

# 液氮冷却对碳纤维复合材料钻削表面完整性的影响

张高峰, 袁雷, 孙昊

(湘潭大学, 湖南 湘潭 411105)

**摘要:** **目的** 研究液氮冷却与钻削工艺对碳纤维复合材料钻削质量的影响。**方法** 采用 YG10X 硬质合金钻头开展碳纤维平纹织物/环氧树脂层压复合材料 (T300) 的液氮低温钻削与常温干式钻削的对比试验研究。分析液氮低温作用下不同钻削参数时的声发射信号有效电压值 (Root-Mean-Square of Acoustic Emission Signals, AE-RMS), 并结合孔的加工质量与声发射信号进行有效的识别。**结果** 与常温干式钻削相比, 液氮低温钻削的 AE-RMS 在钻削阶段平均值增大, 且信号相对平稳, 在钻出阶段末尾处减小, 且无明显突变, 孔出口分层因子和出口毛刺减小。在  $v_f=30$  mm/min 时, 孔出口分层因子降低了 9.2%, 孔壁表面质量提高。**结论** 与常温干式钻削相比, 液氮低温钻削在钻削阶段中, AE-RMS 增大, 但其波动幅度减小, 孔出口毛刺、撕裂等缺陷减少。通过 SEM 观察, 液氮低温钻削下的纤维断口明显减少, 树脂涂覆表面整洁平滑, 横向纤维与树脂界面有较好的结合性, 没有大面积纤维树脂剥离, 孔壁表面质量提高。

**关键词:** 液氮冷却钻削; 碳纤维增强复合材料; 声发射信号; 表面完整性

**中图分类号:** TG115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0064-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.007

## Effects of Liquid Nitrogen Cooling on Drilling Surface Integrity of Carbon Fiber Reinforced Plastics

ZHANG Gao-feng, YUAN Lei, SUN Hao

(Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to discuss the effects of liquid nitrogen cooling and drilling parameters on the driving quality of carbon fiber composites. Liquid nitrogen cryogenic and room temperature dry drilling experiments were carried out for carbon fiber reinforced composites T300 with YG10X cemented carbide drill. Root-Mean-Square of Acoustic Emission Signals (AE-RMS) of different drilling parameters was analyzed, and the corresponding signals of the hole processing quality were identified effectively. Compared with dry drilling at room temperature, the average value of AE-RMS under liquid nitrogen cryogenic drilling increased clearly with less fluctuation in the drilling phase; meanwhile it decreased and had no obvious variation at the end of the drilling phase. Furthermore, the hole outlet delamination factor as well as burr decreased. When  $v_f=30$ mm/min, the hole outlet delamination factor was reduced by 9.2%, and the hole wall surface quality was improved. Compared with dry drilling at normal temperature, liquid nitrogen low temperature drilling has the following characteristics: AE-RMS increases during the drilling phase, but its fluctuation amplitude decreases. Defects such as burrs and tears at the hole

收稿日期: 2019-08-02; 修订日期: 2019-09-30

**Received:** 2019-08-02; **Revised:** 2019-09-30

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51775469, 91860133); 湖南省市联合基金重点项目(2017JJ4051)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51775469, 91860133) and the Key projects of Hunan Municipal Joint Fund (2017JJ4051)

**作者简介:** 张高峰(1971—), 男, 博士, 教授, 主要难加工材料加工理论与技术。邮箱: 378427846@qq.com。

**Biography:** ZHANG Gao-feng(1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: machining theory and technology of hard-to-machining material. E-mail: 378427846@qq.com.

exit are reduced. The SEM observation shows that the fracture of the fiber under low temperature drilling of liquid nitrogen is significantly reduced, the surface of the resin coating is neat and smooth, and the interface between the transverse fiber and the resin has less peeling and the surface quality of the hole wall is improved.

**KEY WORDS:** liquid nitrogen cooling drilling; carbon fiber reinforced plastics (CFRP); acoustic emission signals; surface integrity

碳纤维增强环氧树脂基复合材料（CFRP）因其良好的力学性能而广泛应用在航空航天、体育器材、汽车等众多领域<sup>[1]</sup>。钻削加工是 CFRP 的主要切削加工形式之一，然而由于 CFRP 的自身各向异性、高模高强等特点，且切削过程中的切削热也极易影响加工质量，进而影响 CFRP 的使用性能和安全性能<sup>[2-3]</sup>，亦成为制约其向高端装备应用的瓶颈。因此如何提升 CFRP 的钻削质量一直是工程界面临的难题。

目前，CFRP 的成形技术在国内取得了前所未有的突破，但对于优化 CFRP 加工工艺的方法研究仍然较少，更多的是从改进刀具结构、形貌及加工参数等方面重点研究<sup>[4-6]</sup>，因而忽略了对低温冷却加工方法的探索。低温冷却工艺不仅能够降低切削区、刀具和材料自身的温度<sup>[7]</sup>，还可以改善低温脆性金属材料的加工性能<sup>[8]</sup>，同时降低切削温度对加工材料的影响。如 Alborz Shokrani 等<sup>[9]</sup>采用液氮冷却方式对钛合金进行了铣削实验，结果表明，与常规冷却液冷却相比，钛合金加工表面粗糙度降低了 31%，表面质量明显提高。D. Biermann 等<sup>[10]</sup>采用液态 CO<sub>2</sub> 冷却方式对淬火、回火钢进行了钻削实验，发现在液态 CO<sub>2</sub> 作用下，孔出口毛刺高度以及孔壁表面粗糙度明显减小。针对低温切削在复合材料中的应用，国内部分学者也开始进行了相关研究。如张高峰等<sup>[11]</sup>开展了碳纤维复合材料低温冷风磨削试验研究，发现在冷风磨削下，其磨削力相比干式磨削要大一些，但其表面粗糙度得到了降低。王永青等<sup>[12]</sup>开展了芳纶纤维增强复合材料液氮铣削研究，发现在液氮冷却条件下，出口毛刺、撕裂等缺陷得到显著抑制，表面加工质量得到大幅提高。

温度变化对 CFRP 纤维与树脂性能的影响较大。

Harper 等<sup>[13]</sup>对 T700 增强复合材料进行了不同温度下的拉伸试验，发现随着温度的降低，材料的刚度逐渐增大，而其拉伸强度先增大后减小。Islam 等<sup>[14]</sup>对编织碳纤维/环氧树脂复合材料进行了低温拉伸试验，发现液氮冷却下，CFRP 的模量增大，拉伸强度由原来的 571 MPa 减小至 556 MPa。Kim 等<sup>[15]</sup>通过研究 CFRP 在-50、-100、-150 ℃ 温度下的低温力学性能，发现复合材料随着环境温度降低，刚度增加，抗拉强度降低。

综上所述，为克服 CFRP 钻削中的出口撕裂、毛刺、凹坑等缺陷，低温钻削是一种有效的方法。切削加工中低温冷却技术研究虽已有好几十年的历程，但大多数是应用在难加工金属材料上<sup>[16-19]</sup>，而对 CFRP 低温加工技术研究报道不多<sup>[20]</sup>。据此，文中以 T300 碳纤维/环氧树脂基复合材料为研究对象，结合复合材料的低温力学性能，采用硬质合金麻花钻在液氮低温与常温干式两种钻削方式下，揭示液氮低温冷却环境下对 CFRP 钻削性能的影响。从声发射信号、出口撕裂分层因子及出口毛刺、孔壁表面形貌进行对比分析，以为液氮低温加工方法在 CFRP 钻削加工领域的应用提供理论基础。

1 试验

1.1 材料与设备

所采用的 CFRP 为深圳市宏旺模具有限公司生产的 T300 碳纤维平纹织物/环氧树脂层压复合材料（100 mm×100 mm×5 mm），T300 每层的取向对应于 0°和 90°，编织结构如图 1 所示，力学性能见表 1。

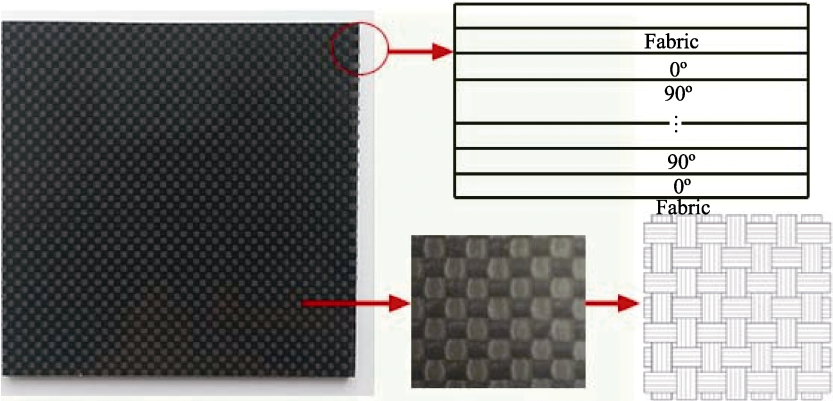


图 1 碳纤维平纹织物/环氧树脂层压复合材料  
Fig.1 Carbon fiber plain fabric/epoxy resin laminated composite

钻削试验在 MV350 数控铣床上进行, 该铣床主轴的最高转速为 5000 r/min, 定位精度为 0.004 mm, 钻削试验装备如图 2 所示。采用 YG10X 硬质合金麻花钻, 直径为 5 mm。采用 PCI-2 声发射检测仪 (包括声发射传感器、放大器、采集仪) 在线采集钻削过程中的

声发射信号, 采样频率为 1 MHz。采用 VHX-2000 型超景深显微镜和 JSM-6360 型扫描电子显微镜对钻削后工件的表面进行观测。液氮冷却系统主要包括液氮发生装置 (液氮罐) 和输送装置 (液氮泵、输送管), 静置温度达到  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 喷嘴出口温度约  $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 碳纤维复合材料及其力学性能

Tab.1 Carbon fiber composites and their mechanical properties

CFRP	Resin matrix	Longitudinal and traverse tensile strength	Tensile modulus	Longitudinal and traverse compression strength	Compressive strength	Density	Fiber diameter
T300 3K	AG-80 epoxy resin	3530 MPa	230 GPa	544 MPa	99.2 GPa	1.76 g/cm <sup>3</sup>	7 $\mu\text{m}$

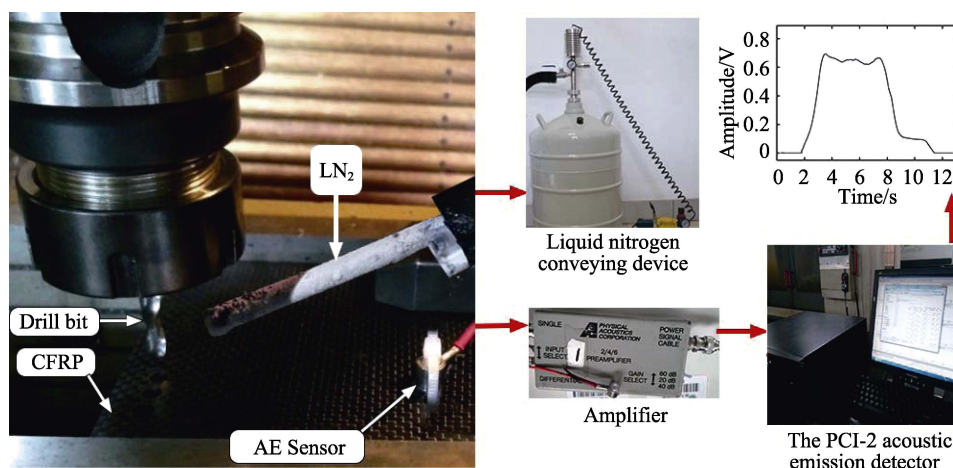


图 2 T300 钻削装备图

Fig.2 T300 drilling equipment drawing

## 1.2 方法

钻削试验之前, 先在碳纤维板的另一侧预钻 2 个孔, 在孔间以及传感器底部涂抹一层耦合剂 (凡士林), 然后用弹性带将声发射传感器牢牢固定在板上, 保证其充分耦合, 以降低外部环境的噪声干扰。钻削试验采用全因素试验法, 在相同参数下分别进行碳纤

维复合材料的干式钻削和液氮低温钻削对比实验, 每组工况下钻孔 2 个, 室内环境温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 试验参数见表 2。文中主要讨论液氮低温对钻削参数及声发射信号和孔质量的影响, 并以干式钻削作为对比, 以及重点分析主轴转速恒为  $n=1500\text{ r/min}$  时液氮低温对孔质量的影响。

表 2 钻削试验参数

Tab.2 Parameters of drilling test

Processing way	Cuting speed $n$	Feed rate $v_f$	LN2 nozzle inlet air pressure $p$	LN2 flow rate	LN2 nozzle outlet temperature
Dry, LN <sub>2</sub>	1500, 2000, 2500 r/min	15, 30, 45, 60 mm/min	0.01 MPa	0.5 L/min	$-(165 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$

在 CFRP 钻削过程中, 材料在刀具切削力的作用下, 使得树脂基体脱落、纤维断裂、分层损伤等, 这些都会产生声发射能量。通过声发射采集仪可以采集到滤波后的声发射信号和声发射信号的有效值电压 (AE-RMS), 其中一个滤波后的信号波形图数据点数为 1024 个, 对应一个 AE-RMS, 把钻削过程中每个 AE-RMS 连接起来, 得到如图 3 所示的光滑曲线。

可将图 3 中的钻削过程 AE-RMS 响应分为钻入、钻削及钻出三个阶段。在  $t_1-t_2$  钻入阶段, 钻头横刃开始接触 CFRP, 直至主切削刃完全切入。此阶段内,

AE-RMS 响应曲线开始上升, 声发射能量主要通过纤维断裂增多而增大。在  $t_2-t_3$  钻削阶段, AE-RMS 的波动幅度变化不大, 声发射能量主要随层间损伤程度而变化。在  $t_3-t_4$  钻出阶段, 横刃到达材料下部, 直至主切削刃完全钻出, 声发射能量随着纤维断裂减小而减小, 以及随着末端基体开裂程度不同而变化。从  $t_4$  时刻至退刀阶段, 声发射能量由钻头副切削刃与孔壁的摩擦产生, 信号较小。因此, 若能在声发射信号中提取  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  的信号值进行分析, 就能得出不同加工方式和加工参数在钻入、钻削、钻出阶段所对

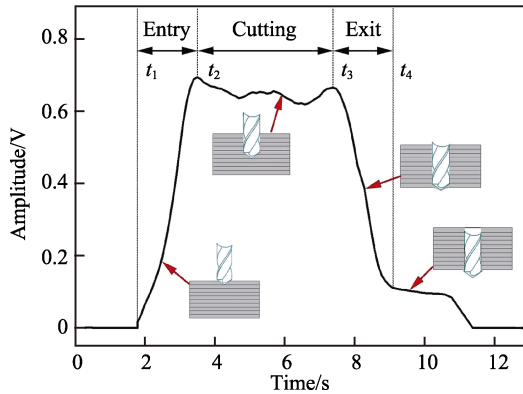


图 3 液氮低温作用下一个完整钻孔过程 AE-RMS  
( $n=1500$  r/min,  $v_f=60$  mm/min)

Fig.3 AE-RMS signal of a whole drilling process under liquid nitrogen cooling ( $n=1500$  r/min,  $v_f=60$  mm/min)

应的 AE-RMS 瞬时波形的变化规律。

如图 4 所示,当横刃到达 CFRP 最外层即将钻出层合板时,横刃会向碳纤维层施加推力,使其与其他纤维层分离。由于刀刃边缘具有负前角,且锋利度不足,因此在孔出口处的纤维无法快速被切除,而是在轴向作用力下向外变形,便会使得两个纤维层的界面

相互分离,裂纹便开始从纤维的纵向逐步扩张<sup>[21]</sup>。如图 5 所示,针对出口处的表面发生的撕裂和分层(层、相间开裂损伤)常引入通用的撕裂因子  $F_d$  这一概念来进行评估<sup>[22]</sup>。分层因子  $F_d$  的计算方法为:

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

式中:  $D_{\max}$  为孔在出口损伤破坏区域的最大直径;  $D$  为所钻孔的直径。

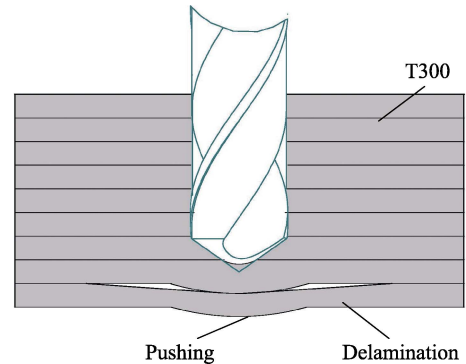


图 4 YG10X 钻出 T300 模型

Fig. 4 YG10X drills out the T300 model diagram

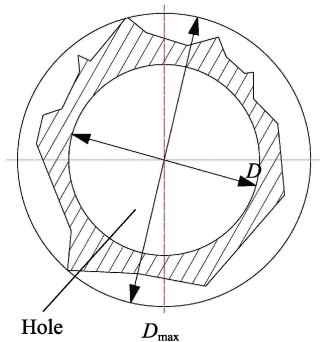


图 5 分层因子  $D_{\max}$  和  $D$

Fig. 5 Stratification factors  $D_{\max}$  and  $D$

## 2 结果及分析

### 2.1 声发射信号分析

液氮低温与常温干式两种钻削方式下,主轴转速、进给速度与钻削阶段 AE-RMS 平均值的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知,在钻削阶段中,当主轴转速一定时,进给速度增加,AE-RMS 平均值增加。这是因为进给速度提高,单位时间内材料去除率增大,纤维层断裂增多,钻削力随之增大,以及钻头与孔壁的摩擦也相应的增大,故 AE-RMS 平均值升高。当进给速度一定时,主轴转速增加,AE-RMS 平均值也增加。这是因为虽然主轴转速的增加,使得钻削力减小,AE-RMS 平均值本应减小,但是随着主轴转速的提高,单位时间内纤维层断裂增多,以及转速增大

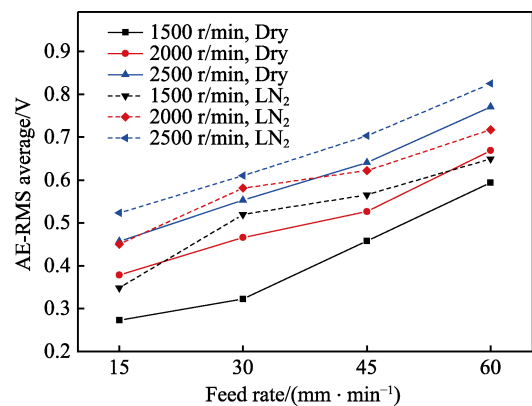
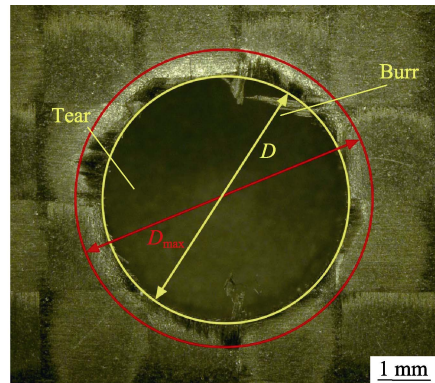


图 6 加工方式、主轴转速和进给速度与钻削阶段 AE-RMS 平均值的关系

Fig. 6 Relation between machining mode, spindle speed and feed speed and the average value of ae-rms in drilling stage



的同时使得钻头与已加工孔壁的摩擦也增大。此外,随着钻削速度的增加,钻头后刀面与孔表面产生挤压变形的速度增大,声发射能量增大。在同一钻削参数下的钻削阶段,与常温干式钻削相比,液氮低温钻削下的 AE-RMS 平均值增大。这是因为液氮低温下 CFRP 孔内各位置的模量都增大,即 CFRP 刚度增大,轴向力会有所增大,故使得 AE-RMS 平均值相比于干式钻削时要大。在常温干式钻削中,由于复合材料导热系数较低,碳纤维和树脂基体随着钻削过程中温度的升高,强度和模量降低,故在工件切削区域会形成局部软化。树脂软化被压缩,应力应变场迅速降低,同时刀刃与已加工表面材料的摩擦和切削变形对刀具作用力降低,因而释放的声发射能量减小,AE-RMS 平均值也减小。

在不同进给速度下,液氮低温钻削与常温干式钻削一个完整钻孔过程的 AE-RMS 如图 7 所示。将同一钻削参数下的 AE-RMS 整合到一起进行对比分析,其钻削时间  $t=t_4-t_1$  应该是相同的,且同一钻削参数下的钻孔时间误差均在 0.5 s 以内。从图 7a、b、c 中

可以看出,在相同钻削参数(包括主轴转速和进给速度)下,与常温干式钻削相比,在钻削阶段,虽然液氮低温作用下的 AE-RMS 要大一些,但其波动幅度要小得多。钻削阶段中,在常温干式钻削方式下,  $v_f=30$  mm/min 时的 AE-RMS 波动幅度最大(如图 7b 中 S 所示),约为 0.1 V;而进给速度  $v_f=15$  mm/min 时的声发射信号 RMS 波动幅度最小,为 0.06 V。在液氮低温钻削方式下,  $v_f=30$  mm/min 中的 AE-RMS 平稳性最优,其波动幅度为 0.03 V;  $v_f=15$  mm/min 中的 AE-RMS 波动幅度也在 0.06 V 之内。这是因为液氮冷却能够有效降低整体 CFRP 以及加工区域的温度,树脂粘在钻头切削刃上的现象大幅减少,使得钻刃的锋利度得到了保持。此外,液氮作用相当于是给整个钻削过程添加了一个冷润滑。同时由于树脂基体和碳纤维两者之间的热膨胀系数相差极大,故温度一旦发生变化,就会相互作用而产生压应力,使 CFRP 整体的内部结合力加强,界面的损坏程度将显著降低。因此在液氮冷却条件下,钻削加工表面质量较好,故平稳性较好。

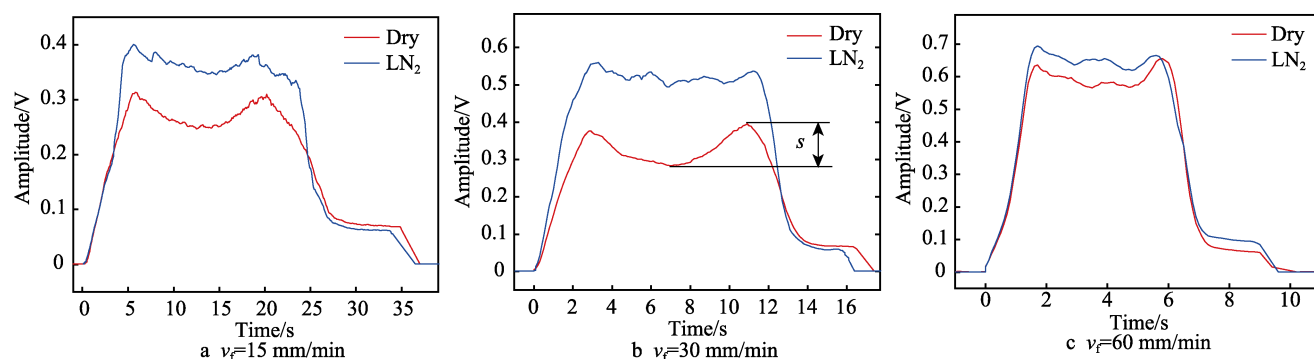


图 7 两种加工方式下完整钻削过程中的声发射信号 ( $n=1500$  r/min)

Fig. 7 Acoustic emission signals ( $n=1500$  r/min) during a whole drilling process under two processing modes

## 2.2 钻孔出口质量分析

液氮低温与常温干式两种钻削方式下,主轴转速  $n=1500$  r/min 时,孔出口形貌随进给速度变化对比如图 8 所示。进给速度对孔出口分层因子的影响曲线(图 8 中相对应的孔)如图 9 所示。由图 8 和图 9 可知,常温干式钻削下,转速一定时,随着进给速度的增大,出口处毛刺、撕裂具有增多的趋势;进给速度一定时,随着转速增大,出口毛刺、撕裂等缺陷减少。这是由于进给速度增大或者转速减小会增大进给方向的轴向力,同时随着温度的逐步升高,切断的纤维也极易粘结在刃口上,使得钻削力增大。此外,在较高温度下,纤维与树脂之间的层间及层内结合强度将会降低,两者综合作用使得出口端纤维在较大轴向力作用下向外退让,未被切断的纤维发生拉伸断裂就会形成毛刺损伤,轴向力越大,纤维与树脂间产生的开裂几率也将增大,故孔出口毛刺增多、撕裂增大。

由图 8 和图 9 还可知,液氮低温钻削下,孔出口

分层撕裂因子随着进给速度的增加呈现先减小后增大的趋势。在相同钻削参数下,与常温干式钻削相比,液氮低温冷却条件下碳纤维复合材料的毛刺、撕裂等缺陷明显减少,孔表面质量显著提高。这是因为液氮低温下树脂与纤维的结合力最大,开裂减小,剪切应力变大,纤维切断就会更加容易。其次,液氮作用下树脂基体刚度增大,刃口纤维的粘结现象减少,再一次验证低温下切削切断较为容易。最后,由于毛刺现象和开裂损伤是相辅相成的关系,当最外层纤维被顺利切断时,刀刃对纤维层的圆周拉扯现象就会减少,从而开裂损伤能够大幅度下降。若最外层纤维没有开裂损伤,CFRP 层间和层内的粘结力就会提升,从而切断纤维也更加容易。因此,最终出口的毛刺和撕裂损伤都得到抑制。

通过图 9 分析还可知,液氮低温钻削下,在  $v_f=30$  mm/min 时,孔的出口质量最好,与常温干式钻削相比,孔出口分层因子降低了 9.2%。说明液氮低温冷却在合适的进给速度下,毛刺、撕裂和分层缺陷

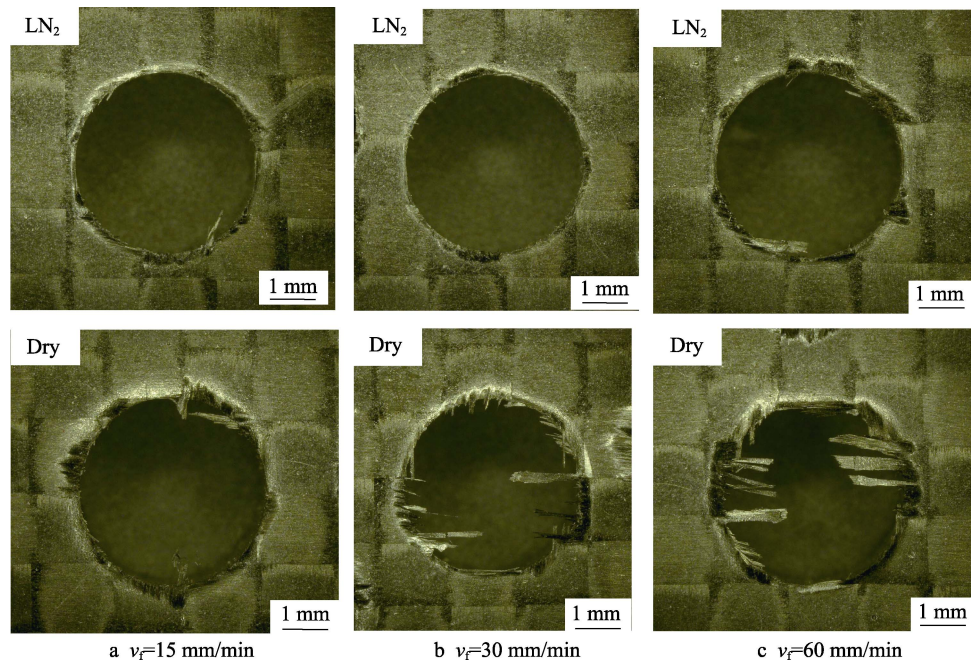


图 8 孔出口形貌对比图 ( $n=1500$  r/min,  $30\times$ )  
Fig. 8 Comparison of hole exit morphology ( $n=1500$  r/min,  $30\times$ )

能够得到更为有效的抑制。

在  $v_f=30$  mm/min 下, 两种钻削方式在钻出阶段末尾处 ( $t_4$  时刻) AE-RMS 所对应的波形如图 10 所示。分析孔出口质量与声发射钻出阶段信号之间的对应关系可以看到: 在液氮低温钻削 (见图 10a) 下, 声发射钻出阶段末尾处信号峰值为 0.128 V, 且信号相对平稳, 而常温干式钻削 (见图 10b) 中, 声发射信号峰值有明显的突变, 突变信号峰值为 0.319 V, 其值达到液氮低温作用下的 2.5 倍。通过观察图 8b 中孔出口形貌可知, 上述这一突变正是孔出口处产生的撕裂和毛刺引起的。可以看出, 液氮低温钻削中的孔出口无毛刺, 撕裂较小, 出口质量好, 分层因子为 1.08, 正好和末尾处信号无突变相对应。图 8b 常温干式钻削中, 孔出口有多处撕裂和大量毛刺, 分层因子达到了 1.19, 且对应的声发射信号末尾有明显的变化。这主要是由于孔出口出现损伤与撕裂毛刺而引起

的, 因此可以通过分析声发射信号对 CFRP 出口损伤进行检测与分析。

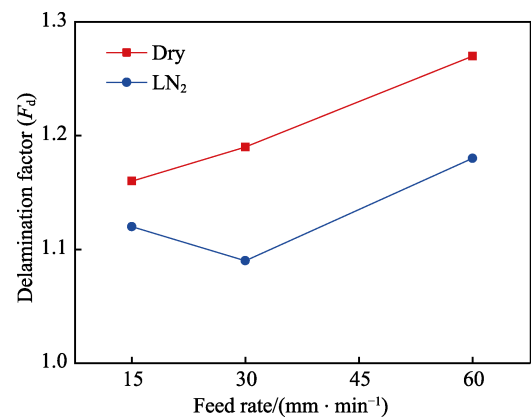


图 9 分层因子与进给速度的关系 ( $n=1500$  r/min)  
Fig. 9 Relationship between stratification factors and feeding speeds ( $n=1500$  r/min)

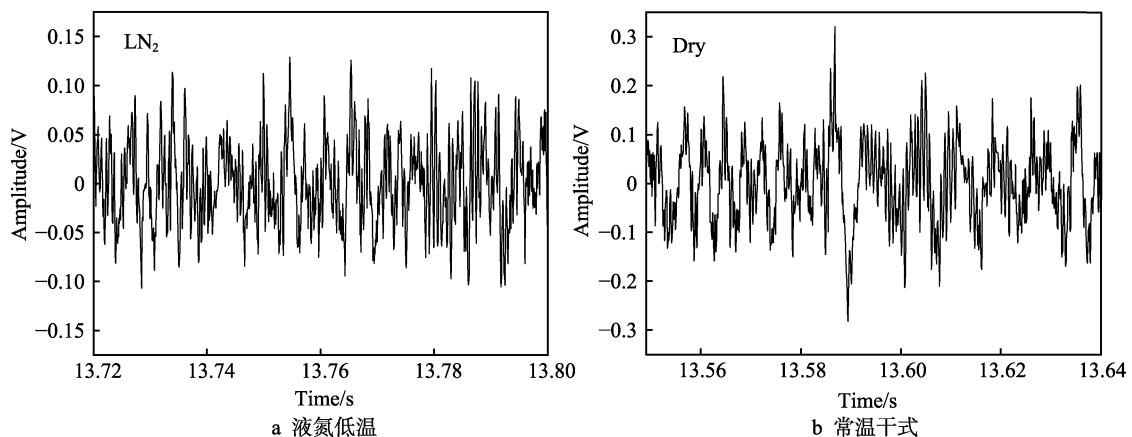


图 10 钻出阶段末尾处声发射信号 ( $n=1500$  r/min,  $v_f=30$  mm/min)  
Fig 10 Acoustic emission signals at the end of the drilling stage ( $n=1500$  r/min,  $v_f=30$  mm/min): a) LN<sub>2</sub>; b) dry



## 2.3 孔壁表面形貌分析

观察孔壁微观形貌前,将试样放入装有酒精溶液的超声波清洗仪中,进行清洁处理,吹干后对试样进行喷金处理,并选择钻削阶段部分区域作为观测区,以便对比分析。从图 11 可以看出,平纹交织层叠 CFRP 钻削的孔壁表面由纵向和横向纤维区两部分交替组成。其中纵向纤维区由树脂涂覆在纵向纤维断口表面而形成,又称之为树脂涂覆表面,它是由主切削刃切掉的树脂在副切削刃的挤压作用下而形成的。因此在纵向纤维区看不清碳纤维断口,只能看到涂覆在纤维断口表面的树脂。同样,横向纤维区由横向纤维

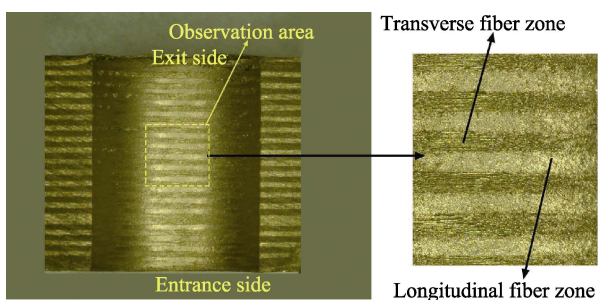


图 11 试样观测区  
Fig. 11 Sample observation area

束、纤维断口以及树脂基体材料结合组成。

在  $v_f=15$  mm/min 时,两种加工方式下孔壁的 SEM 形貌对比如图 12 所示。图 12a、b 为常温干式钻削下的孔壁形貌,可以看到,横向纤维区的两侧纤维都有断口。由图 12a 可知,在横向与树脂涂覆表面的交界处存在凹坑现象,即出现了层间损伤。在图 12b 中,可以看到,横向纤维束出现大面积的纤维与树脂基体剥离现象,两侧纤维断口增多。这是因为高温使得纤维与树脂界面粘结力弱化,基体破碎,大面积剥离。图 12c、d 为液氮冷却钻削下的孔壁形貌。由图 12c 可知,在树脂涂覆表面处没有看到纵向纤维的断口和明显的凹坑现象,即表面相对光洁均匀。在图 12d 中,在横向纤维区也有树脂涂覆形成的光滑表面。这是因为液氮低温钻削过程中仅存在瞬时高温,之后温度迅速降低,使软化的树脂在钻头副切削刃的挤压作用下,固化涂覆在孔壁上,因而能看到横向纤维束上的树脂涂覆。从图 12d 中还可以看到,纤维束和树脂基体间存在强结合键。这是因为低温下纤维的韧性降低,纤维与树脂结合力增加,切削时使此位置更深处纤维由于界面强结合力而产生剪切断裂,且低温下纤维与树脂的弯曲强度增大,层间及层内裂纹易向远处扩展,故而断口表面集中在两侧且横向纤维束较为平滑完整。

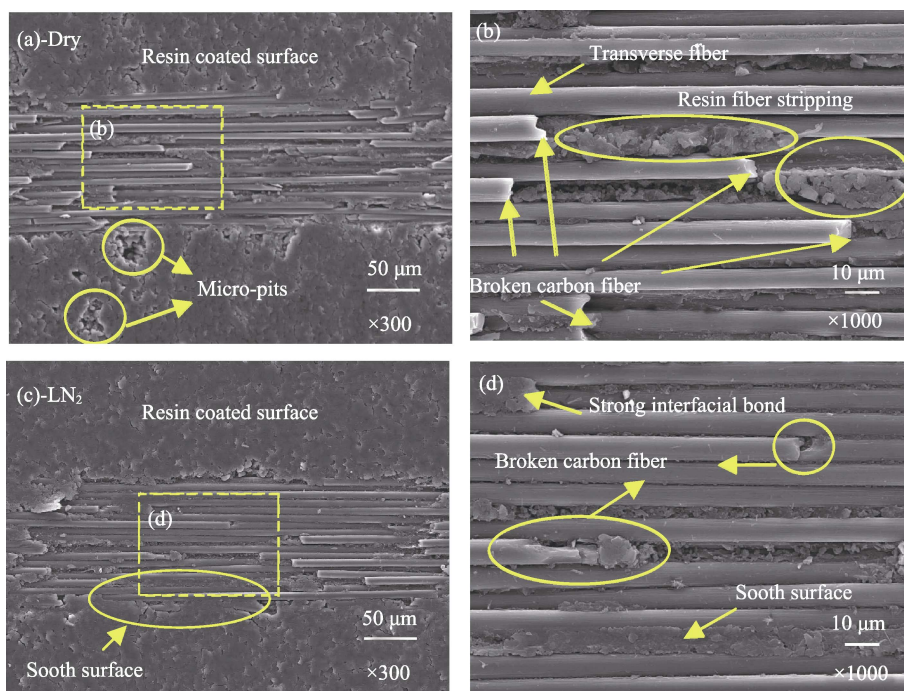


图 12  $v_f=15$  mm/min 时两种加工方式下孔壁的 SEM 形貌 ( $n=1500$  r/min)  
Fig. 12 SEM images of pore wall morphologies of the two machining methods at  $v_f=15$  mm/min ( $n=1500$  r/min)

## 3 结论

1) 与常温干式钻削相比,在相同钻削参数下,液氮低温钻削有以下特点:在钻削阶段中,AE-RMS

增大,但其波动幅度减小;孔出口毛刺、撕裂等缺陷减少。通过 SEM 观察可知,液氮低温钻削下的纤维断口明显减少,树脂涂覆表面整洁平滑,横向纤维与树脂界面有较强结合键,没有大面积纤维树脂剥离,孔壁表面质量提高。

2) 分析声发射信号随钻削参数的变化,可得到以下规律:在液氮低温与常温干式两种钻削方式下,钻削阶段中,当主轴转速一定时,随着进给速度的增加,AE-RMS 平均值也增加;当进给速度一定时,随着主轴转速的增加,AE-RMS 平均值也增加。

3) 分析主轴转速  $n=1500$  r/min 时不同进给速度下的孔出口质量,得到以下规律:在液氮低温钻削下,孔出口分层因子随着进给速度的增加而呈现先减小后增大的趋势。在  $v_f=30$  mm/min 时,孔的出口质量最好。与常温干式钻削相比,孔出口分层因子降低了 9.2%。在 T300-CFRP 钻削过程中,通过分析  $v_f=30$  mm/min 时孔的加工质量,得出声发射信号能够对出口撕裂以及孔壁质量进行有效的损伤识别。

#### 参考文献:

- [1] TETI R. machining of composite materials[J]. Annals-manufacturing technology, 2002, 51(2): 611-634.
- [2] LIU D, TANG Y, CONG W L. A review of mechanical drilling for composite laminates[J]. Composite structures, 2012, 94: 1265-1279.
- [3] KAVAD B V, PANDEY A B, TADAVI M V, et al. A review paper on effects of drilling on glass fiber reinforced plastic[J]. Procedia technology, 2014, 14: 457-464.
- [4] TSAO C C, CHIU Y C. Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills[J]. International journal of machine tool & manufacture, 2011, 51: 740-744.
- [5] GAITOND V N, KARNIK S R, CAMPOS J, et al. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. Journal of materials processing technology, 2008, 203: 431-438.
- [6] PARK K H, BEAL A, KIM D, et al. Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools[J]. Wear, 2011, 271: 2826-2835.
- [7] 白晓丹, 刘静. 低温加工技术及其发展现状分析[J]. 低温工程, 2005(1): 25-29.  
BAI Xiao-dan, LIU Jing. Cryo-fabrication technology and its present development state[J]. Cryogenics, 2005(1): 25-29.
- [8] MOKAVUK S, et al. Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study[J]. Composites part B: engineering, 2018, 147: 1-11.
- [9] SHOKRANI A, DHOKIA V, STEPHEN T. Newman. Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy [J]. Journal of manufacturing processes, 2016, 21: 172-179.
- [10] BIERMANN D, HARTMANN H. Reduction of burr formation in drilling using cryogenic process cooling[J]. Procedia CIRP, 2012, 3: 85-90.
- [11] 张高峰, 何杨, 鲁炎鑫, 等. 碳纤维增强复合材料低温冷风磨削试验研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(20): 2779-2784.  
ZHANG Gao-feng, HE Yang, LU Yan Xin, et al. Experimental study on cryogenic cold air grinding of carbon fiber reinforced plastics[J]. China mechanical engineering, 2016, 27(20): 2779-2784.
- [12] WANG F B, WANG Y Q, 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: 429-439.
- [13] HARPER L T, TURNER T A, WARRIOR N A, et al. Characterisation of random carbon fiber composites from a directed fiber preforming process: The effect of tow filamentisation[J]. Composites: Part A, 2007, 38: 755-770.
- [14] ISLAM M S, MELENDEZSOTO E, CASTELLANOS A G, et al. Investigation of woven composites as potential cryogenic tank materials[J]. Cryogenics, 2015, 72(1): 82-89.
- [15] KIM M G, KANG S G, KIM C G, et al. Tensile response of graphite/epoxy composites at low temperatures[J]. Composite structures, 2007, 79(1): 84-89.
- [16] RAVI S, KUMAR M P. Experimental investigations on cryogenic cooling by liquid nitrogen in the end milling of hardened steel[J]. Cryogenics, 2011, 51(9):509-515.
- [17] CHAANTHINI M K, MURUGAPPAN S, ARUL Sanjivi, et al. Study on hole quality in drilling AA 6063 Plate under cryogenic pre-cooling environment[J]. Materials today: Proceedings, 2017, 4: 7476-7483.
- [18] SREERAMA T V, SORNAKUMAR T, VENKATARAM-AREDDY M, et al. Machinability of 45C steel with deep cryogenic treated tungsten carbide cutting tool inserts[J]. Refractory metal & hard materials, 2009, 27(1): 181-185.
- [19] RAVI S, PRADEEP M K. Experimental investigations on cryogenic cooling by liquid nitrogen in the end milling of hardened steel[J]. Cryogenics, 2011, 51(9): 509-515.
- [20] 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: 605-616.
- [21] RAWAT S, ATTIA H. Wear mechanisms and tool life management of WC-codrills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites[J]. Wear, 2009, 267(5-8): 1022-1030.
- [22] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料钻削孔分层缺陷的研究[J]. 中国机械工程, 2003(22): 96-98.  
ZHANG Hou-jiang, CHEN Wu-yi, CHEN Ding-chang. Investigation on delamination defect of hole drilling of cfrp[J]. China mechanical engineering, 2003(22): 96-98.