

复合叠层材料制孔过程刀具声发射特征分析*

谢小明,冷 晟,徐 青,闵 陶,管晨丞

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 声发射信号具有高频、高灵敏度与高信噪比等特性,被广泛应用于检测领域。复合叠层材料钻孔加工时,伴随着刀具的磨损,会产生丰富的声发射信号,声发射信号特征与刀具磨损情况之间存在密切的关系。为了研究叠层材料制孔过程声发射信号特征随刀具磨损的变化关系,采用高速钢和硬质合金钻头开展了一系列试验,采集制孔过程中刀具的声发射信号,并分析信号的时频域特征。分析结果表明,声发射信号的均方根值、小波包能量与刀具磨损密切相关。

关键词: 叠层材料; 刀具磨损; 声发射; 小波包能量; 钻削

Analysis of Acoustic Emission Characteristics During Drilling Composite Laminated Material

XIE Xiaoming, LENG Sheng, XU Qing, MIN Tao, GUAN Chencheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] With high frequency, high sensitivity and high signal-to-noise ratio characteristics, acoustic emission is widely used in the detection field. When drilling composite laminated material, the acoustic emission signal will be generated with the wear of cutting tools. To obtain the relationship between time and frequency domain characteristics and tool wear condition, using high-speed steel and carbide drill conducted a series of experiments, collecting acoustic emission during the drilling process. The results show that the acoustic emission signal can be used to monitor the wear status of laminated materials. The RMS value and wavelet packet energy of acoustic emission signals are closely related to tool wear.

Keywords: Laminated material; Tool wear; Acoustic emission; Wavelet packet energy; Drilling

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.070

复合叠层材料具有高比强度和比模量、耐疲劳、热膨胀系数小、耐摩擦、耐腐蚀等优点,被广泛应用于飞机、火箭、导弹和高速飞行器等航空航天领域。为了提高叠层结构装配孔的位置精度,在加工紧固件孔时,通常采用一次性钻削复合材料/金属叠层材料的方法。由于不同材料具有不同的力学性能,在切削性能上有着巨大差异,因此一次性钻削过程中孔的质量难以保证,且刀具磨损剧烈。

在航空企业的碳纤维复材叠层板加工中,实际刀具使用寿命往往采用被加工孔出现毛刺等缺陷前制孔的个数进行评价,即确定极限制孔数量,以此作为换刀依据和制孔质量的保证。加工不同尺寸孔,或者更换刀具

型号以及被加工材料属性变化时,必须重新进行刀具试验,确定刀具寿命。因此,通过刀具试验确定刀具寿命这种方法尽管能确保制孔质量,但是会造成刀具提前报废,降低加工效率等问题。

1 声发射信号原理及研究现状

声发射(Acoustic Emission, AE)信号是指材料内部的弹性变形能突然释放所产生的弹性应力波信号,目前被广泛应用到无损监测中。研究表明,刀具磨损过程会产生丰富的声发射信号^[1],通过采集分析声发射信号,可有效监测刀具磨损情况。

目前,国内外研究人员已将声发射法应用到车、铣、钻削过程刀具磨损监测中,并获得了有效成果。Tansel等^[2]研究了铝合金微磨削加工,应用AE信号上部包络线的编码特征来估计刀具磨损。谢剑峰等^[3]研究了45

* 基金项目:南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfjj20160517);中央高校基本科研业务费专项资金项目。

号钢铣削加工过程,使用 AE 信号 31.25~250kHz 频段能量作为刀具破损监测的特征量。Gómez 等^[4]研究了 SAE 1040 钢钻削加工,研究表明 AE 信号平均能量随刀具磨损关系密切,可用来监测刀具磨损。Jemielniak 等^[5]研究了铬镍铁合金粗车过程,研究表明 AE 信号的峰度与能量对刀具磨损状态敏感,并建立了基于切削力和 AE 信号的监测系统。张栋梁等^[6]研究了铝合金 6061 的铣削过程,证明了嵌入维数与 Lyapunov 系数可有效指示刀具磨损。胡江林等^[7]研究了 TC4 钛合金钻削,研究表明 AE 信号振铃数能够清晰表示出刀具磨损速度。Neslušán 等^[8]在 100Cr6-62 材料的车削加工中,运用两种 AE 传感器分别采集高频与低频 AE 信号,将两种信号比值关系作为特征量判定刀具磨损。聂鹏等^[9]研究了 GH4169 车削加工,研究表明 AE 信号幅值均方根和 10~150kHz 频段能量能够指示刀具磨损。周芸梦^[10]研究了铝合金车削过程,研究表明 AE 信号 7.8~31.25kHz 适合监测刀具磨损状态。Maia 等^[11]研究了 AISI 4046 钢的车削过程,研究表明 AE 信号的功率谱平均密度在刀具寿命初期值水平高,随着刀具进入寿命中期值水平降低,进入寿命结束阶段值水平逐渐升高。

上述研究表明,声发射信号在不同加工场景下均能作为有效的刀具监测信号,信号的单个或联合特征量能够在特定的加工场景中指示刀具磨损状态,当材料或加工方式发生改变时,需要重新研究与刀具磨损状态关联的声发射特征量。目前,关于复合叠层材料钻孔过程中声发射信号特征的研究还未见报道。本文研究了碳纤维-铝合金叠层材料钻孔过程的声发射信号,应用统计学方法、频谱分析法与小波包方法分析了加工过程中声发射信号均值、偏度、峭度、均方根、小波包能量等信号特征的变化规律。

2 试验与讨论

2.1 高速钢钻头试验与讨论

由于刀具磨损是一种比较耗时的过程,为了快速获得叠层材料制孔过程中声发射信号随刀具磨损的变化关系,首先使用易磨损的高速钢钻头开展了钻削试验^[12]。试验材料为碳纤维复合材料板与 7075-T7451 铝合金的叠层板,碳纤维板厚 3mm,铝合金板厚度为 3mm,钻孔时复合材料在上层。数据采集卡使用研华 PCIE1816H,采样速率为 1MS/s,目标声发射信号频率范围 125~500kHz。传感器采用声华的 SR800,工作频段为 50~800kHz,灵敏度峰值大于 70db。试验时,传感器被压紧在复合材料表面,传感器与材料表面使用耦合剂减少信号损耗,信号采集硬件平台如图 1 所示。

采用普通无涂层高速钢刀具,直径 6mm。试验设计

如表 1 所示,由于普通高速钢钻头钻削叠层材料时磨损较快,每把刀具都直接从新刀加工至磨损。

鉴于碳纤维-铝合金叠层材料钻孔分为两个阶段,为研究方便,令复合材料阶段标识为 F ,铝合金阶段为 L 。试验过程中观察发现,钻头在刚接触工件与退刀时都会导致信号突变,因此本文分析的均是 F 和 L 区稳定加工阶段的信号,取每个孔 F 、 L 两个阶段的 131072 个数据点作为原始信号。

频域分析:使用高通数字滤波器过滤掉原始信号中 100kHz 以下的信号,对过滤后的信号应用 pwelch 方法、汉宁窗作功率谱分析,分析功率谱图,可以得出每把高速钢钻头磨损过程声发射信号功率谱值水平存在两种状态,3500r/min 下的两种状态区分更为明显。孔 1~3 的信号功率谱维持在一个水平,孔 4 的功率谱值突降至另一水平,孔 5、6 维持在孔 4 的值水平。结合刀具磨损情况可以得出结论,当刀具磨损剧烈后,其声发射信号功率谱值水平会下降。

时域分析:使用高通数字滤波器过滤掉原始信号中 100kHz 以下的信号,然后计算分析信号均值、均方根(RMS)值、偏度、峰度。研究发现,RMS 值具备阶段性特征,均值、偏度与峰度无明显规律。 F 、 L 区 RMS 值变化规律如图 2 所示,可以看出,RMS 值变化规律符合功率谱变化规律。图 3 所示为第 1 组试验参数下高速钢

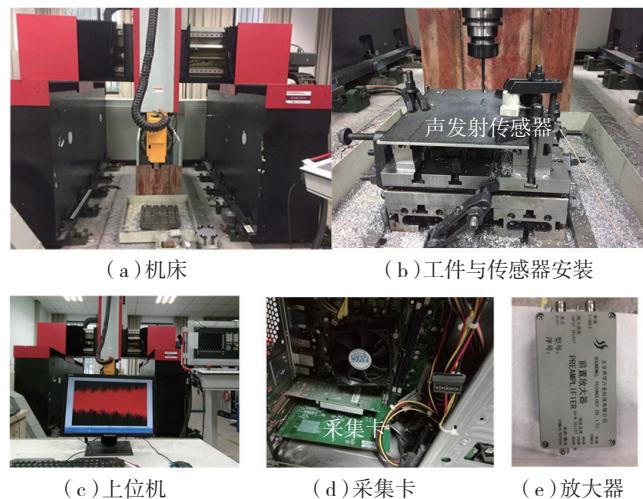


图1 信号采集硬件平台

Fig.1 Signal acquisition hardware platform

表1 高速钢钻头试验参数

试验组号	机床转速 $n / (r \cdot \min^{-1})$	刀具进给量 $f / (mm \cdot \min^{-1})$	重复次数 N	加工孔数量
1	3500	70	2	6
2	3500	50	2	6
3	2700	70	2	6
4	2700	50	2	6

钻头的磨损状态,钻头两个切削刃在钻削中的磨损程度不完全一致,钻头后刀面磨损的更剧烈。

2.2 硬质合金钻头试验与讨论

上述研究表明,叠层材料钻孔过程中,声发射信号的功率谱和RMS值与刀具磨损状态之间存在明显关系。高速钢钻头在加工复合叠层材料中磨损非常快,虽然得到了钻头从新刀加工至报废阶段的整体规律,但是不利于获取磨损过程声发射的细节特征。因此,在上述结论的基础上,本文使用硬质合金钻头在相同条件下开展了第二阶段试验。试验参数如表2所示^[13-14]。以加工叠层板件孔出现明显毛刺作为刀具磨钝标准。

对刀具在F区与L区的AE信号分别做功率谱分析、RMS值分析、时频域分析,分析结果如下:

频域分析:对F、L区信号做功率谱分析发现,300~400kHz频段AE信号变化较规律,1~7孔,功率谱水平持续上升;8~10孔,功率谱水平持续下降;11~26孔,功率谱水平振荡持平。相较于高速钢钻头,若对硬质合金钻头从新刀加工至磨损过程的信号功率谱进行状态划分,也可划分为两个状态。不同的是,硬质合金钻头的状态1呈现缓慢上升的趋势,从状态1到状态2存在一个较短的过渡过程。

时域分析:使用数字高通滤波器过滤掉原始信号中100kHz以下的低频成分,然后计算RMS值,分析发现信号RMS值呈现的规律与功率谱变化规律一致:钻头在初期剧烈磨损阶段,信号的RMS值稳定上升,进入稳定磨损期后,信号RMS值保持在某一水平附近振荡。RMS值变化规律如图4所示。

从上述分析中可以得出,虽然功率谱与RMS值随刀具的磨损呈现阶段性特征,但是无法指示刀具磨损量。于是,本文进一步应用小波包变换对AE信号做了多分辨率分析,研究各频段AE信号能量随刀具磨损的变化情况。

2.2.1 小波包能量

小波包分析对信号的低频、高频部分都有优秀的分辨率,可以解决小波分析方法对高频解析不足的问题^[15]。因此,小波包分析方法在研究高频的声发射信号中具备独特的优势。小波包分解算法为:

$$\begin{cases} x_{j,l,2n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k h_{0(k-2l)} d_{j+1,k,n} \\ x_{j,l,2n+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_k h_{1(k-2l)} d_{j+1,k,n} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\{x_{j+1,l,2n}\}$ 为上层小波包分解结果; $\{x_{j,l,2n}\}$ 与 $\{x_{j+1,l,2n+1}\}$ 为下一级分解结果; j 为尺度指标; l 为位置指标; n 为频率指标; k 为变量; h_0 和 h_1 为分解采用的多分辨率滤波器系数。

小波包重构算法为:

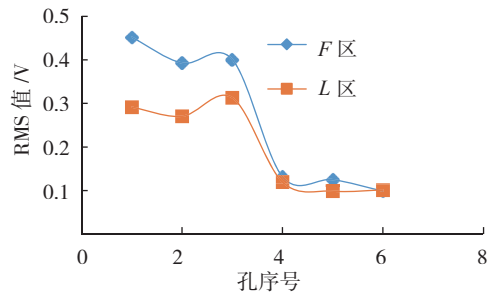
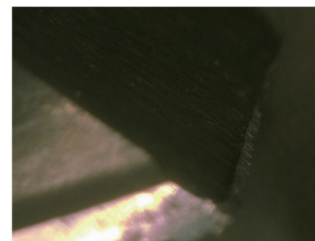
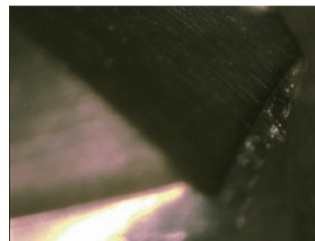


图2 使用高速钢钻头, F、L区RMS值随钻孔数量的变化
Fig.2 Changes of RMS value with hole number in F and L areas with high-speed steel drill



(a) 正常磨损



(b) 严重磨损

图3 刀具磨损状态图

Fig.3 Tool wear state

表2 硬质合金钻头试验参数

试验组号	机床转速 $n / (r \cdot \min^{-1})$	刀具进给量 $f / (mm \cdot \min^{-1})$	重复次数 N	加工孔数量
1	3500	70	2	26
2	3500	50	2	26
3	2700	70	2	26
4	2700	50	2	26

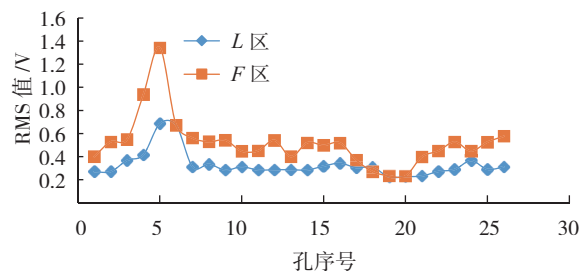


图4 使用硬质合金钻头, F、L区RMS值随钻孔数量的变化
Fig.4 Changes of RMS value with hole number in F and L areas with carbide tool

$$x_{j+1,2n} = \sum_k (h_{0(l-2k)}d_{j,k,2n} + h_{1(l-2k)}d_{j,k,2n+1}) \quad (2)$$

由 Parseval 能量积分公式可得时域上信号 $x(t)$ 的能量为^[16]:

$$\|x\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \quad (3)$$

由公式(1)与(3)可知,用小波包分解系数 $C_{j,k}$ 的平方和就等于原信号在时域的能量,即:

$$E_{j,k} = \sum_n |x_{j,n,k}|^2 \quad (4)$$

2.2.2 分析结果

对 F 区、 L 区原始信号应用 db3 小波进行 3 层小波包分解,共 8 个频段,采样频率为 1MS/s,每频段宽度为 62.5kHz。去除 0~125kHz 信号,以及明显无谱峰存在的 187.5~250kHz 区间。然后用剩下的频段对信号进行重构,再对重构后的信号进行 4 层小波包分解,计算各频段内信号的小波包能量百分比。分析表明, F 区 19 (125~156.25kHz)、21 (187.5~218.75kHz)、22 (218.75~250kHz)、27 (375~406.25kHz) 4 个频段内信号随刀具磨损变化明显, L 区信号则波动明显。其中, F 区频段 21、22 信号小波包能量比随刀具的磨损逐渐下降,频段 19、27 信号能量比随刀具磨损增加而升高。 L 区 4 个频段信号呈现相似规律,但受铝合金切屑挤压、碰撞的影响,声发射信号波动明显^[11,17]。频段能量百分比变化规律如图 5 所示。图 5 (a) 所示 F 区 19、27 两个频段能量比变化规律可以划分为 AB 、 CD 、 EF 3 个阶段,各阶段对应的孔加工质量情况如图 6 所示, AB 段的孔质量良好, CD 段孔开始出现轻微毛刺, EF 段孔存在明显毛刺。

2.2.3 接触面区域信号分析

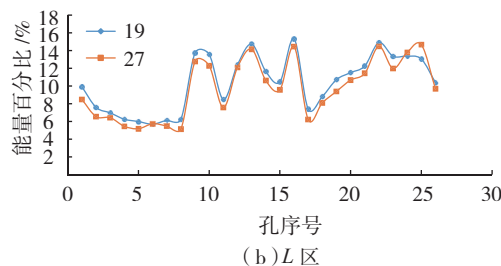
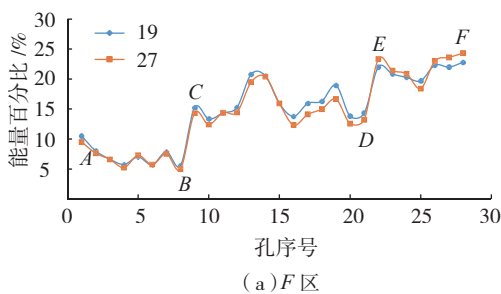


图5 F 区和 L 区频段19、27能量百分比变化规律
Fig.5 Variation of energy percentage at 19 and 27 in F and L areas

通过板材厚度与刀具进给速度计算出刀具加工接触面的时刻,以该时刻为中心,取前后共 1.3s 的数据进行分析。该过程信号时域特征如图 7 所示,从信号变化趋势可以看出,刀具从复合材料加工至铝合金时,信号幅值逐渐衰减,没有发生阶跃性突变,随后信号幅值稳定在铝合金层的幅值水平。

对该过程信号应用小波包多分辨率方法分析各频段信号成分发现,与加工复材层和铝合金层时相同,信号能量主要集中在 19、20、21、22、27 频段。刀具加工接触面的主频段能量比随孔序号的变化情况如图 8 所示,频段 21、22 能量比在总体上有下降趋势,频段 19、27 则在总体上呈现上升趋势,两种趋势波动明显,且变化趋势比较平缓,频段 20 的能量比对刀具磨损状态不敏感。

3 结论

本文根据碳纤维-铝合金叠层材料结构特点,将其制孔过程划分为碳纤维层、接触面与铝合金层 3 个阶段,分析了 3 个阶段的声发射信号特征量。结论如下:

(1) 对高速钢钻头产生的 AE 信号进行小波包分析,

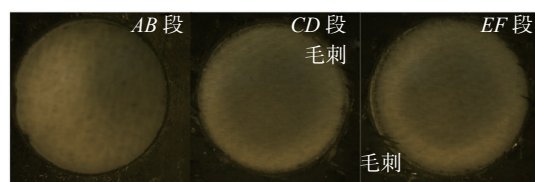


图6 各阶段孔质量图

Fig.6 Hole quality of each stage

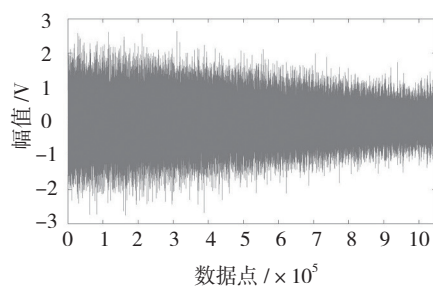


图7 接触面阶段信号时域图

Fig.7 Time domain diagram of contact phase

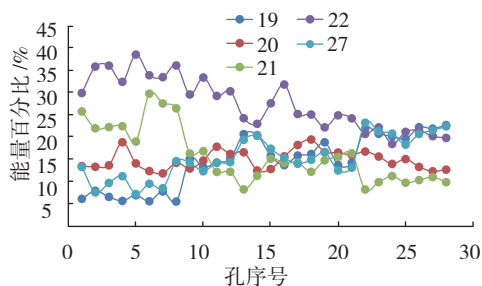


图8 主频段能量变化

Fig.8 Change of energy in main frequency section

发现其信号能量主要集中在 19~22 频段,相较于硬质合金钢钻头,其缺少 27 频段的高频信号。高速钢刀具产生的信号时域 RMS 值初始阶段就处于较高水平,说明其信号在一开始就具有较强的能量;硬质合金钢钻头产生的信号初始能量低,然后逐渐升高。两种刀具的时域特征量均值、偏度、峭度与峰度均没有呈现出明显的规律。

(2) 硬质合金钢钻头加工过程中,与接触面与铝合金层相比,随着刀具的磨损,复合材料层声发射信号变化趋势更加明显,具体表现为 19、27 频段信号能量比值随刀具磨损逐渐增加,21、22 频段则逐渐减少。

(3) 加工材料表面、退刀、铝合金形成切屑以及刀具的崩刃现象均会引起信号突变,这种突变在时域上表现为信号波形图上明显的突刺,时频域上则表现为某一时刻信号成分的变化。这些突变往往是瞬时现象,且包含了对加工过程非常重要的刀具崩刃信息。本文尚未能识别突变信号中的崩刃信息,也还未建立小波包能量比与刀具磨损量之间的模型,未来将会努力解决这两点问题。

参考文献

[1] LIANG S Y, DORNFELD D A. Tool wear detection using time series analysis of acoustic emission[J]. Journal of Engineering for Industry, 1989, 111(3): 147-149.

[2] TANSEL I, TRUJILLO M, NEDBOUYAN A, et al. Micro-end-milling—III. Wear estimation and tool breakage detection using acoustic emission signals[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1998, 38(12): 1449-1466.

[3] 谢剑峰,王海丽. 基于声发射的铣刀破损信号特征的提取与优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(5): 14-17.

XIE Jianfeng, WANG Haili. Tool breakage feature extraction and optimization in milling using acoustic emission[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(5): 14-17.

[4] GÓMEZ M P, HEY A M, RUZZANTE J E, et al. Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission[J]. Physics Procedia, 2010, 3(1): 819-825.

[5] JEMIELNIAK K, KOSSAKOWSKA J, URBAŃSKI T. Application of wavelet transform of acoustic emission and cutting force signals for tool condition monitoring in rough turning of Inconel 625[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 255(1): 123-129.

[6] 张栋梁,莫蓉,孙惠斌,等. 基于混沌时序分析方法与支持向量机的刀具磨损状态识别[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 2138-2146.

ZHANG Dongliang, MO Rong, SUN Huibin, et al. Tool wear state recognition based on chaotic time series analysis and support vector machine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(8): 2138-2146.

[7] 胡江林,张少文,李亮. 基于声发射技术监测刀具磨损的研

究[J]. 工具技术, 2012, 46(3): 67-69.

HU Jianglin, ZHANG Shaowen, LI Liang. Research on tool wear monitoring by acoustic emission technology[J]. Tool Engineering, 2012, 46(3): 67-69.

[8] NESLUŠAN M, MIČIETA B, MIČIETOVÁ A, et al. Detection of tool breakage during hard turning through acoustic emission at low removal rates[J]. Measurement, 2015, 70: 1-13.

[9] 聂鹏, 湛鑫, 徐涛, 等. 基于小波神经网络的航空刀具磨损状态识别[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(1): 106-109.

NIE Peng, CHEN Xin, XU Tao, et al. State recognition of tool wear base on wavelet neural network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(1): 106-109.

[10] 周芸梦. 基于声发射技术的刀具磨损监测研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.

ZHOU Yunmeng. Tool wear monitoring based on acoustic emission technology[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014.

[11] MAIA L H A, ABRAO A M, VASCONCELOS W L, et al. A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission[J]. Tribology International, 2015, 92: 519-532.

[12] 刘勇兵, 张明喆, 周宏, 等. 无涂层高速钢刀具钻削压铸铝合金时的磨损机理图[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(5): 326-330.

LIU Yongbing, ZHANG Mingzhe, ZHOU Hong, et al. Wear mechanism map of uncoated HSS tool in drilling a die-cast aluminum alloy[J]. Tribology, 2000, 20(5): 326-330.

[13] 王共冬, 周丽, 种强, 等. 碳纤维复合材料/铝合金叠层制孔工艺研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 152-157.

WANG Gongdong, ZHOU Li, ZHONG Qiang, et al. Technical investigation on drilling of CFRP/aluminum stack[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(6): 152-157.

[14] 王昌赢, 邱坤贤, 魏莹莹, 等. PTFE/CFRP/铝合金叠层材料钻削试验研究[J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 90-93.

WANG Changying, QIU Kunxian, WEI Yingying, et al. Experimental investigation on drilling of PTFE/CFRP/aluminum stack[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 90-93.

[15] 唐向宏. 时频分析与小波变换[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

TANG Xianghong. Time frequency analysis and wavelet transform[M]. Beijing: Science Press, 2008.

[16] 徐科军. 信号分析与处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

XU Kejun. Signal analysis and processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

[17] PRAKASH M, KANTHABABU M, RAJURKAR K P. Investigations on the effects of tool wear on chip formation mechanism and chip morphology using acoustic emission signal in the microendmilling of aluminum alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5-8): 1499-1511.

通讯作者: 冷晟, 博士、副教授, 研究方向为智能车间制造执行系统, E-mail: meesleng@nuaa.edu.cn. (责编 逸飞)