

文章编号: 1673-3363-(2014)01-0060-06

深部工作面采动应力场分布变化规律实测研究

刘杰^{1,2}, 王恩元^{1,2}, 赵恩来^{1,2}, 徐文全³, 胡少斌^{1,2}

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 陕西煤业化工技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘要 为防止深部较软煤层发生动力灾害, 以平煤股份二矿为工程背景, 采用应力实时监测系统测试了深部工作面采动应力场, 研究了工作面走向和倾向应力分布及变化规律, 分析了应力对煤体稳定性及动力现象的影响, 并探讨了工作面可能发生的动力灾害。结果表明, 工作面上部(靠近采空区)超前采动影响距离、煤帮内应力集中范围、应力集中系数及应力峰值较大, 工作面两端应力规律差异较大。应力峰值和应力梯度变化显著影响煤体的稳定性; 通过监测工作面应力变化, 可对工作面动力现象进行预测预报; 工作面可能发生的动力灾害是应力起主导作用的压出灾害。

关键词 采动应力监测; 应力分布规律; 动力现象

中图分类号 TD 322

文献标志码 A

Distribution and variation of mining-induced stress field in deep workface

LIU Jie^{1,2}, WANG Enyuan^{1,2}, ZHAO Enlai^{1,2}, XU Wenquan³, HU Shaobin^{1,2}

(1. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3. Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute Co Ltd, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract To prevent the occurrence of dynamic disaster in deep soft coal seam, based on the engineering background in No.2 Coal Mine of Pingdingshan Tianan Coal Co. Ltd., the mining-induced stress field in the deep workface was measured by using the stress real-time monitoring system, and the distribution and variation of stress along strike and inclination was studied. In addition, the effect of stress on coal stability and dynamic phenomena was further analyzed, and the dynamic disasters which may occur in this workface were discussed. The results show that in the upper part of workface, which is approaching the gob-side, the influencing distance of advanced mining-induced stress, the stress concentration range within the roadway coal sidewalls are larger, and the stress concentration factor and peak value of stress are higher. The stress distribution and variation is quite different between the head and end of the workface. Moreover, the variation of peak stress and stress gradient significantly influence the stability of coalmass. Because the main disaster probably occurred at the workface is extrusion disaster controlled by the stress, the dynamic disasters can be fore casted by monitoring the stress changes at the workface.

Key words mining-induced stress monitoring; stress distribution; dynamic phenomenon

收稿日期: 2013-05-15

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAK04B07-2); 国家自然科学基金青年基金项目(51304205); 教育部科学技术研究项目

作者简介: 刘杰(1986-), 男, 山东省邹平县人, 博士, 从事煤岩动力灾害方面的研究。

通信作者: 王恩元

E-mail: liujie0805@163.com

Tel: 0516-83884695

近些年,国内矿山开采逐渐进入了深部,尤其是中东部地区,部分矿井开采深度已经超过 800 m,开采深度的增加使得采掘工作面应力越来越大^[1]。为了生产的顺利接续,有些矿井采用了间隔跳采的工作面布置方法,回采至后期易形成半孤岛或孤岛工作面,使得应力出现叠加,造成应力进一步升高。应力的增大会导致巷道变形、底鼓、片帮、冒顶等现象^[2-5],因此众多学者对深部工作面应力和采掘空间矿山压力变化规律进行了研究。刘长友等^[6]对超长孤岛工作面支承压力分布特征进行了模拟研究;司荣军等^[7]模拟了煤层开采过程中采场支承压力动态变化;赵同彬等^[8]模拟了工作面前方支承压力的动态变化规律;王振等^[9]模拟研究并分析了工作面前方采动应力场分布特征;杨威等^[10]模拟了解放层开采后邻近煤岩层应力分布及变化规律;鞠金峰等^[11]对 7 m 支架综采面液压支架支护阻力变化规律进行了研究,分析了支护阻力和动载系数之间的关系;夏永学等^[12]基于微震监测研究了超前支承压力分布特征,得出了通过研究采煤工作面前方微震事件的分布特征与超前支承压力的关系;王恩元等^[13-16]提出了应用电磁辐射监测矿山压力方法,并对采煤工作面矿压分布规律、周期来压以及煤体内应力分布进行了监测,取得了良好的应用效果。以上研究对于认识矿山压力、煤层应力分布及变化规律具有重要的指导意义。现场实测能够更加直观地反映工作面前方超前采动应力分布变化规律,徐文全等^[2]测试了梁北矿 11061 孤岛工作面支承压力分布规律;刘金海等^[17]测试了新巨龙矿井 1301 综放工作面支承压力分布特征;张农等^[18]测试了淮南朱集煤矿 11-2 煤层首采煤层 1111(1)工作面应力分布规律。

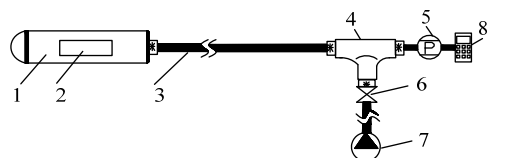
平煤股份二矿庚 20-21050 回采工作面是平顶山矿区典型的深部回采工作面,位于二矿二水平庚一采区东翼中部。该采区东翼回采基本完成,剩余庚 20-21050 和庚 20-21070 这 2 个工作面,两者共同构成了大孤岛。庚 20-21050 回采工作面可采走向长度 845 m,回采工作面倾向长 176 m,采深 740~850 m,煤层平均厚度 1.9 m,煤体坚固性系数在 0.3~0.5 之间。工作面走向 113°,倾向 23°,平均倾角 9.5°。直接顶为深灰色厚层状石灰岩(L6),平均厚度为 4.2 m,局部裂隙发育,坚硬性脆,其上为厚度 1.5 m 的深灰色砂质泥岩。直接底为灰色砂质泥岩,平均厚度 1.7 m,其下为深灰色石灰岩,厚度为 3.23 m。该采区其他已回采工作面和庚组煤

其他回采工作面生产时,未发生动力灾害,而庚 20-21050 工作面回采时,矿压显现非常明显,生产过程中动力现象频繁,并且呈现出明显的区域性,严重影响了工作面安全生产。本文采用中国矿业大学自主研制开发的采动应力监测系统,测试了庚 20-21050 工作面前方应力,分析了应力分布及变化规律,确定应力对煤体稳定性及工作面动力现象的影响,为平煤二矿及附近矿区开采庚组煤提供理论依据及指导。

1 采动应力测试系统及方案

1.1 采动应力测试系统

采动应力实时监测系统包括应力感应系统和数据采集系统,如图 1 所示^[19],应力感应系统的感应探头径向可以伸缩,能够为煤体提供一定的支承力,保证感应探头与煤体良好耦合。数据采集系统能够与矿用监测系统并网运行,实现数据的实时连续测试,并传至地面主机对数据进行及时处理分析,包括数据采集仪和线路。



1-应力感应器; 2-定向应力感应探头; 3-高压油管; 4-三通;
5-电子数显液压转换器; 6-阀门; 7-高压油泵; 8-数据采集仪

图 1 采动应力监测系统示意图

Fig.1 Diagram of mining stress monitoring system

1.2 采动应力测试方案

庚 20-21050 工作面煤层厚度 1.9 m,选择在煤层中部安装采动应力传感器,如图 2 所示。

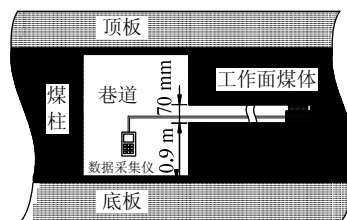


图 2 采动应力监测系统安装示意图

Fig.2 Installation diagram of mining stress monitoring system

采动应力测点布置位置依据工作面推进情况确定,其中轨道巷(上巷)下帮布置 6 个测点,分别在距回采工作面 175, 178, 181, 184, 187, 190 m 处依次安装孔深为 13, 11, 9, 7, 5, 3 m 的应力感应探头;皮带运输巷(下巷)上帮同样布置 6 个测

点,在距回采工作面 135, 138, 141, 144, 147, 150 m 处依次安装孔深为 13, 11, 9, 7, 5, 3 m 的应力感应探头。采动应力传感器布置如图 3 所示。

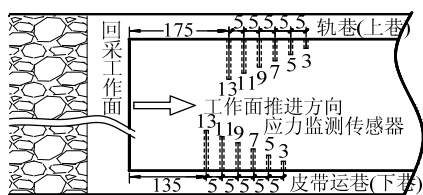


图 3 采动应力传感器布置示意图 (m)

Fig.3 Layout of testing points installed with mining stress sensors

2 采动应力测试结果

2.1 轨道巷采动应力测试结果

轨道巷,现场打钻安装应力感应探头时,3, 5 m 孔均顺利成孔,7 m 孔在钻孔施工接近完成时出现了轻微的喷孔现象,应力在一定程度上得到了释放,9, 11, 13 m 孔在施工时出现了严重喷孔现象,导致应力充分释放,因此有效数据为 3, 5, 7 m 孔的采动应力测试结果,如图 4 所示。由测试结果可以看出,随工作面不断推进,前方采动应力呈现先升高后降低的趋势;巷帮内距煤壁不同深度处采动应力变化规律存在差异。

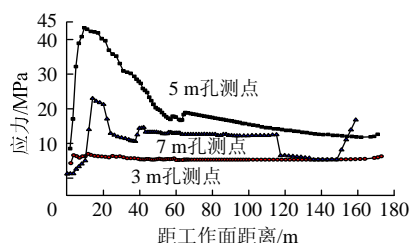


图 4 轨道巷应力测试结果

Fig.4 Measuring results of stress in the tracks roadway

由图 4 可知,工作面推进至距 5 m 孔测点 165 m 时应力出现升高,说明工作面回采过程最大的超前影响距离为 165 m。在工作面距测点 165~60 m 区域时,应力升高较为缓慢,采动作业对应力影响较平稳。工作面推进至测点 60 m 时,应力变化趋势出现改变,其中 3 m 测点应力数据虽然没有明显升高,但是开始波动;5 m 孔测点应力显著升高,并且升高幅度不稳定;工作面推进至距离 7 m 孔测点 40 m 以内,应力数据出现明显的波动,说明工作面回采显著超前影响距离为 40~60 m。5 m 孔测点及 7 m 孔测点在距工作面 10~14 m 区域时,采动应力达到了最大值,由此可知,超前采动应力峰值位于工作

面前方 10~14 m,为工作面采高的 5.2~7.4 倍;之后应力值逐渐降低,测点进入工作面卸压带。在整个测试过程中,3 m 孔测试数据未发生明显的升高,这说明 3 m 孔位于巷帮的松动圈内,煤体破碎严重,失去了承载能力。

由现场安装应力感应探头时的动力现象可知,距离煤壁越深打钻时出现的动力现象越严重,因此轨道巷下帮煤体内应力随深度增加逐渐升高。5 m 孔测点应力最大值达到 43.3 MPa,相对其初始应力 14.5 MPa,应力集中系数达到了 3.0,相对其他工作面而言较高,可以推测距煤壁更深的测点应力值和应力集中系数更大。

2.2 皮带运输巷内采动应力测试结果

皮带运输巷,现场生产时 13 m 孔遭到破坏,未监测到有效数据,其他测点测试数据如图 5 所示。

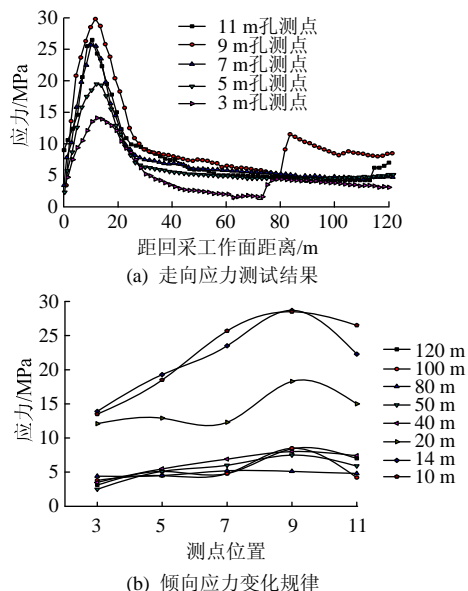


图 5 皮带运输巷采动应力测试结果

Fig.5 Measuring results of mining stress in the belt conveyor roadway

由图 5a 可知,皮带运输巷中,3, 9 m 孔测点距工作面 110 m 处应力出现升高,说明皮带运输巷内采动最大影响范围为 110 m。在距离工作面 30 m 区域时,各测点应力值显著升高,皮带运输巷内回采工作显著超前影响距离为 30 m。工作面推进至距离测点 10~13 m 时,各测点相继达到应力最大值,说明皮带运输巷内应力集中带位于工作面前方 10~13 m 区域,为工作面采高的 5.2~6.8 倍;之后各测点应力值出现下降,测点进入工作面前方卸压带。3 m 孔测点在测试过程中,应力升高幅度不大,说明此区域内煤体承压能力较弱,属于巷帮卸压带。

图 5b 所示为工作面推进至与测点不同距离处, 皮带运输巷内各测点倾向应力变化规律。由图 5b 可以看出, 工作面距离测点较远时, 各测点位置受力均匀, 应力值相差不大; 工作面回采至 40~50 m 处, 各测点应力相继升高, 并且应力增幅产生差异, 7, 9, 11 m 孔测点应力值升高幅度大多数时间较 3, 5 m 孔测点大。随工作面不断向前推进, 靠近自由空间的煤体横向应力较小, 煤体受力时容易发生塑性变形破坏, 无法承受较大应力, 应力向煤体内部转移, 从而在距煤壁一定深度处形成应力集中带, 由图 5b 可以看出, 皮带运输巷上帮煤体内应力集中区距煤壁 7~11 m。在整个回采过程中, 9 m 孔测点应力值最大达到 29.8 MPa, 应力集中系数达到 2.0, 与正常回采工作面相差不大。

利用 GS+ 软件绘制皮带运输巷上帮内应力分布图, 如图 6 所示。

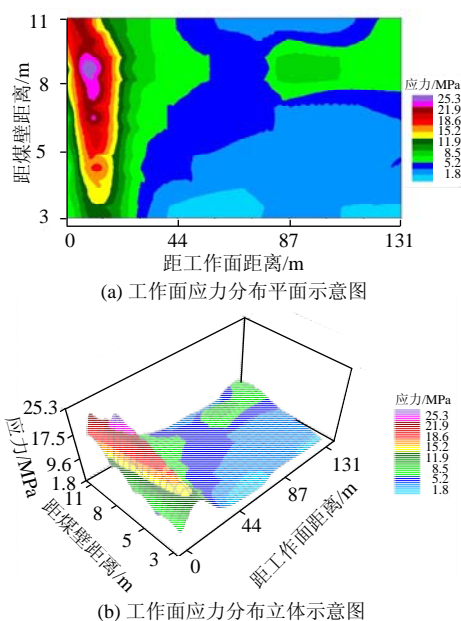


图 6 皮带运输巷采动应力分布图

Fig.6 Distribution of mining stress in the belt conveyor roadway

由图 6a 可看出, 在距离工作面 44~131 m 区域, 工作面应力变化不大, 在走向方向和倾向方向波动不明显; 距离工作面前方 44 m 以内应力在走向和倾向方向上波动较为剧烈, 并且距离工作面越近, 等值线越来越密集, 走向和倾向 2 个方向上应力梯度越来越大。走向方向, 工作面前方 14 m 附近区域应力梯度最大; 倾向方向, 小于 5 m 的区域, 应力变化较为平缓, 应力梯度较小; 深度超过 5 m 时, 应力变化逐渐剧烈, 应力梯度也逐渐升高, 9 m 附

近区域应力波动尤为剧烈。由图 6b 可看出, 远离工作面处的煤层应力较为平稳, 进入超前采动影响区域后应力升高幅度较大, 在 30 m 距离内升高到最大值。工作面前方显著影响距离以内应力值远远大于显著影响区域外的应力值, 并且在距离巷帮 9 m 处存在沿走向的应力集中带, 与工作面前方沿倾向应力集中带形成了“尖点”, 结合图 6a 所示应力梯度变化情况可知, 在“尖点”附近区域煤体在高应力和高应力梯度作用下煤体易于产生破裂, 发生动力现象的危险性相对下部其他区域较高。

通过分析回采工作面两端应力沿走向和倾向的分布规律可以看出, 工作面上部和下部应力分布及变化规律相差较多, 与正常工作面回采和孤岛工作面回采^[2,9]相比, 工作面上部和下部之间的应力变化差异性更大。

3 结果分析

3.1 应力作用分析

应力大小以及应力梯度对煤体的变形破坏有重要作用, 高应力状态下, 当煤体的空间应力梯度超过相应应力状态下的临界梯度时, 煤体会发生破裂。由采动应力测试结果可计算出工作面上部和下部倾向应力梯度变化, 如图 7a 所示, 其中风巷利用 3 m 孔和 5 m 孔距工作面相同距离时的应力梯度计算, 皮带运输巷计算距工作面相同距离时相邻 2 个测点的应力梯度后取平均值。由图 7a 可以看出, 倾斜方向上, 工作面上部应力梯度较大, 并且随工作面的推进不断升高, 下部煤体应力梯度及变化较小。工作面距离测点较远时, 上部应力梯度为 4 MPa/m, 之后随工作面的推进不断升高, 最大达到了 18.1 MPa/m; 工作面距离测点较远时应力梯度在 2 MPa/m, 测点靠近工作面时最大达到了 3.5 MPa/m, 整体升高幅度较小; 相比而言上部煤体发生变形破裂的可能性较高。现场观测发现轨道巷内巷道两帮变形非常明显, 尤以巷道与工作面转角处明显, 并且巷道内煤壁形成了明显的层裂结构, 最外层煤体与工作面剥离, 仅在锚杆支护作用下保持稳定, 因此应当重点加强轨道巷内支护强度, 定期检查巷道内锚杆支护效果, 对于失去支护效果的锚杆能够及时地采取措施修护, 防止动力灾害的发生, 相比而言, 皮带运输巷两帮变形较小。工作面轨道巷内进行超前支护 60 m, 在靠近工作面位置处的单体支柱压力较大, 有时会发生爆缸, 与测试所得采动显著超前影响距离相符。

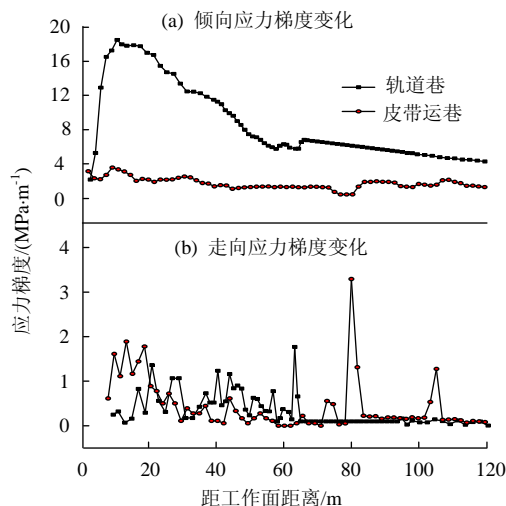


图 7 轨道巷与皮带运输巷采动应力对比分析

Fig.7 Comparative analysis of mining stress between tracks roadway and belt conveyor roadway

图 7b 所示为轨道巷 5 m 孔和皮带运输巷 9 m 孔沿走向方向应力梯度随工作面推进的变化规律。由计算结果可看出,走向方向上,工作面上部煤体应力梯度和下部相差不大,但是轨道巷内工作面距离测点 60 m 以内应力梯度出现明显的波动,而皮带运输巷内在 35 m 以内出现了明显的波动,因此轨道巷内煤体受到的应力波动作用时间较皮带运输巷长,更加容易出现疲劳损伤出现软化,受到外界扰动的作用易于发生动力现象。在实际生产中上述分析得到了验证,回采过程中工作面施工卸压钻孔过程中,工作面上部区域发生卡钻等动力现象频繁,下部相对较少,统计 2011 年 11 月至 2012 年 3 月动力现象记录可知,工作面中上部发生 61 次,下部仅发生 1 次,位于 13# 支架位置处,距离皮带运输巷约 8 m,与工作面下部存在的应力“尖点”位置接近,并且在回采过程中,工作面上部由于卡钻导致钻杆丢失现象非常严重,而下部较少。

高应力不仅会影响工作面动力现象,同时会对矿压显现产生显著作用。庚 20-21050 工作面轨道巷内顶板的完整性较差,经常发生小规模冒顶,并且巷道两帮变形较大,两侧顶板沉降明显,尤其是轨道巷与回采工作面接接口处,相对而言,皮带运输巷顶板完整性较好,两帮煤体变形不明显。

由图 4 可看出,7 m 钻孔测点距离工作面 40 m 应力发生了 1 次下降,由 14.4 MPa 降至 10.6 MPa;距离工作面 24 m 时,应力发生了上升,由 12.9 MPa 升至 21.2 MPa,在以上 2 次应力突变后的作业循环内,工作面施工卸压钻孔时,工作面上部在靠近巷

道的区域内均发生了动力现象。这是由于工作面煤体破裂造成应力升高或降低。当应力监测点处发生破裂时,煤体释放能量,应力降低;当距测点一定距离处的煤体发生破裂时,应力发生转移,引起测点处的应力升高。因此通过监测现场应力突变,能够掌握工作面前方煤体变形破裂情况,及时采取防治措施。

3.2 工作面动力灾害危险性分析

庚 20-21050 工作面埋深较深,煤体自重应力、采动应力、构造应力叠加在工作面形成了较高的应力值,尤其是两巷巷帮和工作面前方煤体。大多数情况下工作面前方煤体在三向应力作用下保持稳定,但是随工作面的推进,水平面应力值逐渐降低,煤体承受垂直应力和水平应力比值逐渐升高,造成煤体越来越容易被破坏,特别是工作面上部煤体。当工作面卸压带提供的支撑力不足以抵抗应力集中带煤体的变形,或受外界扰动应力集中带煤体短时间内释放大量能量时,工作面煤体会失稳破坏。庚 20-21050 工作面瓦斯压力为 0.10~0.58 MPa,瓦斯含量为 3.17~5.48 m³/t,与典型的煤与瓦斯突出矿井相比瓦斯压力和含量较低,并且两巷内向工作面煤体施工钻孔排放瓦斯,工作面内较难形成大范围的瓦斯积聚,因此煤体破坏后不会形成大量瓦斯内能的释放,由此可判断工作面可能发生的灾害是应力起主导作用、瓦斯起辅助作用的压出灾害。

4 结 论

1) 工作面回采过程中,轨道巷内采动超前影响距离为 165 m,煤帮内应力集中区位于 5~13 m,应力集中系数达到 3.0,沿走向应力峰值距工作面约为采高的 5.2~7.4 倍;皮带运输巷内采动超前影响距离为 110 m;煤帮内应力集中区位于 7~11 m,应力集中系数达到 1.8,沿走向应力峰值距工作面约为采高的 5.2~6.8 倍,工作面上部煤体存在应力“尖点”;工作面上部和下部应力分布及变化规律差异性较正常回采工作面和孤岛工作面大。

2) 庚 20-21050 工作面上部倾向应力梯度远大于下部,走向应力梯度相差不大,在高应力和高倾向应力梯度作用下,上部煤体稳定性较差,发生动力现象的可能性较高;通过现场监测应力的变化,可以预报工作面动力现象的发生,提前采取防治措施;工作面可能发生的动力灾害类型是应力起主导作用、瓦斯起辅助作用的压出灾害。

参考文献:

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study of rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] XU Wenquan, WANG Enyuan, SHEN Rongxi, et al. Distribution pattern of front abutment pressure of fully-mechanized working face of soft coal isolated island[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(2): 279-284.
- [3] 齐庆新, 窦林名. 冲击地压理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [4] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [5] 陈国祥, 窦林名, 乔中栋, 等. 褶皱区应力场分布规律及其对冲击矿压的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(6): 751-755.
CHEN Guoxiang, DOU Linming, QIAO Zhongdong, et al. The stress field distribution in folding structure areas and its impact on rock burst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 751-755.
- [6] 刘长友, 黄炳香, 孟祥军, 等. 超长孤岛综放工作面支承压力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 2761-2766.
LIU Changyou, HUANG Bingxiang, MENG Xiangjun, et al. Research on abutment pressure distribution law of over length isolated fully-mechanized top coal caving face [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 2761-2766.
- [7] 司荣军, 王春秋, 谭云亮. 采场支承压力分布规律的数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 351-354.
SI Rongjun, WANG Chunqiu, TAN Yunliang. Numerical simulation of abutment pressure distribution laws of working faces[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 351-354.
- [8] 赵同彬, 张洪海, 陈云娟, 等. 支承压力分布演化规律及对煤岩体破坏的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010, 29(3): 420-423.
ZHAO Tongbin, ZHANG Honghai, CHEN Yunjuan, et al. Evolution of abutment pressure distribution and impact on coal-rock damage[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2010, 29(3): 420-423.
- [9] 王振, 胡千庭, 文光才, 等. 采动应力场分布特征及其对煤岩瓦斯动力灾害的控制作用分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 623-627.
WANG Zhen, HU Qianting, WEN Guangcai, et al. Study on the distribution laws of mining pressure field and its control action on dynamic disasters in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 623-627.
- [10] YANG Wei, LIN Baiquan, QU Yongan, et al. Stress evolution with time and space during mining of a coal seam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48: 1145-1152.
- [11] 鞠金峰, 许家林, 朱卫兵, 等. 7.0 m 支架综采面矿压显现规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 344-350.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Strata behavior of fully-mechanized face with 7.0 m height support[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 344-350.
- [12] 夏永学, 蓝航, 毛德兵, 等. 基于微震监测的超前支承压力分布特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 868-873.
XIA Yongxue, LAN Hang, MAO Debing, et al. Study of the lead abutment pressure distribution base on micro-seismic monitoring[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(6): 868-873.
- [13] 刘晓斐, 王恩元, 何学秋, 等. 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.
- [14] 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 131-137.
WANG Enyuan, HE Xueqiu. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1): 131-137.
- [15] 王恩元, 何学秋, 李忠辉, 等. 煤岩电磁辐射技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] WANG Enyuan, HE Xueqiu, LIU Xiaofei, et al. Comprehensive monitoring technique based on electromagnetic radiation and its applications to mine pressure[J]. Safety Science, 885-893.
- [17] 刘金海, 姜福兴, 王乃国, 等. 深井特厚煤层综放工作面支承压力分布特征的实测研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 1): 18-22.
LIU Jinhai, JIANG Fuxing, WANG Naiguo, et al. Survey on abutment pressure distribution of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep shaft[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Sup 1): 18-22.
- [18] ZHANG Nong, ZHANG Nianchao, HAN Changliang, et al. Borehole stress monitoring analysis on advanced abutment pressure induced by long wall mining[J]. Arab J Geosci, 2013(2): 1-7.
- [19] 徐文全. 采动空间围岩应力实时监测技术及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.