

引用格式: 吴浩源, 赵延冰, 杨永, 等, 2023. 煤矿深部开采动力灾害区域应力效应监测与前兆特征研究 [J]. 地质力学学报, 29 (3): 355–364. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232905](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232905)

Citation: WU H Y, ZHAO Y B, YANG Y, et al., 2023. Regional stress effect monitoring and precursory characteristics of dynamic disasters in deep coal mining [J]. Journal of Geomechanics, 29 (3): 355–364. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232905](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232905)

## 煤矿深部开采动力灾害区域应力效应监测与前兆特征研究

吴浩源<sup>1</sup>, 赵延冰<sup>2</sup>, 杨永<sup>2</sup>, 夏磊<sup>2</sup>, 孙源源<sup>3</sup>

WU Haoyuan<sup>1</sup>, ZHAO Yanbing<sup>2</sup>, YANG Yong<sup>2</sup>, XIA Lei<sup>2</sup>, SUN Yuanyuan<sup>3</sup>

1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 山东兖州煤业股份有限公司鲍店煤矿, 山东 邹城 273500;

3. 兖矿能源集团股份有限公司, 山东 邹城 273500

1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Baodian Coal Mine, Shandong Yanzhou Coal Mining Co., Ltd, Zoucheng 273500, Shandong, China;

3. Yankuang Energy Group Company Limited, Zoucheng 273500, Shandong, China

### Regional stress effect monitoring and precursory characteristics of dynamic disasters in deep coal mining

**Abstract:** Dynamic disaster formation and triggering are closely related to the mechanical behavior of the regional stress field. The regional local stress field is continuously adjusted and changed under the effect of coal mining disturbance. In order to study the precursor response of regional stress field change to dynamic disasters, we used the analytical methods of variational modal decomposition and Hilbert transform to perform time-frequency analysis on the data collected from the Baodian coal mine and to identify and extract the intrinsic modal function (IMF) components reflecting the abnormal dynamic changes in the borehole strain data. The results show that the borehole strain observation data can effectively record the small changes inside the rock mass related to the mining disturbance. After decomposition and transformation, the abnormal fluctuation characteristics of IMF components appear two days before the dynamic pressure event, which is characterized by a “sudden jump” from the stage of stable deformation to the stage of rapid change, “shock” in the stage of rapid deformation change and “drop” in the stage of instability. According to the three-stage theory of seismic deformation, the normal starting time of deformation before the occurrence of dynamic disasters and the “sudden jump-shock-fall” are used as the precursor criteria for the occurrence of coal mine dynamic disasters. Based on the accurate observation of the regional stress field by borehole strainmeter, a criterion method applied to the warning of coal mine power hazards is constructed, which can provide a reference for the safe and efficient recovery of working faces under similar mining environments in coal mines.

**Keywords:** dynamic disaster; variational mode decomposition; borehole strain; Hilbert transform; precursory characteristics

**摘要:** 动力灾害的孕育及诱发与区域应力场的力学行为密切相关, 煤矿开采扰动作用下区域局部应力场不断调整变化。为了研究区域应力场变化特征对动力灾害的前兆响应, 采用变分模态分解和希尔伯特变换的方法对鲍店煤矿采集数据进行时频分析, 识别和提取钻孔应变数据中反映动力异常变化的固有模

基金项目: 山东省科技重大创新项目 (2019SDZY02, 2019SDYZ05)

This research is financially supported by the Major Scientific and Technological Innovation Projects of Shandong Province (Grants 2019SDZY02 and 2019SDYZ05).

第一作者: 吴浩源 (1988—), 男, 博士, 主要从事矿山深部开采动力灾害等方面的研究工作。E-mail: [haoyuanwucumt@163.com](mailto:haoyuanwucumt@163.com)

通讯作者: 孙源源 (1987—), 男, 工程师, 主要从事矿山建设工作。E-mail: [mygcjdx@ykjt.cn](mailto:mygcjdx@ykjt.cn)

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-05-05; 责任编辑: 王婧

态分量。研究表明,钻孔应变观测数据能够有效记录开采扰动相关区域岩体内部的微小变化,解析原始数据滤去干扰信号后获得表征动力异常的特定频段,分解变换后固有模态分量异常波动特征早于动压事件前2~7天出现,表现出形变稳定变化阶段向快速变化阶段“突跳”、形变快速变化阶段“震荡”以及失稳阶段“跌落”的显著特征。依据地震形变三阶段理论,判别动力灾害发生前形变异常开始时刻和“突跳”“震荡”“跌落”作为煤矿动力灾害发生的前兆判据。基于钻孔应变仪对区域应力场的精确观测,构建了应用于煤矿动力灾害超前预警的判据方法,可为煤矿相似开采环境下工作面的安全高效回采提供借鉴和参考。

**关键词:** 动力灾害; 变分模态分解; 钻孔应变; 希尔伯特变换; 前兆特征

**中图分类号:** TD 32; P315.72+7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0355-10

**DOI:** 10.12090/j.issn.1006-6616.20232905

## 0 引言

近年来,随着煤矿开采深度不断加深,动力灾害的发生日趋频繁。其中,冲击地压灾害的破坏力巨大,造成的后果严重影响了煤矿安全开采。从工作面的尺度出发,煤层在开采过程中常伴随上覆坚硬岩层的突然破裂,引发岩体强烈的冲击破坏,表征为一定范围内的破坏现象(纪洪广等,2003)。近年来,专家学者着眼于工作面尺度之外更大的范围去研究煤矿相关动力灾害的发生机制及预警,将研究范围扩展至区域应力场的范畴(李铁等,2003;刘金海等,2014;张月征等,2016a)。甘肃华亭煤矿于2014年发生的一次冲击地压灾害,其释放的能量达到了 $10^8$  J量级,造成1500 m巷道底鼓1.5 m,与工作面尺度内的顶板结构失稳相比,该灾害表现出破坏力强、波及范围广等特点,其根本原因在于周边区域内煤岩体为冲击地压灾害的发生提供了必要的力能条件(张月征等,2016b)。因此,在工作面开采期间,应从更广的区域范围入手,寻求不同尺度的动力异常响应特征,以期探索深部煤矿开采过程中动力灾害的发生及预警机制。

天然地震和矿震都是地层内部的动力学现象,可将天然地震超前预报的观测手段应用到矿震或冲击地压灾害的监测中,其中地壳形变观测是地震地面监测体系中重要的前兆观测项目(邱泽华和石耀霖,2004),监测台站观测到地应力拉伸脉冲异常与地壳地震活动显著相关(邱泽华,2017)。采用S变换和高通滤波从钻孔应变数据中提取短周期信号,能够发现汶川地震前钻孔应变观测出现异常(刘琦和张晶,2011)。借助钻孔应变观测仪器实现对地壳变形的精确记录,可及时捕捉地壳内部如固

体潮汐量级的微小变化(苏恺之,2003;邱泽华,2010;张聪聪,2015)。钻孔应变仪因其频带宽、精度高,适用于监测煤矿深部开采动力灾害异常响应特征。为了揭示煤层开采过程中区域应力场的演变规律,需要考虑开采扰动与区域应力场协同作用对矿震活动性的相互影响,往往需要捕捉长短周期信号(云龙等,2021)。相比监测煤矿动力灾害的其他设备,钻孔应变仪因其监测频带宽的特性(池顺良,2013),所采集的数据含有高频短周期的噪声和低频长周期的应变固体潮频段以及能够反映矿震活动规律的特定频段,为探究工作面采动环境中矿震孕育与诱发机制,需滤去噪声和应变固体潮频段。

针对时域内难以有效区分煤矿动力灾害异常响应信息的问题,文章以鲍店煤矿七采区东翼不规则区域(73<sub>上</sub>11工作面)开采期间观测的钻孔应变数据为基础,采用变分模态分解(VMD)方法,获得不同频率的固有模态函数(IMF)分量。通过构建带通滤波通道,滤去高斯噪声信号和固体潮分量,重构反映矿震活动的IMF分量,利用希尔伯特(Hilbert)变换将时域内看似杂乱无章却能反映矿压活动的应变信息转换成频域信息,求解该分量的瞬时能量和以天为单位的能量累计变化,分析信号异常处矿震的发生与区域应力场之间的相互作用效应,实现对矿震或冲击地压灾害前兆信息的识别和解析,以期对相似地质条件下煤矿动力灾害的预测预报提供一定指导意义。

## 1 工程概况及资料选取

鲍店煤矿73<sub>上</sub>11工作面位于井田东北部边界,东部与东滩煤矿四采区(43<sub>上</sub>09采空区)、十四采区(14316采空区和14302采空区)相接,北部与兴隆庄

煤矿四采区相接, 相邻矿井的3个采区回采工作已完成, 西部为鲍店煤矿 73<sub>上</sub>02 采空区和 73<sub>上</sub>04 采空区, 南部为十采区、七采区 (73<sub>上</sub>09 采空区) 南翼采区, 相邻采区已基本采完 (图 1)。因此, 工作面之间相互关系呈现孤岛工作面开采。其中, 七采区东翼南侧已回采, 待回采的 73<sub>上</sub>11 工作面处于不规则三角形区域 (图 1)。73<sub>上</sub>11 工作面主采 3#煤层, 煤层采深超过 600 m, 且距煤层上方 100 m 处有厚硬砂岩层, 其破断后释放大量弹性应变能, 该厚硬岩层的失稳对工作面安全开采影响显著。根据地质勘探结果, 已探明鲍店煤矿七采区厚硬砂岩最小厚度为 41.75 m, 最大厚度超过 373.55 m。由采区东北部边界向东西翼分界线逐渐增加, 73<sub>上</sub>11 工作面上覆厚硬砂岩层厚度大于 300 m, 部分区域超过 350 m, 工作面周边采空区覆岩运动以及应力场调整势必增加 73<sub>上</sub>11 工作面应力分布的复杂性。综上所述, 73<sub>上</sub>11 工作面开采期间主要受孤岛工作面导致的应力集中和上覆厚硬岩层稳定性的影响, 故 73<sub>上</sub>11 工作面在掘进和回采过程中动力异常响应较为突出, 易引发矿震或冲击地压相关动力灾害。

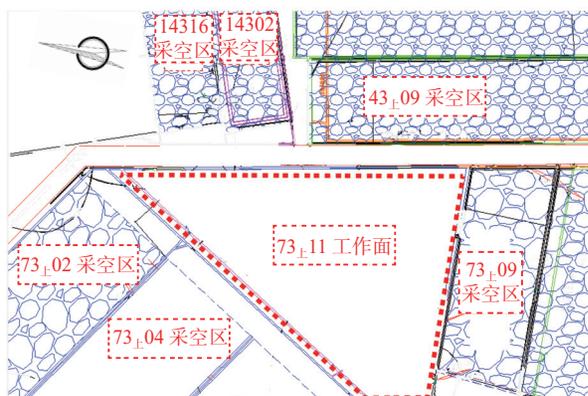


图 1 鲍店煤矿 73<sub>上</sub>11 工作面邻近关系示意图 (海拔 -546.8 m)

Fig. 1 Neighboring relationship diagram of the working face position (The altitude is -546.8 m)

为了揭示矿震发生前的异常响应特征, 选取能量为  $10^5$  J 的矿震事件作为研究对象, 截取 5 月份和 10 月份每次矿震发生前 20 天和震后 10 天作为一个完整的时间序列, 基于 VMD 识别和提取钻孔应变数据。

## 2 基于 VMD 识别和提取钻孔应变数据

工作面开采期间, 钻孔应变仪因其具有高分辨

率、高精度等特性, 采集的数据会受到所处环境中干扰因素的影响, 如高斯噪声的即时干扰和应变固体潮的周期性干扰等 (文勇等, 2012)。消除噪声常见的滤波方法主要有小波变换、傅里叶变换或短时变换 (穆峰等, 2015), 上述方法在处理平稳信号时所表现的效果是满足滤波需求的, 但是在处理非平稳信号时误差较大, 因非平稳信号的特性是其信号自身频率随时间变化而变化, 傅里叶变换在处理相关问题时只能给出总体效果, 并不能够反应出某一时刻信号的局部信息。在此基础上, Huang et al. (1998) 提出经验模态分解 (EMD) 来处理非平稳、非线性信号, 其特点是将原始信号按照频率从高到低的顺序分解为若干个固有模态函数分量, 分解后的各模态函数具备其自身固有的属性; 然后, 再根据希尔伯特变换将信号从时域角度转换至频域角度, 这在面对时域内非线性、非平稳信号分析效果差的环境下, 提供了有力的技术支撑。但随着 EMD 分解方法在信号处理方面的广泛应用, 其缺点也暴露出来, 如其端点效应和模态混叠严重, 不具备严格的数学模型。基于此问题, 在 EMD 基础上又发展出很多改进算法, 如集合经验模态分解 (EEMD; Huang and Wu, 2008; 陈可等, 2010)、补充集合经验模态分解 (CEEMD; Yeh et al., 2010) 和改进集合经验模态分解 (MEEMD; 郑近德等, 2013) 等。EEMD 是通过向原始信号中加入高斯白噪声来抑制经验模态分解过程中存在的模态混叠现象, CEEMD 是通过向目标信号添加成对的符号相反的白噪声, 来确保信号分解具有真实的物理意义, MEEMD 结合 CEEMD 与排列熵 (PE) 算法在抑制模态混叠方面取得理想的结果 (邢昀和荣剑, 2018)。上述相关改进算法虽然在一定程度上解决了模态混叠和端点效应问题 (康佳星等, 2016), 但本质上仍是时域范畴内的递归求解。随后, Dragomiretskiy and Zosso (2014) 提出的一种自适应信号处理方法 (VMD), 通过迭代不断更新各模态函数及中心频率, 得到若干具有一定带宽的模态函数, 获取变分模态的最优解。VMD 相较于 EMD 是基于频域的非递归求解算法, 弥补了 EMD 的缺点。

井下工作环境、地质环境复杂多变 (谭元隆等, 2021), 钻孔应变仪采集的数据记录了不同来源、不同特性的混合时频信号, 仅仅从应变数据波形特征

的时变角度难以精确分析局部细节信息。但诸如噪声、应变固体潮等某个单频信号蕴含着固有的优势频率,采用VMD的方法,能够将具有不同来源、不同频率的波动信号分离出来,进而针对不同的研究问题,选择敏感频率段的数据作为研究对象。

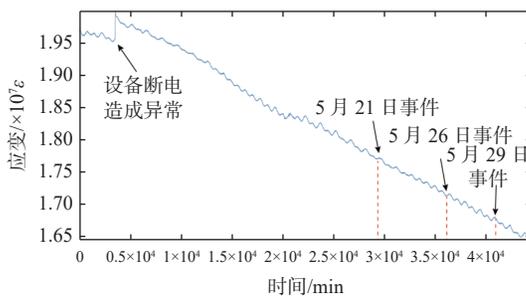
文章采用四分量钻孔应变仪分析采动环境中应变的相对变化规律,四分量钻孔应变仪通过记录元件电容值实现对应变的观测。为界定观测数据质量是否满足研究问题的要求,需要依靠质量评价体系评定数据的可靠性,而钻孔应变数据质量评价体系则是自洽方程(式)。四分量钻孔应变仪采集的数据经过应变换算后得到面应变  $S_a$  (邱泽华等, 2009),依靠自洽方程既可以评判数据自身的可靠性,也可以用来识别四分量钻孔应变仪的工作状态。若数据段内整体变化趋势一致,则满足自洽方程:

$$S_1 + S_3 = S_2 + S_4$$

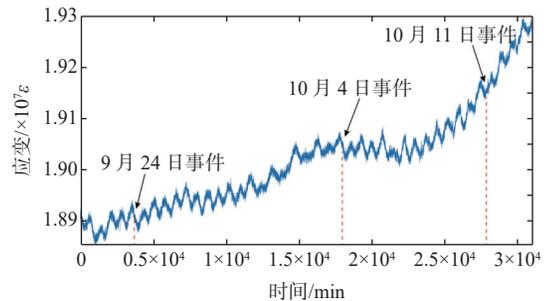
式中:  $S_1$ —元件1的观测数值;  $S_2$ —元件2的观测数值;  $S_3$ —元件3的观测数值;  $S_4$ —元件4的观测数值。

动力灾害的孕育及其诱发与区域应力场的力

学行为密切相关,这里的动力灾害主要涉及冲击地压、矿震以及工作面来压期间发生的顶板异常动力显现事件。针对能级跃迁较大的煤矿动力灾害,钻孔应变曲线走势表现为显著的“阶跃”(张月征等, 2016b),即数据曲线在动力灾害发生时刻产生台阶式上升或下降。此外,还存在一些能级跃迁较小的动压事件。5月4日—5月31日四分量钻孔应变仪分量1和分量3根据自洽方程拟合后的观测数据(图2a),9月22日—10月13日分量2和分量4根据自洽方程拟合后的观测数据(图2b),均满足自洽方程,图中仅绘制拟合后的观测曲线。观察两个不同时间序列上钻孔应变数据的幅值变化,可知某一时刻发生动力异常事件的典型状态失稳现象在应变数据波动特征上并不能够有效直观地显现,应力传递路径受钻孔应变仪安装位置、震源处煤岩介质力学属性等影响,动力异常事件发生前后微小的响应信号大都淹没在固体潮背景下,故有必要根据时频变换识别或提取区域应力场中细微变化与动力灾害的前兆响应特征。



(a) 5月4日—5月31日应变观测曲线



(b) 9月22日—10月13日应变观测曲线

图2 时频解析前钻孔应变仪采集原始数据曲线

Fig. 2 Raw data curves by the borehole strainmeter before time-frequency analysis

钻孔应变仪采集的是多频段混合后的数据(欧阳祖熙等, 2009),经VMD分解后得到若干个固有模态函数(IMF)。定义有意义的瞬时频率其必要条件是函数关于零均值局部对称且过零点的数目与极点的数目一致。据此, Huang et al. (1998)定义了IMF应满足以下2个条件:①在整个数据区间内,极值点的数目与过零点的数目相等或至多相差1个;②在任意一点处,由局部极大值点定义的包络以及由局部极小值点定义的包络的均值为零。此外,为了消除噪声和固体潮等因素对要研究数据段的影响,在VMD分解的基础上,采用希尔伯特(Hilbert)变换依次分析IMF分量,将时域信息转换至频域信息范畴。按照上述理论对5月1日—5月31日的数

据段进行分解,获得各频段IMF曲线(图3)。

如表1所示,IMF1—IMF5周期皆小于1h,推测可能是设备自身或周围环境中产生的高斯噪声(Barman et al., 2016),故剔除IMF1—IMF5分量,以排除噪声对原始数据的干扰。IMF9和IMF10的频率分别为  $2.24 \times 10^{-5}$  Hz与  $1.16 \times 10^{-5}$  Hz,转换至周期后分别为12.4h和23.9h,时间维度上与固体潮严格匹配,确定为固体潮的半日波和日波分量。此外,与IMF9和IMF10邻近的IMF11和IMF12为固体潮谐波分量。

为探究噪声频段对所研频段数据造成的干扰,综上所述,将混杂的各频段数据解析后重构,对比分析降噪前与降噪后的频段曲线(图4)。降噪信号

段与原始信号背景趋势走向一致,对钻孔应变数据的局部异常突跳点捕捉效果良好,降噪信号能够从局部微小信号上反映钻孔应变的波动特征。

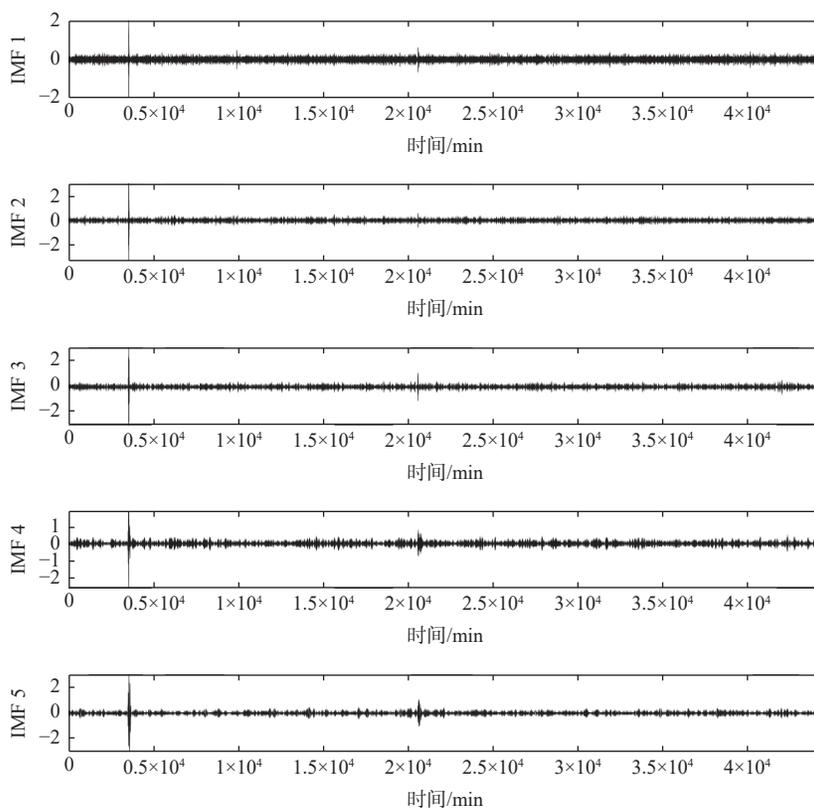
利用 VMD 对含噪信号按照频率从高到低依次分解,得到若干个固有模态分量。通过构建带通滤波器,滤去高频噪声项和低频固体潮背景趋势项后,将其余 IMF 分量重构。

通过上述方法,分析用于监测矿山动力灾害和区域应力场变化的钻孔应变数据。依据变分模态分解原理,既能排除原始信号中的高频噪声,又能

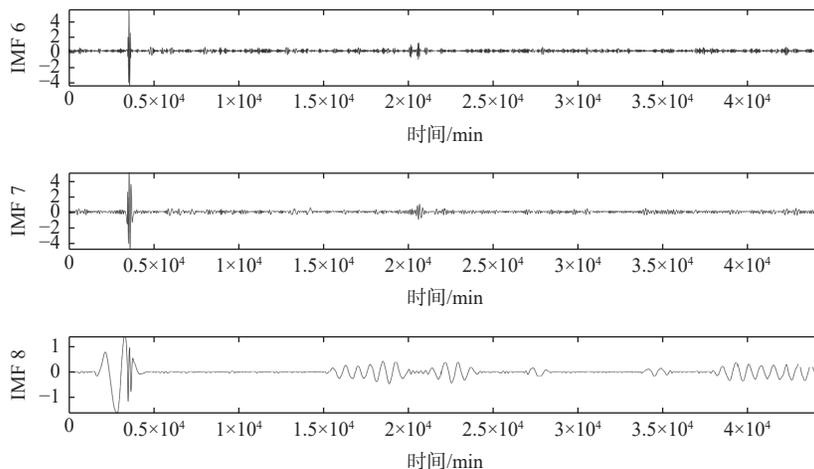
剔除低频固体潮背景数据。因此,该方法充分保留了特定信号段非线性、非平稳的固有属性,经频谱分析得到 IMF1—IMF12 频率与周期的优势分布,对比每个 IMF 的固有属性和信号时频差异性,从而实现钻孔应变数据的降噪处理。

### 3 基于希尔伯特 (Hilbert) 变换的区域应力异常提取方法

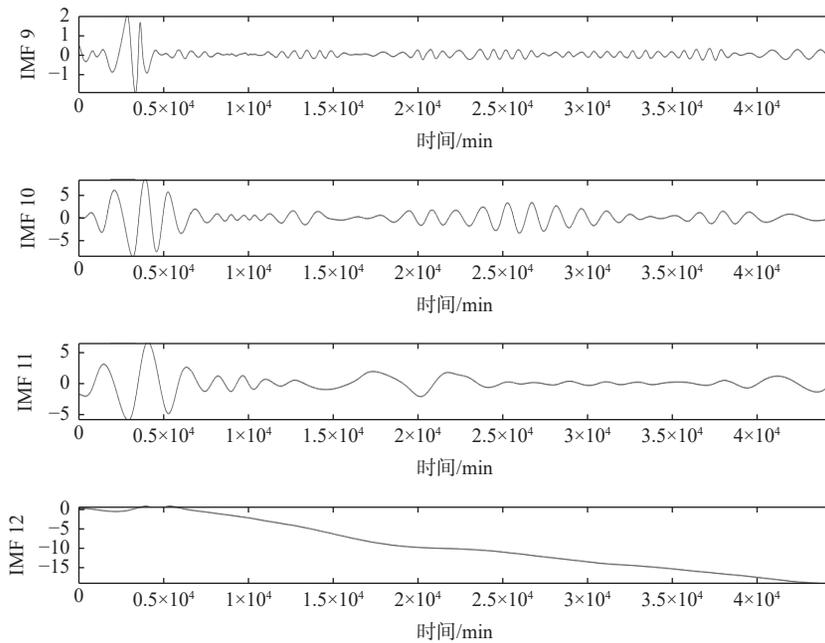
冲击地压和矿震都属于煤矿常见的动力灾害,



(a) 采集环境中产生的高斯噪声频段 (IMF1—IMF5)



(b) 与矿震相关频段 (IMF6—IMF8)



(c) 固体潮及相关谐波频段 (IMF9—IMF12)

图 3 5月1日—5月31日钻孔应变数据 VMD 分解曲线图

Fig. 3 VMD decomposition curves (IMF1—IMF13) of borehole strain data from May 1<sup>st</sup> to May 31<sup>st</sup>

表 1 钻孔应变数据 VMD 分量频率周期表

Table 1 Frequency periodic table of VMD component of borehole strain data

IMF	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	$3.98 \times 10^{-3}$	$2.62 \times 10^{-3}$	$1.19 \times 10^{-3}$	$6.64 \times 10^{-4}$	$3.17 \times 10^{-4}$	$2.41 \times 10^{-4}$
周期/h	0.07	0.10	0.23	0.41	0.89	1.15
IMF	7	8	9	10	11	12
频率/Hz	$1.53 \times 10^{-4}$	$6.37 \times 10^{-5}$	$2.24 \times 10^{-5}$	$1.16 \times 10^{-5}$	$1.51 \times 10^{-6}$	$7.49 \times 10^{-7}$
周期/h	1.8	4.3	12.4	23.9	185	370

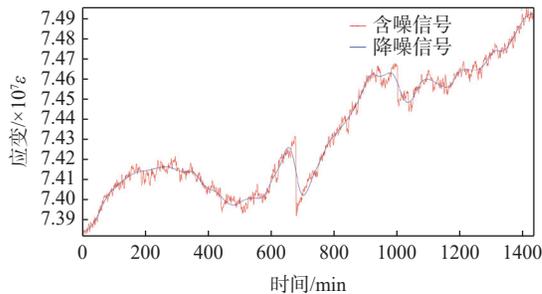


图 4 降噪前后对比效果图

Fig. 4 Comparison diagram before and after noise reduction

两者既有相似之处,也有其内在的差异。通常由于积聚的弹性应变能瞬间释放致使周围煤岩体的破坏,从而引起冲击地压和矿震。前者多发生在巷道或工作面以及开采扰动近源区,并伴随有煤岩体抛出的动力现象,而后者是开采扰动与区域应力场共同作用诱发的地震,多发生在工作面开采扰动远源

区,其在表征动力破坏程度上弱于冲击地压,且不发生煤岩体的抛出现象。此外,从二者的发生频次上分析,冲击地压灾害数要远小于矿震,但当满足一定的临界条件时,矿震会诱发冲击地压灾害的发生。因此,区域应力场监测是实现矿震预测、预警的基础和前提,且有利于揭示冲击地压的致灾机理(姜耀东等, 2014)。

为了得到区域应力场的实时变化,将经过 VMD 分解后得到的精细信号段进一步分析和处理。常用的方法有傅里叶变换和希尔伯特变换。其中,傅里叶变换的优势表现为对平稳或线性信号的处理,若使用该方法处理非平稳、非线性的信号,则需进行特定的变形后方可使用,如:小波变换和短时傅里叶变换。但经过小波变换和短时傅里叶变换解析的信号会出现负频率,负频率在分析相关问题时不具有任何物理意义,而希尔伯特变换在解析过程

中虚数部分较实数部分滞后  $\pi/2$ , 借用此特性可消除负频率的影响。因此, 希尔伯特变换在解析非线性、非平稳信号时, 有其自身特有的优势。

根据矿震事件发生的时间, 以分钟为单位提取钻孔应变数据, 经希尔伯特变换后得到矿震分量的瞬时幅值、瞬时能量和每日累计能量(图 5, 图 6)。由 5 月 1 日—5 月 31 日和 9 月 22 日—10 月 13 日

的钻孔应变瞬时幅值时程变化曲线可知(图 5a, 图 6a), 在时间序列内统计矿震发生频次共计 6 次, 分别为 5 月 21 日、5 月 26 日和 5 月 29 日及 9 月 24 日、10 月 4 日和 10 月 11 日, 从瞬时幅值和累计能量两个角度均反应了相同的变化规律。其中, 日累计能量的变化趋势说明区域应力场内能量在不断的积聚、释放和耗散(图 5b, 图 6b)。

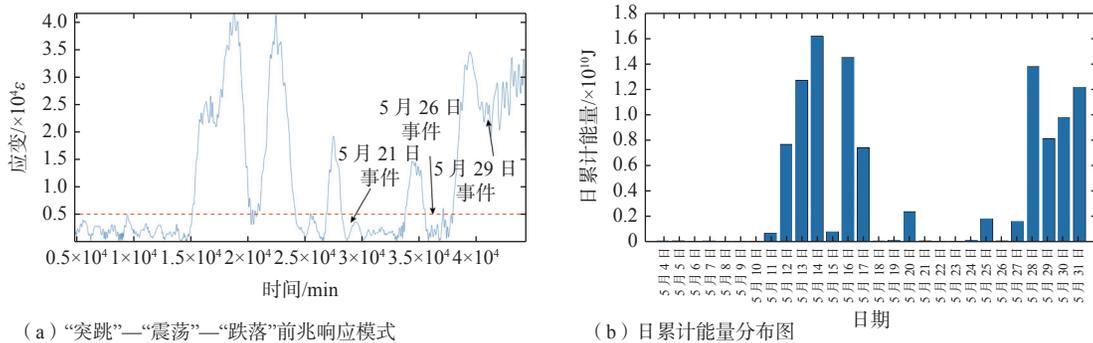


图 5 5 月 1 日—5 月 31 日重构分量动力异常响应幅值和能量时程变化

Fig. 5 Dynamic anomaly response amplitude and energy time-history change of reconstructed components from May 4<sup>th</sup> to May 31<sup>st</sup>

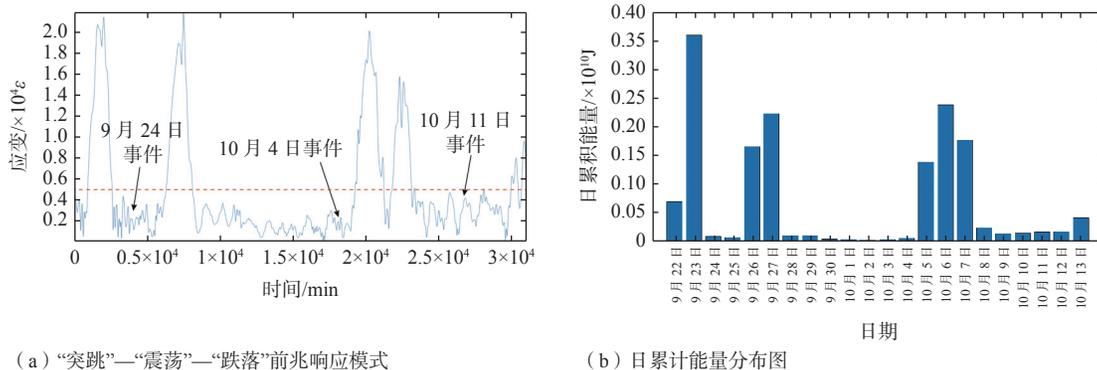


图 6 9 月 22 日—10 月 13 日重构分量动力异常响应幅值和能量时程变化

Fig. 6 Dynamic anomaly response amplitude and energy time-history change of reconstructed components from September 22<sup>nd</sup> to October 13<sup>rd</sup>

### 3.1 从幅值曲线波动形态上分析

矿震与地震都是地下岩层运动后产生形变进而导致弹性应变能的积累并释放(蒋骏等, 2000; 彭华等, 2008, 2011; 王凯英, 2018), 两者在发生机制上具有相似的特征。Mescherikov(1968)、Yoichiro(1974)通过对大量地震资料的归纳总结发现, 在地震的孕育和诱发过程中存在  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  三个阶段, 运用该理论在后续的地震跟踪预测中取得了显著效果。为解释地震形变三阶段的物理实质, 冯德益(1983)认为  $\alpha$  阶段以岩层的微小破裂为主, 持续扩展乃至相互贯通, 导致最终发生非震滑动或岩层的蠕变;  $\beta$  阶段则是因断层活化而引起的突变异常, 并最终进入  $\gamma$  阶段, 表征为大量积蓄弹性应变能的释

放。如图 7 所示, 地震形变三阶段的曲线走势与岩石破坏的应力应变曲线相似, 运用该理论分析煤矿矿震的活动规律, 以期探究矿震发生的前兆特征。以 5 月 21 日矿震事件为例, 应变幅值“有升有降”走势契合地震发生的前期  $\alpha$ 、中期  $\beta$  和后期  $\gamma$  三个形变阶段。 $\alpha$  阶段: 应变稳定变化, 该阶段虽然也会造成煤岩破裂, 但区域应力场总体稳定, 能量积聚速率与能量释放速率趋于一致, 不足以引发动力灾害。 $\beta$  阶段: 应变急剧变化, 表现形式为“震荡”+“突跳”, 这是相关区域岩层破裂产生非稳态应力调整现象的表征, 能量积聚与能量释放处于临界状态, 如 5 月 21 日矿震前期先发生“震荡”后发生“突跳”, 而 5 月 26 日矿震  $\beta$  阶段应力异常表征为“震荡”、“震

荡”+“突跳”2种应变异常表现形式受矿震震源处和“力链”范围内煤岩介质属性、应力传递路径、开采扰动影响范围,以及震源、工作面 and 钻孔应变安装设备三者相对位置的影响,区分2种异常形式有利于了解区域应力场的赋存状态,并为未来的煤矿开采工作提供技术指导。 $\gamma$ 阶段:大量积聚弹性应变能瞬间释放,造成煤岩体破裂并引发矿震。

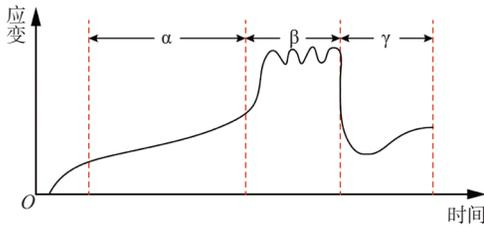


图7 地震形变三阶段物理模型(宋治平等, 2004)  
Fig. 7 Three-stage physical model of seismic deformation (Song et al., 2004)

### 3.2 从形变异常开始时间分析

钻孔应变数据经VMD识别并提取能够反映矿震的IMF分量。该IMF分量经希尔伯特变换后所得时间幅值变化关系,亦是矿震震源、工作面开采位置和钻孔应变仪安装位置三部分组成的系统所形成的一定空间范围内区域应力场变化的表征。不同于天然地震发生前2年应变出现异常的规律(宋先月等, 2003),解析出矿震形变异常早于其发生2~7天(表2, 表3),这是天然地震与煤矿矿震的孕震环境不同所造成的。工作面开采扰动促使区域应力场不断的调整,对比观察开采扰动作用下的区域应力场幅值随时间的变化,形变的三个阶段中稳定变化阶段( $\alpha$ )的应变格值为 $0.5 \times 10^{-10} \epsilon$ ,形变快速变化阶段( $\beta$ )的应变格值为稳定变化阶段的3倍以上,呈现为“突跳”的变化特征。动力灾害发生前,区域应力场内应力(应变)显著升高,积蓄大量的弹性应变能,当相关区域的可释放弹性应变能超过岩石表面应变能时,即可沿破裂面瞬间释放。

基于鲍店煤矿典型动力灾害-矿震事件,通过分析钻孔应变数据对区域应力场异常的响应,认为应变幅值由形变稳定变化阶段向快速变化阶段的幅值阶跃为形变异常开始时间。随后,区域应力场在开采扰动作用下不断调整直至进入震前失稳阶段,能量释放呈现出动力灾害形式。因此,对应变数据进行VMD和Hilbert变换后,可以识别并提取能够反映煤矿动力异常响应的IMF分量,并在地震形变三阶段的理论基础上,统计分析其幅值和累积

表2 5月份形变异常前兆模式特征表

Table 2 Characteristics of deformation anomaly precursory mode in May

发生时间	形变异常开始时间	应力调整持续时间	表现形式
5月21日	5月11日	10 d	“震荡”+“突跳”
5月26日	5月24日	2 d	“震荡”
5月29日	5月27日	2 d	“突跳”+“震荡”

表3 10月份形变异常前兆模式特征表

Table 3 Characteristics of deformation anomaly precursory mode in October

发生时间	形变异常开始时间	应力调整持续时间	表现形式
9月24日	9月22日	2 d	“突跳”
10月4日	9月27日	7 d	“突跳”
10月11日	10月6日	5 d	“突跳”+“震荡”

能量的时程变化规律,进而尝试建立煤矿动力灾害的预测预报模式。

## 4 存在的不足与展望

(1)基于鲍店煤矿所在区域地应力监测数据,采用Hilbert变换方法进行了解析,获得了煤矿动力灾害发生前明显的前兆异常响应特征,但不能代表不同构造环境下的应变前兆特征,未来还需进一步丰富不同构造环境下的应变监测数据采集与分析工作,以期归纳总结出煤矿动力灾害的预测预报模式。

(2)在对分解出的若干个IMF分量进行异常信号提取和识别工作中,由于煤矿井下环境复杂多变,设备采集到的原始数据受到严重干扰,以上研究中所采用的方法仅是针对具体问题的定向研究,在一定程度上删除了干扰信号的影响,但是使用的算法有其自身的局限性,存在部分数据段无法消除干扰的问题,后期还需进一步优化算法,以期提高数据分析的准确性。

## 5 结论

采用VMD和Hilbert变换的方法,分析了鲍店煤矿开采期区域应力场变化的钻孔应变监测数据,结论如下:

(1)将VMD方法应用到钻孔应变数据处理中,能够将混频信号分解为若干个具有特定频段的固有模态分量,为后续动力异常响应特征的识别和提

取提供无模态混叠的数据源。

(2)通过构建带通滤波器,消除高斯噪声和应变固体潮干扰项,重构信号获得能够反映区域应力场对矿震、冲击地压等动力灾害响应的IMF分量,并采用Hilbert变换方法处理特定频段IMF分量。

(3)依据地震形变三阶段理论,定义形变异常开始时间为区域应力场进入异常状态时刻,并经过形变快速变化阶段的“震荡”和“突跳”后,释放出积聚的弹性应变能,满足岩石强度失效和变形破坏准则时,即能引发动力灾害。

(4)基于钻孔应变仪对区域应力场的精确观测,将形变异常开始时间作为动力灾害事故发生前的响应时刻,为未来煤矿开采工程的安全性和稳定性评价提供了一种切实可行的前兆信息判别模式。

## References

- BARMAN C, GHOSE D, SINHA B, et al., 2016. Detection of earthquake induced radon precursors by Hilbert Huang Transform[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 133: 123-131.
- CHEN K, LI Y, CHEN L, 2010. Ensemble empirical mode decomposition for power quality detection applications[J]. *Computer Simulation*, 27(3): 263-266. (in Chinese with English abstract)
- CHI S L, 2013. Strain anomalies before Wenchuan and Lushan earthquakes recorded by component borehole strainmeter[J]. *Science & Technology Review*, 31(12): 27-30. (in Chinese with English abstract)
- DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D, 2014. Variational mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 62(3): 531-544.
- FENG D Y, 1983. Three-stage development process of earthquake precursors: observations and theory[J]. *Journal of Seismological Research*, 6(2): 211-226.
- HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear analysis[J]. *Proc R Soc*, A454: 903-995.
- HUANG N E, WU Z H, 2008. A review on Hilbert-Huang transform: method and its applications to geophysical studies[J]. *Reviews of Geophysics*, 46(2): RG2006.
- JI H G, WANG J A, CAI M F, 2003. Relativity and unity of physical and geometrical characteristics of rockbursting events[J]. *Journal of China Coal Society*, 28(1): 31-36. (in Chinese with English abstract)
- JIANG J, LI S L, ZHANG Y B, et al., 2000. Earthquake precursor information processing and software system[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- JIANG Y D, PAN Y S, JIANG F X, et al., 2014. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 39(2): 205-213. (in Chinese with English abstract)
- KANG J X, HU Y, CHEN H, et al., 2016. Comparative study of VMD and EMD in time-frequency analysis of seismic signals[C]//Proceedings of the 2016 China earth sciences annual conference (XXXIX): Topic 79: Recent progress in paleontology and stratigraphy in China, topic 80: Geothermal theory and applications, topic 81: frontiers of applied geophysics. Beijing: Chinese Geophysical Society: 89-91. (in Chinese)
- LI T, JI L W, ZUO Y, et al., 2003. Study on the seismological method to forecast stronger tremor[J]. *Seismological Research of Northeast China*, 19(1): 53-59. (in Chinese with English abstract)
- LIU J H, ZHAI M H, GUO X S, et al., 2014. Theory of coal burst monitoring using technology of vibration field combined with stress field and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 39(2): 353-363. (in Chinese with English abstract)
- LIU Q, ZHANG J, 2011. Application of s transform in analysis of strain changes before and after Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31(4): 6-9. (in Chinese with English abstract)
- MESCHERIKOV J A, 1968. Recent crustal movements in seismic regions: geodetic and geomorphic data[J]. *Tectonophysics*, 6(1): 29-39.
- MU F, CHANG F L, JIANG Q Y, 2015. Signal filtering based on Improved Empirical Mode Decomposition[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 45(3): 35-42. (in Chinese with English abstract)
- OUYANG Z X, ZHANG J, CHEN Z, et al., 2009. New progress in multi-component observation of crustal deformation in deep boreholes[J]. *Recent Developments in World Seismology*(11): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, 2008. Analysis of the volume strain data from the Shandan in-situ stress monitoring station[J]. *Journal of Geomechanics*, 14(2): 97-108. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, et al., 2011. Strain characteristics of WFS stress stations and its Co-seismic effects analysis: a case study upon  $M_w 9.0$  earthquake in Japan[J]. *Journal of Geomechanics*, 17(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, SHI Y L, 2004. Developments of borehole strain observation outside China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 26(S1): 162-168. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, KAN B X, TANG L, 2009. Conversion and application of 4-component borehole strainmeter data[J]. *Earthquake*, 29(4): 83-89. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, 2010. How to identify earthquake precursor?[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(S2): 1-5, 9. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, 2017. Theory and application of borehole strain observation[M]. Beijing: Seismological Press: 15-16. (in Chinese)
- SONG X Y, SONG Z P, WU A X, et al., 2003. The temporal-spatial evolution characteristics of deformation anomaly before strong earthquakes[J]. *Earthquake*, 23(2): 70-76. (in Chinese with English abstract)
- SONG Z P, YIN X C, MEI S R, 2004. 3-D rheologic model of earthquake preparation (2). strain field and its applications[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 26(2): 121-131. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, 2003. Status and developments of borehole strain observations in China[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 24(1): 65-69. (in Chinese with English abstract)
- TAN Y L, WANG Z X, FENG X Q, et al., 2021. Structural preservation conditions analysis of oil and gas in complex structural area: a case study of structural analysis in the Well Wanjingdi-1, Anhui, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(3): 441-452. (in Chinese with English abstract)
- WANG K Y, GUO Y S, FENG X D, 2018. Sub-instability stress state prior to the 2008 Wenchuan earthquake from temporal and spatial stress evolution[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(5): 1883-1890. (in Chinese)

- with English abstract)
- WEN Y, ZHAO Y J, MENG X, et al., 2012. Analysis on the interference and anomaly of borehole strain in Qinghai region[J]. Plateau Earthquake Research, 24(3): 30-35. (in Chinese with English abstract)
- XING Y, RONG J, 2018. Discussion on the signal decomposition methods of common modes[J]. Modern Computer(36): 7-11. (in Chinese with English abstract)
- YEH J R, SHIEH J S, HUANG N E, 2010. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2(2): 135-156.
- YOICHIRO F, 1974. Relationship between the continuation time of abnormal crustal changes before earthquake[J]. Earthquake (Sun), 27(3): 197-213. (in Japanese)
- YUN L, ZHANG J, WANG J, et al., 2021. Discovery of active faults in the southern Beishan area, NW China: Implications for regional tectonics[J]. Journal of Geomechanics, 27(2): 195-207. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C C, 2015. Research on anomaly detection method of earthquake precursor observation data[D]. Beijing: Institute of Crustal Stress, China Earthquake Administration. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Z, JI H G, CAI M F, et al., 2016a. Triggered effect of solid tidal stress on rockburst and its mechanism[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 33(3): 535-543. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Z, JI H G, XIANG P, et al., 2016b. Analysis of precursor of rock burst based on the fractal characteristics of the mine borehole strain observation data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 35(S1): 3222-3231. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG J D, CHENG J S, YANG Y, 2013. Modified EEMD algorithm and its applications[J]. Journal of Vibration and Shock, 32(21): 21-26, 46. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈可, 李野, 陈澜, 2010. EEMD 分解在电力系统故障信号检测中的应用[J]. *计算机仿真*, 27(3): 263-266.
- 池顺良, 2013. 分量钻孔应变仪记录的汶川、芦山强震前兆应变异常[J]. *科技导报*, 31(12): 27-30.
- 冯德益, 1983. 地震前兆三阶段发展过程的观测结果与理论(英文)[J]. *地震研究*, 6(2): 211-226.
- 纪洪广, 王金安, 蔡美峰, 2003. 冲击地压事件物理特征与几何特征的相关性与统一性[J]. *煤炭学报*, 28(1): 31-36.
- 蒋骏, 李胜乐, 张雁滨, 等, 2000. 地震前兆信息处理与软件系统[M]. 北京: 地震出版社.
- 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等, 2014. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. *煤炭学报*, 39(2): 205-213.
- 康佳星, 胡英, 陈辉, 等, 2016. VMD 与 EMD 在地震信号时频分析中的对比研究[C]//2016 中国地球科学联合学术年会论文集(三十九): 专题 79: 中国古生物学和地层学最新进展、专题 80: 地热理论与应用、专题 81: 应用地球物理学前沿. 北京: 中国地球物理学会: 89-91.
- 李铁, 冀林旺, 左艳, 等, 2003. 预测较强矿震的地震学方法探讨[J]. *东北地震研究*, 19(1): 53-59.
- 刘金海, 黎明华, 郭信山, 等, 2014. 震动场、应力场联合监测冲击地压的理论与应用[J]. *煤炭学报*, 39(2): 353-363.
- 刘琦, 张晶, 2011. S 变换在汶川地震前后应变变化分析中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*, 31(4): 6-9.
- 穆峰, 常发亮, 蒋沁宇, 2015. 基于改进 EMD 算法的信号滤波[J]. *山东大学学报(工学版)*, 45(3): 35-42.
- 欧阳祖熙, 张钧, 陈征, 等, 2009. 地壳形变深井综合观测技术的新进展[J]. *国际地震动态* (11): 1-13.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 2008. 山丹地应力监测站体应变仪的地震效应[J]. *地质力学学报*, 14(2): 97-108.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 等, 2011. WFSD 地应力台应变特征及其同震效应分析: 以日本  $M_w 9.0$  级特大地震为例[J]. *地质力学学报*, 17(1): 1-14.
- 邱泽华, 石耀霖, 2004. 国外钻孔应变观测的发展现状[J]. *地震学报*, 26(S1): 162-168.
- 邱泽华, 阚宝祥, 唐磊, 2009. 四分量钻孔应变观测资料的换算和使用[J]. *地震*, 29(4): 83-89.
- 邱泽华, 2010. 关于地震前兆的判据问题[J]. *大地测量与地球动力学*, 30(S2): 1-5, 9.
- 邱泽华, 2017. 钻孔应变观测理论和应用[M]. 北京: 地震出版社: 15-16.
- 宋先月, 宋治平, 武安绪, 等, 2003. 强震前形变异常的时空演化特征[J]. *地震*, 23(2): 70-76.
- 宋治平, 尹祥础, 梅世蓉, 2004. 地震孕育体源流变模型(二): 应变场及其应用[J]. *地震学报*, 26(2): 121-131.
- 苏恺之, 2003. 我国钻孔应变观测的回顾与展望[J]. *地震地磁观测与研究*, 24(1): 65-69.
- 谭元隆, 王宗秀, 冯兴强, 等, 2021. 复杂构造区油气构造保存条件分析: 来自皖泾地 1 井的构造解析[J]. *地质力学学报*, 27(3): 441-452.
- 王凯英, 郭彦双, 冯向东, 2018. 应力时空演化揭示出的汶川地震前亚失稳过程[J]. *地球物理学报*, 61(5): 1883-1890.
- 文勇, 赵燕杰, 孟鑫, 等, 2012. 青海地区钻孔应变干扰及异常分析[J]. *高原地震*, 24(3): 30-35.
- 邢昀, 荣剑, 2018. 常见不同模态信号分解方法探讨[J]. *现代计算机* (36): 7-11.
- 云龙, 张进, 王驹, 等, 2021. 甘肃北山南部活动断裂的发现及其区域构造意义[J]. *地质力学学报*, 27(2): 195-207.
- 张聪聪, 2015. 地震前兆观测数据异常检测方法研究[D]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所.
- 张月征, 纪洪广, 蔡美峰, 等, 2016a. 固体潮汐应力与矿震触发之间的相关性及其作用机理分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 33(3): 535-543.
- 张月征, 纪洪广, 向鹏, 等, 2016b. 基于矿山钻孔应变观测数据时程分形特征的冲击地压前兆分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 35(S1): 3222-3231.
- 郑近德, 程军圣, 杨宇, 2013. 改进的 EEMD 算法及其应用研究[J]. *振动与冲击*, 32(21): 21-26, 46.