复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 35 卷 第 8 期 8 月 2018 年
Vol. 35 No. 8 Aug 2018

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20171206.006

玻璃纤维增强聚丙烯复合材料制孔损伤

王福吉*，郭会彬，贾振元，马建伟，成德，胡海波
（大连理工大学 机械工程学院，大连 116024）

摘　要： 为抑制玻璃纤维增强聚丙烯复合材料(GF/PP)制孔损伤并提高其制孔效率，本文通过钻削实验获得多种进给速度下的 GF/PP 复合材料钻削轴向力和出口温度，使用高速摄影设备对刀具钻出过程进行在线观测，研究出口材料去除过程及其损伤成因，分析进给速度对 GF/PP 复合材料制孔损伤的影响规律。结果表明：GF/PP 复合材料的钻削出口温度在低速进给时显著升高，在高速进给时基本趋于稳定；出口撕裂是重要的出口损伤形式，成因是大片毛刺受副切削刃的撞击和撕挤，进给速度过高或过低均会加剧损伤；0°毛刺在低速进给时较严重，入口撕裂在高速进给时较严重。

关键词： 玻璃纤维增强聚丙烯复合材料(GF/PP)；热塑性；钻削；进给；损伤
中图分类号： TB332　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-3851(2018)08-2023-09

Drilling damage of glass fiber reinforced polypropylene composites

WANG Fuji*, GUO Huibin, JIA Zhenyuan, MA Jianwei, CHENG De, HU Haibo
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to diminish drilling damage of glass fiber reinforced polypropylene composite (GF/PP) and improve its drilling efficiency, thrust force and outlet temperature during drilling GF/PP composites for various feed rates were measured by drilling experiments, and outlet processes of drilling were instituted observed with high-speed photography equipment. Outlet material removal process and damage mechanisms were demonstrated. Effect of feed rates on GF/PP composites drilling damage was analyzed. The results show that the outlet drilling temperature is high with low feed rates and becomes relatively steady as feed rates increasing; Outlet tearing is mainly outlet damage and caused by the tearing of large burrs by the cutting edges; It becomes severe with a too high or low feed rate. 0° burr is serious with low feed rates; Inlet tearing is serious with high feed rates.

Keywords: glass fiber reinforced polypropylene composites(GF/PP); thermoplastic; drilling; feed; damage

玻璃纤维增强聚丙烯复合材料(GF/PP)具有比强度高、易于成型和造价低廉等优点，是目前应用最广泛的热塑性复合材料之一[1-3]。GF/PP 复合材料零件为完成最终装配，特别是使用铆接、螺接等机械紧固工艺时，必须进行制孔加工。然而复合材料微观结构复杂，不同组分之间性能差异极大，制孔加工过程中极易出现毛刺、撕裂和分层等损伤[4-7]。GF/PP 复合材料的界面结合强度较低[8]，材料制造缺陷较多，PP 基体极易受热软化[9]，在切削过程的力热偶合作用下将表现出极强的塑性，使其加工损伤较传统热固性复合材料更复杂。这些问题严重制约了 GF/PP 复合材料在汽车等领域的推广和应用，是亟待解决的关键问题。

学者针对 GF/PP 复合材料的钻削工艺已经开展了一定的研究。例如，Varatharajan 等[10]研究表明，GF/PP 复合材料的钻削轴向力、扭矩和刀具磨损等均小于热固性复合材料。Palanikumar 等[11]分析了切削参数对 GF/PP 钻削轴向力的影响，认为

收稿日期： 2017-08-15；**录用日期：** 2017-11-13；**网络出版时间：** 2017-12-07 09:58
网络出版地址： https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171206.006
基金项目： NSCF-辽宁联合基金重点项目(U1508207)；国家自然科学基金面上项目(51575082)；国家 973 计划(2014CB046503)；国家自然科学基金创新研究群体项目(51621064)；中央高校基本科研业务费专项资金(DUT16TD01)
通讯作者： 王福吉，博士，教授，博士生导师，研究方向为碳纤维复合材料加工　E-mail：wfjsll@dlut.edu.cn
引用格式： 王福吉，郭会彬，贾振元，等. 玻璃纤维增强聚丙烯复合材料制孔损伤[J]. 复合材料学报，2018，35(8)：2023-2031.
WANG Fuji, GUO Huibin, JIA Zhenyuan, et al. Drilling damage of glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2023-2031 (in Chinese).

http://fhclxb.buaa.edu.cn

进给速度是主要影响因素，切削速度的影响非常微小。Srinivasan 等[12]发现切削参数对其分层因子的影响有类似规律，实验结果显示高速进给时分层因子显著增加。然而由于基体强度易受温度影响，进给速度对热塑性复合材料制孔质量的影响并非简单的线性关系。一些研究显示，使用较高的进给速度，也可能获得较好的制孔质量。例如，超高速进给钻削碳纤维增强聚酰胺(CF/PA)复合材料可提高制孔质量[13]；碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)复合材料的成屑机制会随进给速度增加而发生转变，界面剪切破坏的加剧将使连续切屑变为破碎状切屑，存在一个最优的进给速度[14]。GF/PP 复合材料极有可能也存在上述现象，确定合适的进给速度对提高 GF/PP 的加工效率有重要意义。

现有针对 GF/PP 制孔损伤的研究缺乏针对温度的分析，其与进给速度之间的关系并未明确。除此之外，很少学者针对 GF/PP 制孔损伤形成过程进行研究，但其对刀具设计及仿真建模等工作具有重要的指导意义。国内对热塑性复合材料的研究刚刚起步，材料体系和制备质量还存在不足。为了及时跟进热塑性复合材料工程应用发展的需求，本文以 GF/PP 复合材料为对象，对其钻削过程的力热参数进行了分析，基于高速摄影设备分析了刀具的钻出过程，从几何角度探讨了不同纤维铺层角度的出口损伤形成机制，同时分析了进给速度对制孔损伤的影响，以期相关研究结果可为 GF/PP 复合材料加工工艺制定提供一定的参考和借鉴。

1　实　验

1.1　原材料及刀具

本实验所用 GF/PP 复合材料由广州金发碳纤维新材料发展有限公司提供，玻璃纤维直径约为 17 μm，增强相体积分数约为 35%，基体材料为 PP，铺层顺序为[$(0/90)_5$]，厚度约为 3.5 mm，单层预浸料的力学性能参数如表 1 所示。刀具选用顶角为 118°的标准 K10 硬质合金麻花钻，钻头直径为 8 mm。

1.2　实验方法

实验设备如图 1 所示。所有实验均在光洋 GONA 五轴加工中心上完成。为方便获得高速摄影及出口温度数据，在其主轴上安装了 PARLEC F90-16S 角度头。轴向力测量使用 Kistler 9253B 测力系统，采样频率为 6 kHz。出口温度测量使用 TELOPS FAST M350 热成像仪，使用配套的 HypIR4

表 1　玻璃纤维增强聚丙烯(GF/PP)复合材料预浸料力学性能

Table 1　Mechanical properties of glass fiber reinforced polypropylene(GF/PP) composites prepreg

Mechanical properties	Value
Tensile strength/MPa	750
Tensile modulus/GPa	28
Flexural strength/MPa	600
Flexural modulus/GPa	26
Compressive strength/MPa	160
Short beam interlaminar shear strength/MPa	18

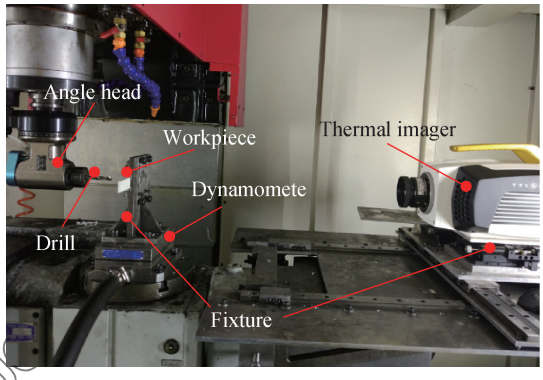


图 1　钻削实验设备

Fig. 1　Setup of drilling experiment

软件选取钻削出口附近的圆形区域并绘制该区域的温度分布柱状图，以该区域温度的最大值作为测量值，热成像仪所测量数据如图 2 所示。使用 Photron FASTCAM SA5 高速摄像机获取钻出过程的图像数据，分辨率为 1 024 × 1 024，帧频为 2 000 frame/s，实验前需将材料出口位置涂成明亮颜色。使用 VHX-600X 超景深显微镜检测出入口损伤，检测前需用颜料渗入材料内部。使用 FEI Q45 扫描电镜对孔壁形貌进行观测。选取每组实验参数如表 2 所示，为减小磨损等因素对单组实验结果的影响，单组实验使用同一把钻头按照进给速度由小到大的顺序连续进行。使用新刀完成一组实验后，后刀面磨损量约为 0.02 mm，说明刀具磨损不会对实验结果造成显著影响。

表 2　单组实验参数

Table 2　Drilling parameters of a set of experiment

Parameter	Value
Spindle speed/($r \cdot min^{-1}$)	3 000
Feed rate/($mm \cdot r^{-1}$)	0.0125, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4

1.3　纤维铺层角度

纤维相对于切削刃的几何角度是研究复合材料

http://fhcxb.buaa.edu.cn

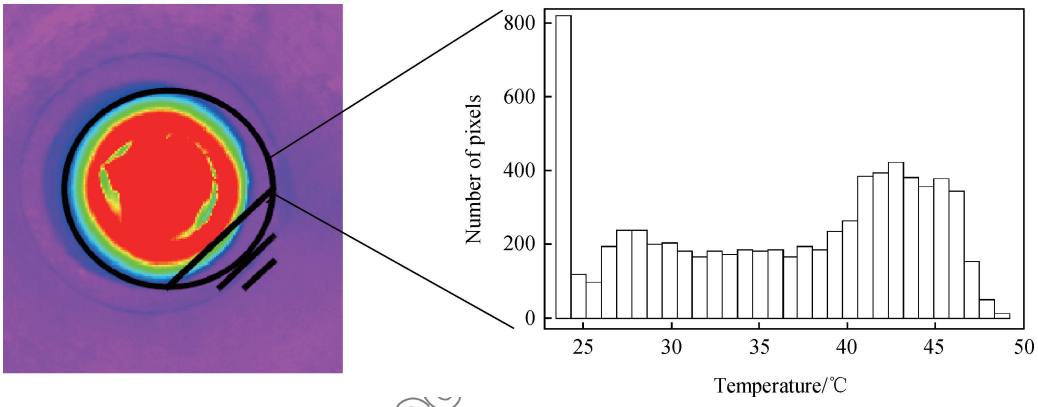


图 2　钻削实验热像仪数据

Fig. 2　Thermal imager data of drilling experiment

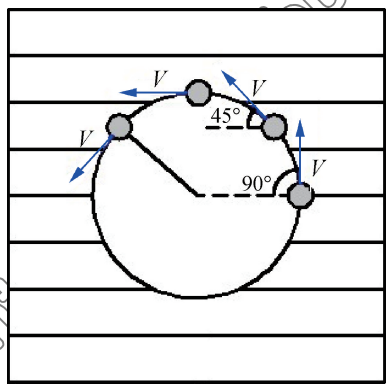


图 3　纤维铺层角度定义

Fig. 3　Definition of fiber orientation angle

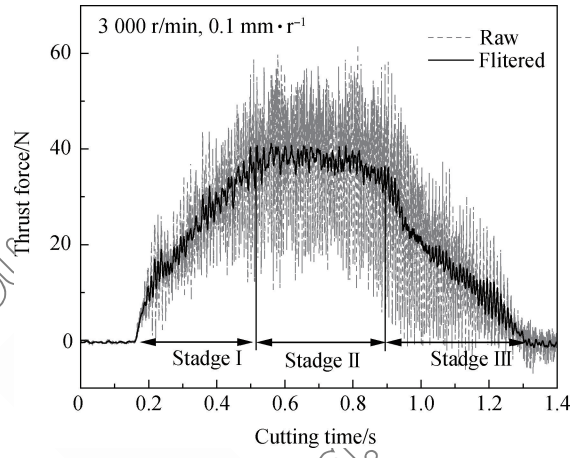


图 4　GF/PP 复合材料轴向力信号

Fig. 4　Thrust force signal of GF/PP composites

切削过程的重要参数。为方便后续分析，本文定义刀具切削过程中切削刃上任意一点的线速度方向与纤维方向的夹角为纤维铺层角度，如图 3 所示。以下本文涉及的所有角度均指纤维铺层角度。由于纤维在基体中存在一定弯曲，纤维铺层角度很难精确测定，实验所测纤维铺层角度均按四舍五入原则取整为 10 的倍数。

2　轴向力和出口温度

轴向力在许多研究中已经成为制孔损伤的重要预测指标[15]。而高温可使热塑性基体性能下将，进而产生加工损伤，也可作为加工损伤的预测指标[16]。基于上述原因，本节将对切削力和切削热进行讨论，为后续章节的分析提供依据。

图 4 是进给速度为 0.1 mm·r^{-1}时的轴向力信号。由于原始信号的振动值较大，使用 100 Hz（切削刃旋转频率）低通滤波对信号进行处理。对比不同进给速度下的轴向力信号，发现轴向力在不同的进给速度下具有相同的变化趋势，均可分为 3 个阶段：阶段Ⅰ是切削刃钻入材料的过程，由于参与切削的切削刃长度逐渐增加，轴向力随之增大；阶段Ⅱ是切削刃完全进入材料的切削过程，此阶段轴向力略微下降，可能是树脂受热软化及底层材料刚度下降导致的；阶段Ⅲ是切削刃逐渐切出的过程，参与切削的切削刃长度减少，轴向力逐渐下降。

图 5 是 GF/PP 复合材料钻削轴向力峰值随进给速度的变化曲线，1～3 分别为 3 组重复实验的结果。可以看出，进给速度对轴向力的影响非常显著，轴向力将随着进给速度增加而增加。大量的研究已经证实，过高的轴向力将导致复合材料出现制孔损伤。因此，可推知 GF/PP 复合材料在高速进给时将会产生严重的制孔损伤，但低速进给时材料性能将受温度影响而下降，较低的轴向力并不能保证较高的制孔质量。

图 6 是 GF/PP 复合材料钻削出口温度随进给速度的变化曲线，1～3 分别为 3 组重复实验的结

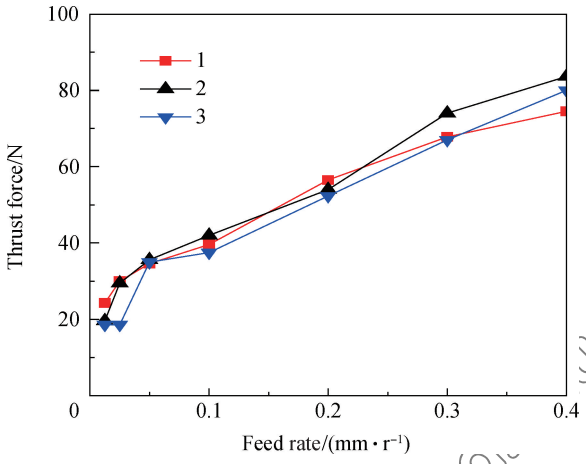


图 5　GF/PP 复合材料轴向力随进给速度的变化

Fig. 5　Change of thrust force of GF/PP composites with feed rates

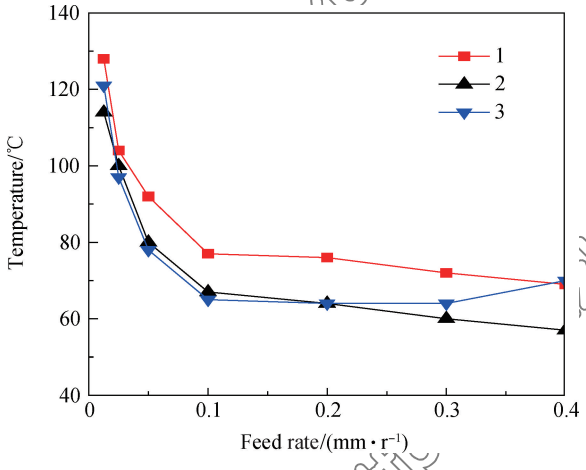


图 6　GF/PP 复合材料出口温度随进给速度的变化

Fig. 6　Change of outlet temperature of GF/PP composites with feed rates

果。第 1 组实验温度相对第 2、3 组实验较高，是由于 3 组实验使用了不同的钻头，钻头刃磨状况不同导致切削产热有所差异。可以看出，钻削出口温度在低速进给时显著升高，当进给速度超过 0.1 mm·r^{-1}时，出口温度基本趋于稳定。这是因为在低速进给时，去除相同体积材料的切削距离更长，摩擦产热更多，所以切削温度更高且变化剧烈；而在高速进给时，切削距离短，摩擦产热比重小，因此出口温度较低且变化较小。PP 树脂在高温下力学性能将显著下降，出口温度过高将导致材料的界面及层间结合强度下降，这意味着低速进给时GF/PP复合材料可能因基体性能下降而产生损伤。

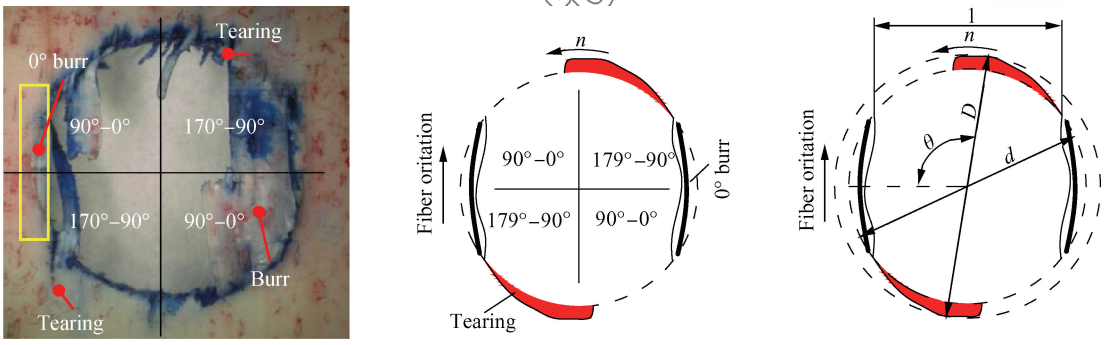
3　GF/PP 复合材料出口损伤

3.1　GF/PP 复合材料出口损伤特征

通过对 GF/PP 复合材料的出口进行观测分析，如图 7 所示。发现其损伤主要分为撕裂和毛刺两大类，出口损伤的实物图如图 7(a)所示。GF/PP 复合材料的出口撕裂形式与热固性复合材料类似，其最大撕裂损伤的出现位置分布于 90°～179°之间。0°位置的毛刺较特殊，其沿纤维方向的两端均与孔壁相连，本文将其命名为 0°毛刺。除 0°位置外，在其他位置同样存在毛刺，但这些毛刺通常与撕裂损伤有很强的关联性，本文不对其进行单独分析。故本文所简化的出口损伤示意图如图 7(b)所示。

3.2　GF/PP 复合材料钻出过程

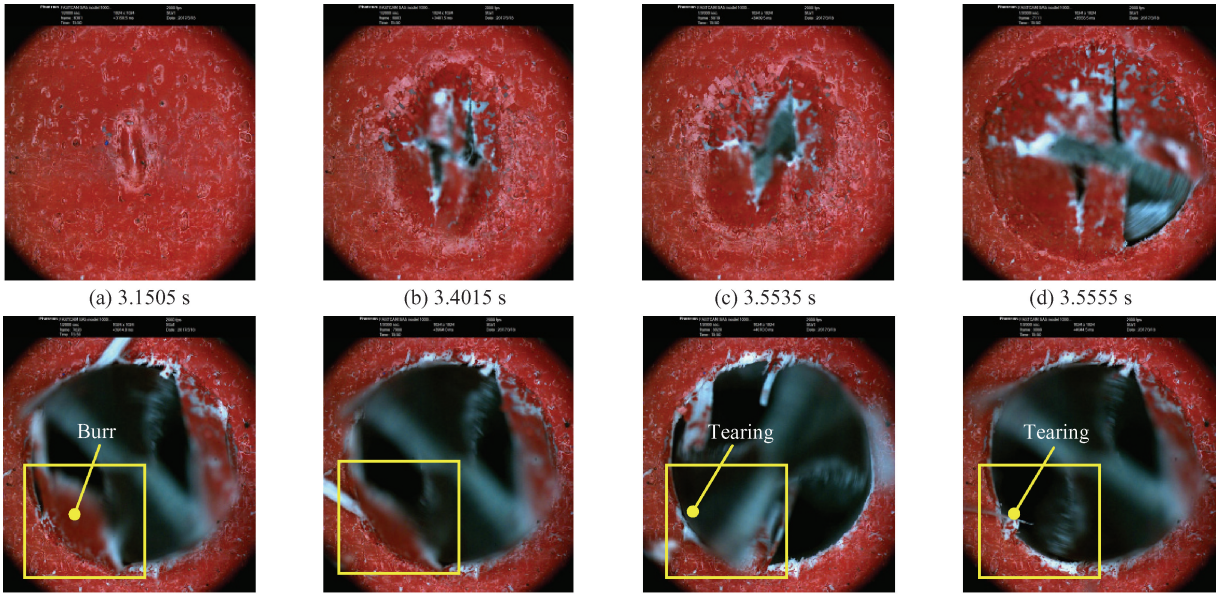
为了分析 GF/PP 复合材料钻削损伤形成过程及刀具结构对切削过程的影响，本实验对不同进给速度下的钻出过程进行了在线观测，如图 8 所示。发现 GF/PP 复合材料的钻出过程可分为三个阶段：阶段Ⅰ是横刃钻出的过程，材料表面出现一个条状凸起，其形状随着钻头的旋转不断发生改变，如图 8(a)所示。阶段Ⅱ是主切削刃钻出的过程，由于 GF/PP 塑性优良，此阶段底层材料附着于钻尖



(a) Outlet damage (3 000 r/min, 0.1 mm·r^{-1})　(b) Sketch of outlet damage　(c) Damage evaluation

图 7　GF/PP 复合材料钻削出口损伤及评价方法

Fig. 7　Outlet drilling damage and damage evaluation method of GF/PP composites



(a) 3.1505 s (b) 3.4015 s (c) 3.5535 s (d) 3.5555 s

(e) 3.9140 s (f) 3.9940 s (g) 4.0100 s (h) 4.0445 s

图 8 GF/PP 复合材料钻出过程

Fig. 8 Drilling process in outlet of GF/PP composites

(3 000 r/min，0.1 mm·r^{-1})

表面，形成帽状结构，如图 8(b)所示。阶段Ⅲ是副切削刃钻出的过程，底层材料在此阶段被逐渐去除。最先被去除的是 0°～90°范围内的材料，如图 8(c)～8(d)所示；90°～179°范围内的材料易形成大块的片状毛刺，与刀具反复碰撞、撕扯，进入排屑槽后被钻头副切削刃去除，如图8(e)～8(f)所示。由于材料受到严重的撞击及撕扯，该位置极易出现严重的撕裂损伤。

3.3 GF/PP 复合材料出口损伤成因

本文基于高速摄影实验对不同纤维铺层角度下的损伤形成因进行了定性分析。本文的分析基于以下研究基础：(1) GF/PP 复合材料底层材料的去除及损伤形成主要发生在副切削刃钻出阶段；(2) 与切削刃接触的任一根纤维，其受力情况可简化为钻头进给方向的力 F_z 和钻头旋转平面内的力 F_x；(3)纤维所受约束作用越强，越容易切断，不易形成毛刺[17]。

本文对不同纤维铺层角度下的损伤形成机制给出如下解释：0°附近位置的损伤成因如图 9(a)所示，该位置的损伤通常为 0°毛刺。对于 0°纤维，其沿进给方向的刚性较差，易受 F_z 作用向上翘起，发生让刀，导致切削刃无法有效切断纤维，而在纤维表面滑行，同时刀具与纤维摩擦生热将导致使树脂基体软化，进而加剧上述过程，因此 0°位置易出现毛刺。

90°～179°之间位置的损伤成因如图9(b)和图9(c)所示，该位置的损伤通常为较大撕裂损伤。如图9(b)所示，90°～179°之间的纤维同时受 F_z 和 F_x 作用，材料的自由端受约束较弱，可以搭接在切削刃表面而不被切断，切削刃将推挤该处材料，使纤维根部出现微小损伤，导致根部约束减弱，同时纤维与切削速度方向所成角度较大，使其不易被切断；如图 9(c)所示，随着刀具不断钻出，未切断的纤维将进入钻头螺旋槽，与副切削刃反复碰撞、撕扯，最终形成严重的撕裂损伤。图 9(b)～9(c)所示过程与图 8(e)～8(h)所示过程相对应。

0°～90°之间位置的切削过程如图 8(d)所示，该位置不易出现较大损伤。在该位置处，刀具的切削刃将首先与纤维的根部接触，其受到的主要作用力是水平面内的 F_x，这时纤维所受约束最强，同时与切削速度方向成较小角度的纤维也更容易被切断，因此不易出现损伤。

3.4 进给速度对 GF/PP 复合材料出口损伤的影响

为了精确描述进给速度对出口损伤的影响，必须对撕裂损伤和 0°毛刺进行表征。本文使用分层因子作为撕裂损伤评价方法[14]，其计算方法为撕裂损伤的最大外接圆直径与孔径之比，本文将其命名为Ⅰ型损伤因子，计算方法如下：

http://fhclxb.buaa.edu.cn

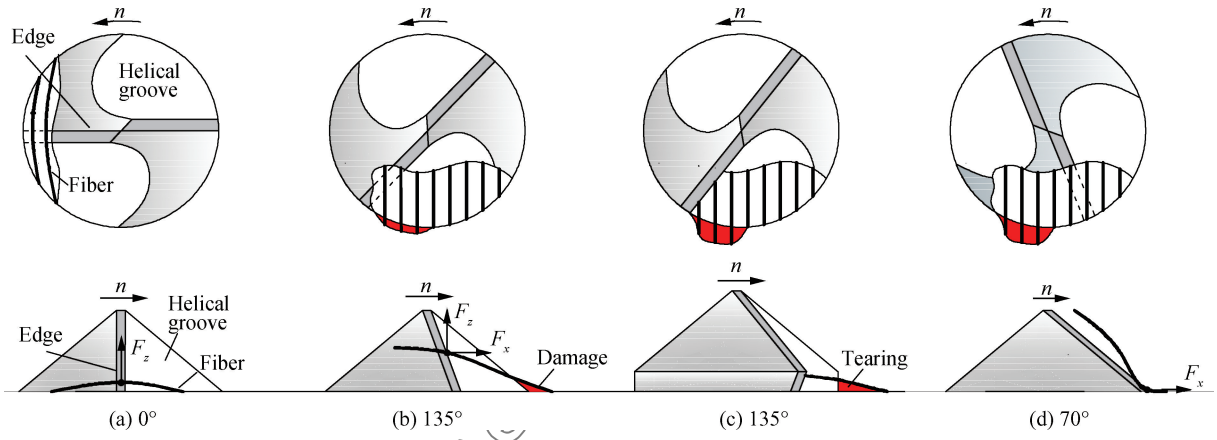


图 9　不同纤维铺层角度下的 GF/PP 复合材料去除过程

Fig. 9　Material remove process of GF/PP composites for various fiber orientation angles

$$F_{\mathrm{I}} = \frac{D}{d} \tag{1}$$

式中：F_{I} 为 I 型损伤因子；D 为撕裂损伤的最大外接圆直径；d 为孔径。

对于 0°毛刺，本文使用其垂直于纤维方向的宽度与孔径的比值进行评价，本文将其命名为 II 型损伤因子，计算方法如下：

$$F_{\mathrm{II}} = 1 - \frac{l}{d} \tag{2}$$

式中：F_{II} 为 II 型损伤因子；l 为不含 0°毛刺的垂直于纤维方向孔径宽度。

图 10 为 GF/PP 复合材料钻削出口撕裂损伤随进给速度的变化曲线，1～3 分别为 3 组重复实验的结果。可知，进给速度低于 0.1 mm·r^{-1}时，撕裂损伤较大且波动剧烈；当进给速度超过 0.1 mm·r^{-1}时，撕裂损伤趋于稳定。高速进给时出现较大损伤符合预期；前文关于出口温度的实验证实低速进给

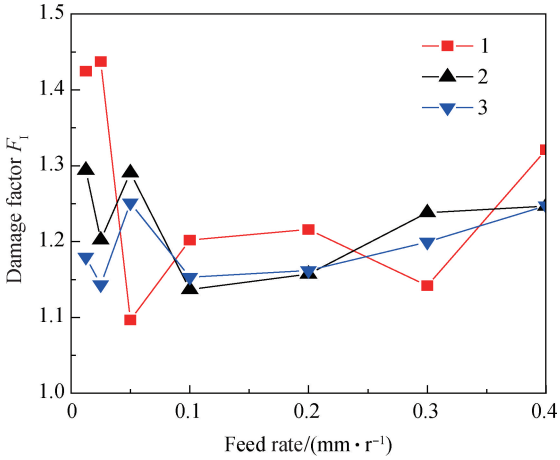


图 10　GF/PP 复合材料出口撕裂损伤随进给速度的变化

Fig. 10　Change of outlet tearing of GF/PP composites with feed rates

时 GF/PP 复合材料的钻削温度较高，因此低速进给时的损伤成因可解释为基体受热导致性能下降。上述结果表明，不能单纯通过减小进给速度的方法提高 GF/PP 复合材料制孔质量，必须辅助以相应的降温设备。

第 1 组实验数值整体略高，主要受其钻削温度的影响。其出现的异常波动可能是 GF/PP 复合材料的制造缺陷导致的，GF/PP 存在较多孔隙且界面强度差异很大，撕裂位置如果存在缺陷则容易扩展，反之则损伤较小。此外，出口撕裂的形成较复杂，最大损伤的出现位置随机分布于 90°～179°之间，不同位置的损伤必然有所区别，实验结果会出现一定的波动。

实验统计了最大撕裂损伤出现的纤维铺层角度，其频数分布如图 11 所示。可以看出，出口撕裂损伤最大值主要分布于 100°～150°之间，最容易出现的位置是 130°附近。直角切实验中大纤维铺层角度的复合材料切断困难[18]，高速摄影观测结果同样表明，130°附近的 GF/PP 材料不易切断，容易与副切削刃剧烈碰撞、撕扯，因此易在此位置出现严重的撕裂损伤。

图 12 是 0°毛刺损伤随进给速度的变化曲线，1～3 分别为 3 组重复实验的结果。可以看出，进给速度的增大有效抑制了 0°毛刺的形成。前文的分析指出，0°毛刺是由于底层材料产生较大变形而形成的，而进给速度增加可以使切削温度降低、底层材料厚度增加，导致底层材料塑性降低、刚度增加，进而减小了切削过程中的材料变形，因此进给速度增大可以有效抑制 0°毛刺的形成。

http://fhclxb.buaa.edu.cn

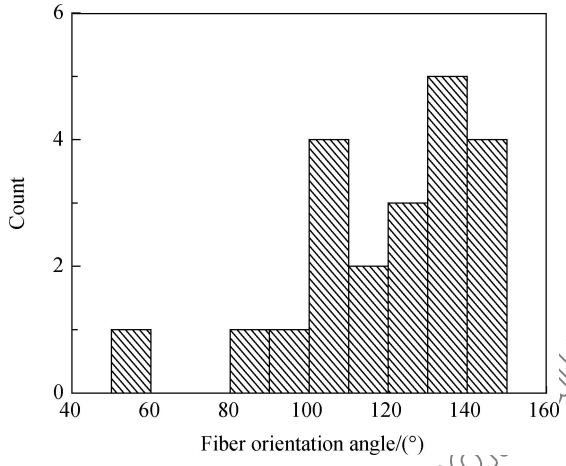


图 11 GF/PP 复合材料最大出口撕裂损伤位置分布

Fig. 11 Position distribution of maximum outlet tearing of GF/PP composites

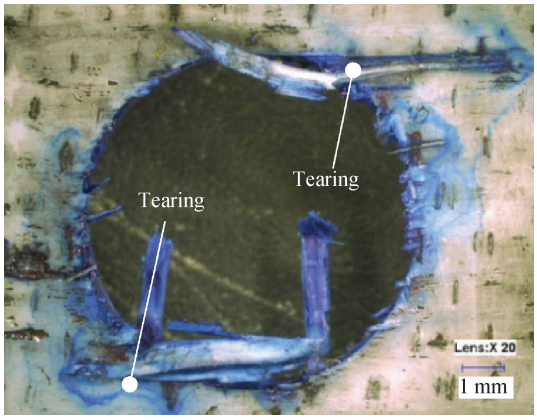


图 13 GF/PP 复合材料钻削入口损伤

Fig. 13 Inlet damage of drilling GF/PP composites (3 000 r/min, 0.3 mm·r^{-1})

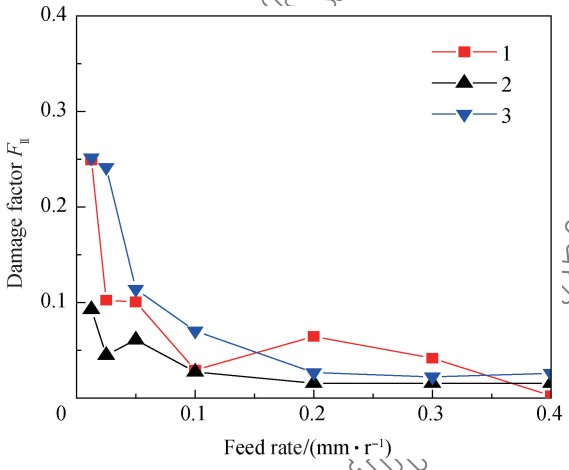


图 12 GF/PP 复合材料 0°毛刺损伤随进给速度的变化

Fig. 12 Change of 0° burr of GF/PP composites with feed rates

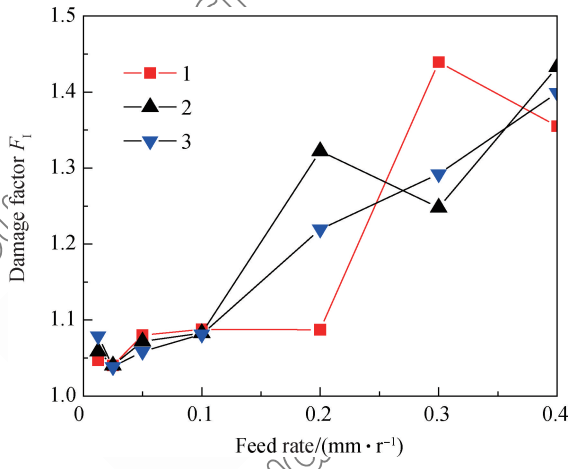


图 14 GF/PP 复合材料入口撕裂损伤随进给速度的变化

Fig. 14 Change inlet tearing of GF/PP composites with feed rates

4 GF/PP 复合材料入口损伤

4.1 GF/PP 复合材料入口损伤特征

GF/PP 复合材料的钻削入口损伤如图 13 所示，主要为撕裂损伤，严重的毛刺只在撕裂位置处存在，所有进给速度下均无 0°毛刺出现。入口撕裂损伤通常在对称位置成对出现，且提高进给速度，这种损伤将急剧增加，这将严重影响 GF/PP 复合材料构件的性能及后续的装配工艺。

4.2 进给速度对 GF/PP 复合材料入口损伤的影响

本文使用 I 型损伤因子对入口撕裂进行评价，图 14 是 GF/PP 复合材料入口撕裂损伤随进给速度的变化曲线，1～3 分别为 3 组重复实验的结果。可以看出，入口撕裂损伤将随着进给速度增加而迅速扩大。与出口撕裂损伤相比，入口撕裂损伤在低速进给时相对稳定，原因是入口侧的切削温度相对较低，不足以显著影响材料性能，入口撕裂损伤主要是由于钻削力过大引起的。但由于 GF/PP 材料存在较多的制造缺陷及钻头制造精度的差异，高速进给时的损伤数值出现较大波动。为了得到较好的入口质量，GF/PP 复合材料制孔时应避免使用过高的进给速度。

实验统计了 GF/PP 复合材料最大入口撕裂损伤位置的纤维铺层角度，其频数分布如图 15 所示。可以看出，入口撕裂损伤的最大值主要出现在纤维铺层角度为150°～170°之间的位置。入口撕裂的出现位置非常集中，其成因可能与麻花钻的结构有关。

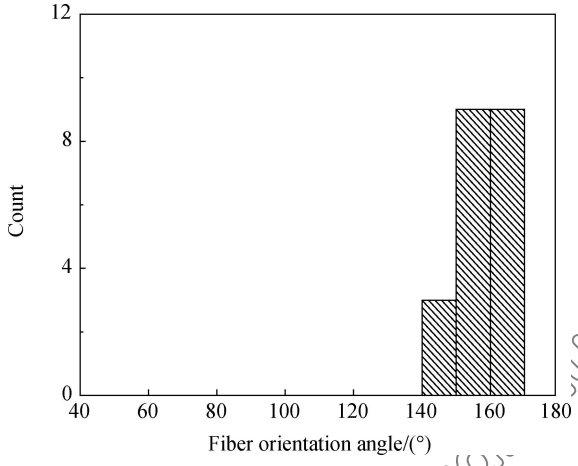


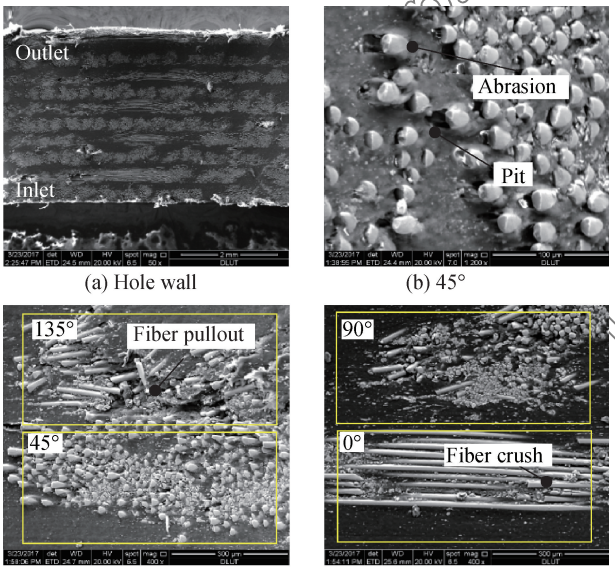
图 15　GF/PP 复合材料最大入口撕裂损伤位置分布

Fig. 15　Position distribution of maximum inlet tearing of GF/PP composites

5　GF/PP 复合材料孔壁形貌

孔壁形貌是衡量制孔质量的重要评价标准。复合材料由于具有各向异性，其孔壁形貌将随纤维铺层角度呈规律性的变化，而针对 GF/PP 复合材料的相关研究目前较少见，GF/PP 复合材料的孔壁损伤情况如图 16 所示。

复合材料最典型的损伤形式为分层损伤，但如图 16(a)所示，GF/PP 复合材料的孔壁未观测到分层损伤。这是因为热塑性复合材料具有较高的层间断裂韧性，且热塑性树脂可以阻止分层损伤的扩展，所以分层损伤极少出现[19-20]。



(a) Hole wall　(b) 45°

(c) 45° and 135°　(d) 0° and 90°

图 16　不同纤维铺层角度下的 GF/PP 复合材料孔壁形貌的 SEM 图像

Fig. 16　SEM images of hole wall morphologies of GF/PP composites for various fiber orientation angles

GF/PP 复合材料的孔壁形貌受纤维铺层角度影响极为显著，在 0°、45°、90°和 135°等 4 种纤维铺层角度下将表现出不同的形貌特征。如图 16(b)所示，纤维铺层角度约为 45°时，纤维与刀具接触侧磨蚀严重，而其对侧则存在微小凹坑，凹坑成因可能是纤维受刀具推挤，压迫 PP 树脂基体发生塑性变形。如图 16(c)所示，纤维铺层角度约为 135°区域加工质量较差，纤维拔出严重，大量裸露纤维嵌入 PP 基体；如图 16(d)所示，纤维铺层角度约为 90°区域有大量纤维碎屑填充于纤维间隙中，纤维铺层角度约为 0°区域纤维磨蚀严重，有部分纤维被压碎。

6　结　论

(1) 玻璃纤维增强聚丙烯复合材料(GF/PP)的钻削出口温度在低速进给时显著升高，在高速进给时基本趋于稳定；GF/PP 复合材料的钻削轴向力会随进给速度增加而显著提高。

(2) GF/PP 复合材料出口材料去除主要发生在副切削刃钻出阶段，纤维铺层角度在 0°～90°之间的材料先被去除，在 90°～179°之间的材料最后被去除。

(3) GF/PP 复合材料出口处的 0°毛刺是底层材料发生变形而产生的，在 90°～179°之间的严重撕裂是大片毛刺受到副切削刃的碰撞和撕挤而产生的。

(4) 进给速度对损伤大小有显著影响，进给速度过高或过低均会加剧出口撕裂；提高进给速度可以减少 0°毛刺；降低进给速度可以减少入口撕裂。

(5) GF/PP 复合材料不易出现分层损伤，在纤维铺层角度约为 135°的区域易出现严重的纤维拔出。

参考文献：

[1] 王永利. 玻璃纤维增强热塑性树脂基复合材料的机械连接性能研究[D]. 上海：东华大学，2017.
WANG Y L. A study on the mechanically fastened joint of glass fiber reinforced thermoplastic[D]. Shanghai: Donghua University, 2017 (in Chinese).

[2] BIRON M. Thermoplastics and thermoplastic composites [M]. Kidlington: William Andrew, 2013, 769-828.

[3] JUNG K, KIM D, KIM H, et al. Finite element analysis of a low-velocity impact test for glass fiber-reinforced polypropylene composites considering mixed-mode interlaminar fracture

toughness[J]. Composite Structures，2017，160：446-456.

[4] 陈燕，葛恩德，傅玉灿，等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报. 2015，32(2)：301-316.
CHEN Y，GE E D，FU Y C，et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2015，32(2)：301-316 (in Chinese).

[5] 高汉卿，贾振元，王福吉，等. 基于细观仿真建模的 CFRP 细观破坏[J]. 复合材料学报，2016，33(4)：758-767.
GAO H Q，JIA Z Y，WANG F J，et al. Mesoscopic failure of CFRP based on mesoscopic simulation modeling[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2016，33(4)：758-767 (in Chinese).

[6] 殷俊伟，贾振元，王福吉，等. 基于 CFRP 切削过程仿真的面下损伤形成分析[J]. 机械工程学报，2016，52(17)：58-64.
YIN J W，JIA Z Y，WANG F J，et al. FEM simulation analysis of subsurface damage formation based on continuously cutting process of CFRP[J]. Journal of Mechanical Engineering，2016，52(17)：58-64 (in Chinese).

[7] 贾振元，何春伶，付饶，等. 基于 CFRP 层合板钻削轴向力时变曲线的钻头几何形状分析[J]. 复合材料学报，2016，33(12)：2757-2765.
JIA Z Y，HE C L，FU R，et al. Analysis of drilling bit geometry based on time varying curve of drilling thrust force for CFRP composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2016，33(12)：2757-2765 (in Chinese).

[8] YOSHIDA T，ISHIAKU U S，OKUMURA H，et al. The effect of molecular weight on the interfacial properties of GF/PP injection molded composites[J]. Composites Part A：Applied Science & Manufacturing，2006，37(12)：2300-2306.

[9] ZHAI Z，GRÖSCHEL C，DRUMMER D. Tensile behavior of quasi-unidirectional glass fiber/polypropylene composites at room and elevated temperatures[J]. Polymer Testing，2016，54：126-133.

[10] VARATHARAJAN R，MALHOTA S K，VIJAYARAGHAVAN L，et al. Mechanical and machining characteristics of GF/PP and GF/polyester composites[J]. Materials Science and Engineering：B，2006，132(1-2)：134-137.

[11] PALANIKUMAR K，SRINIVASAN T，RAJAGOPAL K，et al. Thrust force analysis in drilling glass fiber reinforced/polypropylene (GFR/PP) composites[J]. Materials & Manufacturing Processes，2016，31(5)：581-586.

[12] SRINIVASAN T，PALANIKUMAR K，RAJAGOPAL K，et al. Optimization of delamination factor in drilling GFR-Polypropylene composites [J]. Materials & Manufacturing Processes，2017，32(2)：226-233.

[13] KAKINUMA Y，ISHIDA T，KOIKE R，et al. Ultrafast feed drilling of carbon fiber-reinforced thermoplastics[J]. Procedia CIRP，2015，35：91-95.

[14] KIM D，RAMULU M，DOAN X. Influence of consolidation process on the drilling performance and machinability of PIXA-M and PEEK thermoplastic composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials，2005，18(3)：195-217.

[15] CHE D，SAXENA I，HAN P，et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers：A literature review[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering，2014，136(3)：034001.

[16] SORRENTINO L，TURCHETTA S，BELLINI C. In process monitoring of cutting temperature during the drilling of FRP laminate[J]. Composite Structures，2017，168：549-561.

[17] 温泉，郭东明，高航，等. 基于划痕试验的碳纤维/环氧树脂复合材料制孔毛刺与撕裂缺陷形成机制[J]. 复合材料学报，2014，31(1)：9-17.
WEN Q，GUO D M，GAO H，et al. Burr and spalling damages formation mechanism of carbon epoxy composites by scratching experiment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2014，31(1)：9-17 (in Chinese).

[18] 贾振元，宿友亮，张博宇，等. 基于径向基函数神经网络的 CFRP 切削力预测[J]. 复合材料学报，2016，33(3)：516-524.
JIA Z Y，SU Y L，ZHANG B Y，et al. Prediction of cutting force in CFRP based on radial basis function neural network [J]. Acta Materiae Compoisitae Sinica，2016，33(3)：516-524 (in Chinese).

[19] DE B I，JACQUES S，VAN P W，et al. Study of the mode I and mode II interlaminar behaviour of a carbon fabric reinforced thermoplastic[J]. Polymer Testing，2012，31(2)：322-332.

[20] SHIN S，JANG J. Fractographical analysis on the mode II delamination in woven carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. Journal of Materials Science，1999，34(21)：5299-5306.

http://hclxb.buaa.edu.cn