

DOI: 10.11779/CJGE201409021

# 煤矿底板潜在突水危险区微震识别研究

程爱平<sup>1</sup>, 高永涛<sup>1</sup>, 梁兴旺<sup>2</sup>, 刘超<sup>1</sup>, 吴庆良<sup>1</sup>, 朱权洁<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中煤平朔集团有限公司井工一矿, 山西 朔州 036006)

**摘要:** 为提高微震数据后期分析的直观性, 便于对回采过程中底板潜在突水危险区的分析与识别, 利用聚类分析法对某煤矿微震事件的时空分布进行了分析, 结合现场开采活动, 有效区分了微震事件聚集区。通过理论计算与数值模拟获取正常采动影响下顶底板破裂高度, 对比研究微震事件聚类分析结果, 将该矿微震事件分布在垂直方向上划分为高位异常区、正常影响区和低位异常区。结合现场工程地质概况与涌水量资料, 确定低位异常区即为底板潜在突水危险区。利用研究结果, 最终构建了底板潜在突水危险区微震识别的一般模式。

**关键词:** 微震事件; 空间分布; 聚类分析; 微震识别; 突水危险区

中图分类号: TD745

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)09-1727-06

**作者简介:** 程爱平(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事微震监测工程与矿山动力灾害研究工作。E-mail: zhouhexuan@163.com。

## Identification of potential water inrush areas in coal floor by using microseismic monitoring technique

CHENG Ai-ping<sup>1</sup>, GAO Yong-tao<sup>1</sup>, LIANG Xing-wang<sup>2</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, WU Qing-liang<sup>1</sup>, ZHU Quan-jie<sup>1</sup>

(1. University of Science and Technology Beijing, School of Civil and Environment Engineering, Beijing 100083, China; 2. First

Underground Mine, China National Coal Pingshuo Coal Mining Co., Ltd., Shuozhou 036006, China)

**Abstract:** To improve the explicitness of microseismic data analysis and to identify the potential water inrush areas in coal floor easily, the space-time distribution of microseismic events in a coal mine is analyzed through the cluster analysis. Considering mining activities, the accumulated areas with microseismic events are distinguished effectively. Through theoretical calculation and numerical simulation, the broken heights of roof and floor under the normal mining influence are obtained, and the microseismic event results are compared. The microseismic events are divided into high abnormal area, normal impact area and low abnormal area along the vertical direction. Based on the engineering geological condition and water inflow data, the low abnormal area is regarded as the potential water inrush area in coal floor. By using the research results and microseismic monitoring technology, a general model is established to study the potential water inrush areas in coal floor.

**Key words:** microseismic event; spatial distribution; cluster analysis; microseismic identification; water inrush area

## 0 引言

近几年,随着矿井突水事故频繁发生,给人民生命财产造成重大损失,国内外众多专家学者开展了一系列采动条件下矿井突水监测方法的研究,目前较普遍应用的突水监测方法大致可归纳为6类:地质和水文地质法、地球物理法、地球物理法、专家系统、模型算法、数值模拟法<sup>[1-5]</sup>。其中前3类为现场观测方法,存在的共性缺陷是:无法实现在线连续观测,远场检测的预测效能较低,近场检测存在一定的危险性。后3类为模型计算和分析方法,独立使用的预测效能较低。因此,亟需一种实时连续监测方法。

对于突水监测,虎维岳<sup>[6]</sup>指出“突水通道形成和发生都有一个从孕育、发展到发生的变化过程,在这

一变化过程中的不同阶段都有其对应的前兆”。杨天鸿等<sup>[7]</sup>认为“采动压力和水压力扰动应力场诱发微破裂(微震)是矿山突水前兆的本质特征”。这两个学术观点论证了突水通道的失稳过程具有动态的特征。而微震监测技术作为一种从大地地震行业转化过来的监测手段,以其实时、动态监测的特点,近年来被越来越广泛地应用于采矿工程领域<sup>[8-10]</sup>。微震监测通过对微震波的接收和定位,能够准确获取岩体内的微震活动事件。由于煤层回采过程中,采场空间和地压分布都在不断变化,采动条件下潜在突水通道的形成是一个

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174016)

收稿日期: 2013-11-04

动态演化的过程,因此将微震监测数据和采矿时空关系有机地联系起来,在采动应力场不断演化过程中研究微震事件的活动规律,能够更加有效地识别煤矿底板潜在突水危险区。

由于不均匀地层和复杂开采条件等因素的影响,微震系统分析获取的微震事件空间分布较为离散,直观的进行分区划分,必然受到人为因素的影响。基于此,本文根据某矿综放工作面已有的微震监测结果,利用层次聚类法对微震事件时空分布进行分析,通过微震事件间距的远近程度自动划分为不同聚集区,再结合工程地质概况与现场涌水量资料,确定煤矿底板潜在突水危险区,实现矿井突水的实时监测预警。

## 1 微震事件聚类分析

微震事件是岩体破裂、扩展的伴生现象,其监测结果可以反应地下岩体内部微裂隙孕育、发展、贯通的时空变化规律。因此,通过研究微震事件空间分布特征,结合现场回采活动与工程地质概况,可识别潜在的地压活动危险区<sup>[1]</sup>,进而确定底板潜在突水危险区。

为了客观有效地对微震事件聚集区进行划分,本文采用聚类分析的方法进行自动分区。聚类分析是按照一批样品在性质上的亲疏远近程度进行分类。结合实际,本文采用最短距离聚类法进行聚类,以欧氏距离表示微震事件之间的距离,通过计算微震事件之间的距离来评价其亲疏程度,根据其远近程度进行合理分类<sup>[12-15]</sup>。

## 2 微震监测

### 2.1 工程背景

研究区域所在的 19106 工作面是 9 号煤的首采工作面,19106 工作面平面图如图 1 所示。9 号煤最大厚度 14.60 m,最小厚度 10.60 m,平均厚度为 11.90 m。采煤方法为放顶煤综采,综采工作面走向长约 3000 m,宽度约 300 m,机采高度 3.2 m,放煤高度 9.84 m,放煤步距 0.8 m。工作面南面是 19107 辅运巷,北面是矿区北边界,东面是 9 煤太西辅运巷,西面是 F35 断层。

9 号煤 19106 工作面回采期间面临的水害主要包括奥陶系灰岩岩溶裂隙水害、顶板砂岩水害、断层水害、陷落柱水害和钻孔水害,其中以奥陶系灰岩岩溶裂隙水害危险最大。受底板奥灰承压含水层的影响,工作面回采期间,可能出现复杂的突水动态,一旦发生底板突水,将造成灾难性的后果,极易淹井。因此,

在 19106 工作面回采期间开展底板采动破坏现场监测,分析底板潜在突水危险区,实现回采过程中工作面底板突水危险性的预警预报显得尤为重要。

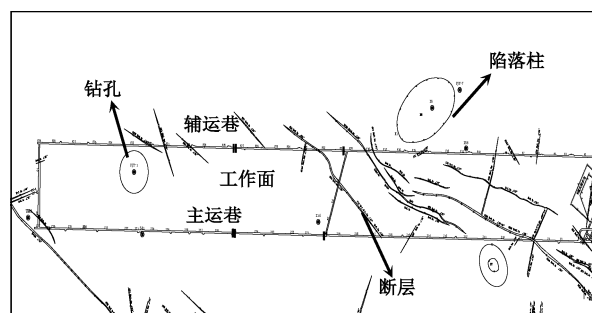


图 1 19106 工作面平面图

Fig. 1 Plane of working face 19106

### 2.2 现场实施

为了实现采动条件下底板突水危险性的实时监测预警,选用了北京科技大学微地震监测研究中心生产的 KJ551 型微震监测系统。KJ551 型微震监测系统总体上由地面微震数据处理系统、微震数据采集系统以及检波器组成,微震监测系统组成及结构如图 2 所示。

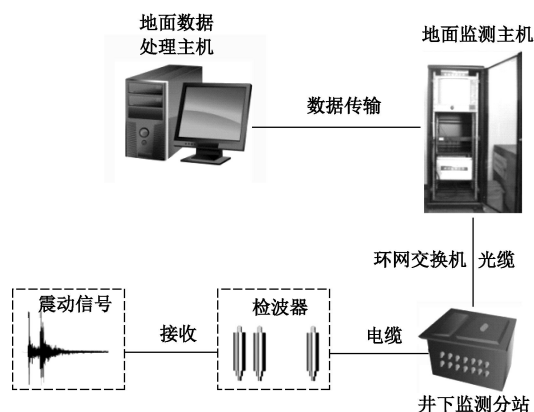


图 2 KJ551 微震监测系统组成及结构

Fig. 2 Components and structure of KJ551 microseismic monitoring system

针对监测区域的现场实际,综合考虑监测系统走线、供电和信号同步等因素,在 19106 工作面辅运巷布置测区,为了能够精确监测顶底板采动破裂,兼顾到可靠性,在位于工作面辅运巷顶底板交替布置测点安装检波器,测区共布置了 26 个顶板监测点,25 个底板监测点,孔间平均距离均为 40 m。

### 2.3 监测结果

微震监测系统于 2012 年 12 月 28 日开始正常运行和采集数据。为标定系统定位精度,于现场开展标定炮试验,试验结果显示系统监测误差小于 5 m,满足监测精度要求。同时,KJ551 微震监测系统所包含的

微震分析定位软件能根据波形特征有效识别岩石破裂事件, 并获取相关地震学参数, 为微震事件时空分布聚类分析提供了条件。

本文仅针对该系统于 2013 年 3 月 1 日—2013 年 4 月 30 日期间监测到的 2788 个微震事件进行研究, 利用 Matlab 软件获取该阶段微震事件空间分布情况如图 3 所示, 其中, 圆球即代表一个微震事件。

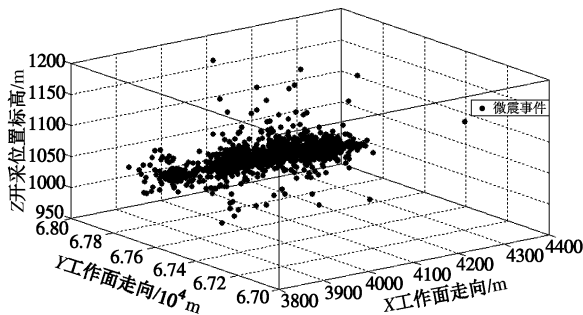


图 3 微震事件空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of recorded microseismic events

3 微震结果分析

由图 3 观察可知, 微震事件空间分布呈较为分散的状态, 直观进行区域划分缺乏相关依据, 必然会受到人为因素的影响。基于此, 本文引入最短距离聚类法, 利用 Matlab 软件编制相关程序, 对其时空分布进行聚类分析, 结合工作面实际回采情况, 开展了微震事件分区研究。

3.1 19106 工作面回采情况

截止到 2013 年 4 月 30 日, 工作面已推采至走向约 4200 m 处, 日进尺平均为 6 m。工作面回采过程中, 经过两个低洼点, 穿过已探明断层 3 个。

3.2 微震事件空间聚类分析

利用编制的 Matlab 程序对系统监测到的 2788 个微震事件的空间分布进行分析, 得到聚类分析结果如表 1 所示。结果表明, 本次分析共得到 6 个聚类, 其中微震事件数最多为 2756 个, 最少为 1 个。图 4 为微震事件空间分布聚类分析结果。图 5 为微震事件空间分布聚类分析三视图。同时, 对各聚类中微震事件的时间分布进行了分析, 结果如图 6 所示(为便于分析, 图中横坐标以微震事件编号代替微震发生时间, 其中 0 代表第一个微震事件发生时间: 2013 年 3 月 1 日 9: 59: 20, 2788 代表最后一个微震事件发生时间: 2013 年 4 月 30 日 13: 09: 26)。以下根据各聚类中微震事件的时空分布及地震学参数, 结合工作面实际回采情况和工程地质条件, 分析微震活动与开采活动的动态响应规律。

表 1 聚类分析结果

Table 1 Results of cluster analysis

聚类	事件数	最大震级	平均能量/KJ
1	2756	0.4	23.8
2	13	0.2	13.2
3	1	-0.4	9.1
4	2	-0.3	8.3
5	15	0.5	31.4
6	1	-0.3	7.9

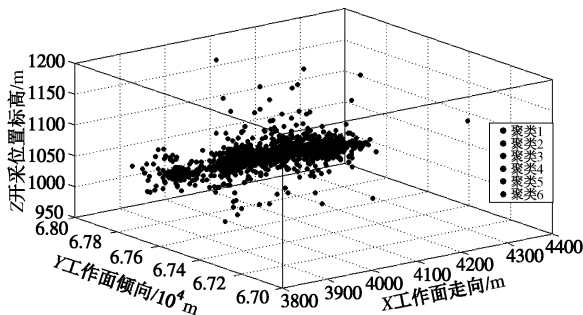


图 4 微震事件空间分布聚类分析结果

Fig. 4 Cluster analysis results of spatial distribution of microseismic events

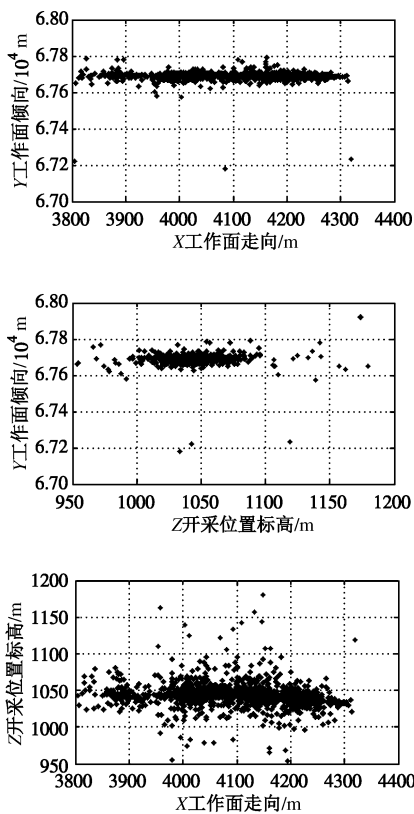


图 5 微震事件空间分布聚类分析三视图

Fig. 5 Three orthographic views of clustering analysis of spatial distribution of microseismic events

图 5 表明, 微震活动主要分布于矿体走向 3800~4300 m, 倾向 67600~67800 m, 垂高 1000~1100 m 之间, 这与 9 煤 19106 工作面正在回采的范围基本对

应。

聚类 1、聚类 2 和聚类 5 均为工作面回采诱发产生，其中，聚类 1 中微震事件较多，较集中，占微震事件总量的 98%，在空间上主要分布在煤层顶底板附近，在时间上分布较均匀，伴随了整个回采过程，说明整个回采过程中，煤层顶底板地压活动显著。

聚类 2 微震事件较少，平均能级较低，但空间与时间上都相对集中（见图 5 和图 6）。空间上主要集中在走向方向 4000，4050 和 4150 m 附近。对照采掘工程平面图分析发现，走向 4000 m 附近，存在一条落差为 4.2 m 的断层，其延伸方向与破裂点分布方向完全一致；走向 4050 m 附近，存在一条落差为 1.8 m 的断层，其延伸方向与破裂点分布方向完全一致；走向 4150 m 附近，存在一条落差为 5.2 m，延伸较长的断层，其延伸方向与破裂点分布方向完全一致。时间上主要发生在 2013 年 4 月 4 日、2013 年 4 月 8 日和 2013 年 4 月 17 日，对比工作面回采进度分析发现，3 个时间段回采区域分别均对应于断层存在区间。

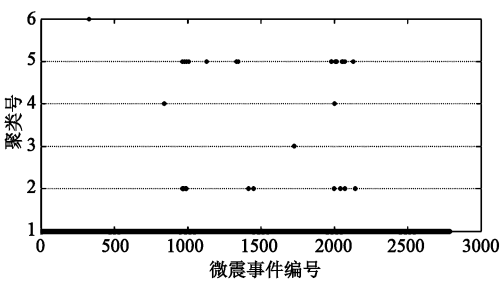


图 6 各聚类中微震事件的时间分布

Fig. 6 Temporal distribution of microseismic events in cluster

聚类 5 微震事件分布规律与聚类 2 基本相同，分析其原因有两个：第一个是受该区域断层构造影响，第二个是由于该区域存在两个小向斜，导致在开采过程中煤层顶底板破裂范围相应向外扩展。

对于微震事件数不超过 2 个的聚类 3、聚类 4 和聚类 6，由于其分布较为分散，能级较小，且远离其余 3 个聚类中心，究其原因，可能与复杂的地质环境及系统误差有关，为确保研究结果的普遍性，分析时将其去除。

通过微震活动时空聚类分析，结合现场工程地质条件和开采活动，能够有效地对微震事件聚集区进行圈定，从而对底板潜在突水危险区开展有针对性的研究。

3.3 微震事件分区划分

综合以上分析，本文将微震事件分布在垂直方向上划分为 3 个区域，分别为高位异常区、正常影响区和低位异常区，正常影响区又包括顶板破裂影响区和

底板破裂影响区。图 7 为微震事件分布走向剖面图。

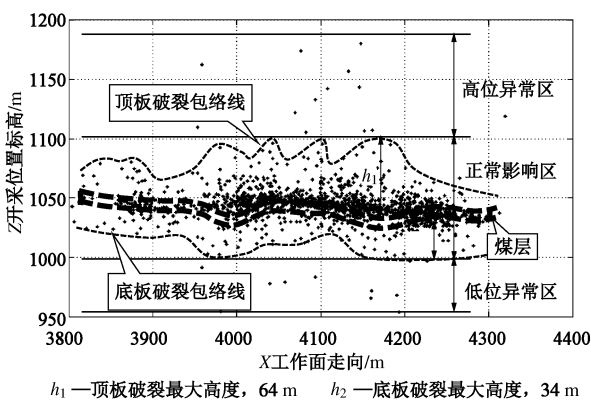


图 7 微震事件分布走向剖面图

Fig. 7 Distribution of microseismic events along strike profile

3.4 微震事件分区合理性验证

当确定采动正常影响范围后，高位异常区和低位异常区范围即可标定，因此，为验证本次分区划分的合理性，只需证明正常影响区范围确定合理即可。

基于此，本文分别通过数值模拟与理论计算<sup>[16]</sup>获取正常回采过程中顶底板破裂高度，并与本次聚类分析结果进行对比，结果表明 3 种方法的计算结果相近，说明聚类分析结果能较为准确、客观地反映顶底板采动破裂高度，即本次聚类分析分区可靠。表 2 为顶底板破裂高度对比分析表。图 8 为 UDEC 数值模拟采动塑性破坏区图。

表 2 顶底板破裂高度对比分析

Table 2 Broken heights of roof and floor		
计算方法	底板破裂最大高度/m	顶板破裂最大高度/m
理论计算	31	68
数值模拟	28	70
微震监测	34	64

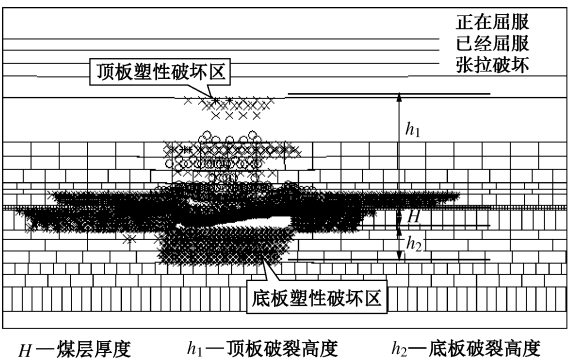


图 8 采动塑性破坏区

Fig. 8 Plastic failure zone by mining

4 底板潜在突水危险区微震识别研究的一般模式

结合矿山涌水量统计资料分析，发现当工作面回

采至走向 4000, 4050 和 4150 m 附近时, 涌水量有明显增大趋势, 因此, 认为低位异常区即底板潜在突水危险区。

根据上述研究结果, 建立基于微震监测技术的煤矿底板潜在突水危险区微震识别研究的一般模式, 如图 9 所示。首先利用微地震监测系统对目标监测区域进行实时监测, 并对采集到的数据进行波形识别选取有效微震事件, 然后利用后处理软件对有效数据进行定量计算, 获取微震事件空间坐标、能量、震级等地震学参数; 针对微震事件空间分布进行聚类分析, 对比理论计算与数值模拟结果, 将目标区域划分为高位异常区、正常影响区和低位异常区; 最后结合现场地质条件和工作面回采情况, 确定底板潜在突水危险区, 并反馈矿山采取相关措施。

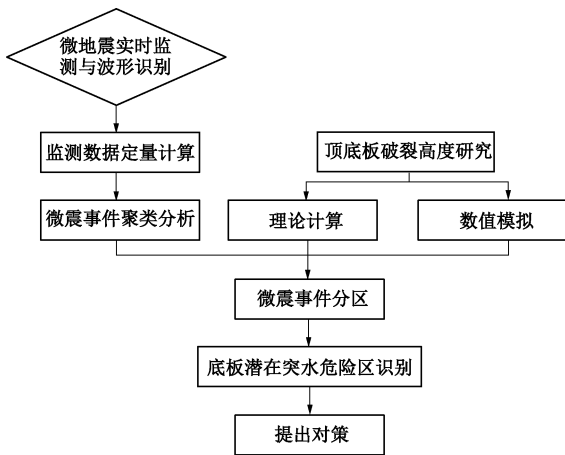


图 9 潜在突水危险区微震识别的一般模式

Fig. 9 General mode of microseismic identification zones of potential water intrush

## 5 结 论

(1) 利用最短距离聚类法对微震事件的时空分布进行研究, 极大提高了微震数据后期分析的直观性, 客观有效地划分了微震事件聚集区。本研究中, 各微震聚集区与开采活动基本对应。

(2) 根据聚类分析结果, 结合现场工程概况和开采活动, 将微震事件分布在垂直方向上划分为高位异常区、正常影响区和低位异常区。研究结果表明, 低位异常区即为煤矿底板潜在突水危险区。

(3) 根据研究结果, 建立了基于微震监测技术的底板潜在突水危险区微震识别的一般模式。

## 参考文献:

[1] 刘树才, 刘鑫明, 姜志海, 等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 348 - 356. (LIU Shu-cai, LIU Xing-ming, JIANG Zhi-hai, et

al. Research on electrical prediction for evaluation water conducting fracture zones in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 348 - 356. (in Chinese))

[2] 朱术云, 鞠远江, 赵振中, 等. 超化煤矿“三软”煤层采动底板变形破坏的实测研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 639 - 642. (ZHU Shu-yun, JU Yuan-jiang, ZHAO Zhen-zhong, et al. Field measurement study on deformation and destruction of “three-soft” coal seam floor of Chaohua coal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 639 - 642. (in Chinese))

[3] 李佩全, 白汉营, 马杰, 等. 厚松散层薄基岩综采面覆岩破坏高度发育规律[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(1): 35 - 41. (LI Pei-quan, BAI Han-ying, MA Jie, et al. Failure height development law of overburden thick loose strata above fully mechanized coal mining face under thin base rock[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(1): 35 - 41. (in Chinese))

[4] 张蕊, 姜振泉, 李秀晗, 等. 大采深厚煤层底板采动破坏深度[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 67 - 72. (ZHANG Rui, JIANG Zhen-quan, LI Xiu-han, et al. Study on the failure depth of think seam floor in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 67 - 72. (in Chinese))

[5] 武强, 朱斌, 刘守强. 矿井断裂构造带滞后突水的流固耦合模拟方法分析与滞后时间确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 93 - 103. (WU Qiang, ZHU Bin, LIU Shou-qiang. Flow-solid coupling simulation method analysis and time identification of lagging water intrush near mine fault belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 93 - 103. (in Chinese))

[6] 虎维岳. 矿山水害防治理论与方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005. (HU Wei-yue. Mine water prevention and control theory and method[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2005. (in Chinese))

[7] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268 - 277. (YANG Tian-hong, TANG Chun-an, TAN Zhi-hong, et al. State of the art of intrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of ground water intrush[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 268 - 277. (in Chinese))

[8] 姜福兴, 王存文, 杨淑华. 冲击地压及煤与瓦斯突出和透水的微震监测技术[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(1): 26 - 28. (JIANG Fu-xing, WANG Cun-wen, YANG Shu-hua.

- Microseismic monitoring and measuring technology for pumping pressure coal and gas outburst and water inrush[J]. Coal Science and Technology, 2007, **35**(1): 26 - 28. (in Chinese))
- [9] 姜福兴, 叶根喜, 王存文, 等. 高精度微震监测技术在煤矿突水监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(9): 1932 - 1938. (JIANG Fu-xing, YE Gen-xi, WANG Cun-wen, et al. Application of high-precision microseismic monitoring technique to water inrush monitoring in coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(9): 1932 - 1938. (in Chinese))
- [10] 窦林名, 何江, 巩思园, 等. 采空区突水动力灾害的微震监测案例研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, **41**(1): 20 - 25. (DOU Lin-ming, HE Jiang, GONG Si-yuan, et al. A case study of micro-seismic monitoring goaf water-inrush dynamic hazards[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, **41**(1): 20 - 25. (in Chinese))
- [11] 杨志国, 于润沧, 郭然, 等. 基于微震监测技术的矿山高应力区采动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 2): 3632 - 3638. (YANG Zhi-guo, YU Run-cang, GUO Ran, et al. Research of mining based on microseismic monitoring technology in high-stress area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3632 - 3638. (in Chinese))
- [12] 刁桂苓, 王俊国, 戴泊生, 等. 渤海、黄海及沿岸强震聚类分析[J]. 华北地震科学, 1999, **17**(2): 6 - 11. (DIAO Gui-ling, WANG Jun-guo, DAI Bo-sheng, et al. Clustering analysis of strong shock along Huanghai and Bohai[J]. North China Earthquake Science, 1999, **17**(2): 6 - 11. (in Chinese))
- [13] 顾洪博, 赵万平. 基于 MMD 聚类算法及在高校成绩分析中的应用[J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2010, **27**(1): 96 - 98. (GU Hong-bo, ZHAO Wan-ping. Clustering algorithm based on Max-min distance for students' score analysis in universities and applications[J]. Journal Hebei University Engineering (Natural Science), 2010, **27**(1): 96 - 98. (in Chinese))
- [14] LES'NIAK A, ISAKOW Z. Space-time clustering of seismic events and hazard assessment in the Zabrze-Bielszowice coal Poland [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2009, **46**(5): 918 - 928.
- [15] 吴爱祥, 武力聪, 刘晓辉, 等. 矿山微地震活动时空分布[J]. 北京科技大学学报, 2012, **34**(6): 609 - 613. (WU Ai-xiang, WU Li-cong, LIU Xiao-hui, et al. Space-time distribution of microseismic activities in mines[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, **34**(6): 609 - 613. (in Chinese))
- [16] 张向东, 张彬, 张树光. 采场围岩纵向“七带”划分与分析[J]. 煤, 1998, **7**(4): 20 - 23. (ZHANG Xiang-dong, ZHANG Bin, ZHANG Shu-guang. Seven zones division and analysis of surrounding rock in vertical[J]. Coal, 1998, **7**(4): 20 - 23. (in Chinese))