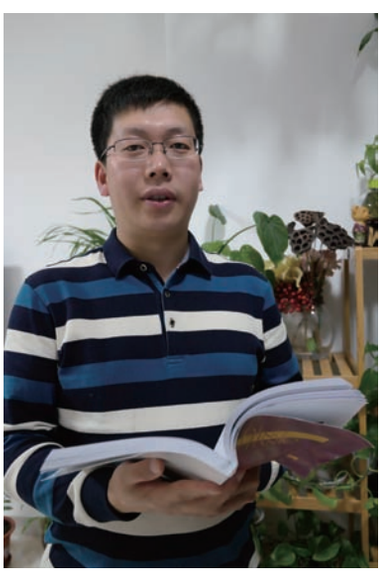
高模量树脂基碳纤维复合材料钻孔加工缺陷分析

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 （100191） 孙剑飞
中国工程物理研究院化工材料研究所 （四川绵阳 621900） 刘 峰
先进航空发动机协同创新中心 （北京 100191） 陈五一



孙剑飞

树脂基碳纤维复合材料由于其比强度、比模量高，热膨胀系数低等优点，在航空、航天、能源、汽车等领域已有广泛的应用。在航空航天领域，钻孔和切边等机械加工方式是其主要加工方式。由于碳纤维复合材料是一种多相材料，具有各向异性，层间强度低，在钻削力的作用下极易产生毛刺、撕裂、分层等缺陷，大大影响其加工质量。

使用传统刀具加工时，刀具磨损严重、寿命短。切削参数对钻削加工缺陷影响明显，例如随着进给量的增加，撕裂和毛刺缺陷变得更加严重。钻削缺陷呈现区域性的原因以及钻削轴向力和分层之间的关系渐渐引起人们的注意，张厚江曾提出轴向力引起I型张开裂纹，从而引起出口分层，Hocheng等对分层发生时临界轴向力的计算公式进行了推导。本文将通过钻孔试验对高模量树脂基碳纤维复合材料的主要加工缺陷着重进行考察。

试验条件和参数

1. 试验条件

试验所用机床为工研精机立式加工中心KT1300VC，钻头为郑钻ϕ16 PCD麻花钻，如图1所示。试验所采用的测力仪为kistler9257B动态测力仪。

试验所用工件材料为高模量碳纤维树脂基复合材料板料，增强纤维类型为M55，纤维体积分数为25%，厚度为2mm。其机械性能如表1所示。

图1 试验所用PCD钻头

表1 材料性能参数

G_{IC}/（J·m^{-2}）	E/GPa	v	X_t/MPa
420.2	353	0.28	1653

2. 试验参数

钻削切削的参数主要有切削速度和进给量两个因素。设计试验以转速和进给量为变化因素进行全因素试验。切削速度（转速）分为四个水平，进给量分为三个水平，具体参数如表2所示。

表2 钻削试验参数

转速n/（r·min^{-1}）	进给量f/（mm·r^{-1}）
1 000	0.05
2 000	0.10
3 000	0.20
4 000	–

缺陷观察结果分析

由于纤维和基体不同的物理化学性能以及复合材料独特的物理结构，钻削得到的孔往往存在各种各样的缺陷。特别是在孔入口、出口处存在的撕裂、毛刺、分层以及孔壁周围存在的微裂纹

这类加工复合材料独有的缺陷，这一类缺陷对孔的加工质量影响明显，同时也大大影响孔的装配精度，本文主要对毛刺、分层及撕裂等着重进行研究。

1. 毛刺缺陷分析

在观察毛刺缺陷时，发现所有的毛刺缺陷都发生在孔表层特定的位置，如图2所示。可见毛刺的产生与切削速度与纤维方向之间的夹角有关，定义此夹角为切削角ϕ。

在钻削过程中，随着钻头的旋转，切削角ϕ在0°～180°之间循环变化，如图3所示。当ϕ位于0°～90°之间时，钻头会对工件材料产生正方向的剪应力；当ϕ位于0°～90°之间时，钻头会对工件材料产生负方向的剪应力。因此可以将钻头钻削工件材料过程分为两类，当切削角为锐角时称为正剪切，当切削角为钝角时称为负剪切。而毛刺缺陷只存在于切削角大于0°而小于90°的区域

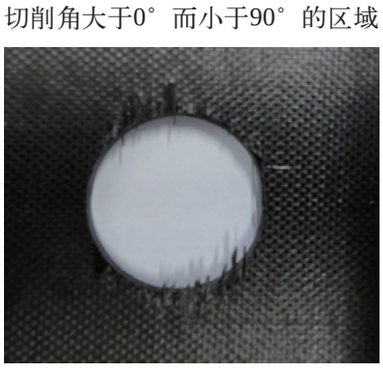


图2　毛刺出口缺陷图片

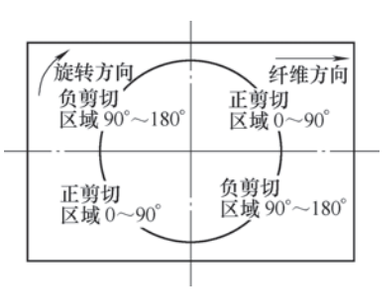


图3　工件材料与切削速度之间切削角示意图

之内，即正剪切区域。说明正剪切时，工件材料不容易被剪断，容易形成毛刺缺陷。

根据复合材料力学可知，碳纤维复合材料拉伸强度和压缩强度不同，因此在承受正剪切和负剪切时材料所具有的剪切强度相差很大。利用单向复合材料应力应变之间的关系以及Hoffman强度准则进行理论分析。

由Hoffman强度准则可知，材料发生破坏的临界条件为

$$\frac{\sigma_1^2-\sigma_1\sigma_2}{X_tX_c}+\frac{\sigma_2^2}{Y_tY_c}+\frac{X_c-X_t}{X_tX_c}\sigma_1+\frac{Y_c-Y_t}{Y_tY_c}\sigma_2+\frac{\tau_{12}^2}{S^2}=1 \quad (1)$$

其中，X_t为纤维方向的拉伸强度，X_c为纤维方向的压缩强度，Y_t为横向拉伸强度，Y_c为横向压缩强度，S为1-2面内的剪切强度。

对于材料主方向与工件坐标系不一致的情况，为了在统一的坐标中计算，需要对应力进行坐标变换，θ表示从x轴转向1轴的角度，以逆时针为正。坐标变换公式为

$$\begin{bmatrix}\sigma_1\\ \sigma_2\\ \tau_{12}\end{bmatrix}=T\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{bmatrix} \quad (2)$$

其中，T称为变换矩阵：

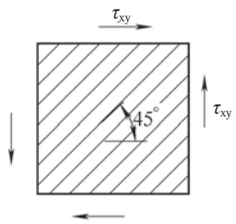
$$T=\begin{bmatrix}m^2 & n^2 & 2mn\\ n^2 & m^2 & -2mn\\ -mn & mn & (m^2-n^2)\end{bmatrix}$$

其中，$m=\cos\theta$，$n=\sin\theta$。

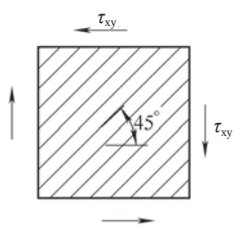
当材料只受剪应力作用时，$\sigma_x=\sigma_y=0$，进行坐标变换后代入Hoffman准则中可得

$$\left(\frac{8m^2n^2}{X_tX_c}+\frac{4m^2n^2}{Y_tY_c}+\frac{m^2-n^2}{S^2}\right)\tau_{xy}^2+\left(\frac{X_c-X_t}{X_tX_c}-\frac{Y_c-Y_t}{Y_tY}\right)2mn\tau_{xy}=1 \quad (3)$$

当正向剪切时，τ_{xy}为正；负剪切时，τ_{xy}为负，材料受力情况如图4所示。根据式（3）代入相应的值可以得出，负剪切作用下工件材料更容易被切断。



（a）受正剪切作用



（b）受负剪切作用

图4　工件材料受正负剪切作用示意图

以θ=45°为例，工件材料力学性能为：S=92.3MPa，X_t=1 490MPa，X_c=1 210MPa，Y_t=40.7MPa，Y_c=197MPa，正剪切时$\tau_{xy}=\tau$，代入式（3）解得临界剪切应力τ=196.5MPa；负剪切时$\tau_{xy}=-\tau$，代入式（3）解得临界剪切应力τ=40.43MPa。对比得出工件材料处于负剪切时更容易被剪断，因为临界剪应力远远低于正剪切时的临界剪切应力。从材料力学角度出发也可以得到这个结论：θ=45°时，正剪切相当于工件材料在纤维方向受到拉应力，而横向受到压应力；负剪切相当于工件材料在纤维方向受到压应力，而横向受到拉应力。碳纤维复合材料纤维方向的抗拉强度大于抗压强度，而横向的抗压强度大于抗拉强度，因此工件材料处于负剪切时更容易发生破坏即被切断。

根据以上分析得出，正剪切

和负剪切对材料的强度有明显影响。正剪切时临界剪应力大，工件材料不容易被切断，容易形成毛刺缺陷；负剪切时临界剪应力小，工件材料容易被切断，毛刺不易产生。因此在孔的出口处，会观察到毛刺缺陷呈区域性分布。

2. 分层缺陷分析

图5为钻削时分层示意图。在钻削碳纤维复合材料时，当层间的载荷超过层间的粘结强度时，分层就会发生。

图5　分层示意图

Hocheng等根据经典的平面弯曲理论和线弹性断裂机理分析了钻削CFRP时的分层机理，并对分层发生时临界轴向力的计算公式进行了推导，结果

$$F_{crit}=\pi\left[\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\upsilon^2)}\right]^{1/2}=\pi\sqrt{32G_{IC}M} \quad (4)$$

其中，G_{IC}是层间的断裂韧性，是材料常数，表示材料对裂纹扩展的抵抗能力，E是拉伸模量，h为未切削层厚度，v是泊松比，抗弯刚度$M=\dfrac{Eh^3}{12(1-\upsilon^2)}$

本文沿用此计算公式对钻削轴向力和分层之间的关系进行分析。由（4）式可以得到钻削整个过程中临界轴向力的变化曲线。通过临界轴向力与实际轴向力的对比，可以对分层的发生进行预测。进而选择合理的切削参数，控制切削力大小，预防分层的发生。

将工件材料性能参数代入（4）式得

$$F_{crit}=2\,058.156\,4h^{3/2} \quad (5)$$

临界轴向力的变化曲线如图6所示，可以发现随着钻削厚度的减小，临界轴向力迅速减小。由于钻削过程中轴向力在0～150N之间，而在入口处和孔中部时临界轴向力远远大于实际轴向力，因此孔入口处和中间部分很难观察到分层缺陷。而到了孔出口处，由于未切削层厚度减小，临界轴向力减小到实际轴向力范围以内，分层缺陷就非常容易产生了。对于分层缺陷极易产生的孔出口处，未切削层厚度约为0.1mm，代入临界轴向力公式可得孔出口处临界轴向力为65.08N。

表3为试验测得钻削出口处钻削力平均值和分层因子（F_d）的

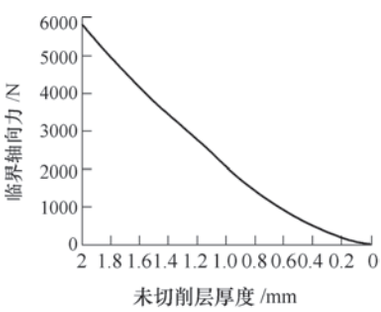


图6　临界轴向力变化曲线

测量值。通过对比可知，当进给量为0.05mm/r时，实际轴向力和出口临界轴向力大小近似，因此分层较小；当进给量为0.10mm/r时，实际轴向力大于出口临界轴向力，分层因子有所增大；当进给量为0.20mm/r时，实际轴向力明显大于出口临界轴向力，分层因子增加明显。

根据钻削试验得到的经验公式

$$f_z=292.347\,9V_c^{0.0047}f_z^{0.4994} \quad (6)$$

令$f_z=f_{crit}=65.08$，切削速度V_C对轴向切削力影响忽略不计，可以求得分层不发生的最大进给量为

$$f_{crit}=0.049\,6\text{mm/r} \quad (7)$$

因此，在碳纤维复合材料的钻削加工中，应根据实际钻削轴向力的大小，选择合适的进给量，从而减小分层缺陷。

结语

本文通过对碳纤维复合材料孔加工缺陷的观察分析，探讨了毛刺缺陷呈现一定区域性的原因，对分层缺陷与钻削轴向力之间的关系进行了进一步的研究，得到了以下结论：

（1）毛刺缺陷分布于工件材料受正剪切的区域。由于碳纤

表3　轴向力和分层因子

序号	进给量f/（mm·r^{-1}）	切削速度V_c/（m·min^{-1}）	轴向力F_z/N	分层因子F_d
1	0.05	50.27	66.46	1.107
2	0.05	100.53	70.18	1.163
3	0.05	150.80	64.06	1.127
4	0.05	201.06	70.59	1.163
5	0.10	50.27	90.67	1.090
6	0.10	100.53	90.77	1.158
7	0.10	150.80	94.04	1.212
8	0.10	201.06	94.24	1.156
9	0.20	50.27	139.38	1.249
10	0.20	100.53	135.64	1.255
11	0.20	150.80	133.50	1.272
12	0.20	201.06	133.27	1.259

维复合材料抗拉强度和抗压强度不同，工件材料受正剪切和负剪切时强度不同，正剪切时强度值大，工件材料不易被切断，容易形成毛刺缺陷；负剪切时强度值小，工件材料容易被切断，不易产生毛刺。

（2）分层的发生是由于层间载荷超过了临界轴向力。计算发现临界轴向力随着未切削层厚度的减小急剧减小，利用钻削力经验公式可以求出分层不发生时的最大进给量为0.049 6mm/r。

参考文献

[1] 刘志强. 碳纤维复合材料在航空领域的应用[J]. 黑龙江科技信息，2013（23）：62.

[2] 陶永亮，徐翔青. 树脂基复合材料在汽车上的应用分析[J]. 化学推进剂与高分子材料，2012（4）：36-40.

[3] 董博. 复合材料及碳纤维复合材料应用现状[J]. 辽宁化工，2013，42（5）：552-554.

[4] 杨小平，隋刚. 碳纤维复合材料在新能源产业中的应用进展[J]. 新材料产业，2012（2）：20-24.

[5] 胡宝刚，杨志翔，杨哲. 复合材料后加工技术的研究现状及发展趋势[J]. 宇航材料工艺，2000（5）：24-27.

[6] 李志强，樊锐，陈五一，等. 纤维增强复合材料的机械加工技术[J]. 航空制造技术,2003(12):34-37.

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

[8] Shyha I，Soo S L, Aspinwall D, et al. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites[J]. Journal of Materials Processing Technology，2010，210（8）：1023-1034.

MW（收稿日期：20160418）

（上接第15页）

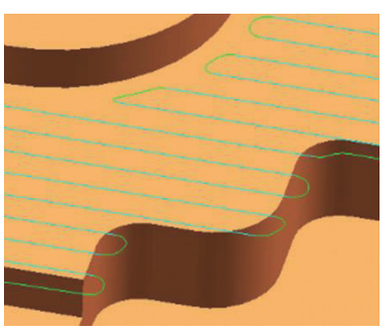


图7　拐角圆弧平滑过渡方式

合理的切入切出方式、横向与拐角路径的平滑过渡以及等高分层加工规划与合理的进给量，始终是为了确保高速加工时切削负荷轻而恒定。

（2）合理的刀具参数选择。适宜高速加工的金刚石刀具、立方氮化硼刀具、陶瓷刀具、涂层刀具、TiC（N）基硬质合金、超细晶粒硬质合金刀具等，不同的材质的刀具适宜于不同的模具材料、工况外，针对不同的模具材质，刀具还有不同的切削参数的选择。一般认为，高速切削的切削速度是常规切削速度的5～10倍。

遇陡峭、拐角等位置，为避免高速加工设备没有前馈功能，须给予合理的降速，要在编程时在陡峭、拐角位置设置适宜的调整比例，合理地对切削参数进行优化，以保持高速机床合理的负载，以及减少质量事故。

（3）先进的CAM软件选择。采用高速加工设备后，对编程人员的要求也增加。近年来 CAM 系统也越来越简单和方便，更贴近于车间高速加工。当前，模具行业常用的CAM软件有美国UG NX/CAM、以色列Cimatron/CAM、法国CATIA/CAM、美国 I-DEAS/CAM、美国Mastercam/CAM、英国Delcam PowerMILL/CAM等辅助制造软件，都分别对高速加工模块进行了工艺创新。

结语

随着市场需求的提升，模具市场日益扩大，模具制造对高速加工技术拥有强烈需求，但精密、复杂模具制造领域运用高速加工技术在我国时间不是很长，还缺乏成熟经验，还需整体提升技术水平与运用广度。

同时，当前模具行业运用高速加工技术后，虽然模具的质量、寿命得到明显提高，但促使模具制造时刀具使用成本高、设备运行成本高，总体制造成本有大幅度增加。为此，高速加工技术的运用应与模具质量、周期、寿命、成本等一并统筹研究、革新，以期通过合理创新，一方面提高模具质量与寿命、缩短模具制造周期，另一方面降低模具制造成本，真正实现我国精密、复杂模具的现代智造新工艺、新水平。MW

（收稿日期：20160411）