

# 深井煤层底板卸荷扰动应力场展布形态研究<sup>\*</sup>

李家卓<sup>1,2</sup>, 李传磊<sup>3</sup>, 李杨<sup>4</sup>, 袁安营<sup>1</sup>, 刘万荣<sup>5</sup>

(1. 安徽理工大学 省部共建深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 3. 山东省煤炭技术服务有限公司, 济南 250032; 4. 神华科学技术研究院有限责任公司, 北京 102211; 5. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)

**摘要:** 采用综合研究方法分析了煤层回采后底板岩层应力场变化特征和空间分布规律, 结果表明: 工作面回采初期, 煤壁前方及开切眼附近最大主应力近似等于垂直应力, 似“球根”状向底板岩层传播, 高剪应力斜向采空区两侧未采煤层底板传播, 并迅速衰减, 水平应力集中程度微弱; 工作面继续回采, 围岩最大主应力场急剧偏转, 底板岩层存在高应力束组成的主应力拱, 垂直应力峰值线是深入煤体斜向工作面底板岩层按负指数规律衰减的曲线, 采场附近垂直应力等值线升高区呈“耳”型分布, 工作面后方采空区底板岩层出现滞后卸压现象, 垂直应力等值线最终趋于“平底型”分布, 卸压范围呈现倒“八”字型; 煤层底板应力场具有继承相关性, 且煤层底板方向应力场衰减速率远大于煤层顶板岩层。附加水平应力和剪应力沿采空区边缘在浅部岩层出现高度集中现象, 之后急剧耗散。力学场偏转伴生出的拉应力、膨胀应力、挤压应力联合作用是底板岩层运动(底臌)的本质力源, 煤壁前方底板岩层存在微弱的扰动变形, 底板岩层裂纹势必超前起裂。

**关键词:** 煤层底板; 开采扰动; 力学场; 时空演化

中图分类号: TD353

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)06-1658-09

## The Distribution Form of Disturbed Stress Field in Coal Floor under Deep Mining Exploitation

Li Jiazhao<sup>1,2</sup>, Li Chuanlei<sup>3</sup>, Li Yang<sup>4</sup>, Yuan Anying<sup>1</sup>, Liu Wanrong<sup>5</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining-induced Response And Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mine, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China; 2. School of Energy Resources and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, P.R. China; 3. Shandong Coal Technology Services Co. Ltd., Jinan 250032, P.R. China; 4. Shenhua Science and Technology Research Institute, Beijing 102211, P.R. China; 5. School of Physical Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, P.R. China)

**Abstract:** Variation characteristics and spatial distribution of mechanical field after coal mined were studied by comprehensive research methods. The results show that: in mining initial stage, the maximum principal stress approximately equals to the vertical stress ahead of coal wall and near the open-off cut, and it spreads to coal floor likely bulb. High shear stress spreads to coal floor of two sides of stope, and decays rapidly. Horizontal stress is not high concentration. With mining continuing, the maximum principal stress begins to deflect, then maximum principal stress arch appears in coal floor stratum. The peak value of vertical stress along the depth declines follows proximately

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-04-28(修改稿)

作者简介: 李家卓(1986-), 男, 山东临沂人, 博士, 副教授, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的教学研究工作。

E-mail: jiazhao312@126.com

基金项目: 安徽省自然科学基金(1808085QE177); 国家重点研发计划(2017YFC0804202); 国家自然科学基金(51774009, 51574008); 安徽省高等学校自然科学研究重点项目(KJ2018A0077)。

negative exponential law. The shape of high vertical stress area resembles ear-shape. The rock stress decreases in the goaf with delays. Vertical stress finally tends to be flat base, and pressure releasing range present 'eight' form. Coal floor stress has the characteristics of successive. Decay rate of vertical stress in coal floor stratum is faster than the roof rock breaks. Additional horizontal stress and shear stress severely concentrates and subsequently decline dramatically. The stress of floor heave comes from tensile stress, swelling stress and bearing stress. Coal floor in the front of coal wall has perturbation, and crack will initiate in advance.

**Keywords:** coal floor; mining disturbance; mechanical field; spatio-temporal variability

## 0 引言

煤层回采打破了初始地应力平衡状态,岩体利用其自组织能力,通过岩层的变形、移动直至宏观断裂,使采场围岩达到与新环境相适应的新稳态平衡状态。岩体的自组织过程即岩体结构的形成、转变和应力场的调整、转移。对煤层底板而言,认识和掌握采动煤层底板力学特征和动态演化,是煤层群安全高效开采、预测底板突水位置和时间、选取底板巷合理位置等工程面临的首要关键问题。<sup>[1-2]</sup>

目前,对采场底板围岩的研究成果主要集中在底板最大破坏深度问题。王作宇等<sup>[3]</sup>在现场观测的基础上,提出了“零位破坏”“原位张裂”理论。李白英<sup>[4]</sup>首次提出了“下三带”的概念。张金才等<sup>[5]</sup>以采场底板岩体发生塑性变形、破坏的假设为前提,计算了采场底板最大破坏深度。施龙青等<sup>[6]</sup>综合考虑断裂力学、岩石力学和实用矿山压力理论,得出了采场底板矿压破坏带计算公式。肖洪天等<sup>[7]</sup>对工作面周期来压时不同工作面长度对采场底板的影响进行了三维电算数值模拟。雷文杰等<sup>[8]</sup>采用有限元强度折减法,求得了煤层开采后底板岩体破坏滑移面。姜耀东等<sup>[9]</sup>采用自行设计的工作面底板水压模拟装置,进行承压水上工作面回采过程中顶、底板破断失稳特征的相似模拟试验,得到底板工作面回采过程中顶、底板应力变化规律。关英斌等<sup>[10]</sup>对某矿9煤工作面回采过程应力场进行了观测,给出了采场底板岩层的最大破坏深度。朱术云等<sup>[11]</sup>、高召宁等<sup>[12]</sup>、鲁海峰等<sup>[13]</sup>及笔者都给出了不同形式的采动底板岩层中的附加应力解析解。然而,采掘对煤层底板岩层的扰动具有特定的空间分

布规律和时间变化特征,对这方面的研究成果较少,而研究和预测这一分布和变化规律具有重要的理论和现实意义。

## 1 采动底板力学特征理论解析

### 1.1 底板岩体附加应力场解析

煤层支承压力是引起底板岩体附加应力场的力源(图1),煤层底板岩层可看作半无限空间弹性半平面<sup>[15]</sup>(图2)。沿 $y$ 方向施加法向连续分布载荷,其强度为 $q_1(x)$ ,在 $x$ 方向距离原点 $\xi$ 处取微分线段 $d\xi$ ,其上的力 $dF=q_1d\xi$ ,于是任意点 $M(x,y)$ 处的应力可表示为

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_x &= \frac{2q_1d\xi}{\pi} \frac{(x-\xi)^2y}{[(x-\xi)^2+y^2]^2} \\ d\sigma_y &= \frac{2q_1d\xi}{\pi} \frac{y^3}{[(x-\xi)^2+y^2]^2} \\ d\tau_{xy} &= \frac{2q_1d\xi}{\pi} \frac{(x-\xi)y^2}{[(x-\xi)^2+y^2]^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

采用附加应力计算方法,可构建完整支承压力分布力学模型(图3)。假设煤层埋深为 $H$ ,煤壁前方移动支承压力系数为 $K_1$ ,后支承压力系数为 $K_2$ , $a \sim f$ 影响段线性载荷依次为 $q_z(1) \sim q_z(5)$ ,则

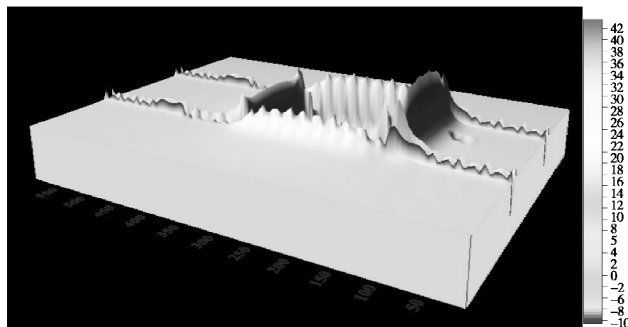


图1 支承压力分布 3D 平面图

Fig.1 3D planar graph of abutment pressure distribution

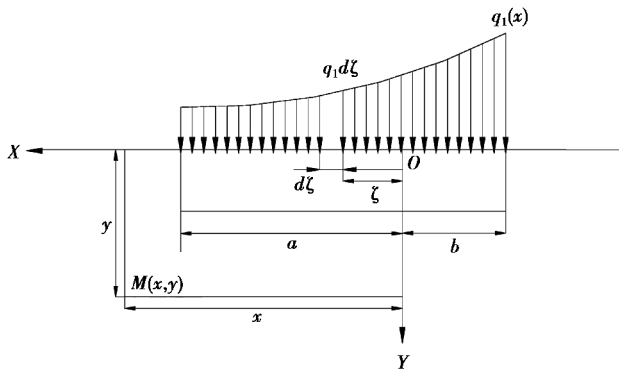


图 2 底板受分布载荷作用计算模型

Fig.2 Schematic diagram of coal seam floor with uniform load

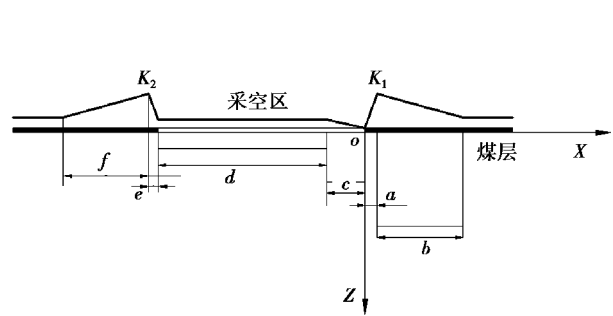


图 3 完整支承压力分布力学模型

Fig.3 Mechanical model of abutment pressure distribution

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \int_0^a \frac{K_1 \gamma H \xi}{a} \cdot \frac{z^3}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_a+b \left[ \frac{(1-K_1)\gamma H}{b} \xi + \frac{(K_1 b - a)\gamma H}{b} \right] \cdot \frac{z^3}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_{-c}^0 \frac{\gamma H \xi}{c} \cdot \frac{z^3}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_{-(c+d)-(c+d+e)} \left\{ \left[ \frac{(1-K_2)\gamma H \xi}{e} + \frac{[(c+d+e)K_2 - (c+d)]\gamma H}{e} \right] \right\} \cdot \frac{z^3}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_{-(c+d+e)-(c+d+e+f)} \left\{ \frac{(K_2-1)\gamma H \xi}{f} + \frac{[(c+d+e+f)K_2 + (c+d+e)]\gamma H}{f} \right\} \cdot \frac{z^3}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi \quad (2)$$

$$\sigma_x = \frac{2}{\pi} \int_0^a \frac{K_1 \gamma H \xi}{a} \cdot \frac{(x-\xi)^2 z}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_a+b \left[ \frac{(1-K_1)\gamma H}{b} \xi + \frac{(K_1 b - a)\gamma H}{b} \right] \cdot \frac{(x-\xi)^2 z}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_{-c}^0 \frac{\gamma H \xi}{c} \cdot \frac{(x-\xi)^2 z}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_{-(c+d)-(c+d+e)} \left\{ \left[ \frac{(1-K_2)\gamma H \xi}{e} + \frac{[(c+d+e)K_2 - (c+d)]\gamma H}{e} \right] \right\} \cdot \frac{(x-\xi)^2 z}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_{-(c+d+e)-(c+d+e+f)} \left\{ \frac{(K_2-1)\gamma H \xi}{f} + \frac{[(c+d+e+f)K_2 + (c+d+e)]\gamma H}{f} \right\} \cdot \frac{(x-\xi)^2 z}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi \quad (3)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{2}{\pi} \int_0^a \frac{K_1 \gamma H \xi}{a} \cdot \frac{(x-\xi) z^2}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_a+b \left[ \frac{(1-K_1)\gamma H}{b} \xi + \frac{(K_1 b - a)\gamma H}{b} \right] \cdot \frac{(x-\xi) z^2}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_{-c}^0 \frac{\gamma H \xi}{c} \cdot \frac{(x-\xi) z^2}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_{-(c+d)-(c+d+e)} \left\{ \left[ \frac{(1-K_2)\gamma H \xi}{e} + \frac{[(c+d+e)K_2 - (c+d)]\gamma H}{e} \right] \right\} \cdot \frac{(x-\xi) z^2}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi + \frac{2}{\pi} \int_{-(c+d+e)-(c+d+e+f)} \left\{ \frac{(K_2-1)\gamma H \xi}{f} + \frac{[(c+d+e+f)K_2 + (c+d+e)]\gamma H}{f} \right\} \cdot \frac{(x-\xi) z^2}{[(x-\xi)^2 + z^2]^2} d\xi \quad (4)$$

## 1.2 计算实例分析

根据淮南矿业集团谢桥矿 1232(1) 综采工作面开采技术条件和现场观测结果有: 工作面埋深 620 m, 工作面倾斜长约 154 m, 煤层容重 1.40 t/m<sup>3</sup>, 煤层倾角平均 13°, 平均煤厚 2.49 m; 老顶为细砂岩, 平均厚度 6.24 m; 直接顶为泥岩、砂质

泥岩, 平均厚度 3.32 m; 直接底为泥岩, 厚度 2.35 m; 老底为粉细砂岩, 厚度 1.76 m; 支承压力系数  $k_1 = 2.1$ 、 $k_2 = 1.9$ 、 $a = 10$ 、 $b = 80$  m、 $c = 160$  m、 $d = 60$  m、 $e = 10$ 、 $f = 70$  m。将以上主要参数带入式(2)至式(4), 可得 1232(1) 综采工作面推进过程中的

附加垂直应力 $\sigma_z$ ,水平应力 $\sigma_x$ 和剪应力 $\tau_{xz}$ 等值线变化曲线。

图4为底板附加垂直应力等值线图,可以看出:工作面回采后,煤壁前方底板压应力传播规律呈现“球根”状,工作面两侧煤体下方底板岩层内形成应力集中区,采空区底板岩层形成卸压区,两者以底板原岩应力等值线为界,且原岩应力等值线

是深入煤体斜向工作面底板岩层内的曲线。底板中,垂直压力大小受控于支承压力大小,但非正比关系。附加垂直应力随着埋深增加而减小,其峰值按负指数规律衰减,距离煤层底板26 m范围内应力集中程度最高,超过26 m急剧扩散,底板一定区域内的岩层在高集中应力下极有可能产生原位张裂隙。

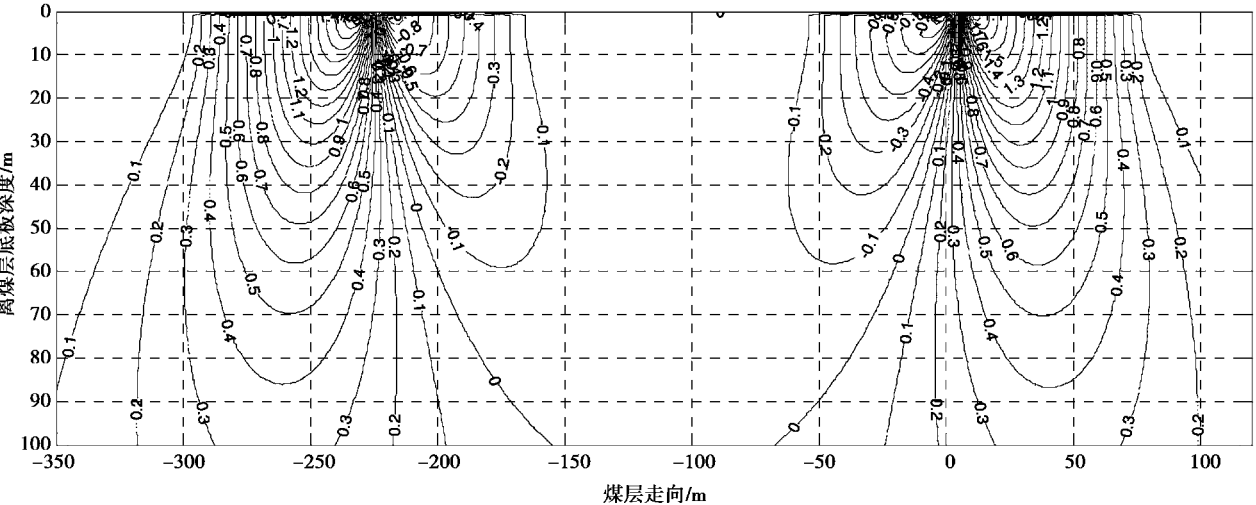


图4 底板附加垂直应力等值线图

Fig.4 Contour map of additive vertical stress

图5为底板附加水平应力等值线图,可以发现:受采动影响,煤层与底板交界处附加水平应力和附加垂直应力基本吻合,也出现了应力升高和集中现象,但二者随深度衰减速率明显不同,煤体下

方底板浅部附加水平应力高度集中,超过12 m深度后急剧衰减,说明高支承压力作用下的附加水平应力在底板中的影响程度远低于垂直应力影响程度。

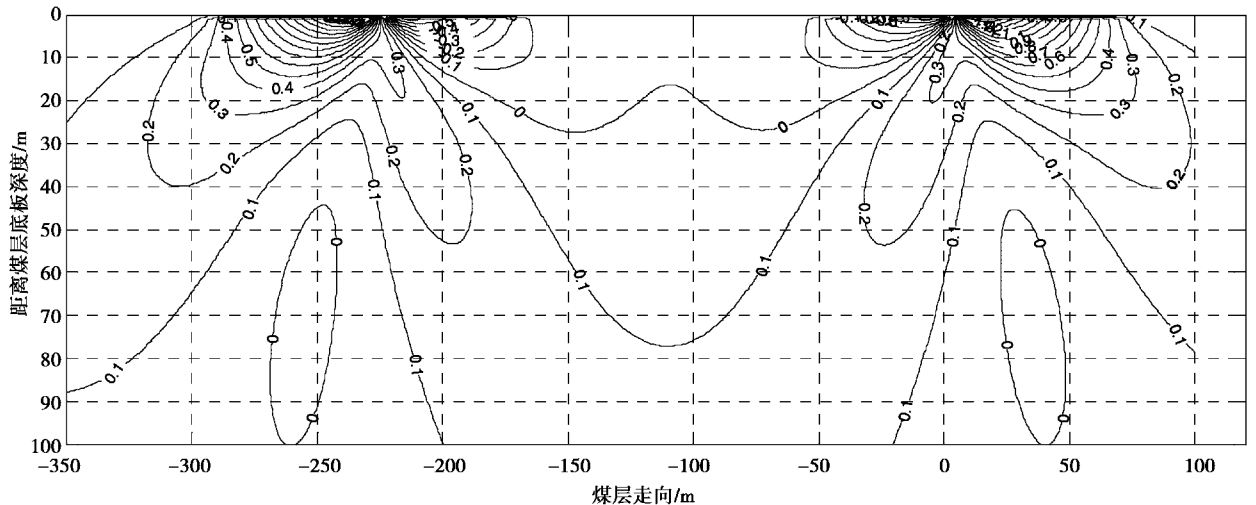


图5 底板附加水平应力等值线图

Fig.5 Contour map of additive horizontal stress

图6为底板附加剪应力等值线图,计算结果表明,原岩应力状态下剪应力为0,煤层开采后底板上边界几乎不存在附加剪应力,距离煤层下边界

2 m剪应力达到最大值,随后剪应力高峰值从支承压力中点处沿与煤层走向呈37°和42°方向向煤层底板以远传播,大致对称分布,其峰值随着埋深以

自然对数  $e$  的负指数规律衰减,最终无限接近原岩应力,采空区中几乎无剪应力存在。在采动影响下,在煤壁附近底板中,剪应力有一个增高区,因煤

层底板为层状岩层,尤其在泥岩和砂质泥岩地质条件下层面内聚力和摩擦角较小,极易产生剪切滑移。

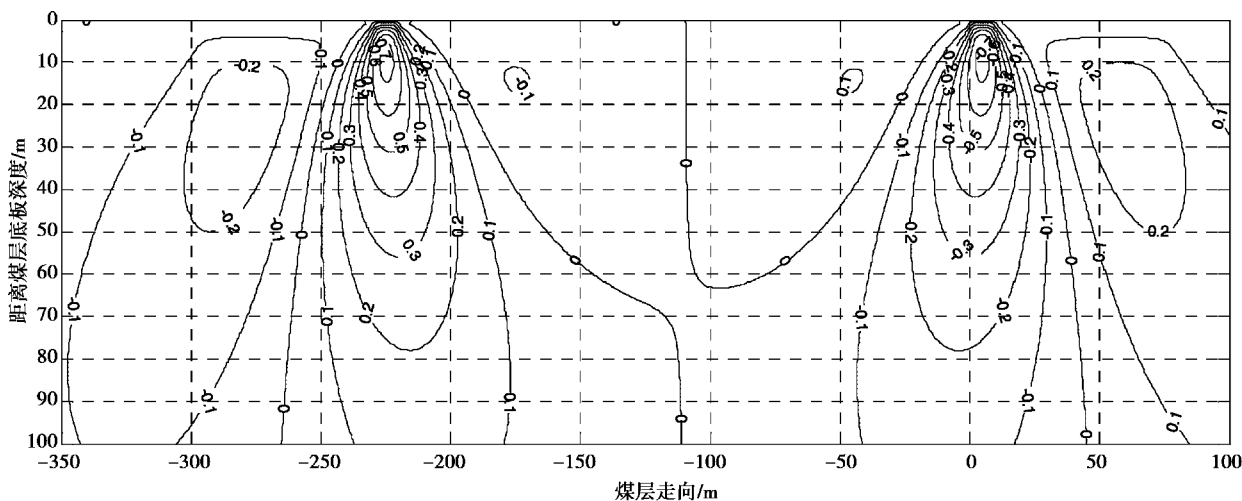


图6 底板附加剪应力等值线图

Fig.6 Contour map of additive shear stress

## 2 底板岩层力学特征相似材料模拟

本模拟研究以淮南矿业集团谢桥矿 1232(1)综采工作面为模拟对象,选用煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学)平面应力相似模型试验台,试验模型尺寸为:长×高×宽=420 cm×170 cm×25 cm。模型中未能模拟的上覆岩层采用人工加压的方法代替。几何相似常数取  $C_l = 1/100$ ,容重相似常数为  $C_\gamma = 1/1.67$ ,应力相似常数  $C_\sigma = 1/167$ ,时间相似常数  $C_t = \sqrt{C_l} = \sqrt{1/100} = 1/10$ ,压力传感器布置在 11 煤层底板岩层中。

### 2.1 底板应力测量结果及分析

随着工作面的推进,底板岩层应力超前呈现整体增大趋势,编号 234 测点位于厚度 4.57 m 细砂岩,该岩层距离煤层底板 7.47 m,处于开切眼正下方。工作面推进 10 m 时应力增量 13.52 MPa,工作面推进 200 m 时为 21.74 MPa(后支承压力)。工作面前方高支承压力的斜向底板采空区方向传播,当工作面推进到 40 m 时编号 240 测点(煤壁前方 60 m 处直接底)应力增量为 20.44 MPa,推进 80 m 时应力增量为 25.35 MPa。工作面推进 100 m 后,各测点应力增量逐渐平缓,推进 190 m 时应力增量最大值为 29.06 MPa,推进 200 m 时应力增量最大值为 30.16 MPa。同时,工作面后方采空区底板岩层出现滞后卸压显现,卸压范围呈现倒“八”字形(如图 7)。

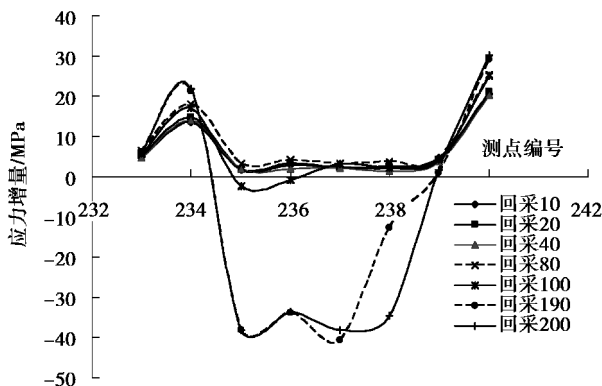


图7 底板岩层应力随工作面推进变化曲线

Fig.7 Stress-forward distance curves of floor strata

随着工作面推进,底板岩层各测点处应力变化具有明显规律性。从煤层底部埋设的 110 个应力传感器中挑选出距离开切眼 40 m、80 m 和 120 m 位置不同埋深 3 个有代表性的测线进行分析。图 8 为测线 1 中不同埋深处 10 个测点随着工作面推进应力变化值,测点 235 距离距离开切眼水平距离为 40 m。随着工作面推进,应力呈现增加趋势,回采至 35 m 处,应力达增加 3.41 MPa,继续回采应力滞后急剧卸压,应力相对增量最大值 -37.07 MPa。考虑工作面埋深,应力绝对增量为 -20.82 MPa,该测点所在岩层在此拉应力作用下将会出现弯曲变形破坏。测点 227 在工作面推进至 65 m 时,压应力增大达到最大值 19.94 MPa。工作面继续推进,应力经历缓慢变化后急剧降低,当工作面推进

120 m时,应力相对增量为 $-22.46$  MPa,绝对应力增量为 $-6.21$  MPa,该岩层将出现卸压后的拉应力,岩层整体向上移动。测点 221、测点 203、测点 149、测点 102 应力变化规律与测点 235 和测点 227 规律相同。同时发现,煤层开采后底板卸压角大致为 $76^\circ$ 。

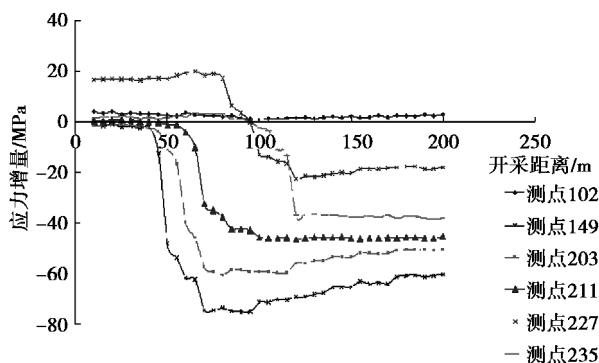


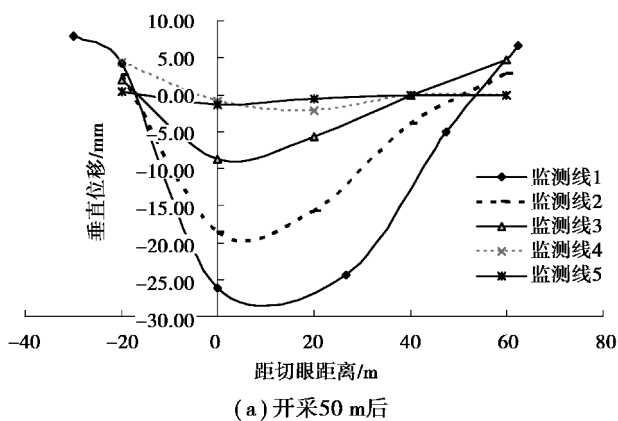
图8 不同底板深度应力变化曲线

Fig.8 Stress-forward distance curves at different depths

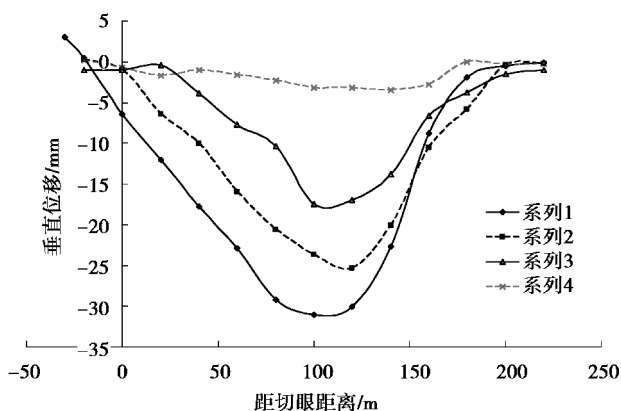
## 2.2 底板位移场分析

图9(a)为工作面推进50 m后底板各岩层位移图。结果表明,随着工作面的推进,初始应力平衡遭到破坏,底板岩层利用其自组织能力,逐渐趋于新的与开采环境相应的平衡状态,宏观上表现为岩层的规律性运动。各测线上垂直方向底版形成一个类似开口向下的倒碗状抛物线,抛物线顶点处于工作面煤壁后方一定距离。从图9(a)可以发现,工作面后方采空区至工作面前方10 m底板岩层整体出现上移现象,发生大面积底臃,底臃最大位置出现在采空区中部,2.9 m厚泥岩直接底最大底臃量为26.2 mm,4.57 m厚细砂岩最大位移量为19.3 mm,5.08 m厚泥岩最大位移量在开切眼下方为9.13 mm,2.14 m厚泥岩最大位移为1.93 mm。

从底板岩层位移曲线(图9(b))可以看出,工作面推进200 m后,底板岩层移动整体进一步增加,直接底最大底臃处距离煤壁后方92 m为32.25 mm,4.57 m厚细砂岩最大位移量为26.14 mm,5.08 m厚泥岩最大位移量在开切眼下方16.89 mm,2.14 m厚泥岩最大位移为2.41 mm。煤壁后方100 m以外远至开切眼采空区底板岩层在垮落岩层作用下,底臃逐渐变小,底板岩层则出现断裂、扩展、闭合循环过程。采空区底板岩层向上弯曲最大挠度大于岩层极限挠度时,岩层即发生破坏。当底板破坏后,弹性能得到释放,底板压力明显降低,随着顶板岩层的垮落充填进入采空区,底板应力有回升趋势。



(a) 开采50 m后



(b) 开采200 m后

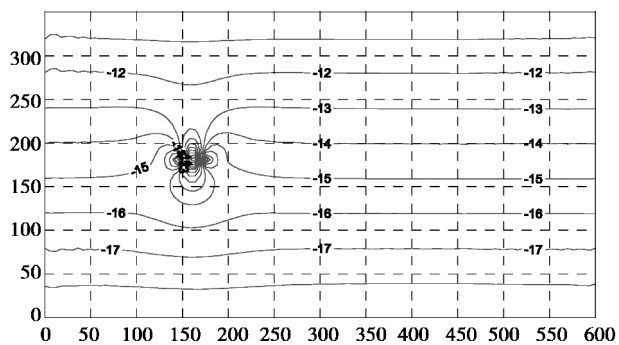
图9 底板岩层位移曲线

Fig.9 Strata displacement curves of floor strata

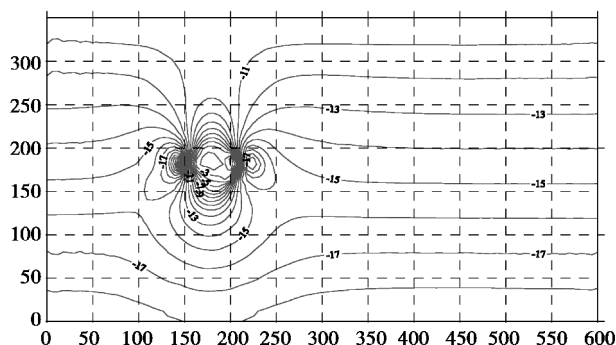
## 3 采动底板力学场特征及时空演化

### 3.1 垂直应力场时空变异性

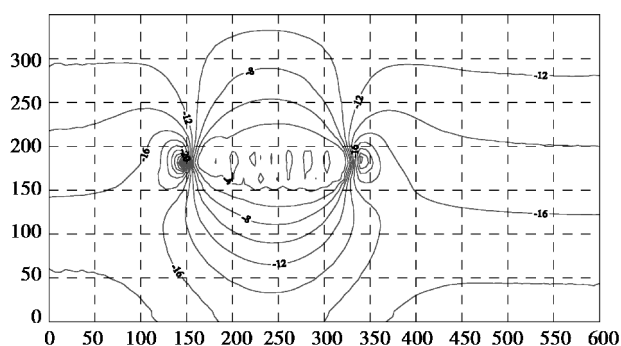
图10为采用FLAC<sup>3D</sup>软件计算出的不同推进距离下的垂直应力场,其主要规律为:随着距离煤层底板深度的增加,应力集中和卸压程度降低,垂直应力等值线逐渐趋于缓和;工作面回采20 m后,煤壁前方及开切眼附近煤层出现垂直应力集中区,垂直应力集中范围大致等于最大主应力集中范围,煤层顶底板小范围内出现垂直应力降低区;回采60 m后,采场下方垂直应力峰值出现偏转,峰值应力沿斜向采空区两侧约 $24^\circ$ 方向沿底板岩层衰减,垂直应力等值线呈“耳”形分布。同时,煤层底板应力具有继承相关性,但因传递过程中伴随应力的耗散,沿煤层底板方向垂直应力衰减速率远大于煤层顶板岩层;工作面回采100 m后,采空区顶底板岩层应力降低区高度进一步增加,采空区下方82 m岩层由初始应力16.7 MPa降低至10.3 MPa,卸压系数为0.62;工作面回采140 m后,底板卸压



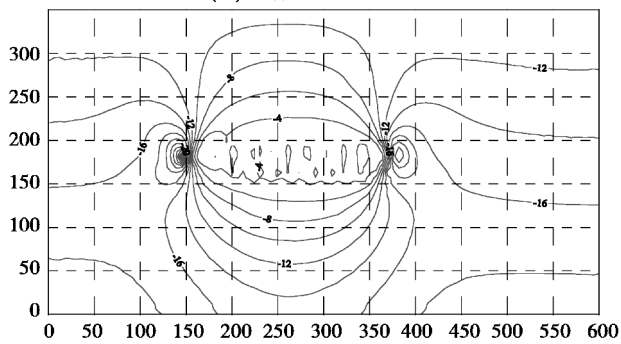
(a) 工作面推进20 m



(b) 工作面推进60 m



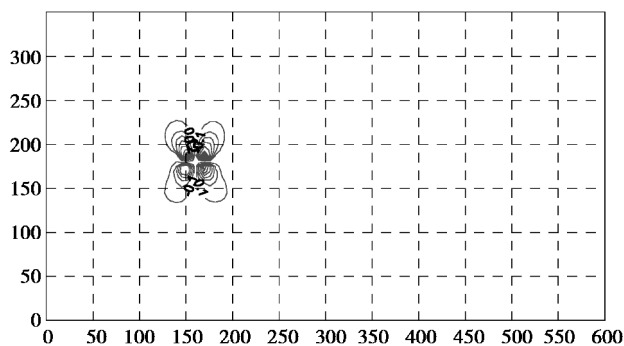
(c) 工作面推进140 m



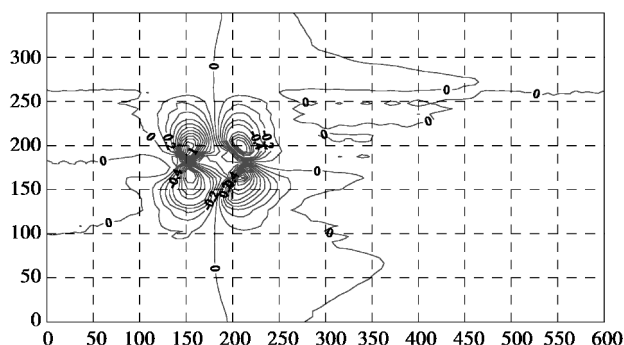
(d) 工作面推进220 m

图10 沿煤层走向工作面中部围岩垂直应力场

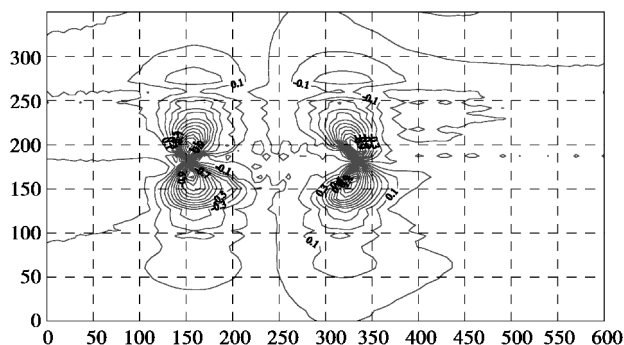
Fig.10 Vertical stress field along the strike in the middle of working face



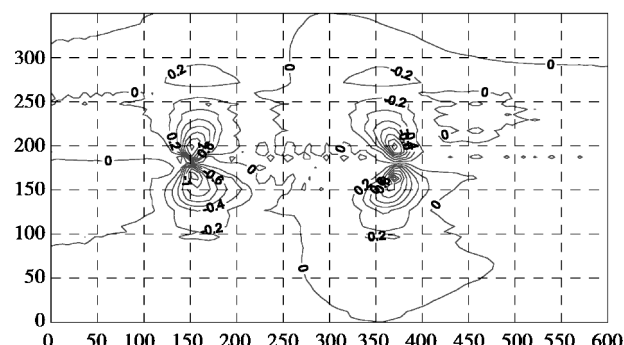
(a) 工作面推进20 m



(b) 工作面推进60 m



(c) 工作面推进140 m



(d) 工作面推进220 m

图11 沿煤层走向工作面中部围岩剪应力场

Fig.11 Shear stress field along the strike in the middle of working face

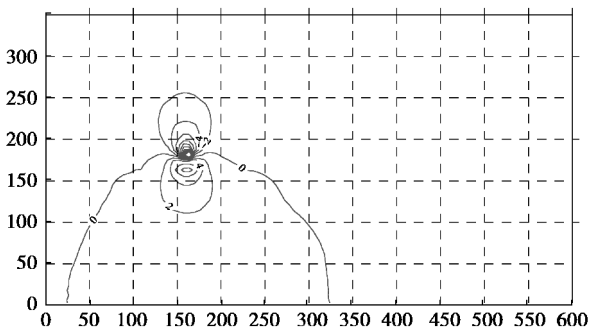
程度进一步增加,同一层位的底板下 82 m 深度岩层垂直应力降低至 8.7 MPa,卸压系数为 0.52;工作面继续回采,推进距离大于工作面倾向长度后,采场底板应力集中范围和集中程度趋于稳定,采空区下方底板卸压区随工作面的推进逐步水平前移。

### 3.2 剪应力场时空变异性

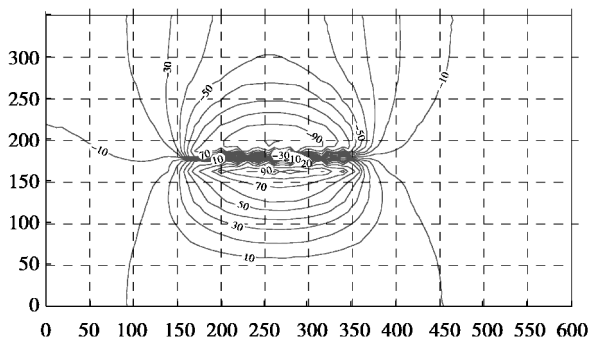
图 11 给出了走向剖面采场中部底板岩层剪应力分布等值线场。可以发现,采场周围剪应力变化梯度剧烈,但影响范围远小于最大主应力和垂直应力。工作面推进 20 m 时,剪应力集中等值线斜向采空区两侧传播,并迅速衰减;当工作面推进 60 m 后,剪应力等值线出现反转,斜向采空区底板岩层,顶底板等值线形态大致沿煤层镜像对称分布;工作面继续推进,剪应力集中等值线沿煤层传播角基本不变,随着深度的增加剪应力衰减速率减缓,采空区浅部岩层剪应力为 0,其高剪应力峰值是底板岩层破坏的主要力源。

### 3.3 位移场时空变异性

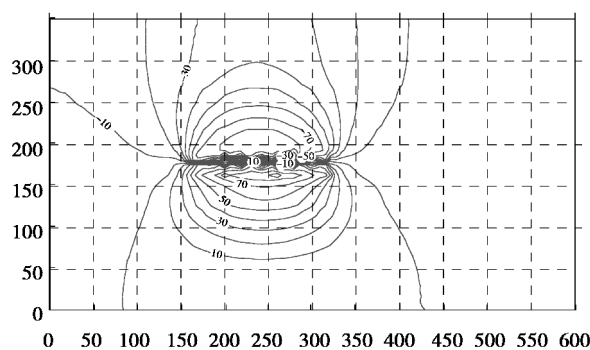
图 12 显示 1232(1)综采工作面不同推进距离的垂直位移场。计算结果表明,工作面回采后底板岩层在拉应力、膨胀应力、挤压应力联合作用下出现底臃显现,垂直位移等值线沿深度方向均有递减,同时煤壁前方底板岩层也出现微弱的移动。



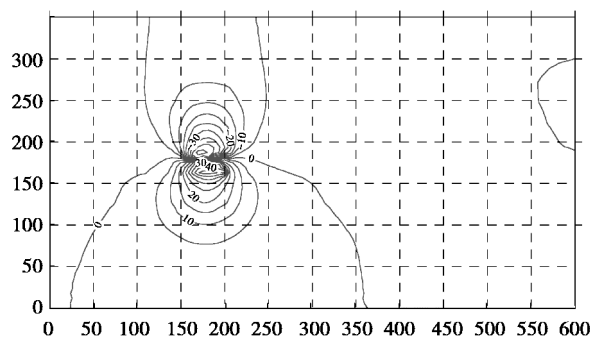
(a) 工作面推进 20 m



(b) 工作面推进 60 m



(c) 工作面推进 140 m



(d) 工作面推进 220 m

图 12 沿煤层走向工作面中部围岩垂直位移

Fig.12 Vertical displacement along the strike in the middle of working face

## 4 结论

(1) 工作面推进一定距离后,采场围岩近场区域最大主应力场急剧偏转,底板岩层存在高应力束组成的主应力拱,垂直应力峰值线是深入煤体斜向工作面底板岩层内按负指数规律衰减的曲线,采场附近垂直应力等值线升高区呈“耳”形分布,工作面后方采空区底板岩层出现滞后卸压现象,垂直应力等值线最终趋于“平底形”分布,卸压范围呈现倒“八”字形。

(2) 煤层底板应力具有继承相关性,沿煤层底板方向垂直应力衰减速率远大于煤层顶板岩层。附加水平应力和剪应力沿采空区边缘在浅部岩层出现高度集中现象。

(3) 工作推进一定距离后力学场偏转伴生出的拉应力、膨胀应力、挤压应力联合作用,是底板岩层运动(底臃)的本质力源,采场前方底板岩层出现微弱的扰动变形,且存在裂纹超前起裂现象。

### 参考文献(References)

[1] 康钦容,张卫中,韩佩博,等. 三维应力条件下煤层

- 底板采动破坏规律实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(3): 612-618. (Kang Qinrong, Zhang Weizhong, Han Peibo, et al. Experimental study of mine-induced underlying strata failure regularity in three dimensional stress condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(3): 612-618. (in Chinese))
- [2] 付宝杰, 涂敏, 程桦. 承压水上厚煤层底板变形破坏特征实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S1): 107-112. (Fu Baojie, Tu Min, Cheng Hua. Deformation and failure characteristics research on thick seam mining floor above confined water [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S1): 107-112. (in Chinese))
- [3] 王作宇, 刘鸿泉, 王培彝, 等. 承压水上采煤学科理论与实践[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 40-48. (Wang Zuoyu, Liu Hongquan, Wang Peiyi, et al. Theory and practice of coal mining discipline on confined water [J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(1): 40-48. (in Chinese))
- [4] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J]. 山东矿业学院学报, 1999, 18(4): 11-18. (Li Baiying. “Down Three Zones” in the Prediction of the water inrush from Coalbed Floor Aquifer-theory, development and application [J]. Journal of Shandong Institute of Mining & Technology, 1999, 18(4): 11-18. (in Chinese))
- [5] 张金才, 刘天泉. 论煤层底板采动裂隙带的深度及分布特征[J]. 煤炭学报, 1990, 15(2): 46-55. (Zhang Jincan, Liu Tianquan. On depth of fissured zone in seam floor resulted from coal extraction and its distribution characteristics [J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(2): 46-55. (in Chinese))
- [6] 施龙青, 韩进. 开采煤层底板“四带”划分理论与实践[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 16-23. (Shi Longqing, Han Jin. Theory and practice of dividing coal mining area floor into Four-Zone [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(1): 16-23. (in Chinese))
- [7] 肖洪天, 温兴林, 张文泉, 等. 分层开采底板岩层移动的现场观测研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 71-74. (Xiao Hongtian, Wen Xinglin, Zhang Wenquan, et al. In situ measurement of floor strata displacements in slice mining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 71-74. (in Chinese))
- [8] 雷文杰, 汪国华, 薛晓晓. 有限元强度折减法在煤层底板破坏中的应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 299-303. (Lei Wenji, Wang Guohua, Xue Xiaoxiao. Application of finite element strength reduction method to destruction in coal seam floor [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 299-303. (in Chinese))
- [9] 姜耀东, 吕玉凯, 赵毅鑫, 等. 承压水上开采工作面底板破坏规律相似模拟试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1571-1578. (Jiang Yaodong, Lü Yukai, Zhao Yixin, et al. Similar simulation test for breakage law of working face floor in coal mining above aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1571-1578. (in Chinese))
- [10] 关英斌, 李海梅, 路军臣. 显德汪煤矿9号煤层底板破坏规律的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 121-125. (Guan Yingbin, Li Haimei, Lu Junchen. Research on No. 9 coal seam floor's fracture regularity in Xiandewang coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(2): 121-125. (in Chinese))
- [11] 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): 191-194. (Zhu Shuyun, Jiang Zhenquan, 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): 191-194. (in Chinese))
- [12] 高召宁, 孟祥瑞, 郑志伟. 采动应力效应下的煤层底板裂隙演化规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 90-95. (Gao Zhaoning, Meng Xiangrui, Zheng Zhiwei. Research on evolution rules of coal seam floor crack under mining stress effect [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 90-95. (in Chinese))
- [13] 鲁海峰, 姚多喜, 梁修雨, 等. 采动底板横观各向同性岩体应力解析解[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(5): 1050-1056. (Lu Haifeng, Yao Duoxi, Liang Xiuyu, et al. Analytical solution of stress in a transversely isotropic floor rock mass under mining [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(5): 1050-1056. (in Chinese))
- [14] 李家卓. 采场底板围岩应力壳力学特征研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015. (Li Jiazhao. Study on mechanical characteristics on surrounding rock of stope floor stress shell [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015. (in Chinese))
- [15] 陈明祥. 弹塑性力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (Chen Mingxiang. Elasticity and plasticity [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))