of the CIRP*, 1989, 38(1): 119~124
- 3 König W, Grab P, Willerscheid H. Mchining of fibre reinforced plastics. *Annals of the CIRP*, 1985, 34(2): 537~548
- 4 张厚江,陈五一,陈鼎昌. 碳纤维复合材料的钻削加工. 新技术新工艺, 1998(5): 16~18
- 5 张厚江. 碳纤维复合材料(CFRP)钻削加工技术的研究: [博士学位论文]. 北京:北京航空航天大学,1998
- 6 胡凡. 复合材料钻削加工的研究: [硕士学位论文]. 北京:北京航空学院,1985

DEFECTS IN DRILLING CARBON FIBRE-REINFORCED PLASTIC PLATES

Zhang Houjiang

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Chen Wuyi Chen Dingchang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract: The formation of the exit defects in carbon fibre-reinforced plastic plates is investigated and their features in terms of drilling conditions is characterized. It is found that spalling and fuzzing are the major mechanisms of exit defects and spalling is usually a severer damage. The spalling, consisting of a main region and a secondary region, is caused by chisel and cutting edge actions, in which the former plays a key role. The fuzzing, however, exists in the cutting region where the included angle between the fibre direction of the surface ply and that of the cutting speed is acute. A severer spalling damage corresponds to a low spindle speed, a high feed speed, a large feed rate and a great thrust force. There exists a critical ratio of cutting speed to feed speed, which is about 3 000~4 000, beyond which the spalling size can be minimized.

Key words: Carbon fibre-reinforced plastics Spalling
Fuzzing Drilling conditions

作者简介:张厚江,男,1965年出生,副教授,博士。研究方向为复合材料切削加工理论、工程测试技术等。

E-mail: hjzhang@public3.bta.net.cn

INVESTIGATION OF THE EXIT