

煤矿层状岩体压力拱演化规律的相似模拟^{*}

杜晓丽¹, 马芹永^{1a}, 宋宏伟², 魏京胜²

(1. 安徽理工大学 a.土木建筑学院, b.矿业工程博士后流动站, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:采动作用下的岩体应力转移变化所形成的压力拱特征研究,对于采矿岩层控制和巷道围岩稳定具有重要的科学价值。基于理论分析和相似材料物理模型实验,分析了综放工作面上覆岩层变形破坏形态及其应力转移变化规律,证实了采矿矿压以压力拱的形式转移。研究表明:采煤工作面推进后,伴随着采场岩层应力的不断转移和调整,将在采场岩层中形成一个承担上覆岩层重力的压力拱,其空间形态近似为长轴在开采面推进向短轴与工作面平行向的鸡蛋壳形厚壁结构。工作面初采开始后,随其推进距离的增加,压力拱向周边岩层深部延伸;拱体厚度增大、拱内岩层应力升高。

关键词: 采矿矿压; 压力拱; 演化规律

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2017)02-0381-06

Simulation on Evolution Characteristics of the Pressure Arch
in Bedded Rock at Coal Mining

Du Xiaoli¹, Ma Qinyong^{1a}, Song Hongwei², Wei Jingsheng²

(1a. School of Civil Engineering and Architecture, 1b. Mining Engineering Post-doctoral Mobile Stations, An Hui University of Science & Technology, Huainan Anhui 232001, P.R. China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, P.R. China)

Abstract: Research on evolution characteristics of pressure arch in coal mining has important scientific value in solving the mining strata control and roadway stability. Based on theoretical analysis and equivalent material simulation, fracture modes of overlying strata and law of stress transference in surrounding rock were analyzed, the dynamic mining pressure transferring in the form of pressure arch was conformed. It is showed that pressure arch in the adjoining rock after coal mining is approximately egg-shaped and thick-wall closed structure, with long axis in the trend of working face and short axis parallel to the working face. With the increase of working face's driving distance, the inner boundary of pressure arch extends, arch body becomes thicker and stress in the arch body increases.

Keywords: dynamic mining pressure; pressure arch; evolution law

0 引言

根据工程力学,在地下开挖空间,会带来围岩应力的转移,在一定范围内产生应力集中现

象^[1-2]。近期数值模拟研究还表明^[3-9],在地下空间埋深达到一定数值后,围岩应力转移会形成有规律的压力区域,拱形是这个区域的典型特征,被称为岩石“压力拱”。同时,相似物理模型实验结果

^{*} 收稿日期:2016-02-24(修改稿)
作者简介:杜晓丽(1977-),女,山东临沂人,博士(后),讲师,主要从事岩土工程、地下工程等领域的教学与科研工作。E-mail:dxleve@163.com
基金项目:湖南科技大学煤矿安全开采技术湖南省重点实验室开放基金(201202);中国博士后科学基金(2013M541811);国家自然科学基金(41301074);安徽理工大学博士基金

证实^[10-16],伴随综放工作面推进和上覆岩层的运动,在一定范围内的围岩中会产生动态的应力集中区,但对应力集中区的空间形态及其变化规律研究尚不深入。因此,本文利用相似模型实验和压力拱理论,进一步探讨采煤工作面推进过程中围岩应变分布状况及其上覆覆岩的破坏规律,以期探明煤矿矿压的转移形式和演化规律,为揭示深部煤矿开采存在的软岩变形和冲击地压的形成机理等问题提供理论依据。

1 压力拱的力学特征分析

压力拱^[3]是岩体为抵抗不均匀变形而进行自我调节的一种现象,是围岩内应力发生集中、传递路线发生偏转而形成的一种拱形应力分布区。以圆形硐室为例,根据弹塑性力学理论可知:硐室开挖一方面引起周边径向应力降低,另一方面出现切向应力集中现象,如果围岩应力仍小于岩体强度,围岩将处于弹性状态,此时的压力拱内边界即为硐室轮廓,拱体即为弹性应力升高区;如果围岩局部区域的应力超过了岩体强度,则巷道周边岩石将首先发生破裂,并逐渐向深部扩展,形成破裂区、塑性区,此时压力拱的内边界外移,压力拱拱体即为塑性区和弹性内的围岩应力升高区(如图 1 所示)。处于压力拱拱体内的岩体承担着自身和其上的岩体荷重,是确保其上方岩体不会塌落的一个具有拱的力学特性的结构。而压力拱内部的岩体因径向应力降低而破坏,倘若对此破裂区不进行及时支护,其硐顶岩体将随着时间的增长而逐渐坍塌,但是这种坍塌并不是无限制的,当硐顶岩体坍塌形状为自然拱形时,围岩将重新处于稳定状态。

2 相似模型实验设计

2.1 相似模型的原型地质概况

某煤矿 21101 综放工作面位于 21 采区下山西部,该工作面为 2-1 煤,煤层厚度为 10~15 m、平均埋深为 500 m。煤层地质结构简单,发育 3-6 层夹矸。井田内大中型断层稀少,基本构造形态为简单的单斜构造。地层产状平缓,走向近东西,倾向南,倾角 11°~13°,沿走向略有变化。直接顶为深灰~灰黑色泥岩,老顶为砾岩,部分岩层综合柱状图如图 2 所示。

2.2 相似模型的建立

平面模型实验能够真实、客观地反映采场岩层的破裂、冒落和移动规律,在上覆岩层运动和发展规律研究中具有显著的优点^[17-18]。因此,本文相

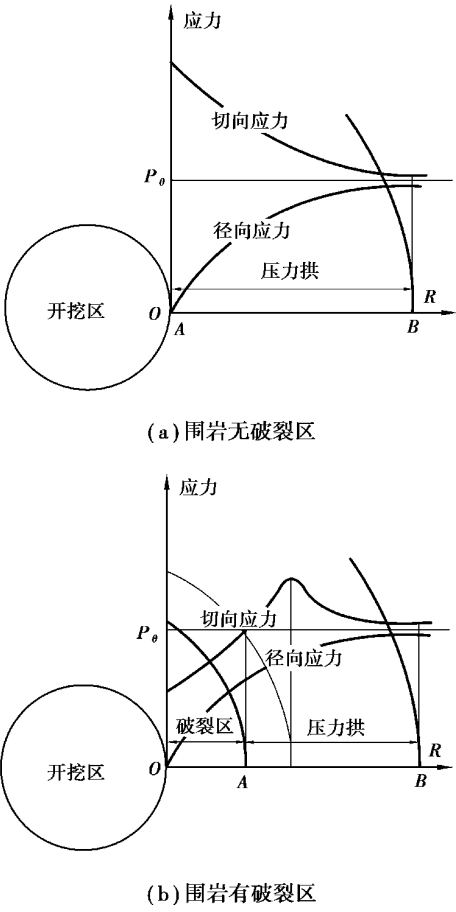


图 1 围岩压力拱

Fig. 1 Pressure arch of surrounding rock

地层单位		柱状图	平均深度	岩性特征
国际	地方性			
系统组段				
侏罗纪	马四组		205	砾石成分为以石英岩、石英砂岩、石灰岩岩屑为主。含少量岩浆岩,本统中下部见有铝土岩砾石,底部砾石以石英砂岩为主。
	泥岩段		26	深灰~灰黑色泥岩,夹菱铁质薄层,致密均一、断口平坦,具隐蔽水平层理。
	下含煤段		12	上部为半亮型,块状~粉粒状,条痕黑褐~褐黑色,下部为半暗型煤,粉粒状为主。底部煤质较差,结构复杂,夹矸常为泥岩、炭质泥岩和粉砂岩。
	底砾岩段		6	浅灰色砾岩,局部为棕色~灰色含砾砂岩,钙质基底式胶结。
三叠系	叠系		>300	

图 2 地层综合柱状图

Fig. 2 Synthetical histogram of stratum

似实验在长×宽×高=1.0 m×0.25 m×1.0 m 平面模型试验台上进行。模型的几何相似比 $C_l=200$,假

定原型采场长度为 200 m,采场推进距离为 140 m;底板厚度为 40 m,下含煤段厚度为 12 m,泥岩段为 26 m,部分马凹组岩层厚度为 122 m。

针对煤系地层岩体强度小、容重低、弱胶结的特性,相似材料选用石英砂为骨料,石膏和石灰为主胶结料,云母为辅助胶结料。取相似材料容重常数 $C_\gamma = 1.5$,通过常规土工三轴实验获得原地层相似材料的最佳配比。

2.3 监测点的布置及数据采集系统

根据煤矿采矿围岩压力拱形成与演化规律的数值模拟成果^[19],监测点主要布置在靠近采空区较近的围岩中(如图 3 所示)。数据采集系统由 BE120-3CA 电阻应变片组成的单元应变片,Dater taker515 主机和扩展槽、及计算机输出设备组成(如图 4 所示),监测数据每 5 min 采集一次。

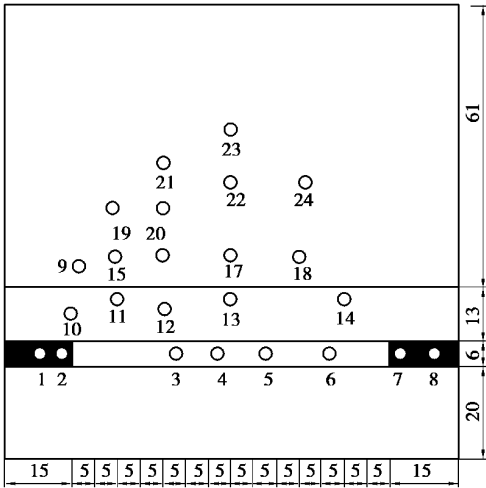


图 3 监测点布置 (单位: cm)

Fig. 3 Layout of measuring points (unit: cm)

2.4 补偿荷载的确定

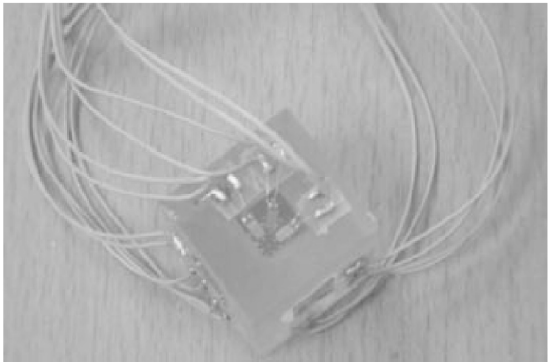
补偿荷载应为尚未模拟部分的岩体重量及有机玻璃板与模型间的摩擦损失,但摩擦损失相对岩体重量较小,此处忽略不计。尚未模拟部分的岩体重量据下列公式求出:

q_p = \gamma_p(H - H_1) \tag{1}

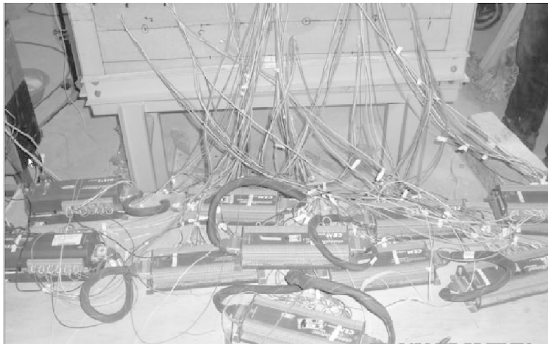
q_m = \frac{q_p}{C_1 C_\gamma} = \frac{\gamma_p(H - H_1)}{C_1 C_\gamma} \tag{2}

式中: q_p 为原型未模拟岩层压力, kN/m^2 ; q_m 为模型未模拟岩层压力, kN/m^2 ; H 为从地表到煤层的上覆岩层厚度, m ; H_1 为模拟顶板岩层的高度; γ_p 为上覆岩层的重力密度,取其平均值为 25 kN/m^3 。

将 $C_1 = 200$ 、 $C_\gamma = 1.5$, $H = 500 \text{ m}$ 代入式(2),可求得 $q_m = 29.3 \text{ kN/m}^2$ 。又因平面物理模型试验架



(a) 单元应变片



(b) Dater taker515 主机和扩展槽



(c) 计算机输出设备

图 4 Taker 515 数据采集系统

Fig. 4 Data measure system of Taker 515

长为 1.0 m、宽为 0.2 m,则模型上部需要施加的总荷载值为 5.86 kN。

3 实验过程

在模型顶部施加重物荷载,待监测点应变稳定后再进行工作面开采。由于相似材料强度较低,工作面推进采用人工钻凿的方式进行,推进时间由牛顿定律和岩层移动相似比例确定,即时间比例与模型比例尺的关系如下:

C_t = T_m/T_p = \sqrt{C_1} = 14.14 \tag{3}

假定原型工作面开采速度为 10 m/d,则模型中每 1.7 h 推进 0.05 m。在煤层推进过程中,利用数字照相系统记录上覆岩层离层和破坏状况。

4 相似模型实验结果分析

4.1 围岩宏观成拱效应分析

图5为上覆岩层活动变形破坏的过程,由图5(a)可知,当工作面推进78 m时,泥岩层形成宽度、长度约为0.5 m、50 m的离层。图5(b)为工作面推进80 m时,在泥岩层岩梁弯曲沉降发展到一定程度后,岩梁端部率先开裂、中部随后拉断,以“假塑性岩梁”的形式垮落,并形近似对称状、高约3 m的冒落拱。图5(c)为工作面向前推进85 m时,上覆岩层离层显著增加,并瞬间垮落,此时冒落拱主要向上部岩层扩大。当工作面继续向前推进

时,因碎落岩体基本充满采空区,相对有效地阻止了上覆岩层的变形、破坏和移动。此时上覆岩层中离层主要沿工作面推进向扩展,如图5(d)所示为工作面推进100 m时。图5(e)为工作面推进120 m时,伴随上覆岩层离层、断裂、垮落,冒落拱沿工作面推进向出现周期破坏。

相似模拟实验的结果表明,在采场上覆岩层中形成一个动态变化的冒落拱,其拱迹线由岩梁折断线和离层边界线构成。随着工作面的推进,拱内被裸露的岩层主要向上位岩层中发展、传递;当碎落岩体基本充满采空区后,离层主要沿工作面推进向延伸,并形成周期冒落的宏观拱。

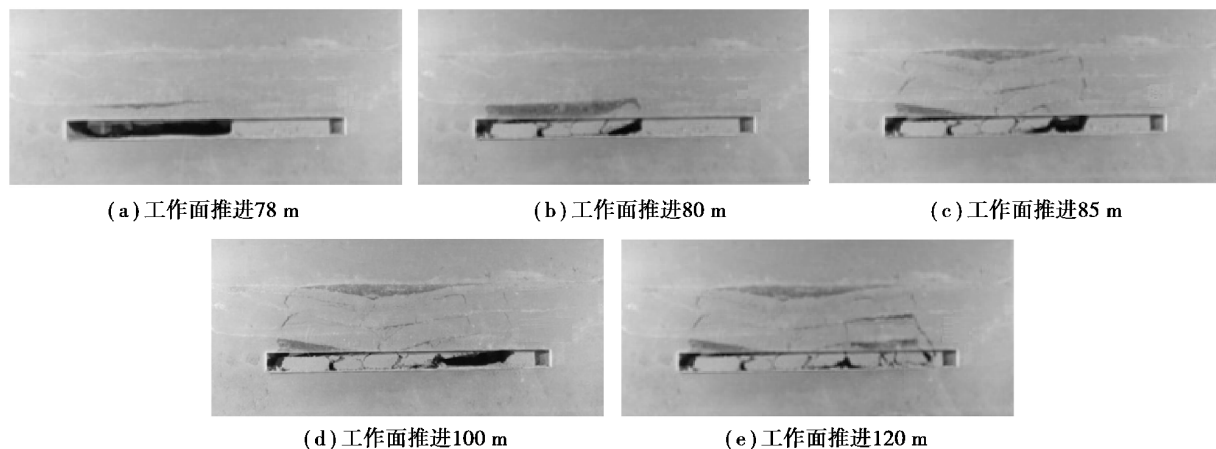


图5 上覆岩层活动变形

Fig. 5 Deformation of overlying strata

4.2 围岩应变分析

选择煤层水平向应变和上覆岩层垂直向应变为分析对象,得到如图6所示围岩应变与工作面推进距离的关系。随工作面推进,岩层中监测点的应力是不断变化的,并呈现下列特征:

(1)在工作面煤壁前方,随着工作面与测点距离的不断减小,监测点的应变逐渐增大;当距离测点30~35 m时,应变达最大值;当工作面逐渐靠近监测点时,监测点的应变则开始减小,并在距离监测点约5 m处,围岩应变小于初始监测值。

(2)在开煤壁后方,随监测点与开切眼距离的减小,监测点应变增加;当工作面推进40 m时,近开切眼处的围岩应变达到最大值;工作面推进40 m后,近开切眼处的围岩应变开始减小,远离开切眼处的监测点应变缓慢增加并趋向稳定。

(3)在上覆岩层中,临近工作面及采空区上覆岩层一定层位的岩体存在高应变区域,并随着推进距离的增大,高应变区域向上部围岩和工作面推进方向转移,其峰值应变亦有增加的趋势;采空区上方出现了低应变区域,随工作面推进距离的增大,

低应变范围增大。因上覆岩层内其他监测点的应变亦存在以上变化规律,此处不再赘述。

综上所述,随工作面推进距离的增大,在煤层及上覆岩层中存在高应变区域,随工作面的推进距离的增大,高应变区域呈现向煤壁外部围岩延伸及上部覆岩扩展的趋势。

4.3 压力拱演化特征分析

根据平面模型应力与应变的关系,得到围岩切向应力,即:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_0 + \mu \varepsilon_{90}) \quad (4)$$

式中: E 为弹性模量; μ 为泊松比; ε 为应变;脚标0和90为极坐标系下应变片与水平方向夹角。

利用工作面推进40 m、110 m、140 m时的监测数据,通过式(4)可得到各个监测点的切向应力,将围岩中的应力集中区用光滑的曲线连接起来,就得到煤层及上覆岩层中的压力拱(虚线部分据煤层底板应力分布的相似材料模拟研究结果^[11]而推知)如图7所示。

由该图可知采煤工作面压力拱演化具有下列

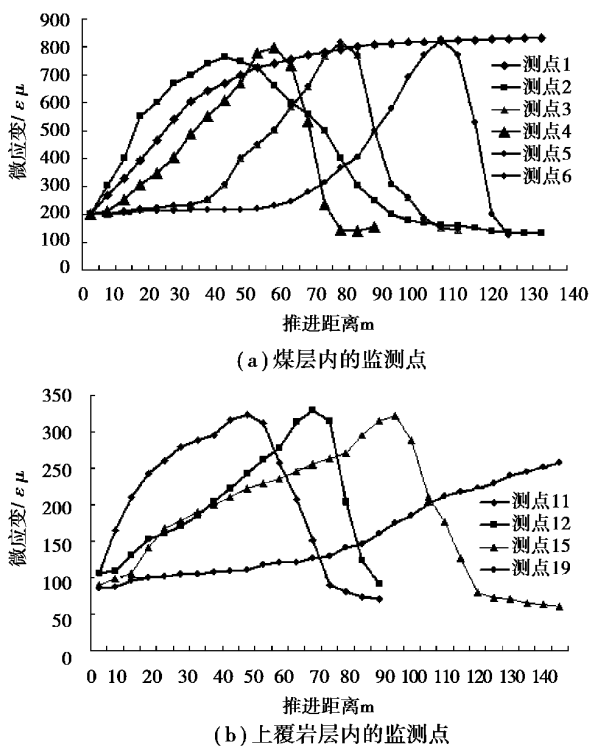


图6 监测点应变与工作面推进距离的关系
Fig. 6 Relationships between strain of measuring points and work face forward

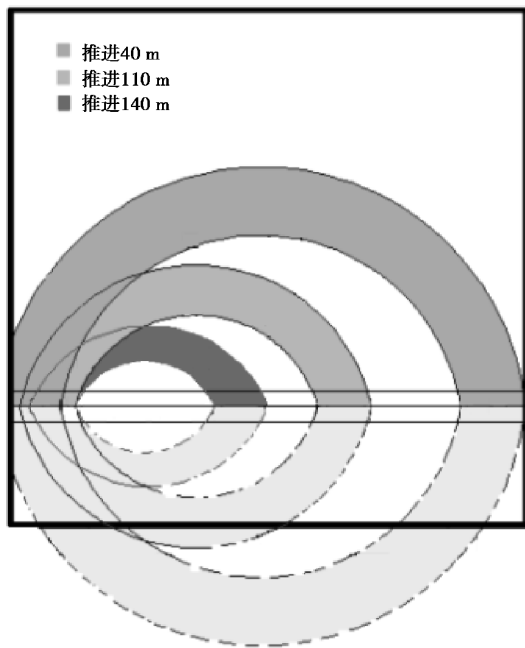


图7 压力拱演化模式
Fig. 7 Evolution pattern of pressure arch

特征:

- (1)压力拱为长轴在工作面推进向、短轴在工作面倾向的鸡蛋形厚壁结构。
- (2)随工作面推进距离的增加,压力拱不断向周边围岩扩展,拱体厚度增加。

(3)压力拱拱体内岩体处于应力升高区,拱体内岩体抗剪强度增加,围岩承载能力增大。鸡蛋形的压力拱空间形态说明采煤工作面采空区附近的回风和运输轨道顺槽在采煤工作面推进过程中处于应力增高的动压作用区,这一结论与数值模拟成果一致,也得到了采矿动压的研究结果的证实^[20-21]。

5 结论

- (1)相似模拟实验再现了21101综放工作面覆岩运动和破坏的情景,覆岩冒落与工程实际相符,冒落的宏观成拱效应明显,表明实验结果真实可信。
- (2)相似物理模型试验表明,采煤工作面推进过程中,监测点的围岩应变不断变化,在一定范围内形成动态演化的应变受压区和应力集中区。
- (3)综放工作面围岩内存在环绕采空区的动态压力拱,其空间形态近似为长轴在开采面推进向,短轴在工作面倾向的鸡蛋形厚壁结构。
- (4)随工作面推进距离的增加,压力拱内边界向周边围岩延伸,拱体厚度增大,拱内岩体应力升高,围岩承载能力增大。

参考文献(References)

[1] Kastner H. Statik des Tunnel und Stollenbaus, auf der Grundlage geomechanischer[M]. Erkenntnisse, Zweite neubearbeitete Auflage, Springer Verlag, 1971.

[2] 高磊. 矿山岩体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. (Gao Lei. Mine rock mechanics[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1988. (in Chinese))

[3] Song H W, Zhao J, Wang C. Study on concept and characteristics of stress rock arch around a cavern underground [A]//Proceedings of Underground Singapore 2003 and Workshop Updating the Engineering Geology of Singapore[C]. Singapore, 2003:44-51.

[4] 王闯. 大跨度地下岩石工程压力拱的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003. (Wang Chuang. Research on pressure arch of large span underground rock engineering[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2003. (in Chinese))

[5] Khairil Anwar. A study on stress rock arch development around dual caverns [D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2003.

[6] 陶婷婷. 双隧道围岩的压力拱与合理的隧道位置的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008. (Tao Tingting. The study on pressure arch of surrounding rock of the double tunnel and the location of a reasonable tunnel [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,

2008. (in Chinese))
- [7] 王云飞,李长洪,郑晓娟,等.不同开挖方式地下硐室压力拱的演变机理研究[J].矿业研究与开发,2009,29(6):12-14,20. (Wang Yunfei, Li Changhong, Zheng Xiaojuan. Research on the evolution mechanism of pressure arch of underground cavern excavated in different ways[J]. Mining Research and Development, 2009,29(6):12-14, 20. (in Chinese))
- [8] 唐德康.高应力软岩巷道喷锚支护技术的研究[D].徐州:中国矿业大学,2010. (Tang Dekang. Research on anchor jet technology in the roadway high-stress soft rock [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2010. (in Chinese))
- [9] 梁晓丹.节理围岩应力自调节成拱特性与稳定性的研究[D].徐州:中国矿业大学,2005. (Liang Xiaodan. Study on arching action by stress adjusting and stability of jointed surrounding rock [D]. Xuzhou: China University of Mining, 2005. (in Chinese))
- [10] 李海梅,关英斌,杨大兵.邯邢地区煤层底板应力分布的相似材料模拟分析[J].矿业安全与环保,2007,34(6):24-25,28. (Li Haimei, Guan Yingbin, Yang Dabing. Analysis on similarity simulation of coal seam floor's stress distribution on Haixing region[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, 34(6):24-25,28. (in Chinese))
- [11] 杨科,谢广祥.综放开采煤层应力分布规律的相似模拟研究[J].矿山压力与顶板管理,2004(2):26-27,30. (Yang Ke, Xie Guangxiang. Research on similarity simulation of stress distribution law about fully mechanized top coal Caving[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004(2):26-27,30. (in Chinese))
- [12] 张健全,戴华阳.采动覆岩应力发展规律的相似模拟实验研究[J].矿山测量,2003(4):49-51. (Zhang Jianquan, Dai Huayang. Research on similarity simulation experiment of development law of mining induced overburden stress [J]. Mine Surveying, 2003(4):49-51. (in Chinese))
- [13] 李纯,马俊枫,刘全明.综放采场围岩压力分布规律相似材料模拟实验研究[J].煤矿开采,2007,12(6):64-67. (Li Chun, Ma Junfeng, Liu Quanming. Similar simulation research on pressure distribution of surrounding rock in full-mechanized caving mining field [J]. Coal Mining Technology, 2007, 12(6): 64-67. (in Chinese))
- [14] 谢广祥.综放工作面及其围岩宏观应力壳力学特征[J].煤炭学报,2005,30(3):309-313. (Xie Guangxiang. Mechanical characteristics of fully mechanized top-coal caving face and surrounding rock stress shell [J]. Journal of China Coal Societ, 2005, 30(3): 309-313. (in Chinese))
- [15] 杨永康,李建胜,康天合,等.浅埋厚基岩松软顶板综放采场矿压特征工作面长度效应[J].岩土工程学报,2012,34(4):709-716. (Yang Yongkang, Li Jiansheng, Kang Tianhe, et al. Effect of working face length on underground pressure characteristics by fully-mechanized top-coal caving mining under shallow-buried thick bedrock loose roof [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2):268-273. (in Chinese))
- [16] 侯圣权,靖洪文,杨大林.动压沿空双巷围岩破坏演化规律的试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(2):265-268. (Hou Shengquan, Jing Hongwen, Yang Dalin. Physical model for deformation-failure evolution of double gob-side entry [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2):265-268. (in Chinese))
- [17] 苏承东,勾攀峰,邓广涛.采矿平面应力相似模拟试验装置的研制[J].河南理工大学学报(自然科学版),2007,26(2):141-144. (Su Chengdong, Gou Panfeng, Deng Guangtao. Testing equipment development of mining similar model on biaxial stress [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2007,26(2):141-144. (in Chinese))
- [18] 张羽强,黄庆享,严茂荣.采矿工程相似材料模拟技术的发展及问题[J].煤炭技术,2008,27(1):1-2. (Zhang Yuqiang, Huang Qingxiang, Yan Maorong. Development and problems of mining similar simulation experiment technique [J]. Coal Technology, 2008, 27(1):1-2. (in Chinese))
- [19] 杜晓丽,宋宏伟,陈杰,煤矿采矿围岩压力拱的演化特征数值模拟研究[J].中国矿业大学学报(自然科学版),2011,40(6):863-867. (Du Xiaoli, Song Hongwei, Chen Jie. Numerical simulation research on evolution characteristics of pressure arch in coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology (Natural Science), 2011,40(6):863-867. (in Chinese))
- [20] 窦林名,何学秋.冲击矿压防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001. (Dou Linming, He Xueqiu. Theory and technology of burst control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [21] 谢广祥,杨科,常聚才.综放回采巷道围岩力学特征实测研究[J].中国矿业大学学报,2006,35(1):94-98. (Xie Guangxiang, Yang Ke, Chang Jucai. Spottesting mechanical characteristics of surrounding rock in gates of fully mechanized top-coal caving face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(1):94-98. (in Chinese))