

文章编号 1004-924X(2017)04-0934-09

BK7 光学玻璃金刚石划刻声发射信号的特征提取

毕 果*, 许涛林, 彭云峰, 郭昕乾
(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要:以金刚石压头划刻 BK7 光学玻璃为研究对象,分析了脆性材料脆性去除过程中的声发射机制,研究了声发射信号的特征提取技术。多种切深实验显示: BK7 光学玻璃发生脆性去除的特征主要集中在 $[100, 200]$ kHz、 $[300, 400]$ kHz 两个频段,对应不同的声发射机制,其中 $[100, 200]$ kHz 频带的滤波信号呈现明显的、时间间歇的突发式声发射现象,与脆性材料裂纹的生成与扩展密切相关。基于上述实验结果,提出了以突发式声发射事件为单位的特征监测方法。针对该带通滤波信号的均方根值(RMS),研究了基于凸优化理论的声发射事件识别算法,得到了脆性材料裂纹扩展的时刻及能量信息。得到的结果表明:以声发射事件为单位的特征监测具有明确的物理意义,能够更加客观地表征脆性材料的去除过程。

关键词: BK7 光学玻璃; 金刚石划刻; 声发射信号; 特征提取; 状态监测

中图分类号: TN305.2; TQ171.734 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.0934

Feature extraction of acoustic emission signal for diamond scratching of optical glass BK7

BI Guo*, XU Tao-lin, Peng Yun-feng, GUO Xin-qian

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

* Corresponding author, E-mail: guobi@xwu.edu.cn

Abstract: By focusing on the diamond scratching of BK7 optical glass, the Acoustic Emission (AE) mechanism in the brittle removal of optical brittle materials was analyzed and a feature extraction technique of AE signals used in processing and monitoring of optical brittle materials was studied. Various cutting depth test results show that features of brittle removal for optical glass BK7 mainly focus on two frequency bands that are $[100, 200]$ kHz and $[300, 400]$ kHz, and they correspond to different AE mechanisms. In which, filtered signal of frequency band $[100, 200]$ kHz presents obvious burst-type AE phenomenon with a time interval, which is closely related to the production and extension of cracks for optical brittle materials. On the basis of the results mentioned above, a monitoring method that uses burst-type AE events as unit was proposed. Aimed at RMS (Root Mean Square) signals of the band-pass filtering, a recognition algorithm of AE events based on convex optimization theory was studied to get the time and energy information of crack growth for optical brittle materials. It concludes that the feature monitoring method that uses AE events as unit has specific physical meanings

收稿日期: 2016-07-22; 修订日期: 2016-10-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51675453); 福建省自然科学基金资助项目 (No. 2016J01260)

and represents removal process of optical brittle materials more objectively.

Key words: BK7 glass; diamond scratching; Acoustic Emission signal(AE); feature extraction; status monitoring

1 引言

近年来,在激光瞄准系统和空天望远镜等高科技领域广泛应用的光学脆性材料由于技术指标的不断提升和需求量的激增,加工效率问题越来越突出^[1]。金刚石砂轮磨削是大口径光学元件从胚料到面成型的主要加工方式,监测磨削过程、控制磨削表面质量及亚表面损伤层厚度,是减少其后续抛光时间、显著压缩工时的关键^[2,3]。目前,这些技术也受到业界越来越多的关注。

脆性材料磨削过程中,磨粒与材料表面的接触及摩擦、裂纹产生及发展、材料破碎剥离等都伴随着声发射现象,声发射现象是一种材料内部由于受到外部条件作用引起的弹性波的瞬间释放^[4]。鉴于声发射信号与材料去除过程的密切关系,声发射监测已成为加工过程监测的常用手段之一。Martins C H R^[5]研究了砂轮修整过程中金刚石笔的磨损识别问题,将声发射特征频段滤波信号均方根值(RMS)和功率统计比作为特征输入神经网络,实现了修整工具磨损阶段的准确划分。Yang Z S^[6]在白刚玉砂轮磨削碳钢实验中,对原始声发射波形进行 coif2 小波分解,进而利用支持向量机对锋利和已磨损的两种砂轮状态进行识别划分。Liao T W^[7]将声发射信号时域相关特征带入 AdaBoot-MDC 模型,研究了针对不同工况和多种材料的更广泛意义上的金刚石砂轮磨损问题。

由于声发射信号时域波形多呈现高频随机波动,过程监测相关文献中涉及的声发射特征多为 RMS 值、中心频率、能量分布等统计意义上的简单特征^[5-9]。实际上,声发射信号并不是真正意义上的随机信号,而是信号在较长的观测时间内呈现伪随机现象。脆性材料去除过程的声发射信号,是由无数个声发射源发射的信号在时间历程上出现和叠加而成的^[10],统计特征限制了声发射信号对材料去除状态的实时表征能力。目前,小波^[11]、循环统计分析^[12]、经验模态分解^[13]等先进信号处理被成功应用于与故障诊断相关的声发射

特征提取中。但是,脆性材料去除过程的声发射现象发生时间随机,且形式多样,而故障的声发射信号一般具有较强的周期性,并在较长的时间内声发射机制也较为单一。因此,加工过程的声发射监测难度更大。另外,这些现有方法本身运算复杂,特征表达抽选,利用声发射信号监测脆性材料去除过程,需要提取更为简洁方便的监测特征。

为此,本文利用金刚石压头划刻 BK7 光学玻璃,模拟磨粒与硬脆材料的干涉过程,以多种切深基础实验的声发射数据为基础,分析 BK7 光学玻璃脆性去除的声发射机制,讨论声发射监测特征的提取思路。重点针对与脆性破裂密切相关的突发式声发射现象,建立凸优化数学模型,以声发射事件为单位研究其识别算法,得到了脆性材料裂纹扩展时刻及能量信息。

2 实验

2.1 实验装置与实验条件

实验装置如图 1 所示,以四轴精密机床为基础搭建金刚石划刻实验平台,金刚石压头通过连接件安装于机床主轴,声发射传感器通过磁力座吸附在连接件上,以确保干涉点与传感器距离始终保持不变。BK7 光学玻璃用热熔胶粘在吸附于磁力工作台的测力仪上。测力仪由 4 个型号为 S2M 的力传感器组合而成,使用测力仪的目的是保证压头轨迹与实际工件表面平行,从而实现水平划刻。划刻时,压头与工件相对速度为 10 mm/s。声发射信号采集设备采用美国物理声学公司的 PCI-2 声发射检测系统,声发射传感器型号为 R50A,采样频率为 1 MHz。

实验采用 90°洛式压头模拟磨削金刚石磨粒,实验对象是经过抛光的具有一级光洁度的 BK7 光学玻璃试件,通过机床数控系统和测力仪相配合实现等切深刻,分别进行了 5、10、15、25、30、35 μm 等 6 种切深的划刻实验。各划痕局部显微图片如图 2 所示, BK7 均以脆性去除为主。5 μm 切深时,在划痕的周围可以观察到细微的裂纹和材料崩碎留下的凹坑, BK7 以脆性去除

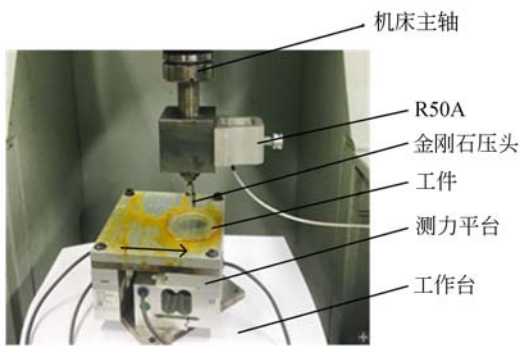


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental instruments

为主。10、15 μm 切深时,划痕旁裂纹长度及崩碎凹坑尺寸明显增加。30、35 μm 切深时,划痕旁裂纹数量有所减少,崩碎凹坑不再局限于划痕周围,其深度显著增加,甚至深入划痕底部。

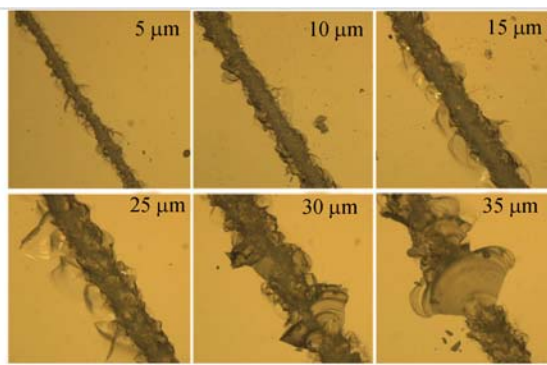


图 2 划痕局部视图(放大倍数为 20)

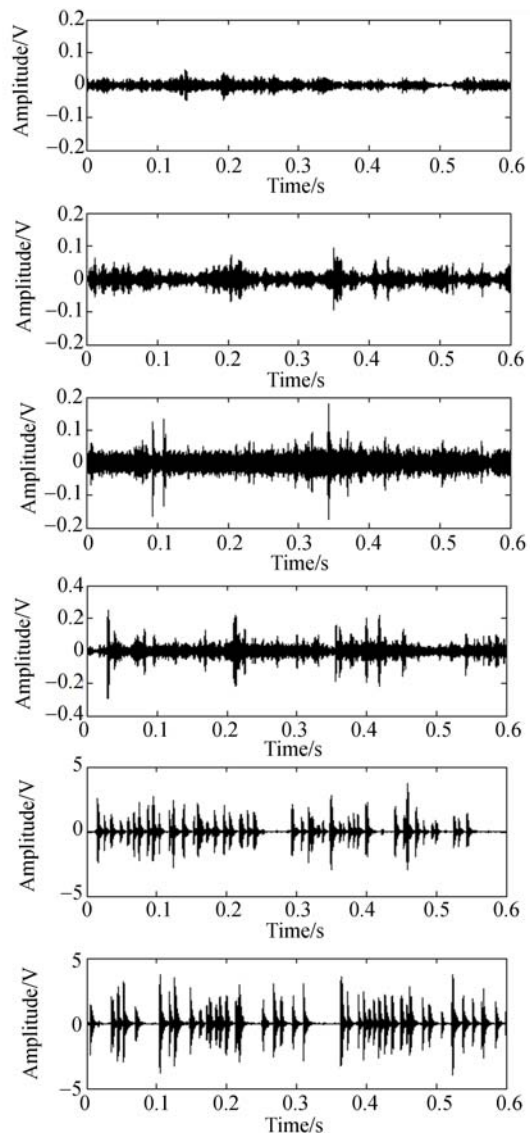
Fig. 2 Microscopic pictures of scratches

2.2 声发射信号频谱分析

图 3 所示为 6 种切深、时长 0.6 s 的声发射信号时域波形。随着切深的增加,信号幅值逐渐增加,切深超过 15 μm 后,增加幅度更为显著,并且突发式声发射信号的能量和发生频次也随着切深的增加越来越显著。

如图 4 声发射信号频谱所示,所有切深下,声发射信号的能量都相对集中在 100~200 kHz 低频段、300~400 kHz 中频段以及 450 kHz 以上高频段三个频段内。450 kHz 高通滤波信号基本属于无规律随机扰动,可能由于连接件及压头连杆等的形变、摩擦或采集误差等造成的高频干扰噪声。

[100, 200]kHz 低频段、[300, 400]kHz 中频段的带通滤波信号如图 5 所示(10 μm 和 35 μm 切深对应的滤波信号分别与 5 μm 和 30 μm

图 3 声发射信号的时域波形(自上而下切深分别为 5、10、15、25、30、35 μm)Fig. 3 Waveforms of AE signals (the cutting depth is 5 μm to 35 μm from top to bottom)

类似,鉴于篇幅省略)。图 6 为图 5(c) 低频段信号和中频段信号的局部放大图,横坐标标注时刻对应图 5(c) 中的低频段信号和中频段信号时刻;图 7 为图 5(d) 低频段信号和中频段信号的局部放大图。低频段滤波信号为随机发生的、事件间歇的突发式声发射信号,中频段滤波信号多呈现幅值随时间随机连续波动的声发射现象。切深较小时,中频段滤波信号幅值较高,低频段幅值随切深增加的增长较中频段迅速,切深 30 μm 以上时,更多的声发射能量集中在低频段内,且中频段与低频段滤波信号在时域上保持了很好的同步性。

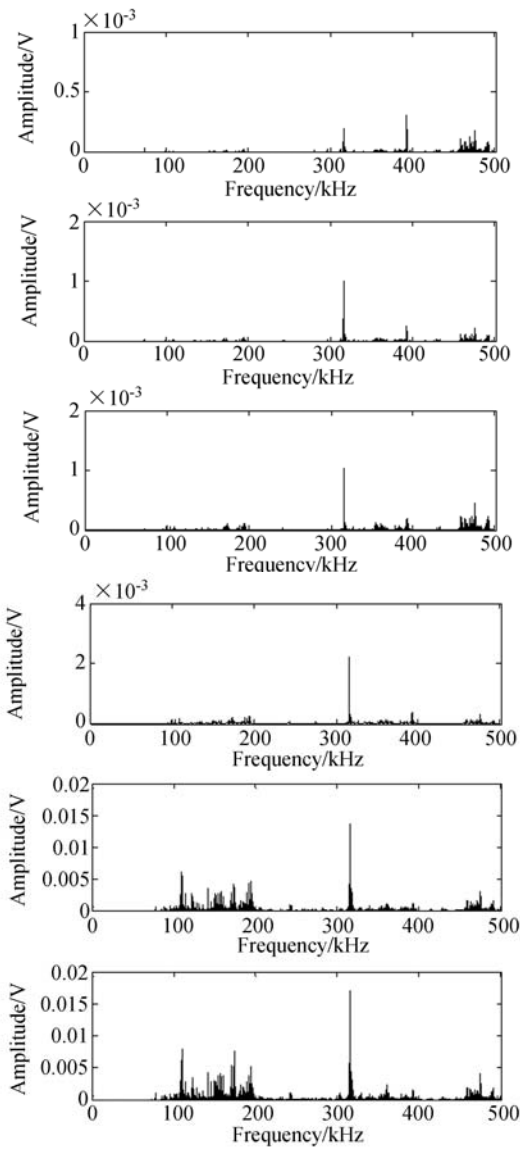
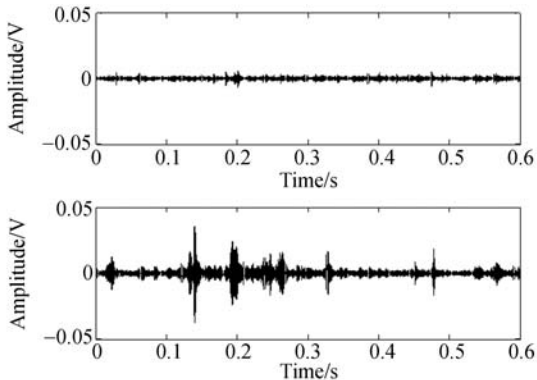
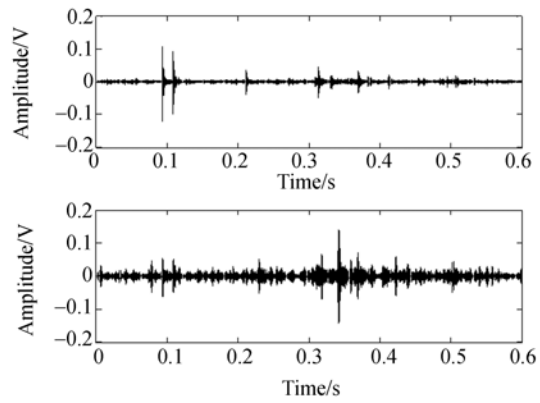


图 4 图 2 中各声发射信号对应频谱

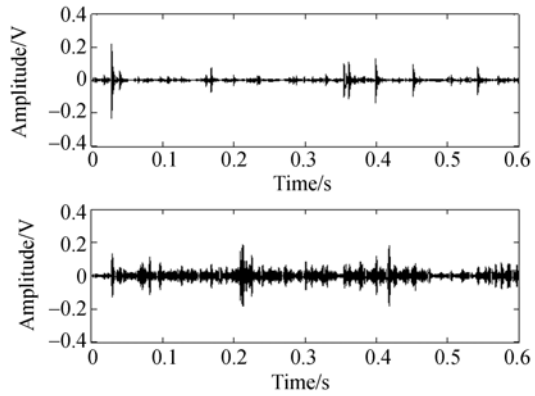
Fig. 4 Spectra of the AE signals shown in fig. 2



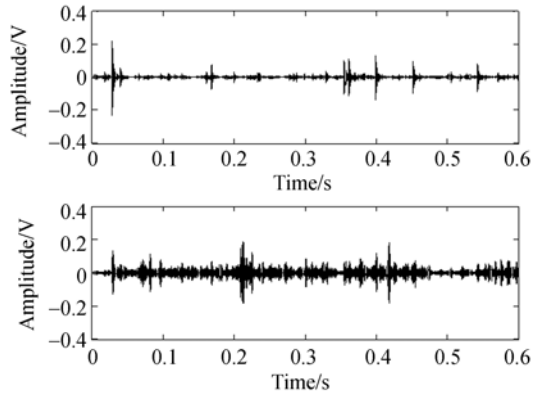
(a) 5 μm 切深对应的声发射滤波信号(上部:[100, 200]kHz;下部:[300, 400]kHz,下同)



(b) 15 μm 切深对应的声发射滤波信号



(c) 25 μm 切深对应的声发射滤波信号



(d) 30 μm 切深对应的声发射滤波信号

图 5 声发射信号带通滤波信号

Fig. 5 Band-pass filtering signals ((a) 5 μm , (b) 15 μm , (c) 25 μm , (d) 30 μm)

图 8 为切深对应声发射信号频谱的局部放大图, [100, 200]kHz 段内具有多个谱峰, 能量分布呈现宽频特性; [300, 400]kHz 段, 仅在 316 kHz 附近、2 kHz 宽度内存在单峰的能量分布。声发

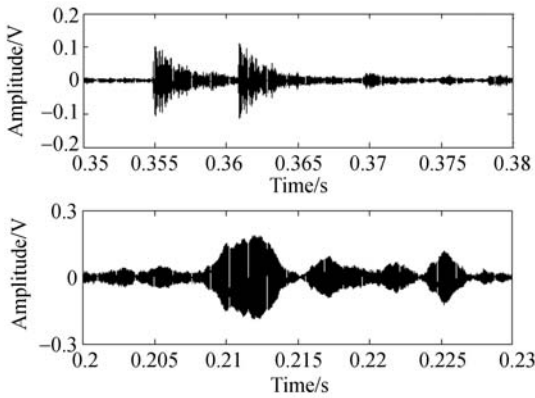


图 6 图 5(c)局部放大图

Fig. 6 Local details of fig. 5(c)

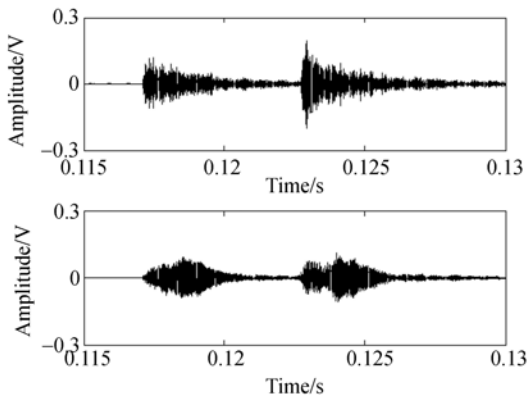
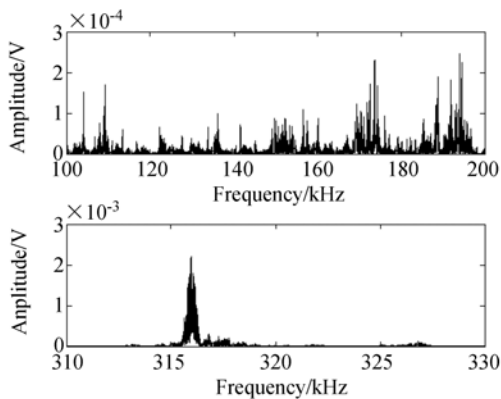


图 7 图 5(d)局部放大图

Fig. 7 Local details of fig. 5(d)

射频率由能量释放速率决定,释放速率越大,声发射信号频率越高^[14]。因此,低频段和中频段滤波信号的声发射机制不同。

图 8 25 μm 切深声发射信号频谱局部放大图Fig. 8 Spectrum details of the case 25 μm

[100, 200]kHz 频带主要对应裂纹萌发与扩

展的能量释放,是典型的时间间歇突发式声发射信号。由于微裂纹形态与尺度的不同,释放频率具有较大的随机性,因此呈现宽频特性。[300, 400]kHz 中频段对应的声发射信号频谱结构单一,说明其对应声发射能量释放机制较为单纯,猜测是由近表面层微裂纹延伸至表面,造成脆性材料的崩碎引起的能量释放现象。BK7 光学玻璃近表层无法避免地存在显微裂纹和局部缺陷,小切深时,干涉作用产生的裂纹在基体中扩展,未必扩展到表面造成材料崩碎,而原始存在的微裂纹则有可能在干涉作用下继续扩展直至材料崩碎。因此,从滤波信号时域图上来看,小切深时低频段和中频段滤波信号时间上并不同步;而切深增大,尤其当切深在 30 μm 以上时,脆性材料的开裂和崩碎趋于同步,两种声发射机制在发生时间上保持了较好的一致性。从图 2 划痕局部视图对比也可以看出,在 25 μm 切深及以下,划痕附近可以观测到明显的裂纹,而 30、35 μm 切深时,裂纹多直接发展成为较深的崩碎凹坑。

3 声发射监测特征提取

由 2.2 分析可知,[100, 200]kHz 低频段、[300, 400]kHz 中频段是声发射信号的特征频段,对应了不同的声发射机制。其中,中频段以频域窄带为基本特征,因此,中间频率、峰值、能量分布等频率域的常规统计特征可以作为监测参数,反映一段时间内脆性材料表面成形情况。对于 [100, 200]kHz 的低频段,由于裂纹产生与发展情况复杂,频带内存在多个能量集中区域,且能量分布无规律,故难以准确实现频域特征的监测。相比复杂的频谱结构,低频段滤波信号的时域表现为明显的时间间歇突发式声发射信号,每一个震荡衰减的声发射信号就代表了某个时间点上,脆性材料表面及亚表面裂纹的情况。为此,以突发式声发射事件为单位,识别裂纹产生时刻及其能量具有更大的现实意义,以下将对低频段滤波信号中突发式声发射事件的识别进行研究。

3.1 理论基础

假定声发射原始波形在 [100, 200]kHz 频段的带通滤波信号为 x ,其 RMS 信号 $y \in R^n$ 可以表示为:

$$y(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x(i+k \cdot L)|^2 \quad k = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

其中参数 $L \in \mathbb{N}$, L/f 决定了 RMS 信号的时域分辨能力。突发式声发射事件识别目标是确定事件发生的时刻以及冲击能量的大小,并不关注实际的震荡频率,因此, RMS 信号可以完全替代原带通滤波信号得到其包络形式。这一替代有利于压缩计算时间。

然后,建立 RMS 信号 y 的凸优化数学模型如下^[15]:

$$\min \|\hat{y} - y\|_2^2 + \delta \|D\hat{y}\|_2^2, \quad (2)$$

其中 \hat{y} 表示 y 的估计值; $\|\hat{y} - y\|_2^2$ 表示 L_2 范数下,估计信号与真实信号的接近程度; $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{(n-1) \times n}$ 是双对角矩阵:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$\|D\hat{y}\|_2^2$ 展开形式如下:

$$\|D\hat{y}\|_2^2 = \sum_{i=1}^{n-1} (\hat{y}_{i+1} - \hat{y}_i)^2, \quad (4)$$

上式临近两个点偏差的 L_2 范数,反映了 y 的平滑程度。式(2)中系数 δ 表示 $\|\hat{y} - y\|_2^2$ 和 $\|Dy\|_2^2$ 这两部分在优化问题中的权重,是估计信号 \hat{y} 接近真实信号的程度和自身光滑程度的综合考量。

式(2)是标准的无约束凸优化问题,根据凸优化基本理论可以得到其解:

$$\hat{y} = (\mathbf{I} + \delta \mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} y, \quad (5)$$

其中 \mathbf{I} 是单位矩阵, \mathbf{D}^T 是矩阵 \mathbf{D} 的转置。

3.2 声发射监测特征

基于以上数学模型,突发式声发射事件识别步骤如下:

(1)、对声发射原始信号进行 [100, 200] kHz 带通滤波,得到滤波信号 x ;

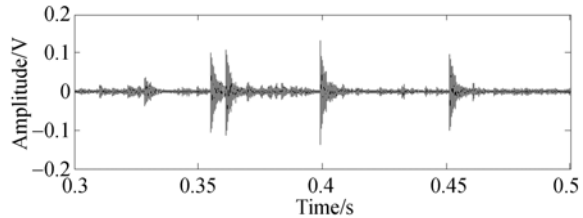
(2)、根据式(1)得到其 RMS 信号 y ;

(3)、设定权重参数 δ ,根据式(5)得到信号 y 的平滑信号;

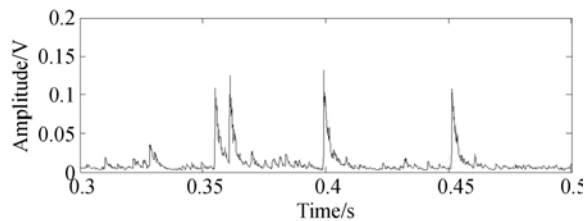
(4)、得到 \hat{y} 的局部极大值点,并与预先设定的阈值 V_{ex} 进行对比,得到高于阈值的局部极大值点。每一个局部极大值点对应一次突发式声发

射事件,监测局部极大值点位置和幅值,可以准确把握材料脆性去除的历程。

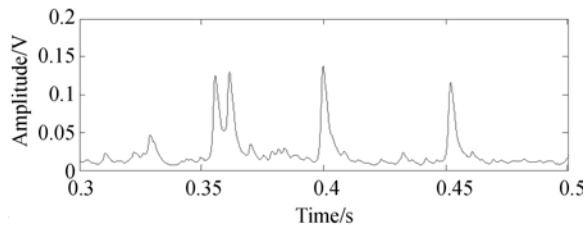
根据以上理论分析和实施步骤对数据进行处理,图 9、图 10 分别为切深 25 μm 和 30 μm 对应声发射信号的一系列处理过程(为清楚起见,切深



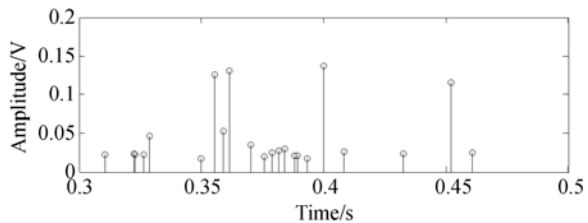
(a) [100, 200] kHz 带通滤波得到滤波信号 x
(a) Filtering signal x



(b) RMS 信号 y
(b) RMS signal y



(c) 平滑估计信号 \hat{y}
(c) Estimation signal \hat{y}



(d) \hat{y} 幅值大于阈值 V_{ex} 的局部极大值点
(d) Burst-type AE events

图 9 25 μm 切深对应声发射信号的突发式声发射事件识别过程

Fig. 9 Identification procedure of burst-type AE events for the case of 25 μm

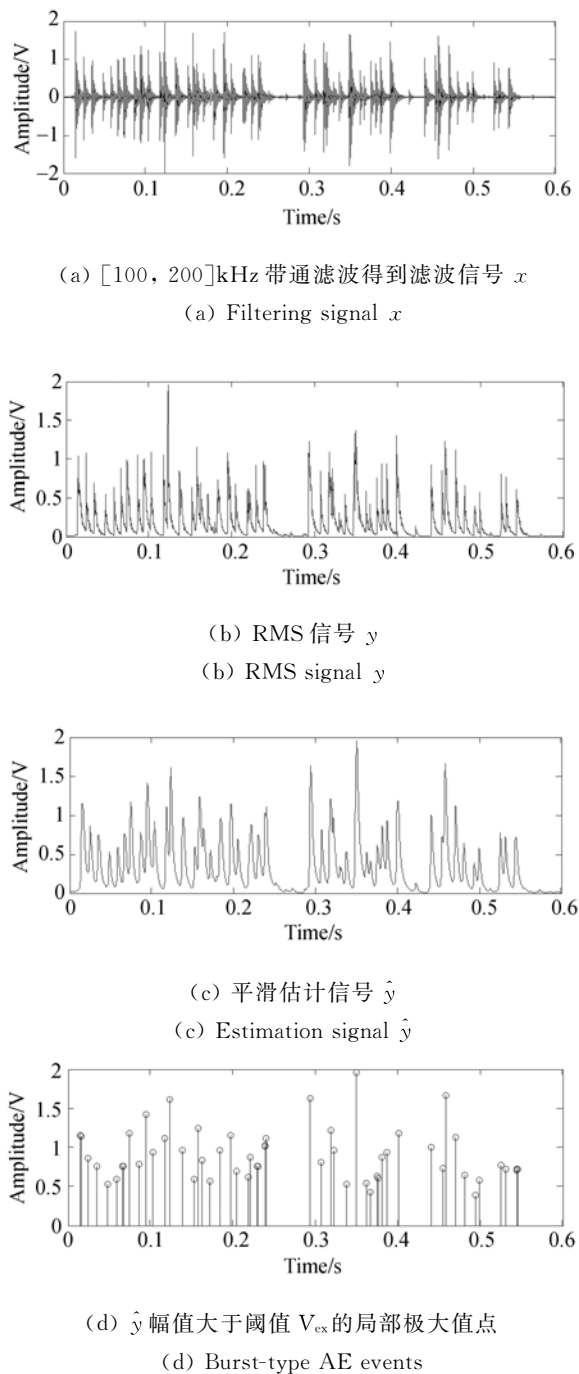


图 10 30 μm 切深对应声发射信号的突发式声发射事件识别过程

Fig. 10 Identification procedure of burst-type AE events for the case of 30 μm

25 μm 的示例用局部显示), 图中(a)~(d)依次对应上述 4 个步骤。式中的参数取 $m=200$, $L=100$, 此时信号 y 的分辨率为 10^{-4} s, 参数 m 和 L 的取值没有严格限制, 可以根据能够接受的 RMS 信号分辨率进行选择, 只是由于突发式声发射事

件在时间上有相互重叠的情况, m 和 L 过大时将有可能无法区分相邻两次的突发式事件。

式中权重 $\delta=40$, δ 用于平衡相似度和光滑度两个优化目标, δ 应该取较大数值, 以加强对 RMS 信号的平滑效果, 使平滑后的 RMS 信号中单次冲击仅存在一个局部极大值。由于信号局部极值的求取非常方便, 故将大于某一阈值的局部极值点作为监测参数可实现对突发式声发射事件的监测, 从而使监测结果具有更清晰的物理意义。实际监测中可根据数据波动情况尝试参数 δ 的取值, 对于文中所涉及的信号, δ 的取值在 30~50 均可实现监测效果。实际工作中, 如果 δ 的取值过大, RMS 信号中微小冲击将被过分平滑而无法识别。

局部极大值点阈值 V_{ex} 取信号 y 均方根值的一半, 即: $V_{ex} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y(j)|^2$, 该实例中的阈值选择仅为验证方法的可行性, 实际监测中可以根据经验选择绝对阈值用于连续加工过程的监测。

图 9(a)与(d)、图 10(a)与(d)的对比说明, 信号中的突发式声发射事件与局部极大值点有较好的一一对应关系, 在此基础上, 可以统计连续加工过程中与裂纹相关的突发式声发射事件, 用于监控加工过程。与传统振铃计数等声发射统计特征相比, 以声发射事件为单位的监测技术具有更明确的实际物理意义, 可以更好地适应不同加工参数与加工条件, 为加工状态监测提供更客观准确的声发射特征。

4 结 论

本文以 90°金刚石压头划刻 BK7 光学玻璃为研究对象, 分析脆性材料脆性去除过程中的声发射机制, 多种切深实验证实 BK7 光学玻璃声发射特征主要集中在 [100, 200]kHz、[300, 400]kHz 两个频段内, [300, 400]kHz 段具有窄带单峰的

频率特征,声发射机制较为单一,与材料崩碎有较大关系;[100, 200]kHz段滤波信号则在时域具有显著的时间间歇突发式声发射现象,与裂纹产生与扩展密切相关。文中重点针对[100, 200]kHz段滤波信号进行了突发式声发射信号特征

识别方法研究,基于凸优化数学模型,提出了以突发式声发射事件为单位的监测特征提取方法。该方法能够准确识别与裂纹相关的声发射事件的发生时刻及能量大小,为状态监测提供客观的、具有明确物理意义的声发射特征。

参考文献:

- [1] BRECKINRIDGE J B, LILLIE C F. Prime focus architectures for large space telescopes; reduce surfaces to save cost[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9904:99044k.
- [2] YU T B, LI H N, WANG W S. Experimental investigation on grinding characteristics of optical glass BK7: with special emphasis on the effects of machining parameters[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(5):1405-1419.
- [3] 吕东喜,王洪祥,黄燕华. 光学材料磨削的亚表面损伤预测[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3):680-686.
- LÜ D X, WANG H X, HUANG Y H. Prediction of grinding induced subsurface damage of optical materials[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):680-686. (in Chinese)
- [4] LEE D E, HWANG I, VALENTE C M O, et al.. Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(2):176-188.
- [5] MARTINS C H R, AGUIAR P R, FRECH A, et al.. Tool condition monitoring of single-point dresser using acoustic emission and neural networks models[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2014, 63(3):667-679.
- [6] YANG Z S, YU Z H. Grinding wheel wear monitoring based on wavelet analysis and support vector machine[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 62(1-4):107-121.
- [7] LIAO T W, TANG F M, QU J, et al.. Grinding wheel condition monitoring with boosted minimum distance classifiers[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2008, 22(1):217-232.
- [8] CAESARENDRA W, KOSASIH B, TIEU A K, et al.. Acoustic emission-based condition monitoring methods: Review and application for low speed slew bearing[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2016, 72-73:134-159.
- [9] CHEN P C, SU Y F, YANG S Y, et al.. Determination of Initial Crack Strength of Silicon Die Using Acoustic Emission Technique[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(7):2497-2506.
- [10] AHN B W, LEE S H. Characterization and acoustic emission monitoring of AFM nanomachining [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2009, 19(4):45028.
- [11] SADEGH H, MEHDI A N, MEHDI A. Classification of acoustic emission signals generated from journal bearing at different lubrication conditions based on wavelet analysis in combination with artificial neural network and genetic algorithm[J]. *Tribology International*, 2015, 95:426-434.
- [12] VICUÑA C M, ACUÑA D Q. *Cyclostationary processing of vibration and acoustic emissions for machine failure diagnosis* [M]. CHAARI F, LESKOW J, NAPOLITANO A. Cyclostationarity: Theory and Methods. Switzerland: Springer, 2014: 141-156.
- [13] LI R Y, HE D. Rotational Machine Health Monitoring and Fault Detection Using EMD-Based Acoustic Emission Feature Quantification[J]. *IEEE*

Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(4):990-1001.

- [14] 龙宪海, 阳能军, 王汉功. 基于声发射技术的 30CrMnSi 钢断裂机理研究[J]. 材料工程, 2011 (1):17-22.

LONG X H, YANG N J, WANG H G. Fracture

mechanism for 30CrMnSi steel based on acoustic emission technology [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011(1): 17-22. (in Chinese)

- [15] BOYD S, VANDENBERGHE L. *Convex Optimization* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

作者简介:



毕 果(1978—),女,河南南阳人,工学博士,副教授,2000年于郑州工业大学获学士学位,2003年于郑州大学获硕士学位,2007年于上海交通大学获博士学位,主要从事精密加工过程监测等方面的研究。Email:guobi@xmu.edu.cn



彭云峰(1977—),男,江西吉安人,教授,2006年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事精密工程方面的研究。E-mail:pengyf@xmu.edu.cn