

文章编号: 1673-3363-(2013)03-0317-06

采场底板应力分布与破坏规律研究

王连国¹, 韩猛^{1,2}, 王占盛^{1,2}, 欧苏北^{1,2}

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 煤层开采后采空区四周形成不同程度的支承压力带, 其中应力卸载与集中会向底板深部传递, 进而影响到底板的破坏深度与范围。本文建立了综合考虑工作面走向与倾向受力特点的空间半无限体模型, 推导出了底板垂直应力的迭代计算式, 并采用数学软件 MATHCAD 计算出了不同深度处底板的应力分布情况, 结果表明: 底板各岩层垂直应力等值线呈椭圆形, 浅部岩层等值线梯度较大, 深部岩层等值线梯度较小。基于应力理论分析结果及 Mohr-Coulomb 准则计算出某矿底板最大破坏深度 14.8 m, 现场微震监测结果显示底板最大破坏深度 15.2 m, 两者相吻合。本文的研究成果可为围岩控制及承压水上安全采煤研究提供理论依据。

关键词 底板; 应力分布; 应力传递; 破坏规律

中图分类号 TD 323

文献标志码 A

Stress distribution and damage law of mining floor

WANG Lian-guo¹, HAN Meng^{1,2}, WANG Zhan-sheng^{1,2}, OU Su-bei^{1,2}

(1. State Key Laboratory For Geomechanics and Deep Underground Engineering,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining
and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract After coal seam mining, different abutment pressure zones are formed around goaf area, and the stress unloading and concentration can be passed to the deeper floors, then the destroy depth and scope of floors are also affected. In this paper, the half-infinite body model was established which comprehensively considered the stress characteristics in the strike and inclined directions of the working face, and the iterative formula of vertical stress in floors was calculated. Meanwhile, the stress distributions in floors with different depths were calculated by Software-MATHCAD. The results show that the stress contours in different floor strata present oval shapes, and the contour gradient in shallow strata is larger than that in deeper strata. Based on the stress analysis results and Mohr-Coulomb criteria, the maximum damaged depth in floor of one mine was calculated to 14.8 m, while the largest damaged depth of floor by field seismic monitoring was 15.2 m, which are identical with each other. The results in this paper can provide theory basis for surrounding rock controlling and safety mining above confined water.

Key words floor; stress distribution; stress transfer; damage law

收稿日期: 2012-06-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226805); 国家自然科学基金项目(51274191)

作者简介: 王连国(1964-), 男, 山东省高唐县人, 教授, 博士生导师, 从事采矿工程与岩石力学等方面的研究。

E-mail: lgwang@cumt.edu.cn

Tel: 0516-83885205

煤层开采引起回采空间周围岩层应力重分布,并向底板深部传递,造成底板不同程度的破坏^[1]。

对采场底板应力分布规律的研究,是研究底板破坏深度和范围的重要前提^[2]。孟祥瑞等^[1]通过建立力学模型,给出了底板岩体破坏判据。林峰^[3]采用相似材料模拟试验分析了工作面生产过程中煤层底板应力分布规律。曹树刚等^[4]分析了楠木寺煤矿盘区巷道底板应力分布状况,探讨了该矿合理的巷道布置方式。

底板下工程结构的建设也需考虑底板应力分布情况^[5]。底板下开掘巷道、留设煤柱等均应避开底板应力集中区,以保证工程结构的稳定。

底板破坏范围与开采范围及采空区范围的支承压力分布有关^[6-8],由于底板的破坏可能导致地下水分布的变化,如我国华北地区许多煤层底板为奥陶系石灰岩,富水性强,煤层开采后底板的变形破坏可能引起突水等事故^[9-10]。事实上采动底板突水

事故是底板的破坏与承压水共同作用导致的^[11-13]。因此底板突水防治应重视研究采动底板破坏规律。

对采场底板破坏规律的研究,大部分学者只分析了工作面走向方向载荷对底板破坏规律的影响,忽略了工作面倾向方向载荷的影响。本文采用半无限体模型,综合分析了采场底板在工作面走向、倾向载荷共同作用下的应力分布及破坏规律,具有一定的创新性。

本文参考相关文献,建立了采场底板受力模型,采用半无限体空间理论,推导出了底板应力计算公式,并对某矿 10-108 工作面进行了底板破坏理论计算和微震监测,对底板应力分布和破坏规律进行了系统研究。

1 采场底板应力分布规律研究

根据矿压和关键层理论,建立如图 1 所示的煤层底板受力模型^[5]。

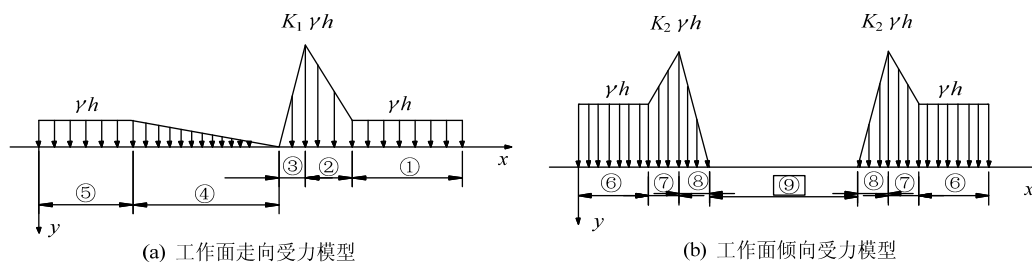


图 1 煤层底板受力模型

Fig.1 The force model of floor

其中:①,⑤,⑥区域为原岩应力分布区,③,⑦区域为应力增高区,②,⑧区域为应力降低区,④,⑨区域为采空区,则底板岩层各应力分量为:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= -\frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{qx^3 d\xi}{[x^2 + (y-\xi)^2]^2} \\ \sigma_y &= -\frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{qx(y-\xi)^2 d\xi}{[x^2 + (y-\xi)^2]^2} \\ \tau_{xy} &= -\frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{qx^2(y-\xi) d\xi}{[x^2 + (y-\xi)^2]^2}\end{aligned}\quad (1)$$

式中 q 为任意微元载荷集度。

由弹性力学可知,半无限体受法向集中力 P 作用时(如图 2),任意点 $M(x,y,z)$ 垂直应力 σ_z 为^[9]:

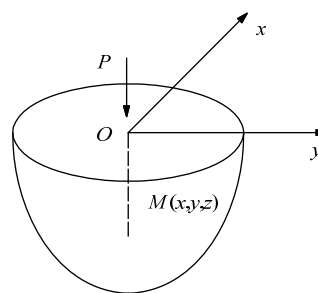


图 2 半无限空间作用一集中力的示意图

Fig.2 Diagram of the concentrated force in the three-dimensional semi-infinite space

$$\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \quad (2)$$

在任一分区范围内,应力系数在 X, Y 方向变化如式(3)所示。

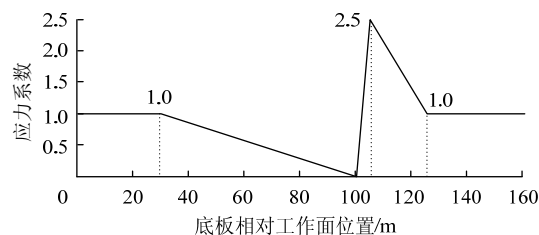
$$p(x) = \frac{p_1 + \frac{p_2 - p_1}{\xi_{2i} - \xi_{1i}}(x - \xi_{1i})}{p_1} \quad (3)$$

$$q(y) = \frac{q_1 + \frac{q_2 - q_1}{\eta_{2i} - \eta_{1i}}(y - \eta_{1i})}{q_1}$$

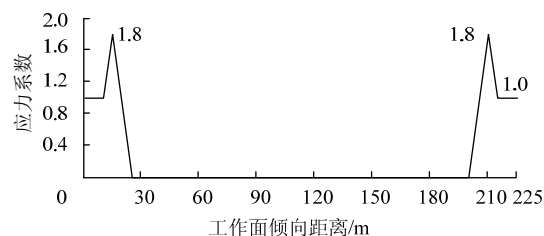
式中: p_1, p_2 分别为点 (ξ_1, η_1) , (ξ_2, η_2) x 方向应力系数; q_1, q_2 分别为点 (ξ_1, η_1) , (ξ_2, η_2) y 方向应力系数, 则第 i 分区载荷对底板应力影响为:

$$\sigma_z^{(i)}(x, y, z) = -\frac{3z^3}{2\pi} \int_{\xi_{1i}}^{\xi_{2i}} \int_{\eta_{1i}}^{\eta_{2i}} \left[p_{1i} + \frac{p_{2i} - p_{1i}}{\xi_{2i} - \xi_{1i}}(\xi - \xi_{1i}) + \left[q_{1i} + \frac{q_{2i} - q_{1i}}{\eta_{2i} - \eta_{1i}}(\eta - \eta_{1i}) \right] \right] \frac{d\eta d\xi}{\left[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2 \right]^{\frac{5}{2}}} \quad (4)$$

将底板载荷简化为图3所示的沿工作面走向、倾向分布示意图(其中,工作面位于 $x=100$ m 处,倾向从 $p=25$ m 至 $p=200$ m)。



(a) 沿工作面走向应力分布图



(b) 沿工作面倾向应力分布图

图3 底板载荷分布变化图

Fig.3 Changes of floor stress distribution

则所有分区载荷影响下的底板岩层应力为:

$$\sigma_z(x, y, z) = \sum_{i=1}^9 \sigma_z^{(i)}(x, y, z) \quad (5)$$

运用 MATHCAD 软件, 计算出不同深度底板应力系数等值线如图4所示。

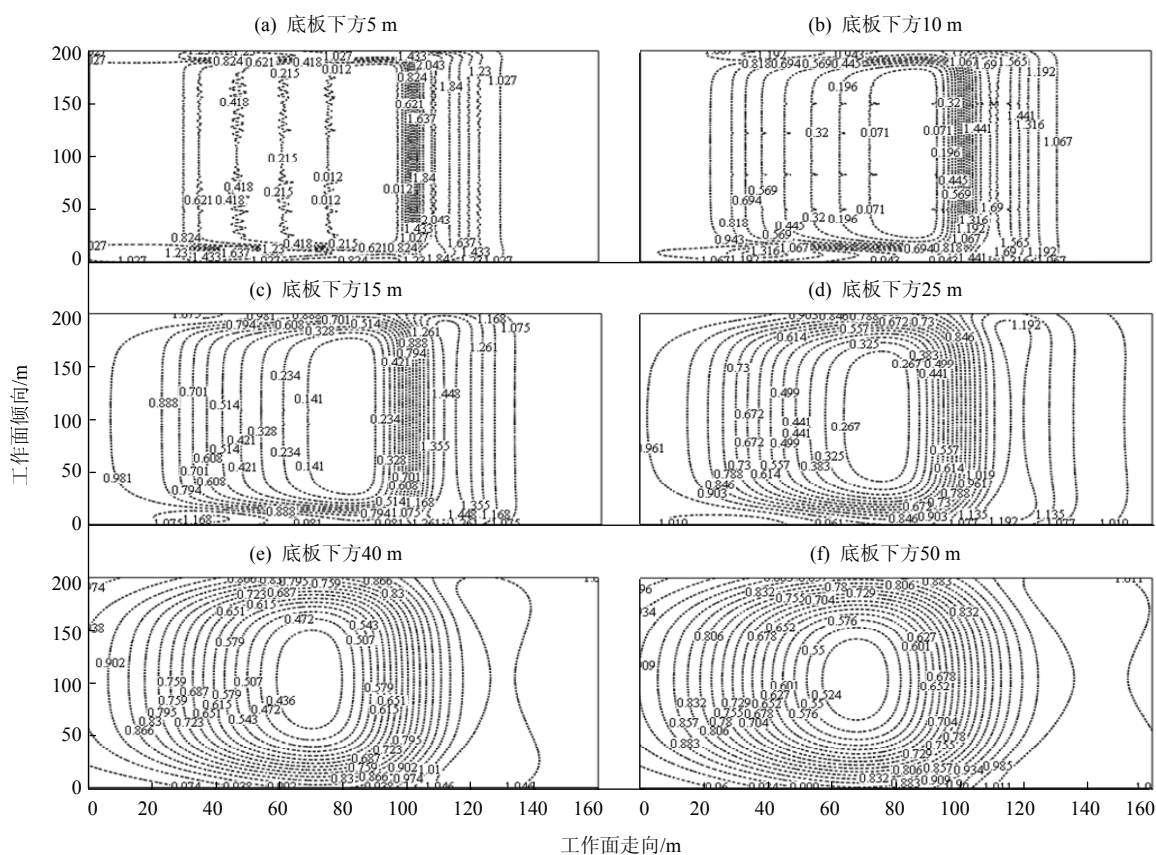


图4 底板应力系数等值线

Fig.4 Contours of the stress coefficient of the floor

由图4可得:

1) 底板下方5, 10, 15, 25 m深度: 最大应力系数分别为1.84, 1.69, 1.448, 1.19, 分别位于距离工作面前方0~23, 0~27, 0~29, 0~32 m范围内; 工作面两侧一定范围有不同程度应力集中;

2) 底板下方40, 50 m深度, 应力集中区基本不存在, 但卸载区在一定范围仍存在, 最小应力系数分别为0.436, 0.524;

3) 底板各岩层垂直应力等值线呈椭圆形, 浅部岩层等值线梯度较大, 深部岩层等值线梯度较小;

4) 随着底板深度增加, 高应力区范围逐渐增大, 但应力系数逐渐减小, 最终趋近于1; 低应力区范围逐渐减少, 但应力系数逐渐增加, 趋近于1。

2 采场底板应力传递规律研究

工作面后方20 m, 工作面位置、工作面前方5 m, 工作面前方30 m分别对应采动影响下的底板应力卸载区、应力临界区、应力集中区和应力恢复区。这4个范围内不同深度底板垂直应力变化情况如图5所示。

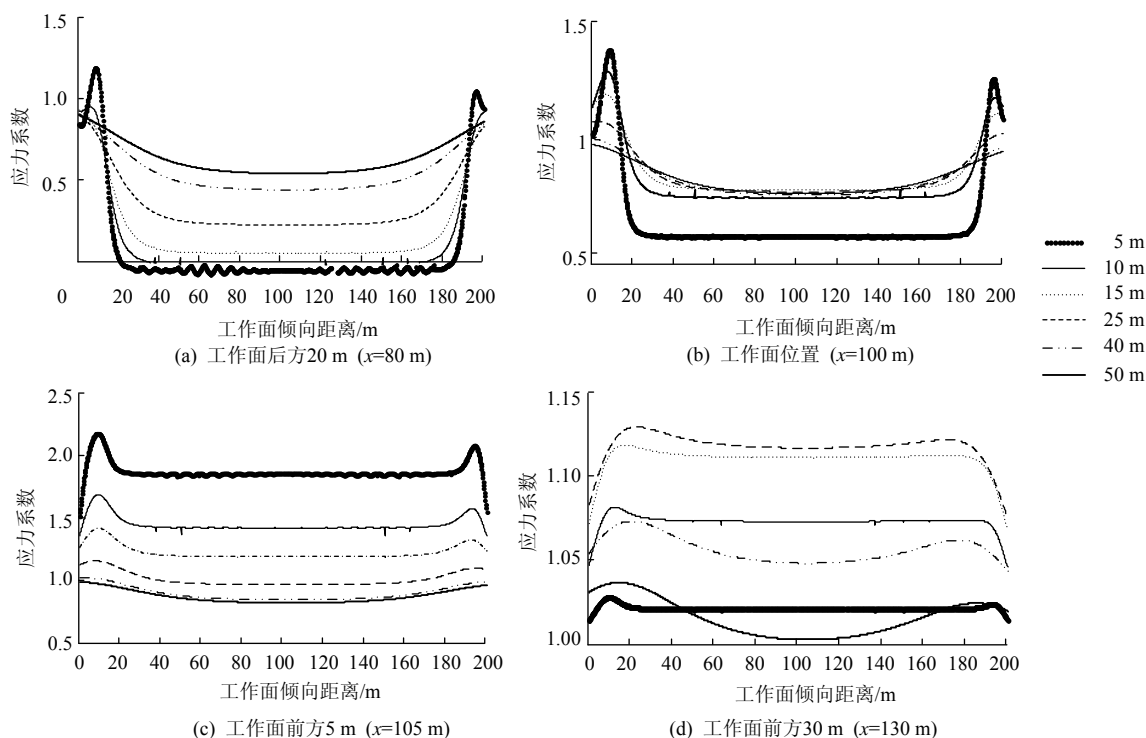


图5 底板垂直应力随深度变化规律

Fig.5 Vertical stress of floor changes with depth

由图5可得:

1) 在应力卸载区、应力临界区和应力集中区, 底板应力均表现出两端高、中间低的变化形态, 工作面两端一定范围内均出现不同程度的应力集中;

2) 随着底板深度增加: 卸载区底板应力逐渐增大; 临界区底板中部应力变化不明显, 工作面两端应力逐渐增大; 集中区底板应力呈现规则增大; 恢复区底板应力变化不大, 变化范围在1.0~1.15之间, 基本稳定在原岩应力。

3 采场底板破坏规律研究

3.1 工程概况

某矿10-108工作面切巷长度为175 m, 正巷长850 m, 副巷长800 m, 煤层平均厚度为2.9 m, 由

浅到底板岩性依次为7.25 m细砂岩、3.3 m 11[#]煤和25.4 m泥岩。

3.2 理论分析

岩体在多向应力作用下的破坏服从Mohr-Coulomb破坏准则, 即:

$$\sigma_1 - K\sigma_3 = R_c \quad (6)$$

式中: σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力, $K = (1 + \sin \varphi_0) / (1 - \sin \varphi_0)$, φ_0 为岩体内摩擦角, R_c 为完整岩体单轴抗压强度。主应力 σ_1, σ_3 为:

$$\sigma_1, \sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (7)$$

将式(1)中的 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 代入上式即可求得关于 $z(x, y)$ 的表达式, 通过 $\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = 0$, 可以

求出岩体最大破坏深度 h_{\max} ，求得该矿 10-108 工作面底板破坏深度最大 14.8 m。

3.3 微震监测

微震监测技术^[14-16]主要应用于监测岩爆和矿震，应力重分配，岩体大冒落，边坡与底板破坏，灾害定位监测、预报和灾害预警，地下灾害安全救助，检测工程施工质量，监测岩体和混凝土结构的损伤和老化过程等方面，具有远距离、动态、三维、实时监测的特点。监测系统结构如图 6~7 所示。

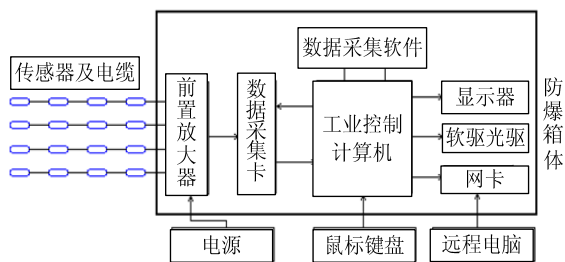


图 6 微震监测系统结构示意图

Fig.6 Microseismic monitoring system schematic



图 7 井下防爆微震监测仪

Fig.7 The underground explosion-proof microseismic monitor

根据微震监测原理与方法，考虑工作面实际地质及巷道布置的情况，在该矿 10-108 工作面布置 5 个钻孔，即 A，B，D，E，J，每个钻孔中放置 2 个检波器，分别命名为 A1，A2，B1，B2，D1，D2，E1，E2，J1，J2(如图 8 中红点所示)，对 108 工作面底板破坏深度和范围进行动态监测。

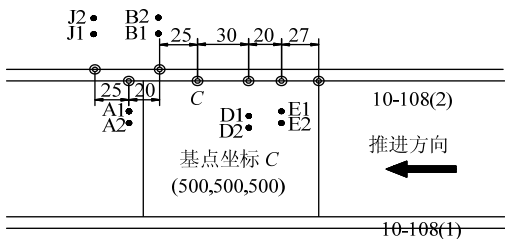


图 8 检波器布置示意图

Fig.8 Floor microseismic monitoring drilling and detector arrangement sketch map

选择 C 点作为事件定位原点，历经近 35 d 的微震监测，最后统计出所有事件的空间坐标，微震事

件沿工作面倾向分布如图 9 所示。

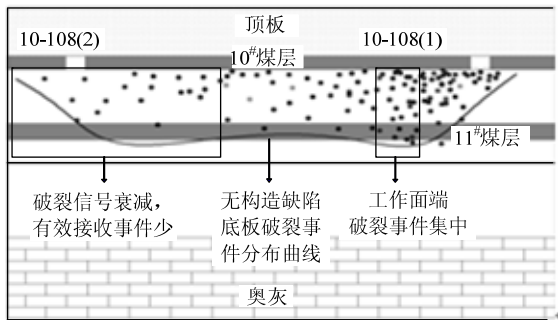


图 9 微震事件倾向分布图

Fig.9 The floor statistics events along tendency

由图 9 可知，沿工作面倾向，底板破裂形状类似于倒置的马鞍形，破裂事件集中的位置是工作面端部距巷道 5~15 m 范围内，底板破坏深度最大 15.2 m，与理论计算结果相吻合。

4 结 论

1) 建立了采场底板受力模型，计算出了底板垂直应力等值线，可知，底板各岩层垂直应力等值线呈椭圆形，浅部岩层等值线梯度较大，深部岩层等值线梯度较小；

2) 随着底板深度增加，高应力区范围逐渐增大，但应力系数逐渐减小，最终趋近于 1；低应力区范围逐渐减少，但应力系数逐渐增加，最终趋近于 1；

3) 利用 Mohr-Coulomb 准则，计算出该矿 10-108 工作面底板破坏深度最大 14.8 m；

4) 通过现场微震监测，对采场底板破坏范围进行了动态监测，指出，该矿 10-108 工作面底板破坏范围呈现倒置马鞍形，破坏深度最大为 15.2 m，与理论计算结果相吻合。

参考文献：

[1] 孟祥瑞，徐铨辉，高召宁，等．采场底板应力分布及破坏机理[J]．煤炭学报，2010，35(11)：1832-1836.
MENG Xiang-rui, XU Cheng-hui, GAO Zhao-ning, et al. Stress distribution and damage mechanism of mining floor[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1832-1836.

[2] 刘德君．采空区的围岩应力分布及其与底板突水的关系[J]．煤矿安全，1988，7：35-39.
LIU De-jun. The stress distribution of the goaf and its relationship of water inrush[J]. Safety in Coal Mines, 1988, 7: 35-39.

[3] 林峰．煤层底板应力分布的相似材料模拟分析[J]．安

- 徽理工大学学报, 1990, 10(3): 19-28.
- LIN Feng. Equivalent-material simulation and analysis of stress distribution over seam floors[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology, 1990, 10(3): 19-28.
- [4] 曹树刚, 徐光明, 陈林顿. 盘区巷道底板应力分布的研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1993, 10(增刊): 177-180.
- CAO Shu-gang, XU Guang-ming, CHEN Lin-dun. Panel roadway floor stress distribution[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1993, 10(Supp): 177-180.
- [5] 卜万奎. 采场底板断层活化及突水力学机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学矿业工程学院, 2009.
- [6] 尹尚先, 王尚旭, 武强. 陷落柱突水模式及理论判据[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 964-968.
- YIN Shang-xian, WANG Shang-xu, WU Qiang. Water inrush patterns and theoretic criteria of karstic collapse column[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 964-968.
- [7] 金怀涛. 采场底板变性特征及底板巷道围岩控制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学能源与安全学院, 2011.
- [8] 朱术云, 姜振泉, 姚普, 等. 采场底板岩层应力的解析法计算及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(2): 191-195.
- ZHU Shu-yun, JIANG Zhen-quan, YAO Pu, et al. Application of analytic method in calculating floor stress of a working face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(2): 191-195.
- [9] 张华磊, 王连国. 采动底板附加应力计算及其应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 288-293.
- ZHANG Hua-lei, WANG Lian-guo. Computation of mining induced floor additional stress and its application [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 288-293.
- [10] 彭维红, 董正筑, 李顺才. 半平面体弹性问题的边界积分公式及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(3): 400-404.
- PENG Wei-hong, DONG Zheng-zhu, LI Shun-cai. Boundary integral formula of semi-plane elasticity problem and its application[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, 34(3): 400-404.
- [11] 李佩涛, 武强. 底板破坏型采煤工作面突水机理及治理技术[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(5): 653-656.
- LI Pei-tao, WU Qiang. Water-inrush mechanism and government technique of working-face evoked by mining floor damage[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2008, 27(5): 653-656.
- [12] 谢广祥, 杨科, 刘全明. 综放面倾向煤柱支承压力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 545-549.
- XIE Guang-xiang, YANG Ke, LIU Quan-ming. Study on distribution laws of stress in inclined coal pillar for fully-mechanized top-coal caving face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 545-549.
- [13] 陈士林, 钱七虎, 王明洋. 深部坑道围岩的变形与承载能力问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2203-2211.
- CHEN Shi-lin, QIAN Qi-hu, WANG Ming-yang. Problems of deformation and bearing capacity of rock-mass around deep buried tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2203-2211.
- [14] CATHY M L, LOUIS M M, JEFFREY G, et al. The effects of sulfate on the physical and chemical properties of actively treated acid mine drainage floc[J]. Mine Water and the Environment, 2002, 21: 114-120.
- [15] WANG J A, PARK H D. Coal mining above a confined aquifer[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(4): 537-551.
- [16] 姜福兴, XUN Luo. 微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 147-149.
- JIANG Fu-xing, XUN Luo. Application of microseismic monitoring technology of strata fracturing in underground coal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 147-149.