

# 锯切圆柱形 42CrMoA 的声发射监测试验

陈冰<sup>1</sup> 毕升豪<sup>1</sup> 王健<sup>1</sup> 邓朝晖<sup>1</sup> 刘国跃<sup>2</sup>

(1 湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201)

(2 湖南泰嘉新材料科技股份有限公司, 长沙 410203)

**文 摘** 针对锯切加工中的带锯条磨损状态未知、锯切质量下降等问题, 本文研究了新试制的 FTCUT 双金属带锯条锯切圆柱形 42CrMoA 合金结构钢过程中锯切行为的变化, 探讨了声发射信号与单刀锯切过程、锯齿磨损和锯切表面质量变化的关联。研究表明: 锯切圆柱材料时随着锯切深度的变化, 参与齿数先增大后减小, 带锯条约束条件不断变化, 进而影响着声发射信号幅值和锯切表面质量; 基于时域分析可知锯齿磨损过程分为磨合磨损、快速磨损、稳定磨损三个阶段; 基于 FFT 频域分析发现当频谱图出现多个主频, 且第一主频幅值下降时, 表明声发射信号来源比较分散, 即可认定带锯条失效; 基于小波包频域分析发现第 7 频段信号占比最高, 最能反映工件表面质量的变化, 其波动情况与锯切表面的微纹和波纹情况可建立一定的联系。因此, 可基于声发射信号时域和频域分析判断锯齿磨损和锯切表面恶化情况, 为锯齿磨损和锯切表面质量的在线监测提供一定的思路。

**关键词** 声发射, 时域分析, 频域分析, 小波包分解, 锯齿磨损, 在线监测

中图分类号: TB332

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2023.04.014

## Monitoring Experiment of Acoustic Emission of Sawing Cylindrical 42CrMoA

CHEN Bing<sup>1</sup> BI Shenghao<sup>1</sup> WANG Jian<sup>1</sup> DENG Zhaohui<sup>1</sup> LIU Guoyue<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

(2 Hunan Taijia New Material Technology Co., Ltd., Changsha 410203)

**Abstract** In order to solve the problems of unknown bandsaw blade wear state and the deterioration of sawing quality in sawing process, the sawing behavior change of FTCUT bimetallic bandsaw blade during sawing of 42CrMoA alloy structure steel was studied and the relationship between acoustic emission signal and the single-blade sawing process, saw teeth wear and sawing surface quality change was discussed. The results indicate that with the change of sawing depth, the number of saw teeth increases first and then decreases and the constraints of the bandsaw change constantly, which affects the acoustic emission signal amplitude and sawing surface quality. Based on the time domain analysis, the saw teeth wear process can be divided into three stages: run-in wear, fast wear and stable wear. Based on the FFT frequency domain analysis, it is found that when there are multiple dominant frequencies in the spectrum diagram and the amplitude of the first dominant frequency decreases, the acoustic emission signal sources are scattered, and the bandsaw blade failure can be determined. Based on the analysis of wavelet packet frequency domain, it is found that the 7<sup>th</sup> frequency band signal has the highest proportion and can reflect the change of workpiece surface quality. A certain relationship can be established between the fluctuation and micro grain and ripple of the sawing surface. Therefore, the saw teeth wear and sawing surface deterioration can be analyzed and judged based on acoustic emission signal in time domain and frequency domain. A certain idea for online monitoring of saw teeth wear and sawing surface quality is provided.

**Key words** Acoustic emission, Time domain analysis, Frequency domain analysis, Wavelet packet decomposition, Saw teeth wear, Online monitoring

收稿日期: 2021-09-28; 修回日期: 2023-08-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 52175401); 湖南省研究生科研创新项目 (QL20210239)

第一作者简介: 陈冰, 1986 年出生, 博士, 副教授, 主要从事难加工材料的精密加工及其加工过程的在线监测技术工作。E-mail: chenbing@hnust.edu.cn

## 0 引言

带锯条锯切加工具有去除材料效率高、材料适应性好等优点,在钢铁、木材、机械、汽车、造船、石油、矿山和航空等领域被广泛使用<sup>[1]</sup>。然而,在锯切过程中由于机床结构、工艺参数、工件材质不均(或夹有杂质)等原因导致带锯条磨损、锯切质量下降等问题,进而使得带锯条失效<sup>[2]</sup>。随着材料科学技术的快速发展,出现了多种贵重材料,在锯切下料阶段贵重材料的浪费导致加工成本过高,因此,这就对带锯条锯切加工效率和质量提出了更高的要求。目前国外一些锯切企业依靠多年技术创新的积累和智能技术的应用,加工的工件端面表面质量可以达到粗铣水平,有的机型甚至可以达到半粗铣水平,“以锯代车铣”已经成为我国高端智能锯切设备的发展趋势<sup>[3]</sup>。因此,对锯切过程进行在线监测就显得尤为重要。

声发射监测技术是一种在线无损监测技术,具有优越的灵敏度和信噪比,并且其具有频率范围宽,易于安装等优点<sup>[4]</sup>。因此,国内外学者将声发射监测技术应用于锯切加工中<sup>[5-7]</sup>。ALFREDO<sup>[8]</sup>利用圆锯片对中密度纤维板进行锯切试验研究,发现锯切的声发射信号能量与表面粗糙度之间有密切的联系,当锯切表面粗糙度增加时,锯片与工件表面摩擦产生的应力波强度随之增加,导致声发射的能量值也增加,但其特征信号表征方法单一。张美琴等<sup>[9]</sup>研究了圆盘锯锯切花岗石过程的声发射信号特征,研究表明声发射信号的均方根值随锯切参数的变化趋势一致,且花岗石的抗压强度越高,声发射信号的均方根值越大,但其特征信号表征方法也较单一。HU等<sup>[10]</sup>设计金刚石圆锯片锯切混凝土试验,分析了锯切力信号与加工状态之间的关系,研究表明锯切力信号对加工状态和表面质量具有更好的识别能力,而声发射信号与锯切力信号之间存在一定的延迟性。BEREND<sup>[11]</sup>采用圆形锯片对混凝土锯切加工,发现锯切混凝土过程中混凝土结构成分发生变化时,声发射信号的主要频率也发生了明显的变化,为混凝土切割的实时监控和锯切工艺参数的实时调整提供了参考依据,但并未对同一结构成分的表面质量和声发射信号之间的联系进行研究。VAHID等<sup>[12]</sup>提出了一种基于多传感器融合的方法来监测刀具温度,发现声发射在刀具温度监测方面比其他信号具有更好的性能,其与振动信号结合可以达到最佳监测效果。杨静榕<sup>[13]</sup>研究发现可根据声发射计数率表征与预测木工带锯机在曲线锯削时切削面波纹成分的振幅和粗糙度成分的振幅。ZHU等<sup>[14]</sup>提出通过监测木工带锯机锯切过程中的声发射信号来检测齿槽

裂纹的方法,发现随着齿槽裂纹数量的增加,声发射信号的振幅增大,锯切表面质量变差;但没有建立不同粗糙度与声发射信号之间的对应关系,无法实现锯切表面质量的在线监测。陈冰等<sup>[15]</sup>发现双金属带锯条在锯切GCR15圆柱棒料过程中,当开始出现剧烈磨损时,声发射原始信号、峰值、均值、和峰值频域均发生突变情况,因此可由信号突变特征判断带锯条初始剧烈磨损时间,从而避免坯料斜切现象的发生,但没有从锯切加工过程及机理变化,描述声发射信号特征突变的原因。

综上所述,目前少有研究考虑了带锯条锯切加工过程及机理变化与声发射信号特征变化之间的关系,且特征信号分析处理手段有限。因此,本文采用卧式单立柱金属带锯床对42CrMoA圆柱棒料进行锯切试验,分析锯切圆柱形坯料过程中带锯条参与齿数、齿数变化率和振动状态的变化等,采集锯切过程全生命周期的声发射信号,进行时域和频域的特征分析,提取带锯条磨损和工件表面恶化的信号特征,进而实现带锯条磨损和锯切表面质量的监测,拟为带锯条锯切金属构件的在线监测提供一种思路。

## 1 锯切加工过程

此实验是带锯条垂直于工件截面进行的,如下图1所示。在这个过程中带锯条存在两个方向的运动,即水平方向的匀速锯切运动和垂直于工件截面的进给运动。由于工件为圆柱形,随着锯切深度的增加,参与加工的锯齿数量也随之变化。根据带锯条与工件之间的几何关系,可以计算出参与锯切的带锯条长度与锯切深度的关系为

$$L = 2\sqrt{[d(220 - d)]} \quad (1)$$

式中: $L$ 为参与加工的带锯条长度; $d$ 是锯切的深度。

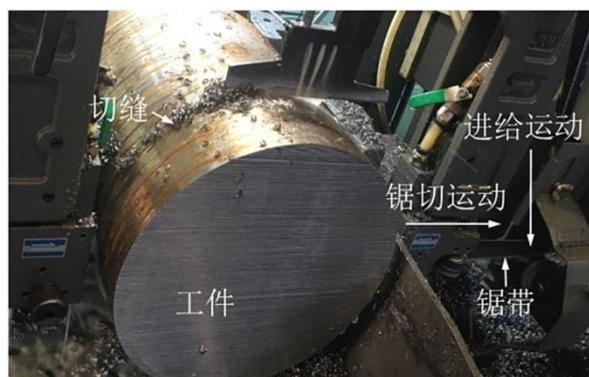


图1 锯切加工圆柱工件

Fig. 1 Sawing of cylindrical workpieces

实验中采用的带锯条为某带锯条生产企业研制的新锯条,设计锯齿齿距为TPI 2/3,带锯条宽度为34 mm,因此,参与锯切的齿数与锯切深度的关系为

$$N = 0.2 \sqrt{d(220 - d)} \quad (2)$$

式中,  $N$  为参与加工的锯齿个数。

由式(2)可得齿数随锯切深度变化的曲线图,如图2所示,并对式(2)求导,可得齿数变化率随锯切深度变化的曲线图,如图2所示。由图2中齿数变化曲线可知,在锯切圆柱形工件时,随着锯切深度的增加,参与加工的锯齿个数先增大后减小;而由图2中齿数变化率曲线可知,其主要分为三个阶段,有两个拐点,两个拐点之间齿数变化率差异不大,表明在两个拐点之间锯切过程相对稳定,并且约占工件直径的4/5。

锯切中锯齿的断续切削使得带锯条断续受力,进

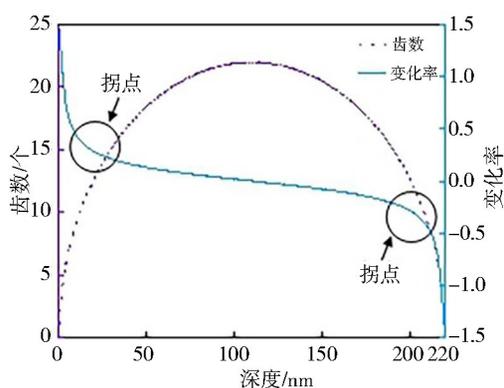
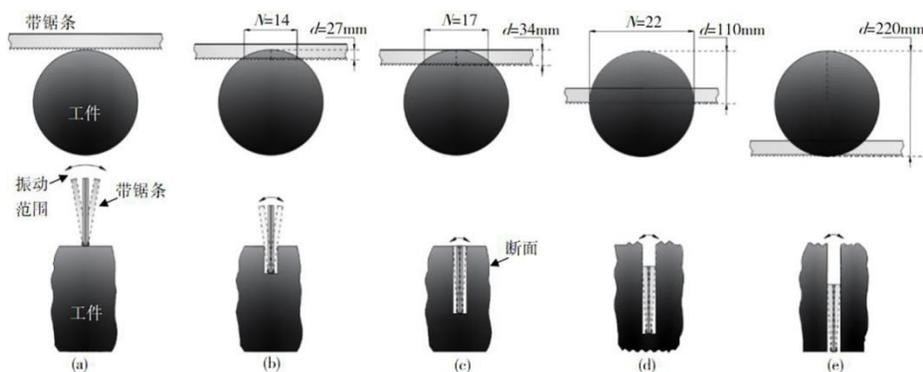


图2 齿数、齿数变化率随锯切深度的变化曲线

Fig. 2 The change curves of the number of saw teeth and the change rate of the number of saw teeth with the cutting depth



注:(a)刚接触时,(b)切入27 mm,(c)完全没入,(d)切入110 mm,(e)切入220 mm。

图3 锯切截面和侧面示意图

Fig. 3 Sawing section and side view

## 2 锯切加工实验平台及其声发射信号来源

### 2.1 锯切加工实验平台

为探究锯切过程中锯齿磨损、锯切表面质量与声发射信号之间的关系,设计了锯切加工试验,实验采用某带锯条生产企业试制的FTCUT双金属带锯条,其齿部和背部材料分别为M42高速钢和D6A弹簧钢。M42高速钢硬度、热硬性高(常温硬度为69~70 HRC,600 °C时的高温硬度为54~55 HRC),耐磨性良好。而D6A弹簧钢高韧性耐磨,耐蚀性优良,延展性极强,淬透性良好。在圆柱卧式带锯床A-33上进

而出现频率与齿间距和分齿角度相关的振动,而带锯条的振幅与其所受工件的约束状态有关,随着锯切深度的增加,带锯条锯齿侧和背带侧受工件的约束状态逐渐发生变化,如图3所示。图3(a)为带锯条刚与工件相接触时的状态,由图2可知,此时参与锯切的齿数极少,同时锯齿侧被工件约束的深度也极浅,而背带侧几乎全部处于自由状态,不受约束。图3(b)为切入深度为27 mm时的状态,根据式(2),此时参与锯切的齿数是14个,锯齿侧全部进入工件且受约束的长度增加,背带侧部分进入工件并受切缝壁的约束,使得背带顶部的振幅与图3(a)相比变小。图3(c)为切入深度为34 mm时的状态,带锯条完全进入工件,根据式(2),此时参与锯切的齿数是17个,锯齿侧受工件约束的长度进一步增加,同时,其背带侧完全进入工件,受切缝壁的完全约束,使背带顶部的振幅进一步减小。图3(d)为切入深度为110 mm时的状态,根据式(2),此时参与锯切的齿数是22个,锯齿侧受到工件约束的长度达到最大值,背带侧同样受到切缝壁的完全约束,背带顶部的振幅与图3(c)相同。图3(e)是切入深度为220 mm,为即将切断工件的状态,由图2可知,此时参与锯切的齿数极少,锯齿侧受到工件约束的长度减小,同时背带侧受到切缝壁的完全约束,其顶部的振幅与图3(c)、3(d)相同。

行带锯条全生命周期的锯切实验,直至失效。依据锯切加工系统的特性,搭建了锯切过程的声发射信号采集系统,如图4所示,包括G150-2声发射传感器、PAS声发射前置放大器、NI公司的USB6351数据采集卡以及基于LabVIEW编写的声发射采集软件系统,信号的传播路径为:吸附在工件上的声发射传感器采集锯切声发射源通过材料传递过来的应力波信号,并转换成模拟电压信号,经前置放大器放大后传输至采集卡,最后转换成数字信号显示和存储在计算机中。锯切材料为42CrMoA,直径为220 mm的圆

柱形工件,此材料强度、淬透性高,韧性好,抗拉强度 1 080 MPa,屈服强度大于 930 MPa,退火或高温回火供应状态布氏硬度 HBW $\leq$ 217。锯切加工参数为:锯切线速度 8.4 m/min、进给速度 20.3~23.5 mm/min,设置采样频率为 200 kHz,采集并存储声发射信号。在试制的 FTCUT 带锯条锯切至第 15 刀时,工件锯切表面质量严重下降,且单刀锯切时间为第一刀的 2 倍以上,业内判定失效。

## 2.2 锯切声发射信号的来源

声发射是固体材料或构件在变形时以应力波形式快速释放能量的一种常见物理现象。带锯条锯切加工是一种每齿进给量少且材料去除不连续的金属切割工艺。金属在锯切过程中会发生剪切和滑移,图 5 表示了金属滑移过程,其中滑移线和流动轨迹线基本相互正交,横向线是金属流动轨迹线,纵向线是金属剪切滑移曲线<sup>[16]</sup>。切削加工金属材料过程中 AE 信号源主要来自以下几个方面:刀具与工件的摩擦碰撞、材料去除的弹塑性变形、锯切过程中切屑的

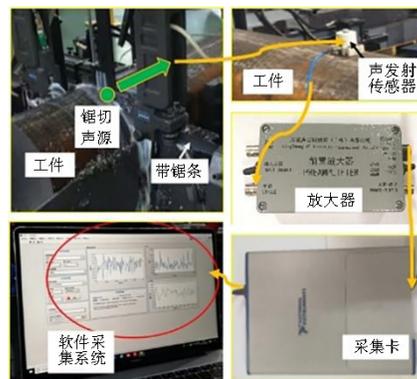


图 4 锯切声发射信号采集系统

Fig. 4 Sawing acoustic emission signal acquisition system

形成、锯齿的磨损及切屑的断裂等<sup>[17]</sup>。因此,锯切中声发射信号源主要来自于:(1)材料在第一变形区的剪切变形;(2)切屑在第二变形区的二次变形和与前刀面的摩擦碰撞;(3)材料在第三变形区与后刀面的挤压和摩擦;(4)锯齿的崩刃和磨损。图 5 中的浅色箭头显示了锯切过程中声发射信号的来源,图 5 中 I、II、III 分别为第一、二、三变形区。

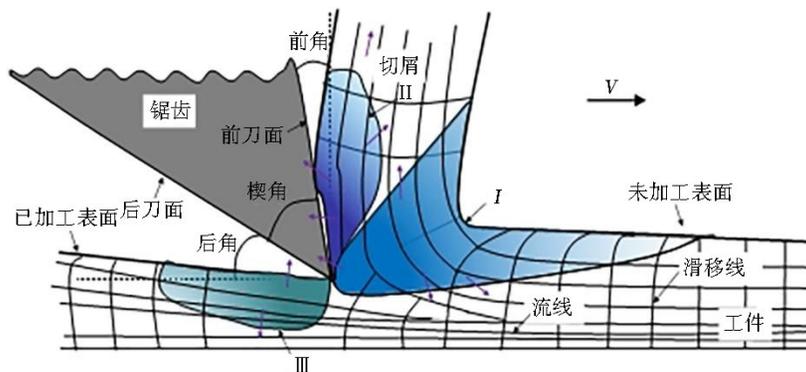


图 5 锯切声发射的来源

Fig. 5 Source of sawing acoustic emission

## 3 声发射信号分析

### 3.1 原始声发射信号分析

图 6 为试制的 FTCUT 带锯条锯切第 3、4、10、11、14 和 15 刀的原始声发射信号。由图 6 可知,每刀的锯切原始声发射信号基本均主要包括 5 个阶段:①锯切前空程阶段;②锯切加工第 1 阶段;③锯切加工第 2 阶段;④锯切加工第 3 阶段;⑤退出锯切阶段。以第 10 刀为例,在锯切空程阶段(约前 10 s)信号幅值特别小,小于 0.1 V;随着带锯条向下移动,锯齿与工件接触进入锯切加工第 1 阶段,信号幅值增大到 0.6 V,持续 10 s 左右,这是因为锯齿与工件刚接触时振动冲击较大,产生了较大的应力波;随着稳定锯切和振动冲击的消除信号幅值逐渐减小至最小 0.4 V 左右后,再缓慢增大直至第 1 阶段结束,这是由于随着锯切深入,参与切削齿数逐渐增加,锯齿去除材料行为增强,导致信号的幅值增大;然而,从第 1 阶段进入

第 2 阶段时,信号由 0.5 V 左右突变增大至 3.2 V 左右,推测其原因有两个:一是由于如图 2 所示参与锯切齿数变化率曲线第一个拐点处引起的,此时参与锯切齿数变化率由急剧减少突变为缓慢减少;二是由于如图 3 所示的背带由工件不完全约束突变为全部约束,使得带锯条的振动行为发生突变,两个原因的复合作用使信号发生突变。进入第 2 阶段后,信号在长时间内保持在 3.2 V 左右,这同样是由两个原因引起的:一是由于如图 2 所示的参与锯切齿数变化率在第一个拐点后变为缓慢减少;二是由于如图 3 所示的背带进入工件后被完全约束而未发生变化,两个原因的复合作用使信号幅值在长时间内几乎不变。进入第 3 阶段时,信号由 3.2 V 左右突变减小至 0.7 V 左右,推测其原因是如图 2 所示的参与锯切齿数变化率第二个拐点引起的,此时参与锯切齿数变化率由缓慢减少突变为急剧减少,使得信号在此处发生

突变。进入第3阶段后,信号由0.7 V左右减小至0.1 V左右,这是由于随着锯切进行,参与切削齿数逐渐减少,锯齿去除材料行为减弱,导致信号的幅值降低。此外,第3阶段时间小于第1阶段时间,推测这是由于第3阶段背带被工件完全约束,而第1阶段未被工件完全约束,因而第3阶段带锯条的振动行为比第1阶段更为稳定,去除材料效率更高。此外,纵观带锯条整个生命周期,发现信号在锯切时间最长的第2阶段的占比随着锯切刀数的增大而减小,单刀锯切时间随着锯切刀数的增加而增加。同时,信号

在第3和4刀每个锯切加工阶段的波动均较大,这是由于锯齿在制造过程中齿高不一致,使得去除材料行为不稳定引起的;然而,信号在第10和第11刀的每个锯切加工阶段具备一定的规律性和稳定性,这是由于经过前几刀的锯切加工使得锯齿高度相对一致,因而去除材料行为逐渐稳定;最后,相比第10和第11刀,信号在第14和第15刀的锯切加工第2阶段存在一定的波动,这是由于随着锯切刀数的增加,锯齿逐渐被磨损,因而齿部剪切作用减弱而挤压与摩擦作用增强,使得去除材料行为不稳定。

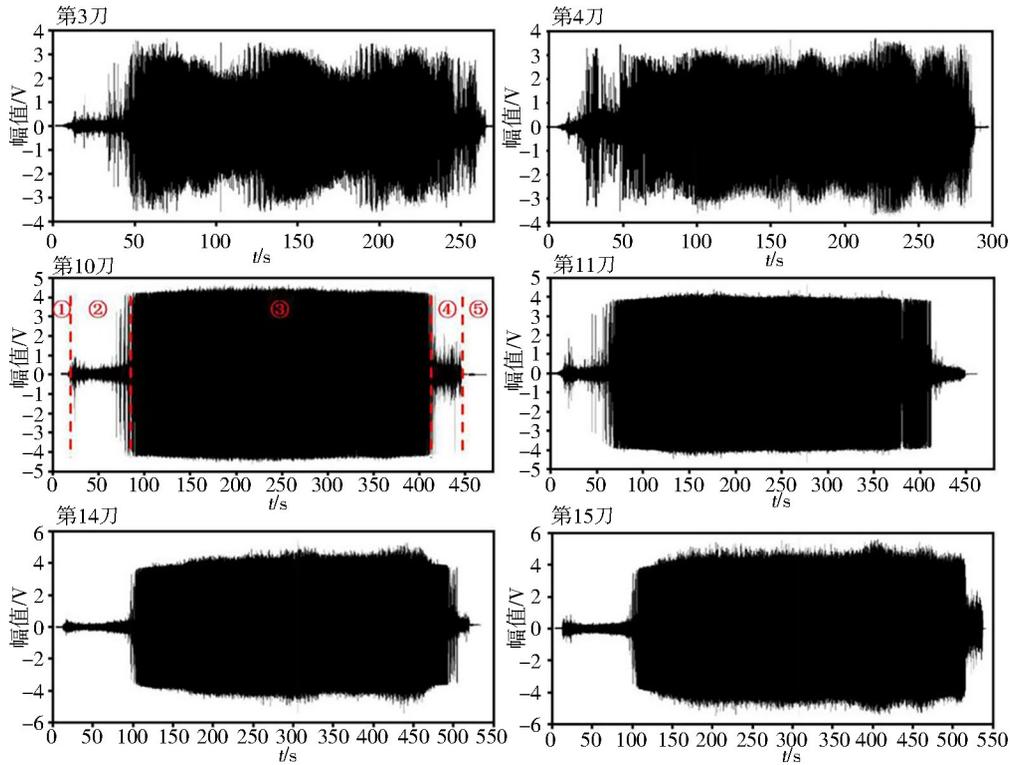


图6 第3、4、10、11、14、15刀完整声发射原始信号

Fig. 6 The original signal of complete acoustic emission for the 3<sup>rd</sup>, 4<sup>th</sup>, 10<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, 14<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup> sweeps

### 3.2 声发射信号时域分析

由图6可以看出,声发射原始信号中③锯切加工第2阶段占据了单刀锯切时间的大部分,决定了最终的工件表面质量。因此,为了减少信号处理时间,提高处理效率,先提取每刀中此阶段其中1 s的声发射原始信号求得均方根值,并与每刀所用锯切时间作出随着加工刀数变化的折线图,如图7所示。由图7可知,声发射均方根值和单刀锯切时间均随加工刀数的增多逐渐增大,同时单刀加工时间的变化趋势与声发射均方根值变化趋势大致相同,均表现为第1~4刀幅值较为平稳,在第4~7刀之间幅值快速增加,第7刀之后幅值缓慢增加。因此,可以推测锯齿全生命周期的磨损过程经历了磨合磨损、快速磨损和稳定磨损三个过程。

图8为提取的第1刀和第15刀锯切后带锯条锯

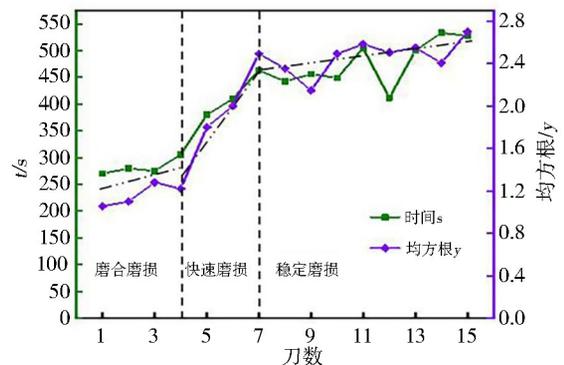


图7 每刀加工时间、均方根值变化曲线

Fig. 7 The change curve of processing time per cut and root mean square value

齿在电子显微镜下的形貌及其磨损量。由图8可知,双金属带锯条左分齿和右分齿上分齿侧的磨损量均大于非分齿侧的磨损量;直齿上两侧位置的磨损量

相近且大于中间位置的磨损量,同时几乎关于中心线对称。此外,左、右分齿的磨损量总体上大于直齿的磨损量,表明左、右分齿参与锯切材料去除量大于

直齿,且切缝壁表面分别由左、右分齿去除材料形成,而直齿主要去除切缝底面的材料。

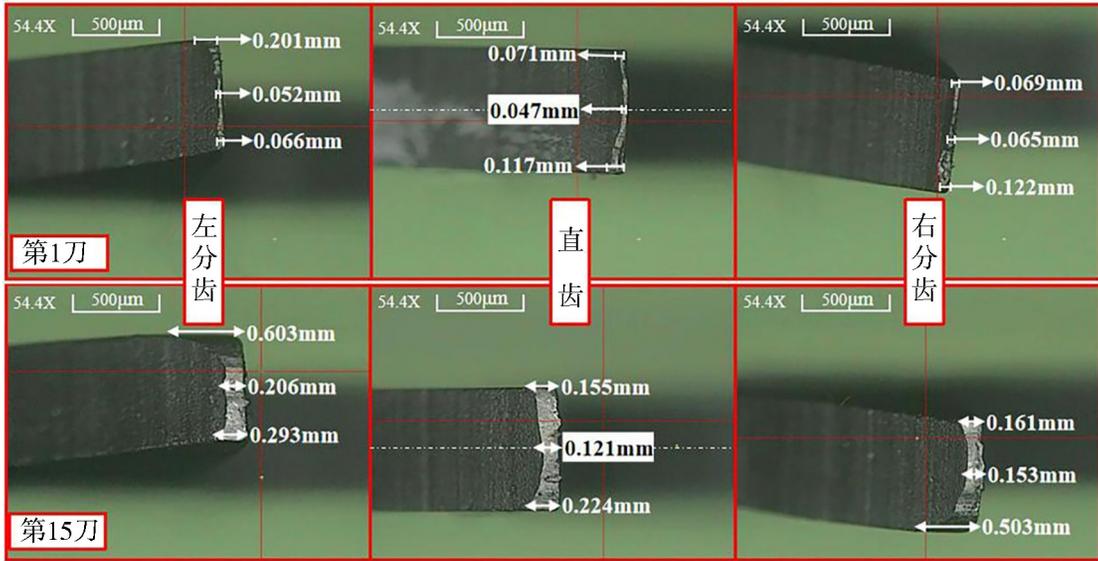


图8 带锯条锯齿电子显微形貌

Fig. 8 Electron micrograph of saw teeth of bandsaw blade

综上所述,本次锯切实验共15刀,在1~4刀时锯齿处于磨合磨损阶段,其特点是从不一致的锯齿高度开始磨合,单刀锯切过程声发射信号幅值相对小且不稳定,声发射信号来源以材料的剪切去除为主,单刀锯切时间较短;在4~7刀,锯齿处于快速磨损阶段,其特点是从不一致的锯齿高度快速磨合成相对一致的锯齿高度,声发射信号来源仍以材料的剪切去除为主,单刀锯切时间快速增加;第10刀锯齿处于稳定磨损阶段,其特点是锯齿高度相对一致,相比磨合磨损和快速磨损阶段,声发射原始信号幅值再次增大但锯切过程相对稳定,在此阶段声发射信号来源从材料的剪切去除和锯齿与工件的摩擦并存逐渐过渡为以锯齿与工件的摩擦为主。

### 3.3 声发射信号频域分析

从频域的角度分析,为了降低计算量,提取第3、4、10、11、14、15刀的声发射原始信号中③锯切加工第2阶段的1s进行快速傅里叶变换得到图9。由图9可知,第3、4、10、11、14刀声发射信号来源主要集中在80~90kHz频段之间,其余频段的幅值较低。此外,第3、4刀声发射信号的第一主频幅值较小(约为0.3V左右),第10、11、14刀声发射信号的第一主频幅值较大(约为0.7V左右);与其他刀数相比,第15刀的FFT图声发射信号频率则更为分散,20~10kHz之间的频段有多个声发射信号主频,其中第一主频也在80~90kHz之间,但其幅值小于其他刀数的幅值,表明声发射信号来源比较分散,其中来源于材料剪切去除的高频信号占比降低,而锯齿与工件的摩擦信号等占比突然增大,预示着磨损将加剧。因此,基于FFT频域分析的信号特征可以获

取带锯条是否存在剧烈磨损的状态,进而认定失效。

图10所示为第10刀和第15刀锯切后的工件表面形貌。由图10可知,工件表面质量可分为3个区域,分别对应锯切加工第1阶段、锯切加工第2阶段和锯切加工第3阶段;工件锯切表面质量均呈现锯切加工第1阶段好于第2阶段,好于第3阶段,即工件锯切表面质量自上而下逐渐变差,由于切缝壁主要由左、右分齿去除材料形成,所以其表面质量主要受锯齿侧运动情况的影响,包括横向振动和纵向进给运动,横向振动主要受带锯条被约束情况影响,纵向进给速度则随着工件直径的增大而减小。锯切加工第1阶段时带锯条未被完全约束且进给速度较快;第2阶段时被完全约束且进给速度较慢;第3阶段时被完全约束且进给速度较快。因此,可以推测锯齿侧横向振动对表面质量的影响大于进给速度的影响;当带锯条被约束在切缝壁后,背带振动受限导致锯齿侧承受更多锯切过程中产生的能量,导致锯齿侧振动更不稳定,降低了表面质量。此外,如图10(a)第10刀的锯切加工第2阶段下半部分和第3阶段工件表面上出现了一些较浅的微纹,而如图10(b)第15刀从进入第2阶段至第3阶段结束工件表面上均出现了大量的深而宽波纹,表明第15刀的工件表面质量大幅差于第10刀。因此,工件表面上的波纹是降低表面质量的主要因素,若能通过声发射信号反映出工件表面的波纹情况,即可判断锯切表面质量。

通过对上述锯切声发射的原始信号、均方根值和单刀锯切时间等时域信息以及FFT频域分析均难

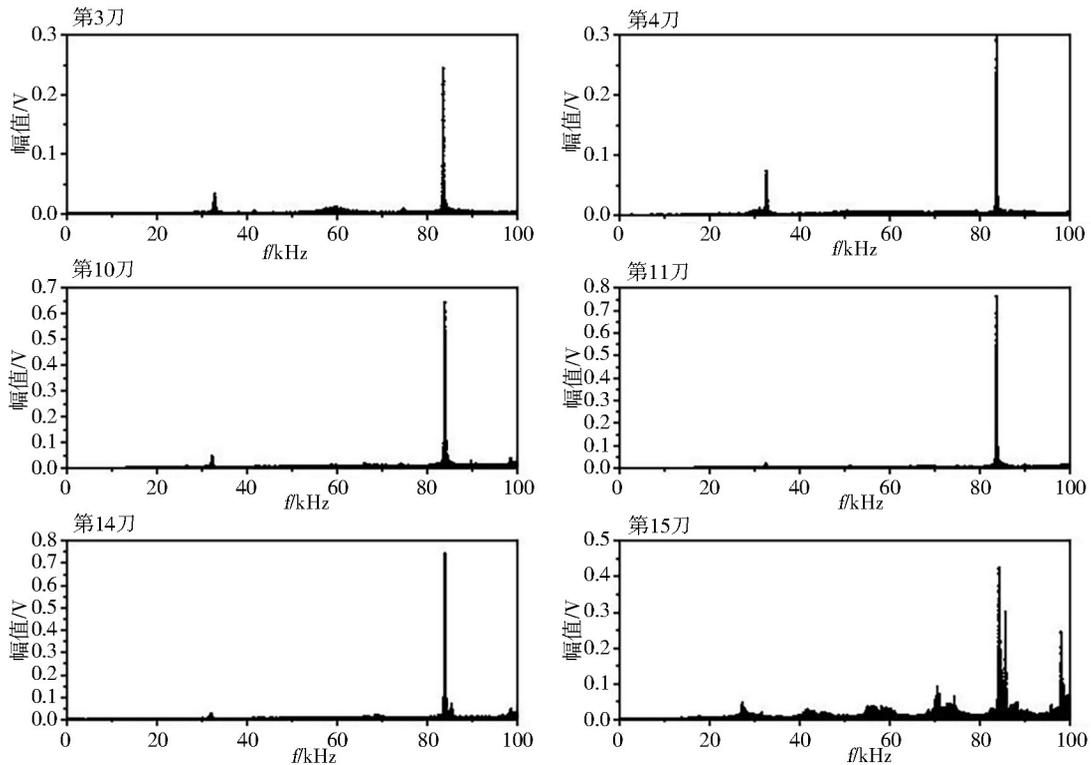
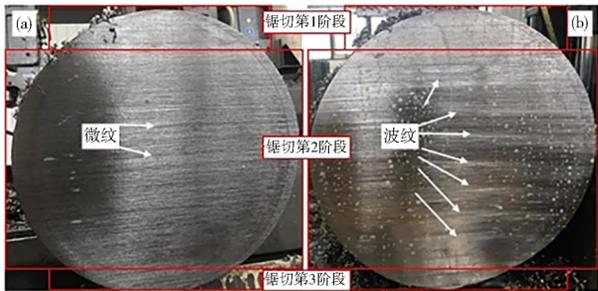


图9 第3、4、10、11、14、15刀1s的FFT图

Fig. 9 1s FFT graph of the 3rd, 4th, 10th, 11th, 14th and 15th knife



注:(a)第十刀;(b)第十五刀。

图10 锯切后工件表面照片

Fig. 10 The surface photo of the workpiece after sawing

以与锯切表面的波纹状况直接建立联系。但是通过FFT频域分析可以看出,每个频段的信号峰值随着带锯条的磨损会发生变化,进而影响锯切表面质量。小波包分解是将信号分解成不同频段的一种分析方法。为了建立声发射信号与锯切表面波纹状况之间的联系,采用小波包分解对一刀的声发射原始信号逐秒分解成各频段,再将各对应频段的能量谱百分比绘制成曲线观察变化趋势。小波包分解时一般根据信号具体特点选择小波基,本文选择不同的小波基函数对图9所示信号使用小波包分解,发现使用db2小波基分解后的信号更加贴近原始信号,分解效果最佳且其各频段能量百分比大小和FFT频谱上各主频峰值大小最为接近,因此选择db2小波基。同时小波包分解层数的选择也十分重要,分解层数过多需要耗费更多的时间计算,影响计算和判别速度;分

解层数过少则不能获取与表面质量有对应关系的声发射信号特征,因此,选择的原则是在保证具有信号特征的前提下,尽量选择少的分解层数。尝试了小波包分解2~4层,发现进行两层小波包分解时,各频段能量百分比曲线与表面波纹状况之间尚不能建立联系,但在三层分解时发现某一频段可满足能量百分比曲线与表面波纹状况建立联系的要求。如图11所示为对一个信号进行3层小波包分解的原理图,第1层是将原始信号分解成高频部分和低频部分两个子信号,依次往下,第2层可以得到四个不同频段的子信号,第3层可以得到八个不同频段的子信号<sup>[18]</sup>。首先基于db2小波基函数对第10和15刀声发射信号进行3层小波包分解,分为0~12.5 kHz、12.5~25 kHz、25~37.5 kHz、37.5~50 kHz、50~62.5 kHz、62.5~75 kHz、75~87.5 kHz和87.5~100 kHz的8个频段,再提取各频段的能量谱百分比作为特征值。

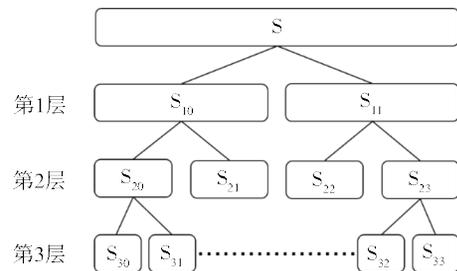


图11 小波包分解原理图

Fig. 11 Schematic diagram of wavelet packet decomposition

图12为将上述特征值按时间序列绘制的曲线图。由图12可知,各频段能量变化趋势仍表现为3个阶段,与图6所示的锯切加工三个阶段分别对应,其中均为第7频段75~87.5 kHz的声发射信号占比最高。对比第10和15刀,发现每个频段都发生了一定变化,但第7频段变化最大,尤其是锯切加工第2阶段的对比更为明显。如图12(a)所示,第10刀时,第7频段锯切加工第2阶段的信号特征为幅度较小、周期较短、不规律性的小幅波动,对应的工件表面是深度较浅的微纹,此外,表面上两个略深的微纹仍能基于第7频段信号的变化对应上。然而,如图12(b)所示,第15刀时,第7频段锯切加工第2阶段的信号特征为出现周期较大、幅度变化较大、不规律性的大幅波动,且大幅波动内还含有与图12(a)中相似的小幅波动,其中信号的大幅波动对应的是工件表面比较明显的波纹,且与信号变化特征有一一对应的关系,此外,在波纹内和波纹间仍存在如图12(a)中的微纹,与信号的小幅波动存在对应关系。综上所述,第7频段锯切加工第2阶段的声发射信号特征与锯切工件表面的波纹状况建立了一定的联系,可用来监测工件表面波纹状况。

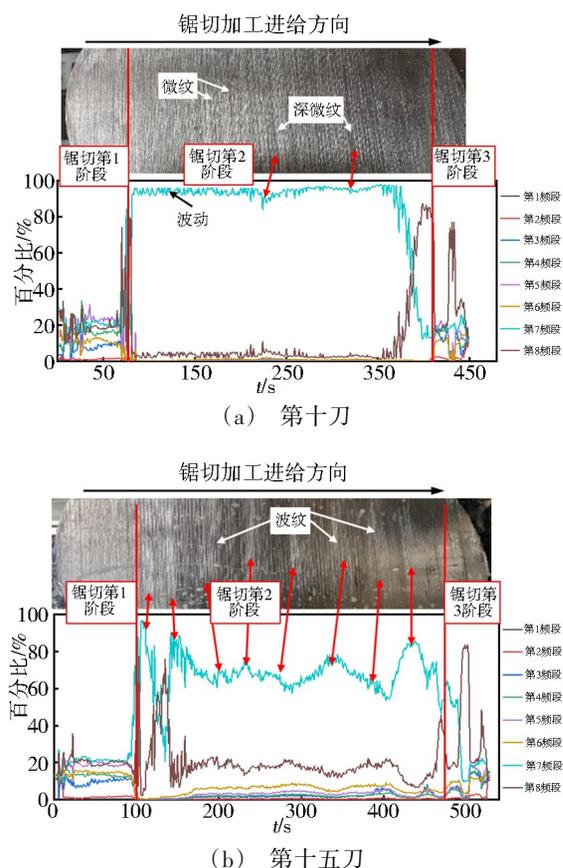


图12 第10、15刀信号各频段能量变化趋势与表面波纹的联系

Fig. 12 The relationship between the energy change trend of the 10<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup> knife signals in each frequency band and the surface ripples

#### 4 结论

(1)分析了带锯条锯切圆柱体材料时,带锯条参与切削齿数的变化及振动约束变化情况。参与锯切齿数随锯切加工深度的增加由急剧增加变为缓慢增加,切至圆柱工件下半段后由缓慢减小变为急剧减少,且原始声发射信号的幅值随着参与齿数的增加而增加,且在参与齿数变化率拐点位置处发生突变;随着锯切深度的增加,带锯条背带由侧面无约束逐渐变化至完全被约束直至锯切结束,当被完全约束后原始声发射信号幅值发生突变。因此,锯切过程中参与锯切齿数的变化状况和带锯条的约束状态是影响锯切声发射信号和工件表面质量的两个主要因素,下一步的主要研究工作是通过有限元仿真分析和实验,定量揭示这两个因素对声发射信号的影响规律。

(2)双金属带锯条锯切加工全生命周期中,根据声发射信号的均方根值和单刀锯切加工时间可以得到其磨损过程为磨合磨损、快速磨损、稳定磨损三个阶段。

(3)基于声发射信号时域分析,发现单刀锯切加工过程声发射原始信号幅值随加工刀数逐渐增大,且单刀锯切时间随加工刀数增加至磨合磨损阶段单刀锯切时间的2倍左右。而基于FFT频域分析,发现当声发射频域信号出现多个峰值,且第一峰值的幅值下降时,表明声发射信号来源比较分散,预示着带锯条磨损将加剧,即可认定带锯条失效。

(4)基于小波包分解的声发射信号频域分析,发现分解后的第7频段75~87.5 kHz声发射信号能量占比最高,最能反映工件表面质量变化。第7频段锯切加工第2阶段的声发射信号波动情况与锯切后工件表面的微纹和波纹情况可建立一定的联系,并用于判断锯切加工表面波纹情况和质量。

(5)通过本文研究发现声发射信号某一频段的波动情况与锯切表面质量有一定的联系,因此下一步的研究工作将建立声发射信号特征与锯切表面质量的定量映射模型,并开发一套基于声发射信号的带锯条磨损和锯切表面形貌的在线监测系统。

#### 参考文献

[1] ZHUO R, DENG Z, CHEN B, et al. Overview on development of acoustic emission monitoring technology in sawing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116: 1411-1427.

[2] 田芳. 减少双金属带锯条故障的技术措施[J]. 机电信息, 2010(30): 36-37.

TIAN F. Technical measures to reduce the failure of bimetallic band saw blades [J]. Mechanical and Electrical

Information,2010(30):36-37.

[3] WANG Y, ZHANG Y, TAN D, et al. Key technologies and development trends in advanced intelligent sawing equipments [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(3):30.

[4] LIU C, WANG G F, Qin X D, et al. The online monitoring of surface quality based on time-frequency spectrum analysis of acoustic emission [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 141:564-568.

[5] VAHID N, JULIE C, FARROKH S. Acoustic emission monitoring of sawing process: artificial intelligence-e approach for optimal sensory feature selection [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102:4179-4197.

[6] 高振. 石材锯切过程中声发射信号特征的实验研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2015.

GAO Z. Experimental Research on the Characteristics of Acoustic Emission Signal During Stone Sawing Process [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2015.

[7] İLHAN, Asiltürk. Intelligent adaptive control and monitoring of band sawing using a neural-fuzzy system [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009 (5) : 2302-2313.

[8] ALFREDO A. Cutting energy and surface roughness in medium density fiberboard rip sawing [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2011, 69(1):11-18.

[9] 张美琴, 高振, 吴海融, 等. 花岗石锯切过程声发射信号特征的实验 [J]. 华侨大学学报; 自然科学版, 2015 (36):619.

ZHANG M Q, GAO Z, WU H R, et al. Experiment on the characteristics of acoustic emission signal during granite sawing [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2015 (36):619.

[10] HU S S, HU Y N, CHEN B D, et al. The dynamic characteristics of concrete sawing based on wavelet multi-scale analysis [J]. Materials Science Forum, 2013, 770:303-307.

[11] BEREND D, DAVID B, BENJAMIN K, et al. Sonic

analysis in cut-off grinding of concrete [J]. Production Engineering, 2008, 2(2):209-218.

[12] VAHID N, MARZIEH K, JULIE C, et al. Cutting tool temperature monitoring in circular sawing: measurement and multi-sensor feature fusion-based prediction [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112:2413-2424.

[13] 杨静榕. 关于木工带锯机切削表面状况的研究 [J]. 木工机床, 1999, 4(1):11-15.

YANG J R. Research on the cutting surface condition of woodworking band saw machine [J]. Woodworking Machinery, 1999, 4(1):11-15.

[14] ZHU N F, CHIAKI T, TADASHI O. Automatic detection of a damaged cutting tool during machining II: Method to detect gullet crack in a bandsaw during sawing [J]. Journal of Wood Science, 2001, 47:490-492.

[15] 陈冰, 毕升豪, 焦浩文, 等. 基于声发射的带锯条磨损在线监测试验研究 [J]. 工具技术, 2021, 55(4):32-38.

CHEN B, BI S H, JIAO H W, et al. On-line wear monitoring research of bandsaw blade by acoustic emission [J]. Tool Technology, 2021, 55(4):32-38.

[16] 潘柏松, 梁利华, 张元祥. 金属切削带锯床设计理论与方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

PAN B S, LIANG L H, ZHANG Y X. Design Theory and Method of Metal Cutting Band Sawing Machine [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.

[17] 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):199-205.

[18] 蒋佳炜, 胡以怀, 柯赞, 等. 基于小波包特征提取和模糊熵特征选择的柴油机故障分析 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(4):273-277, 298.

JIANG J W, HU Y H, KE Y, et al. Fault diagnosis of diesel engines based on wavelet packet energy spectrum feature extraction and fuzzy entropy feature selection [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4):273-277, 298.