

程辉,赵洪宝,徐建峰,等. 基于滑移线场理论的巷道底鼓机理与防治技术研究[J]. 矿业科学学报,2021,6(3):314-323. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2021.03.008

Cheng Hui,Zhao Hongbao,Xu Jianfeng,et al. Study on floor heave mechanism and control technology of roadway based on slip line field theory[J]. Journal of Mining Science and Technology,2021,6(3):314-323. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2021.03.008

# 基于滑移线场理论的巷道底鼓机理与防治技术研究

程辉,赵洪宝,徐建峰,秦逢缘,张一潇,胡林枫

中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083

**摘要:**基于滑移线场理论对巷道底板岩层建立滑移线场模型,以山西焦煤回坡底煤矿1021巷为工程背景,研究了巷道非对称性底鼓机理,并提出了合理的底鼓防治技术。研究表明,巷道底板滑移线应力场中存在均匀应力场与非均匀应力场,从两帮往巷道中心线处,底板应力逐渐减小;底板滑移线主动区速度垂直向下,过渡区受主动区挤压而发生旋转并挤压被动区,被动区向上运动,从而产生巷道底鼓现象。回坡底煤矿1021巷由于受到孤岛煤柱应力集中作用,巷道两帮支承压力呈非对称分布,靠近煤柱一侧的高支承压力在底板形成滑移线场,其速度场方向指向远离煤柱一侧巷帮,因此1021巷底鼓现象具有明显的非对称性分布特征,远离煤柱一侧底鼓量较大。针对1021巷滑移型底鼓特征,采用单体锚索平行布置的非对称性支护进行巷道底鼓防治,现场应用效果良好。

**关键词:**巷道底鼓;滑移线场;支承压力;底鼓防治

中图分类号:TD 3

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2021)03-0314-09

## Study on floor heave mechanism and control technology of roadway based on slip line field theory

Cheng Hui ,Zhao Hongbao ,Xu Jianfeng ,Qin Fengyuan ,Zhang Yixiao ,Hu Linfeng

School of Energy and Mining Engineering,China University of Mining and Technology-Beijing,Beijing 100083,China

**Abstract:**Based on the slip line field theory,the slip line field model of roadway floor is established.Taking 1021 roadway of Huipodi coal mine in Shanxi Province as the engineering background,the mechanism of asymmetric floor heave of roadway is studied,and the reasonable prevention and control technology of floor heave is put forward.The results show that:There are uniform stress field and non-uniform stress field in the stress field of roadway floor slip line.From the two sides to the center line of the roadway,the floor stress decreases gradually;The velocity of the active zone of the floor slip line is vertical downward.The transition zone rotates and compresses the passive zone due to the extrusion of the active zone.The passive zone moves upward,resulting in floor heave.Due to the stress concentration of isolated pillar in Huipodi coal mine,the abutment pressure on both sides of the roadway is asymmetric.The abutment pressure near the coal pillar forms a slip line field on the floor,and the direc-

收稿日期:2020-11-13 修回日期:2021-01-20

基金项目:越崎杰出学者计划(800015Z1179);国家自然科学基金(51474220);中央高校基本科研业务费专项资金(2020YJSNY07)

作者简介:程辉(1996—),男,广西梧州人,博士研究生,主要从事矿山岩体力学与巷道围岩控制等方面的研究工作。Tel:18810019869,E-mail:hui1280@126.com

通信作者:赵洪宝(1980—),男,山东德州人,教授,博士生导师,主要从事矿山岩体力学等方面的教学与研究工作。Tel:13426079538,E-mail:hongbaozhao@126.com

tion of the velocity field points to the side of the roadway far away from the pillar. Therefore, the floor heave of 1021 roadway is asymmetric, and the floor heave height at the side far away from the pillar is larger. According to the characteristics of sliding floor heave in 1021 roadway, asymmetric support with parallel arrangement of single anchor cable is adopted to prevent floor heave of roadway, and the application effect is good.

**Key words:** floor heave of roadway; slip line field; abutment pressure; prevention and control of floor heave

随着我国煤炭资源开采逐渐由浅部转入深部,在高应力作用下巷道发生底鼓的可能性大大增加。巷道底鼓直接影响矿井的正常生产,不合理的底鼓治理技术也会耗费大量的人力、物力。研究巷道底鼓发生机理以及防治技术对于保障煤矿正常生产具有重要意义。

针对巷道底鼓发生机理,诸多学者进行了较为深入的研究。柏建彪等<sup>[1]</sup>运用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件确定了巷道底鼓发生时底板存在着“两点三区”,即零位移点、零应变点,并以这两点将采动巷道底板从上向下分为拉应变上升区、拉应变压缩区、压应变压缩区;孙利辉等<sup>[2]</sup>认为深部巷道强烈底鼓是由高地应力、岩石内黏土矿物遇水膨胀、支护结构不合理等综合因素影响造成的,并通过相似模拟试验确定了底板锚索束+底板浅部、深部注浆的综合底鼓控制技术;孙晓明等<sup>[3]</sup>基于欧拉公式,利用压杆稳定理论、莫尔库仑准则和挠曲破坏力学模型,分析了不同层状岩体巷道变形破坏机理;曹平等<sup>[4]</sup>将底板受水平应力挤压变形简化为受轴向力作用的板状材料力学模型,运用弹性力学得出底板岩层应力状态;王卫军等<sup>[5]</sup>认为回采巷道两帮煤体的强度对巷道底鼓产生重要影响,煤体强度较大的回采巷道两帮破坏范围较小,底板鼓起的范围随之减小,因而底鼓量较小,反之底鼓量较大,并在工程实践中得以验证;李传明等<sup>[6]</sup>认为薄分层软弱底板巷道围岩在支护体作用下形成“组合岩梁”,破坏形式从单层层压曲破坏转变为整体“组合岩梁”破坏;康红普等<sup>[7]</sup>运用弹性薄板理论对巷道底鼓进行了分析,认为巷道发生底鼓的主要原因是底板受到水平应力挤压而发生挠曲;江东海等<sup>[8]</sup>运用3DEC软件建立了复杂节理岩体巷道模型,深入探究了复杂节理岩体巷道非对称底鼓机制并给出相应控制对策;王晓卿等<sup>[9]</sup>以潘一东矿带式输送机大巷为研究对象,采用数值模拟研究了巷道底鼓机理,并提出以端锚锚索束为主的底鼓控制方案;李新旺等<sup>[10]</sup>针对不同侧压系数条件下巷道底板变形特征、底板岩层破坏规律进行了深入分析。

前人研究成果对巷道底鼓防治具有一定的指导作用,但对于滑移型底鼓发生机理与防治技术的研究,仍有待于深入开展。本文基于前人研究成果,采用滑移线场理论深入探究巷道底鼓发生机理,并以山西焦煤回坡底煤矿1021巷为工程背景,揭示其底鼓机理并提出针对性的底鼓防治技术,最终进行现场实践。本文研究内容对煤矿巷道底鼓机理与防治技术研究具有参考与借鉴作用。

## 1 巷道底板滑移线场模型

### 1.1 理论模型

井下巷道开挖后,围岩应力重新分布,巷道两帮形成支承压力的,若底板岩性较软,巷道底板会在两帮支承压力的作用下形成滑移线场<sup>[11]</sup>,其简化力学模型如图1所示。

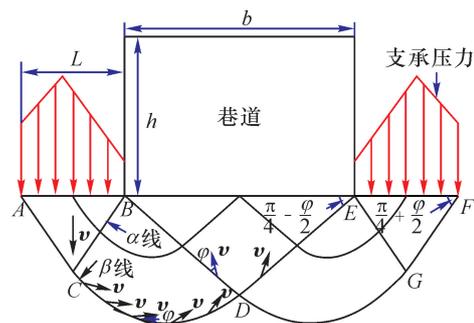


图1 底板滑移线场模型

Fig. 1 Floor slip line field model

图1中, $L$ 为巷道两帮支承压力的作用范围; $b$ 、 $h$ 分别为巷道宽度与高度; $v$ 为底板速度场任意一点的速度。

假设巷道底板的塑性滑移破坏符合Mohr-Coulomb准则且巷道底鼓问题属于平面应变问题,根据滑移线场理论,可知巷道两帮底板的极限承载力<sup>[12]</sup>为

$$q = c \cot \varphi \left[ \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \exp(\pi \tan \varphi) - 1 \right] \quad (1)$$

式中, $\varphi$ 为底板岩层内摩擦角; $c$ 为岩层黏聚力; $q$ 为底板极限承载力。

假设巷道两帮支承压力峰值为  $K\gamma H$ , 此时, 巷道底板发生塑性滑移的临界条件为

$$K\gamma H \geq c \cot \varphi \left[ \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \exp(\pi \tan \varphi) - 1 \right] \quad (2)$$

式中,  $K$  为巷道两帮支承压力峰值系数;  $\gamma$  为岩石容重;  $H$  为埋深。

### 1.2 底板滑移线应力场

根据应力场巷道底板滑移场可分为 3 个区域, 分别为主动应力场、过渡应力场和被动应力场。以图 1 为例,  $ABC$  区域为主动应力场,  $BCD$  区域为过渡应力场,  $BDE$  区域为被动应力场。

根据滑移线场理论, 滑移线可分为  $\alpha$  族和  $\beta$  族, 在  $BDE$  区域中,  $\alpha$  线和  $\beta$  线均为直线, 因此,  $BDE$  区域根据滑移线场基本性质可知, 该区域属于均匀应力场, 根据 Mohr-Coulomb 准则可得其平均应力为

$$\bar{p}_{BDE} = \frac{c \cot \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

在  $BCD$  区域, 该区域为蜕化的 Riemann 问题,  $B$  点为应力间断点, 且滑移线不全为直线, 滑移线的基本性质失效, 此时不能通过  $D$  点处的应力状态得出该区域内所有的应力状态。该区域内所有的  $\alpha$  线均为直线,  $\beta$  线是同心对数螺线。已知在  $BCD$  区域中,  $C$  点的应力状态<sup>[12-13]</sup>为

$$\bar{p}_C = \frac{c \cot \varphi}{1 - \sin \varphi} \exp(\pi \cot 2\mu) \quad (4)$$

式中,  $\mu$  为  $\alpha$  线与  $\beta$  线之间的夹角, 且  $\mu = \pi/4 - \varphi/2$ 。

结合扇形滑移线场中的平均应力关系式可得  $BCD$  区域中的任意一点应力状态为

$$\begin{aligned} \bar{p}_{BCD} &= \bar{p}_C \exp(-2\varphi \tan \varphi) \\ &= \frac{c \cot \varphi}{1 - \sin \varphi} \exp(\pi \cot 2\mu - 2\varphi \tan \varphi) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\varphi$  为  $\beta$  线上任意一点与  $BC$  线之间的夹角。

在  $ABC$  区域, 该区域内所有的  $\alpha$  族和  $\beta$  族均为直线, 因此  $ABC$  区域同样为均匀应力场。所以该区域内的应力状态即为  $C$  点应力状态, 即

$$\bar{p}_{ABC} = \frac{c \cot \varphi}{1 - \sin \varphi} \exp(\pi \cot 2\mu) \quad (6)$$

对比底板应力场应力可得

$$\bar{p}_{ABC} > \bar{p}_{BCD} > \bar{p}_{BDE} \quad (7)$$

由式(7)可知, 在巷道底板无支护条件下, 越靠近两帮下方的底板区域, 其应力集中程度越大;

远离两帮的底板区域, 应力集中程度越小。该规律符合现场实际规律。

### 1.3 底板滑移线速度场

$ABC$  区域因滑移线均为直线, 因此属于均匀速度场, 该区域内的合速度方向为垂直向下, 在该区域内沿着  $\alpha$  线和  $\beta$  线的速度为

$$v_\alpha = v_\beta = \frac{1}{2} \sec\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) v \quad (8)$$

在  $BCD$  区域, 沿着  $\alpha$  线和  $\beta$  线的速度<sup>[12-13]</sup>为

$$v_\alpha = 0 \quad (9)$$

$$v_\beta = \frac{1}{2} \cos \varphi \sec\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \exp\left\{\left[\left(\frac{3}{4}\pi - \frac{\varphi}{2}\right) + \theta - \mu\right] \cot 2\mu\right\}$$

式中,  $\theta$  为某点主应力切线方向与水平方向的夹角。

在滑移线场中, 滑移线即为速度间断线, 所以沿着  $\beta$  线的速度与滑移线之间存在大小为  $\varphi$  的夹角, 其速度矢量方向如图 1 所示。

$BDE$  区域与  $ABC$  区域相同, 亦为均匀速度场, 该区域速度场<sup>[12-13]</sup>为

$$\begin{aligned} v_\alpha &= 0 \\ v_\beta &= \frac{1}{2} \cos \varphi \sec\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \exp\left(\frac{\pi}{2} \cot 2\mu\right) \end{aligned} \quad (10)$$

同样,  $\beta$  线的速度方向与滑移线之间存在大小为  $\varphi$  的夹角。式(10)仅考虑单侧巷帮作用下的速度场。两帮作用下,  $BDE$  区域水平方向速度相互抵消, 而垂直方向速度为两帮作用下速度垂直分量的叠加。因此,  $BDE$  区域的垂直方向速度为

$$v = \cos \varphi \sec\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \exp\left(\frac{\pi}{2} \cot 2\mu\right) \quad (11)$$

通过上述对滑移线场的理论分析可知, 底板  $ABC$  区域在巷道两帮支承压力作用下, 速度方向向下, 呈下沉趋势。  $BCD$  区域岩体以  $B$  点为旋转点向巷道内部转动,  $BDE$  区域由于受到  $BCD$  区域岩体的旋转挤压, 产生了向上的速度, 从而发生底鼓现象。

采用 FLAC<sup>3D</sup> 对巷道底板速度场进行模拟验证, 因巷道变形属于平面应变问题, 数值模型尺寸设计为长 50 m、高 35 m、宽 2 m。模型总计 62 000 个单元, 75 978 个节点。模型包括 6 个煤岩层, 从下往上依次是中细砂岩 8 m、泥岩 7 m、煤层 6 m、油页岩 5 m、中细砂岩 5 m、粉砂岩 4 m, 如图 2 所示。模型顶部施加垂直应力 20 MPa, 为自由边界, 底部以及左右前后进行位移约束, 为固定边界。模

拟采用 Mohr-Coulomb 模型进行计算。运算平衡后的模型沿煤层底板开挖 4 m×3.5 m(宽×高)的矩形巷道,再次运算至平衡。各岩层具体物理力学参数见表 1。

数值模拟结果如图 3 所示,由图 3 可以看出,两帮下底板 1 区域速度竖直向下,导致 2 区域的岩体产生旋转的速度矢量,3 区域岩体在两侧岩体的旋转挤压下发生底鼓现象,产生垂直向上的速度(图 3 中红色箭头代表底板不同区域整体的速度方向)。可以看出,数值模拟结果与理论结果保持一致,验证了理论分析的正确性。

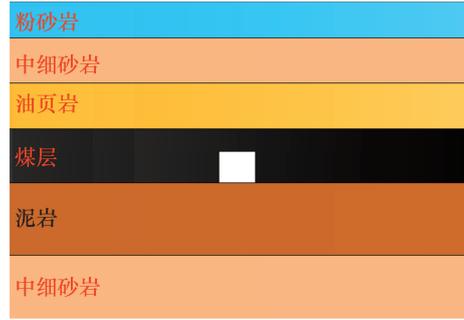


图 2 数值模型岩层分布

Fig. 2 Numerical model of strata distribution

表 1 岩层物理力学参数

Tab. 1 Rock physical and mechanical parameters

岩性	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	2 600	4. 40	2. 90	2. 00	3. 15	28
中细砂岩	2 750	6. 74	4. 35	3. 15	3. 5	33
油页岩	2 140	1. 53	0. 76	1. 60	1. 2	22
煤层	2 000	2. 58	1. 19	1. 28	1. 5	35
泥岩	2 360	1. 36	0. 64	0. 50	0. 8	20
中细砂岩	2 750	6. 74	4. 35	2. 20	3. 5	33

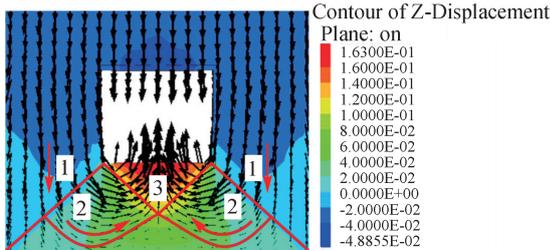


图 3 滑移线速度场模拟结果

Fig. 3 Simulation results of slip line velocity field

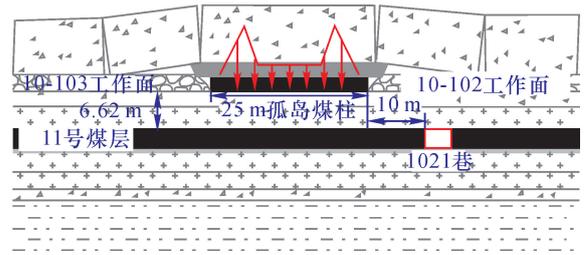


图 4 工作面与巷道位置布置图

Fig. 4 Layout of working face and roadway

## 2 工程实例

### 2.1 工程背景

山西焦煤回坡底煤矿主采 10 号与 11 号煤层,煤层平均厚度 10 号为 2. 65 m、11 号为 3. 2 m,两层煤之间平均间距为 6. 62 m,属于近距离煤层开采。本文所研究巷道为东一采区 11-102 工作面 1021 运输巷。1021 巷所处位置如图 4 所示。

1021 巷宽 4. 6 m、高 3. 3 m、埋深 560 m。根据矿方地应力报告显示,1021 巷所受垂直应力约为 14 MPa,整条巷道平均侧压系数约为 1. 5。其上方为 10 号煤层 10-102 工作面,该工作面现场监测时期已全部采空。与 10-102 工作面相邻的是 10-103 工作面,正处于回采阶段,随着 10-103 工作面不断推进,两个工作面之间的区段煤柱逐渐演化为

孤岛煤柱,煤柱平均宽度为 25 m,1021 巷与煤柱边缘距离 10 m。1021 巷直接底为 0. 8 m 铝质泥岩,基本底为 3 m 泥岩,底板为裸露状态,无任何支护措施。巷道布置在采空区下方的卸压区,原本应有利于巷道维稳,但在实际现场中发生了较为严重的底鼓现象,最大底鼓量达到 1 m。回坡底煤矿面对严重的巷道底鼓现象,反复采用卧底法进行治理,但该方法治标不治本,巷道底鼓现象并没有得到解决。同时,还消耗了大量的人力、物力,严重影响矿井的正常生产。

### 2.2 底鼓机理研究

从图 4 可知,10 号煤层孤岛煤柱由于两侧采空,必然会形成高支撑压力,因此煤柱下方底板会形成一定程度的应力集中,造成 1021 巷围岩应力

环境的改变,导致巷道出现严重的底鼓现象<sup>[14]</sup>。基于滑移线场理论已知巷道两帮支承压力分布对巷道底鼓有直接影响,因此,探究巷道两帮支承压力分布对掌握1021巷底鼓机理有重要意义。

1021巷两帮支承压力由巷道开挖引起的围岩应力和煤柱引起的应力集中叠加而成。已知巷道开挖引起的围岩应力<sup>[15-17]</sup>为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x)\left(1 - 4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \\ \sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y)\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x)\left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\left(1 + 2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right)\sin 2\theta \end{cases} \quad (12)$$

$$R = \sqrt{(b^2 + h^2)}/4$$

式中, $R$ 为巷道几何当量半径; $r$ 为围岩距巷道中心的距离; $\theta$ 为围岩单元与水平方向应力的夹角; $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\tau_{r\theta}$ 分别为巷道围岩单元所受到的径向应力、切向应力、剪应力。

孤岛煤柱支承压力在10号煤层底板引起的应力集中可由弹性力学半平面无限体计算得到,其基本公式<sup>[18-20]</sup>为

$$\begin{cases} \sigma_x = \lambda\gamma H + \Delta\sigma_x = \lambda\gamma H - \frac{2}{\pi} \int_{-a}^b \frac{q(\xi)y(x-\xi)^2}{[y^2 + (x-\xi)^2]^2} d\xi \\ \sigma_y = \gamma H + \Delta\sigma_y = \gamma H - \frac{2}{\pi} \int_{-a}^b \frac{q(\xi)y^3}{[y^2 + (x-\xi)^2]^2} d\xi \\ \Delta\tau_{xy} = -\frac{2}{\pi} \int_{-a}^b \frac{q(\xi)y^2(x-\xi)}{[y^2 + (x-\xi)^2]^2} d\xi \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ 分别为孤岛煤柱在底板引起的水平应力、垂直应力与切应力; $\lambda$ 为侧压系数; $\xi$ 为底板任意一点处微单元与原点的距离。

为准确探究孤岛煤柱支承压力分布规律,采用FLAC<sup>3D</sup>模拟10号煤层孤岛煤柱的支承压力分布情况,建立如图5所示的数值模型。模型尺寸为474 m×100 m×135 m(长×宽×高),共计5 498 400个单元,5 663 676个节点。模型顶部施加12.25 MPa的应力,侧压系数设置为1.5,模型底部设置垂直方向位移约束,为固定边界,模拟采用Mohr-Coulomb模型进行计算。模型初始平衡后开挖10-102与10-103工作面,工作面长度均为200 m,开挖后继续运算直至模型重新平衡。岩层力学参数见表2。

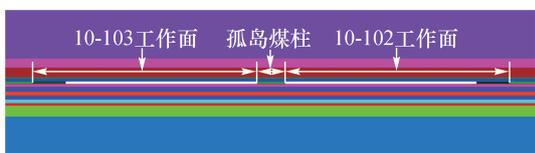


图5 数值模拟计算模型  
Fig. 5 Numerical simulation model

根据模拟结果,提取孤岛煤柱支承压力分布结果,如图6所示。

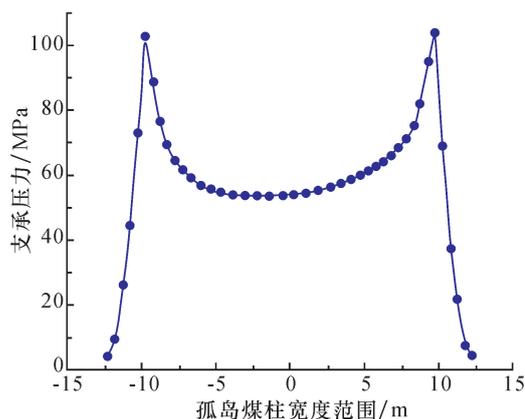


图6 孤岛煤柱支承压力分布结果  
Fig. 6 Abutment pressure distribution results of isolated coal pillar

基于图6,取孤岛煤柱支承压力的应力增量进行数学拟合,得到支承压力分段拟合方程;煤柱两侧采空区支承压力,根据现场经验假设从煤柱边缘至采空区内部10 m范围内达到原岩应力状态,便可得到其应力增量函数。将函数分别代入式(13)中叠加,计算得到不考虑巷道开挖情况下孤岛煤柱在底板引起的垂直应力分布,如图7所示。

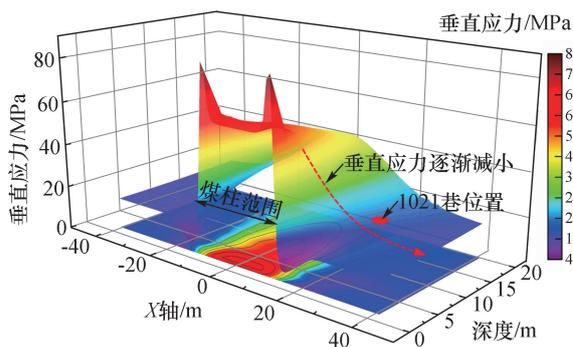


图7 孤岛煤柱引起的底板垂直应力分布  
Fig. 7 Vertical stress distribution of floor caused by island coal pillar

表2 回坡底煤矿岩层物理力学参数

Tab.2 Rock physical and mechanical parameters of Huipodi coal mine

岩层	厚度/m	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)
上覆岩层	46	2 460	10.80	8.13	7.80	5.40	38
粉砂岩	8	2 680	5.60	4.2	5.20	1.40	29
K <sub>2</sub> 灰岩	8.9	2 800	5.57	4.53	5.40	3.80	27
9号煤层	1	1 400	2.08	0.54	1.20	0.64	20
泥岩	2.3	2 600	2.91	1.50	2.00	2.10	32
10号煤层	2.65	1 420	2.50	1.72	2.00	1.00	21
粉砂岩	2.82	2 680	5.60	4.20	5.10	1.40	29
泥岩	3.8	2 461	6.08	3.47	3.00	0.60	28
11号煤层	3.2	1 423	2.50	1.72	2.40	1.20	29
铝质泥岩	0.8	2 100	2.60	1.80	2.65	2.00	25
泥岩	3	2 461	6.08	3.47	3.00	0.60	28
粉砂岩	2.53	2 680	5.60	4.20	5.10	1.40	29
铝质泥岩	3	2 981	2.17	1.00	2.40	0.90	25
石英砂岩	2	2 650	3.05	1.92	4.30	1.60	27
粉砂岩	10	2 680	5.57	4.20	5.10	1.40	29
下部岩体	35	2 680	5.60	4.18	5.20	1.50	30

由图7可以看出,孤岛煤柱应力集中导致底板垂直应力显著增大,且以煤柱中心线为轴呈对称性分布;距离煤柱边缘越远,垂直应力越小;1021巷两帮支承压力分布,如图8所示。

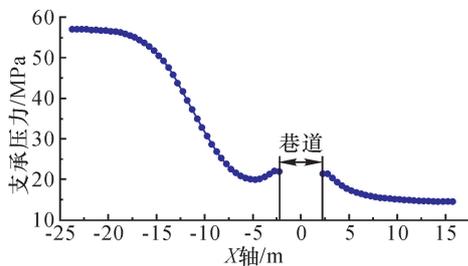


图8 巷道两帮支承压力分布规律

Fig.8 Distribution law of abutment pressure on both sides of roadway

由图8可以看出,巷道两帮支承压力呈现明显的非对称分布,靠近煤柱一侧巷帮支承压力较大,远离煤柱一侧支承压力较小,两者数值上相差4.07倍,非对称性的支承压力分布与1021巷底鼓特征有直接关系。

已知巷道底板在两帮支承压力作用下产生滑

移线场,且支承压力越大,底板滑移线场范围越广,速度场也就占据主导优势。从1021巷两帮支承压力分布情况来看,靠近孤岛煤柱一侧支承压力远大于另一侧,若考虑应力增量在巷道底板引起的滑移线场,远离煤柱一侧巷帮支承压力在底板引起的滑移线场可以忽略。因此,1021巷底板滑移线场模型如图9所示。

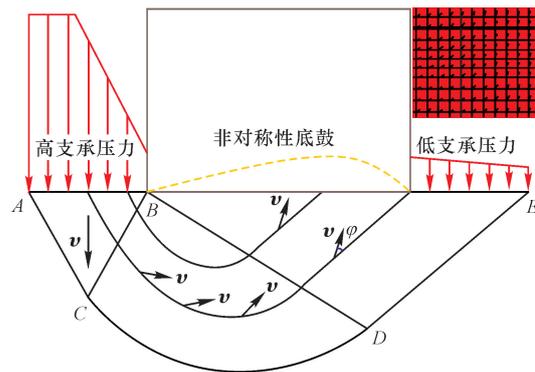


图9 1021巷底板滑移线场模型

Fig.9 Slip line field model of 1021 roadway floor

1021 巷底板滑移线场主要由靠近煤柱一侧巷帮的高支撑压力引起,底板滑移线同样存在主动区(ABC 区域)、过渡区(BCD 区域)、被动区(BDE 区域),ABC 区域由于高支撑压力作用,其速度场垂直向下,挤压过渡区 BCD 区域使该区域以 B 为基点,向巷道内部转动并挤压 BDE 区域,BDE 区域速度方向与滑移线夹角为  $\varphi$ ,其速度场整体方向指向远离煤柱一侧巷帮。理论分析结果与 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟结果基本保持一致,验证了理论分析的正确性。

基于上述分析可知,1021 巷底鼓现象将会呈现出明显的非对称性分布,远离煤柱一侧底板底鼓量较大,靠近煤柱一侧底鼓量较小。该结论与 1021 巷现场实际情况相吻合。因此,针对 1021 巷底鼓防治技术,应考虑其非对称性分布特征。

### 2.3 底板破坏深度研究

巷道底板破坏深度是底鼓防治技术确定的重要依据,假设巷道底板破坏满足 Mohr-Coulomb 准则,其基本原理如图 10 所示。

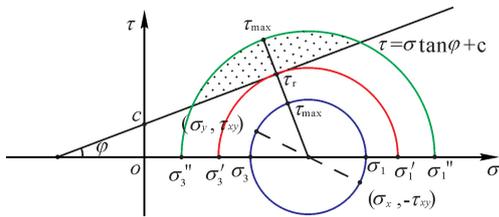


图 10 Mohr-Coulomb 准则  
Fig. 10 Mohr Coulomb criterion

由图 10 可知,若知道底板任意一点应力状态,便可确定其莫尔圆,  $\tau_{max}$  为该单元的最大剪应力,  $\tau_r$  为单元实际的抗剪强度。若  $\tau_{max} < \tau_r$ ,则认为单元不发生破坏;反之,则发生破坏。因此,定义底板破坏准则为

$$F(x, y) = \tau_r - \tau_{max}$$

$$= \left[ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{c}{\tan \phi} \right] \sin \phi - \sqrt{\left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

(14)

图 8 中已知 1021 巷两帮支撑压力分布,以巷道为中心建立直角坐标系,取两帮支撑压力增量进行拟合,便得到分段拟合方程;底板黏聚力  $c=2.8 \text{ MPa}$ ;内摩擦角  $\varphi=28^\circ$ 。在 matlab 软件中将分段拟合方程代入式(13)计算得到巷道底板应力分布,再将底板黏聚力与内摩擦角代入式(14),计算得到巷道底板破坏云图如图 11 所示。

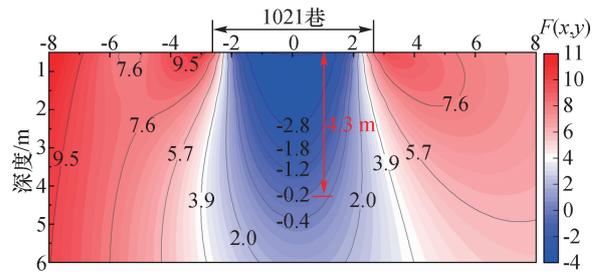


图 11 1021 巷道底板破坏云图  
Fig. 11 1021 roadway floor failure

由图 11 可以看出,巷道在两帮支撑压力作用下,1021 巷底板最大破坏深度可达 4.3 m,该计算结果与回坡底煤矿底板钻孔窥视结果较为吻合,一定程度说明了理论解算的正确性。

### 3 底鼓防治技术研究

针对 1021 巷非对称底鼓特征,结合回坡底实际情况,将巷道底板由原来的无支护方案调整为单体锚索平行布置的非对称支护,支护设计如图 12 所示。该支护方案中,锚索采用该矿原先使用的  $\phi 18.9 \text{ mm} \times 6 \text{ 000 mm}$  高强度弹性松弛钢绞线,已知底板最大破坏深度为 4.3 m,因此该锚索支护具有较好的着力点。同时,锚索重点在巷道底鼓量较大一侧进行支护,间排距  $1 \text{ 200 mm} \times 1 \text{ 800 mm}$ ,巷道中心线处锚索垂直底板支护,远离巷道中心线处的锚索则与垂直方向之间夹角约为  $20^\circ$ ,通过锚固作用抵抗巷道底板滑移。

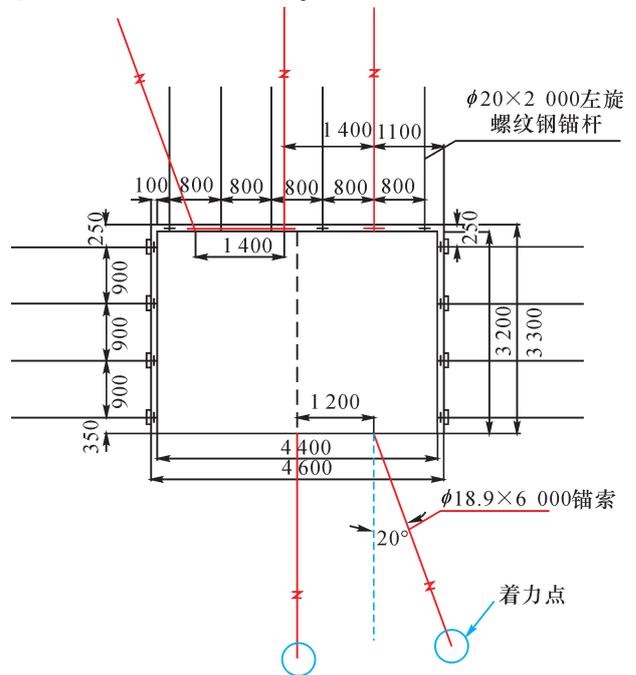


图 12 1021 巷底鼓防治方案  
Fig. 12 Prevention and control scheme of roadway floor heave

回坡底煤矿在 1021 巷划分一定长度巷道作为试验区对图 12 支护方案进行了工业性试验,调整了支护参数,并对巷道表面位移进行监测,监测结果显示巷道在 15 d 内围岩变形剧烈,之后逐渐平稳,最大底鼓量约为 90 mm,未出现较为明显的底鼓现象,巷道治理后整体效果如图 13 所示。



图 13 巷道底板支护后整体效果

Fig. 13 Effect of roadway floor support

#### 4 结 论

(1) 巷道底板滑移线应力场中存在着均匀应力场与非均匀应力场,且底板应力从两帮处往巷道底鼓中心线处逐渐减小。均匀应力场速度方向为垂直向下,非均匀应力场速度沿切线方向,巷道底板中部岩体受到两侧岩体的旋转挤压从而向上运动,产生底鼓现象。

(2) 巷道两帮支承压力的分布对巷道底鼓有直接影响,回坡底煤矿 1021 巷两帮支承压力的分布呈现明显的非对称性分布,靠近孤岛煤柱一侧支承压力的分布较大,导致底板滑移线场呈非对称分布,基于滑移线场基本性质得出巷道底鼓会呈现非对称分布,最大底鼓量位置发生在远离煤柱一侧。

(3) 针对 1021 巷滑移型底鼓特征,提出了单体锚索平行布置的非对称支护方案,该底鼓防治技术现场应用效果良好。

#### 参考文献

[1] 柏建彪,李文峰,王襄禹,等. 采动巷道底鼓机理与控制技术[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(1):1-5.  
Bai Jianbiao, Li Wenfeng, Wang Xiangyu, et al. Mechanism of floor heave and control technology of roadway in-

duced by mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 1-5.

[2] 孙利辉,杨本生,孙春东,等. 深部软岩巷道底鼓机理与治理试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(2):235-242.

Sun Lihui, Yang Bensheng, Sun Chundong, et al. Experimental research on mechanism and controlling of floor heave in deep soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2): 235-242.

[3] 孙晓明,苗沛阳,申付新,等. 不同应力状态下深井水平层状软岩巷道底鼓机理研究[J]. 采矿与安全工程学报,2018,35(6):1099-1106.

Sun Xiaoming, Miao Peiyang, Shen Fuxin, et al. Study on floor heave mechanism of horizontal layered soft rock roadway in deep well under different stress states[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1099-1106.

[4] 曹平,李好月,钟涌芳,等. 深埋高侧压巷道底鼓机理分析及控制[J]. 中南大学学报:自然科学版,2017,48(2):457-464.

Cao Ping, Li Haoyue, Zhong Yongfang, et al. Mechanism and control of floor heave of deep buried roadway with high lateral pressure coefficient[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(2): 457-464.

[5] 王卫军,冯涛. 加固两帮控制深井巷道底鼓的机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(5):808-811.

Wang Weijun, Feng Tao. Study on mechanism of reinforcing sides to control floor heave of extraction opening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 808-811.

[6] 李传明,谢广祥,林远东,等. 巷道薄分层软弱底板围岩变形控制机理与支护实践[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(5):948-954.

Li Chuanming, Xie Guangxiang, Lin Yuandong, et al. Surrounding rock deformation control mechanism with thin-layered soft and weak floor in roadway and its supporting practice[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(5): 948-954.

[7] 康红普,陆士良. 巷道底鼓的挠曲效应及卸压效果的分析[J]. 煤炭学报,1992,17(1):37-52.

Kang Hongpu, Lu Shiliang. Analysis of floor heave in roadway due to deflecting and destressing effects[J]. Journal of China Coal Society, 1992, 17(1): 37-52.

[8] 江东海,李恭建,马文强,等. 复杂节理岩体巷道非均称底鼓机制及控制对策[J]. 采矿与安全工程学报,2018,35(2):238-244.

Jiang Donghai, Li Gongjian, Ma Wenqiang, et al. Mechanism of non-harmonious roadway floor heave in

- complex jointed rock mass and control measures [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35 (2): 238-244.
- [9] 王晓卿, 阚甲广, 焦建康. 高应力软岩巷道底鼓机理及控制实践 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34 (2): 214-220, 227.  
Wang Xiaoqing, Kan Jiaguang, Jiao Jiankang. Mechanism of floor heave in the roadway with high stress and soft rock and its control practice [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34 (2): 214-220, 227.
- [10] 李新旺, 孙利辉, 杨本生, 等. 巷道底板软弱夹层厚度对底鼓影响的模拟分析 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34 (3): 504-510.  
Li Xinwang, Sun Lihui, Yang Bensheng, et al. Simulation of the influence of thickness of the weak interlayer on the floor heave of the roadway [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34 (3): 504-510.
- [11] 杨军, 高玉兵, 刘世奇, 等. 动压扰动采准巷道围岩失稳机理及控制研究 [J]. *矿业科学学报*, 2018, 3 (5): 451-460.  
Yang Jun, Gao Yubing, Liu Shiqi, et al. Study on failure mechanism and control techniques of the preparation roadway induced by dynamic mining disturbance [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 3 (5): 451-460.
- [12] 郑颖人, 龚晓南. 岩土塑性力学基础 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989: 232-249.
- [13] 张学言. 岩土塑性力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1993: 101-104.
- [14] 李臣, 李鹏, 鲁时雨, 等. 断层保护煤柱下采煤工作面保留巷道破坏分析及其控制 [J]. *矿业科学学报*, 2020, 5 (5): 519-527.  
Li Chen, Li Peng, Lu Shiyu, et al. Failure analysis and control of retained roadway at working face under protection coal pillar of the faults [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 5 (5): 519-527.
- [15] 尹光志, 鲁俊, 李星, 等. 真三轴应力条件下钻孔围岩稳定性及塑性区特性 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43 (10): 2709-2717.  
Yin Guangzhi, Lu Jun, Li Xing, et al. Stability and plastic zone characteristics of surrounding rock under true triaxial stress conditions [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43 (10): 2709-2717.
- [16] 尹光志, 鲁俊, 张东明, 等. 真三轴应力条件下钻孔围岩塑性区及增透半径研究 [J]. *岩土力学*, 2019, 40 (S1): 1-10.  
Yin Guangzhi, Lu Jun, Zhang Dongming, et al. Study on plastic zone and permeability - increasing radius of borehole surrounding rock under true triaxial stress conditions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40 (S1): 1-10.
- [17] 董海龙, 高全臣. 两向不等压巷道围岩塑性区解析的评估与改进 [J]. *矿业科学学报*, 2019, 4 (3): 213-220.  
Dong Hailong, Gao Quanchen. Evaluation and improvement on analysis of plastic zone in roadway surrounding rock under unequal compression in two directions [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 4 (3): 213-220.
- [18] 赵洪宝, 程辉, 李金雨, 等. 孤岛煤柱影响下巷道围岩非对称性变形机制研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39 (S1): 2771-2784.  
Zhao Hongbao, Cheng Hui, Li Jinyu, et al. Study on asymmetric deformation mechanism of surrounding rock of roadway under the effect of isolated coal pillar [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39 (S1): 2771-2784.
- [19] 宋文成, 梁正召, 刘伟韬, 等. 采场底板破坏特征及稳定性理论分析与试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38 (11): 2208-2218.  
Song Wencheng, Liang Zhengzhao, Liu Weitao, et al. Theoretical analysis and experimental investigation on failure characteristics and stability of stope floors [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38 (11): 2208-2218.
- [20] 宋文成, 梁正召. 承压水上开采倾斜底板破坏特征与突水危险性分析 [J]. *岩土力学*, 2020, 41 (2): 624-634.  
Song Wencheng, Liang Zhengzhao. Investigation on failure characteristics and water inrush risk of inclined floor mining above confined aquifer [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41 (2): 624-634.

(责任编辑: 陈骏)