

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.01.012

# 基于铣削声音信号的刀具状态实验研究

朱国奎, 张敏良, 朱鹤

(上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620)

**摘要:**为了更加准确、有效对铣刀磨损状态进行监测,笔者提出以铣削声音为监测信号的方案,搭建基于铣削声音信号的刀具状态监测平台,设计了基于LabVIEW的实验数据采集分析系统软件平台,并通过小波变换对实验结果进行了论证。实验结果表明,在1.5~2.0 kHz,2.5~4.5 kHz频率范围内,铣削声音信号与刀具磨损有很好的相关性;切削参数的变化也会对声音信号产生影响,其中主轴转速的影响最为明显。方案验证了用声音信号监测刀具状态是切实可行的,为刀具状态的监测提供了新的思路与方法。

**关键词:**刀具磨损;铣削声音信号;小波变换;切削参数;LabVIEW软件

中图分类号:TG71;TP274 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)01-0054-06

## Experimental Study on Tool Condition in Milling Based on Sound Signal

ZHU Guokui, ZHANG Minliang, ZHU He

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to monitor the wear condition of milling cutter more accurately and effectively, a scheme was proposed to choose the milling sound signal as the monitoring signal. A tool condition monitor platform was established based on milling sound signal. A software platform based on LabVIEW was designed to deal with experimental data, including acquisition and analysis. And the results were demonstrated by wavelet transform. Experimental results showed that sound signal and tool wear had good correlation in the frequency range of 1.5 kHz to 2 kHz and 2.5 kHz to 4.5 kHz; the change of cutting parameters would also affect the sound signal, the effect of spindle speed on sound signal was the most obvious maximum. The scheme proved that it was feasible to monitor tool condition with sound signal, and provided a new idea and method for tool detection.

**Keywords:** tool wear; milling sound signal; wavelet transform; cutting parameters; LabVIEW

在金属切削加工过程中,刀具与工件直接接触,刀具状态的变化会直接影响加工精度和工件的表面质量。其中刀具的磨损和破损是刀具状态变化的主要形式。随着工业化和当代制造业的迅猛发展以及数控机床和加工中心的广泛使用,迫切需要可靠、实用的刀具监测方法。国内外学者对此进行了大量研究<sup>[1-7]</sup>,主要以振动信号、切削力信号、声发射信号、电流信号为监测信号,对刀具状态进行监测,但能应用于实际生产中的非常少。主要原因有监测成本高、安装繁琐以及与刀具磨损相关性不明显等。

笔者采用传声器采集铣削声音信号,基于

LabVIEW设计了实验数据采集分析系统软件平台<sup>[8-11]</sup>,包括数据采集、时域分析、频域分析和小波分析模块。探索声音信号与刀具磨损情况及铣削参数的关系,并对声音信号进行7层小波分解,以各频段能量所占百分比为特征量来验证结论。与测力仪、声发射传感器和电流传感器相比,传声器具有性价比高、安装方便等优点,对于不同的刀具和工件能保证相似的监测条件,具有比较广泛的应用前景。

### 1 试验设计

实验设备:沈阳机床厂VMC-850E立式加工中心,主轴最大转速8 000 r/min。

收稿日期:2016-07-27;修回日期:2016-10-20

第一作者简介:朱国奎(1992),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事金属切削加工中刀具状态的监测研究。E-mail:1292678747@qq.com

工件材料:45#钢。

实验刀具:硬质合金立铣刀,刀具直径  $D = 12$  mm,齿数  $Z = 4$ 。

传声器:CYR2120U + 传感器。

刀具检测:工具显微镜。

分析平台:基于 LabVIEW 的数控铣削声音信号采集分析系统,如图 1 所示。

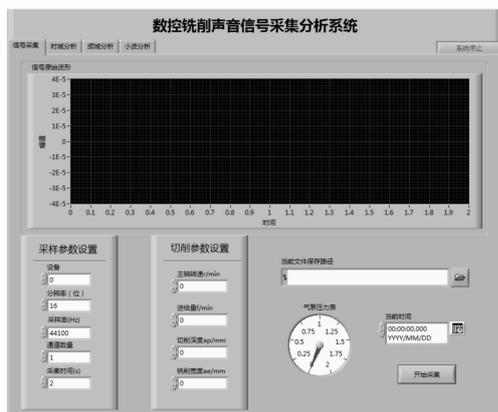
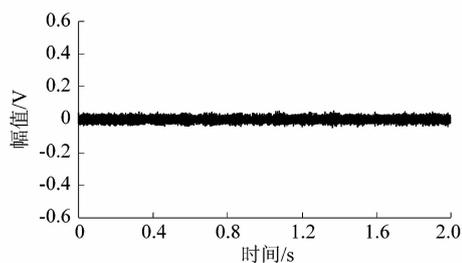


图 1 实验数据采集分析系统

Figure 1 Experimental data acquisition and analysis system

采用笔记本电脑自带的声卡作为 A/D 转换装置,采样频率为 44.1 kHz,单通道采集,采样时间为 2 s,分辨率为 16 位。铣削实验平台结构如图 2 所示。

用 3 把后刀面磨损宽度为 0,0.1,0.3 mm 的刀具进行切削,以代表刀具的初期磨损、正常磨损和急剧磨



(a)  $n=1\ 000$  r/min 空转时域波形

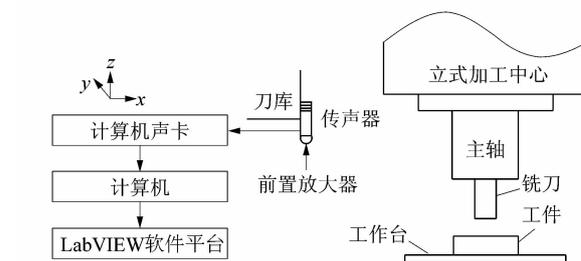


图 2 铣削实验平台结构图

Figure 2 Structure of milling experiment platform

损状态。对表 1 中的实验参数进行全因素实验,共获取声音信号样本 81 个。

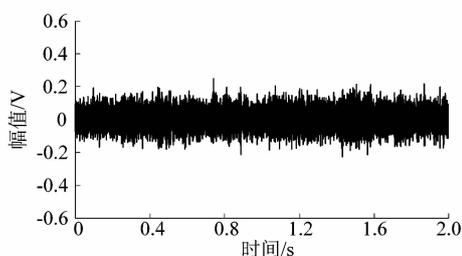
表 1 实验参数表

Table 1 Experimental parameters

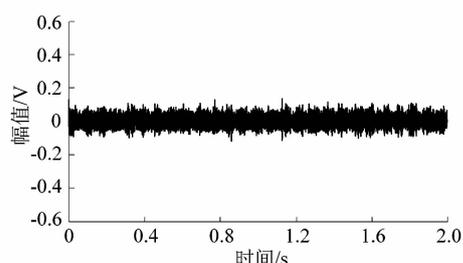
转速 $n/$ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	进给量 $f/$ ( $\text{mm} \cdot \min^{-1}$ )	切削深度 $a_p/\text{mm}$	刀具磨损量 $V_B/\text{mm}$
750	90	1.0	0.0
1 000	120	1.5	0.1
1 250	150	2.0	0.3

## 2 实验数据分析

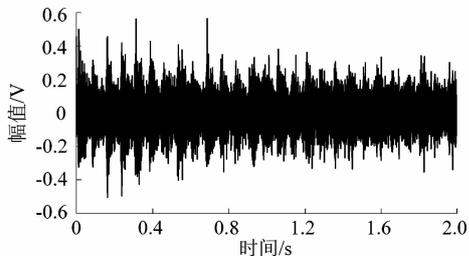
首先,采集机床空转信号和切削时的声音信号。机床空转信号是在  $n=1\ 000$  r/min, $f=0.15$  mm/r 时,刀具在工件上方移动所获得;正常切削时,采集不同磨损程度的刀具在同一切削条件下( $n=1\ 000$  r/min, $f=0.15$  mm/r, $a_p=2.0$  mm)铣削声音信号的时域波形,如图 3 所示。



(c)  $V_B=0.1$  mm 时域波形



(b)  $V_B=0$  mm 时域波形



(d)  $V_B=0.3$  mm 时域波形

图 3 空转和正常切削的时域波形

Figure 3 Idle and normal cutting time-domain waveform

由图3可知,声音信号的变化是比较灵敏的,空转时波形的幅值明显小于切削时的波形,随着刀具磨损程度的不断增大,信号波形幅值不断增大,不稳定性也增大。因此,铣削声音信号可以有效反映刀具的磨损情况,采用铣削声音信号作为特征量对刀具状态进行监测是可行的。

其次,对采集到的声音信号进行功率谱对比分析,由于采样频率为44.1 kHz,根据奈奎斯特(Nyquist)采样定律,铣削声音信号的截止频率为22 050 Hz,由于在10 kHz以上的频率范围内,信号能量值很小,刀具不同磨损情况下频谱幅值变化很小,因此取0~10 kHz频率范围内的信号作分析,将图3(b),(c),(d)的信号导入LabVIEW软件平台进行功率谱分析,结果如图4所示。

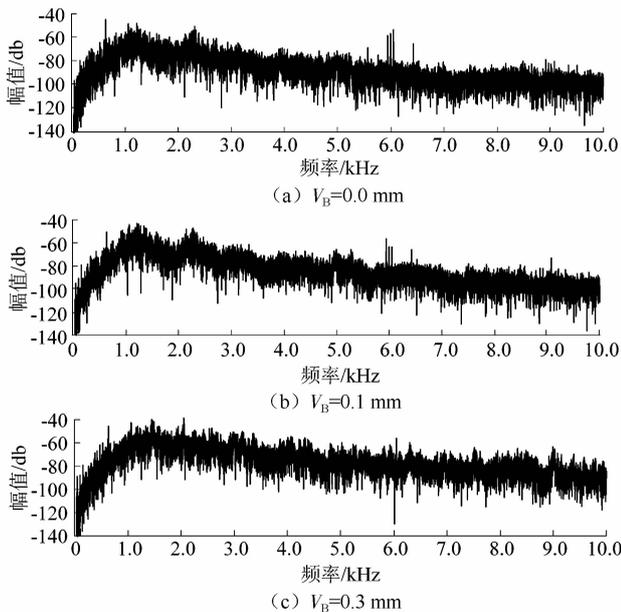


图4 刀具不同磨损状态下的功率谱对比  
Figure 4 Power spectral contrast in different tool wear condition

由图4可知,在1.4~2 kHz以及2.5~5 kHz的频率段范围内,声音信号功率谱的幅值变化明显,能较好地反映刀具的磨损情况。随着刀具磨损量的增大,声音的能量逐渐增大。因此,可以将这2个频率段初步定义为与刀具磨损的相关频段。

对声音信号做1.4 kHz的高通滤波处理,比较同一切削条件下( $n = 1\ 000\ \text{r/min}$ ,  $f = 0.15\ \text{mm/r}$ ,  $a_p = 2.0\ \text{mm}$ )刀具在3种不同磨损状态下的频谱,如图5所示。

由图5分析可知,声音信号的能量主要分布在1.0~5.0 kHz范围内,其中在1.5~2.0 kHz和2.5~4.5 kHz频率段范围内,声音波形幅值随着刀具磨损量的增大增幅明显,声音信号和刀具磨损情况相关性很好;在大于4.5 kHz的频率范围内,声音信号能量很小,可以忽略不计。

为了进一步验证此结论,笔者采用小波变换对声音信号进行更深层次的分析。

传统的信号分析处理方法都是在傅里叶变换的基础上建立的,只能对信号做全局变换,将信号从时间域转换到频率域进行分析,无法对信号的时频局部区域的性质进行表述,在分析处理非平稳信号时存在严重的缺陷,而铣削声音信号正是一种典型的非平稳信号,时频域的局部性质含有重要的特征信息。因此需要找到一种可以对非平稳信号进行时频域分析的方法。

小波变换克服了短时傅里叶变换单一分辨率的不足,可以实现多分辨率分析,可以对信号在时域、频域范围内进行特征表述,是一种常用的时频分析处理方法。小波变换是一种在不改变窗口面积的前提下,对窗口形状进行适当调整的方法,通常在低频部分采用较宽窗,在高频部分采用较窄窗,来满足低频频率细分、高频时间细分的要求。这种时频域局部分析的特性以及自适应性,使得小波分析非常适合应用于铣削声音信号的分析处理。

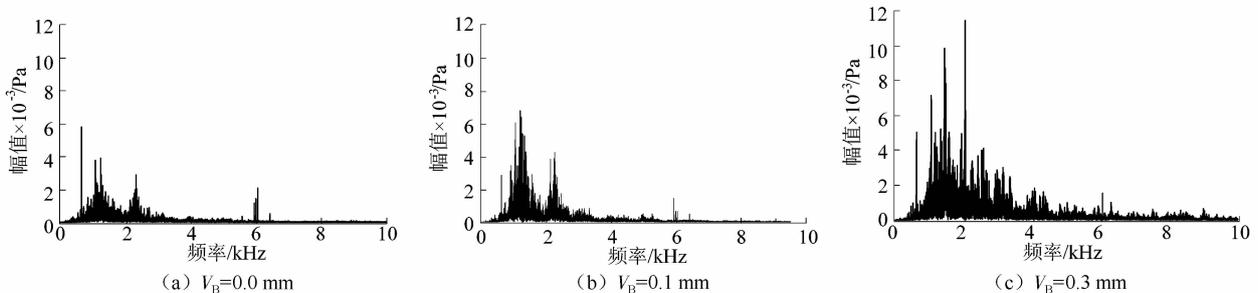


图5 滤波后刀具不同磨损状态下声音信号的频谱对比  
Figure 5 Spectrum contrast of filtered sound signal in different tool wear condition

对原始声音信号  $S$  进行 7 层小波分解,选择  $db2$  为小波母函数,得到 8 个特征量,对应频段为  $A_7, D_7, D_6, D_5, D_4, D_3, D_2$  和  $D_1$ 。各频段频率范围划分如表 2 所示。

表 2 各频段范围

Table 2 Each frequency range Hz

序号	频段	序号	频段
$A_7$	0 ~ 172	$D_4$	1 378 ~ 2 756
$D_7$	172 ~ 344	$D_3$	2 756 ~ 5 512
$D_6$	344 ~ 689	$D_2$	5 512 ~ 11 025
$D_5$	689 ~ 1 378	$D_1$	11 025 ~ 22 050

将切削参数为  $n = 1\ 000\ \text{r/min}$ ,  $f = 0.15\ \text{mm/r}$ ,  $a_p = 2.0\ \text{mm}$ , 刀具磨损量为 0, 0.1, 0.3 mm 的 3 组切削样本信号导入 LabVIEW 软件平台,进行小波分析。图 6 为刀具在初期磨损状态下的小波分解情况。

由图 6 可以直观看出,声音信号能量主要集中在  $D_3, D_4, D_5$  和  $D_6$  频段,另外 2 组信号小波分解后也是类似情形。对小波分解后的各个频段进行能量计算,求得刀具在不同磨损状态下的能量占总能量的百分比,如表 3 所示。

表 3 小波分解后各频率区间段能量占总能量百分比

Table 3 Wavelet decomposition of each frequency band energy accounted for total energy

刀具磨损	各频率区间段能量占总能量百分比/%							
	$A_7$	$D_7$	$D_6$	$D_5$	$D_4$	$D_3$	$D_2$	$D_1$
初期磨损	0.4	4.2	37.2	40.0	14.2	3.3	0.6	0.1
正常磨损	0.3	3.3	15.4	47.3	26.9	5.9	0.8	0.1
严重磨损	0.3	1.8	14.0	33.5	35.5	12.3	2.3	0.3

折线图表示如图 7。

对刀具不同磨损状态下各频率区间段能量分析后发现,信号的能量主要分布在  $D_6, D_5, D_4$  和  $D_3$  频率范围内,随着刀具磨损量的不断增大,主要能量分布段有从低频段向高频段移动的趋势。频段  $D_6$  (344 ~ 689 Hz),  $D_5$  (689 ~ 1 378 Hz) 能量所占百分比随着刀具磨损的不断加剧,呈下降趋势;频段  $D_3$  (2 756 ~ 5 512 Hz) 和  $D_4$  (1 378 ~ 2 756 Hz) 能量百分比随着刀具磨损的不断加剧,有较为明显的上升趋势,即这 2 个频率区间和刀具的磨损状态相关性很好,也证明了前文分析中所得出刀具磨损量的特征频段是 1.5 ~ 2.0 kHz, 2.5 ~ 4.5 kHz 的结论是正确的。

其次,为了研究切削参数的变化对声音信号的影响,笔者对不同磨损状态下的刀具进行了单因素实验,

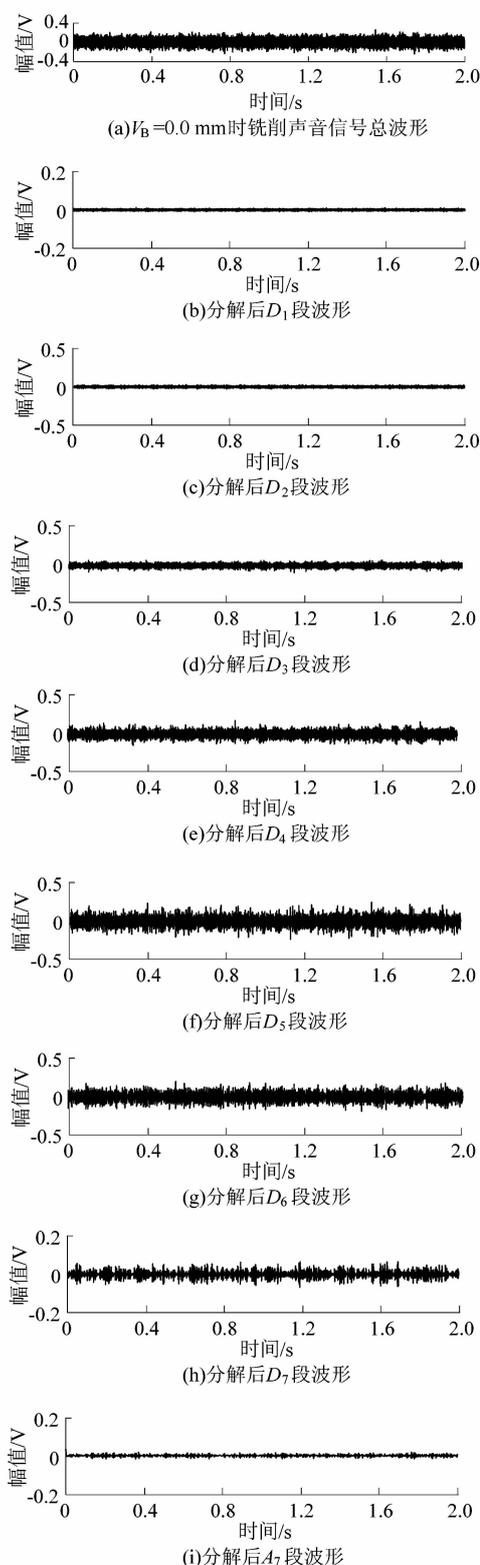


图 6  $V_B = 0.0\ \text{mm}$  时铣削声音信号的 7 层小波分解

Figure 6 Seven layer wavelet decomposition of milling sound signal in  $V_B = 0.0\ \text{mm}$

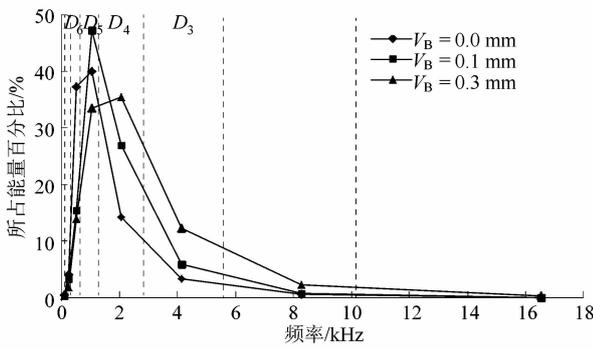


图7 刀具不同磨损状态下能量分布图  
Figure 7 Energy distribution in different tool wear condition

图8~10依次为进给量、切削深度和主轴转速发生变化时,铣削声音信号的频谱对比。

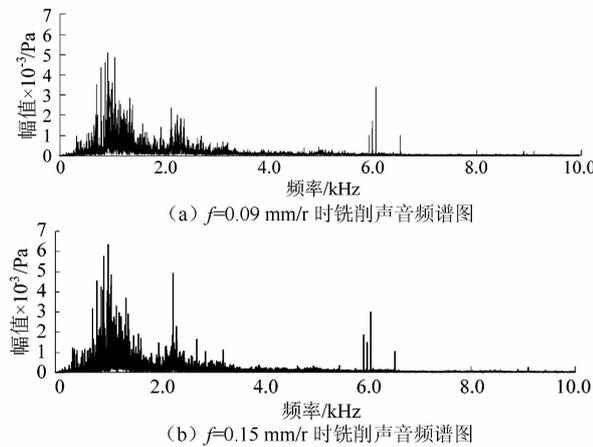


图8 不同进给量对铣削声音信号的影响  
( $V_B = 0.0 \text{ mm}, n = 1250 \text{ r/min}, a_p = 2.0 \text{ mm}$ )  
Figure 8 Effects of different feed rate on milling cutting sound signal  
( $V_B = 0.0 \text{ mm}, n = 1250 \text{ r/min}, a_p = 2.0 \text{ mm}$ )

分析对比图8~10可知,刀具在同一磨损状态下,改变切削参数,声音信号会产生相应变化。其中主轴转速对声音信号影响最大,信号幅值随主轴转速的增大而增大,增幅明显。进给量和切削深度对声音信号影响较小,总体而言,随着进给量和切削深度的增大,信号幅值会有小幅度增长。

### 3 结论

刀具磨损状态的监测是实现工业自动化、智能化的关键,监测信号的选择是实现实时监测的重要影响因素。笔者选择铣削声音信号为监测信号来监测铣刀的磨损状态,进行了全因素铣削实验,基于 LabVIEW 完成了声音信号的采集,时频域特性和小波分解后各

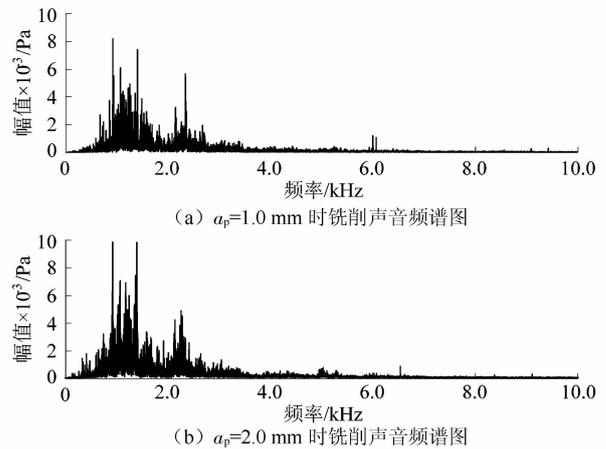


图9 不同切削深度对铣削声音信号的影响  
( $V_B = 0.1 \text{ mm}, n = 1250 \text{ r/min}, f = 0.12 \text{ mm/r}$ )  
Figure 9 Effects of different cutting depth on milling cutting sound signal  
( $V_B = 0.1 \text{ mm}, n = 1250 \text{ r/min}, f = 0.12 \text{ mm/r}$ )

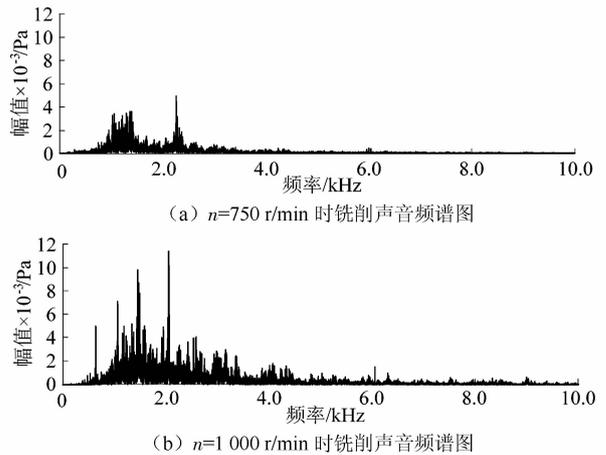


图10 不同转速对铣削声音信号的影响  
( $V_B = 0.3 \text{ mm}, a_p = 2.0 \text{ mm}, f = 0.15 \text{ mm/r}$ )  
Figure 10 Effects of different spindle speed on milling cutting sound signal  
( $V_B = 0.3 \text{ mm}, a_p = 2.0 \text{ mm}, f = 0.15 \text{ mm/r}$ )

频率段的能量变化分析,以及切削参数的变化对声音信号影响的对比,得出如下结论:

1) 在 1.5~2.0 kHz 及 2.5~4.5 kHz 频率区间段,不同磨损状态下的刀具产生的信号声压值变化明显,与刀具磨损状态相关性很好,能够反映出刀具磨损状态的变化;随着刀具磨损的不断加剧,主要能量分布有从低频段向高频段移动的趋势。

2) 声音信号幅值与切削参数呈正相关变化趋势,  
(下转第 63 页)