

芳纶纤维增强树脂复合材料液氮冷却钻孔试验

王晋宇, 刘海波, 刘阔*, 刘佳欣, 王永青
(大连理工大学 机械工程学院, 大连 116024)

摘 要: 芳纶纤维增强树脂(AFRP)复合材料是一种公认的难加工材料, 加工中极易出现毛刺、烧蚀等缺陷, 目前缺乏对其有效的加工工艺方法。为提高其加工质量, 研究了液氮作为冷却介质的 AFRP 复合材料钻孔试验。在相同切削参数下进行了干式切削和超低温加工对比试验, 测量了切削过程中的轴向切削力和孔临近区域的温度, 并计算了孔的进出口毛刺面积和分层因子, 分析了 AFRP 复合材料缺陷的成因, 探讨了不同加工条件下缺陷的变化规律。结果表明: 与干式切削相比, 采用液氮超低温冷却加工的切削力升高了约 15.2%, 切削温度降低了约 141.6℃, 毛刺面积减少了约 24.7%, 因切削热产生的烧蚀现象得到抑制, 明显改善了 AFRP 复合材料的加工质量。

关键词: 芳纶纤维; 复合材料; 液氮冷却; 超低温加工; 钻孔; 加工质量
中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)01-0089-07

Experiment of liquid nitrogen cooling drilling test of aramid fiber-reinforced polymer composites

WANG Jinyu, LIU Haibo, LIU Kuo*, LIU Jiaxin, WANG Yongqing
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The aramid fiber-reinforced polymer (AFRP) composite are proverbial difficult-to-machining materials, it is easy to generate defects of burr and ablation. At present, there is lacks of the effective processing methods for AFRP composite. In order to raise processing quality, the drilling experiment of AFRP composite using liquid nitrogen as cooling medium was studied. A comparative test of dry cutting and cryogenic machining under the same cutting parameters was carried out. The axial cutting force and temperature in the vicinity of the hole in the cutting process were measured, and the delamination factor and fuzzing area after drilling were calculated. The causes of AFRP composite machining defects were analyzed, and the changing rules of defects under different cutting conditions were discussed. The results show that compared with dry cutting, the cutting force increases by 15.2%, the cutting temperature decreases by 141.6℃, and the burr area decreases by 24.7%. The ablation phenomenon caused by cutting heat is inhibited, visibly improving the processing quality of AFRP composite when liquid nitrogen ultralow temperature cooling is used.

Keywords: aramid fiber; composites; liquid nitrogen cooling; cryogenic machining; drilling; processing quality

芳纶纤维增强树脂(AFRP)复合材料是一种具有数低等特性, 零件经机械加工后极易出现毛边、撕裂和分层等表面缺陷, 尤其在半封闭的钻孔加工中, 因切削力/热耦合的影响缺陷更为明显, 严重影响零件使役中的几何精度和装配连接^[4-5]。芳纶纤维增强树脂(AFRP)复合材料是一种具有高比强度、高比刚度、低密度及高绝缘性的先进复合材料。由于其出众的耐冲击性和可设计性等特点, 在航空航天、装甲武器及汽车等领域的需求日渐提升^[1-3]。但 AFRP 复合材料也是公认的难加工材料, 具有纤维韧性大、结合界面强度低和导热系

为抑制复合材料钻孔损伤, 提高钻孔质量和加工效率, 国内外学者从切削参数、刀具选择和冷却
收稿日期: 2019-01-16; 录用日期: 2019-03-12; 网络出版时间: 2019-03-20 10:12
网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190318.001>
基金项目: 国家自然科学基金-辽宁联合基金重点支持项目(U1608251)
通讯作者: 刘阔, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为超低温加工技术与装备 E-mail: liukuo@dlut.edu.cn
引用格式: 王晋宇, 刘海波, 刘阔, 等. 芳纶纤维增强树脂复合材料液氮冷却钻孔试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1): 89-95.
WANG Jinyu, LIU Haibo, LIU Kuo, et al. Experiment of liquid nitrogen cooling drilling test of aramid fiber-reinforced polymer composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(1): 89-95 (in Chinese).

降温等方面进行了研究。伍俏平等^[6]采用两种钻头进行 AFRP 复合材料钻孔实验,研究了钻头的切削力、切削温度和钻孔质量等变化规律,发现超细晶硬质合金钻头可以提高钻孔性能。Díaz-álvarez 等^[7]研究了麻花钻头和三尖钻头对 AFRP 复合材料钻孔的影响,建立了切削参数和进出口损伤、轴向力的经验公式,讨论了切削速度和进给速度对钻孔缺陷的影响。Liu 等^[8]进行 AFRP 复合材料钻孔时在进出口处增加了支撑环,研究了此条件下进给速度对轴向力、加工缺陷的影响,发现支撑环尺寸接近钻头直径时,产生的分层、撕裂和毛刺缺陷最少。Bao 等^[9]利用有限元方法建立了 AFRP 复合材料钻孔时的温度场模型,研究了不同加工参数下的钻孔温度变化。发现主轴转速为 3 000 r/min 时,最高温度可达到 297.3℃。

液氮冷却加工可以降低切削温度、提高切削性能和改善刀具寿命,是近年来快速发展的一种绿色加工工艺^[10]。应用该技术, Bhattacharyya 等^[11]开展了 AFRP 复合材料车削试验研究,发现液氮冷却加工对刀具磨损、切削力和加工表面粗糙度都有正向效果。Wang 等^[12]进行了 AFRP 复合材料超低温冷却切削试验,对比干式切削,液氮加工可以显著抑制纤维起毛、撕裂和烧蚀等缺陷。Xia 等^[13]对碳纤维复合材料进行了超低温和干式切削对比钻孔试验,同样发现液氮冷却加工在提高孔表面质量、抑制加工损伤等方面有积极作用。但目前液氮冷却超低温加工技术多数集中于金属材料^[14],纤维复合材料切削加工研究较少,特别是针对 AFRP 复合材料超低温钻孔的研究鲜有涉及。

1 芳纶纤维增强树脂 (AFRP) 复合材料钻孔缺陷

芳纶纤维的酰胺基团较难与其他原子或基团发生反应,与树脂基体的黏合性较差,使 AFRP 复合材料的层间结合强度极低;此外,与脆性的碳纤维相比,芳纶纤维的韧性强,在外力作用下发生颈缩和屈服,纤维经历弯曲、原纤化及一定的塑性变形后最终断裂。这些都导致 AFRP 复合材料宏观呈现出毛刺、撕裂、分层等缺陷^[15]。

图 1 为 AFRP 复合材料钻孔缺陷示意图。可以看到,进口处,因横刃的挤压,纤维发生弯曲变形,纤维受刀具挤压后从树脂基体中剥离出来,AFRP 复合材料表面处的纤维没有得到很好地支撑,导致

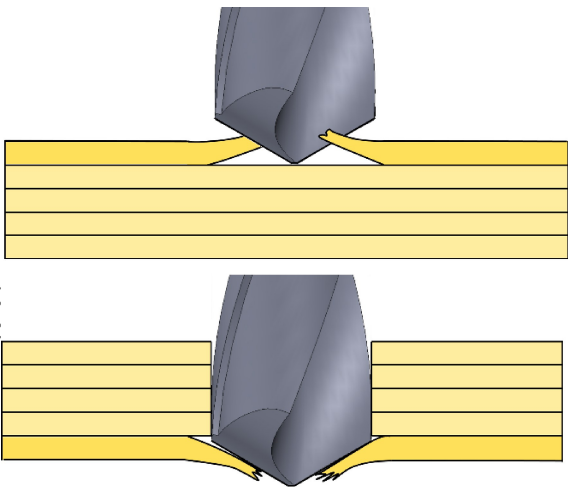


图 1 芳纶纤维增强树脂基复合材料 (AFRP) 钻孔缺陷示意图
Fig. 1 Diagram of defects during drilling of Aramid fiber-reinforced polymer (AFRP)

部分纤维无法被完全切断。同时芳纶纤维柔性大但抗压强度低,在外力作用下纤维很少发生剪切断裂,更多是经历一定的塑性变形后断裂,形成不平整断口,进而产生毛刺^[15]。切削刃完全进入 AFRP 复合材料后,对材料的挤压力达到峰值,AFRP 复合材料待切削层支撑刚度却随着切削深入而下降,树脂基对纤维的约束力逐渐降低。直到出口处的末层纤维完全没有约束,孔边缘处纤维主要受拉伸力和弯曲力,无法被有效切断,产生分层、撕裂。

大量研究表明,轴向力是纤维复合材料机械钻孔过程中产生分层、毛刺缺陷的主要因素^[16-18]。为降低轴向力,减少加工损伤,钻孔时多采用高转速低进给。张海旻^[7]、Bao 等^[9]及庄原^[15]在麻花钻头切削 AFRP 复合材料时,进给速度仅为 2~5 mm/min,但此进给参数下不仅加工效率低,还会产生严重的烧蚀和碳化现象。

综上所述,如何提高加工效率、抑制切削烧蚀、改善加工性能已成为制约 AFRP 复合材料钻孔发展的技术难点。本文提出液氮作为冷却介质进行 AFRP 复合材料钻孔试验,通过超低温加工抑制钻孔产生的高热量,降低切削温度。从切削力/热变化出发,研究超低温冷却下的钻削性能,探寻液氮对加工损伤的影响规律和抑制加工损伤的机制。

2 AFRP 钻孔试验

2.1 试验条件

试验复合材料为 F12 芳纶纤维增强环氧树脂 (EP) 复合材料层合板,编织方向为 0/90°,单层纤维

厚度为 0.13 mm。环氧树脂基固化温度为 130℃, 玻璃化转变温度(T_g)为 160℃。层合板厚度为(5.8±0.1)mm, 纤维质量分数为(62±2)wt%。成型后将其裁剪成 150 mm×100 mm 规格以方便进行试验; 采用日本京瓷公司生产的 KYOCERA-101 氮铝化钛涂层标准麻花钻头, 钻头直径 φ 为 6 mm; 试验机床为长征三轴立式加工中心 KVC850M, 主轴转速最高为 8 000 r/min, 工作行程为 850 mm×550 mm×600 mm。本课题组自主研发的液氮射流调控系统采用真空绝热管进行液氮传输, 减少管内液氮的汽化, 同时喷嘴出口处的液氮处于高压射流状态, 使液氮可以有效地喷射到切削区。

2.2 试验方案

图 2 为超低温加工试验示意图。试验前先用 1 mm 微型钻头对 AFRP 复合材料进行预埋孔加工, 预埋孔位置距离加工孔壁 0.5 mm, 深度为 3.6 mm。试验采用切削参数为: 主轴转速 n 分别为 1 000 r/min、3 000 r/min、5 000 r/min、7 000 r/min, 进给速度 V_f 分别为 30 mm/min、60 mm/min、120 mm/min、240 mm/min、480 mm/min 进行正交试验, 在相同参数下分别进行干式加工和液氮外喷冷却加工。试验切削力通过 YDCB-III05 型测力仪、LN5861 电荷放大器和 ADLINK USB1901 采集卡进行采集测量; 采用 OMEGA-K 型热电偶放置预埋孔处测量切削温度, 热电偶测温范围为 -200~500℃, 测量精度为 0.1℃。试验现场如图 3 所示。采用日本 KEYENCE 公司产 VHX-600 型超景深显微镜对钻孔缺陷进行观测。

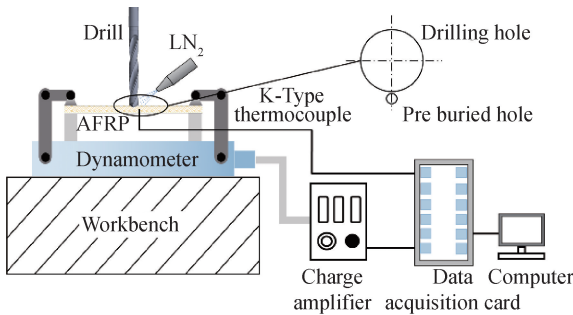


图 2 超低温加工试验示意图

Fig. 2 Diagram of cryogenic machining experiment

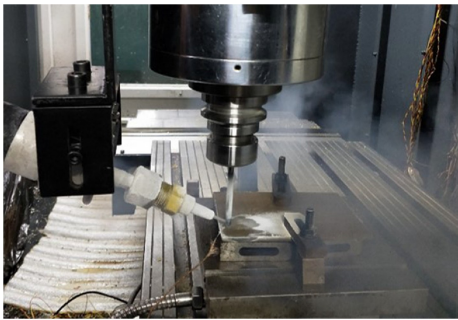


图 3 超低温加工试验

Fig. 3 Cryogenic machining experiment

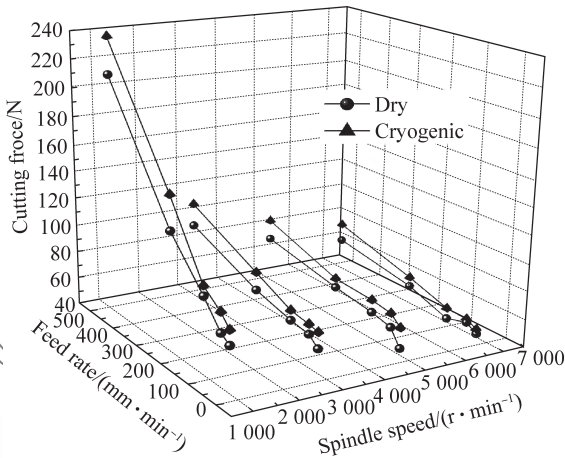


图 4 AFRP 复合材料的轴向力分布

Fig. 4 Axial cutting force distribution of AFRP composite

加工条件下, AFRP 复合材料轴向力变化趋势基本一致。主轴转速不变时, 随着进给速度的增加, 轴向力呈现出类似线性增加。特别是在主轴转速 $n=1\,000\text{ r/min}$ 时, 轴向力增加的幅度最大。进给速度不变时, 不同转速下的轴向力大致存在两种变化形式。在进给速度 $V_f=30\sim60\text{ mm/min}$ 时, 轴向力随主轴转速的增加呈现类直线性减少, 且减小幅度不明显, 根据切削理论可知, 随着切削速度的提高, 轴向力降低到某一个值后, 趋向于一个恒力; 在 $V_f=240\sim480\text{ mm/min}$ 高进给参数下, 轴向力随主轴转速的增加呈曲线式急剧下降, 说明 AFRP 复合材料钻孔时主轴转速和进给速度对轴向力影响较为明显。根据轴向力的变化规律, 在 AFRP 复合材料钻孔过程中想要获得较低轴向力, 应选择高转速低进给的切削参数。

在所有试验参数下, 对比干式切削, 液氮冷却超低温加工条件下产生的轴向力平均升高了 15.2%。这是由于在超低温环境下, AFRP 复合材

3 结果与分析

3.1 AFRP 复合材料的钻削力

不同主轴转速、进给速度和加工条件下 AFRP 复合材料轴向力的分布如图 4 所示。可知, 在两种

料的层间结合强度得到提升。随着温度的降低AFRP 复合材料变得更硬，复合材料发生变形阻力也更大。

3.2 AFRP 复合材料钻削温度

芳纶纤维和环氧树脂的导热系数低，导致AFRP 复合材料的导热性极差，特别是在高速钻孔加工时，刀具后刀面与复合材料摩擦产生大量的切削热量无法及时扩散，切削区温度急速升高，当超过树脂基体的玻璃化转变温度 T_g 时，便会产生严重的烧蚀缺陷。

图 5 为 AFRP 复合材料切削温度分布规律。可知，进给速度越低，主轴转速越高，钻孔的切削温度越高，尤其是在 $V_f=30\sim60\text{ mm/min}$ 低进给参数下，切削温度升高十分明显，干式切削的切削温度更是达到了 291°C 。结合图 4 可知，切削温度和轴向力随切削参数变化趋势正好相反。主要是与钻头作用在工件上的时间有关。高转速低进给时，虽然切削力很小，切削力做功产生热量较小，但刀具单位时间内与工件接触次数增加，后刀面与已加工表面发生更多的摩擦，大量摩擦热在微小的切削区内无法及时扩散，使切削温度在短时内急剧升高。相比超低温加工，干式切削时切削温度均高于 T_g 。

相比于干式切削，液氮冷却加工条件下全部试验切削温度的平均值降低了 141.6°C 。其原因为液氮沸点低 (-196°C)，形成深冷状态，同时其较大的换热系数和在高压射流状态下产生的强迫对流换热，共同作用降低了切削区的温度。因此即便是在高转速低进给的加工参数下，依旧可以保证切削区温度低于 T_g 。

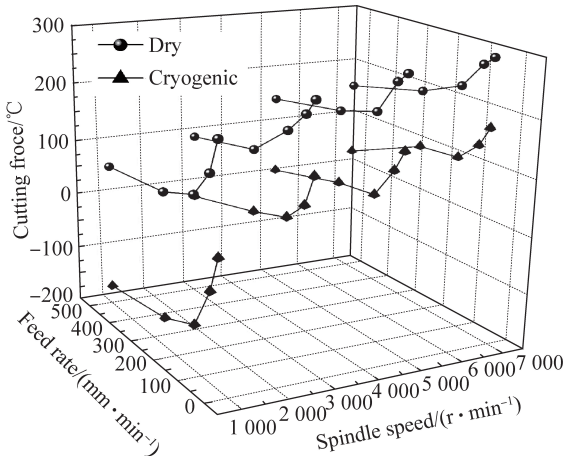


图 5 AFRP 复合材料的切削温度分布

Fig. 5 Cutting temperature distribution of AFRP composites

3.3 AFRP 复合材料孔质量

3.3.1 缺陷评价

在叠层树脂基复合材料钻孔过程中，材料末端纤维层缺乏支撑，纤维破坏形式不再是被切断，而是呈现出轴向挤压破坏，导致分层现象主要集中在出口处，如图 6(a)所示，分层缺陷根据分层因子 F_d 进行评价，计算如下：

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D}$$
 (1)

式中： D_{\max} 为孔分层最大直径； D 为钻孔直径。

AFRP 复合材料进口处的毛刺形状杂乱无规则，以致量化过程中无法像碳纤维测量毛刺长度、宽度等特征。在本次研究中，采用光学数字化技术，对进口处的毛刺进行区域化量化处理，采用图像软件对进口表面毛刺进行二值化处理^[19]。通过毛刺面积 A 对毛刺缺陷进行评价，主要特征方法如图 6(b)所示。

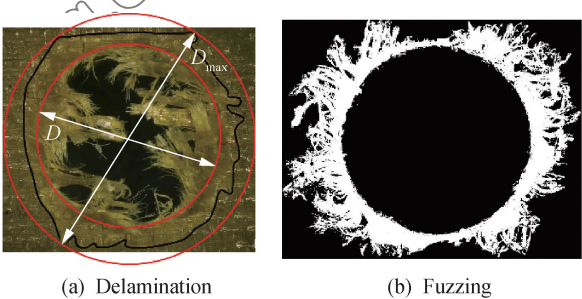


图 6 AFRP 复合材料钻孔质量特征

Fig. 6 Characterization of hole quality of AFRP composite

3.3.2 分层缺陷

AFRP 复合材料在试验出口处分层缺陷结果如图 7 所示。可以看出，在干式切削和液氮冷却两种加工条件下，AFRP 复合材料的分层缺陷因加工参数变化而改变的趋势基本一致。即在主轴转速不变情况下，随着进给速度的增加，分层因子 F_d 增大且变化幅值较大；在进给速度不变情况下，随着主轴转速的增加，分层因子 F_d 减小且变化幅值较小。尤其在低转速低进给的加工参数下，该现象更为明显。此外，液氮冷却条件下的分层因子 F_d 均大于干式切削条件。与 Xia 等^[13]在碳纤维复合材料液氮冷却钻孔过程中发现的现象一致，主要是液氮环境下轴向力增加所导致。

3.3.3 毛刺缺陷

图 8 为 AFRP 复合材料的进口毛刺缺陷结果。可以看出，干式切削情况下，在不同主轴转速下，

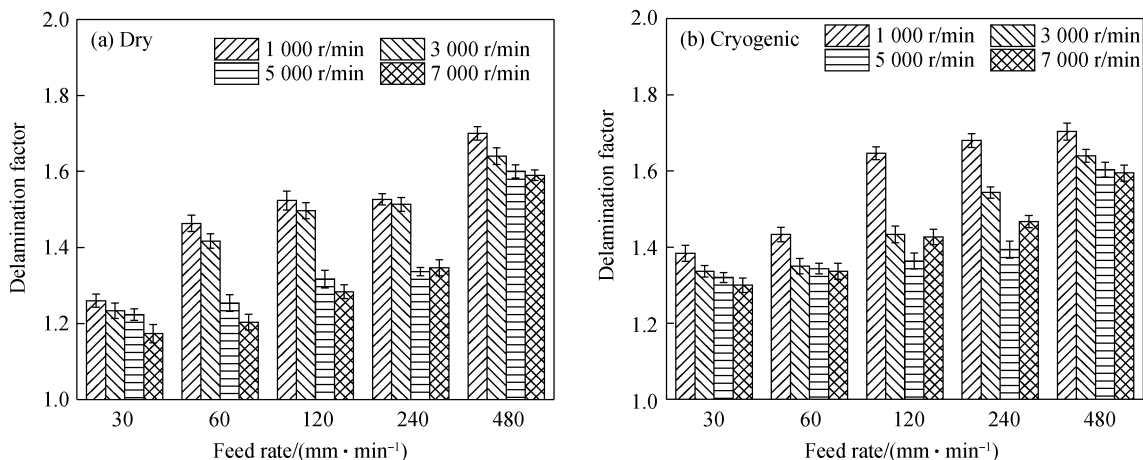


图 7 AFRP 复合材料的分层缺陷结果
Fig. 7 Delamination defect results of AFRP composite

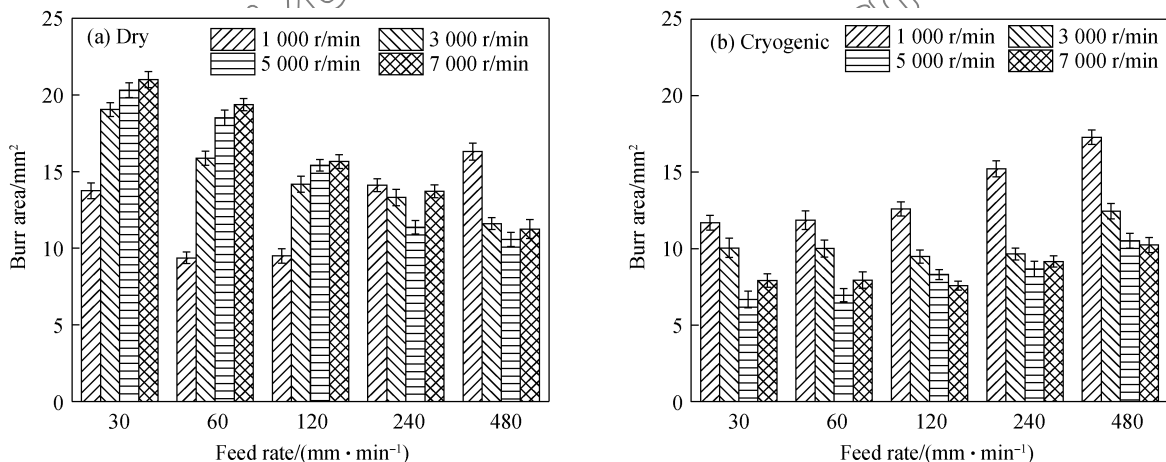


图 8 AFRP 复合材料的毛刺缺陷结果
Fig. 8 Fuzzing defect results of AFRP composite

进给速度对毛刺产生了两种影响趋势。即在 $n = 1\,000\text{ r/min}$ 时,随着进给速度的增加,毛刺面积先减小后增大,而当主轴转速升高后,毛刺面积随着进给速度的增加逐渐变小。这是轴向力/热共同作用的结果。

从上文可知,进给速度和主轴转速对切削力/热的影响是相反的。高转速情况时,随着进给的增加,虽然轴向力变化较小,但切削温度变化较为剧烈。在此切削参数下,毛刺缺陷主要受切削热的影响。温度升高后,树脂基弹性模量、抗拉强度和密度等一系列性能随之降低,当温度超过 T_g 后,树脂性能急剧下降^[20]。树脂软化失去对纤维的支撑和束缚,纤维不能被有效切断。故在切削温度均超过树脂基的 T_g 且高速钻孔情况下,进给速度增大后,切削温度的降低导致毛刺减少。

在切削温度较低的 $n = 1\,000\text{ r/min}$ 加工参数下, V_f 从 60 mm/min 增大到 480 mm/min ,切削力急速增大,温度变化较小且低于 T_g ,由于树脂基和芳纶纤维的层间结合能力极低,轴向力过大会导致 AFRP 复合材料内部出现树脂和纤维脱黏,刀具与纤维编织黏结成型点的最大屈服强度使多数纤维不能被有效切削,进而产生更多毛刺。当 V_f 从 60 mm/min 减小到 30 mm/min 时,轴向力小幅度减少,但切削温度升高较多,切削温度对毛刺缺陷起主要影响,温度升高后 AFRP 复合材料的层间剪切强度下降,纤维被刀具从基体中剥离,切削效果减弱,进而产生更多毛刺,如图 9 所示。

对比干式切削,在液氮冷却切削时,切削温度均未达到树脂基体的 T_g 值,减少了切削温度对其影响,轴向力几乎变成了唯一影响因素,因此毛刺

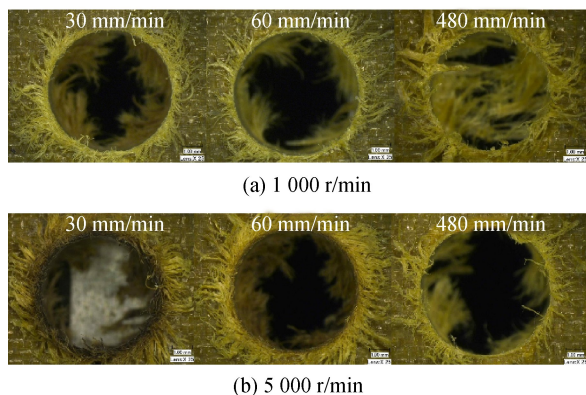


图9 AFRP复合材料的干式切削进口缺陷
Fig.9 Enter port defect of AFRP composite in dry machining

面积随进给速度的增加而增大,随着主轴转速的增加而减少。根据数据可知,相比干式切削,超低温加工时 AFRP 复合材料的平均毛刺面积减少了 24.7%。尤其在高速钻孔时,钻孔所产生的毛刺和烧蚀缺陷得到明显抑制,如图 10 所示。这是由于超低温条件下,切削温度得到了大幅度降低,避免了热损伤,树脂力学性能得到保障,同时低温环境下,树脂和纤维的不同膨胀系数,使进口处纤维和树脂产生内部应力,增加了树脂对纤维的支撑,毛刺缺陷得到了明显抑制。

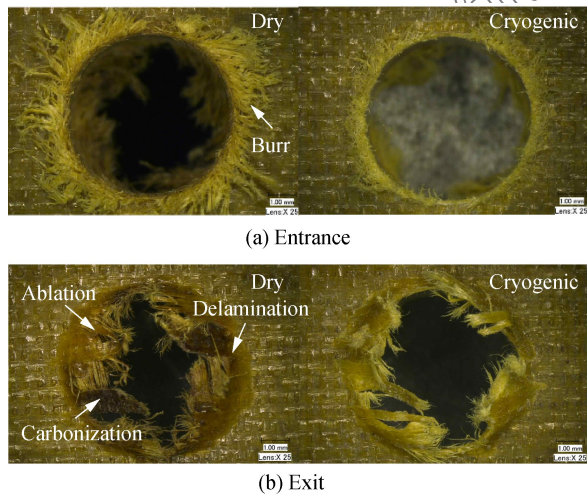


图 10 干式切削和超低温加工缺陷图(主轴转速 $n=5\,000\text{ r/min}$,
进给速度 $V_f=60\text{ mm/min}$)

Fig.10 Defects of dry and cryogenic machining (Spindle speed
 $n=5\,000\text{ r/min}$, Feed rate $V_f=60\text{ mm/min}$)

4 结 论

(1) 在芳纶纤维增强树脂 (AFRP) 复合材料钻孔中,对比常规干式切削,液氮冷却加工条件下,所有试验参数的平均轴向力增加了 15.2%,平均切

削温度降低了 141.6℃,切削温度均在树脂基体玻璃化转化温度 (T_g) 之下,保持了 AFRP 复合材料加工过程中树脂基的性能。

(2) 相比常规干式切削时产生大量毛刺和严重烧蚀缺陷,液氮冷却加工可以大幅度提高切削速度,同时避免进出口处因切削温度过高所引起的烧蚀缺陷,分层缺陷小幅度增加,平均毛刺面积减少了 24.7%。

(3) 对比分析切削参数对钻孔分层、毛刺和烧蚀缺陷的影响,在液氮冷却加工条件下选取主轴转速 $n=5\,000\text{ r/min}$ 、进给速度 $V_f=60\text{ mm/min}$ 的切削参数,可以实现 AFRP 复合材料高效低损伤的加工效果。

参考文献:

- [1] 邢丽英,包建文,孔嵩明,等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1327-1338.
XING L Y, BAO J W, LI C M, et al. Development status and facing challenge of advanced polymer matrix composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1327-1338 (in Chinese).
- [2] 陈磊,宋欢,李正胜,等. 芳纶纤维材料在电气绝缘和电子领域中的应用进展[J]. 绝缘材料, 2018, 51(10): 7-10.
CHEN L, SONG H, LI Z S, et al. Application progress of aramid fiber materials in electrical insulation and electronic fields[J]. Insulating Materials, 2018, 51(10): 7-10 (in Chinese).
- [3] SINGH T J, SAMANTA S. Characterization of Kevlar fiber and its composites: A Review[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 2(4-5): 1381-1387.
- [4] 张瀚妮. 芳纶纤维复合材料加工过程中的热力行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
ZHANG Y N. Study on thermal and mechanical behavior of aramid fiber composites during machining[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [5] 石文天,刘汉良,张加波,等. 芳纶纤维复合材料切削加工缺陷研究[J]. 中国塑料, 2013, 27(4): 71-74.
SHI W T, LIU H L, ZHANG J B, et al. Research on cutting defects of aramid fiber composites[J]. China Plastics, 2013, 27(4): 71-74 (in Chinese).
- [6] 伍俏平,刘平,邓朝晖,等. 基于超细晶硬质合金钻头的 AFRP 钻削性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(10): 2246-2253.
WU X P, LIU P, DENG C H, et al. Drilling performance of ultrafine cemented carbide drill in machining aramid fiber reinforce polymer composites[J]. Acta Materiae Compositae

- Sinica, 2017, 34(10): 2246-2253 (in Chinese).
- [7] DÍAZ-ÁLVAREZ A, RODRÍGUEZ-MILLÁN M, DÍAZ-ÁLVAREZ J, et al. Experimental analysis of drilling induced damage in aramid composites [J]. *Composite Structures*, 2018, 202: 1136-1144.
- [8] LIU S, YANG T, LIU C, et al. Investigation of hole quality during drilling of KFRP based on the interaction between colars and cutter [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(9-12): 4101-4116.
- [9] BAO Y, HAO W, GAO H, et al. Numerical and experimental investigations on temperature distribution of plain-woven aramid fiber-reinforced plastics composites with low mild spindle velocities [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 99(1-4): 613-622.
- [10] SHOKRANI A, DHOKIA V, MUNOZ P, et al. State-of-the-art cryogenic machining and processing [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2013, 26(7): 616-648.
- [11] BHATTACHARYYA D, ALLEN M, MANDER S J. Cryogenic machining of Kevlar composites [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1993, 8(6): 631-651.
- [12] WANG F, WANG Y, HOU B, et al. Effect of cryogenic conditions on the milling performance of aramid fiber [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(1-4): 429-439.
- [13] XIA T, KAYNAK Y, ARVIN C, et al. Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(1-4): 605-616.
- [14] KALE A, KHANNA N. A Review on cryogenic machining of super alloys used in aerospace industry [J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 7: 191-197.
- [15] 庄原. 芳纶纤维复合材料切磨复合加工技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- ZHUANG Y. Study on combined machining technology of sawing and grinding aramid composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [16] 李桂玉, 汪海晋, 孙杰, 等. 基于复合材料钻削缺陷容差值的工艺参数优化 [J]. *复合材料学报*, 2014, 31(4): 1022-1029.
- LI G Y, WANG H J, SUN J, et al. Process parameter optimization based on the defects tolerance of drilling composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(4): 1022-1029 (in Chinese).
- [17] ABRAO A M, FARIA P E, RUBIO J C C, et al. Drilling of fiber reinforced plastics: A review [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 186(1-3): 1-7.
- [18] 黄启锋, 林有希, 范宜鹏, 等. 高速钻削过程刀具后刀面磨损对轴向力的影响 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2018, 41(6): 6-9.
- HUANG Q F, LIN Y X, FAN Y P, et al. Effect of tool wear on axial force for high speed drilling [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2018, 41(6): 6-9 (in Chinese).
- [19] JOSHI S, RAWAT K, BALAN A S S. A novel approach to predict the delamination factor for dry and cryogenic drilling of CFRP [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 262: 521-531.
- [20] FOREMAN J P, PORTER D, BEHZADI S, et al. Predicting the thermomechanical properties of an epoxy resin blend as a function of temperature and strain rate [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(9): 1072-1076.