

文章编号:0253-9993(2011)10-1601-06

# 综采工作面过断层巷道稳定性多参量监测

姜耀东<sup>1,2</sup> 吕玉凯<sup>2</sup> 赵毅鑫<sup>1,2</sup> 高占学<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083; 3. 宁夏宁鲁煤电有限责任公司任家庄矿,宁夏 银川 750004)

**摘 要:**以综采工作面前方出现小断层为研究背景,采用锚杆测力计、锚索测力计、多功能测枪、电磁辐射仪、红外测温仪、风速计及湿度计等多参量手段对巷道稳定性进行了监测;通过对巷道围岩的应力、位移、电磁辐射和温度同步监测的同时,实现了对巷道围岩体的宏细观相结合的成功监测。结合数值模拟对断层位置处的应力和内能变化规律进行研究,并对多参量监测结果应用主成分分析方法得出:温度作为内能的直接表现形式,有着和应力、位移相同的发展变化规律;电磁辐射体现着煤岩体内部结构的应力分布规律及微破裂的频次,能在细观上监测巷道围岩体变化;多参量中各参量依照其重要性及敏感性由强到弱依次为巷道变形量、电磁辐射强度值、巷道内部温度、巷道应力;结合电磁辐射、温度、应力和位移的多参量监测方法可以实现对巷道围岩体进行不同的空间尺度、全方位的监测。

**关键词:**综采工作面;断层;多参量监测;主成分分析;宏细观研究

中图分类号:TD322.4

文献标志码:A

## Multi-parameter monitoring the stability of rock around roadway while fully mechanized coal face passing through fault

JIANG Yao-dong<sup>1,2</sup>, LÜ Yu-kai<sup>2</sup>, ZHAO Yi-xin<sup>1,2</sup>, GAO Zhan-xue<sup>3</sup>

(1. State Key Lab of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. Ningxia Ning-lu Coal and Electricity Co., Ltd., Rengjiazhuang Coal Mine, Yinchuan 750004, China)

**Abstract:** Taking the small fault as research background, which existence ahead of fully mechanized coal face, the roadway stability were monitored by the means of multi-parameter method. Monitoring equipments include bolt dynamometer, anchor dynamometer, multi-function measured gun, electromagnetic radiation instrument, infrared thermometer, anemometer and hygrometer. Through the synchronous monitoring of stress, displacement, EME and temperature, micro-macro measurement methods of rock around roadway were realized successfully. Combining with the numerical simulation of stress in the fault and internal energy, meanwhile, the principal component analysis for multi-parameters, some conclusions were concluded. As the direct manifestation of internal energy, temperature shows the same variation with stress and displacement. Electromagnetic radiation measurements reflect the law of stress distribution of coal internal structure and micro-fracture frequency. The importance and sensitivity of parameters from strong to weak are displacement, electromagnetic radiation measurements, temperature and stress. Different spatial scales and comprehensive on rock of roadway's measurement is realized which need combine with electromagnetic radiation measurements, temperature, stress and displacement monitoring.

**Key words:** fully mechanized coal face; fault; multi-parameter monitoring; principal component analysis; micro-macro methods

收稿日期:2010-01-17 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2010CB226801);国家自然科学基金资助项目(50704034);北京市教育委员会共建项目建设计划

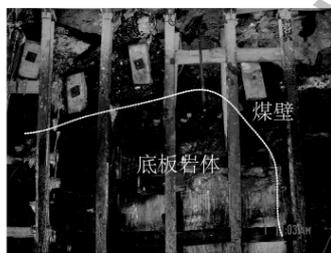
作者简介:姜耀东(1958—),男,江苏海安人,教授,博士生导师,博士。E-mail:jiangyd@cumtb.edu.cn

在矿山压力作用下,会引起各种力学现象<sup>[1]</sup>。断层构造在采煤过程中经常出现,其存在阻断了巷道顶板的连续承受及传递载荷能力。随着巷道掘进和工作面回采,断层位置附近往往是高应力集中区,容易诱发各种灾害事故。为此,近年来许多学者在现场测量<sup>[2-4]</sup>、岩石力学性能实验<sup>[5-7]</sup>、相似模拟实验<sup>[8]</sup>以及数值模拟<sup>[9]</sup>方面进行了大量的研究,取得了许多有价值的成果。目前关于巷道断层位置附近的现场矿压监测方法仍是巷道两帮收敛量、顶底板移近量和支护荷载监测等,而实验室中已经进行过许多包括应力、应变研究在内的声发射、电磁辐射、热红外成像研究。

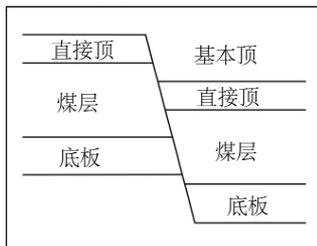
针对这一现象,本文以任家庄 11305 回风巷为研究对象,在传统的应力、位移监测基础上添加了电磁辐射、温度等手段,实现多参量在巷道矿压监测中的应用研究。

### 1 工程概况

任家庄矿区位于鄂尔多斯台地西缘,区内大部属低缓的半沙漠丘陵地带。井田内可开采煤层包括山西组和太原群共含煤 12 层,地面标高为 +1 318.4 ~ +1 322.8 m;其中 11305 工作面位于 11 采区,标高 +864 ~ +940 m,埋藏深度 380 ~ 450 m,工作面走向长 1 617 m,方位角为 207.5°,煤层平均厚度为 2.56 m;11305 回风巷中切眼前方 290 m 处出现正断层,落差 1.4 m,如图 1 所示。



(a) 断层位置



(b) 断层示意

图 1 任家庄矿 11305 工作面断层位置及示意

Fig. 1 The photo and schematic diagram of fault position in 11305 working face of Rengjiashuang Coal Mine

## 2 多参量监测

### 2.1 测点布置

多参量监测点分别对称布置在 11305 回风巷及运输巷。以回风巷为例,如图 2 所示,从距开切眼 190 m 位置的巷道下帮处布置 1 号测站起沿工作面回采方向每隔 30 m 布置 1 个测站,共计 4 个测站。在 4 号测站前方 10 m 及 20 m 位置处的下帮部、顶板及上帮部位各布置 1 个测点,用来观测松动圈范围及煤壁内部温度。从 4 号测站开始向开切眼方向每隔 10 m 在巷道下帮部布置 1 个电磁辐射监测点。

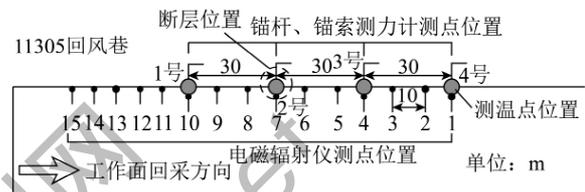


图 2 多参量监测点布置

Fig. 2 The arrangement diagram of multi-parameter measurement points

巷道测站截面多参量监测点布置位置如图 3 所示,分别在测站下帮布置锚杆测力计、电磁辐射仪、温度监测点;在测站顶板布置锚杆测力计、锚索测力计、测力锚杆、温度监测点;在测站上帮温度监测点;在测站截面左右对应位置布置巷道两帮收敛监测点;在测站截面上下对应位置布置顶底板移近量监测点。

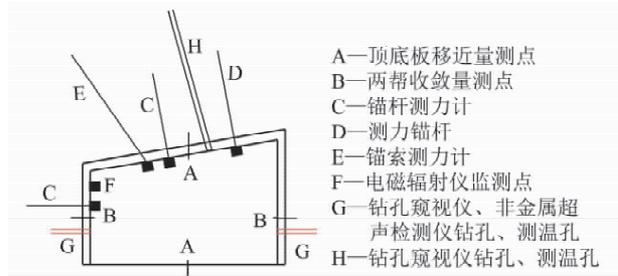


图 3 巷道测站截面多参量布置

Fig. 3 The arrangement diagram of multi-parameter measurement points in roadway section

### 2.2 顶板及两帮压力监测

支护荷载是通过应用锚杆测力计及锚索测力计得以实施监测,巷道断面监测位置如图 3 所示。图 4(a) 中随着工作面回采的进行,巷道支护荷载总体呈现增大的趋势;在距离 4 号测站前方 60 m 位置处有一正断层,当工作面回采到该断层前方 30 m (图中 90 m) 位置处,顶板应力达到最大值 6.288 MPa;工作面继续向前推进,顶板压力逐渐释放,经过断层 10 m (图中 50 m) 位置处,应力为极小值 1.008 MPa;此

后,随着回采工作面进入到 4 号测站 50 m 范围内,顶板应力又重新增大。

断层导致初始应力场的扰动,局部产生附加应力。在采动影响下,随着距断层面距离的减小,工作面前方煤体中支撑应力均明显增大;在回采工作面煤壁和其前方断层之间煤柱之上压力分布类似于小的残留煤柱的情况,煤柱愈窄,压力峰值越高<sup>[10]</sup>。4 号测站煤帮应力在 60 m(断层)位置处,应力达到极大值 2.616 MPa。

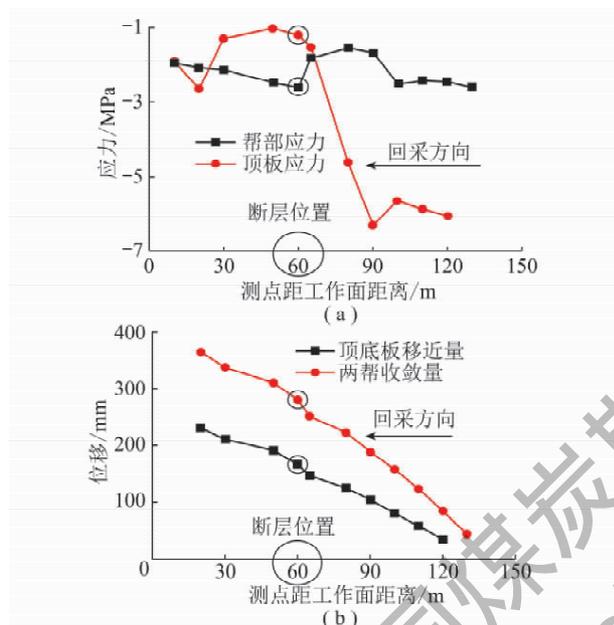


图 4 4 号测站处帮部及顶板应力和位移随工作面回采的变化曲线

Fig. 4 The stress and displacements curves of coal side and roof at station 4 with mining

### 2.3 顶底板移近量、两帮收敛量监测

顶底板移近量和两帮收敛量通过多功能测枪来监测。如图 4(b) 所示,两者都随着工作面回采进行呈现递增的趋势;前者随工作面回采进行产生的位移累积量及速度均小于后者,原因是顶板被断层所阻断,不能形成连续的承载体,断层位置后方顶板应力有所降低且重新分布,同时与各自的岩性也有很大的关系。当工作面回采到距 4 号测站 20 m 位置处,顶底板移近量及两帮收敛量都达到最大值,分别为 231.5 mm 和 364.0 mm;此时其位移已经超过了玻璃钢锚杆的最大延伸长度,导致现场靠近工作面位置处锚杆大面积失效,煤壁片帮现象严重。

### 2.4 电磁辐射仪监测

电磁辐射监测手段是从煤岩体的细微破坏产生的电荷信号入手来研究矿压显现特征,广泛应用在有冲击倾向性采区<sup>[11]</sup>,同时也可以利用 EME 指标有效地提取出煤岩体应力变化前兆信息<sup>[12]</sup>。电磁辐射的强

度主要反映了煤岩体的受载程度及破裂强度,而脉冲数是用来反映煤岩体变形及微破裂的频次<sup>[13]</sup>。

现场应用 KBD5 电磁辐射仪对 11305 回风巷的 15 个测点进行了电磁辐射监测,测点位置如图 2 所示。选取测点 7 进行分析,该测点位于断层位置,如图 5 所示,在 2 月 4—5 日(距断层处 30 m)电磁辐射 EME 值明显增大,2 月 6 日工作面回采到断层,此时,电磁辐射 EME 值较小。通过结果分析得出:测点处的脉冲数基本为零,证明该区域基本没有煤体由于能量积聚产生很多的微破裂频次,不会发生冲击失稳现象;同时电磁辐射能量幅值出现先增大后减小再急剧增大,预示着前方将有较大的能量集中,在此次矿压监测中工作面前方断层的存在也验证了这个推论。

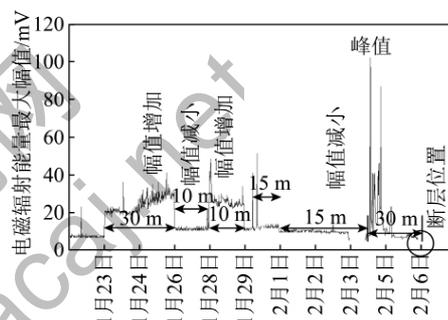


图 5 工作面回采过程中测点 7 电磁辐射能量最大幅值随时间的变化曲线

Fig. 5 The change curve between the maximum amplitude of electromagnetic radiation and time during mining process

### 2.5 温度、风速、湿度监测

煤岩体内部温度是其内能最直接的体现,将温度测量作为监测手段之一,也就是在不受周围环境场的影响情况下,直接观测煤岩体能量的变化,从而可以掌握其应力及应变的变化规律。

实际采用红外测温仪对测温点温度进行测量,测点位置如图 6 所示,分别对该监测点煤体和顶板表面及内部 6 m 深度进行温度测量;同时考虑到测点温度受环境场中温度、风速以及湿度影响很大,于是进行了相应的环境场参量测量。

测温监测点的环境场湿度范围在 86.0% ~ 87.5%,平均湿度为 87.375%,环境场的风速范围在 0.9 ~ 1.3 m/s,平均风速为 1.1 m/s;环境场中各参量在工作面回采期间变化范围不大,可以视为恒定场。

文献[14]指出煤岩体应力变化以及发生破坏过程中都伴随着温度发生变化。图 7 结果显示:随着工作面的移近,顶板和煤壁测点表面和内部温度总的趋势是升高;煤体和顶板表面和内部温度在工作面回采至 60 m(断层位置)处,温度达到了极大值;经过断

层 10 m 后 温度重新降低;当回采至 30 m 位置处 煤体和顶板的表面及内部温度重新升高。

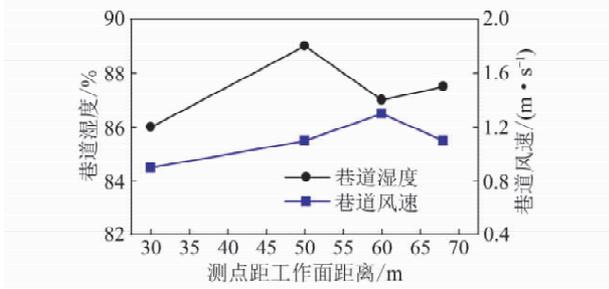


图 6 巷道湿度和风速随工作面回采的变化曲线  
Fig. 6 The change curves of humidity and wind speed in roadway with mining

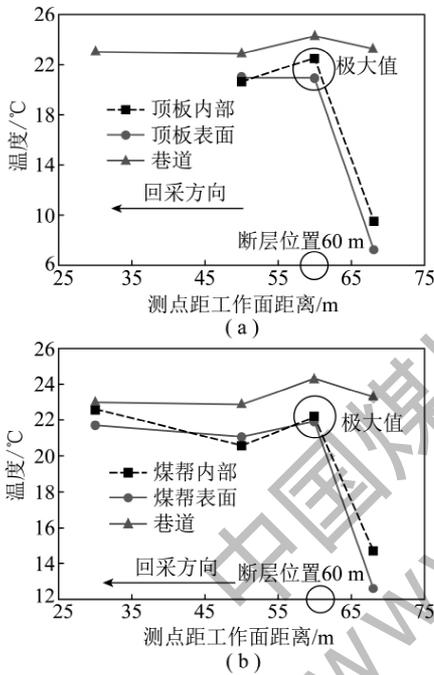


图 7 顶板和煤帮表面及内部温度随工作面回采的变化曲线  
Fig. 7 The surface and inside temperature change curves of roof and coal with mining

顶板及煤帮表面和内部 6 m 深孔的温度监测结果表明:随工作面回采至断层位置前,温度呈现增加的趋势,这与巷道中支护荷载变化规律一致,同时在断层位置前,温度变化的速度(曲线斜率)明显要高于过断层后的速度,这一规律同样和巷道压力及位移监测结果一致。

2.6 多参量数据主成分分析

多参量监测变量较多,增加了分析问题的复杂性,在实际问题中,参量之间可能存在一定的相关性,即多参量间可能存在信息的重叠,用较少的参量来替代原来较多的参量,且这种替代可以反映出原来多个变量的大部分信息,主成分分析方法认为:参量的变异性越大,说明它对各种场景的“遍历性”越强,提供

的信息更加充分,信息量就越大<sup>[15]</sup>。

(1) 将原始数据标准化,以消除单位不同造成结果的差异;

(2) 建立参量的相关系数矩阵;

(3) 求相关系数矩阵的特征值;

(4) 确定多参量中各参量数据的重要程度。

以顶板应力、顶底板移近量、巷道温度、巷道风速、巷道湿度、顶板孔内温度及顶板表面温度的监测结果为向量,组成矩阵来研究,得到的特征值分别为:0.006 4、6.970 3、0.018 7、0.000 3、0.004 4、0;监测结果的重要程度从强到弱依次为:顶底板移近量、巷道温度、顶板应力、顶板内部温度、巷道湿度;其中顶底板移近量在总特征值中贡献率达到 99.6%,为监测结果的第 1 主成分。

以帮部应力、两帮收敛量、巷道温度、巷道风速、巷道湿度、帮内温度、帮部表面温度、电磁辐射强度为向量,组成矩阵来研究,得到的特征值分别为:0、7.975 2、0.000 7、0、0.002 6、0、0.021 5。监测结果的重要程度从强到弱依次为:两帮收敛量、电磁辐射强度、帮内部温度、巷道温度;其中两帮收敛量在总特征值中贡献率达到 99.69%,为监测结果的第 1 主成分。

经主成分分析得出在巷道多参量监测中,巷道的位移监测结果的全面性及遍历性要强于电磁辐射强度值、巷道应力及巷道内部温度等。

3 数值模拟

通过应用 ABAQUS 有限元软件进行三维数值模拟。底面及侧面 3 个方向全部位移约束,上面无约束;初始垂直应力为自重应力,初始水平应力取 10 MPa;如图 8 所示,模型大小为 600 m × 450 m × 300 m,工作面采宽 240 m,煤层倾角 20°,在回采 45 ~ 50 m 间设置断层,采用 Mohr-Coulomb 模型模拟工作面回采。模型所需力学参数均有现场取样、实验室取芯、加工成标准样品后进行单、三轴试验测得,结果见表 1。

表 1 数值模拟力学参数

Table 1 The mechanical parameters of numerical simulation

岩石名称	密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量 / GPa	泊松比	内聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)
直接顶	2 672	20.37	0.221	8.69	48.23
直接底	2 479	16.45	0.164	12.55	31.81
煤	1 376	3.48	0.193	10.60	29.11
基本顶	2 600	30.06	0.220	25.30	35.00
基本底	2 500	30.41	0.190	26.40	35.00

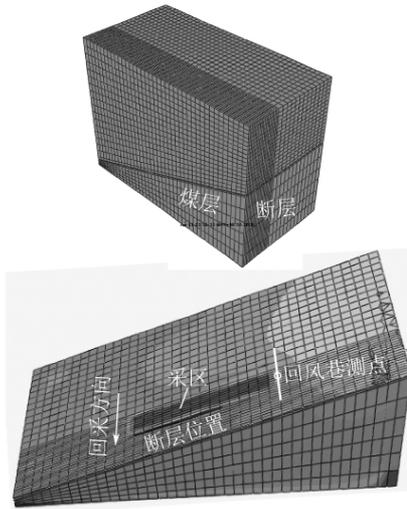


图 8 数值模型及剖面

Fig. 8 Numerical model and profile

由于现场巷道中布置测温孔及应力、位移等监测设备受实际情况的影响,无法布置在断层位置进行同步监测,故采用实际围岩物理力学参数进行数值模拟来研究断层位置处各参量的变化规律也是一种有效的补充;同时数值模拟断层位置处的应力及内能的变化结果也可以作为实测的验证。

由图 9 看出,从距离断层约 25 m 的距离开始,断层位置应力开始急剧增加,到达断层位置应力达到最大值 7.75 MPa,随着工作面继续向前推进,断层位置处应力得到释放,经过断层 10 m 时,应力达到最小值 1.69 MPa,随后应力缓慢增加。

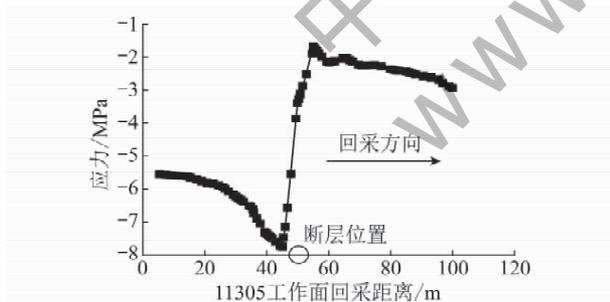


图 9 断层处测点应力随工作面距离的变化曲线

Fig. 9 The stress curve of measurement point in fault position with mining

断层位置处的最大应力比 4 号测站实际监测最大应力 6.288 MPa 偏大,且当回采到 4 号测站位置时,断层处的应力为 2.56 MPa,而实测 4 号测站的应力为 1.94 MPa,分析原因是由于 4 号测站在断层后方 50 m 处,断层的存在阻断了顶板连续传递上覆岩层压力的作用,当经过断层继续向前回采时,前方顶板及煤壁相当于只承受断层位置到测站段上覆岩层的压力。

工作面回采过程中煤岩体变形、破裂等现象发生

时必然会产生整体内能的变化,如图 10 所示,工作面回采至断层位置时,结构内能发生突跳,这也很好地解释了煤岩体中温度发生明显改变的结果;同时表明煤岩体中微小结构也发生着剧烈的挤压、摩擦并对外作功,产生能量的转移。

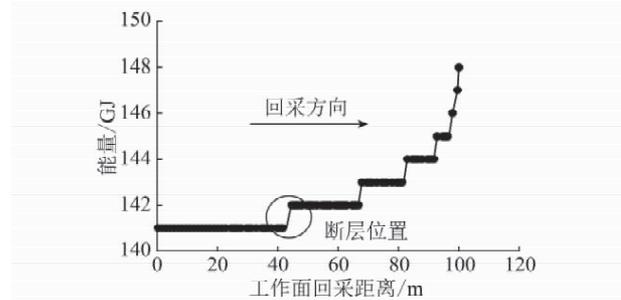


图 10 工作面回采中结构整体内能变化曲线

Fig. 10 The change curve of the internal energy with mining

## 4 结 论

(1) 多参量监测手段从巷道围岩体的应力、位移、微观结构变化以及宏观内能改变监测入手,实现了现场宏微观监测相结合的全面监测体系;各参量从不同空间尺度监测并相互验证,为更加全面地了解巷道围岩稳定性特征提出了一种新的思路。

(2) 数值模拟方法很好地弥补了现场监测中由于布点位置受多方因素影响无法全部布置到断层位置而进行同步观测的不足,成功分析了回采工作面过断层时,断层位置的应力及内能的变化规律,同时也验证了现场监测中各参量之间的内在联系。

(3) 温度作为内能最直接的体现,经过实际观测,并与应力、应变监测结果对比分析,发现其应用于现场中对围岩体进行能量监测中是切实可行的。

(4) 多参量数据经过主成分分析,得出各参量重要性及敏感性由强到弱依次为:巷道变形量、电磁辐射强度值、巷道内部温度、巷道应力。

## 参考文献:

- [1] 钱鸣高,刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京:煤炭工业出版社,1991.  
Qian Minggao, Liu Tingcheng. Underground pressure and control [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991.
- [2] 刘泉声,张伟,卢兴利,等. 断层破碎带大断面巷道的安全监控与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(10): 1954-1962.  
Liu Quansheng, Zhang Wei, Lu Xingli, et al. Safety monitoring and stability analysis of large-scale roadway in fault fracture zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1954-1962.
- [3] 薛亚东,张长根,李兴宏,等. 采区断层探测与分布规律研究

- [J]. 煤炭学报 2003 28(5): 513-516.
- Xue Yadong, Zhang Changgen, Li Xinghong, et al. Seismic exploration of fault in mining area and study on its distribution law [J]. Journal of China Coal Society 2003 28(5): 513-516.
- [4] 卢国志, 彭林军, 许守东, 等. 采场组合矿压观测方案的研究 [J]. 岩土力学 2006 27(S1): 319-321.
- Lu Guozhi, Peng Linjun, Xu Shoudong, et al. Study of combined observation scheme about coal mine stress [J]. Rock and Soil Mechanics 2006 27(S1): 319-321.
- [5] 张平松, 刘盛东. 断层构造在矿井工作面震波 CT 反演中的特征显现 [J]. 煤炭学报 2006 31(1): 35-39.
- Zhang Pingsong, Liu Shengdong. Character appearance of fault structure in seismic wave CT inversion for mine work faces detecting [J]. Journal of China Coal Society 2006 31(1): 35-39.
- [6] 吴立新, 唐春安, 钟 声, 等. 非连续断层破裂红外辐射与声发射、应力场的对比研究 [J]. 岩石力学与工程学报 2006 25(6): 1111-1117.
- Wu Lixin, Tang Chun'an, Zhong Sheng, et al. Comparison of thermal infrared radiation from discontinuous jointed faults fracturing with its acoustic emission and stress field [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2006 25(6): 1111-1117.
- [7] 刘善军, 吴立新, 张艳博, 等. 拐折非连通断层加载失稳的热辐射演化特征 [J]. 岩石力学与工程学报 2009 28(S2): 3342-3348.
- Liu Shanjun, Wu Lixin, Zhang Yanbo, et al. Evolutive features of thermal radiation of tortuously no-connected fault in the loading and instability process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009 28(S2): 3342-3348.
- [8] 朱月明, 潘一山, 孙可明. 急倾斜煤层开采解放层相似模拟实验 [J]. 辽宁工程技术大学学报 2003 22(2): 205-207.
- Zhu Yueming, Pan Yishan, Sun Keming. Physical modeling experiment of extraction of protective seam in dip-slopping coal seams [J]. Journal of Liaoning Technical University 2003 22(2): 205-207.
- [9] 唐东旗, 吴基文, 李运成, 等. 断裂带岩体工程地质力学特征及其对断层防水煤柱留设的影响 [J]. 煤炭学报 2006 31(4): 455-460.
- Tang Dongqi, Wu Jiwen, Li Yuncheng, et al. The features of fault zone rockmass engineering geological mechanics and its effect on leaving fault waterproof pillar [J]. Journal of China Coal Society, 2006 31(4): 455-460.
- [10] 孟召平, 彭苏萍, 黎 洪. 正断层附近煤的物理力学性质变化及其对矿压分布的影响 [J]. 煤炭学报 2001 26(6): 561-566.
- Meng Zhaoping, Peng Suping, Li Hong. Influence of normal faults on the physical and mechanical properties of coal and the distribution of underground pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2001 26(6): 561-566.
- [11] 窦林名, 何学秋, 王恩元. 冲击矿压预测的电磁辐射技术及应用 [J]. 煤炭学报 2004 29(4): 396-399.
- Dou Linming, He Xueqiu, Wang Enyuan. Electromagnetic emission technique of monitoring rock burst and its application [J]. Journal of China Coal Society 2004 29(4): 396-399.
- [12] 刘晓斐, 王恩元, 何学秋. 回采工作面应力分布的电磁辐射规律 [J]. 煤炭学报 2007 32(10): 1019-1022.
- Liu Xiaofei, Wang Enyuan, He Xueqiu, et al. Electromagnetic radiation laws of the stress distribution in working face [J]. Journal of China Coal Society 2007 32(10): 1019-1022.
- [13] 高忠红, 何富连, 孟筠青, 等. 利用井上下电磁辐射确定煤岩动力灾害的钻屑量预警值 [J]. 煤炭学报 2011 36(4): 615-518.
- Gao Zhonghong, He Fulian, Meng Junqing, et al. Determine the warning value of drilling cuttings weight coal and rock dynamic disaster through electromagnetic radiation [J]. Journal of China Coal Society 2011 36(4): 615-518.
- [14] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 煤岩冲击失稳的机理和实验研究 [M]. 北京: 科学出版社 2009.
- Jiang Yaodong, Zhao Yixin, Liu Wengang, et al. Investigation on the mechanism of coal bumps and relating experiments [M]. Beijing: Science Press 2009.
- [15] 朱建平. 应用多元统计分析 [M]. 北京: 科学出版社 2006.
- Zhu Jianping. Applied multivariate statistics [M]. Beijing: Science Press 2006.