



一种超声超低温冰层支撑辅助CFRP钻削方法

李树健 陈蓉 李常平 李鹏南 牛秋林 邱新义

A method of CFRP drilling assisted by ultrasonic, cryogenic temperature and ice support

LI Shujian, CHEN Rong, LI Changping, LI Pengnan, NIU Qiulin, QIU Xinyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210514.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑刀具磨损影响的CFRP复合材料钻削轴向力预测

Prediction of thrust force in CFRP composite drilling considering tool wear effect

复合材料学报. 2021, 38(7): 2207–2217 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201111.003>

硬质合金台阶钻结构参数及钻削工艺参数对CFRP开孔性能的影响

Effect of structural parameters and drilling process parameters of carbide step drills on the performance of CFRP drilling

复合材料学报. 2017, 34(8): 1721–1728 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161124.003>

碳纤维增强环氧树脂复合材料层合板干涉连接插钉轴向力建模与分析

Research on thrust force of carbon fiber reinforced epoxy resin composite laminates during the interference-fit bolt installation process

复合材料学报. 2019, 36(10): 2294–2301 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190104.003>

双顶角钻头钻削CFRP复合材料的刀具磨损机制

Wear mechanism of double point angle drill bit in drilling CFRP composites

复合材料学报. 2017, 34(4): 749–757 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160823.001>

芳纶纤维增强树脂复合材料液氮冷却钻孔试验

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

复合材料学报. 2020, 37(1): 89–95 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190318.001>

冷却空气流向对CFRP制孔刀具磨损及孔质量的影响

Influence of cooling air direction on tool wear and hole quality in CFRP drilling

复合材料学报. 2019, 36(2): 410–417 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180327.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.13801/j.cnki.fhclxb.20210514.001](https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210514.001)

一种超声超低温冰层支撑辅助 CFRP 钻削方法



分享本文

李树健^{*1}, 陈蓉², 李常平¹, 李鹏南¹, 牛秋林¹, 邱新义¹

(1. 湖南科技大学 机电工程学院, 湘潭 411201; 2. 湖南工程学院 机械工程学院, 湘潭 411104)

摘要: 提出一种超声振动+超低温液氮+由超低温环境形成的冰冻支撑层 (Ultrasonic vibration+Cryogenic liquid nitrogen+Frozen support layer, UCF) 来辅助碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 钻削制孔, 有效降低钻削缺陷的加工方法。该方法的基本原理为: 利用超声作用下的钻头高频振动实现轴向钻削力的弱化, 利用超低温液氮以及形成的冰冻支撑层来实现钻削出口侧材料的约束和支撑, 并有效降低加工过程的钻削热影响。基于 UCF 的基本原理, 开展了相应的 UCF 辅助加工实验, 通过微观检测表征和缺陷因子计算等手段, 与传统钻削模式 (Traditional drilling, TD)、低温液氮+冰冻支撑模式 (Cryogenic liquid nitrogen +Freezing support, CF) 下的 CFRP 制孔质量进行了对比分析。结果表明, 采用 UCF 模式和 CF 模式均会引起轴向力增加, 但 UCF 模式下的最大轴向力增幅相对较小; 与 TD 模式相比, 采用 UCF 辅助加工方法最大可使 CFRP 钻削出口的毛刺因子降低 75%, 撕裂因子降低 8.9%, 分层因子降低 34.6%, 孔壁表面粗糙度 R_a 降低 53.6%。

关键词: CFRP; 加工缺陷; 背板支撑; 低温钻孔; 轴向力

中图分类号: TQ327.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2022)03-1044-11

A method of CFRP drilling assisted by ultrasonic, cryogenic temperature and ice support

LI Shujian^{*1}, CHEN Rong², LI Changping¹, LI Pengnan¹, NIU Qiulin¹, QIU Xinyi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

Abstract: A method of ultrasonic vibration + cryogenic liquid nitrogen + frozen support layer (UCF) is proposed to assist carbon fiber reinforced polymer (CFRP) drilling and effectively reduce machining defects. The basic principle of this method is as follows: the high frequency vibration of the drill bit under ultrasonic action is used to weaken the axial drilling force; the cryogenic temperature liquid nitrogen and the formation of frozen support layer are used to realize the constraint and support of the material at the drilling exit side, and effectively reduce the whole process of drilling heat effect. Based on the basic principle of UCF, corresponding experiment of UCF assisted drilling were carried out, and the hole quality of CFRP under traditional drilling mode (TD) and cryogenic liquid nitrogen + freezing support mode (CF) was compared and analyzed by means of microscopic inspection and characterization and defect factor calculation. The results show that both UCF and CF can increase the axial force, but the maximum axial force increased little. Compared with TD mode, UCF can reduce burr factor by 75%, tear factor by 8.9%, delamination factor by 34.6% and surface roughness R_a by 53.6%.

Keywords: CFRP; machining defects; back plate support; cryogenic drilling; axial force

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-04-16; 录用日期: 2021-05-04; 网络首发时间: 2021-05-14 10:10:07

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210514.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (51975208; 51775184; 52105442)

通信作者: 李树健, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为树脂基复合材料成型与切削加工技术 E-mail: smart0110@126.com

引用格式: 李树健, 陈蓉, 李常平, 等. 一种超声超低温冰层支撑辅助 CFRP 钻削方法 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(3): 1044-1054.

LI Shujian, CHEN Rong, LI Changping, et al. A method of CFRP drilling assisted by ultrasonic, cryogenic temperature and ice support[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(3): 1044-1054(in Chinese).

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)具有轻质、高强、耐腐蚀、抗疲劳等优异特性，在航空航天等对轻量化结构要求较高的工业领域得到了广泛应用^[1-4]。对 CFRP 进行钻削加工是确保 CFRP 构件连接和装配的必要工序。但 CFRP 具有非均质、各向异性结构特征，使其在加工过程中极易产生毛刺、撕裂、分层、热烧蚀等加工缺陷^[5-6]，对 CFRP 构件的高可靠性装配和长寿命安全服役产生巨大挑战。

CFRP 钻削缺陷主要存在于孔的入口、出口及孔壁区域^[7-8]，其中，入口缺陷主要以钻头外缘转角的剥离作用所形成的毛刺为主。而对于孔的出口及孔壁区域，一方面由于 CFRP 层间结合性能相对薄弱，一旦轴向钻削力高于其层间结合强度，极易诱发分层缺陷，对工件造成难以修复的损伤。另一方面，高速旋转的钻头会与 CFRP 中的高硬度碳纤维质点产生剧烈的摩擦，由于钻削是一种半封闭加工方式，以及 CFRP 是热的不良导体，随着钻削深度的增加，易在孔内产生热积聚现象。当钻削温度高于树脂的玻璃化转变温度时(一般为 180℃ 左右)，则会导致基体烧蚀并由此诱发纤维/树脂的界面性能弱化、钻头的热疲劳破损倾向增加，进一步影响工件的加工质量。此外，当钻头到达出口区域时轴向钻削力最大、热积聚最多，且由于材料的不断去除导致该区域材料因缺乏足够约束和支撑而发生刚度退化现象。在钻头的持续推挤下，出口区域产生分层缺陷的倾向更为明显，而纤维因缺乏足够约束会进一步促进出口毛刺和撕裂缺陷产生。

为解决 CFRP 的制孔缺陷问题，现有研究多集中于优化刀具结构^[9-12]、开发新型刀具涂层材料^[13-14]、优化加工工艺参数^[15-17]等方面。相关研究成果在一定程度上对加工缺陷起到了抑制作用，但优化刀具结构或开发新型涂层通常存在周期长、成本高的问题，而加工工艺参数优化虽可弱化加工缺陷的产生，但难以较大程度上消除。为此，近几年学者们发展了超声振动辅助 CFRP 钻削方法^[18-20]，该方法通过超声产生的高频振动来降低轴向钻削力，并进而抑制加工缺陷，但未能有效降低钻削过程的热积聚现象。而针对 CFRP 孔出口侧材料因缺乏足够约束而导致的刚度退化、缺陷频发等问题，学者们提出了在出口侧增加支撑垫板来提供出口侧材料约束和支撑的解决思路^[21-22]，对出口分层缺陷起到了很好的抑制作用，但毛刺

缺陷仍难以大范围消除。

近年来，低温及超低温辅助切削加工方法在相关文献中屡见报道，对解决切削过程的热影响问题提供了很好的借鉴模式。例如，Koklu 等^[23]研究了 CFRP 在超低温液氮冷却预处理后的制孔行为，结果表明该方法可有效降低刀具磨损和孔壁表面粗糙度。刘书暖等^[24]对比了常温、干冰冷却、液氮冷却三种条件下的 CFRP/钛合金叠层结构的制孔质量，结果表明低温条件能够改善出口的毛刺和热烧蚀现象。但上述研究均发现对 CFRP 进行低温预处理会引起轴向钻削力增加，不利于控制出口分层缺陷。Thirumalai 等^[25]在低温液氮喷淋条件下增加了旋转超声系统来控制低温条件引起的轴向钻削力增加现象，虽然有效控制了加工毛刺、获得了较低的孔壁表面粗糙度，但仍无法抑制轴向钻削力的增加，因而仍无法避免出口分层缺陷的形成。

为解决 CFRP 钻削制孔的缺陷问题，本文提出一种集成超声振动+超低温液氮+由超低温形成的冰冻支撑层来辅助 CFRP 钻削的超声振动+超低温液氮+由超低温环境形成的冰冻支撑层(UCF)辅助加工方法。该方法集成了超低温液氮在降低钻削温度方面的优势，考虑了 CFRP 工件底部形成的冰冻层对孔出口侧提供的约束支撑作用，并通过超声振动来削弱轴向钻削力的增加。通过开展理论分析，设计对比实验，结合微观表征和缺陷因子计算等手段，研究了 UCF 辅助加工方法的具体效果。相关研究对开发 CFRP 高品质制孔技术、节约刀具研发成本具有一定的工程参考价值。

1 UCF 辅助钻削 CFRP 的理论分析

UCF 辅助钻削 CFRP 方法的工艺特征主要包括以下几个方面：(1)将高频超声振动引入传统的 CFRP 钻削过程，利用超声振动削弱轴向钻削力的增长，减小切削刃对入口边缘的剥离作用，降低孔壁和出口分层的几率；(2)在加工过程持续进行超低温液氮喷淋，来尽量消除钻削热的影响；(3)在钻削出口铺设水浸薄纱，一方面通过超低温环境形成的具有一定刚度的冰冻支撑层，来实现对出口材料的约束和支撑，从而降低出口分层缺陷；另一方面由于冰冻层的存在，出口毛刺易被冻住而有利于其切除，从而进一步对出口撕裂缺陷的产生起到抑制作用。由此可见，在 UCF 辅助加工过程中，由超低温环境形成的冰冻支撑层对

CFRP 钻削出口质量的控制占据主导作用。而由超声振动、超低温液氮虽可分别对钻削力和钻削热起到一定抑制作用，但并不能完全消除轴向力过大、钻削热过高导致的加工缺陷问题，因而两者在 UCF 辅助加工方法中起辅助作用。UCF 辅助加工方法示意如图 1 所示。

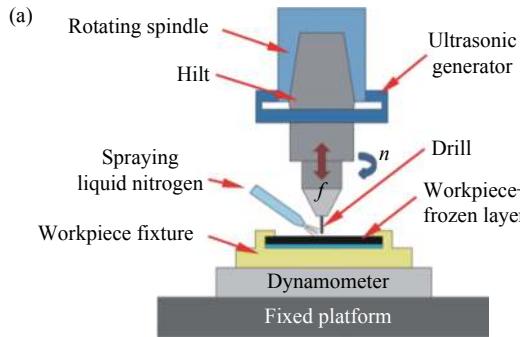


图 1 UCF 辅助 CFRP 制孔原理: (a) UCF 示意图; (b) 传统钻削出口; (c) 冰冻约束条件下的出口

Fig. 1 Principle of UCF assisted CFRP drilling: (a) UCF flow diagram; (b) Traditional drilling outlet; (c) Outlet under frozen constraint

假设不考虑超声振动的辅助作用，对冰层支撑条件下的 CFRP 钻削力与分层关系进行理论分析。CFRP 底部存在支撑时钻削出口分层示意如图 2 所示。其中: F_B 为冰层支撑条件下的轴向钻削力; F_R 为冰层向上的反作用力; a 为分层区域半径; c 为钻削孔的半径; b 为孔周围环向支撑力的作用半径; x 为轴向位移; H 为 CFRP 厚度; h 为裂纹深度。当出口分层即将发生时，满足能量平衡方程:

$$dU_d = dW - dU \quad (1)$$

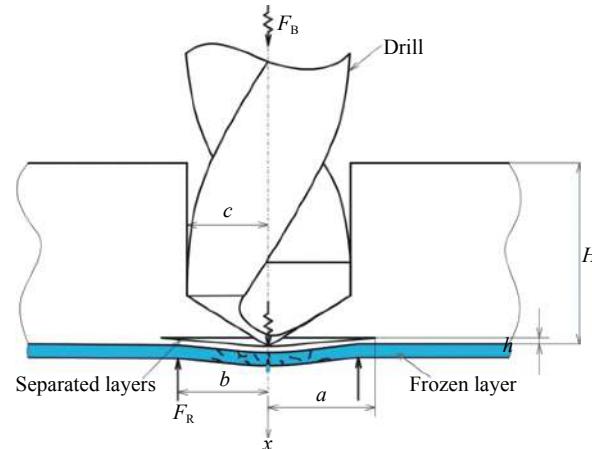
其中: dU 为无穷小应变能; dW 为 F_B 在轴向位移 dx 上做的无穷小功; dU_d 为分层即将开始时层间裂纹扩展而吸收的无穷小应变能。满足:

$$dW = F_B \cdot dx \quad (2)$$

$$dU_d = G_{IC} \cdot dA = 2\pi G_{IC} ada \quad (3)$$

其中: dA 是分层区域的变化量; G_{IC} 为 I 型断裂模式的临界应变能释放率。

对于边缘固定的 CFRP 钻削出口所对应的圆形区域，在 F_B 和 F_R 作用下，出口分层区域材料变形挠度可通过孔内侧和外侧部分分别表示^[26]:



F_R —Reaction force of frozen layer; F_B —Axial drilling force; a —Radius of layered area; b —Radius of action of circumferential support force; c —Radius of hole; H —Thickness of CFRP laminate; h —Crack depth

图 2 存在支撑时的钻削出口分层示意图

Fig. 2 Delamination diagram of drilling outlet with backup

(i) $0 \leq r \leq c$ (内侧部分)

$$w_1(r) = \frac{F_B}{16\pi M} \left[2r^2 \ln \frac{r}{a} + (a^2 - r^2) \right] - \frac{F_R}{8\pi M} \left[(r^2 + c^2) \ln \frac{a}{c} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{c^2}{a^2} \right) (a^2 + r^2) \right] \quad (4)$$

(ii) $c \leq r \leq a$ (外侧部分)

$$w_2(r) = \frac{F_B}{16\pi M} \left[2r^2 \ln \frac{r}{a} + (a^2 - r^2) \right] - \frac{F_R}{8\pi M} \left[(r^2 + c^2) \ln \frac{r}{a} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{c^2}{a^2} \right) (a^2 - r^2) \right] \quad (5)$$

其中: CFRP 层合板的抗弯刚度 M 可由式 (6) 计算得出; 式中 E 为 CFRP 的等效杨氏模量; ν 为泊松比。

$$M = Eh^3 / 12(1 - \nu^2) \quad (6)$$

当钻头钻出时，在冰层的约束支撑下使出口边缘分层现象得以抑制，即满足边界条件:

$$w(b) = w(c) = 0 \quad (7)$$

可得

$$F_R = F_B \cdot \frac{\left[c^2 \ln \frac{c}{a} + \left(\frac{c^2 - a^2}{2} \right) \right]}{\left[2c^2 \ln \frac{c}{a} + \left(\frac{a^4 - c^4}{2a^2} \right) \right]} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (4) 和 (5)，可以得出储存的总应变能和外力所做的功为:

$$U = \pi \left\{ \int_0^c \left[M \left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_1}{\partial r} \right)^2 \right] r dr + \int_c^a \left[M \left(\frac{\partial^2 w_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_2}{\partial r} \right)^2 \right] r dr \right\} \quad (9)$$

$$dU = \frac{\partial U}{\partial a} da \quad (10)$$

$$W = F_B w(0) =$$

$$F_B \cdot \left[\frac{F_B a^2}{16\pi M} - \frac{F_R}{8\pi M} \left(c^2 \ln \frac{c}{a} + \frac{a^2 - c^2}{2} \right) \right] \quad (11)$$

$$dW = \left(\frac{F_B^2 a}{8\pi M} - \frac{F_R F_B}{8\pi M} \frac{a^2 - c^2}{a} \right) da \quad (12)$$

将式(3)、(10)、(12)一起代入能量平衡方程式(1)，可得轴向钻削力 F_B 与分层区域半径 a 的函数关系如式(13)所示。

$$F_B = \pi \sqrt{32G_{IC}M} \cdot \sqrt{\frac{f(a)}{g(a)}} \quad (13)$$

其中 $f(a)$ 和 $g(a)$ 的表达式可分别由式(14)和式(15)表示。

$$f(a) = \left(a^4 - c^4 - 8c^2 a^2 \ln \frac{c}{a} \right) \cdot \left[128c^4 a^4 \ln(ca) - 128c^4 a^4 \ln c \ln a + 16c^2 a^6 \ln \frac{c}{a} + 16c^6 a^2 \ln \frac{a}{c} + a^8 + c^8 - 2c^4 a^4 \right] \quad (14)$$

$$g(a) = 3(a^{12} - c^{12}) + 72c^2 a^{10} \ln \frac{c}{a} + 192c^8 a^4 \ln c \ln a + 3072c^6 a^6 \ln \frac{a^2 + c}{c^2 + a} + 768c^8 a^4 \ln \frac{a^2 + c}{c^2 + a} - 288c^4 a^8 \ln c \ln a - 704c^6 a^6 \ln c + 192c^{10} a^2 \ln c \ln a + 73c^4 a^4 (a^4 - c^4) + 32c^2 a^2 (a^8 - c^8) + 64c^4 a^8 \ln \frac{c}{a} + 56c^{10} a^2 \ln \frac{c}{a} + 704c^6 a^6 \ln ca - 192c^{10} a^2 \ln ca + 288c^4 a^8 \ln ca + 3216c^6 a^6 \ln \frac{c}{a} - 1536c^8 a^4 \ln a + 768c^8 a^4 \ln c \ln a + 32c^{12} (\ln c \ln a - \ln ca) \quad (15)$$

UCF 辅助钻削的过程是一个振动冲击与传统钻削共同作用的复合过程。因此，当考虑超声振动和 CFRP 底部的冰层支撑作用时，轴向钻削力可近似表示为^[27]：

$$F_B^U \approx t_c f F_B + \frac{2}{\pi} F_B \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(nt_c \pi f) \cos(2n\pi f t) \quad (16)$$

其中：一个振动周期 T 内的纯切削时间为 t_c ；切削周期 $T = 1/f$ ；振动频率 $f = w/2\pi$ ； w 为主轴转速方向的瞬时角速度。

将式(13)代入式(16)，可得采用 UCF 辅助制孔时产生的轴向钻削力 F_B^U 为：

$$F_B^U \approx \left[t_c f + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(nt_c \pi f) \cos(2n\pi f t) \right] \cdot \pi \sqrt{32G_{IC}M} \cdot \sqrt{\frac{f(a)}{g(a)}} \quad (17)$$

2 CFRP 钻削实验设计

2.1 实验材料及工装

实验采用的工件材料为单向 CFRP 层合板，单层厚度为 0.125 mm，铺层方式为 [0°]₄₀，层合板总体尺寸为 90 mm×90 mm×5 mm (长×宽×厚)，由韩国碳融合技术研究所提供。纤维型号为 T700，基体为热固性环氧树脂，材料性能参数见表 1。实验使用的钻头为硬质合金标准麻花钻，直径为 6 mm，钻尖角为 140°，由韩国 OSG 公司生产。在液氮喷淋实验环节，使用的液氮注入压力约为 32 kPa，贮藏温度为 -196°C。

表 1 CFRP 的性能参数

Table 1 Performance parameters of CFRP

| Parameter | Value |
|-------------------------------|-------|
| Tensile strength/MPa | 950 |
| Compressive strength/MPa | 570 |
| Young's modulus/GPa | 61.5 |
| Shear modulus/GPa | 3.7 |
| Poisson' ratio | 0.3 |
| Density/(kg·m ⁻³) | 155 |
| Hardness (HRB) | 70-75 |

在工件装夹过程中，为最大限度地保证工件完全被约束，消除因局部微振动造成的切削力测量误差，以及确保位于工件底部的混合冰冻层的平整度，本实验设计了专用夹具，如图 3 所示。该夹具侧边的三角形凹槽与图 4 中的金属挡杆进行配合，通过外挡板上螺钉的紧固作用实现金属挡杆对工件的面内约束。夹具底部设计为内部中空形式，通过其四周与工件厚度相当的凹槽进行

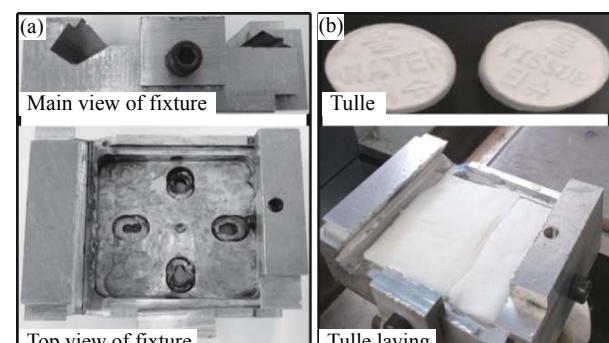


图 3 夹具工装及辅材：(a) 夹具；(b) 薄纱

Fig. 3 Fixture and accessories: (a) Fixture; (b) Tulle

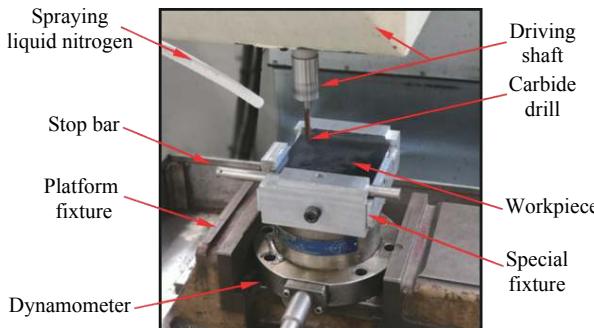


图 4 UCF 辅助钻削 CFRP 实验

Fig. 4 Experiment UCF assisted drilling of CFRP

工件安装和定位，并通过底部的纵向螺钉进行轴向约束。

为防止形成冰冻层所需的水发生泄漏而难以获得完整的冰冻层，本实验采用少量薄纱进行水预浸处理，来确保形成一定刚度的冰冻支撑层。在冰层形成过程中，一方面通过超低温液氮持续喷淋形成的超低温环境来实现水浸薄纱的迅速凝固；另一方面通过控制水浸薄纱的总厚度与夹具四周的凹陷面(图 3(a) 中夹具俯视图)刚刚平齐来确定含薄纱冰冻层的最终厚度。实验中均以获得的冰冻层厚度 2 mm 作为研究参考，主要由于此时形成的冰纱混合层既具备了一定的硬度和刚度，又不因厚度过大而影响实验精度。本研究中使用的水预浸薄纱铺放方式及原材料形式如图 3(b)。此外，超低温液氮通过专用铜管引出，并对准钻头与 CFRP 层合板接触入口的区域，进行全过程持续喷淋，以保证整个加工过程在低温环境下进行。此时，水浸薄纱中的液态水很难以液态形式渗透进工件材料，因此可忽略水浸入工件而导致的材料层间性能弱化问题。

2.2 实验设备与工艺

为研究 UCF 辅助钻削 CFRP 方法的实际效果，设置了传统钻削模式(TD)、液氮冰冻辅助钻削模式(CF)与 UCF 辅助钻削模式的对比实验，如表 2 所示。相关加工工艺参数均设定为主轴转速 1 500 r/min，进给量 0.1 mm/rev。在实验过程中，采用工业吸尘器对切屑进行回收处理。

本实验采用的制孔设备为超声辅助钻削机床，具体型号为 DMC SS-600，超声振动频率为 30 kHz。钻削过程的切削力采用 Kistler 9256C2 测力仪进行采集，实验场景如图 4。采用超景深三维显微系统(KEYENCE, VHX-500FE)、扫描电子显微镜

表 2 CFRP 钻削模式设定

Table 2 Setting of CFRP drilling mode

| Mode | Auxiliary factor | | |
|------|---------------------------|---------------------|----------------------|
| | Cryogenic liquid nitrogen | Support by freezing | Ultrasonic vibration |
| TD | ✗ | ✗ | ✗ |
| CF | ✓ | ✓ | ✗ |
| UCF | ✓ | ✓ | ✓ |

Notes: TD—Traditional drilling; CF—Cryogenic liquid nitrogen + Freezing support; UCF—Ultrasonic vibration + Cryogenic liquid nitrogen + Frozen support layer.

(S4200, HITACHI) 以及三维表面形貌测量仪(NV-2000, NANO SYSTEM)对 CFRP 钻削入口、孔壁、出口进行形貌表征和粗糙度分析。

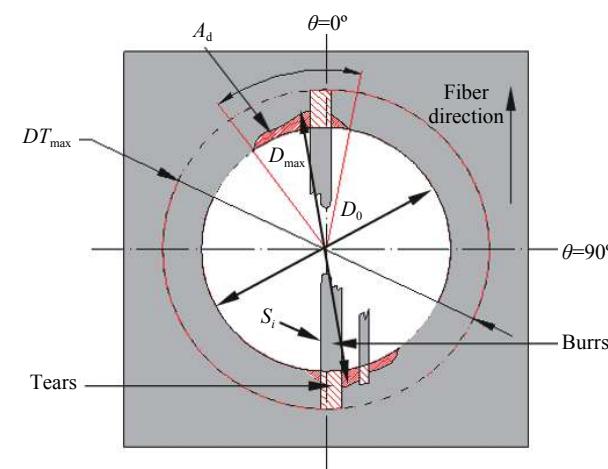
2.3 加工缺陷的评价方法

在 CFRP 钻削过程中易出现毛刺、撕裂、分层等加工缺陷，示意如图 5 所示。为评价不同钻削模式下的加工缺陷量化指标，分别对毛刺、撕裂、分层等加工缺陷进行缺陷因子定义和计算。毛刺缺陷因子 F_{burr} 、撕裂缺陷因子 F_t 、分层缺陷因子 F_{da} 的计算方法如式(18)~(20)所示^[28]。

$$F_{\text{burr}} = \frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{4\pi D_0^2} = \frac{\sum_1^n S_i}{4\pi D_0^2} \quad (18)$$

$$F_t = \frac{DT_{\max}}{D_0} \quad (19)$$

$$F_{\text{da}} = \alpha \frac{D_{\max}}{D_0} + \beta \frac{A_{\max}}{A_0} \quad (20)$$



A_d —Actual area of layered area; S_i —Area of burr; D_0 —Nominal diameter of hole; DT_{\max} —Maximum nominal diameter corresponding to tear position; D_{\max} —Maximum nominal diameter corresponding to layered area

图 5 CFRP 钻削缺陷示意图

Fig. 5 Schematic diagram of CFRP drilling defects

式中： S_i 为第*i*根毛刺的面积； D_0 为 CFRP 孔的名义直径； DT_{\max} 表示某撕裂位置对应的最大名义直径； D_{\max} 代表分层区域对应的最大名义直径； A_d 为分层区域的实际面积； A_{\max} 为由 D_{\max} 计算出的相应分层区域的最大面积； α 和 β 为相关系数，分别由式(21)和(22)计算求得：

$$\alpha = 1 - \beta \quad (21)$$

$$\beta = \frac{A_d}{A_{\max} - A_0} \quad (22)$$

3 实验结果与讨论

3.1 轴向钻削力分析

图 6 展示的是不同钻削模式下的轴向钻削力时变曲线。可以看出，超声辅助钻削模式与传统钻削模式下的轴向力时变曲线总体变化趋势一致，但随钻削方式不同，轴向力数值存在一定差异。相较 TD 模式，采用 CF 模式和 UCF 模式时，最大轴向力均有所增加。其中，CF 模式下最大轴向力增加了 53.2%，而采用 UCF 模式钻削时最大轴向力增加了 7.8%。

由此可见，与传统钻削模式(TD)相比，采用其他两种钻削模式均会导致轴向钻削力或多或少的增加。这是由于超低温条件会使材料的耐磨性、硬度和抗拉强度增加^[29]，从而导致刀具切削时需要克服的材料内能更高，因而需要更大的切削力才能完成材料的去除。另外值得关注的是，相较于 CF 模式，采用 UCF 模式所获得的最大轴向力增量要明显较低。在本研究中，同等条件下 UCF 模式较 CF 模式可使最大轴向力减少 45.4%。导致轴向钻削力降低的主要原因是：在 UCF 钻削模式下，由于超声振动的介入，使得钻头刃口与工件材料的接触表现为周期较短的断续切削接触，从而有效降低了轴向钻削力，相关文献研究结果^[30]也获得了同样的结论。

在 CFRP 实际钻削过程中，一般制孔数量都是成批开展的。因此，为对比批量制孔后不同钻削模式的加工效果，本文以连续钻削 50 个孔为研究参考，不同钻削模式下的最大轴向力如图 7 所示。结果表明，随制孔数量增加，不同钻削模式下的最大轴向力均呈现一定的增加趋势。其中，TD 模式与 UCF 模式下的最大轴向力增量相对较小，而 CF 模式下的最大轴向力增量则相对较大。以 TD 模式下钻第一个孔的最大轴向力为参考基准，当连续完成 50 个孔的钻削后，TD 模式下引

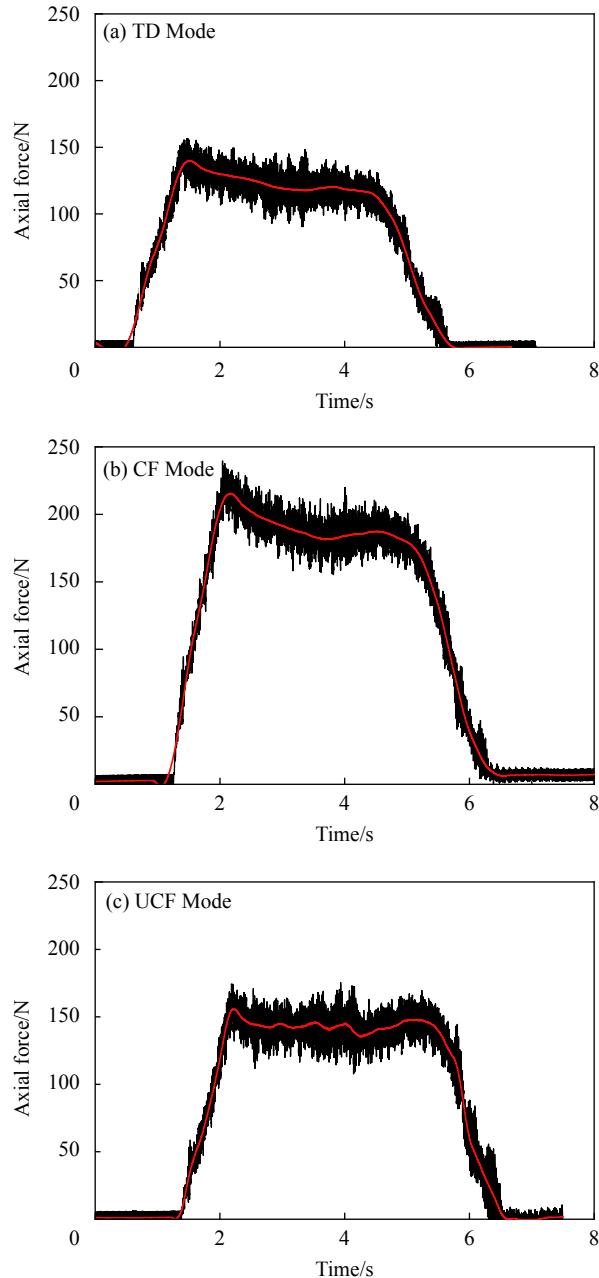


图 6 CFRP 不同钻削模式下的轴向力时变曲线

Fig. 6 Time varying curve of axial force for CFRP under different drilling modes

起的最大轴向力增量为 4.3%，CF 模式下最大轴向力增量高达 90%，而 UCF 模式下最大轴向力增量为 37.9%。

这是由于，一方面，对于 CFRP 传统钻削加工，随制孔数量增加，在同等条件下引起轴向力变化的主要因素就是刀具磨损，而本研究采用的是较耐磨的硬质合金钻头，在制孔数量较少时刀具磨损程度相对较低。并且 CFRP 的传统加工一

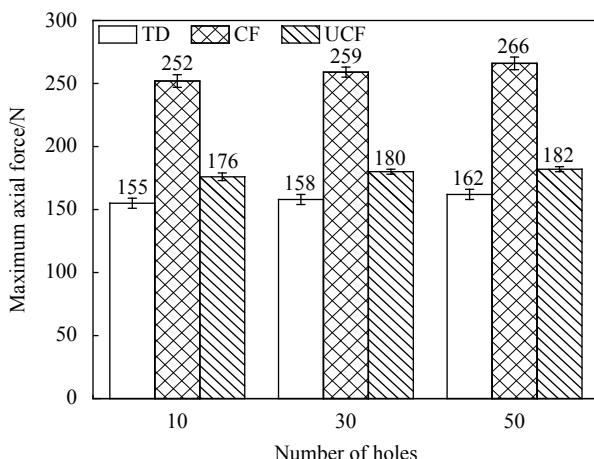


图 7 CFRP 不同钻削模式下最大轴向力与制孔数量的关系

Fig. 7 Relationship between maximum axial force and number of holes in different drilling modes for CFRP

般为干式加工，产生的切屑为弥散状粉末，如图 8(a)，在工业吸尘设备的持续吸附作用下能快速脱离加工环境，因而不会因刀具刃口快速磨损而引起较大的轴向力变化。另一方面，针对 CF 和 UCF 两种钻削模式，持续喷淋的低温液氮会有效抑制切削热产生，但持续喷淋的超低温液氮环境又会导致材料力学性能的增加，并引起轴向钻削力的提高。此外，加工过程产生的 CFRP 颗粒粉尘在低温液氮与室温空气中水汽的双重作用下易发生颗粒冻结，如图 8(b)，形成的块状大颗粒切屑难以快速排出，对轴向力的增加也起到了一定的促进作用。但根据图 7 中最大轴向力的实验结果，由于超声振动的介入，UCF 模式下的最大轴向力要比无超声振动介入时的 CF 模式低 52.1%，即对轴向力实际起到了一定的削弱作用。因此，采用 UCF 模式可确保获得低温、底部出口约束支撑的同时，对最大轴向力的剧增起到一定的抑制作用。

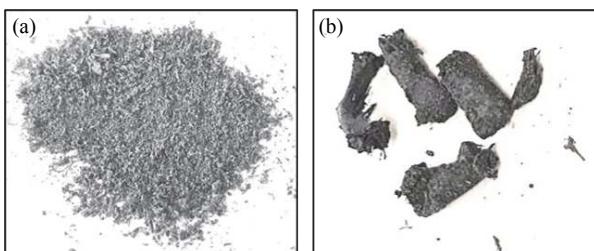


图 8 CFRP 切屑形态: (a) 粉状切屑; (b) 块状切屑
Fig. 8 Chip form of CFRP: (a) Powder chip; (b) Block chip

3.2 入口和出口钻削质量分析

图 9 展示的是不同钻削模式下的入口、出口

形貌特征。可以看出，三种制孔模式下的入口形貌特征基本相同，均呈现较好的质量状态，表明入口区域的钻削质量受制孔模式的影响较小。而对于出口区域，不同制孔模式下的钻削质量则存在明显的不同。

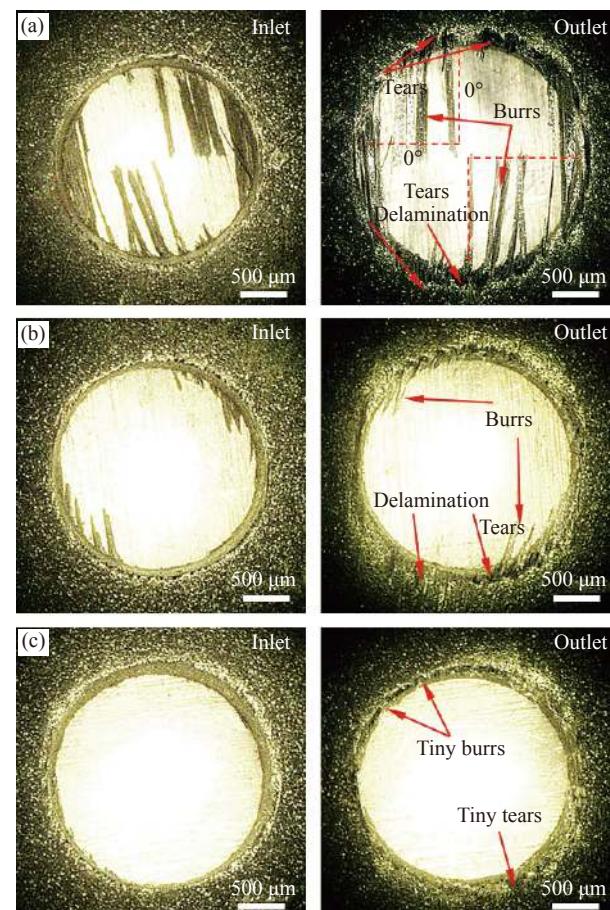


图 9 CFRP 不同钻削模式下的入口和出口形貌：

(a) TD 模式; (b) CF 模式; (c) UCF 模式

Fig. 9 Inlet and outlet morphologies of CFRP under different drilling modes: (a) TD mode; (b) CF mode; (c) UCF mode

在 TD 模式下 (图 9(a))，出口区域存在较多的毛刺缺陷，主要分布于纤维方向角 0°~90°的范围内。在此范围内纤维主要因刀具刃口的挤压作用而承受拉伸载荷，当刃口与出口侧最外层纤维开始接触时，由于最外侧纤维缺少足够约束而未被切断，进而形成毛刺。当钻头旋转一周时，两个切削刃分别经历一个 0°~90° 纤维方向角范围的切削，因而毛刺在出口区域呈对称分布。此外，随钻削深度增加，切削热积聚趋势明显增加，受热软化的树脂进一步弱化了其对纤维的约束和支持作用，加剧了出口毛刺的形成。并且受轴向钻削力影响，毛刺根部受到向外的拉压作用而产生撕

裂缺陷，并伴随一定的出口分层现象。

相较 TD 模式，采用 CF 模式可维持在低温环境下进行 CFRP 的钻削，并通过出口形成的冰冻层实现对近外层材料的约束，因此该模式下的切削热影响较小。并且由于冰冻层的约束作用，靠近出口的 CFRP 材料不再向外进行大位移退让，多数纤维受到冰冻层向孔内的支撑作用而在刃口的切削下实现断裂和切除，因而该模式下基本不存在较大毛刺。但由于超低温加工环境带来的材料强度、硬度提高，又直接导致了轴向钻削力的增加，使得钻头对 CFRP 出口层的载荷作用增加。因而，在出口区域小毛刺、边部撕裂甚至分层缺陷仍有发生，如图 9(b) 所示。

UCF 模式则集成了 CF 模式可减少切削热、增加出口约束支撑的优势，并在此基础上引入了超声振动对轴向钻削力削减的优势，尤其在弱化由低温环境导致的轴向钻削力增加，并由此诱发的出口分层问题方面优势明显。图 9(c) 为 UCF 模式下 CFRP 钻削出口的显微形貌，可以发现出口区域加工缺陷明显减少，尤其是对 CFRP 钻削质量影响最大的分层缺陷几乎难以观测到，仅存在微量毛刺和边部微撕裂缺陷。

图 10 给出了三种不同钻削模式下出口区域缺陷因子的检测和计算结果。由结果可知，相较于 TD 钻削模式，采用 UCF 钻削模式时最大可使毛刺因子降低 75%，撕裂因子降低 8.9%，分层因子降低 34.6%。可见，即使在未开发和使用 CFRP 专用钻削刀具的前提下，采用 UCF 钻削模式仍可实现对 CFRP 钻削出口缺陷的有效抑制。

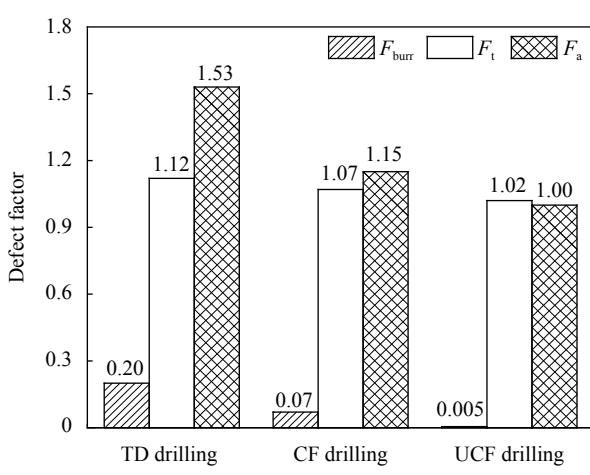


图 10 CFRP 不同钻削模式下的缺陷因子

Fig. 10 Defect factors of CFRP under different drilling modes

3.3 孔壁质量分析

采用超景深显微镜及 SEM 扫描电子显微镜对不同钻削模式下的 CFRP 孔壁形貌进行了局部表征，结果如图 11 所示。可以发现，在 TD 钻削模式下，孔壁表面钻削损伤后的树脂层与纤维层出现局部混合状态，在局部放大图中可明显发现由于切削温度过高而引起的纤维和树脂黏附现象，树脂层与纤维层间界面相对模糊，呈较宽的波纹状，如图 11(a)。而当采用 CF 钻削模式时，如图 11(b) 所示，树脂黏附和残留现象基本消失，树脂层与纤维层的界面相对清晰，总体呈较为均匀的波纹状特征。图 11(c) 为 UCF 钻削模式下获得的孔壁表面形貌，可以发现，整体孔壁加工表面相对光滑，树脂与纤维近乎呈均一态分布，从局部 SEM 扫描结果中基本难以观察到树脂和纤维的残留现象，孔壁表面质量明显较好。

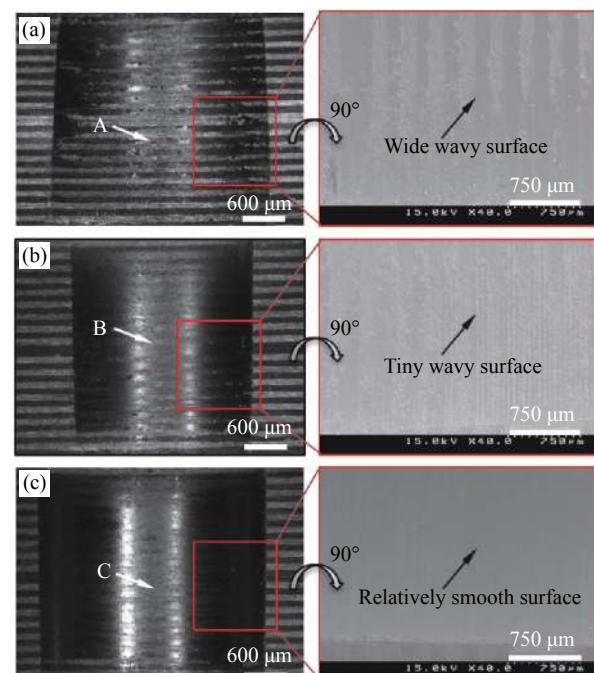


图 11 CFRP 不同钻削模式下的孔壁形貌：(a) TD 模式；
(b) CF 模式；(c) UCF 模式

Fig. 11 Morphology of hole wall of CFRP under different modes:
(a) TD mode; (b) CF mode; (c) UCF mode

为定量表征不同钻削模式下的孔壁表面质量，采用三维表面形貌测量系统对 CFRP 钻削孔壁进行了检测分析，结果如图 12 所示。TD 钻削模式下孔壁表面纤维断裂形成的凹坑非常明显，所选代表性微区域表面的粗糙度 R_a 值为 $2.22 \mu\text{m}$ 。当采用 CF 钻削模式时 R_a 值测量结果为 $1.97 \mu\text{m}$ ，纤

维断裂残留的凹坑明显减小。而采用 UCF 钻削模式时，孔壁表面难以观测到清晰的纤维层和树脂层，这与 SEM 显微扫描结果一致，此时的表面粗糙度 R_a 值仅为 $1.03 \mu\text{m}$ 。相对于 TD 模式和 CF 模式，所选代表性微区域表面的粗糙度 R_a 值分别降低了 53.6% 和 47.7%。

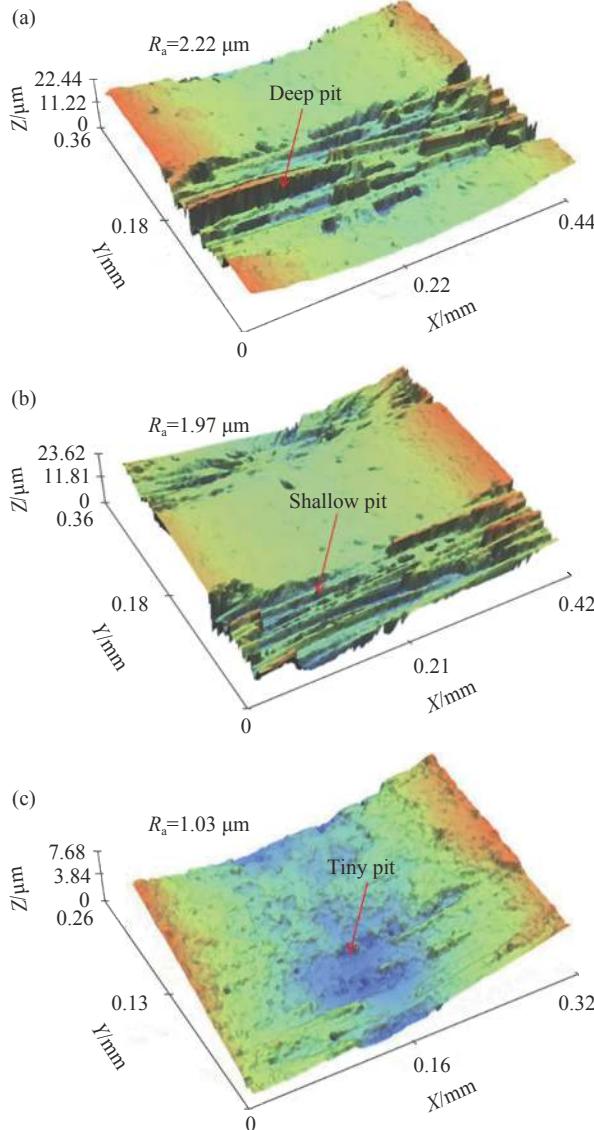


图 12 CFRP 不同钻削模式的孔壁表面粗糙度：

(a) TD 模式; (b) CF 模式; (c) UCF 模式

Fig. 12 Surface roughness of hole wall of CFRP with different modes:

(a) TD mode; (b) CF mode; (c) UCF mode

下面从不同钻削模式下 CFRP 材料断裂、损伤的微观尺度来对孔壁表面的形成进行分析和探讨。由于本研究中 CFRP 层合板的材料铺层为单向铺层，因此针对三种钻削模式，任意选取保持在同一孔壁母线上的 A、B、C 三个位置（图 11）进

行分析，CFRP 切削形成的微观断口形貌如图 13 所示。

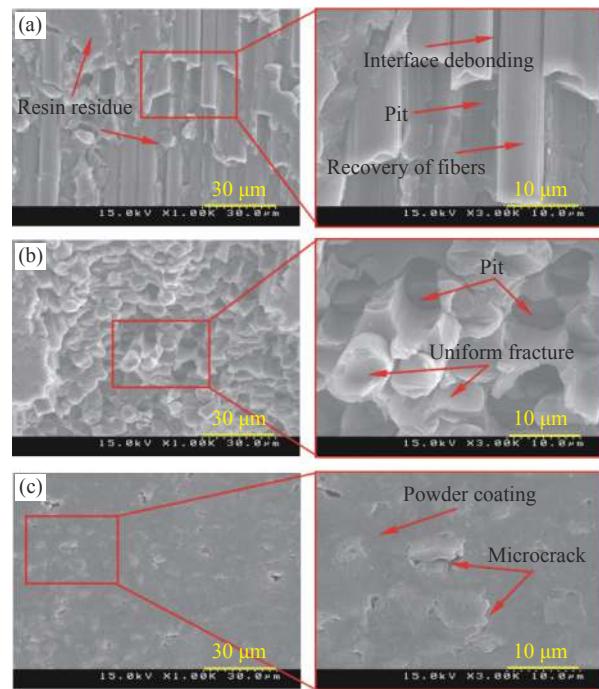


图 13 CFRP 不同钻削模式的孔壁损伤形貌：

(a) TD 模式; (b) CF 模式; (c) UCF 模式

Fig. 13 Damage morphology of hole wall of CFRP with different modes:

(a) TD mode; (b) CF mode; (c) UCF mode

在 TD 模式下，普遍存在未切断纤维的回弹、纤维不规则断裂形成的深度凹坑，以及加工表面的树脂残留等现象，如图 13(a)。而在 CF 钻削模式下，因超低温液氮的持续喷淋作用使得切削热影响得到抑制，产生的粉末切屑在低温状态下会形成一定的固结，并作为被切削材料的局部约束而参与切削过程。在此条件下，孔壁材料的整体刚度和硬度增加，因而可实现纤维较整齐的切断，如图 13(b)。在 UCF 钻削模式下，CFRP 孔壁加工表面难以观测到纤维断口，取而代之的是大面积的粉末状碎屑涂覆在已加工表面，局部区域由于涂覆不彻底而形成零星微孔洞和微裂纹，如图 13(c)。这是由于，虽然 CFRP 材料在超低温液氮条件下会导致材料力学性能提高，并进一步使轴向钻削力增加。但超声振动的实时介入使作用在材料上的挤压力呈非连续作用状态，从而在保证纤维被切断的同时，刀具刃口对待切削材料以及已加工表面的亚表面挤压作用，并不会持续延伸和扩展，因而在低温环境下纤维的断裂仍然保持整齐断裂状态。此外，由于刀具进行的是高频往复运动，产生的冷态切屑与刀具进行剧烈研磨而成的粉末

状碎屑嵌入或涂覆在已加工表面, 从而降低了孔壁加工表面的粗糙度, 并对加工表面及亚表面的损伤起到一定的抑制作用。

4 结论

(1) 提出一种集成超声振动+超低温液氮+由超低温环境形成的冰冻支撑层(UCF)来辅助碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)制孔的UCF辅助钻削加工方法。结果表明, 该方法可有效抑制CFRP制孔缺陷, 提高制孔质量。

(2) 采用UCF辅助加工方法, 可有效降低加工过程的钻削热, 但会使材料力学性能提高而引起轴向钻削力增加。超声振动的介入对轴向钻削力的增加会起到一定的抑制作用, 但不能完全抵消因材料力学性能提高带来的轴向钻削力增长。

(3) 相较CFRP的传统钻削模式, 采用UCF钻削模式, 最大可使出口毛刺因子降低75%, 撕裂因子降低8.9%, 分层因子降低34.6%, 孔壁表面粗糙度 R_a 值降低53.6%。研究结果对开发CFRP高品质制孔技术具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 石经纬, 赵娟, 刘传军, 等. 复合材料翼面壁板剪切稳定性[J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1590-1600.
SHI Jingwei, ZHAO Juan, LIU Chuanjun, et al. Stability of composite stiffened panels in plane shear[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(7): 1590-1600(in Chinese).
- [2] 孟庆勋, 姜寿山, 刘书暖, 等. CFRP层合板制孔周期内轴向力分布规律研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 110-120.
MENG Qingxun, JIANG Shoushan, LIU Shunuan, et al. Study of thrust force distribution in a drilling cycle during drilling of CFRP laminates[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(11): 110-120(in Chinese).
- [3] 李树健, 湛利华, 白海明, 等. 基于树脂流动的变截面复合材料结构固化过程热-流-固多场强耦合数值仿真[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 119-126.
LI Shujian, ZHAN Lihua, BAI Haiming, et al. Numerical simulation of heat-flow-solid multi-field strong coupling in curing process of variable cross-section composite structures based on the resin flow[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(8): 119-126(in Chinese).
- [4] QIU X Y, LI P N, LI C P, et al. Study on chisel edge drilling behavior and step drill structure on delamination in drilling CFRP[J]. *Composite Structures*, 2018, 203: 404-413.
- [5] 贾振元, 毕广健, 王福吉, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料切削机理研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 213-222.
JIA Zhenyuan, BI Guangjian, WANG Fuji, et al. The research of machining mechanism of carbon fiber reinforced plastic[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(23): 213-222(in Chinese).
- [6] XU W X, ZHANG L C. Heat effect on the material removal in the machining of fibre-reinforced polymer composites[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, 140: 1-11.
- [7] DONG G J, LANG C Y, LI C, et al. Formation mechanism and modelling of exit edge-chipping during ultrasonic vibration grinding of deep-small holes of microcrystalline-mica ceramics[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(8): 12458-12469.
- [8] GAUGEL S, SRIPATHY P, HAEGER A, et al. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)[J]. *Composite Structures*, 2016, 155: 173-183.
- [9] YU Z, LI C P, QIU X Y, et al. Study on damage in carbon fiber reinforced plastic drilling using step cutting mechanism drill[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 826: 154058.
- [10] JIA Z Y, FU R, NIU B, et al. Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 110: 55-65.
- [11] XU J Y, LI C, MI S P, et al. Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 1076-1087.
- [12] SU F, ZHENG L, SUN F J, et al. Novel drill bit based on the step control scheme for reducing the CFRP delamination[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 262: 157-167.
- [13] WANG X C, SHEN X T, ZENG C, et al. Combined influences of tool shape and as-deposited diamond film on cutting performance of drills for CFRP machining[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 347: 390-397.
- [14] DOLUK E, RUDAWSKA A, JÓZEF K, et al. Milling of an Al/CFRP sandwich construction with non-coated and TiAlN-coated tools[J]. *Materials*, 2020, 13(17): 3763.
- [15] SHUNMUGESH K, PANNEERSELVAM K P. Investigation and optimization of machining parameters in drilling of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites[J]. *Pigment and Resin Technology*, 2017, 46(1): 21-30.
- [16] SU Y L. Effect of the cutting speed on the cutting mechanism in machining CFRP[J]. *Composite Structures*, 2019, 220: 662-676.
- [17] SORRENTINO L, ESPOSITO L, BELLINI C. A new methodology to evaluate the influence of curing overheating on

- the mechanical properties of thick FRP laminates [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 109: 187-196.
- [18] NING F, CONG W, PEI Z, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: A comparison with grinding [J]. *Ultrasonics*, 2016, 66: 125-132.
- [19] DONG G J, ZHANG L M. Investigation on grinding force and machining quality during rotary ultrasonic grinding deep-small hole of fluorophlogopite ceramics[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(5/8): 2815-2825.
- [20] GENG D X, LU Z H, YAO G, et al. Cutting temperature and resulting influence on machining performance in rotary ultrasonic elliptical machining of thick CFRP [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 123: 160-170.
- [21] FEITO N, DÍAZ-ÁLVAREZ J, LÓPEZ-PUENTE J, et al. Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs [J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 1147-1155.
- [22] LIU L P, QI C L, WU F, et al. The effect of support on multi-hole drilling for glass fiber-reinforced plastic composite materials [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93: 953-965.
- [23] KOKLU U, MORKAVUK S. Cryogenic drilling of carbon fiber reinforced composite (CFRP) [J]. *Surface Review and Letters*, 2019, 26(1): 1950060.
- [24] 刘书暖, 夏文强, 王宁, 等. CFRP/钛合金叠层构件低温钻削的轴向力与成孔质量研究 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(13): 82-86.
- [25] LIU Shunuan, XIA Wenqiang, WANG Ning, et al. Research on thrust force and hole lability of drilling CFRP/Ti stacks in low temperature [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(13): 82-86(in Chinese).
- [26] THIRUMALAI K S, KO T J, LI C, et al. Rotary ultrasonic machining of woven CFRP composite in a cryogenic environment [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 698: 984-993.
- [27] KARIMI N Z, HEIDARY H, KIANFAR P, et al. The effect of support plate on drilling-induced delamination [J]. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 2016, 3: 19-24.
- [28] 郑建新, 刘传绍, 赵波. 振动钻削中轴向平均切削力的理论研究 [J]. 工具技术, 2009, (6): 48-50.
- ZHENG Jianxin, LIU Chuanshao, ZHAO Bo. Theoretical study on average axial cutting force in vibration drilling [J]. *Tool Technology*, 2009, (6): 48-50(in Chinese).
- [29] DAVIM J, RUBIO J, ABRAO A. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates [J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67: 1939-1945.
- [30] FUJUN X, FAN W, ZHANG Y, et al. Modification of tensile, wear and interfacial properties of kevlar fibers under cryogenic treatment [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 116: 398-405.
- [31] ISHIDA T, NOMA K, KAKINUMA Y, et al. Helical milling of carbon fiber reinforced plastics using ultrasonic vibration and liquid nitrogen [J]. *Procedia Cirp*, 2014, 24: 13-18.