DOI: 10.3901/JME.2019.11.197

复合材料成型分层缺陷在钻削横刃挤压阶段的扩展行为*

王福吉 胡海波 张博宇 马建伟 赵 猛
(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要: 碳纤维增强复合材料由于具有高比强度、高比模量等优异性能, 广泛应用于先进装备的承力构件中。此类复材构件在铺放固化成型过程中易产生随机分布的分层缺陷, 若缺陷区域与构件连接孔加工区域交叠, 将使制孔损伤产生机制更加复杂、加工质量更难以保证。为保障碳纤维复合材料构件的加工质量, 揭示成型分层缺陷对制孔质量的影响机制, 针对钻削过程中成型分层缺陷的动态演化行为进行研究, 得到其在钻削过程中轴向力最大的横刃挤压阶段发生扩展的临界条件以及扩展长度的计算方法。基于此, 结合钻削试验对预埋分层缺陷在制孔过程中的扩展行为进行在线观测, 最终获得刀具作用位置对缺陷扩展行为的影响。该研究成果将为后续有关复材成型缺陷在钻削过程中扩展的抑制方法研究提供基础, 也将为丰富复材损伤抑制理论作出贡献。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 钻削制孔; 成型分层缺陷; 缺陷扩展行为; 损伤抑制

中图分类号: TB332

The Expansion Behavior of Composite Delamination Defect during the Chisel Edge Extrusion Stage

WANG Fuji HU Haibo ZHANG Boyu MA Jianwei ZHAO Meng
(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has been widely adopted in manufacturing key load-bearing parts in advanced equipment due to its high specific strength, high specific strength, etc. However, the delamination defect may be introduced during manufacturing. These defects are randomly distributed in the workpiece. If the delamination zone and the drilling zone overlapped, the mechanism of drilling damage would be more complicated, and the quality of the hole would be difficult to guarantee. In order to promise the quality of drilling hole and reveal the influence mechanism of delamination defect on the hole quality. The research is aimed to analyze the dynamic expansion behavior of delamination defect, and a model is established to calculate the critical condition which the delamination begin to propagate and the expansion length of the delamination during the chisel edge depress the delamination. The expansion behavior of delamination defect can be observed online through the drilling experiment; finally the effect of the tool position on the defect expansion behavior can be obtained. The researches provide a theoretical basis for suppressing delamination expansion.

Key words: CFRP; drilling hole; manufacturing delamination defect; defect expansion behavior; damage suppression

0 前言

碳纤维树脂基增强复合材料(Carbon fiber reinforced composite, CFRP)由于具有轻质、高强的

优异性能, 近年广泛应用于航空航天领域先进装备的大型承力构件中^[1-2]。例如, 波音 787 客机和 A380 客机的水平尾翼、垂直尾翼构件采用碳纤维增强复合材料, 使得飞机重量和油耗大幅降低^[3]。这些复材承力构件常采用铺放、固化成型方式设计制造, 相比于传统材料构件的制造方式, 可省去毛坯制备、粗加工等环节, 有效缩短了工艺流程。然而, 由于碳纤维复合材料的各向异性、层叠成型特征, 以及热压固化过程中的热、化学收缩非均匀性, 其在成

* NSCF-辽宁联合基金重点(U1508207)、国家自然科学基金(51575082)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2014CB046503)、国家自然科学基金创新群体(51621064)和中央高校基本科研业务费专项资金(DUT16TD01)资助项目。20180619 收到初稿, 20190224 收到修改稿

型过程中易产生分层等缺陷,导致构件性能大幅下降^[4]。此外,为满足连接装配需求,成型后的构件常需要进行钻削加工,由于碳纤维复合材料的层间结合力相对较弱,在钻削轴向力作用下易导致层间界面失效诱发分层^[5],特别是当钻削区域存在成型分层缺陷时,其加工质量更难以保证。这些成型和加工过程中产生的分层严重降低了构件的承载性能,甚至导致大型构件报废,造成巨大损失。因此,实现碳纤维复合材料分层损伤的有效抑制是保证大型承力构件可靠服役的关键。

为抑制分层损伤,国内外学者对碳纤维复合材料成型和加工过程中分层损伤的成因和影响因素进行了研究。研究发现,在碳纤维复合材料铺放、固化成型过程中,温度和压力等过程参数对成型分层缺陷的产生具有关键性影响,同时,外来异物、树脂流动性等外在因素也会加剧分层^[6-7];在碳纤维复合材料钻削制孔过程中,主轴转速、进给速度等工艺参数以及复材工件的纤维铺层顺序、钻削刀具几何结构是影响钻削分层损伤的决定性因素^[8-9]。基于此,部分学者通过优化过程参数、改善刀具结构等方面对分层缺陷进行了抑制。KRISHNARAJ 等^[10]研究了工艺参数对钻削轴向力和扭矩的影响,并计算出最优钻削加工参数,有效减少钻削分层损伤。FERNANDES 等^[11]通过试验的方法发现四刃直槽的钻扩一体式钻头的加工质量较好。TSAO^[12]设计了钻磨复合制孔工具,有效降低了钻削力。JIA 等^[13]通过观察钻削加工中材料的去除行为开发先进刀具,抑制了钻孔分层损伤。上述研究分别针对碳纤维复合材料在成型过程和钻削制孔过程中的分层损伤抑制方法进行了研究,然而,碳纤维复合材料成型过程中的分层缺陷无法彻底消除,其分布具有很大的随机性,且对构件性能有很大影响^[14]。若成型分层缺陷在静态载荷作用下或钻削过程中发生扩展,构件性能及制孔质量将难以保证。因此,需要针对碳纤维复合材料成型分层缺陷在静载作用和钻削加工中的扩展行为进行深入研究。

目前,关于碳纤维增强复合材料成型分层缺陷在静态载荷下的扩展行为已经进行了大量的研究。PEKBAY 等^[15]对含带状分层损伤的玻璃纤维复合材料层合板的临界屈曲载荷进行了研究,指出试样尺寸、铺层角度及铺层顺序对临界屈曲载荷均有影响。JIANG^[16]研究了疲劳压缩载荷作用下的开孔复合材料层合板的分层形成及演化规律,并指出在损伤形成的过程中刚度的变化很小。KENANE 等^[17]开展了复合材料层合板的静态载荷及疲劳载荷试验,并测定了分层疲劳扩展阈值。上述研究成果能

够合理的揭示成型分层缺陷在静态载荷作用下的扩展行为。然而,实际的钻削过程是在刀具连续进给下的动态过程,其钻削力大小非恒定且作用点位置随刀刃的回转和进给运动发生动态变化。

此外,由于成型缺陷分布的随机性,刀具与缺陷的实际作用位置不可控。因此,需要对钻削过程中成型分层缺陷的扩展行为进行进一步研究。

为解决上述问题,本文通过在钻削中最易产生分层损伤的孔出口附近预埋成型分层缺陷的方式,分析其在钻削轴向力最大的横刃挤压阶段中的扩展行为,求取缺陷扩展的临界条件以及扩展长度的计算方法。基于此,结合半孔钻削试验对预埋分层缺陷在制孔过程中的扩展行为进行在线观测,最终获得刀具作用位置对缺陷扩展行为的影响。本文的研究成果将为后续有关复材成型缺陷在钻削过程中扩展的抑制方法研究提供基础,也将为丰富复材损伤抑制理论作出贡献。

1 横刃挤压阶段成型分层缺陷演化行为分析

实际的钻削过程中,刀具在持续回转的同时匀速沿工件厚度方向进给,刀具的横刃、主切削刃先后对工件材料进行切削作用从而实现材料的去除。由于碳纤维复合材料层间结合强度较低,在钻削轴向力作用下极易发生分层,特别是钻削出口附近处材料的支撑强度更弱,致使分层损伤加剧。因此,孔的出口分层损伤是影响碳纤维复合材料制孔质量的关键,工业中也常以出口分层损伤作为评价其制孔质量的标准。

本章将通过在制孔出口处附近预埋缺陷的方式,分析计算在钻削过程中产生轴向力最大的阶段——横刃挤压阶段^[18]中该缺陷的动态行为,获得缺陷扩展的临界条件及扩展长度的计算方法。

在钻削刀具的横刃与工件相互作用的过程中,被切削层纤维在钻削刀具横刃的推挤作用下将发生弯曲变形。这一过程中被切削层纤维可简化为具有弹性地基约束的梁模型^[19],横刃对材料的作用力近似等效为集中载荷^[19],如图 1 所示。

图 1 集中载荷作用下的弹性地基梁模型

取长度为 dx 的微小单元体, 其在切削过程中的受力情况如图 2 所示。其中, p_m 为单位长度上周围材料对纤维的支撑作用, q_b 为界面对纤维的粘结作用。

图2 微元体受力示意图

考虑到在碳纤维复合材料中, 周围材料对纤维的约束作用同时包括法向约束作用和切向约束作用, 结合双参数弹性地基梁理论, 有^[19]

$$p_m = k_m w - k_{m1} \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \quad (1)$$

式中, k_m 为周围材料支撑的第一参数, 反映了纤维弯曲时周围材料对它的法向支撑作用; k_{m1} 为周围材料支撑的第二参数, 反映了纤维弯曲时周围材料对它的切向约束作用。

然而, 由于在横刃挤压阶段下, 刀具对纤维层中纤维产生的作用力主要为竖直向下的轴向力, 而周围材料对纤维的切向约束主要作用于所研究纤维层的层内, 对纤维在横刃挤压阶段的弯曲变形影响很小, 因此可取 $k_{m1}=0$, 此时双参数地基梁模型可简化为温克尔地基梁, 如式(2)。

$$p_m = k_m w \quad (2)$$

纤维在横刃挤压下的弯曲变形主要受周围材料对纤维的法向约束作用影响。如图 2 中所示, 在实际的钻削过程中, 周围材料对纤维的法向约束作用一方面来自所研究纤维层下方材料对纤维的支撑作用 p_m , 另一方面则来自所研究纤维层上方界面对纤维的粘结作用 q_b , 此二者作用叠加为周围材料对纤维的法向约束作用。

本文将所研究纤维层下方材料近似为等效均质材料^[19], 且由于钻削出口附近的材料所受下方材料的约束较弱, 则式(2)中表征下方材料支撑的系数 k_m 可按 Boit's 所推导的方法取为^[20]

$$k_m = 1.23 \left[\frac{E_m^* d_f^4}{1.06(1-\nu^2) E_f I_f} \right]^{0.11} \frac{E_m^*}{1.06(1-\nu^2)} \quad (3)$$

式中, E_m^* 为所研究纤维层下方材料的等效模量, 可由材料力学方法按下式计算^[21]

$$\frac{1}{E_m^*} = \frac{c_f}{E_f} + \frac{c_m}{E_m} \quad (4)$$

式中, E_f 为纤维的弹性模量; E_m 为树脂基体的弹性模量; c_f 为纤维的相对体积含量; c_m 为树脂基体的相对体积含量。

另一方面, 界面对纤维的粘结作用为

$$q_b = k_b w \quad (5)$$

式中, k_b 为界面的等效模量。

综上式(2)~(5), 由微小单元体的平衡方程, 可得单纤维温克尔地基梁的变形控制方程

$$E_f I_f \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + (k_m + k_b) w(x) = 0 \quad (6)$$

上述分析均是在碳纤维复合材料无成型缺陷的前提下进行的。而当界面处存在缺陷时, 含缺陷界面下方纤维将不再受到界面的粘结作用, 此时该层纤维在刀具横刃挤压作用下将仅收到来自下方材料的支撑作用。如图 3 所示, 设界面缺陷区域为 AB , 载荷作用于点 O , 记缺陷层的下一层纤维层为层 S , 则层 S 中在 AB 区域下方的纤维在横刃挤压阶段的变形控制方程简化为

$$E_f I_f \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + k_m w(x) = 0 \quad (7)$$

图3 横刃挤压成型分层缺陷

因此, 考虑界面处成型缺陷对纤维约束状态的影响, 将层 S 中的纤维划分为 FB 、 BO 、 OA 、 AE 四段。考虑到 O 点左右两侧结构相似, 下面以 O 点左侧为例, 采用有限元计算方法, 对纤维的弯曲断裂及界面缺陷的扩展情况进行求解。

对于 OA 段, 由式(7)求得纤维弯曲变形的挠度通解为

$$w(x) = \exp(\alpha x) (B_1 \cos \beta x + B_2 \sin \beta x) + \exp(-\alpha x) (B_3 \cos \beta x + B_4 \sin \beta x) \quad (8)$$

其中, $B_1 \sim B_4$ 为积分常数, 且有

$$\alpha = \beta = \sqrt[4]{\frac{k_m}{4E_f I_f}} \quad (9)$$

梁单元内部的剪力和扭矩可分别表示为^[22]

$$Q = -E_f I_f \frac{d^3 w}{dx^3} \quad (10)$$

$$M = -E_f I_f \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (11)$$

设矢量 d_{OA} 、 r_{OA} 分别为

$$\mathbf{d}_{OA} = \{w_O, \theta_O, w_A, \theta_A\}^T \quad (12)$$

$$\mathbf{r}_{OA} = \{Q_O, M_O, Q_A, M_A\}^T \quad (13)$$

则单元刚度矩阵 $\mathbf{k}_{OA}$ 为

$$\mathbf{k}_{OA} = \mathbf{r}_{OA} \mathbf{d}_{OA}^{-1} \quad (14)$$

对于 AE 段, 由于点 E 为无穷远处, 其挠度为 0, 即满足

$$w_E = w|_{x=+\infty} = 0 \quad (15)$$

则纤维弯曲变形的挠度通解简化为

$$w(x) = \exp(-\alpha x) (B_3 \cos \beta x + B_4 \sin \beta x) \quad (16)$$

其中, B_3 、 B_4 为积分常数, 且有

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{k_m + k_b}{4E_f I_f}} \quad (17)$$

设矢量 $\mathbf{d}_{AE}$ 、 $\mathbf{r}_{AE}$ 分别为

$$\mathbf{d}_{AE} = \{w_A, \theta_A\}^T \quad (18)$$

$$\mathbf{r}_{AE} = \{Q_A, M_A\}^T \quad (19)$$

则单元刚度矩阵 $\mathbf{k}_{AE}$ 为

$$\mathbf{k}_{AE} = \mathbf{r}_{AE} \mathbf{d}_{AE}^{-1} \quad (20)$$

由式(14)和式(20), 可得 O 点左侧纤维的整体载荷、位移、刚度之间的关系式

$$\mathbf{R}_{left} = \mathbf{K}_{left} \mathbf{d}_{left} \quad (21)$$

式中, $\mathbf{K}_{left}$ 为根据式(14)和式(20)中求得的单元刚度矩阵经叠加而得到的 O 点左侧纤维整体刚度矩阵。

采用类似的计算方法, 对 O 点右侧纤维进行分析求解, 最终确定整体纤维的载荷、位移、刚度之间的关系式

$$\mathbf{R} = \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (22)$$

式中, 整体载荷矢量 $\mathbf{R}$ 为

$$\mathbf{R} = \{Q_F, Q_B, M_B, Q_O, M_O, Q_A, M_A, Q_E\}^T \quad (23)$$

整体位移矢量 $\mathbf{d}$ 为

$$\mathbf{d} = \left\{ w_F, \frac{dw_F}{dx}, w_B, \frac{dw_B}{dx}, w_O, \frac{dw_O}{dx}, w_A, \frac{dw_A}{dx}, w_E, \frac{dw_E}{dx} \right\}^T \quad (24)$$

矩阵 $\mathbf{K}$ 为根据 FB 、 BO 、 OA 、 AE 四段的单元刚度矩阵经叠加原理求得的整根纤维的整体刚度矩阵。

由式(24)得

$$\mathbf{d} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{R} \quad (25)$$

2 横刃挤压阶段成型分层缺陷扩展临界条件及扩展长度的计算方法

根据式(25)求解出 $\mathbf{K}$ 之后, 可通过向点 O 施加载荷 $\mathbf{R}$ 计算出各节点位移。考虑到点 A (或点 B) 为预埋缺陷的边缘, 随着切削过程的进行, 载荷 $\mathbf{R}$ 不断增加, 纤维的弯曲变形不断增加, 设 k_b 为界面的等效模量, σ_b 为界面的结合强度, 若满足

$$k_b w_A \geq \sigma_b \quad (26)$$

则点 A (或点 B) 处界面将发生开裂, 即预埋缺陷将发生扩展, 反之则缺陷不扩展。然而, 在切削过程中, 纤维的弯曲变形存在极限, 当纤维内的截面的最大拉应力 $\sigma_{\max}$ 达到其拉伸强度极限 σ_t 时, 纤维将发生断裂。一旦纤维发生断裂, 纤维的弯曲变形将不再增加, 则点 A (或点 B) 的位移也不再发生变化。因此, 点 A (或点 B) 处的界面若发生开裂, 即预埋缺陷若发生扩展, 其一定发生在纤维弯曲断裂之前。结合以上分析, 可得在横刃挤压阶段预埋缺陷扩展的临界条件为

$$\begin{cases} w_A \geq \frac{\sigma_b}{k_b} \text{ 或 } w_B \geq \frac{\sigma_b}{k_b} \\ \sigma_{\max} < \sigma_t \end{cases} \quad (27)$$

其中, 设纤维半径为 r , 则纤维各截面最大拉应力为

$$\sigma_{\max} = \max \left(E_f r \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \quad (28)$$

为判断式(27)是否成立, 采用迭代算法, 每个增量步逐渐增加 Q_O 的值以增加载荷矢量 $\mathbf{R}$, 并求解每增量步中 w_A 、 w_B 以及 $\sigma_{\max}$ 的值。当 $\sigma_{\max}$ 达到 σ_t 时, 即纤维发生弯曲断裂, 迭代停止, 算法流程如图 4 所示。

以下将按照式(27)是否成立, 进行分类讨论, 以求得缺陷的扩展长度, 记为 L_e 。

若式(27)不成立, 则缺陷不会发生扩展, $L_e=0$; 若式(27)成立, 预埋缺陷将发生扩展, 则迭代过程继续。扩展后每个增量步将逐渐增大 BO 或 OA 段长度, 以及载荷矢量 $\mathbf{R}$ 的值, 依据新的约束条件重新对梁内的各部分单元进行求解, 更新缺陷扩展后纤维整体刚度矩阵, 并求解 w_A 、 w_B 以及 $\sigma_{\max}$ 的值。当 $\sigma_{\max}$ 达到 σ_t 时, 即纤维发生弯曲断裂, 迭代停止, 此时 AB 段的长度与迭代之前的长度之差即为缺陷扩展长度, 具体算法流程如图 5 所示, 其中 floor 为向下取整函数。

图4 成型分层缺陷扩展临界条件计算方法的流程

图5 成型分层缺陷扩展长度计算方法的流程

3 刀具不同作用位置成型分层缺陷演化行为

成型分层缺陷在材料内部的分布具有很大的随机性，导致实际的加工过程中刀具与缺陷的相对位置不可控。为探索刀具与成型缺陷的作用位置对其扩展行为的影响，本文分别在距离缺陷边缘 3.5 mm 和 0.1 mm 位置处进行钻削制孔，利用高速相机对缺陷扩展行为进行在线观测，并与理论计算结果进行对比。

3.1 试验设置

本文采用单层厚度为 0.18 mm 的 T800/977-2 预浸料，用手工铺设的方式制备厚度为 3.6 mm 的层合板。在厚度方向十分之一的位置处，置入直径为 7 mm 厚度为 0.01 mm 的聚四氟乙烯薄膜^[23]作为预埋成型缺陷，而后放入热压罐在 180 ℃ 高温、0.6 MPa 压力下固化，最终制得的层合板性能参数如表 1 所示。

表 1 碳纤维复合材料单层板性能参数

材料特性	数值
纤维弹性模量 E_f / GPa	295
纤维半径 r / μm	3.25
纤维拉伸强度 σ_t / GPa	4.05
界面粘结强度 σ_b / (Pa · m)	50
界面等效模量 k_b / GPa	115
树脂弹性模量 E_m / GPa	3.45
纤维体积分数 c_f	0.65
树脂体积分数 c_m	0.35

为更直观、清晰地对预埋缺陷的动态行为进行在线观测，本文采用 RAHME^[24]的半孔试验观测方法，如图 6 所示，因此在制备样件时，将缺陷区域沿中心线切开，以使缺陷区域在加工过程中便于观测。通过超声水浸 C 扫描对缺陷区域进行定位，并基于此对层合板进行裁切，最终制得尺寸为 70 mm × 35 mm × 3.6 mm 的试件，如图 7 所示。

图6 钻削 CFRP 层合板试验的配置图

图7 预置分层缺陷试件

选用直径为 6 mm，前角为 10°，后角为 12° 的硬质合金麻花钻，在 GONA 五轴加工中心上进行钻削试验，转速为 3 000 r/min，进给速度为 150 mm/min。试验过程中使用 FASTCAM SA5 高速相

机进行拍摄。

3.2 试验结果及对比较证

(1) 加工位置距离缺陷边缘 3.5 mm。

基于图 4、5 中所示算法,对边界点挠度值以及截面最大弯曲正应力随加载载荷的变化规律进行计算,结果如图 8 所示。

图 8 成型分层缺陷边界处弯曲挠度及纤维弯曲正应力的动态演化过程

随着迭代次数增加, w_A 、 w_B 及 $\sigma_{\max}$ 均增加。然而,因刀具作用位置与缺陷边缘的距离(mm 级)相比于纤维直径(μm 级)尺度巨大,刀具的挤压作用对缺陷边缘的变形挠度 w_A 、 w_B 的影响较小,导致当截面最大正应力 $\sigma_{\max}$ 随加载载荷增加而达到纤维的拉伸强度极限 σ_t 时, w_A 、 w_B 均未达到 σ_b/k_b (本例中 w_A 和 w_B 两曲线重合),即缺陷将不扩展。此时,加载载荷为 63.92 N。

图 9 所示为半孔钻削试验在线观测结果。其中图 9a 对应横刃刚接触 S 层时状态,图 9b 对应横刃刚钻出该层时的状态。可见,在层内纤维断裂前,缺陷边缘 A、B 点并未出现扩展,与理论计算结果相符。

(a) 横刃接触分层缺陷

(b) 横刃钻出分层

图 9 距离缺陷边缘 3.5 mm 半孔钻削过程观测图

(2) 加工位置距离缺陷边缘 0.1 mm。

类似的,对刀具作用位置与缺陷边缘较近时该缺陷的扩展行为进行计算。此时,在纤维的截面最大正应力 $\sigma_{\max}$ 达到其拉伸强度极限 σ_t 前,缺陷边缘 A 的挠度达到界面失效的临界挠度(260.9 μm),即缺陷发生扩展,如图 10 所示。由图 5 可知,随着加载载荷的持续增加,缺陷边缘将不断远离刀具作用点,直至纤维断裂。图 11 为缺陷扩展长度以及纤维截面最大正应力随加载载荷的变化曲线,当加载载荷增加至 69.86 N 时,纤维截面最大正应力 $\sigma_{\max}$ 达到纤维拉伸强度 σ_t ,纤维发生断裂,此时,缺陷边缘扩展位移为 84.57 μm 。

图 10 成型分层缺陷扩展前边界处弯曲挠度及纤维弯曲正应力的动态演化过程

图 11 成型分层缺陷扩展后 A 点扩展位移及纤维弯曲正应力的动态演化过程

图 12 为在线观测结果。图 12b 中可见在刀具最终钻出 S 层时,缺陷边缘由初始的点 A 扩展至点 A', 实测扩展长度为 75.93 μm , 与理论计算结果误差为 11.3%。

(a) 横刃接触分层缺陷

(b) 横刃钻出分层

图 12 距离成型分层缺陷边界 A 点 0.1 mm 处
半孔钻削过程观测图

4 结论

(1) 成型分层缺陷在钻削过程的横刃挤压阶段发生扩展的临界条件为: 在纤维内最大弯曲正应力达到最大拉伸强度之前, 成型分层缺陷边缘处的界面应力达到界面的等效强度。

(2) 若成型分层缺陷在钻削过程的横刃挤压阶段发生了扩展, 则随着载荷的增加, 在纤维内部最大弯曲正应力增加的同时缺陷区域不断扩大, 直至纤维最大弯曲正应力达到其最大拉伸强度发生断裂。

(3) 刀具作用位置对分层缺陷的扩展具有较大影响, 当刀具作用位置离缺陷边缘较远时, 载荷对缺陷边缘挠度的影响较小, 成型分层缺陷较难扩展; 反之, 若刀具作用位置离缺陷边缘较近, 成型分层缺陷易发生扩展。

参 考 文 献

- [1] 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): 749-757.
QIAN Baowei, LIU Wei, JIA Zhengyuan, et al. Wear mechanism of double point angle drill bit in drilling CFRP composites [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2017, 34(4): 749-757.
- [2] NING F D, CONG W L, WANG H, et al. Surface grinding of CFRP composites with rotary ultrasonic machining: a mechanistic model on cutting force in the feed direction[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1-4): 1217-1229.
- [3] WANG F J, ZHANG B Y, MA J W, et al. Computation of the distribution of the fiber-matrix interface cracks in the edge trimming of CFRP[J]. Applied Composite Materials, 2018(5): 1-28.
- [4] 王雪明, 谢富原, 李敏, 等. 热压罐成型复合材料复杂结构对制造缺陷的影响规律[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 317-322.
- WANG Xueming, XIE Fuyuan, LI Min, et al. Effect Rules of Complex structure on manufacturing defects for composites in autoclave molding[J]. Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 757-762.
- [5] JIN P J, KIM G W, KANG Y L. Critical thrust force at delamination propagation during drilling of angle-ply laminates[J]. Composite Structures, 2005, 68(4): 391-397.
- [6] CANTEWELL W J, MORTON J. Significance of damage and defects and their detection in composite materials: A review[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2007, 27(1): 29-42.
- [7] 王雪明, 谢富原, 李敏, 等. 热压罐成型复合材料构分层缺陷影响因素分析[C]//全国复合材料学术会议, 2008.
Wang Xueming, Xie Fuyuan, LI Min, et al. Factor analysis of delamination in composite components produced by autoclave process[C]//National Conference on Composite Materials, 2008.
- [8] 张厚江, 陈五一. 碳纤维复合材料(CFRP)钻孔出口处缺陷的研究 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 150-155.
ZHANG Houjiang, CHEN Wuyi. Investigation of the exit defects in drilling carbon fiber-reinforced plastic plates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(7): 150-155.
- [9] LAZAR M B, XIROUCHAKIS P. Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(12): 937-946.
- [10] KRISHNARAJ V, ZITOUNE R, DAVIM J P. Drilling of polymer-matrix composites[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(15): 1817-1832.
- [11] FERNANDES M, COOK C. Drilling of carbon composites using a one shot drill bit. Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(1): 70-75.
- [12] TSAO C C. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill[J]. Materials & Design, 2008, 29(9): 1740-1744.
- [13] JIA Z, FU R, NIU B, et al. Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2016, 110(2016): 55-65.
- [14] 王奔, 高航, 郭东明. 树脂固化温度与纤维铺设方式对 C/E 复合材料制孔质量的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 19-25.
WANG Ben, GAO Hang, GUO Dongming, et al. Influence of resin cure temperature and fiber lay-up style on the drilling quality of C / E composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 19-25.

- [15] PEKEY Y. A numerical and experimental investigation of critical buckling load of rectangular laminated composite plates with strip delamination[J]. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 2006, 25(7): 685-697.
- [16] JIANG J. Delamination formation and delamination propagation of composite laminates under compressive fatigue loading[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2000, 13(1): 8-13.
- [17] KENANE M, BENMEDAKHENE S, AZARI Z. Fracture and fatigue study of unidirectional glass/epoxy laminate under different mode of loading[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2010, 33(5): 284-293.
- [18] WON M S, DHARAN C K H. Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2002, 124(4): 778-783.
- [19] QI Z, ZHANG K, LI Y, et al. Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks[J]. *Composite Structures*, 2014, 107(1): 604-609.
- [20] BOIT M A. Bending of an infinite beam on an elastic foundation[J]. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 2008, 29(9): 1740-1744.
- [21] 沈观林, 胡更开, 刘彬. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
SHEN Guanlin, HU Gengkai, LIU Bin. *Mechanics of composite materia*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [22] FENG Z, COOK R D. Beam elements on two-parameter elastic foundations[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1983, 109(6): 1390-1402.
- [23] LUO H, HANAGUD S. Delamination modes in composite plates[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 1996, 9(4): 106-113.
- [24] RAHME P. Study into causes of damage to carbon epoxy composite material during the drilling process[J]. *International Journal of Machining & Machinability of Materials*, 2008, 3(4): 356-363.

作者简介: 王福吉, 男, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为碳纤维增强复合材料高质高效加工方法。

E-mail: wfjsll@dlut.edu.cn

胡海波, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为碳纤维增强复合材料成型缺陷在制孔过程中的演化行为。

E-mail: 734111217@qq.com

张博宇(通讯作者), 男, 1992 年出生, 博士研究生。碳纤维复合材料加工损伤预测及工艺优化。

E-mail: allen0317@mail.dlut.edu.cn