

高强度碳纤维增强复合材料层合板的钻削制孔过程 及其缺陷形成分析

陈明 邱坤贤 秦声 王呈栋 蔡晓江

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海, 200240)

摘要: 单向层合结构的高强度碳纤维增强树脂基复合材料已逐渐发展成为航空承力结构件的主要材料, 相关的切削加工需求也越来越多。由于显著的各向异性, 单向层合结构的碳纤维复合材料易在切削加工中形成缺陷, 难切削加工性明显。针对 T800 级高强度 CFRP 单向层合材料开展直角自由切削试验, 研究其在切削过程中的切削力和切削热随纤维方向角的变化产生的各向异性行为。针对制孔刀具三尖钻和八面钻开展 CFRP 层合板的钻削制孔试验, 研究了三尖钻和八面钻的具体钻削过程中切削力、扭矩和切削温度的变化规律及其对钻削缺陷形成的影响。此外, 对钻削制孔形成的孔壁加工表面进行分析, 得到了典型孔壁缺陷的形貌照片并分析其形成原因。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 各向异性; 切削力; 切削温度; 表面形貌

中图分类号: TG501

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)05-0667-08

Study on Drilling Behaviors and Defects Forming Process of High-Strength CFRP Laminates

Chen Ming, Qiu Kunxian, Qin Sheng, Wang Chengdong, Cai Xiaojiang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: High-strength carbon fiber reinforced polymer (CFRP) with unidirectional laminate structure has gradually developed into major material in load-bearing components in aerospace, and the cutting demand of CFRP is increasing. Because of the significant anisotropy, CFRP laminates highly tend to produce defects and are typical difficult-to-machine materials. Orthogonal cutting experiments on T800 high-strength CFRP unidirectional laminates are conducted to study the variation of cutting force, torque and cutting temperature with different fiber orientations. Based on the drilling experiments with brad point drill and multifacet drill, the effects of cutting force, torque and cutting temperature on defect forming process are discussed, and SEM topography of hole wall surface with typical defects is given. Through analyzing the wall surface of drilling holes, defect formation mechanism under different drilling processes is given.

Key words: carbon fiber reinforced polymer (CFRP); anisotropy; cutting force; cutting temperature; surface topography

碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)作为最具代表性的一种先进树脂

基复合材料, 由于其具有比强度和比刚度大、耐腐蚀、可设计性强等诸多优势^[1-2], 自 20 世纪 70 年代

基金项目: 国家自然科学基金(51105253)资助项目; 国家高技术研究发展计划(“八六三”计划)(2013AA040104)资助项目; 国家科技重大专项课题(2012ZX04012-021)资助项目。

收稿日期: 2014-05-10; **修订日期:** 2014-07-10

作者简介: 陈明, 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 高速切削理论与应用技术、高效精密磨削理论与应用技术、难加工材料加工与精密加工理论等。

通信作者: 陈明, E-mail: mchen@sjtu.edu.cn.

开始应用于航空领域,从小尺寸、小承力的整流罩、扰流板到尾翼级的次承力部件,再到机身、机翼级的主承力大型结构体^[3-5],CFRP材料已经逐步替代传统的铝合金、高强钢等金属材料成为主要的航空结构件材料。例如目前的B787、A380、A350、A400M等国外先进大型飞机上复合材料已经全面应用于飞机的主承力大型结构件,这也标志着大型民机正式进入复合材料时代。通常CFRP材料大型构件是直接通过材料成型过程实现复杂结构件的成型,尽管如此,为了使CFRP材料构件能够达到最终零件所要求的几何尺寸、形状精度和表面质量,材料成型之后再行切削加工基本是难以避免的,特别是装配过程中最常见的孔加工,其孔加工质量直接影响装配质量和效率。

CFRP材料的各向异性与非均匀性使其与金属材料的切削加工过程有着明显的区别^[6],这使得切削加工领域面临对新的挑战。复合材料各向异性的影响主要表现为复合材料在切削加工时显著的方向性,如CFRP层合板的层间结合强度仅为其沿纤维方向抗拉强度的5%~20%,易在切削力的作用下形成层间分层。又例如切削CFRP材料时在不同的纤维方向角条件下的材料去除机理完全不同,这导致每层内部将产生具有各向异性层内作用力,最终由于多层的相互作用,在整体上产生波动明显的切削力,影响加工质量。由上可知,复合材料从材料组成和复合属性上导致了切削加工性能较差、切削过程材料去除规律复杂、易形成切削加工缺陷。

面对航空制造业巨大的需求以及CFRP材料切削加工存在的挑战,国内外研究者也开展了一些研究工作^[7-10],主要涉及切削工艺参数优化、刀具结构匹配、加工表面缺陷^[11]等方面。例如文献^[12]研究了匕首钻和麻花钻的钻削过程,重点研究横刃的钻入过程。文献^[13]使用3种不同刃形的钻头进行了钻削试验,主要针对麻花钻展开研究。文献^[14]使用4种不同几何参数的钻头进行钻削试验,研究不同钻削推力对CFRP材料分层的影响,但没有考虑工件材料各向异性对钻削缺陷的影响。总的来说,目前针对各向异性特征下材料的切

削去除机理研究仍较少,尤其是针对特殊优化处理的三尖钻结构和八面钻结构缺少系统的钻削过程研究。

本文针对T800级高强度CFRP单向层合材料开展直角自由切削试验,研究其在切削过程中的力热随纤维方向角的变化产生的各向异性行为,针对三尖钻和八面钻开展CFRP层合板的钻削制孔试验,研究了三尖钻和八面钻的具体钻削过程及钻削缺陷形成原因。此外,对钻削制孔形成的孔壁加工表面进行分析,得到了典型孔壁缺陷的形貌照片并分析其形成原因。

1 试验方案

1.1 工件材料和刀具

采用的试验材料为T800/X850CFRP单向层合板,其中A板为同向铺层(均为0°方向)共32层,厚度为6.08mm,B板铺层方向为[+45/-45/0/45/0/0/-45/90/45/0/-45/0/-45/90/45/0]s,厚度同为6.08mm。碳纤维体积分数均为65%,相关的力学性能指标如表1所示。

试验中A板被切割成尺寸为25mm×30mm的小块板料,通过对0°CFRP层合板按不同方向切割得到纤维方向角分别为0°,15°,30°,45°,60°,75°,90°,105°,120°,135°,150°和165°的单向层合板进行直角自由切削试验,试验所用刀具为定制的CVD金刚石涂层硬质合金正交飞刀,刀具前角为25°,后角为15°,涂层后的刃口钝圆半径为15μm。试验所用切削速度为 $V_c=50$ m/min,切削深度为 $a_p=20$ μm。

B板平面尺寸为200mm×300mm,用于进行钻削制孔试验,试验所用刀具为针对CFRP材料制孔加工优化的三尖钻和八面钻,具体刀具信息如表2所示。试验采用切削参数为 $V_c=50$ m/min,每转进给 $f_r=0.008$ mm/r。

1.2 试验配置

CFRP单向层合板A板直角自由切削试验的配置图如图1(a)所示。试验中的正交切削运动是在KENT-KGS-1020AH平面磨床上完成的,将装有正交飞刀的飞刀盘代替砂轮完成飞切运动。切

表1 试验用CFRP单向层合板力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of unidirectional CFRP laminates

拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa	压缩强度/ MPa	压缩模量/ GPa	面内剪切强度/ MPa	90°拉伸强度/ MPa	抗弯强度/ MPa
2 840	168	1 570	145	98	80	1 670

注:未说明的力学性能参数均为0°方向性能。

表2 钻削制孔试验刀具
Tab. 2 Cutting tools in drilling experimnts

钻头编号	钻头牌号	钻头品牌	钻头直径/mm	钻头设计	涂层
#1	R850-0800-70A1A	SANDVIK	8.00	三尖钻	TiAlN
#2	50024	SGS	7.96	八面钻	类金刚石

削力的采集通过 Kistler-9272 测力仪和 Kistler-5017B 放大器完成。瞬时切削温度的测量是通过人工热电偶测温来完成的。热电偶被夹在两块 CFRP 材料块的中间,试验时热电偶随工件材料一起被切掉,从而记录下工件材料被切瞬时的切削温度。热电偶采用 OMEGA-0.05 mm 高灵敏 K 型热电偶(测温范围 0~1 370 °C,分辨率 0.1 °C),热电势信号是通过快速响应热电势采集仪记录,采集频率 100 kHz。

CFRP 单向层合板 B 板钻削制孔试验的配置图如图 1(b)所示,所用机床为 DMG-70 V 五轴加

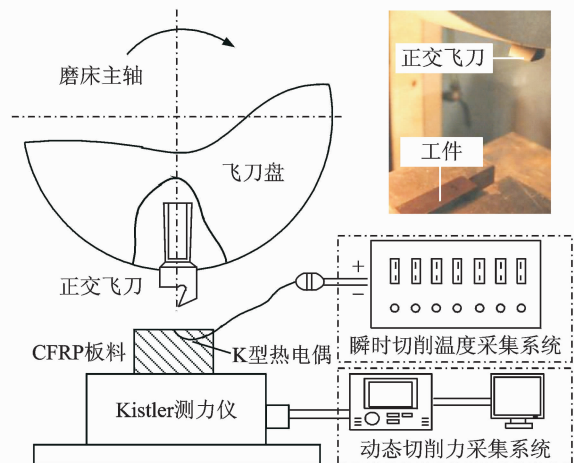
工中心。切削力的测量与 A 板直角自由切削试验切削力测量方法相同。通过埋入钻削刀具内冷孔的标准 K 型热电偶采集后刀面的平均温度,通过对称放置的存储式无线热电势采集模块实现长时间、连续的切削温度采集,采集频率为 1 Hz。

2 试验结果与分析

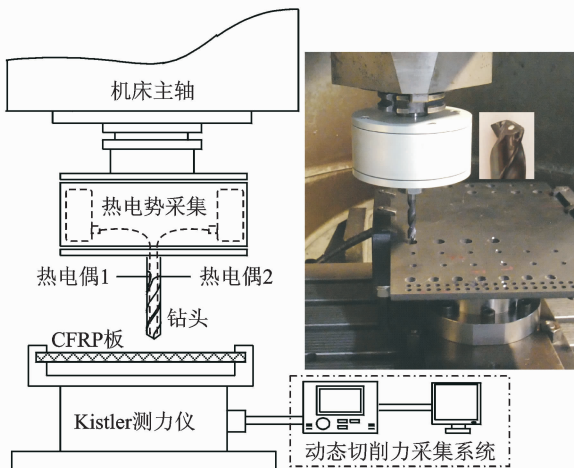
2.1 切削过程中的各向异性

2.1.1 切削力和切削比能

通过直角自由切削得到如图 2(a)所示的主切削力 F_c 随纤维方向角 θ 在 0~180°范围内连续变化而发生明显波动,表现出显著的各向异性。如图



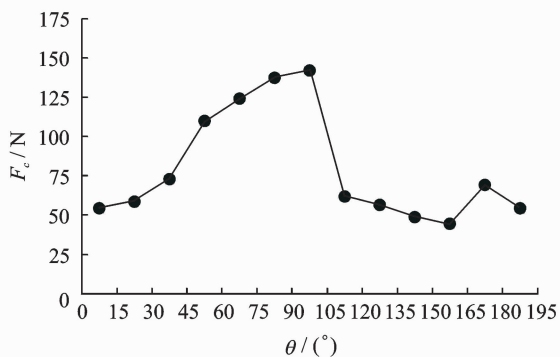
(a) A板直角自由切削试验



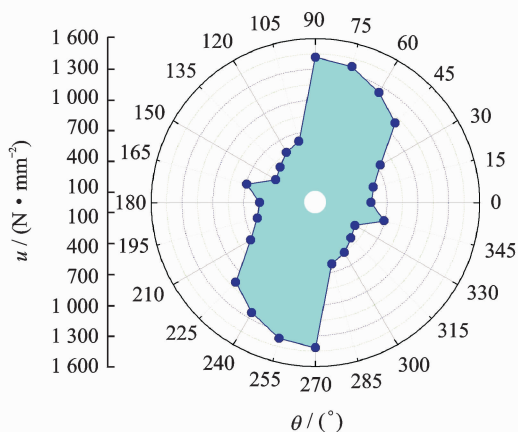
(b) B板钻削制孔试验

图1 CFRP 层合板切削试验配置图

Fig. 1 Scheme of cutting of CFRP laminates



(a) 切削力



(b) 切削比能图谱

图2 CFRP 层合板单层材料的切削力和切削比能图谱 ($V_c = 50 \text{ m/min}$, $a_p = 20 \mu\text{m}$)

Fig. 2 Cutting force and specific energy map in cutting of CFRP uniform laminates ($V_c = 50 \text{ m/min}$, $a_p = 20 \mu\text{m}$)

2(b)所示为沿孔圆周方向分布的切削比能图谱,整个图谱呈狭长形状,表现显著的方向性。在顺纤维($0^\circ < \theta < 90^\circ$)切削的一、三象限切削比能较大,并随着 θ 的增长呈线性增长;在逆纤维($90^\circ < \theta < 180^\circ$)切削的二、四象限切削比能较小,易于进行切屑分离;最大值出现在垂直纤维切削时($\theta = 90^\circ / 270^\circ$)约为最小值的3.2倍,意味着在 $\theta = 90^\circ$ 时切削加工性能最差,切屑分离最困难;在二、四象限靠近水平轴的位置($\theta = 165^\circ / 345^\circ$)有小幅的切削比能增大。

2.1.2 切削温度

在 $V_c = 50$ m/min的切削速度下,CFRP材料整体切削温度水平较低,如图3所示。在不同纤维方向角 θ 的影响下,切削温度表现出了显著的各向异性,其峰值出现在 $\theta = 90^\circ$ 方向上。在 $\theta < 90^\circ$ 的顺纤维区域, T_c 随 θ 角的增大基本呈线性增长关系;在 $\theta > 90^\circ$ 的逆纤维方向上,在刚从垂直方向进入逆纤维区域之后 T_c 首先有一个快速下降之后随着纤维方向角 θ 的增大,除在 $\theta = 165^\circ$ 方向上会略有上升外,总体呈下降趋势。

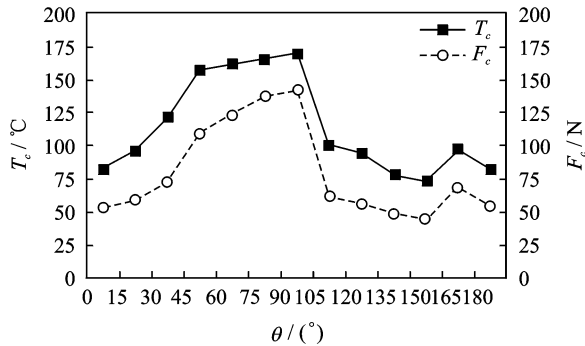


图3 CFRP单向层合板切削温度的产生
($V_c = 50$ m/min, $a_p = 20$ μm)

Fig. 3 Temperature generation in cutting CFRP unidirectional laminates ($V_c = 50$ m/min, $a_p = 20$ μm)

综上所述,可知切削力和切削温度都随着纤维方向角的变化表现出显著的各向异性,在具体钻削过程中,CFRP工件材料通常由几十层不同方向的铺层叠加而成,每一层内部各向异性将综合起来对钻削轴向力、扭矩和钻削温度的空间分布产生显著影响,进而影响到钻削缺陷的形成。

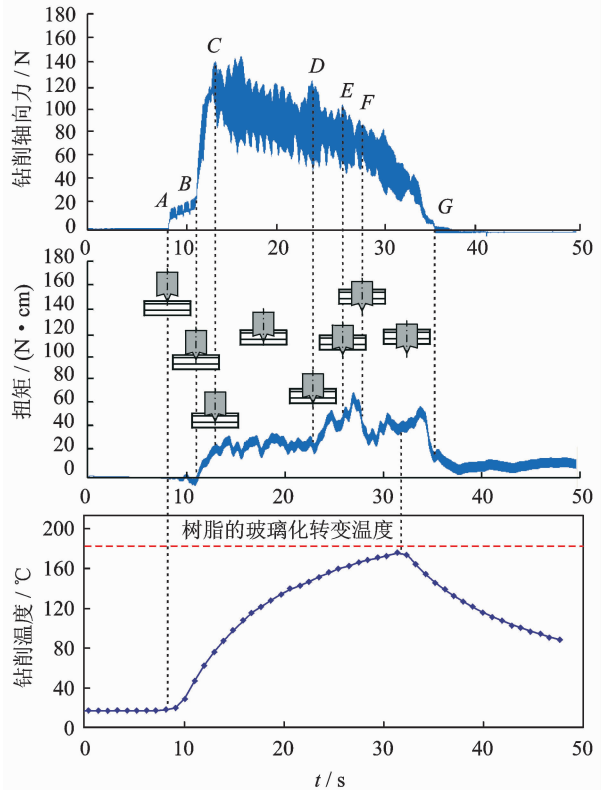
2.2 钻削制孔过程的切削力与温度

三尖钻(图4(a))钻削CFRP单向层合板时的钻削过程、钻削轴向力、扭矩和钻削温度如图4(b)所示。钻削轴向力在入口处水平较高,之后迅速下降;钻削扭矩在入口处水平稍低,在出口处波动明

显且有上升趋势;钻削温度在整个钻削过程一直呈缓慢上升趋势,并有滞后现象。八面钻(图5(a))钻削CFRP单向层合板时钻削过程、钻削轴向力、扭矩和钻削温度如图5(b)所示。



(a) 三尖钻结构



(b) 三尖钻类刀具制孔时的切削力,扭矩及切削温度随时间变化图

图4 三尖钻结构及其制孔时的切削参数随时间变化曲线

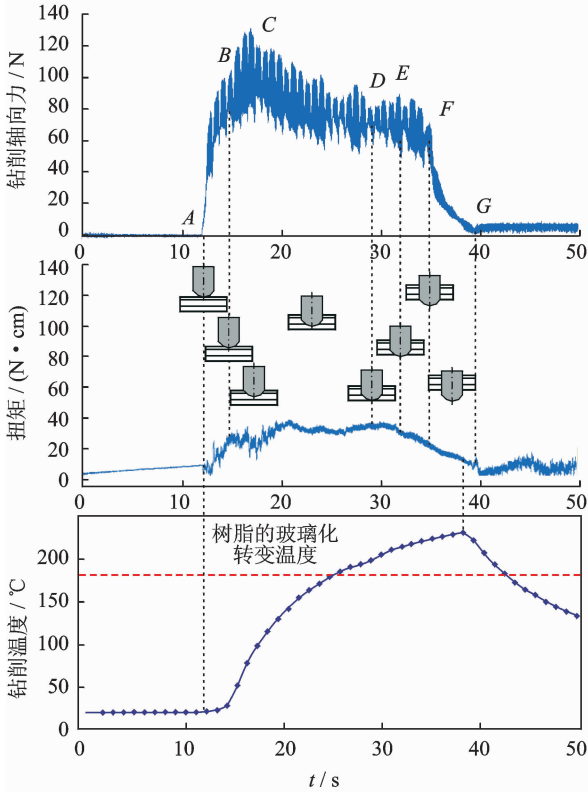
Fig. 4 Structure of 3-point drill and cutting parameter changing with time

钻削轴向力在入口处先快速上升,之后呈下降趋势;钻削扭矩则整体较为平稳,仅在入口处略有不稳定的波动。钻削温度同样呈缓慢上升趋势,并有滞后现象。三尖钻和八面钻的钻削过程可分为如下6个阶段:

(1)A~B:三尖钻钻尖中心进入,由于横刃作用,轴向力上升较为明显;八面钻第一锋角进入,轴



(a) 八面钻结构



(b) 八面钻类刀具制孔时的切削力, 扭矩及切削温度随时间变化曲线

图 5 八面钻机构及其制孔时的切削参数随时间变化曲线

Fig. 5 Structure of 8-facet drill and cutting parameter changing with time

向力上升较慢, 扭矩的上升较为明显, 并在上升的同时也呈现明显波动。

(2) *B~C*: 三尖钻外缘两刃尖和八面钻第二锋角均开始进入工件, 轴向力都呈快速上升趋势直到出现最大值(*C*点处); 三尖钻由于外缘刃尖切断纤维的作用, 使得扭矩的上升过程相对缓慢, 而八面钻由于第二锋角为小锋角, 利于割断孔壁纤维和降低周向切削力, 使扭矩则呈下降趋势。

(3) *C~D*: 三尖钻和八面钻刀尖通过工件材料内部, 进入稳定切削段, 钻削扭矩保持平稳; 在刀具螺旋角的作用下, 轴向力均呈下降趋势。

(4) *D~E*: 三尖钻钻尖中心钻出, 刀具横刃离开工件, 钻削轴向力继续减小; 失去了钻尖中心的定心作用之后, 刀具周向割断纤维时的载荷情况明显恶化, 扭矩显著上升; 八面钻第一锋角钻出, 钻削轴向力下降不明显, 在钻出后扭矩的下降比较明显。

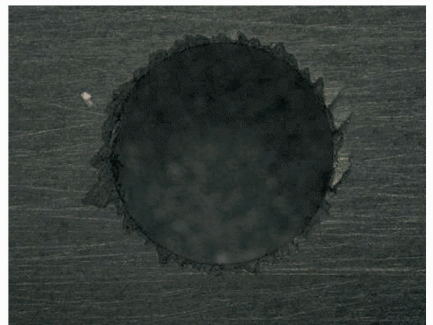
(5) *E~F*: 三尖钻和八面钻的钻尖整体逐步离开工件, 轴向力和扭矩均呈快速下降趋势; 三尖钻在外缘刃尖离开工件后下降更为显著, 八面钻第二锋角所形成的刃口贴近孔壁, 在其逐步钻出后钻削扭矩下降更为显著。

(6) *F~G*: 三尖钻和八面钻的钻体通过工件, 由于制孔任务完成, 轴向力和钻削扭矩均回落至 0。

由以上分析可知, 三尖钻的钻尖结构使得在入口处(*B~C*段)的钻削轴向力较大而钻削扭矩上升较慢, 有效避免入口剥起分层和入口撕裂的发生; 在出口处(*E~F*段)轴向力水平也较低, 可以有效避免出口推离分层; 但在外缘刃尖未钻出的 *D~E* 段, 扭矩上升明显且不稳定, 周向切削力变大, 易造成出口撕裂, 如图 6(a) 所示; 此时钻削温升也达到较高水平, 树脂黏结性变差, 易造成起毛、烧伤、纤维拔出等。综上所述, 三尖钻可以有效抑



(a) 出口撕裂



(b) 入口撕裂

图 6 CFRP 单向层合板的典型撕裂缺陷
Fig. 6 Typical splintering defects of CFRP unidirectional laminates

制出入口的分层,但易在出口产生撕裂缺陷。而八面钻的双锋角结构使得刀具在钻出工件材料时($E\sim F$ 段)保持较低水平且稳定的轴向力和扭矩,有效避免出口分层、撕裂等缺陷;但在刀具第一锋角钻入工件材料时($A\sim B$ 段),钻削扭矩上升明显且有加工不稳定情况,易在入口处形成撕裂缺陷,如图6(b)所示。综上所述,八面钻的钻尖结构可有效避免出口分层、撕裂,提高出口质量,但在钻削入口处易形成入口撕裂缺陷。

此外,两种刀具的钻削温度均在出口侧达到最高值,八面钻的钻削温度高于三尖钻,且八面钻的钻削温度已经高于 185°C 的树脂玻璃化转变温度。

2.3 钻削制孔过程中缺陷形成影响因素

2.3.1 切削力和切削温度对制孔缺陷的影响

(1) 切削力对制孔缺陷的影响

在实际钻削过程中,对于存在多向铺层设计的CFRP单向层合板,其空间切削比能可认为在单层材料切削比能图谱的基础上按铺层方向进行叠加,具体分布如图7所示。

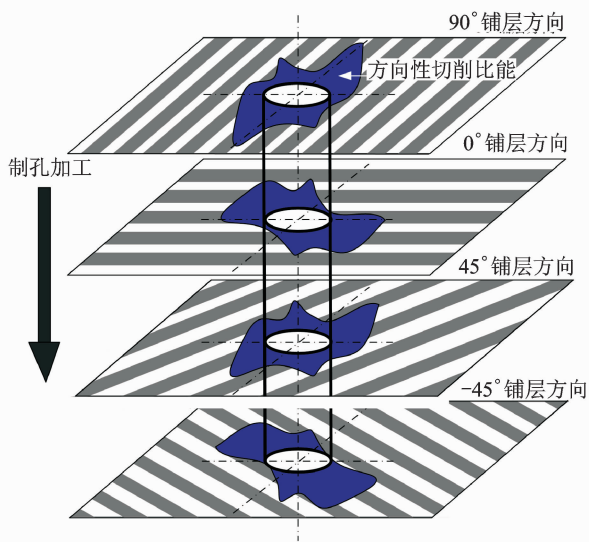


图7 CFRP单向层合板制孔加工中的切削力产生

Fig. 7 Cutting force generation in drilling CFRP unidirectional laminates

在钻削过程中,刀具切削刃同一时间接触的材料远远超过一层,切削刃在与每一层材料接触时都可能会分别形成不同的纤维方向角,而在不同纤维方向角下的切削比能是不同的,切削过程中各层内将产生沿圆周方向具有各向异性的周向切削力用于切屑分离。由于制孔刀具锋角和螺旋角的作用,同时也将在各层内产生沿圆周方向具有各向异性的轴向分力。从总体来看,钻削轴向力及扭矩将产

生如图4,5所示的不稳定波动现象;同时在CFRP材料每层材料切削比能的各向异性影响下,制孔加工时的切削力同样具有显著的方向性,这是产生制孔缺陷的重要影响因素:

①当制孔轴向力的各向异性波动超过CFRP单向层合板的层间 90° 结合强度极限时,即产生层间级缺陷;

②当制孔周向力(力矩)的各向异性波动在某层内超过CFRP单向层合板的层内最弱的 90° 拉伸强度极限时,即产生层内级缺陷;

③当制孔周向力(力矩)的各向异性波动在某层内未超过纤维的断裂强度极限时,纤维未被正常切削去除,即产生纤维级缺陷。

(2) 切削温度对制孔缺陷的影响

与切削力类似,CFRP层合板材料加工时切削温度的各向异性会在多层材料的不同铺层方向上进行叠加,进一步产生制孔切削温度的各向异性波动。当制孔切削温度波动超过玻璃化转变温度后,切削温度越高树脂的软黏性就越强,相应的树脂对于孔表面碳纤维的支撑和保护作用就越差,缺陷越容易产生:

①在受基体支撑较少的孔进出口处,可能发生层间树脂黏结失效,即产生层间级缺陷;

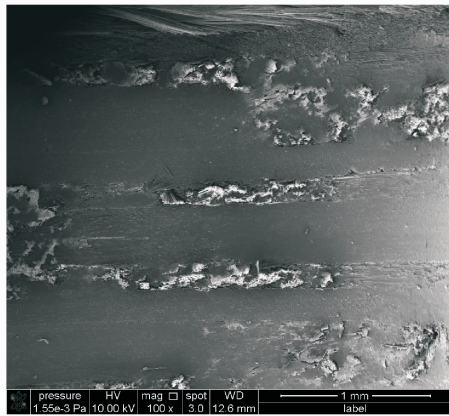
②在半封闭、散热条件较差的孔壁上,可能发生切削温度的过度上升,即产生孔壁烧伤;

③在受基体支撑较少的孔进出口材料层内,失去支撑的纤维还可能在切削力的间接影响下在层内失去规则的排布,即产生起毛。

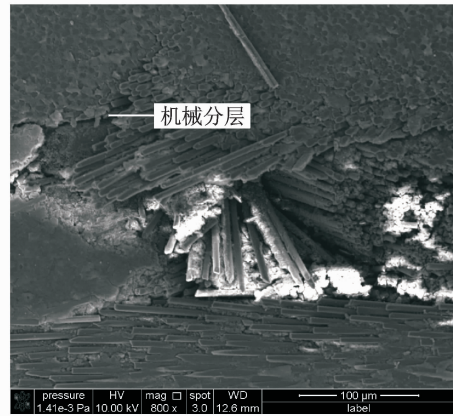
2.3.2 缺陷形成

由前面的分析结果可知,碳纤维增强复合材料钻削制孔过程由于受CFRP层合板空间各向异性的影响,钻削中轴向力和扭矩的分布存在显著的各向异性,且发生明显波动;钻削温度沿孔壁的分布也存在各向异性,且整体温度呈缓慢累积上升趋势,极大的影响了各层树脂的机械性能,导致缺陷的产生甚至孔壁的烧伤。

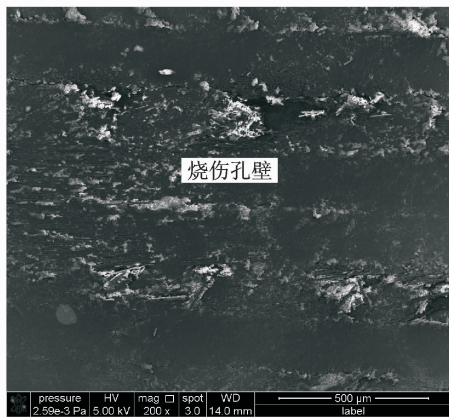
由此可知,在钻削制孔的出口侧虽然钻削轴向力水平较低,但钻削温度累积水平高,可能会超过树脂的玻璃化转变温度,并伴随有不稳定波动的钻削扭矩。因此,在制孔出口侧的树脂容易在钻削温度的累积影响下发生玻璃化转变,失去对碳纤维的支撑和保护,并在钻削轴向力和不稳定钻削扭矩的进一步影响下,发生制孔出口缺陷。如图8所示,即为切削力热影响下所形成的制孔出口缺陷SEM形貌照片。



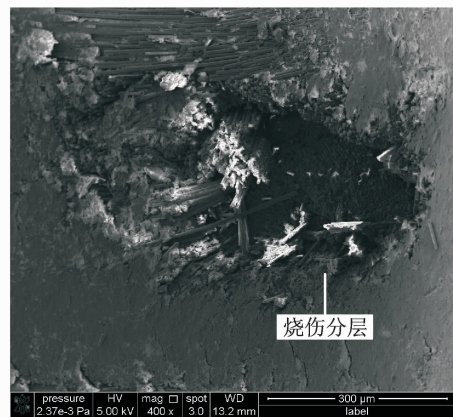
(a) 出口侧正常的孔壁



(b) 受轴向力和不稳定扭矩作用而产生的出口机械分层



(c) 已发生烧伤的出口侧孔壁



(d) 烧伤发生后树脂碳化降解消失所导致的分层缺陷

图 8 切削力热影响形成的出口侧孔壁缺陷

Fig. 8 Hole outlet wall defects affected by cutting force and temperature

3 结 论

本文以 CFRP 材料的直角自由切削试验为基础,讨论了高强度碳纤维单向层合材料在切削过程中的力热行为的各向异性,再通过 CFRP 层合板的钻削制孔试验,研究了三尖钻和八面钻的具体钻削过程及钻削缺陷形成原因,得到以下主要结论:

(1)CFRP 材料的力热行为各向异性

CFRP 材料的切削力和切削温度具有显著各向异性。不同纤维方向角 θ 条件下的切削比能差异明显,基于此提出了 T800/X850 CFRP 层合板单层材料沿圆周分布的切削比能图谱。在 $\theta=90^\circ$ 时切削加工性能最差,切屑分离最困难。切削温度在顺纤维区域线性增长,在逆纤维区域有所下降。

(2)CFRP 材料的钻削制孔过程

三尖钻的钻尖形式可增大入口处钻削轴向力并减小出口处钻削轴向力,有效避免入口分层、撕裂和出口分层缺陷,但外圆刃尖易引起扭矩的增大及波动现象,导致出口撕裂缺陷。

八面钻的钻尖形式可在钻尖完全进入工件材料后保持较低水平的钻削轴向力和扭矩,获得良好的孔壁形貌和孔出口质量,但在钻削入口处易引起扭矩剧烈波动,导致入口撕裂缺陷。

(3)CFRP 材料钻削缺陷形成影响因素

CFRP 材料各层力热行为的各向异性引起钻削过程中轴向力及扭矩的不稳定波动现象,当轴向力波动超过 CFRP 材料的层间结合极限时,形成层间级缺陷;当扭矩波动超过 CFRP 材料层内拉伸强度极限时,产生层内级缺陷;当切削温度波动过大时,产生树脂黏结失效或者孔壁烧伤缺陷。

参考文献:

- [1] Teti R. Machining of composite materials[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51 (2): 611-634.
- [2] Komanduri R. Machining of fiber-reinforced composites[J]. Machining Science and Technology, 1997, 1 (1):113-152.
- [3] Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft con-

- struction[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, 41(2):143-151.
- [4] 陈绍杰. 复合材料技术与大型飞机[J]. *航空学报*, 2008, 29(3):605-610.
Chen Shaojie. Composite technology and large aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(3):605-610.
- [5] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(3):24-36.
Ye Lieping, Feng Peng. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(3):24-36.
- [6] Koenig W, Wulf C, Grass P, et al. Machining of fibre reinforced plastics[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 1985, 34(2):537-548.
- [7] Bhatnagar N, Ramakrishnan N, Naik N K, et al. On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35(5):701-716.
- [8] Jain S, Yang D C H. Delamination-free drilling of composite laminates[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1994, 116(4):475-481.
- [9] Tsao C, Hocheng H. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(11):1261-1270.
- [10] Liu D F, Tang Y J, Cong W L. A review of mechanical drilling for composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(4):1265-1279.
- [11] Krishnaraj V, Prabukarthi A, Ramanathan A, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(4):1791-1799.
- [12] Lazar M B, Xirouchakis P. Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(12):937-946.
- [13] Velayudham A, Krishnamurthy R. Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 185(1/2/3):204-209.
- [14] Abrao A M, Rubio J C, Faria P E, et al. The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite[J]. *Materials & Design*, 2008, 29(2):508-513.