

承压水上开采沿工作面倾向底板力学破坏特征

宋文成¹, 梁正召¹, 赵春波²

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 为了研究承压水上开采沿工作面倾向底板应力分布规律和变形破坏特征, 运用弹性力学理论, 建立考虑沿工作面倾向支承压力分布和承压水共同作用的底板应力计算模型, 结合初次和周期来压特点, 理论推导计算底板应力分布和破坏形态, 并利用 FLAC^{3D} 数值模拟和原位测试技术进一步探讨开采后沿工作面倾向底板力学破坏特征和应力分布特点。研究表明: (1) 理论计算采后底板呈“倒马鞍形”破坏形态, 且剪切应力呈“反向对称螺旋状”分布, 近似一对正负剪切力偶, 易沿边界产生剪切滑移破坏, 这与数值模拟得到的塑性区及应力分布特点相吻合; (2) 应力集中程度最大值位于弹塑性交界附近, 初次和周期来压支承压力系数之比与最大垂直应力集中系数比值近似相等; (3) 模拟表明, 开采后孔隙水沿底板递进导升, 易从工作面端部斜下方涌入工作面, 形成突水现象, 与实际突水部位相吻合; (4) 理论计算、数值模拟和现场实测底板最大破坏深度分别为 12, 12.875 和 13.75 m, 三者结果大致相当。所构建力学模型计算结果与数值模拟所得有较好的一致性, 更加符合现场实际破坏形态, 其研究成果可为承压水上开采底板破坏机制提供一定的理论依据, 对矿井防治水具有指导意义。

关键词: 采矿工程; 承压水上开采; 底板岩体; 工作面倾向; 应力分布; 破坏特征

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)09 - 2131 - 13

Mechanical failure characteristics of mining floor along working face inclination above confined water

SONG Wencheng¹, LIANG Zhengzhao¹, ZHAO Chunbo²

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to study the stress distribution and mechanical failure characteristics of mining floor along the inclination of the working face above confined water, mechanical models of floor rock were constructed considering the combined action of supporting pressure and confined water along the inclination of the working face respectively. The stress distribution and failure form of floor were theoretically calculated considering the characteristics of initial and periodic pressure. The mechanical failure characteristics and stress distribution of mining floor based on numerical simulation of FLAC^{3D} and in-situ testing technology were further discussed. The failure tendency of mining floor along the inclination of the working face has an “inverted saddle shape”. The corresponding shear stress is distributed in “reverse symmetry spiral”, which approximates a pair of positive and negative shear couple and is easy to produce shear failure along the boundary. This is in accordance with the

收稿日期: 2018 - 01 - 15; **修回日期:** 2018 - 05 - 21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB047100); 国家自然科学基金资助项目(51274053)

Supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(Grant No. 2014CB047100) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51274053)

作者简介: 宋文成(1990 -), 男, 2014 年毕业于山东科技大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事矿井防治水方面的研究工作。E-mail: 1441814812@qq.com。通讯作者: 梁正召(1977 -), 男, 现任教授、博士生导师。E-mail: LiangZZ@dlut.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0058

failure zone and the stress distribution from numerical simulation. The maximal value of concentration level is located at the boundary of the elastic and plastic junction. The ratio of the supporting pressure coefficient under the initial and periodic pressure is approximately equal to that of the maximum vertical stress concentration coefficients. The simulation shows that the pore water is progressively promoted along the floor and easy to pour into the working face from the underneath part of its two ends, forming a water inrush phenomenon, which is in accordance with the actual water inrush position. The maximum failure depths from theoretical calculation, numerical simulation and field measurement are 12, 12.875 and 13.75 m respectively, and the three results are quite close to each other. The results obtained from the mechanical model are in good agreement with one from the numerical simulation, and are consistent with the actual failure mode.

Key words: mining engineering; mining above confined water; floor rock mass; the inclination of the working face; stress distribution; failure characteristics

1 引言

受开采影响,底板岩体应力重新分布,发生变形,并造成不同程度的破坏,尤其是面临承压水上开采时,更易诱发矿井突水事故^[1]。因此,底板突水防治应重视对采动应力分布规律及变形破坏特征的研究^[2]。目前,众多学者已分别从理论分析、数值模拟及现场实测等多方面开展了相关研究,取得了丰硕成果。

在理论分析方面,王连国等^[3]考虑了沿工作面走向和倾向的受力特点,构建弹性半平面无限体受力模型,推导并计算了底板垂直应力分布情况。孟祥瑞等^[4-6]根据工作面前方支承压力分布,构建了煤层底板应力计算模型,结合莫尔-库仑准则,研究了采后底板应力分布和破坏规律。鲁海峰和姚多喜^[7]将底板岩体视为横观各向同性体,推导出底板应力解析解,分析了应力分布与变形参数的各向异性度的关系。显然,上述弹性力学模型只针对支承压力分布特点进行有益探讨,未考虑承压水对底板的影响。

在数值模拟方面,刘伟韬等^[8-9]基于FLAC^{3D}仿真软件探讨了不同工作面开采条件及地质力学参数影响下深部承压水上开采底板破坏特征,进行了主控因素敏感性分析,并与所建力学模型求解结果相对比。张文彬^[10]利用UDEC软件模拟了底板破坏方式和应力分布规律,并结合弹塑性力学理论和回归分析方法进一步确定底板破坏影响范围。

在现场实测方面,张平松等^[11]采用震波CT技术收集了不同时期底板探测数据,获得了回采过程中底板破坏的动态发育规律及特征。孙建等^[12]利用微震监测技术对承压水上倾斜煤层底板开采破坏特征进行动态监测。

之后,熊祖强等^[13-18]采用不同手段进行了底板破坏特征相关探索。上述研究内容深入且手段多样,所涉及相关力学模型鲜有同时考虑初次和周期来压时沿工作面倾向支承压力分布和承压水共同作用对于开采底板破坏的影响,且较少采用多种手段对理论结果进行验证。

因此,以某矿41503工作面承压水上开采为背景,根据初次和周期来压特点及承压水作用,建立沿工作面倾向底板力学计算模型,理论求解底板应力分布规律和破坏特征,并利用数值模拟和现场实测所得结果验证了理论模型的正确性、可行性,为矿井防治水提供了一定的理论依据。

2 工程概况

某矿41503工作面埋深690~720 m,平均700 m左右,主要开采15煤,位于二号井四采区下部,平均厚度1.5 m左右,煤层倾角2°~7°,属于近水平煤层,赋存相对稳定,工作面走向长度为300 m,倾斜长度为100 m,采用走向长壁全部垮落法进行顶板管理,其直接顶为细砂岩、砂质泥岩,直接底为中砂岩,根据钻孔所揭露的岩层综合柱状图,如图1所示。工作面范围内没有大的断层构造,在其下方50~60 m的位置处有一奥灰含水层,最大水压可达3.7 MPa,对工作面开采的威胁较大。

3 理论分析

3.1 基本原理

假设有一半无限平面体,在其上平面边界上受到一集中力 F 作用,且该力与边界垂直方向成角 β ,由于该集中力 F 的作用,在半无限体下任一点引起径向应力和切向应力,如图2所示。

柱状	岩(煤)层名称	厚度/m	岩层特性描述
	细砂岩	19	灰白色, 细粒状结构, 顶部裂隙发育, 主要含石英石, 长石次之
	13 煤、泥岩	4.2	煤层可采结构简单, 局部有泥岩
	粉砂岩	13	深灰色粉砂质结构, 中下部含泥质
	砂质泥岩	2.5	深灰色, 层状构造, 上部可见方解石细脉, 底部节理发育, 较破碎
	细砂岩	5	浅灰色, 细粒结构, 中薄层状, 钙质胶结, 节理、裂隙发育
	15 煤	1.5	煤层结构简单, 平均厚度 1.5 m
	中砂岩	2	灰白色, 中粗粒状结构, 钙质胶结
	16 煤、夹石	4.5	煤层可采结构简单, 局部有夹石
	粉砂岩	25.5	灰色、灰黑色粉砂岩, 含层状核心
	中砂岩	25	灰白色, 中粗粒结构, 中厚层状构造钙质胶结, 主要含石英石、长石

图 1 岩层综合柱状图

Fig.1 Comprehensive histograms of strata

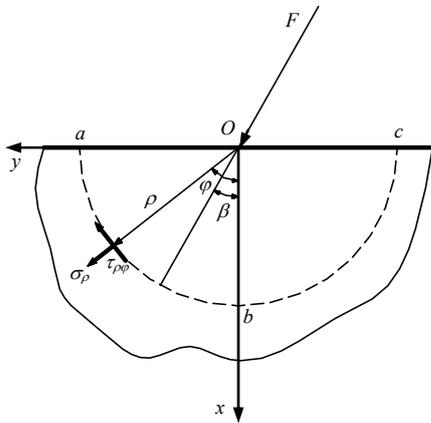


图 2 半平面体边界上受集中力示意图

Fig.2 Sketch of concentrated stress on the boundary of a half plane body

根据弹性力学理论^[19], 采用半逆解法求解, 得到应力分量:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= -\frac{2F}{\pi\rho}(\cos\beta\cos\varphi + \sin\beta\sin\varphi) \\ \sigma_\varphi &= 0 \\ \tau_{\rho\varphi} &= \tau_{\rho\varphi} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

令 $\beta = 0^\circ$, 即集中力 F 垂直于半平面边界, 如图 3 所示。

将式(1)代入下式(极坐标转换式)中:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_\rho \cos^2\varphi + \sigma_\varphi \sin^2\varphi - 2\tau_{\rho\varphi} \sin\varphi \cos\varphi \\ \sigma_y &= \sigma_\rho \sin^2\varphi + \sigma_\varphi \cos^2\varphi + 2\tau_{\rho\varphi} \sin\varphi \cos\varphi \\ \tau_{xy} &= (\sigma_\rho - \sigma_\varphi) \sin\varphi \cos\varphi + \tau_{\rho\varphi}(\cos^2\varphi - \sin^2\varphi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

则可得到

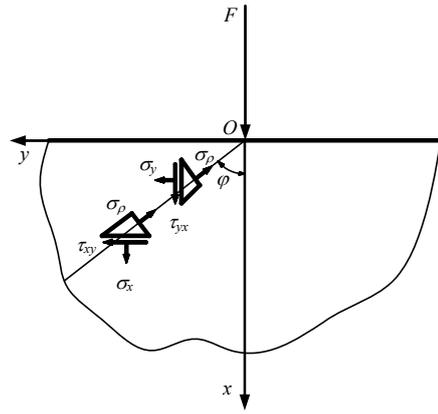


图 3 半平面体边界上受垂直集中力示意图

Fig.3 Sketch of vertical concentrated stress on the boundary of a half plane body

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_\rho \cos^2\varphi = -\frac{2F \cos^3\varphi}{\pi\rho} \\ \sigma_y &= \sigma_\rho \sin^2\varphi = -\frac{2F \sin^2\varphi \cos\varphi}{\pi\rho} \\ \tau_{xy} &= \sigma_\rho \sin\varphi \cos\varphi = -\frac{2F \sin\varphi \cos^2\varphi}{\pi\rho} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3.2 力学计算模型构建与推导

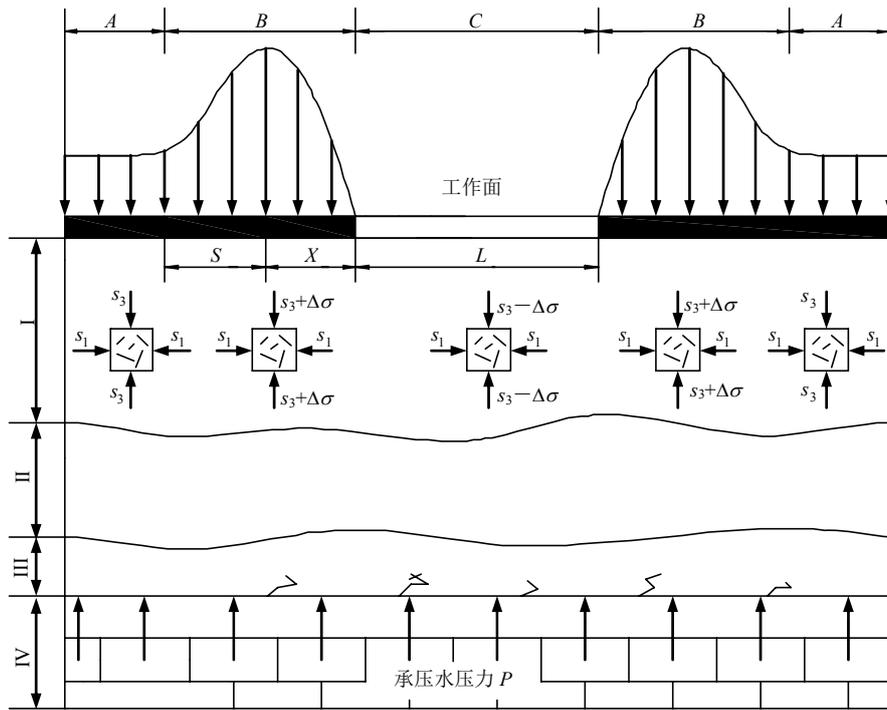
根据实用矿山压力理论^[20], 在不考虑构造应力影响的情况下, 承压水上开采沿工作面倾向底板岩体受力状态示意图, 如图 4 所示。

根据图 4 所示, 假设不考虑构造应力及原岩应力区对底板的影响, 根据支承压力分布特点和承压水对底板的作用, 分别构建初次和周期来压时沿工作面倾向底板力学计算模型, 如图 5 所示, 将塑性区(X)简化为三角形线性载荷, 弹性区(S)简化为梯形线性载荷, 承压水作用简化为矩形均布载荷。

由于初次和周期来压时沿工作面倾向支承压力的分布形态具有相似性, 因此仅以初次来压为例进行推导。

以工作面倾向中部为原点, 以平行于底板且沿着煤岩交界处水平向左为 y 轴, 以垂直于底板向下为 x 轴, 建立平面直角坐标系, 如图 5(a)所示。假设原岩应力大小为 γH , 初次来压时, 沿工作面倾向应力集中区最大值为 $k_c \gamma H$, 煤壁与控顶区交界处上方支承压力对底板的作用为 0, 弹性区梯形载荷 $F_a(y)$ 和 $F_d(y)$ 的作用宽度为 f , 塑性区三角形载荷 $F_b(y)$ 和 $F_c(y)$ 的作用宽度为 e , 则承压含水层均布载荷 $F_e(y)$ 的作用宽度为 $2f+2e+L$ 。

在极坐标情况下, 各段线性载荷在底板岩体中任一点 $G(y, x)$ 的应力分量分别为:



A—原岩应力区；B—应力集中区；C—卸荷区；S—弹性区；X—塑性区；L—工作面斜长

图4 承压水上开采沿工作面倾向底板受力状态示意图

Fig.4 Diagram of the stress state of mining floor along the inclination of the working face above confined water

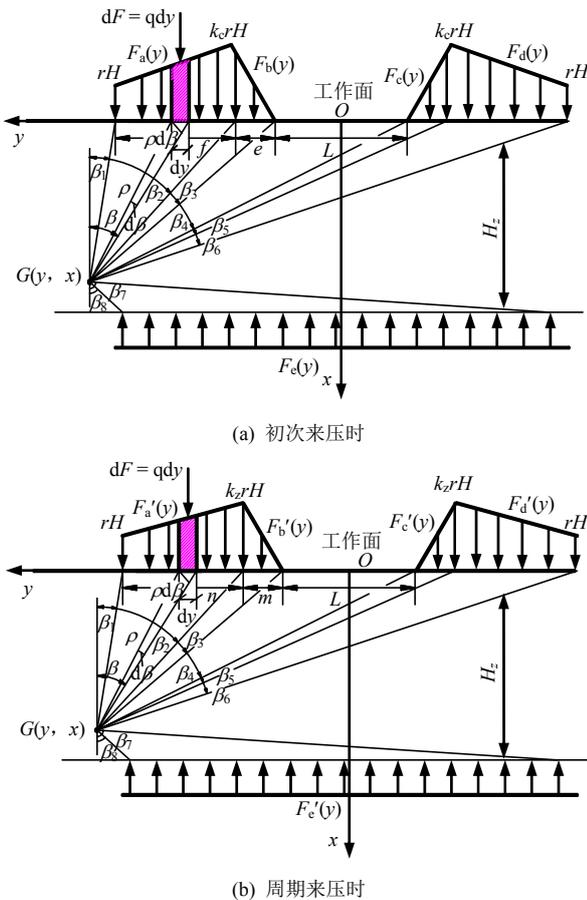


图5 承压水上开采沿工作面倾向底板力学计算模型

Fig.5 Mechanical calculation model of mining floor along the inclination of the working face above confined water

(1) 在梯形线性载荷 $F_a(y)$ 作用下的应力分量:

$$\sigma_{xa} = -\frac{x(k_c - 1)\gamma H}{\pi f} \left[\tan \beta_1 (\beta_1 - \beta_2) - \frac{1}{2} \tan \beta_1 \sin(2\beta_2) + \sin^2 \beta_2 \right] + \frac{\gamma H}{\pi} (\beta_1 - \beta_2 + \sin \beta_1 \cos \beta_1 - \sin \beta_2 \cos \beta_2)$$

$$\sigma_{ya} = -\frac{x(k_c - 1)\gamma H}{\pi f} \left[\tan \beta_1 (\beta_1 - \beta_2) + \tan \beta_1 \sin \beta_2 \cos \beta_2 + 2 \ln \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} - \sin^2 \beta_2 \right] + \frac{\gamma H}{\pi} (\beta_1 - \beta_2 + \sin \beta_2 \cos \beta_2 - \sin \beta_1 \cos \beta_1)$$

$$\tau_{xya} = -\frac{x(k_c - 1)\gamma H}{\pi f} \left\{ \tan \beta_1 (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) - (\beta_1 - \beta_2) - \frac{1}{2} [\sin(2\beta_2) - \sin(2\beta_1)] \right\} + \frac{\gamma H}{\pi} (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2)$$

(4)

其中,

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \arctan \frac{2y - 2f - 2e - L}{2x} \\ \beta_2 &= \arctan \frac{2y - 2e - L}{2x} \end{aligned} \right\}$$

(2) 在三角形线性载荷 $F_b(y)$ 作用下的应力分量:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xb} &= \frac{xk_c \gamma H}{\pi e} \left[\tan \beta_3 (\beta_2 - \beta_3) + \frac{1}{2} \tan \beta_3 \sin(2\beta_2) - \sin^2 \beta_2 \right] \\ \sigma_{yb} &= \frac{xk_c \gamma H}{\pi e} \left[\tan \beta_3 (\beta_2 - \beta_3) - \tan \beta_2 \sin \beta_3 \cos \beta_3 + 2 \ln \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_3} + \sin^2 \beta_2 \right] \\ \tau_{xyb} &= \frac{xk_c \gamma H}{\pi e} \left\{ \tan \beta_3 (\sin^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_3) - (\beta_2 - \beta_3) - \frac{1}{2} [\sin(2\beta_3) - \sin(2\beta_2)] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \beta_2 &= \arctan \frac{2y - 2e - L}{2x} \\ \beta_3 &= \arctan \frac{2y - L}{2x} \end{aligned} \right\}$$

(3) 在三角形线性载荷作用 $F_c(y)$ 下的应力分量:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xc} &= -\frac{xk_c \gamma H}{\pi e} \left[\tan \beta_4 (\beta_4 - \beta_5) - \frac{1}{2} \tan \beta_4 \sin(2\beta_5) + \sin^2 \beta_5 \right] \\ \sigma_{yc} &= -\frac{xk_c \gamma H}{\pi e} \left[\tan \beta_4 (\beta_4 - \beta_5) + \tan \beta_4 \sin \beta_5 \cos \beta_5 + 2 \ln \frac{\cos \beta_4}{\cos \beta_5} - \sin^2 \beta_5 \right] \\ \tau_{xyc} &= -\frac{xk_c \gamma H}{\pi e} \left\{ \tan \beta_4 (\sin^2 \beta_4 - \sin^2 \beta_5) - (\beta_4 - \beta_5) - \frac{1}{2} [\sin(2\beta_5) - \sin(2\beta_4)] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \beta_4 &= \arctan \frac{2y + L}{2x} \\ \beta_5 &= \arctan \frac{2y + 2e + L}{2x} \end{aligned} \right\}$$

(4) 在梯形线性载荷 $F_d(y)$ 作用下的应力分量:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xd} &= \frac{x(k_c - 1)\gamma H}{\pi f} \left[\tan \beta_6 (\beta_5 - \beta_6) + \frac{1}{2} \tan \beta_6 \sin(2\beta_5) - \sin^2 \beta_5 \right] + \frac{\gamma H}{\pi} (\beta_5 - \beta_6 + \sin \beta_5 \cos \beta_5 - \sin \beta_6 \cos \beta_6) \\ \sigma_{yd} &= \frac{x(k_c - 1)\gamma H}{\pi f} \left[\tan \beta_6 (\beta_5 - \beta_6) - \tan \beta_5 \sin \beta_6 \cos \beta_6 + 2 \ln \frac{\cos \beta_5}{\cos \beta_6} + \sin^2 \beta_5 \right] + \frac{\gamma H}{\pi} (\beta_5 - \beta_6 + \sin \beta_6 \cos \beta_6 - \sin \beta_5 \cos \beta_5) \\ \tau_{xyd} &= \frac{x(k_c - 1)\gamma H}{\pi f} \left\{ \tan \beta_6 (\sin^2 \beta_5 - \sin^2 \beta_6) - (\beta_5 - \beta_6) - \frac{1}{2} [\sin(2\beta_6) - \sin(2\beta_5)] \right\} + \frac{\gamma H}{\pi} (\sin^2 \beta_5 - \sin^2 \beta_6) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \beta_5 &= \arctan \frac{2y + 2e + L}{2x} \\ \beta_6 &= \arctan \frac{2y + L + 2e + 2f}{2x} \end{aligned} \right\}$$

(5) 在矩形均布载荷 $F_e(y)$ 作用下的应力分量:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xe} &= \frac{P}{\pi} (\beta_7 - \beta_8 + \sin \beta_7 \cos \beta_7 - \sin \beta_8 \cos \beta_8) \\ \sigma_{ye} &= \frac{P}{\pi} (\beta_7 - \beta_8 + \sin \beta_8 \cos \beta_8 - \sin \beta_7 \cos \beta_7) \\ \tau_{xye} &= \frac{P}{\pi} (\sin^2 \beta_7 - \sin^2 \beta_8) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} \beta_7 &= \arctan \frac{2y + L + 2e + 2f}{H_z - x} \\ \beta_8 &= \arctan \frac{2y - L - 2e - 2f}{H_z - x} \end{aligned} \right\}$$

基于应力叠加原理, 将各线性载荷作用下的应力分量对应相加, 得到初次来压时, 承压水上开采沿工作面倾向底板岩体内任意一点 $G(y, x)$ 的垂直应力、水平应力和剪切应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{xa} + \sigma_{xb} + \sigma_{xc} + \sigma_{xd} + \sigma_{xe} \\ \sigma_y &= \sigma_{ya} + \sigma_{yb} + \sigma_{yc} + \sigma_{yd} + \sigma_{ye} \\ \tau_{xy} &= \tau_{xya} + \tau_{xyb} + \tau_{xyc} + \tau_{xyd} + \tau_{xye} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

若将周期来压时对应参数替换后, 亦可得到相应的周期来压底板应力表达式。

3.3 底板应力分布计算

根据 41503 工作面的开采地质资料，取工作面倾向长度 $L = 100\text{ m}$ ，煤层底板至承压含水层上边界垂直距离 $H_2 = 50\text{ m}$ ，考虑到安全因素，取承压含水层水压 $P = 4\text{ MPa}$ ，岩层容重 $\gamma = 25\text{ kN/m}^3$ 。沿工作面倾向，初次来压时，两帮塑性区宽度 $e = 10\text{ m}$ ，弹性区宽度 $f = 20\text{ m}$ ；周期来压时，两帮塑性区宽度 $m = 7\text{ m}$ ，弹性区宽度 $n = 16\text{ m}$ 。

基于 MathCAD 软件，结合前述推导的应力表达式(9)，计算得到初次和周期来压时沿工作面倾向底板应力分布情况，如图 6~8 所示。

通过承压水上开采初次和周期来压两种情况下沿工作面倾向底板岩体中垂直应力、水平应力及剪切应力系数等值线对比，可以得到规律如下：

(1) 从垂直应力分布看，与初次和周期来压时顶板支撑压力分布相对应，底板岩体中均出现明显的垂直应力集中与卸荷现象，且集中程度最大处位于弹塑性交界附近，应力集中系数最大值分别为 3.174 和 2.07，二者比值为 1.53，近似等于支撑压力系数之比($k_c/k_z=1.48$)。

(2) 从水平应力分布看，初次来压时应力集中程度(相同层位)和影响范围均大于周期来压时。由

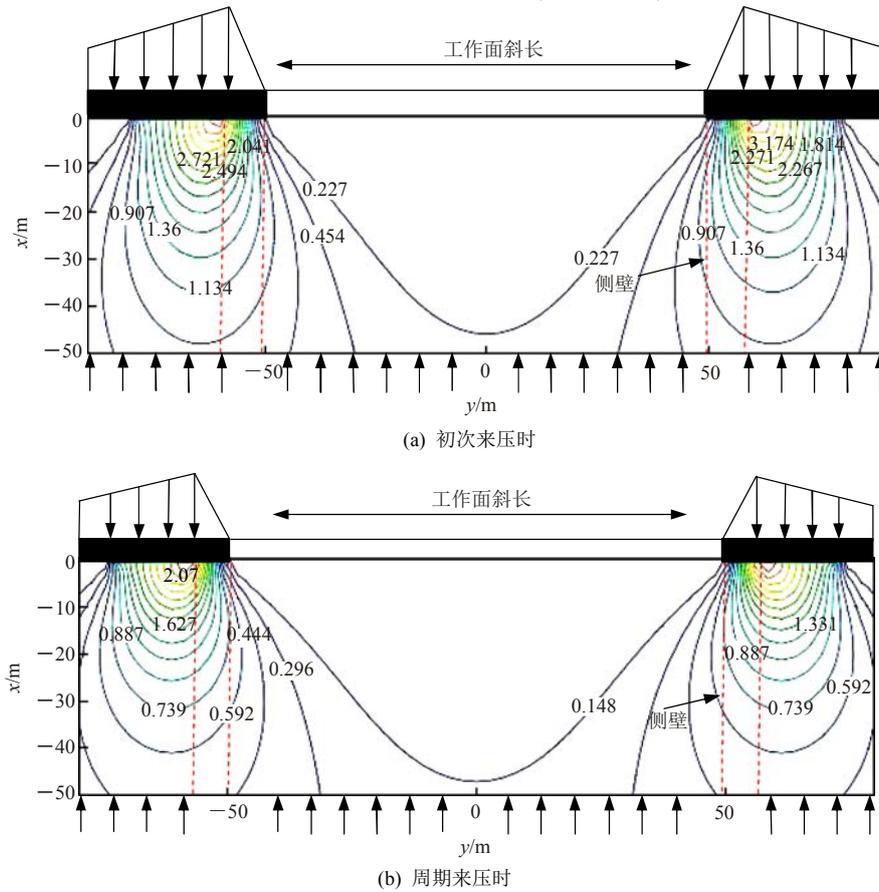
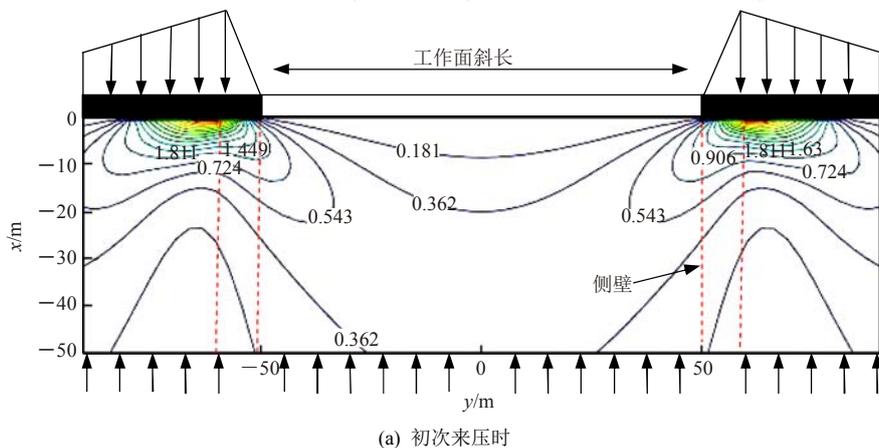


图 6 承压水上开采沿工作面倾向底板岩体垂直应力系数($\sigma_x/(\gamma H)$)等值线

Fig.6 Vertical stress coefficient isolines of mining floor along the inclination of the working face above confined water



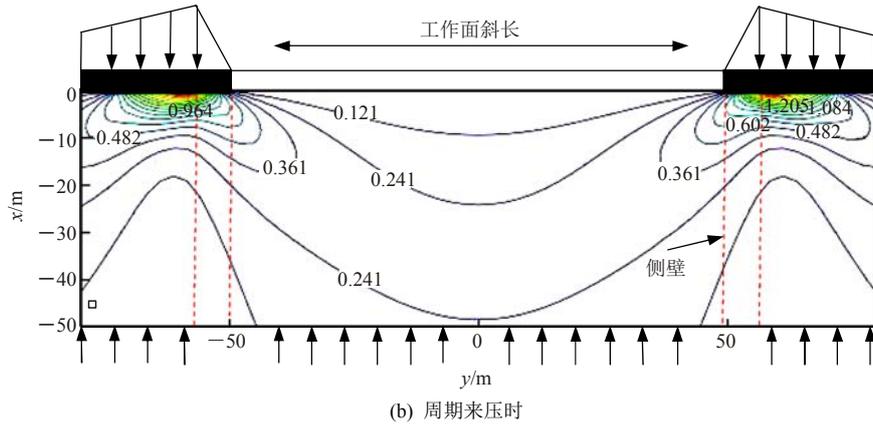


图 7 承压水上开采沿工作面倾向底板岩体水平应力系数($\sigma_x/(\gamma H)$)等值线

Fig.7 Horizontal stress coefficient isolines of mining floor along the inclination of the working face above confined water

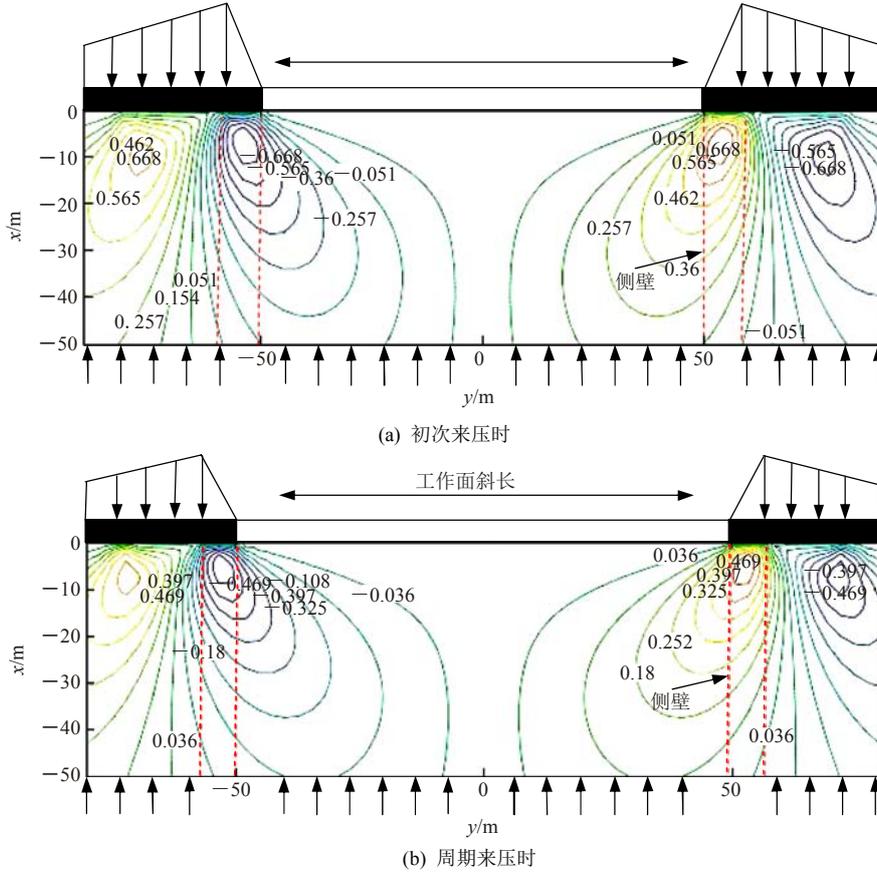


图 8 承压水上开采沿工作面倾向底板岩体剪切应力系数($\tau_{xy}/(\gamma H)$)等值线

Fig.8 Shear stress coefficient isolines of mining floor along the inclination of the working face above confined water

于岩体泊松效应，在两侧煤体下方底板浅部，水平应力亦出现不同程度的集中现象，但明显小于垂直应力集中程度，且随着深度增加，水平应力等值线趋于缓和。

(3) 从剪切应力分布看，最大剪应力值出现在载荷作用的边缘，其剪切应力系数等值线以应力峰值为界，两端呈“反向对称螺旋状”分布，与底板法线呈一定夹角斜向下方传播，近似一正一负剪切力偶，形成急剧剪切应力变化带，促使底板岩体容易产生压剪或拉剪变形破坏，与实际易破裂部位相吻合。

3.4 底板破坏特征计算

对采场底板应力分布规律的研究，是分析底板破坏深度和范围的重要前提^[21]。一般地，底板中易产生剪切变形，故岩体破坏是由其抗剪强度决定的^[22]。当底板岩体内部的最大剪应力 τ_{max} 大于抗剪强度 $[\tau]$ 时，则发生破坏。

工程中常运用莫尔 - 库仑准则，底板内某点的最大剪切应力^[23]为

$$\tau_{max} = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2} \quad (10)$$

则底板任意点的破坏判据为

$$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \tan \varphi + c \leq \tau_{\max} \sqrt{\tan^2 \varphi + 1} \quad (11)$$

式中： φ 为内摩擦角， c 为黏聚力。

令：

$$F(y, x) = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \tan \varphi + c - \tau_{\max} \sqrt{\tan^2 \varphi + 1} \quad (12)$$

当 $F(y, x) \leq 0$ ，表明岩体遭到破坏，公式中部分参数由室内试验获得，取 $\varphi = 30^\circ$ ， $c = 6 \text{ MPa}$ ，代入式(12)中，即可分别求得初次和周期来压时沿工作面倾向底板岩体破坏特征，如图 9 所示，该图由构建的函数(式(12))计算得到，线条代表抗剪强度与最大剪应力的差值，小于零代表岩体遭到破坏。

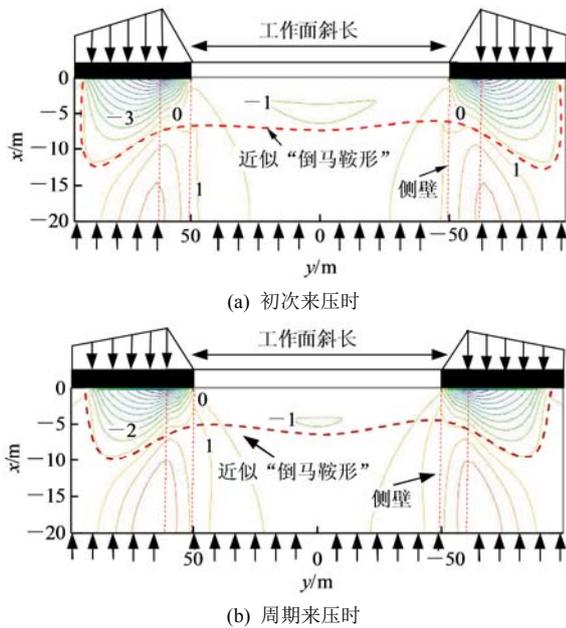


图9 承压水上开采沿工作面倾向底板岩体破坏特征(单位: MPa)
Fig.9 Failure characteristics of mining floor along the inclination of the working face above confined water(unit: MPa)

结合图 8, 9 分析，可以得到：

(1) 初次和周期来压时，二者沿工作面倾向底板岩体的整体破坏形态大体一致，近似呈“倒马鞍形”，且破坏深度初次来压(约 12 m)大于周期来压(约 9 m)，这与现场底板实际破坏特征的有关论述相符合^[24-27]。

(2) 受支撑压力作用，在工作面两端弹塑性交界附近的底板浅部岩体破坏最为剧烈，沿倾向中部下方岩体破坏相对较弱，其端部破坏发展方向与图 8 所示的剪切应力变化带分布大体一致，裂纹易从切面两端开始向深部扩展、延伸，与中部贯通，

形成“两端深中间浅”的剪切破坏形态。

4 数值模拟

4.1 模型构建

根据研究区域的开采地质条件构建 41503 工作面开采物理模型，如图 10 所示，并结合钻孔综合柱状图及岩层组物理力学性质指标，进一步建立 FLAC^{3D} 数值计算模型，如图 11 所示。

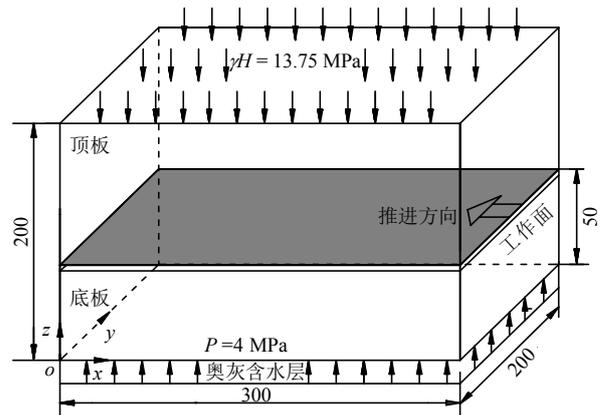


图 10 41503 工作面开采物理模型(单位: m)
Fig.10 Mining physical model of working face 41503(unit: m)

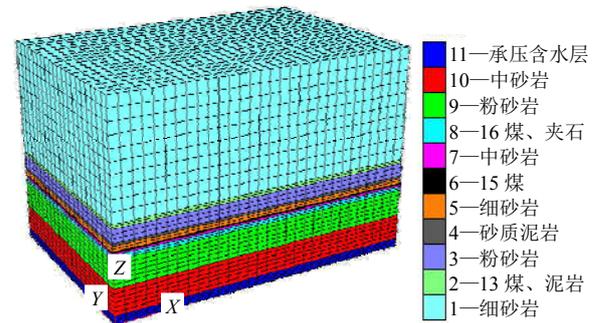


图 11 FLAC^{3D} 数值计算模型
Fig.11 Meshes and domain for numerical calculation with FLAC^{3D}

模型尺寸：取走向长度(x)为 300 m，倾向长度(y)为 200 m，垂向长度(z)为 200 m；

边界条件：对模型的侧部边界分别施加 x, y 方向约束，底部边界施加全约束，顶部边界等效均布面载荷作用，大小为 13.75 MPa，方向垂直向下。为了模拟底板承压水作用，在模型下方施加大小为 4 MPa 的固定水压。

开采方式及范围：采用走向长壁分步式开采，煤层一次采全高，取工作面走向长度为 200 m，倾向长度为 100 m，每步推进 10 m，共计开采 20 步。考虑到端部效应，取工作面开切眼和停采线至边界保护煤柱的距离为 50 m，两侧巷道保护煤柱的宽度为 50 m。各岩层物理力学参数由实验室测试获取，具体见表 1。

表 1 岩层组物理力学性质计算指标

Table 1 Physico-mechanical properties of rock group

序号	岩性	容重/(kN·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	孔隙率
1	细砂岩	25	4.3	3.2	4.5	35	4.22	5×10 ⁻¹⁵	0.3
2	13 煤、泥岩	23	2.6	1.6	4.0	31	2.87	6×10 ⁻¹⁴	0.5
3	粉砂岩	24	3.1	1.7	3.8	28	2.21	3×10 ⁻¹⁴	0.4
4	砂质泥岩	26	2.6	1.6	3.2	31	2.28	4×10 ⁻²²	0.2
5	细砂岩	25	4.3	3.2	4.5	35	4.22	3×10 ⁻¹⁵	0.3
6	15 煤	14	1.3	0.6	0.8	19	1.12	5×10 ⁻¹⁶	0.4
7	中砂岩	27	4.5	2.8	5.7	32	3.60	7×10 ⁻¹²	0.3
8	16 煤、夹石	25	2.8	1.9	2.7	33	3.20	3×10 ⁻¹⁵	0.5
9	粉砂岩	24	3.1	1.7	3.8	28	2.21	2×10 ⁻¹⁴	0.4
10	中砂岩	27	4.5	2.8	5.7	32	3.60	4×10 ⁻¹¹	0.5
11	奥灰含水层	26	3.0	2.0	2.6	35	4.14	8×10 ⁻⁷	0.7

4.2 模拟结果与分析

随着工作面推进，底板岩体应力重新分布，发生变形破坏，取走向中部的工作面倾向塑性区和最大主应力云图切片，如图 12，13 所示。

结合图 9，12 和 13 对比分析，可以得到：

(1) 数值模拟得到承压水上开采沿工作面倾向底板破坏形态(即塑性区分布)呈明显的“倒马鞍形”，其两端最大破坏深度为 12.875 m，其破坏边界为剪切破坏模式，与理论计算的底板剪切破坏特征相符合。

(2) 受煤层开采影响，孔隙水如渗流矢量箭头所示，沿底板递进导升，易从工作面端部斜下方形成突水通道，涌入工作面，发生突水现象。另外，最大主应力变化趋势与顶底板岩体塑性区破坏范围的变化趋势大体一致。

对应的垂直应力、水平应力及剪切应力分布，如图 14~16 所示。

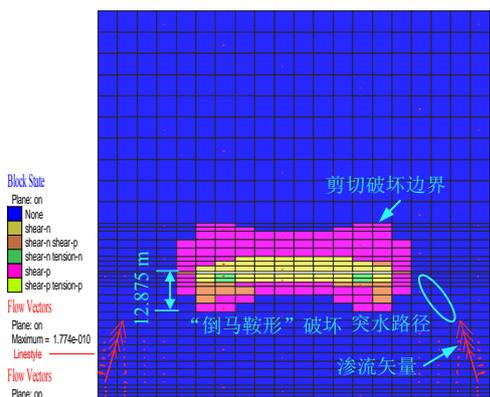


图 12 承压水上开采沿工作面倾向底板塑性区范围

Fig.12 Failure zone of mining floor along the inclination of working face above the confined water

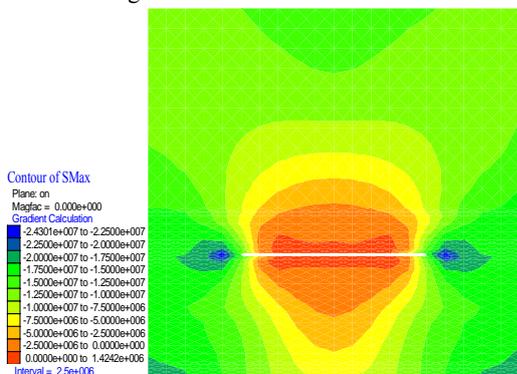


图 13 承压水上开采沿工作面倾向底板最大主应力分布 (单位: Pa)

Fig.13 Maximum principal stress of mining floor along the inclination of working face above the confined water (unit: Pa)

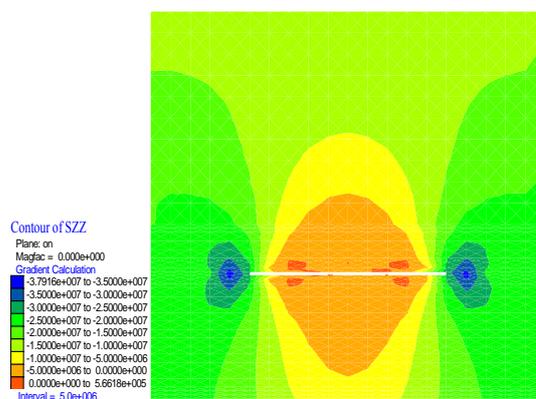


图 14 承压水上开采沿工作面倾向底板垂直应力分布 (单位: Pa)

Fig.14 Vertical stress of mining floor along the inclination of the working face above the confined water (unit: Pa)

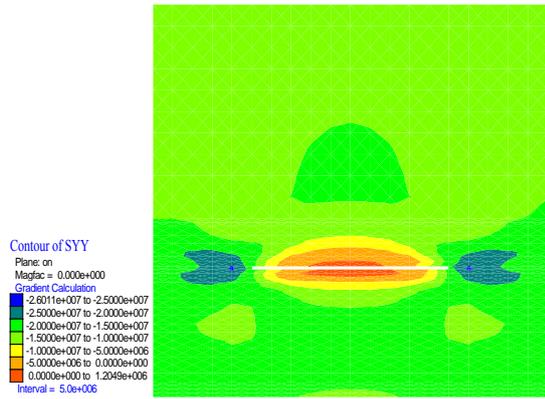


图 15 承压水上开采沿工作面倾向底板水平应力分布 (单位: Pa)

Fig.15 Horizontal stress of mining floor along the inclination of working face above the confined water(unit: Pa)

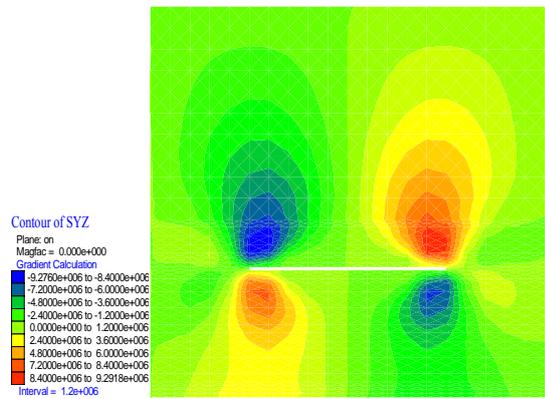


图 16 承压水上开采沿工作面倾向底板剪切应力分布 (单位: Pa)

Fig.16 Shear stress of mining floor along the inclination of the working face above the confined water(unit: Pa)

对比分析图 6~8 及图 14~16 可得:

(1) 如图 14, 15 所示, 模拟结果表明, 开挖后工作面两端垂直应力高度集中, 其应力集中程度及作用范围均明显大于水平应力的影响。针对应力卸荷水平而言, 工作面下方岩体垂直应力的卸荷范围较水平应力的影响大。随着深度的增加, 垂直应力等值线较为激凸, 而水平应力等值线趋于扁平, 与图 6, 7 中理论计算得到的应力系数等值线分布有较好的一致性。

(2) 如图 16 所示, 对应工作面两端的弹塑性交界附近下方底板岩体中分别出现正负剪切应力变化带, 与理论模型得到剪切应力分布(见图 8)相吻合, 结合底板塑形区破坏形态和破坏模式(见图 12)分析, 剪切应力变化带的存在可促使裂纹扩展, 形成压剪或拉剪破坏, 其发展方向与底板边界破坏相对应。这与张金才^[22]中“在压缩区与膨胀区的交界处, 采场边缘下部的底板岩体中容易产生剪切变形而发

生剪切破坏”一致。

5 原位测试

5.1 实测设备

利用双端封堵测漏装置, 如图 17 所示, 进行压水试验来测试底板采动破坏深度是水文地质观测中的重要方法。一般的, 通过在井下选取适当的位置, 向下(或向上)施工不同方位和倾角的俯斜(或仰斜)钻孔, 然后进行微分方式的注(放)水测试, 根据钻孔内注(放)水量来判定受采动影响而导致的岩层破坏发育深度(或高度)^[28]。

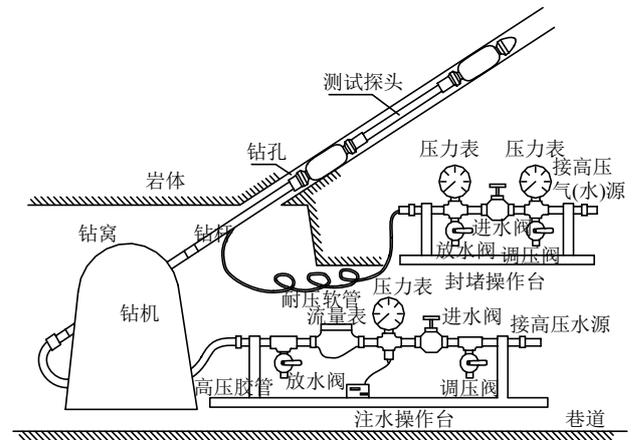


图 17 钻孔双端封堵测漏装置

Fig.17 Device for measuring leakage with double ends plugging of borehole

5.2 实测方案

将下区段回风平巷作为观测巷道, 垂直于 41503 工作面走向布设观测剖面, 并按照施工要素, 向底板中分别施工 4 个观测钻孔(1 个采前孔和 3 个采后孔), 如图 18 所示, 然后利用双端封堵测漏装置进行压水试验, 根据钻孔在不同深度位置处的漏水失量, 推断岩体裂隙发育程度, 以便于控制底板最大破坏深度。

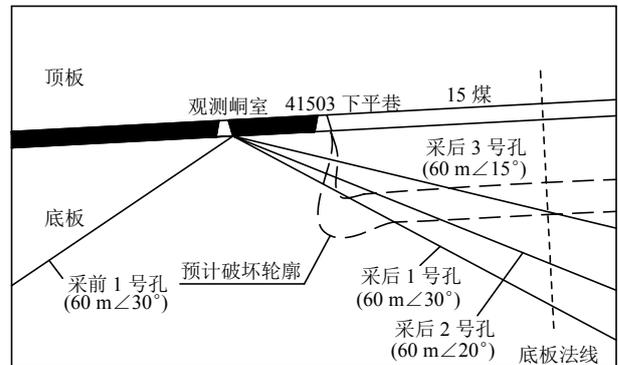


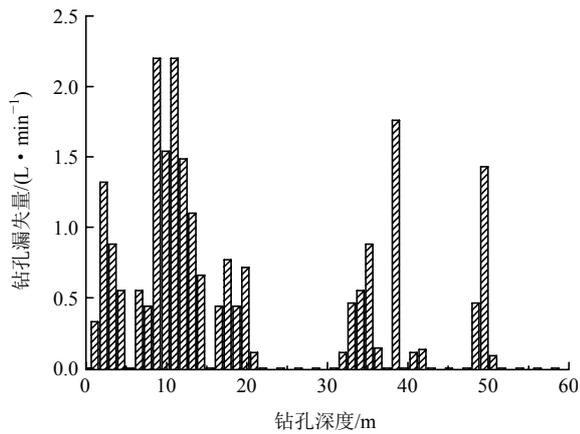
图 18 钻孔施工布置剖面图

Fig.18 Drilling layout

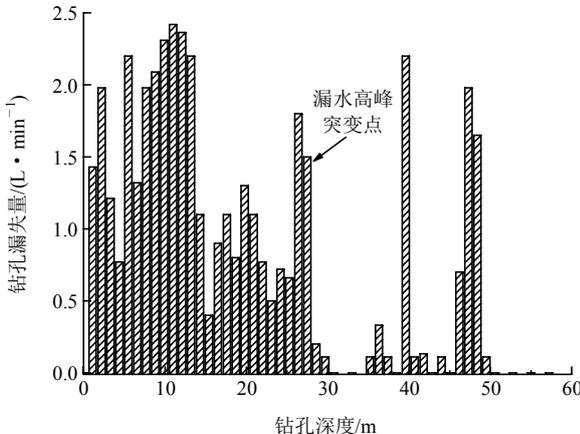
5.3 实测结果与分析

对现场观测数据进行整理统计，并绘制钻孔漏失量成果图，如图 19 所示，分析可以得出：

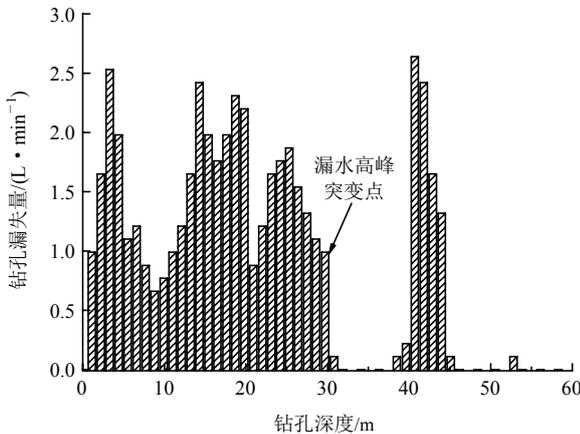
(1) 采前 1 号孔用来观察回采前工作面底板岩体状态，起到对比作用。在钻孔深度为 2~3 和 8~11 m 段呈现明显漏水状态，最大值约 2.2 L/min，根据漏水量及岩层分析，可能是受观测孔钻探或原生裂隙等影响所致。随钻孔深度增加，在 18~20, 35, 38 及 49 m 处依稀出现不连续漏水点，而其余漏水量近乎为 0，这表明底板深部宏观裂隙不发育，岩体相对连续完整。



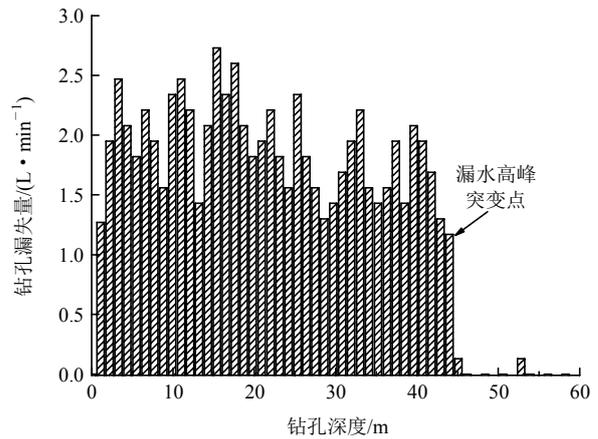
(a) 采前 1 号孔



(b) 采后 1 号孔



(c) 采后 2 号孔



(d) 采后 3 号孔

图 19 钻孔漏失量成果图

Fig.19 Results of water leakage in borehole

(2) 相对于采前 1 号孔而言，待工作面推过后，采后 1 号孔漏水量明显增加，在钻孔浅部 0~5 m 范围内，最大漏水量由 1.3 L/min 变为 2.0 L/min。受开采影响，底板岩体原有裂隙进一步扩展，在 0~30 m 范围内形成连续的漏水孔段。其中，在钻孔 7~13 m 段形成持续的漏水高位，其最大漏水量为 2.4 L/min，在钻孔 40 和 50 m 处漏水量由原来的 1.8 和 1.5 L/min 分别变为 2.2 和 2.0 L/min，而在钻孔 50 m 以远，漏水量为 0。虽然深部岩体出现零星漏水点，但是总体保持完整。因此，按照连续漏水段中漏水高峰突变点 27.5 m 和钻孔倾角 30° 计算，则采后 1 号孔实测底板连续破坏深度为 13.75 m。

(3) 观测数据表明采后 2 号孔的连续漏水段长度为 30 m，浅部岩体钻孔漏水量为 1~2.5 L/min；钻孔中部 20~30 m 段平均漏水量约为 1.3 L/min，此应为新增裂隙；深部岩体除部分漏水点外，其余区域孔段的漏水量趋近于 0。因此，按照连续漏水段中漏水高峰突变点 29.7 m 和钻孔倾角 20° 计算，则采后 2 号孔实测底板连续破坏深度为 10.16 m。

(4) 采后 3 号钻孔漏水量表明，受开采影响，底板岩体内部裂隙全部贯通，所形成的连续漏水段长度为 44 m，且漏水量全面增加，这是因为相对于其他钻孔而言，采后 3 号孔距工作面底板最近，所以遭受影响最为剧烈。因此，按照连续漏水段中漏水高峰突变点 44 m 和钻孔倾角 15° 计算，则采后 3 号孔实测底板连续破坏深度为 11.38 m。

综上，取实测连续破坏深度的最大值 13.75 m，作为 41503 工作面底板最大破坏深度可信度较高。考虑到安全因素，取承压含水层水压为 4 MPa，在隔水层完整无断裂构造破坏地段，突水系数按照 0.1

MPa/m 计算, 则采后突水系数为 0.11 MP/m, 已经达到了临界值, 突水危险性较大, 应采取底板注浆或其他措施, 降低突水系数至安全值以下。

6 结 论

(1) 考虑初次和周期来压时沿工作面倾向支承压力分布和承压水对底板的共同作用, 构建了底板弹性力学模型, 推导了底板应力分布解析解, 计算了垂直、水平及剪切应力系数等值线分布, 可知: 工作面两端垂直应力高度集中, 其应力集中程度及作用范围均明显大于水平应力的影响, 随深度增加, 水平应力系数等值线趋于缓和, 对应剪切应力系数等值线呈“反向对称螺旋状”分布, 与底板法线呈一定夹角斜向下方传播, 近似一正一负剪切力偶, 形成急剧剪切应力变化带, 促使底板裂纹产生压剪或拉剪破坏。

(2) 数值模拟得到承压水上开采沿工作面倾向底板破坏形态呈明显的“倒马鞍形”, 破坏模式为剪切破坏, 孔隙水沿底板递进导升, 易从工作面端部斜下方形成突水通道, 涌入工作面, 发生突水现象, 与理论计算得到底板剪切破坏特征相符合, 且模拟得到垂直应力、水平应力和剪切应力分布规律与理论计算结果一致。

(3) 通过原位测试对采场底板破坏范围进行探测, 得到破坏深度最大为 13.75 m, 与理论计算和数值模拟结果(分别为 12 和 12.875 m)大致相当, 验证了理论分析与数值计算研究方法在底板变形破坏问题上的研究是正确可行的。

(4) 本文谨从弹性力学角度构建力学模型, 对承压水上开采沿工作面倾向底板力学破坏特征做有益探讨, 其研究工作虽能在一定程度上解答承压水上开采煤层底板力学机制问题, 但相对于实际岩石工程或岩石破裂过程问题存在一定的局限性。

参考文献(References):

[1] 刘伟韬, 武 强. 深部开采断裂滞后突水机理及数值仿真技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2010: 2 - 5.(LIU Weitao, WU Qiang. Mechanism and numerical simulation technology of lagging water inrush in deep mining[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2010: 2 - 5. (in Chinese))

[2] 郭惟嘉, 刘伟韬, 张文泉. 矿井特殊开采[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008: 141 - 142.(GUO Weijia, LIU Weitao, ZHANG Wenquan. Coal special mining[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House,

2008: 141 - 142.(in Chinese))

[3] 王连国, 韩 猛, 王占盛, 等. 采场底板应力分布与破坏规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3): 317 - 322.(WANG Lianguo, HAN Meng, WANG Zhansheng, et al. Stress distribution and damage law of mining floor[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3): 317 - 322.(in Chinese))

[4] 孟祥瑞, 徐铨辉, 高召宁, 等. 采场底板应力分布及破坏机制[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1 832 - 1 836.(MENG Xiangrui, XU Chenghui, GAO Zhaoning, et al. Stress distribution and damage mechanism of mining floor[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1 832 - 1 836.(in Chinese))

[5] 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 Zhengquan, 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))

[6] 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 - 292.(ZHANG Hualei, WANG Lianguo. Computation of mining induced floor additional stress and its application[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 288 - 292.(in Chinese))

[7] 鲁海峰, 姚多喜. 采动底板层状岩体应力分布规律及破坏深度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2 030 - 2 039.(LU Haifeng, YAO Duoxi. Stress distribution and failure depths of layered rock mass of mining floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2 030 - 2 039.(in Chinese))

[8] 刘伟韬, 刘士亮, 姬保静. 基于正交试验的底板破坏深度主控因素敏感性分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 1 995 - 2 001.(LIU Weitao, LIU Shiliang, JI Baojing. Sensitivity analysis of controlling factors on failure depth of floor based on orthogonal experiment[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 1 995 - 2 001.(in Chinese))

[9] 刘伟韬, 穆殿瑞, 杨 利, 等. 倾斜煤层底板破坏深度计算方法及主控因素敏感性分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 849 - 859.(LIU Weitao, MU Diantui, YANG Li, et al. Calculation method and main factor sensitivity analysis of inclined coal floor damage depth[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 849 - 859.(in Chinese))

[10] 张文彬. 综采放顶煤工作面底板应力及其破坏深度分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(12): 17 - 21.(ZHANG Wenbin. Analysis on floor stress and failure depth of fully mechanized top coal caving mining face[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(12): 17 - 21.(in Chinese))

[11] 张平松, 吴基文, 刘盛东. 煤层采动底板破坏规律动态观测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 1): 3 009 - 3 013.(ZHANG Songping, WU Jiwen, LIU Shengdong. Study on dynamic observation of coal seam floor's failure law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 009 - 3 013.(in Chinese))

- [12] 孙建, 王连国, 唐芙蓉, 等. 倾斜煤层底板破坏特征的微震监测[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1 589 - 1 595.(SUN Jian, WANG Lianguo, TANG Furong, et al. Microseismic monitoring failure characteristics of inclined coal seam floor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1 589 - 1 595.(in Chinese))
- [13] 熊祖强, 王晓蕾. 承压水上工作面破坏及裂隙演化相似模拟试验[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1 114 - 1 120.(XIONG Zuqiang, WANG Xiaolei. Similar simulation for breakage law and cracks evolution of working face in coal mining above aquifer[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1 114 - 1 120.(in Chinese))
- [14] 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): 1 571 - 1 578.(JIANG Yaodong, LV 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): 1 571 - 1 578.(in Chinese))
- [15] 冯梅梅, 茅献彪, 白海波, 等. 承压水上开采煤层底板隔水层裂隙演化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 336 - 341.(FENG Meimei, MAO Xianbiao, BAI Haibo, et al. Experimental research on fracture evolution law of water-resisting strata in coal seam floor above aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 336 - 341.(in Chinese))
- [16] 刘伟韬, 宋文成, 穆殿瑞, 等. 底板采动破坏带分段观测系统与应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(10): 2 808 - 2 816.(LIU Weitao, SONG Wencheng, MU Dianrui, et al. Section observation system on floor mining damage zone and its application[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(10): 2 808 - 2 816.(in Chinese))
- [17] 高召宁, 孟祥瑞, 李英明. 煤层底板采动应力效应及其力学作用机制研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(4): 201 - 205.(GAO Zhaoning, MENG Xiangrui, LI Yingming. Effects of coal-mining on the bottom floor stress and its kinetic mechanism[J]. Journal of Safety and Environment, 2011, 11(4): 201 - 205.(in Chinese))
- [18] 孙建. 沿煤层倾斜方向底板“三区”破坏特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 115 - 121.(SUN Jian. Failure characteristics of floor “three-zone” along the inclined direction of coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(1): 115 - 121.(in Chinese))
- [19] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 72 - 76.(XU Zhilun. Concise tutorial on elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 72 - 76.(in Chinese))
- [20] 谭云亮, 吴士良, 尹增德, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008: 19 - 21.(TAN Yunliang, WU Shiliang, YIN Zengde, et al. Ground press and strata control[M]. Beijing: Coal Industry Publishing House, 2008: 19 - 21.(in Chinese))
- [21] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91 - 99.(ZHOU Hongwei, XIE Heping, ZUO Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 91 - 99.(in Chinese))
- [22] 张金才. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 19 - 21.(ZHANG Jincai. Rock mass seepage and water inrush from seam floor[M]. Beijing: Geological Press, 1997: 19 - 21.(in Chinese))
- [23] 张黎明, 王在泉, 孙辉, 等. 岩石卸荷破坏的变形特征及本构模型[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1 626 - 1 631.(ZHANG Liming, WANG Zaiquan, SUN Hui, et al. Failure characteristics and constitutive model of rock under unloading condition[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1 626 - 1 631.(in Chinese))
- [24] 代革联, 杨韬, 郭国强, 等. 带压开采首采工作面底板破坏深度研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 56 - 60.(DAI Gelian, YANG Tao, GUO Guoqiang, et al. Study on failure depth of seam floor in first coal mining face with pressurized mining[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 56 - 60.(in Chinese))
- [25] 徐智敏. 深部开采底板破坏及高承压突水模式、前兆与防治[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1 421 - 1 422.(XU Zhimin. Mining-induced floor failure and the model, precursor and prevention of confined water inrush with high pressure in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1 421 - 1 422.(in Chinese))
- [26] 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: 自然科学版, 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 and Technology: Natural Science, 1999, 18(4): 11 - 18.(in Chinese))
- [27] 刘再斌, 靳德武. 华北型煤田下组煤开采围岩破坏规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(7): 24 - 27.(LIU Zaibin, JIN Dewu. Study on surrounding rock failure laws of mining lower group coal seam in north china coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(7): 24 - 27.(in Chinese))
- [28] 刘伟韬, 王东辉, 穆殿瑞. 深部承压水上开采煤层底板破坏特征[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2017, 36(9): 920 - 926.(LIU Weitao, WANG Donghui, MU Diantui. Failure characteristics of coal seam floor in deep confined water[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2017, 36(9): 920 - 926.(in Chinese))