

文章编号:1671-251X(2021)02-0063-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020110052

煤岩膨胀破裂应变及声发射特征实验研究

李杰, 邱黎明, 殷山, 刘洋, 童永军

(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)



扫码移动阅读

摘要:针对目标对煤岩膨胀破裂过程中的声发射特征研究较少的问题,开展了煤岩膨胀破裂实验,分析了煤岩膨胀破裂全过程应变与声发射信号的变化规律。结果表明:①煤岩膨胀破裂过程可划分为微破裂阶段(Ⅰ)、宏观裂纹生成及扩展阶段(Ⅱ)和劈裂阶段(Ⅲ)。②煤、岩试样膨胀过程应变演化具有一致性,均呈现“缓变→加速→极值”变化趋势,但两者各阶段声发射信号差异较大。③煤样在第Ⅰ、Ⅱ阶段声发射振铃计数较为丰富,在临近第Ⅲ阶段累计振铃计数呈指数型递增;而砂岩在第Ⅰ、Ⅱ阶段声发射振铃计数较少,在临近第Ⅲ阶段累计振铃计数表现出“突增→平静”趋势。④煤岩膨胀破裂过程均存在变形局部化现象,应变变异系数的突变和声发射峰值频率段增多现象可作为煤岩胀裂失稳破坏的前兆特征。研究结果可为煤岩致裂等工程的监测预警提供依据。

关键词:煤岩膨胀破裂;声发射;煤岩表面形变;应变;应变系数

中图分类号:TD315.1

文献标志码:A

Experimental study on characteristics of strain and acoustic emission in the process of coal rock expansion and fracture

LI Jie, QIU Liming, YIN Shan, LIU Yang, TONG Yongjun

(School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem that there are few researches on the acoustic emission characteristics in the process of coal rock expansion and fracture, experiments on coal rock expansion and fracture are carried out to analyze the change law of strain and acoustic emission signals during the whole process of coal rock expansion and fracture. The results show that: ① the coal-rock expansion and fracture process can be divided into micro-fracture stage (Ⅰ), macro-fracture generation and expansion stage (Ⅱ) and splitting stage (Ⅲ). ② the strain evolution of coal and rock samples in the expansion process is consistent, showing the trend of 'slow change→acceleration→extreme value'. However, the acoustic emission signals of the two samples at each stage are quite different. ③ the acoustic emission ringing counts are more abundant in the coal samples at stages Ⅰ and Ⅱ, and the cumulative ringing counts increase exponentially near stage Ⅲ; while the acoustic emission ringing counts are less in the rock samples at stages Ⅰ and Ⅱ, and the cumulative ringing counts show a 'sudden increase - calm' trend near stage Ⅲ. ④ there is deformation localization in the process of both coal and rock expansion and fracture. The sudden change of strain variation coefficient and the increase of acoustic emission peak frequency range can be used as the precursor characteristics of coal rock expansion, fracture and instability. The research results can

收稿日期:2020-11-23;修回日期:2021-01-25;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家自然科学基金项目(52004016);中央高校基本科研项目(FRF-TP-18-081A1);山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY01)。

作者简介:李杰(1996—),女,山东日照人,硕士研究生,研究方向为煤岩动力灾害监测预警,E-mail:17806245008@163.com。通信作者:

邱黎明(1991—),男,河南周口人,讲师,研究方向为地下工程安全监测预警,E-mail:qiulm@ustb.edu.cn。

引用格式:李杰,邱黎明,殷山,等.煤岩膨胀破裂应变及声发射特征实验研究[J].工矿自动化,2021,47(2):63-69.

LI Jie, QIU Liming, YIN Shan, et al. Experimental study on characteristics of strain and acoustic emission in the process of coal rock expansion and fracture[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(2): 63-69.

provide a basis for monitoring and early warning of coal rock fractures and other projects.

Key words: coal rock expansion and fracture; acoustic emission; coal rock surface deformation; strain; variation coefficient

0 引言

在煤炭开采过程中,普遍存在张拉破坏现象。抗拉强度是煤岩材料的重要力学参数之一,煤岩的抗拉强度远小于抗压强度,当煤岩整体或者局部受到拉应力作用时,往往更容易发生失稳破坏。目前对煤岩材料拉升破坏特征的研究多集中在直接拉伸和劈裂条件下,而在低透气性煤层增透、坚硬顶板预裂切顶和复杂环境隧道的掘进开挖等工程中,煤岩的破坏往往都与膨胀拉应力有关^[1-3]。因此,研究煤岩膨胀破裂的变形破坏特征及其监测预警,对于保证工程安全具有重要意义^[4]。

煤岩材料受载破坏过程伴随着微裂纹的萌生、扩展、贯通,同时会引起煤岩表面的形变^[5-6]。大量研究表明,应变是煤岩失稳破坏的重要指标。范金洋等^[7]建立了岩石变形失稳应变梯度理论模型,对岩爆等现象的应变局部化进行了解释。马少鹏等^[8]分析了受载煤岩表面应变场的演化规律,认为煤岩内部微裂纹的演化与应变场统计指标具有一定的联系。赵程等^[9]研究了预制裂纹试样的变形损坏演化特征,并探讨了岩石细观破坏及宏观力学性质的联系。

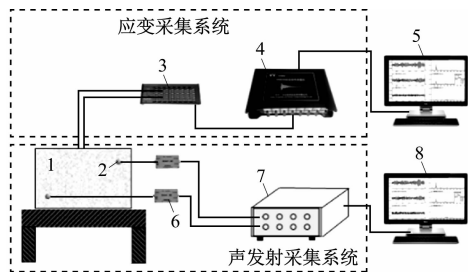
煤岩在受载过程中,除引起煤岩表面形变外,还伴随着能量的释放^[10],其中一部分能量以弹性波的形式释放出来,即声发射现象。针对煤岩失稳破坏过程中的声发射现象,国内学者取得了大量研究成果。文献[11-13]研究了煤岩单轴压缩破坏过程中的声发射信号,认为其能反映煤岩内部的变形和损伤程度,建立了基于声发射特性的单轴压缩煤岩损伤模型。文献[14-15]研究了岩石在单轴作用下应力—应变全过程的声发射特征,得出声发射可用来表征岩石的微观损伤演化。文献[16]研究发现煤岩破坏前期声发射存在相对平静期现象,认为声发射平静期可以作为煤岩失稳破坏的前兆信息。文献[17]研究了不同加载条件下岩石破坏过程中声发射的演变规律,发现不同加载条件下声发射演化特征具有较大区别。文献[18]通过研究三轴压缩状态下岩石的声发射演变规律,发现声发射特征参数的突变可作为岩石破裂的前兆。以上研究结果表明,声发射信号与煤岩的受力状态密切相关,且不同的加载方式下声发射信号有着显著差异^[19-21]。

目前对声发射的研究多集中在煤岩单轴、剪切、劈裂等破坏模式,对煤岩膨胀破裂过程中的声发射特征研究较少。鉴此,本文开展煤岩膨胀破裂实验,测试煤岩膨胀破裂过程中的变形及声发射演变规律,分析煤岩膨胀破裂表面形变与声发射信号的对应关系,以揭示煤岩膨胀破裂的前兆特征。研究结果对进一步揭示煤岩膨胀破裂的变形破坏特征及静爆致裂过程具有参考意义。

1 煤岩膨胀破裂实验系统与方案

1.1 实验系统

煤岩膨胀破裂实验系统主要包括声发射采集系统、应变采集系统及数据分析系统,如图 1 所示。声发射采集系统由 8 通道声发射采集仪、声发射探头和声发射放大器组成。声发射采集仪最高采样频率为 10 MHz,输入信号电压范围为 $-10\sim10$ V,能够同步记录所有通道全波形数据,外接 20 dB 放大器。应变采集系统由 YSV 动态信号采集仪、应变放大器等组成。其中,YSV 动态信号采集仪采用 24 位数据采集芯片,最高采样频率为 51.2 kHz,可实现 16 通道同步采集。本次实验采样频率设置为 2 kHz。



1—试样;2—声发射探头;3—应变放大器;
4—YSV 动态信号采集仪;5—应变数据分析系统;
6—声发射放大器;7—声发射采集仪;8—声发射数据分析系统。

图 1 煤岩膨胀破裂实验系统

Fig. 1 Coal and rock expansion and fracture experiment system

1.2 试样制备及膨胀致裂原理

实验所用试样为大块原煤和砂岩,将其加工成尺寸为 200 mm×120 mm×150mm(长×宽×高)的长方体。在试样中部钻 1 个直径为 30 mm、深 100 mm 的中心孔,用以充填无声破碎剂。在中心孔两侧设置 2 个直径为 10 mm、深 120 mm 的引导孔,用以控制裂纹的发展方向。试样如图 2 所示。

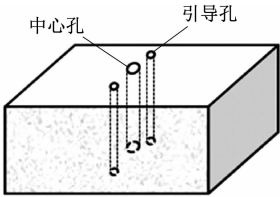


图2 煤岩试样
Fig.2 Coal or rock sample

无声破碎剂是一种粉状高效能安全破碎材料,适用于在不宜采用炸药爆破的场合进行破碎或拆除作业。考虑实验环境温度约为0~10℃,选用适用温度为-5~15℃的HSCA-III型无声破碎剂。该试剂与水混合后体积快速增长,进而对有限空间的边界产生膨胀压,使中心孔附近弹性区域内均受到径向压应力 σ_r 和切向拉应力 σ_θ 。径向压应力会促使原始裂隙闭合,切向拉应力会促使新裂纹产生与发展。当膨胀压远大于抗拉强度时,中心孔就会产生裂纹,在引导孔的作用下按照预设方向扩展。试样受力及裂纹扩展如图3所示。

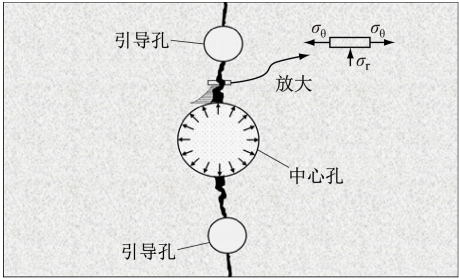


图3 试样受力及裂纹扩展

Fig.3 Sample stress and fraction propagation

1.3 应变片布置及实验方案

由于中心孔附近主要受径向压应力及切向拉应力,本文主要以观察试样表面受拉情况为主,故在中心孔四周布置了如图4所示的3—6号应变片,1号、2号应变片用于观察侧面的受拉情况。

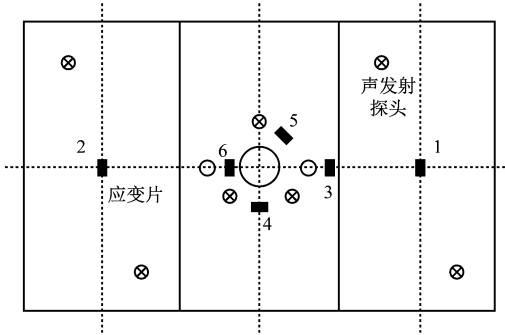


图4 声发射探头及应变片布置

实验共采用2组试样。实验前用砂纸对试样表面进行打磨处理,保证表面平整度小于0.01mm。将声发射探头和应变片粘贴到预定位置,然后调试声发射采集仪,并提前预热0.5h。待声发射采集

仪预热完成后,将无声破碎剂与水按质量比3:1调制成浆液,并迅速倒入中心孔中,开始采集数据。膨胀剂水化反应时间约为20~60min,实验开始后每隔30min观察试样及膨胀剂状态,待试样膨胀破裂后,停止数据采集并保存实验数据,实验结束。

2 实验结果及分析

2.1 煤岩膨胀变形破裂形态

将无声破碎剂注入中心孔后约2~3h,试样发生破坏。试样破坏后的裂纹形态主要分为纵向裂纹和横向裂纹2类,如图5所示。由图5可知,煤样和砂岩中均出现纵向裂纹,这是由于无声破碎剂对试样施以径向膨胀力,在引导孔的作用下,试样发生纵向破坏。与砂岩不同,煤样表面还存在横向裂纹,且裂纹走向并不规则,这是由于煤样具有丰富且薄弱的层理结构,受到轴向拉应力时其材料具有不均匀性。因此,对于具有层理结构的煤岩,在布设中心孔及引导孔时需考虑层理结构对裂纹走向的影响。

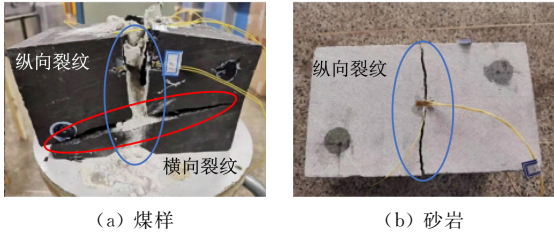


图5 煤岩试样膨胀破裂后形态

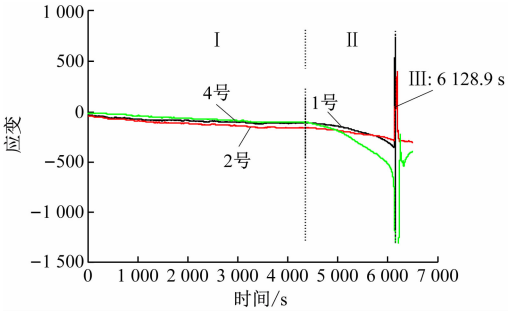
Fig.5 Morphology of coal and rock samples after expansion and fracture

2.2 煤岩膨胀破裂应变演化规律

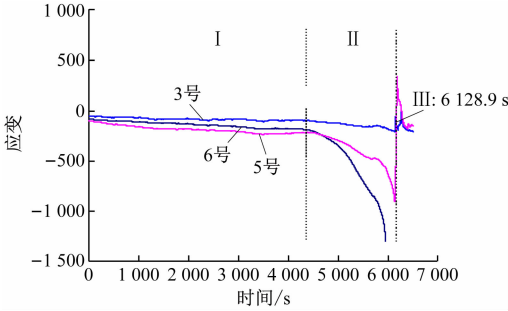
实验所采用的应变片是一种电阻式敏感元件,当试样发生变形时,应变片随试样一起变形。这时应变片中的电阻丝会出现机械变形,导致其电阻发生变化,从而反映结构的变形情况。

煤岩膨胀破裂过程各测点的应变-时间曲线如图6、图7所示,图中应变值的正负代表应变片长度的变化,正值表示应变片变短(受压),负值则表示应变片变长(受拉)。根据应变变化特征,将煤岩膨胀破裂过程分为微破裂阶段(I)、宏观裂纹生成及扩展阶段(II)、劈裂阶段(III)。

(1) 微破裂阶段。煤样的0~4300s和砂岩的0~5180s为微破裂阶段。无声破碎剂注入中心孔后,随着水化反应的进行,膨胀应力逐渐变大,中心孔附近单元受径向压应力 σ_r 和切向拉应力 σ_θ 作用,煤岩中心孔周边的裂隙、孔隙等受压应力作用而逐渐被压密,同时在拉应力的作用下产生微小裂纹。由于水化反应早期的膨胀应力较小,煤样表面应变仅有小幅降低,表明煤样表面有较小的弹性膨



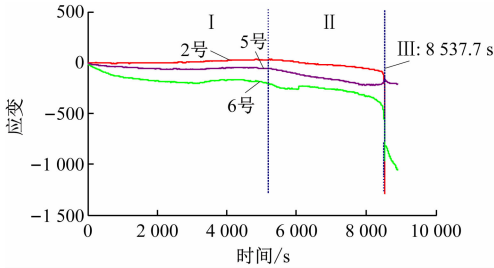
(a) 1 号、2 号、4 号应变测点



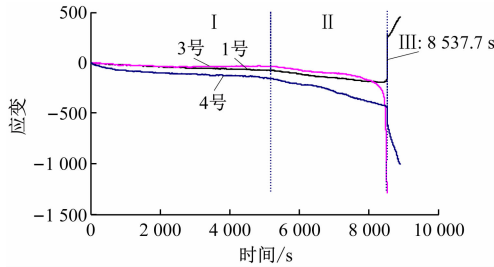
(b) 3 号、5 号、6 号应变测点

图 6 煤样测点应变时序变化

Fig. 6 Strain time series change of coal sample measuring points



(a) 2 号、5 号、6 号应变测点



(b) 1 号、3 号、4 号应变测点

图 7 砂岩测点应变时序变化

Fig. 7 Strain time series change of rock measuring points

胀拉伸变形。砂岩表面各处的应变变化趋势略有不同,应变的变化趋势主要分为 2 类:1 号、3 号、4 号应变片呈现缓慢下降趋势,3 处均受到切向的拉应力作用;2 号、5 号、6 号应变片先呈现下降趋势,从 3 400 s 开始出现回升现象(应变量为负),这主要是由于无声破碎剂水化反应后中心孔周边出现小的裂隙,使得中心孔附近得到短时间的释放空间。

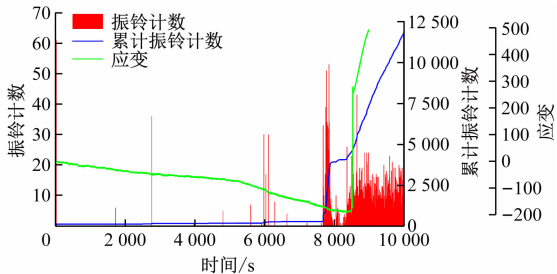
(2) 宏观裂纹生成及扩展阶段。煤样的

4 300~6 100 s 和砂岩的 5 180~8 500 s 为宏观裂纹生成及扩展阶段。水化反应产生的热量使得水化作用加速进行,膨胀应力随即快速升高,由中心孔逐渐向自由面传递,促使中心孔附近裂纹产生并加速扩展。各应变片受到切向拉应力的作用,应变沿负值快速降低,且不同测点应变的变化速率具有显著区别。4 300 s 后,除 3 号应变片之外,煤样表面应变片均快速降低,且为负值,说明除 3 号应变片外其余应变片均位于裂纹走向上,其中 6 号应变片在此阶段已被拉断。由图 7 可知,砂岩表面应变在此阶段均呈快速下降趋势,且为负值,说明砂岩表面各应变片均受到拉应力作用。

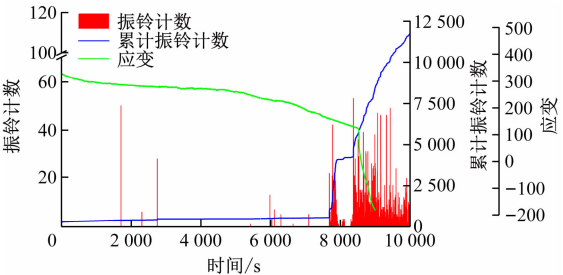
(3) 劈裂阶段。煤样的 6 100 s 和砂岩的 8 500 s 为劈裂阶段。无声破碎剂产生的膨胀压经过第 II 阶段的传递后,逐渐作用于试样整体。当膨胀压积累到一定值时,试样发生大的破坏,宏观裂纹瞬间贯通,应变在瞬间发生突变,应变曲线呈现垂直拐角型趋势。

2.3 煤岩膨胀破裂声发射演化规律

通过监测煤岩膨胀过程中的声发射,可得到煤岩的损伤程度和内部破裂状况。砂岩和煤样膨胀破裂过程中的声发射振铃计数、累计振铃计数、应变时序变化如图 8 及图 9 所示(选取主裂纹上的 2 个测点:测点 1 和测点 6)。



(a) 测点 1



(b) 测点 6

图 8 砂岩各测点应变与声发射时序变化

Fig. 8 Strain and acoustic emission time series change at each measuring point of rock

由图 8 可知,砂岩声发射累计振铃计数临近劈裂时呈现“突增→平静”趋势。在微破裂阶段,声发射振铃计数极少,声发射信号较弱,这说明砂岩内部微小裂隙、孔隙较少,均质性较好,在无声破碎剂水

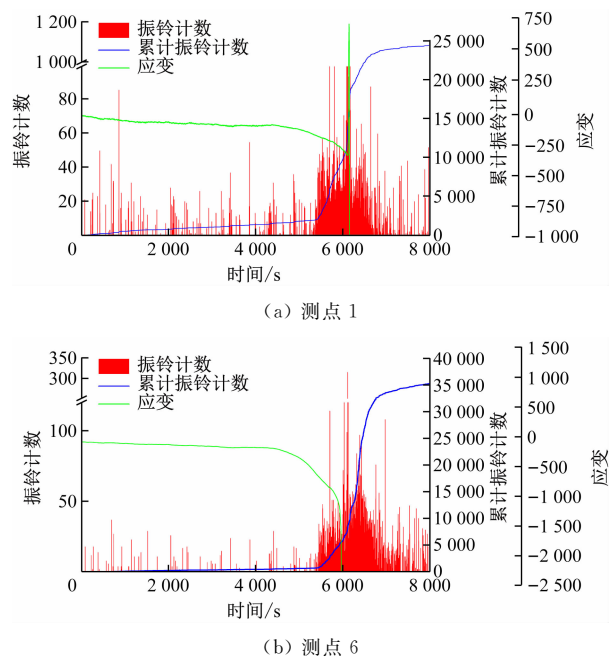


图9 煤样各测点应变与声发射时序变化

Fig. 9 Strain and acoustic emission time series change at each measuring point of coal

化作用前期其内部无明显变化。在宏观裂纹生成及扩展阶段,随着应变速率快速增加,砂岩内部开始有裂纹萌生,此时仍然仅有少量声发射信号。接近劈裂阶段时,声发射振铃计数出现峰值,声发射累计振铃计数先突增后经历一段“平静期”,砂岩中的裂纹开始急剧扩展、贯通,并在8 537.3 s发生劈裂破坏,伴随着大裂纹的生成,许多微小裂纹也随着膨胀压的进一步增大而产生。在该阶段声发射累计计数出现第2次突增,声发射信号密集出现。

由图9可知,煤样声发射累计振铃计数临界劈裂时呈现指数递增趋势。相比砂岩试样,在微破裂阶段及宏观裂纹生成及扩展阶段,声发射信号十分丰富,且具有阵发性,表明在这2个阶段,煤样内部不断有微小裂隙、孔隙产生及扩展。接近劈裂阶段时,声发射累计振铃计数呈指数增长趋势,声发射振铃计数在劈裂瞬间(6 128.9 s)达到峰值,煤样裂纹发生大的贯通,劈裂后煤样与砂岩声发射振铃计数均密集出现。

煤样、砂岩膨胀过程声发射信号具有鲜明的差异,声发射信号反映了煤岩不同膨胀阶段的内部裂纹扩展规律。

3 煤岩胀裂应变及声发射响应

3.1 煤岩膨胀破裂非均匀变形演化特征

通过分析煤岩膨胀破裂过程中不同测点的应变变化规律发现:在微破裂阶段,不同区域的应变呈现出速率稳定变化现象;在主破裂发生前,试样处于宏

观裂纹生成及扩展阶段时,应变速率稳定变化的特征逐渐消失,表现为变化幅度显著增大,且不同测点应变的变形速率有明显区别。对于煤岩膨胀破裂而言,主裂纹在应力集中区(即中心孔附近)率先破裂,随后逐渐延伸扩展,即存在变形局部化现象。煤岩膨胀破裂不同区域的变形可反映破裂的过程性:如果不同区域内变形协调一致,表明试样未出现集中破裂区域;如果其中一个或几个区域变形速率快速增加,预示会出现集中破裂区域。

利用应变的变异系数 C_v 定量表征变形局部化演化特征。在统计学中,变异系数 C_v 用来描述数据分布的离散度,应变变异系数越大,代表应变分布的离散程度越大,即应变局部化越明显,其定义为

$$C_v = \frac{S}{\bar{\epsilon}_1} \tag{1}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \bar{\epsilon}_1)^2} \tag{2}$$

$$\bar{\epsilon}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i \tag{3}$$

式中: S 为某时刻变形场的标准方差; ϵ_i 为某时刻煤岩表面各点(共 n 个点)的应变值; $\bar{\epsilon}_1$ 为某时刻 ϵ_i 的平均值。

按式(1)~式(3)计算煤岩膨胀破裂过程中应变的变异系数,并绘制其变化曲线,如图10、图11所示。

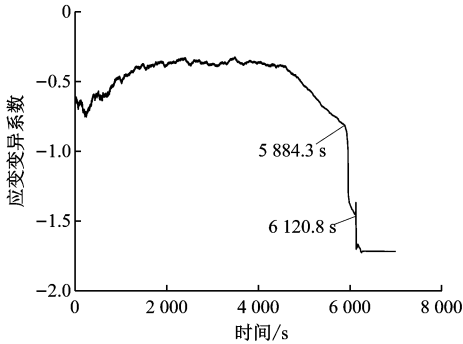


图10 煤样应变变异系数曲线

Fig. 10 Strain variation coefficient curve of coal

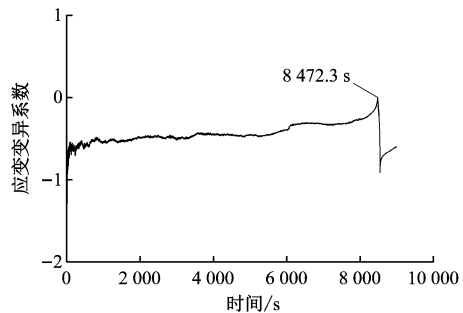


图11 砂岩应变变异系数曲线

Fig. 11 Strain variation coefficient curve of rock

由图10、图11可知,破碎剂开始时刻的反应速率并不稳定,因此试样受力不均,应变出现波动变

化,应变的变异系数 C_v 呈现波动变化。在变形局部化前,煤样变异系数前期具有明显的上升趋势,然后呈现稳定波动,且存在多个突变点;而砂岩应变变异系数先稳定波动,然后出现显著上升趋势,仅存在一个突变点。煤样应变变异系数较砂岩应变变异系数变化剧烈,即煤样变形局部化现象更加复杂。煤样的 2 个显著突变点分别发生在 5 884.3,6 120.8 s,分别比主破裂提前 244.6,8.1 s;而砂岩的突变点发生在 8 472.3 s,较主破裂提前 65.0 s。因此,煤岩样应变变异系数的突变可作为破坏前兆。当变异系数突降时,表明不同区域形变中出现了较大变化,即生成了宏观大裂纹,并伴随着能量释放,产生声发射信号。因此,应变变异系数与声发射存在一定关系。

3.2 煤岩膨胀破裂非均匀变形与声发射响应相关关系

煤岩膨胀破裂过程中区域应变的非均匀性与声发射存在一定关系。对于煤岩声发射而言,不同破裂尺度产生的声发射信号频率也不同。大尺度裂纹产生的信号低频成分多,小尺度裂纹产生的信号高频成分多。峰值频率作为震源频谱特征的重要参数,可近似看作信号的主频,故本节通过分析煤岩破裂应变变异系数与声发射峰值频率的响应关系,研究煤岩膨胀破裂内部演化特征。

声发射峰值频率与应变变异系数随时间的变化如图 12 所示。

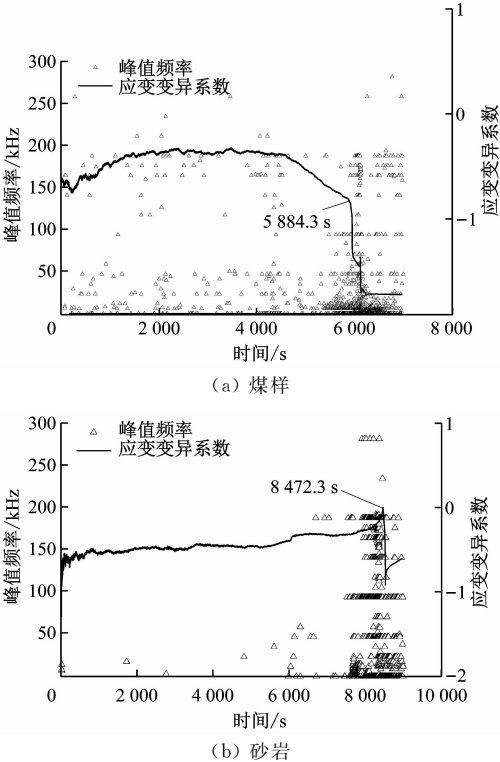


图 12 声发射峰值频率与应变变异系数曲线
Fig. 12 Curves of acoustic emission peak frequency and strain variation coefficient

从图 12 可发现,在应变变异系数突变前,煤样有 2 个峰值频率带,分别为低频率带(0~50 kHz)和高频率带(150~200 kHz),而砂岩声发射较少;当临近应变变异系数发生突变时,煤样和砂岩声发射峰值频率分布均较为分散,频率带明显增多。

根据上述分析可得出声发射事件峰值频率与煤岩试样变形演化特征的响应关系:煤岩膨胀变形局部化发生时,即劈裂前,声发射峰值频率带明显增多,可作为胀裂破坏的前兆信息。

4 结论

(1) 煤样和砂岩变形破坏过程均包括微破裂阶段、宏观裂纹生成及扩展阶段和劈裂阶段。微破裂阶段,煤岩表面应变变化幅度较小;在宏观裂纹生成及扩展阶段,应变随着膨胀压的传递加快变化;在劈裂瞬间,应变达到极值。

(2) 煤样和砂岩由于内部结构及均一性存在差异,膨胀破坏过程其声发射信号表现出不同的特征:煤样声发射在整个破坏过程较为丰富,在临近破坏时刻,声发射累计计数呈现指数增长;砂岩在微破裂阶段和宏观裂纹生成及扩展阶段,声发射计数较少,在破坏时刻,声发射累计计数呈现“突增→平静”趋势。

(3) 煤岩膨胀破裂存在变形局部化现象,声发射信号与之有较好的对应关系。煤岩变形在出现明显局部化前,声发射峰值频率较均匀分布在高、低频段或无声发射现象。煤岩膨胀出现变形局部化时,声发射峰值频率的分布频段增多,预示着宏观劈裂裂纹的形成。应变变异系数的突变和声发射峰值频率段增多现象可作为煤岩胀破的前兆特征。

参考文献(References):

[1] 李忠辉,宋晓艳,王恩元. 石门揭煤静态爆破致裂煤层增透可行性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1):86-89.
LI Zhonghui, SONG Xiaoyan, WANG Enyuan. Feasibility of improving permeability by static blasting during uncovering coal seam in cross-cut[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1):86-89.
[2] 黄炳香,王友壮. 顶板钻孔割缝导向水压裂缝扩展的现场试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9):2002-2008.
HUANG Bingxiang, WANG Youzhuang. Field investigation on crack propagation of directional hydraulic fracturing in hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9):2002-2008.
[3] 曹晓立,马瑞,高文学,等. 钻孔胀裂法在隧道掘进工程中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46(5):126-128.

- CAO Xiaoli, MA Rui, GAO Wenxue, et al. Application of borehole burst method in tunnel excavation engineering [J]. Construction Technology, 2017, 46(5):126-128.
- [4] 邱黎明, 李忠辉, 王恩元, 等. 煤与瓦斯突出远程智能监测预警系统研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(1): 17-21.
- QIU Liming, LI Zhonghui, WANG Enyuan, et al. Research on remote intelligent monitoring and early warning system for coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(1):17-21.
- [5] 赵永红, 熊春阳, 戴天环, 等. 细砂岩变形破坏过程的实验研究[C]//“力学 2000”学术大会论文集. 北京: 气象出版社, 2000:367-368.
- ZHAO Yonghong, XIONG Chunyang, DAI Tianhuan, et al. Experimental study on deformation and failure process of fine sandstone [C]//Proceedings of "Mechanics 2000" Academic Conference. Beijing: Meteorological Press, 2000:367-368.
- [6] 赵永红, 凌勇. 细砂岩裂纹周围变形破坏过程及应变场分布[J]. 岩土力学, 2004, 25(6):865-870.
- ZHAO Yonghong, LING Yong. Fracture development and strain field around the stress induced crack area in sandstone [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 865-870.
- [7] 范金洋, 姜德义, 欧阳振华, 等. 基于塑性应变梯度理论的材料失稳型冲击地压触发判据[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11):2959-2966.
- FAN Jinyang, JIANG Deyi, OUYANG Zhenhua, et al. Material-instability rock burst criteria based on the theory of strain gradient plasticity[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11):2959-2966.
- [8] 马少鹏, 周辉. 岩石破坏过程中试件表面应变场演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1667-1673.
- MA Shaopeng, ZHAO Hui. Surface strain field evolution of rock specimen during failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8):1667-1673.
- [9] 赵程, 田加深, 松田浩, 等. 单轴压缩下基于全局应变场分析的岩石裂纹扩展及其损伤演化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4):763-769.
- ZHAO Cheng, TIAN Jiashen, SONG Tianhao, et al. Crack propagation and damage of rock under uniaxial compression based on global strain field analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4):763-769.
- [10] SONG Dazhao, WANG Enyuan, LI Zhonghui, et al. Energy dissipation of coal and rock during damage and failure process based on EMR[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25(5):787-795.
- [11] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤体破裂声发射的频谱特征研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3):289-292.
- WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Zhentang, et al. Study on frequency spectrum characteristics of acoustic emission in coal or rock deformation and fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3):289-292.
- [12] 刘保县, 黄敬林, 王泽云, 等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1):3234-3238.
- LIU Baoxian, HUANG Jinglin, WANG Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1):3234-3238.
- [13] 李回贵, 高保彬, 李化敏. 单轴压缩下煤岩宏观破裂结构及声发射特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3):612-618.
- LI Huigui, GAO Baobin, LI Huamin. Study on macroscopic fracture structure and acoustic emission character of coal rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 11(3):612-618.
- [14] 陈宇龙, 魏作安, 许江, 等. 单轴压缩条件下岩石声发射特性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊2): 237-240.
- CHEN Yulong, WEI Zuo'an, XU Jiang, et al. Experimental research on the acoustic emission characteristics of rock under uniaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2):237-240.
- [15] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15):2499-2503.
- LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2499-2503.
- [16] 曹树刚, 刘延保, 张立强. 突出煤体变形破坏声发射特征的综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1):2794-2799.
- CAO Shugang, LIU Yanbao, ZHANG Liqiang. Study on characteristics of acoustic emission in outburst coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1):2794-2799.
- [17] 张宁博, 齐庆新, 欧阳振华, 等. 不同应力路径下大理岩声发射特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 389-394.
- ZHANG Ningbo, QI Qingxin, OUYANG Zhenhua,

et al. Experimental on acoustic emission characteristics of marble with different stress paths[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(2):389-394.

[18] 纪洪广,卢翔. 常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(4):694-702.

JI Hongguang, LU Xiang. Characteristics of acoustic emission and rock fracture precursors of granite under conventional triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 694-702.

[19] 李楠,王恩元,赵恩来,等. 岩石循环加载和分级加载损伤破坏声发射实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7):1099-1103.

LI Nan, WANG Enyuan, ZHAO Enlai, et al. Experiment on acoustic emission of rock damage and fracture under cyclic loading and multi-stage loading [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1099-1103.

[20] 付军辉,黄炳香,刘长友,等. 煤试样巴西劈裂的声发射特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2011,39(4):25-28.

FU Junhui, HUANG Bingxiang, LIU Changyou, et al. Study on acoustic emission features of coal sample Brazilian splitting [J]. Coal Science and Technology, 2011,39(4):25-28.

[21] 许江,刘义鑫,刘婧,等. 双面剪切荷载作用下岩石断裂过程声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(增刊1):2659-2664.

XU Jiang, LIU Yixin, LIU Jing, et al. Study of characteristics of rock acoustic emission fracture process of double shear loading effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1):2659-2664.

第47卷第2期
2021年2月
Industry and Mine Automation
Vol. 47 No. 2
Feb. 2021



扫码移动阅读

文章编号:1671-251X(2021)02-0058-05 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17677

矿用钢丝绳损伤检测信号处理方法研究

王红尧¹, 吴佳奇¹, 李长恒¹, 唐文锦¹, 张艳林²

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;
2. 华北科技学院 河北省矿山设备安全监测重点实验室, 河北 廊坊 065201)

摘要:采用电磁检测法检测矿用钢丝绳受损情况时,检测信号中含有大量噪声,且存在尖峰和突变干扰,增大了损伤识别难度,需要对原始检测信号进行降噪处理。常用的傅里叶变换无法处理运行中的钢丝绳检测信号,而小波变换因存在平移不变性较差、频带混叠等问题而影响检测准确性。提出了基于双树复小波变换的矿用钢丝绳损伤检测信号处理方法。首先采用Q平移法构造双树复小波高低通滤波器,对原始信号进行3层双树复小波分解,得到高低频信号分量;然后采用最小极大方差软阈值方法对分解信号进行降噪处理;最后对降噪信号进行重构。在实验室环境下搭建了钢丝绳损伤检测试验平台,对基于双树复小波变换的钢丝绳损伤检测信号处理方法的降噪性能进行验证,结果表明:该方法可有效减少检测信号中的尖峰和突变数量,使信号平稳,降噪效果优于经典小波变换,且增大了奇异点处信号峰值,有利于后续特征提取。

关键词:矿用钢丝绳; 钢丝绳损伤检测; 电磁检测法; 信号降噪; 小波变换; 双树复小波变换
中图分类号:TD67 **文献标志码:**A

Research on signal processing method of mine wire rope damage detection

WANG Hongyao¹, WU Jiaqi¹, LI Changheng¹, TANG Wenjin¹, ZHANG Yanlin²

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and

收稿日期:2020-10-29;修回日期:2021-02-07;责任编辑:李明。
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774293);河北省矿山设备安全监测重点实验室资助项目(SM202002)。
作者简介:王红尧(1981—),男,山东海阳人,副教授,博士,主要研究方向为矿山安全监控、巡检机器人技术及装备,E-mail:Hongyaowang2004@163.com。通信作者:吴佳奇(1996—),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为矿山安全监控与设备故障诊断技术,E-mail:1134608851@qq.com。
引用格式:王红尧,吴佳奇,李长恒,等. 矿用钢丝绳损伤检测信号处理方法研究[J]. 工矿自动化,2021,47(2):58-62.
WANG Hongyao, WU Jiaqi, LI Changheng, et al. Research on signal processing method of mine wire rope damage detection[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(2): 58-62.

Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2.Hebei Key Laboratory for Mine Equipment Safety Monitoring, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China)

Abstract: When using electromagnetic detection method to detect the damage of mine wire rope, the detection signal contains a lot of noise. Moreover, there are spikes and mutations interference, which increase the difficulty of damage identification. Therefore, it is necessary to reduce the noise of the original detection signal. The commonly used Fourier transform cannot process the operating wire rope detection signal. The wavelet transform has problems of poor translation invariance and frequency aliasing, which affect the detection accuracy. This paper proposes a method for mine wire rope damage detection based on dual-tree complex wavelet transform. Firstly, a dual-tree complex wavelet high and low pass filter is constructed by Q-shift method, and the original signal is decomposed by 3-layer dual-tree complex wavelet to obtain the high and low frequency signal components. Secondly, a soft threshold method with minimax variance is used to reduce the noise of the decomposed signal. Finally, the noise reduction signal is reconstructed. A wire rope damage detection test platform is built in the laboratory environment to verify the noise reduction performance of the wire rope damage detection signal processing method based on dual-tree complex wavelet transform. The results show that the method can reduce the number of spikes and mutations in the detection signal effectively and make the signal stable. The noise reduction effect is better than that of classical wavelet transform. The method increases the signal peak value at the singularity point, which is beneficial to the subsequent feature extraction.

Key words: mine wire rope; wire rope damage detection; electromagnetic detection method; signal noise reduction; wavelet transform; dual-tree complex wavelet transform

0 引言

钢丝绳因具有弹性好、承载能力和耐用性强等特点,广泛应用于煤矿主副井提升系统、单轨吊机车运输系统、架空乘人装置等。因工作环境恶劣,矿用钢丝绳在长期使用过程中不可避免地会产生损伤,存在安全隐患。《煤矿安全规程》规定,必须对钢丝绳进行定期检测与维护。

电磁检测法是目前最常用的矿用钢丝绳损伤检测方法。在实际应用中,受工作环境、绳股效应、断丝头冲击等^[1]因素的影响,钢丝绳损伤电磁检测信号中包含大量噪声,且存在尖峰和突变干扰,使表征损伤的波峰和波谷(即信号奇异部分)无法清晰显示,增大了损伤信号定性和定量识别难度。为了提高损伤检测的准确度,需要对检测信号进行处理,降低噪声干扰。目前常用的钢丝绳信号处理方法有傅里叶变换、小波变换等。傅里叶变换借助正弦波分解原始信号并分析信号频谱,但无法反映信号瞬时频率随时间的变化情况,仅适用于分析平稳信号,无法对非平稳信号的特定成分进行降噪处理。小波变换^[2-4]可对钢丝绳损伤检测信号进行多尺度分解重构、滤波、去噪处理,也可对检测信号进行压缩和传递,具有多分辨率、基小波选择灵活、可多尺度分析等特点,但存在平移不变性较差、频带混叠等问题,导致在钢丝绳检测信号分解、重构过程中引入假波噪声,影响检测准确度。

双树复小波变换是 N. G. Kingsbury 提出的一

种信号处理方法^[5],解决了小波变换中平移不变性较差、频带混叠等问题^[6],可使信号中的奇异部分更加清晰,有利于提高检测准确度,在图像压缩、去噪等方面已有应用,尚未有用于矿用钢丝绳损伤检测的报道。本文提出一种基于双树复小波变换的矿用钢丝绳损伤检测信号处理方法,以消除检测信号中的噪声,提高后续损伤特征提取与识别的准确度。

1 双树复小波变换理论

双树复小波变换是基于小波变换形式的复数小波变换。其通过设计 2 个小波滤波器组,建立双线并行的小波变换树(即实部树和虚部树)对信号进行小波分解。为了实实现部树和虚部树的小波分解系数互补,将虚部树的采样位置设置在实部树的中点,使 2 种系数可被有效利用,从而弥补了小波变换平移不变性缺陷,同时提高了计算效率^[7]。

双树复小波变换采用小波变换中的 1/2 频程转换公式。在双树复小波变换应用于实际工程中时,可根据实际需求选用奇偶滤波器构造法、共同因子法和 Q 平移法构造高低通滤波器,以此进行信号分解和重构。针对矿用钢丝绳损伤检测信号,若采用奇偶滤波器构造法、共同因子法构造双树复小波变换的高低通滤波器,则只能在很小的范围内具有线性相位,而采用 Q 平移法时,在双树复小波变换中每一层虚部树的采样位置恰好位于实部树采样位置的中点,具有很强的对称性,对钢丝绳损伤检测信号降噪和特征提取非常有利^[8],因此本文选用 Q 平移

法构造双树复小波变换滤波器。

以一个 3 层双树复小波变换为例说明信号分解过程,如图 1 所示。 h_0, h_1 分别为实数部分低通、高通滤波器; g_0, g_1 分别为虚数部分低通、高通滤波器。原始信号 $M(n)$ 通过 h_0 得到实数部分低频信号 M_{10} ,通过 h_1 得到实数部分高频信号 M_{11} ,通过 g_0 得到虚数部分低频信号 iM'_{10} ,通过 g_1 得到虚数部分高频信号 iM'_{11} 。该过程为第 1 层双树复小波分解。按照第 1 层分解步骤,继续对信号实数和虚数部分的尺度函数信号(即低频信号)进行双树复小波分解,依次得到第 2 层分解的实数、虚数部分低频、高频信号 $M_{20}, M_{21}, iM'_{20}, iM'_{21}$,以及第 3 层分解的实数、虚数部分低频、高频信号 $M_{30}, M_{31}, iM'_{30}, iM'_{31}$ 。因此原始信号经过 3 层双树复小波变换后可得到 12 个分量信号,分别为 $M_{10}, M_{11}, M_{20}, M_{21}, M_{30}, M_{31}, iM'_{10}, iM'_{11}, iM'_{20}, iM'_{21}, iM'_{30}, iM'_{31}$ 。

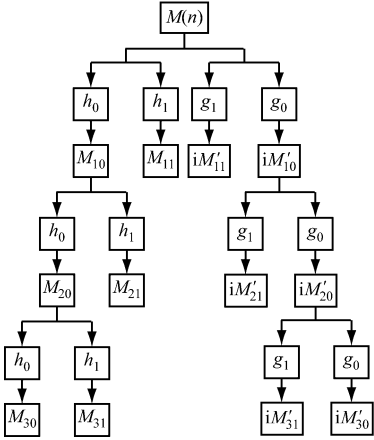


图 1 双树复小波变换 3 层分解过程

Fig. 1 Three-level decomposition process of dual-tree complex wavelet transform

经双树复小波变换分解后的高低频信号可通过重构转换为原始信号,如图 2 所示。

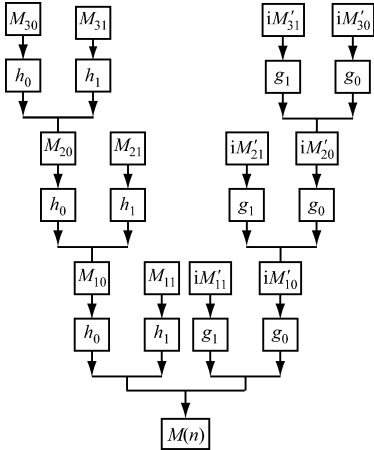


图 2 双树复小波变换 3 层重构过程

Fig. 2 Three-level reconstruction process of dual-tree complex wavelet transform

2 基于双树复小波变换的钢丝绳损伤检测信号处理方法

基于双树复小波变换的钢丝绳损伤检测信号处理流程如图 3 所示。首先,确定所用小波基函数及小波分解层数,对检测信号进行分解;然后,选择合适的作用阈值方法并确定阈值,对分解信号进行去噪处理;最后,对信号进行重构,得到降噪后的信号。

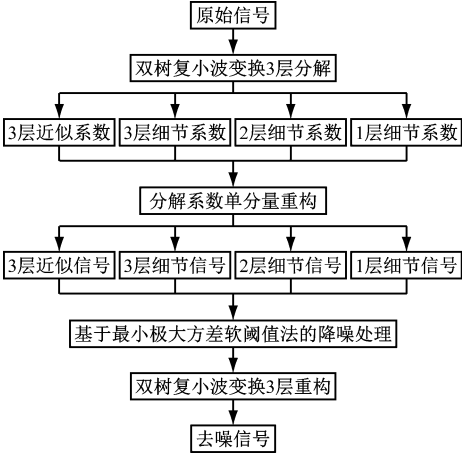


图 3 基于双树复小波变换的钢丝绳损伤检测信号处理流程
Fig. 3 Signal processing flow of wire rope damage detection based on dual-tree complex wavelet transform

进行双树复小波分解时,若分解层数过少,则降噪效果较差,但过多的分解层数会导致计算量增大^[9]。本文设计 3 层分解。采用 Q 平移法构造双树复小波变换高低通滤波器,得到高低频信号分量。作用阈值在小波变换过程中具有重要意义^[10]。与硬阈值相比,采用软阈值降噪后,信号特征不会改变^[11],因此选用软阈值对信号进行降噪处理,并采用最小极大方差软阈值模型确定阈值。完成分量信号降噪处理后,对其进行重构,得到降噪后的原始信号。

3 钢丝绳损伤检测试验

为了检验基于双树复小波变换的矿用钢丝绳损伤检测信号处理方法的有效性,在实验室环境下进行钢丝绳损伤检测试验。制备 1 根直径为 10 mm、长度为 800 mm 的钢丝绳,在距离钢丝绳一端 200 mm 处人为制造 1 处宽 5 mm、深 2 mm 的局部损伤,如图 4 所示。采用电动机、滚轮等搭建钢丝绳损伤检测试验平台^[12],如图 5 所示。



图4 钢丝绳损伤
Fig.4 Wire rope damage



图5 钢丝绳损伤检测试验平台

Fig.5 Experimental platform of wire rope damage detection

钢丝绳损伤检测信号由漏磁传感器获取,检测过程如图6所示。永久磁铁对钢丝绳励磁至磁饱和,电动机驱动钢丝绳运动。基于霍尔元件的漏磁传感器检测钢丝绳径向和轴向上的漏磁量和磁通变化,检测信号依次经差分运算放大器、滤波电路、模数转换电路处理后传输至计算机。在 Matlab 软件环境下,采用双树复小波变换对检测信号进行处理。

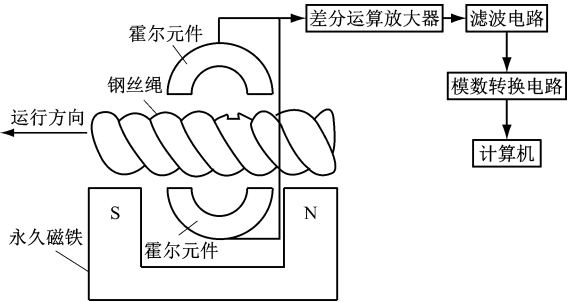
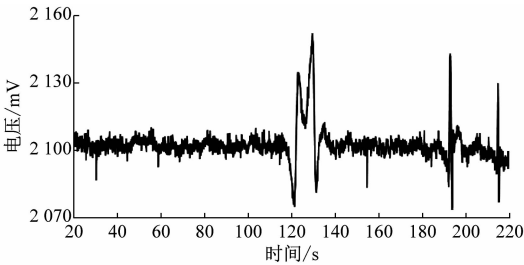


图6 钢丝绳损伤检测过程

Fig.6 Wire rope damage detection process

4 试验结果分析

钢丝绳损伤检测原始信号如图7所示,可看出信号中含有大量噪声,难以分辨出损伤信号。完成



(a) 基于双树复小波变换

检测信号的双树复小波变换 3 层分解后,对各层分解系数进行单分量重构得到的信号如图 8 所示,其中 a_3 为近似信号(低频信号), d_1, d_2, d_3 为细节信号(高频信号)。可看出钢丝绳损伤检测信号的奇异点(受损点)约在试验开始后 120~130 s 处。

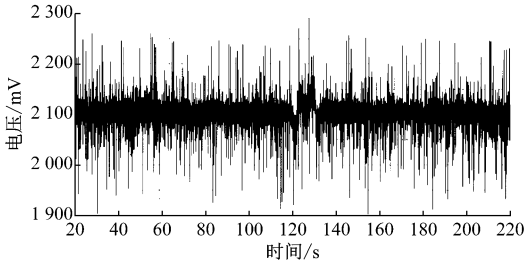


图7 钢丝绳损伤检测原始信号

Fig.7 Original signal of wire rope damage detection

分别采用双树复小波变换和经典小波变换对检测信号进行处理,处理过程中均采用最小极大方差软阈值模型确定作用阈值。试验结果如图9所示。

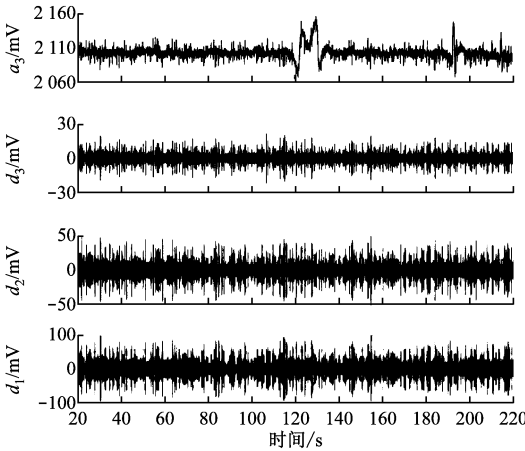
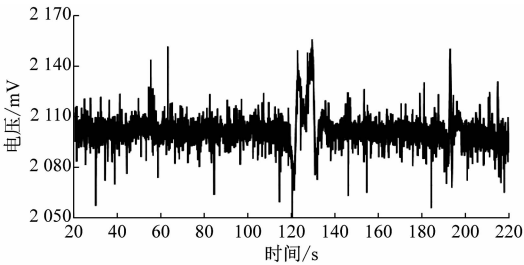


图8 经双树复小波变换3层分解后的单分量重构信号

Fig.8 Reconstruction signals of each component after three-layer decomposition by dual-tree complex wavelet transform



(b) 基于 Haar 基小波变换

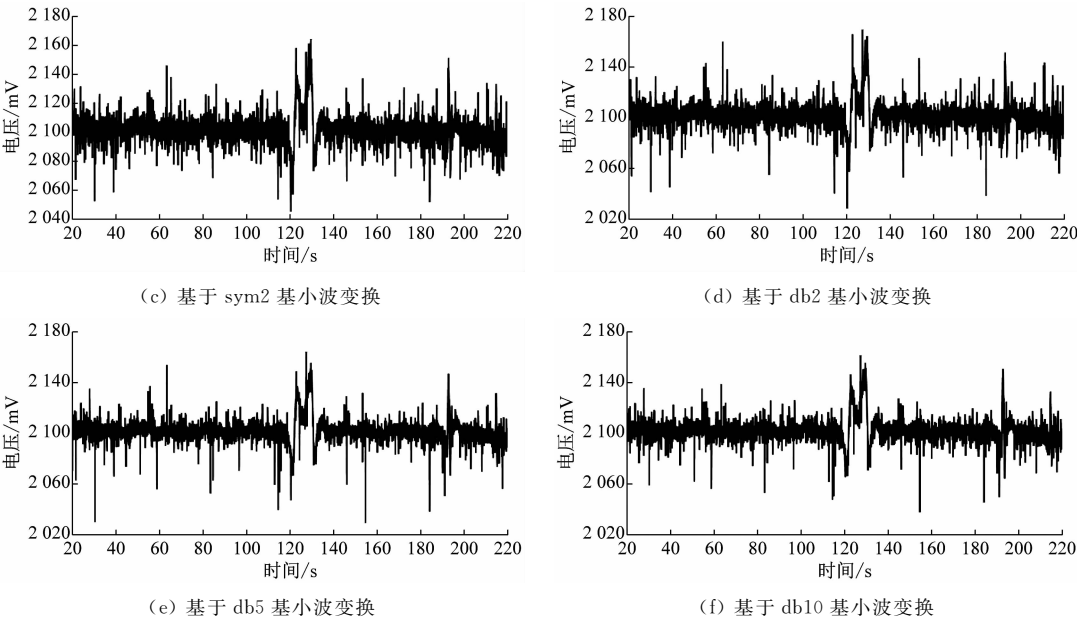


图 9 钢丝绳损伤检测信号处理结果

Fig. 9 Signal processing results of wire rope damage detection

从图 9 可看出,钢丝绳损伤检测信号经双树复小波变换处理后,尖峰和突变数量明显减少,信号整体平稳,去噪效果明显;奇异点处信号峰值明显变大,有利于后续特征提取;尽管在 2×10^5 ms, 2.2×10^5 ms 处存在尖峰,但该处信号不符合钢丝绳损伤故障特征,不会导致误判。而采用经典小波变换对钢丝绳损伤检测信号进行处理后,信号整体不平稳,奇异点处信号不明显,且存在多处类似奇异点的尖峰和突变,易导致钢丝绳损伤故障误判。

计算经不同方法处理后信号的信噪比 R ,结果见表 1。信噪比越大,则降噪效果越好。

$$R = 10 \lg \left| \frac{\sum_{n=1}^N x^2(n)}{\sum_{n=1}^N [x(n) - \bar{x}(n)]^2} \right| \tag{1}$$

式中: N 为采样次数; $x(n)$ 为原始信号; $\bar{x}(n)$ 为经处理后的预测信号。

表 1 经不同方法处理后的钢丝绳损伤检测信号信噪比
Table 1 Signal to noise ratios of wire rope damage detection signal processed by different methods

处理方法	阈值	信噪比
基于双树复小波变换	0.321 6	14.010 0
基于 Haar 基小波变换	0.345 5	7.946 6
基于 sym2 基小波变换	0.359 6	7.880 1
基于 db2 基小波变换	0.374 5	7.880 1
基于 db5 基小波变换	0.389 6	7.394 2
基于 db10 基小波变换	0.374 2	6.876 4

根据图 9 和表 1 可知,采用双树复小波变换对钢丝绳损伤检测信号的降噪效果优于经典小波变换,有利于提高钢丝绳损伤检测准确度。

5 结论

(1) 采用电磁检测法检测矿用钢丝绳损伤情况时,受井下恶劣环境影响,检测信号中包含大量噪声,且存在尖峰和突变干扰,增大了损伤信号定性和定量识别难度。采用双树复小波变换对钢丝绳损伤检测信号进行处理可较好地去除噪声,得到分布较明显的钢丝绳损伤特征信号,避免了小波变换存在的平移不变性较差、频带混叠等问题,有利于对钢丝绳损伤情况作出准确判断。

(2) 在实验室环境下搭建了钢丝绳损伤检测试验平台,对基于双树复小波变换的钢丝绳损伤检测信号处理方法的降噪性能进行验证,结果表明:该方法可有效减少检测信号中的尖峰和突变数量,使信号平稳,降噪效果优于经典小波变换,且增大了奇异点处信号峰值,有利于后续特征提取。

参考文献 (References):

[1] MOUHIB N, WAHID A, SABAH F, et al. Experimental characterization and damage reliability analysis of central core strand extracted from steel wire rope[J]. Enggineering Failure Analysis, 2021, 120:1-8.

[2] 鞠晨,张超,樊红卫,等. 基于小波包分解和 PSO-BPNN 的滚动轴承故障诊断[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8):70-74.

JU Chen, ZHANG Chao, FAN Hongwei, et al. Rolling bearing fault diagnosis based on wavelet packet decomposition and PSO-BPNN[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8):70-74.

[3] 田劫,胡耀松,郭红飞,等. 基于霍尔元件的矿用钢丝绳探伤仪研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(11):75-80.

TIAN Jie, HU Yaosong, GUO Hongfei, et al.

Research on mine-used wire rope flaw detector based on Hall element[J]. Industry and Mine Automation, 2019,45(11):75-80.

[4] HUANG Xinyuan, LIU Zhiliang, ZHANG Xinyu, et al. Surface damage detection for steel wire ropes using deep learning and computer vision techniques [J]. Measurement,2020,161:1-12.

[5] KINGSBURY N G. The dual-tree complex wavelet transform;a new technique for shift invariance and directional filters[J]. IEEE Digital Signal Processing Workshop,1998,98(1):2-5.

[6] TUDAVEKAR G,PATIL S R,SARAF S S. Dual-tree complex wavelet transform and super-resolution based video inpainting application to object removal and error concealment [J]. CAAI Transactions on Intelligence Technology,2020,5(4):314-319.

[7] 王鹤,辛云宏. 基于双树复小波变换的红外小目标检测算法[J]. 激光与红外,2020,50(9):1145-1152.
WANG He, XIN Yunhong. Infrared small target detection based on DT-CWT[J]. Laser & Infrared, 2020,50(9):1145-1152.

[8] 徐佳杰. 基于双树复小波与宽度学习的轴承故障诊断方法研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2020.
XU Jiajie. Research on bearing fault diagnosis method based on dual-tree complex wavelet and width learning[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology,2020.

[9] TORBATI N, AYATOLLAHI A, SADEGHIPOUR P. Image-based gating of intravascular ultrasound sequences using the phase information of dual-tree complex wavelet transform coefficients [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2019, 38 (12): 2785-2795.

[10] 杨宇,曾国辉,黄勃. 基于双树复小波包和改进 SVM 的轴承故障诊断[J]. 计算机工程与应用,2020,56(17):231-235.
YANG Yu, ZENG Guohui, HUANG Bo. Fault diagnosis method of bearings based on dual-tree complex wavelet packet transform and improved SVM [J]. Computer Engineering and Applications,2020,56(17):231-235.

[11] 王勇,王臻. 基于双树复小波的移动阴影检测和移除 [J]. 网络安全技术与应用,2020(4):54-56.
WANG Yong,WANG Zhen. Mobile shadow detection and removing based on dual-tree complex wavelet[J]. Network Security Technology & Application, 2020 (4):54-56.

[12] 田劼,赵彩跃. 基于 3D Maxwell 的钢丝绳漏磁检测仿真研究[J]. 煤炭工程,2020,52(7):152-156.
TIAN Jie, ZHAO Caiyue. Simulation on magnetic leakage detection of steel wire rope based on 3D Maxwell[J]. Coal Engineering,2020,52(7):152-156.