

# 基于力信号的低频振动制孔刀具磨损状态分析

谢松峰,陈燕,晏超仁,郭南,陈逸佳,范文涛

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室,江苏 南京 210016)

**摘要:**为分析碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)/钛合金(TC4)叠层材料低频振动制孔工艺下刀具磨损状态,开展基于切削力信号的制孔刀具磨损状态研究。通过采集 CFRP/TC4 叠层材料低频振动制孔过程中的切削力信号,进行时域和频域分析,探讨各信号特征量与刀具磨损状态之间的联系。研究表明:CFRP/TC4 叠层材料低频振动制孔轴向力信号的均值、标准差、方均根和峰度系数都与刀具磨损状态关系密切。轴向力信号频率主要集中在 0 Hz、主轴旋转频率 33 Hz 及振动刀柄振动频率 38 Hz 处,且频率分布不会随着刀具的磨损而改变。

**关键词:**叠层材料;低频振动制孔;刀具磨损;切削力信号

中图分类号: TG713.1 文献标志码: A 文章编号: 1671-5276(2022)01-0011-04

## Tool Wear Condition Analysis Based on Cutting Force Signals of Low Frequency Vibration Assisted Drilling

XIE Songfeng, CHEN Yan, YAN Chaoren, GUO Nan, CHEN Yijia, FAN Wentao

(Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To analyze the tool wear status during low frequency vibration assisted drilling of CFRP/TC4 laminated material, a research on the wear status of drilling tools based on cutting force signals was carried out. The cutting force signals of the low frequency vibration assisted drilling of the CFRP/TC4 laminated material were collected to be analyzed in time domain and frequency domain and the relationship between each signal feature and tool wear status was discussed. The research results show that the mean value, standard deviation, root mean square and kurtosis coefficient of the axial force signals, during the low frequency vibration assisted drilling of CFRP/TC4 laminated material, are closely related to the tool wear status. The frequency of the axial force signals is mainly concentrated on 0 Hz, spindle rotation frequency at 33 Hz and vibration tool holder vibration frequency at 38 Hz, and the frequency distribution will not change with tool wear.

**Keywords:** laminated material; low frequency vibration assisted drilling; tool wear; cutting force signal

## 0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)/钛合金(TC4)叠层材料在制孔过程中存在制孔质量差、加工效率低、刀具磨损严重等问题。为了提高叠层材料的制孔质量和制孔稳定性,许多学者对其展开了研究,并且发现在合适的加工参数下,低频振动钻削工艺是一种能有效保证叠层材料制孔效率和制孔质量的工艺方法。国内外针对低频振动制孔技术进行了广泛的研究。PECAT O 等<sup>[1]</sup>针对 CFRP/钛合金叠层材料进行钻削试验,发现低频振动工艺能够稳定断屑,相比于传统钻削工艺其后刀面磨损大大减小,提高了刀具耐用度。杨浩骏<sup>[2]</sup>针对 CFRP/TC4 叠层材料进行传统制孔和低频振动制孔对比试验,发现刃口钝化是叠层结构制孔刀具的主要磨损形态。OKAMURA K 等<sup>[3]</sup>采用 10~50 Hz 的低频轴向振动钻削工艺对钛合金进行了钻削试验研究,发现低频轴

向振动钻削可以降低切削温度,改善排屑状况,同时刀具耐用度得到提高。根据现有的研究可以得出,低频振动制孔工艺在制孔时可以稳定断屑,降低了切削温度,提高了刀具耐用度。

为了有效地识别刀具的磨损状态,国内外学者围绕刀具磨损的间接监测技术进行了广泛的研究。ZHU K P 等<sup>[4]</sup>研究了微细铣削加工,对采集到的信号进行时域和频域的分析,发现切削力的均值、偏度和小波包系数等特征量与刀具磨损状态密切相关。EI-WARDANY T I 等<sup>[5]</sup>研究了钻削加工过程的振动信号与刀具磨损状态的关系,研究表明振动信号的峭度能够反映刀具的崩刃故障,倒频谱比率适合监测刀具磨损量。在叠层材料制孔刀具磨损状态监测方面,谢小明等<sup>[6]</sup>针对 CFRP/铝合金叠层材料进行钻削试验,发现加工复合材料层的声发射信号方均根与主频段小波包能量比能够指示刀具磨损状态。

虽然针对不同加工工艺下的刀具磨损状态监测技术已得到大量研究,但是针对 CFRP/TC4 叠层材料低频振动

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875284)

第一作者简介:谢松峰(1995—),男,江苏连云港人,硕士研究生,研究方向为刀具磨损状态监测技术。

制孔过程中的刀具磨损状态监测的研究尚不完善。因此本文开展基于切削力信号的 CFRP/TC4 叠层材料低频振动制孔刀具磨损状态的分析。采集 CFRP/TC4 叠层材料低频振动制孔过程中的切削力信号,对切削力信号时域特征进行统计分析,探讨各时域特征变化规律与刀具磨损状态之间的联系,并对切削力信号进行快速傅里叶变换,探究切削力信号的频率分布以及刀具磨损对信号频率分布的影响。本文所得分析结果可以为低频振动制孔刀具磨损状态监测技术提供指导。

## 1 试验设备及方案

采用 DMG Ultrasonic 五轴数控加工中心进行刀具磨损试验,试验工装如图 1 所示。该机床配合 Mitis 低频振动刀柄可以实现刀具轴向的低频振动。试验的工件为 T800 型 CFRP 板材和 TC4 板材,厚度均为 10 mm。试验时 CFRP 置于上层,TC4 位于下层,以尽量减少 CFRP 出口分层的产生。试验采用的刀具为适用于 CFRP/TC4 叠层材料加工的整体硬质合金钻头,刀具直径为 9.525 mm,未经涂层处理,钻头采用双顶角设计,有良好的定心作用。加工过程中未加冷却液,采用刀具内部空气内冷的冷却方式。

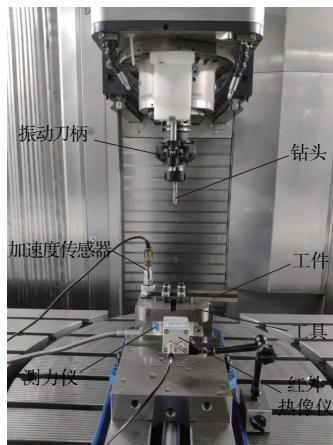


图 1 钻削试验工装

加工过程中的切削力信号通过 Kistler 9272 三向压电式测力仪和 5070 A 电荷放大器进行采集,并在测力软件 Dyno Ware 上进行参数的设置,本次试验切削力信号采样频率设置为 1 000 Hz。

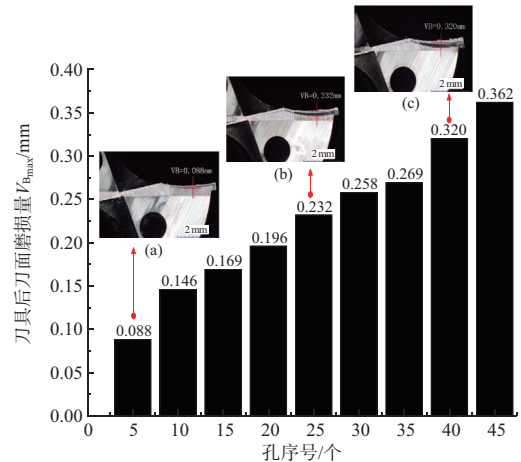
试验加工参数选取先前试验研究<sup>[2,7]</sup>所得适用于 CFRP/TC4 叠层材料加工的参数,具体为:转速  $n = 1\ 000$  r/min;进给速度  $f = 0.04$  mm/r;振动刀柄振幅  $A = 0.06$  mm;频转比  $w_f$  为 2.5 osc/r。CFRP 层与 TC4 层采用相同的加工参数进行试验。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 刀具磨损阶段划分

本文选取刀具后刀面磨损量作为刀具磨损状态的衡量标准,以刀具后刀面最大磨损量位置处磨损值  $V_{B\max}$  作为刀具后刀面磨损量的值。试验过程中每加工 5 个孔测量一次刀具后刀面磨损量,试验所得刀具后刀面磨损量变

化曲线如图 2 所示。从刀具后刀面磨损量变化曲线可以发现,在钻削前 10 个孔时,刀具磨损速率快,后刀面磨损量快速增至 0.146 mm,将该阶段划分为刀具的初期磨损阶段。在钻削第 10 个至第 35 个孔时,刀具磨损速率下降,刀具磨损更加平稳,刀具后刀面磨损量从 0.150 mm 均匀增至 0.269 mm,将该阶段划分为正常磨损阶段;当刀具钻削第 35 个孔至第 45 个孔时,刀具后刀面磨损速率变大,刀具后刀面磨损量从 0.269 mm 快速增至 0.362 mm,将此阶段划分为严重磨损阶段。



(a) 初期磨损阶段 (b) 正常磨损阶段 (c) 严重磨损阶段

图 2 刀具后刀面磨损量变化

### 2.2 切削力信号时域特征分析

时域分析是在信号时间序列范畴对信号的特征进行分析的过程。本文选取切削力信号平均值  $\bar{x}$ 、标准差  $\sigma$ 、方均根  $r_{ms}$ 、偏度系数  $S_k$  和峰度系数  $K_u$  作为时域特征进行分析,其值可分别通过式(1)、式(2)、式(3)、式(4)和式(5)计算得到。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

$$r_{ms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (3)$$

$$S_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3} \quad (4)$$

$$K_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} \quad (5)$$

其中: $n$ 表示时域信号序列的长度; $x_i$ 表示信号的幅度。

试验所得振动制孔轴向力信号各时域特征随制孔数目的增多,CFRP 层及 TC4 层轴向力信号的均值和方均根均呈增长趋势,且 TC4 层变化更加明显。振动钻削时 CFRP 层轴向力信号的标准差和峰度系数表现出了明显的阶段性特征,且和刀具磨损阶段相对应。而 TC4 层轴向力信号的标准差和峰度系数仅在严重磨损阶段产生波动,在其他磨损阶段无明显

变化特征。轴向力信号的偏度系数除钻削 CFRP 层时在初期磨损阶段下降速率较快外,其他变化过程没有体现出明显的与刀具磨损状态相关的阶段性特征。从上述的分析可

以得出,CFRP 层轴向力信号的均值、标准差、方均根及峰值系数和 TC4 层轴向力信号的均值及方均根随着刀具的磨损表现出了与刀具磨损阶段相关的阶段性特征。

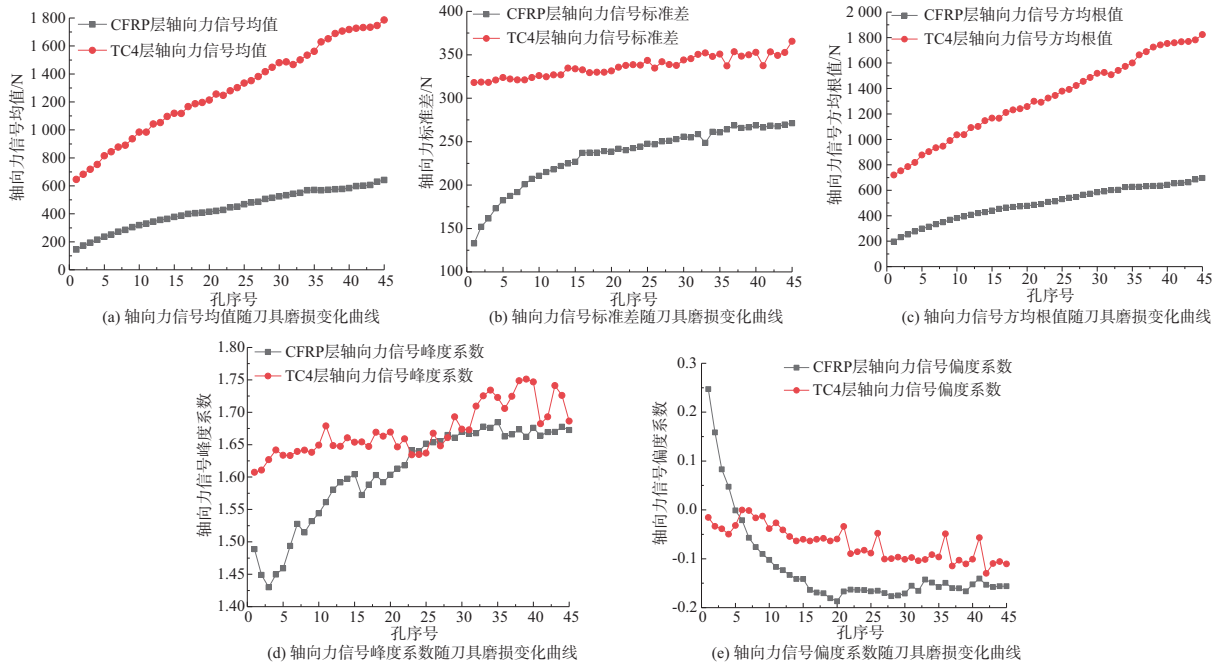


图3 轴向力信号各时域特征随刀具磨损变化曲线

### 2.3 切削力信号频域特征分析

为了探究轴向力信号频域特征与刀具磨损状态之间的关联,分别对采集到的 CFRP 层和 TC4 层稳定钻削阶段的轴向力信号进行快速傅里叶变换,得到各自的频谱图。振动钻削第 25 个孔时 CFRP 层及 TC4 层轴向力信号的频谱分布如图 4 所示。可以看出,轴向力信号的频率成分主要集中在 0~150 Hz 内。CFRP 层中,0 Hz 和 38.6 Hz 处的频率幅值最大,占频率的主要成分。此外,33.3 Hz、77.2 Hz 和 115.7 Hz 处也存在小幅频率成分。通过分析可知,0 Hz 代表轴向力信号的整体偏移趋势;38.6 Hz 的频率代表了振动刀柄的振动频率;33.3 Hz 的频率为主轴转动频率;77.2 Hz 和 115.7 Hz 处的小幅频率成分则为振动刀柄振动微小变化所产生的整数倍于振动刀柄振动频率的谐波。TC4 层中频率成分主要集中在 0 Hz 和 38.3 Hz 处,且由主轴转速和振动刀柄振动所产生的谐波幅值很小。

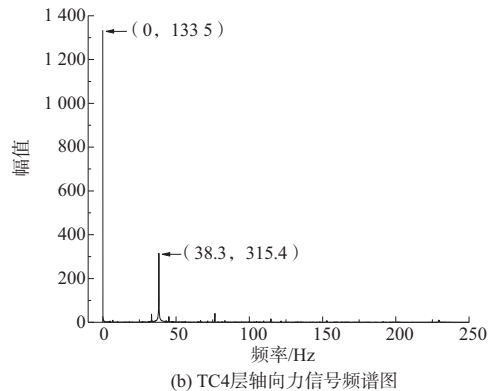
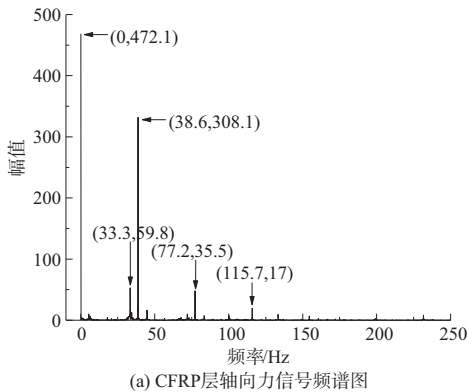


图4 振动钻削叠层材料第 25 个孔轴向力信号频谱图

为了探究刀具磨损对轴向力信号频率分布的影响,选取振动钻削叠层材料第 5 个孔、第 25 个孔及第 40 个孔时的轴向力信号,分别对 CFRP 层及 TC4 层稳定钻削阶段的轴向力信号进行快速傅里叶变换,得到各自的频谱图,如图 5、图 6 所示。从图 5 刀具磨损对 CFRP 层轴向力信号频率分布的影响可以发现,随着制孔数目的增多,轴向力信号各频率成分保持稳定,没有发生明显移动。0 Hz 和 38 Hz 处频率幅值随着制孔数目的增多而逐渐变大,且 0 Hz 处频率幅值的增加幅度远大于 38 Hz 处。从图 6 刀具磨损对 TC4 层轴向力信号频率分布的影响可以发现,TC4 层轴向力信号各频率成分的分布也没有受到刀具磨损的影响,各频率成分保持稳定。其中 0 Hz 处频率幅值随着制孔数目的增多而明显增大,38 Hz 处频率幅值则保持相对稳定,频率幅值在 300、400 处波动变化。

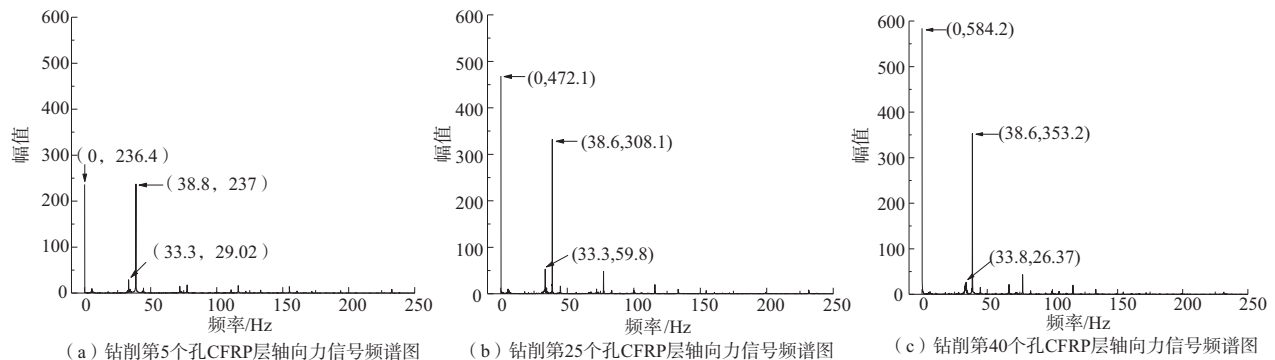


图5 刀具磨损对CFRP层轴向力信号频率分布的影响

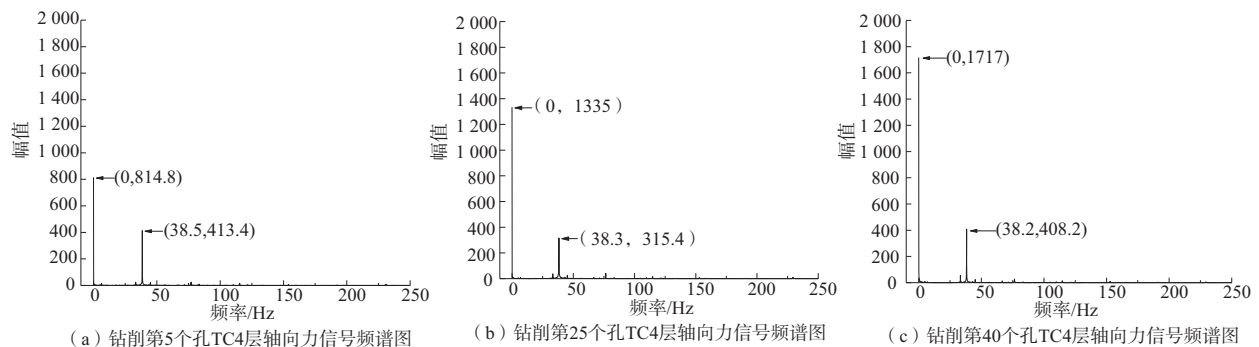


图6 刀具磨损对TC4层轴向力信号频率分布的影响

### 3 结语

1) 低频振动钻削CFRP/TC4叠层材料CFRP层轴向力信号的均值、标准差、方均根及峰度系数和TC4层轴向力信号的均值及方均根随着刀具的磨损表现出了与刀具磨损阶段相关的阶段性特征。

2) 低频振动制孔时,轴向力信号的频率主要集中在0 Hz、主轴旋转频率33 Hz以及刀柄振动频率38 Hz处,且轴向力信号频率分布不会随着刀具磨损而改变。

#### 参考文献:

- [1] PECAT O, BRINKSMEIER E. Tool wear analyses in low frequency vibration assisted drilling of CFRP/Ti6Al4V stack material[J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 142-147.
- [2] 杨浩骏. CFRP/TC4叠层结构低频振动制孔基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019.

- [3] OKAMURA K, SASAHARA H, SEGAWA T, et al. Low-frequency vibration drilling of titanium alloy [J]. JSME International Journal Series C, 2006, 49(1): 76-82.
- [4] ZHU K P, WONG Y S, HONG G S. Multi-category micro-milling tool wear monitoring with continuous hidden markov models[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(2): 547-560.
- [5] EL-WARDANY T I, GAO D, ELBESTAWI M A. Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(6): 687-711.
- [6] 谢小明,冷晟,徐青,等. 复合叠层材料制孔过叠层阶段声发射分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 30-32.
- [7] 姚琦威. CFRP/TC4叠层材料低频振动制孔刀具磨损研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019.

收稿日期:2020-12-28