



移动扫码阅读

陈新年,熊咸玉,王景春,等.直角梯形巷道围岩应力非对称特征数值模拟研究[J].煤炭科学技术,2019,47(4):57-62.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.04.010

CHEN Xinnian,XIONG Xianyu,WANG Jingchun,*et al.*Numerical simulation study on asymmetric characteristics of surrounding rock stress in right angle trapezoidal roadway[J].Coal Science and Technology,2019,47(4):57-62.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.04.010

直角梯形巷道围岩应力非对称特征数值模拟研究

陈新年¹,熊咸玉¹,王景春^{1,2},沈攀¹

(1.西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054;2.陕西省高速公路建设集团公司,陕西 西安 710065)

摘 要:针对石炭井二矿区倾斜煤层直角梯形巷道围岩出现非对称变形破坏,给巷道的稳定性控制和支护带来很大困难的问题,采用数值模拟方法,对该矿区巷道垂直应力、水平应力及水平位移进行了系统分析研究,给出了倾斜煤层直角梯形巷道围岩应力的分布规律及破坏特征。研究结果表明:巷道两帮、顶板及尖角处均呈现明显的非对称应力集中现象,主要表现为两帮应力集中峰值和距帮部侧壁的距离差异明显,并随着倾角和地应力增大而增大,当倾角为 $18^{\circ}\sim 27^{\circ}$,低帮应力集中峰值为高帮的1.07~1.33倍,高帮到巷道帮部侧壁的距离比低帮大1.26~3.79 m。其次沿煤层倾角相同方向对称的两尖角处表现为明显的压应力区,而相反方向两尖角处则表现为明显的拉应力区,且压应力和拉应力的最大值均出现在巷道顶板的两尖角处,其破坏特征表现为低帮一侧及底板严重的变形破坏。

关键词:倾斜煤层;直角梯形巷道;非对称特征;围岩应力

中图分类号:TD322 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2019)04-0057-06

Numerical simulation study on asymmetric characteristics of surrounding rock stress in right angle trapezoidal roadway

CHEN Xinnian¹,XIONG Xianyu¹,WANG Jingchun^{1,2},SHEN Pan¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Expressway Construction Group Company, Xi'an 710065, China)

Abstract: The asymmetric deformation and failure of surrounding rock of right angle trapezoidal roadway in the inclined coal seam of Shitanjing No.2 Mine resulted in much difficulty to the stability control and support of the roadway. Based on this, the numerical simulation method was adopted to make a systematic analysis of the vertical stress, the horizontal stress and the horizontal displacement of roadways and the distribution and failure characteristics of surrounding inclined coal seam right angle trapezoidal roadway were given. The results show that there are obvious asymmetric stress concentration phenomena in the two sides, roof and sharp corners of the roadway which features a sharp differences between the stress concentration peak distances of two sides and the distances from the sidewalls; the stress grows as the inclination and ground stress increase when the inclination angle is 18° to 27° , the peak stress concentration of the low side is 1.07 to 1.33 times higher than that of the high side and the distance from the high side to the side wall of the roadway side is 1.26 to 3.79 m higher than the distance from the low side. Next, the two symmetrical sharp corners along the same direction of the coal seam are characterized by obvious compressive stress zones; by contrast, the two sharp corners in the opposite direction show obvious tensile stress. The maximum values of compressive stress and tensile stress appear at the two sharp corners of the roof of the roadway and its failures are characterized by severe deformation and damage on the low side and the floor plate.

Key words: inclined coal seam; right angle trapezoid roadway; asymmetric characteristics; surrounding rock stress

收稿日期:2018-12-12;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11872299)

作者简介:陈新年(1960—),男,陕西合阳人,高级工程师,硕士生导师。E-mail:chenxinnian362@126.com

0 引言

随着21世纪我国东部优越的矿产资源日渐枯竭,产量萎缩,资源开采的重点加速向西部转移,煤炭资源的开采在西部地区经济建筑中具有举足轻重的地位^[1-2]。在西部地区倾斜煤层储量约占可采储量的10.1%左右,且煤质较好,具有很高的开采价值^[3-5]。但倾斜煤层开采过程中,由于倾角的影响导致巷道围岩应力呈现非对称分布特征,给巷道的稳定性控制和支护工程带来很大的困难^[6-9]。

国内外学者对倾斜煤层巷道围岩应力非对称分布特征的研究主要集中在大倾角、急倾斜煤层,且断面形式多为矩形巷道和拱形巷道。伍永平等^[10]对大倾角煤层坚硬顶板预裂弱化的数值分析,得出FLAC^{3D}数值模拟软件能较好地应用于现场;王红伟等^[11]对大倾角煤层开采进行大型三维可加载相似模拟试验研究,得出覆岩空间垮落呈非对称拱壳形态,上部区域应力值、来压强度、支承压力区应力集中系数等特征量明显大于下部区域;伍永平等^[12]分析了大倾角“三软”煤层回采巷道围岩变形破坏特征,巷道围岩应力分布及变形破坏呈现明显的非对称特征;唐治等^[13]对急倾斜煤柱开采后对巷道影响的数值模拟,得出结果和实际开采吻合较好,对煤矿开采有一定指导意义;包海玲等^[14]对深部倾斜巷道变形机理进行研究,得出巷道的顶板、两帮和底板应力集中差异明显,并随倾角的增大而增大;乔元栋^[15]研究了急倾斜煤层仰斜开采条件下上覆岩层的应力分布特征和破坏规律,得出急倾斜薄煤层仰斜开采实体煤侧和工作面前方均存在应力增高区;张玉军等^[16]对急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏特征进行分析,得出覆岩破坏最终发育形态呈明显的拱形,且偏于顶板一侧,覆岩垮落角将随着开采分层的增加而增大;张蓓等^[17]对不同岩层倾角下巷道围岩变形破坏进行了数值计算,得出巷道围岩变形破坏随着岩层倾角增加表现出明显的非对称性,提出了针对性的支护措施。但对不同倾角缓倾斜煤层直角梯形巷道的围岩非对称应力分布规律研究较少。因此,开展缓倾斜煤层直角梯形巷道围岩应力非对称特征数值模拟分析对倾斜煤层直角梯形巷道稳定性评价具有重要理论价值和实际应用意义。

在倾斜煤层中,巷道通常沿煤层顶板、中部及底板布置,巷道所处的位置不同,巷道的断面形式也不同。石炭井二矿区位于西部高山地区,是典型的缓倾斜煤层,倾角为18°~27°,可采煤层厚度为5.50~6.06 m,巷道沿煤层的顶板掘进,形成直角梯形巷道。笔者以石

炭井二矿区为工程背景,采用理论分析和FLAC^{3D}数值模拟计算方法对不同倾角倾斜煤层直角梯形巷道围岩应力非对称分布规律进行研究,为该地区倾斜煤层直角梯形巷道支护方案的选取提供科学依据。

1 巷道围岩应力非对称特征分析

众多学者研究发现^[18-20],倾斜煤层巷道开挖后,在上覆岩层荷载的作用下,巷道周围应力重分布呈现明显的非对称的特征,巷道两帮、顶板以及底板的应力分布差异明显。

由于煤层倾角的影响,作用在巷道两帮应力表现为沿煤层倾斜方向剪切应力 τ 和垂直于煤层方向压应力 σ_y 。使得高帮受到一个平行于煤体方向的拉伸力 σ_x ,而低帮受到一个挤压力 σ_x (图1)。

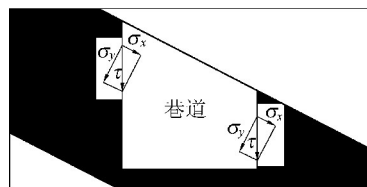


图1 巷道两帮围岩应力分解

Fig. 1 Stress decomposition of surrounding rock of two roadway-sides

这种不对称,非均质受力状态,导致低帮的应力集中峰值大于高帮,且巷道两帮应力集中峰值到帮侧的距离存在差异(图2)。

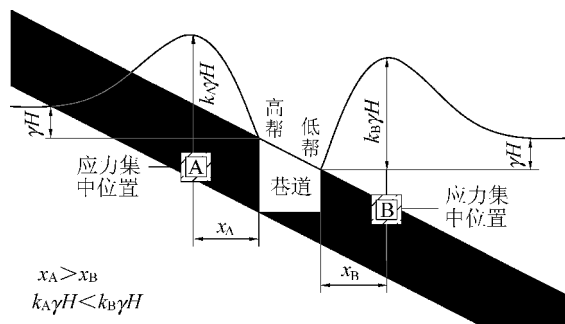


图2 巷道两帮围岩应力分布

Fig. 2 Stress distribution of surrounding rock of two roadway-sides

根据应力极限平衡区宽度计算公式可以计算出应力集中A区、B区与帮侧的距离为 x_A 、 x_B ,即

$$x_A = \frac{m_A f}{2 \tan \varphi_0} \ln \frac{(k_A \gamma H + C_0 / \tan \varphi_0)}{(C_0 / \tan \varphi_0 + P / f)} \quad (1)$$

$$x_B = \frac{m_B f}{2 \tan \varphi_0} \ln \frac{(k_B \gamma H + C_0 / \tan \varphi_0)}{(C_0 / \tan \varphi_0 + P / f)} \quad (2)$$

式中: x_A 、 x_B 为应力极限平衡区宽度; m_A 、 m_B 为巷道高度; f 为侧压系数; φ_0 为复合煤岩体内摩擦角; k_A 、 k_B 为应力集中系数; γ 为岩层平均容重; H 为煤层开采深度; C_0 为煤层与顶板岩层的黏聚力; P 为支架

对煤帮的支护阻力。

从公式中可以看出:应力集中区 A、B 与两帮的距离大小起关键作用的是巷道两帮的高度,对于倾斜煤层直角梯形巷道而言,由于两帮高度差异明显,所以高帮应力集中区到帮侧的距离比低帮大。

对于巷道顶板,应力分布也呈现明显的非对称的特征,即作用在巷道顶板的压应力向右侧(低帮)偏斜,且应力大于左侧(高帮),顶板左(高帮)尖角处出现压应力,右(低帮)尖角处出现拉应力,并随倾角的变化而变化(图 3)。

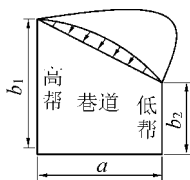


图3 巷道顶板应力分布

Fig. 3 Stress distribution at roof of roadway

尖角处应力其值为

$$\text{高帮: } \sigma' = \int_0^{b_1} 5ab_1 \gamma H dh \quad (3)$$

$$\text{低帮: } \sigma'' = \int_0^{b_1-b_2} 5a(6b_1 - b_2) \gamma H dh \quad (4)$$

式中: σ' 、 σ'' 为巷道顶板高帮侧、低帮侧尖角处的应力; a 为巷道的宽度; b_1 、 b_2 为巷道高帮、低帮的高度。

在两帮、顶板非对称应力作用下,巷道围岩变形破坏也呈现明显非对称特性,巷道两帮内挤、错位,严重鼓出,低帮的破坏大于高帮,巷道的低帮两尖角处破坏最为严重。

2 模型建立及参数选取

采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件,根据摩尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 准则建立计算模型,模型尺寸 36 m×5 m×36 m,4 个侧面采用法向约束,顶面即地表为应力和位移自由边界,底边界施加水平及垂直约束,模型的最上方为上覆岩层。建立倾角为 18°、21°、24°、27°等 4 个典型计算模型,分别施加为 5、10、15、20 MPa 的应力,分析直角梯形巷道围岩应力非对称分布特征。依据石炭井二矿区煤层地质条件选取围岩物理力学参数,见表 1。

表 1 煤岩数值模拟物理力学参数

Table 1 Numerical simulation of physical and mechanical parameters of coal and rock

层位	岩层	厚度/ m	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa
1	粉砂岩	4.6	8.49	6.47	32.1	5.70	3.77	115.00
2	中粒砂岩	4.0	10.11	7.27	37.0	11.80	2.78	103.00
3	泥岩	2.9	7.79	5.34	31.5	1.85	1.54	70.00
4	煤层	5.5	1.80	0.83	21.0	1.60	0.50	9.31
5	粉砂岩	9.2	8.49	6.47	32.1	5.70	3.77	103.00

3 数值模拟分析

3.1 巷道垂直应力分布特征

不同倾角倾斜煤层直角巷道在模拟地应力 2.5 MPa 作用下垂直应力如图 4 所示,从图 4 中可

知,巷道右帮(低帮)的应力集中大于左帮(高帮),左帮(高帮)的应力集中区到帮侧的距离大于右帮(低帮),巷道顶板应力集中偏向于右帮(低帮)一侧,而底板应力集中偏向于左帮(高帮)一侧,并随着倾角的变化而变化。

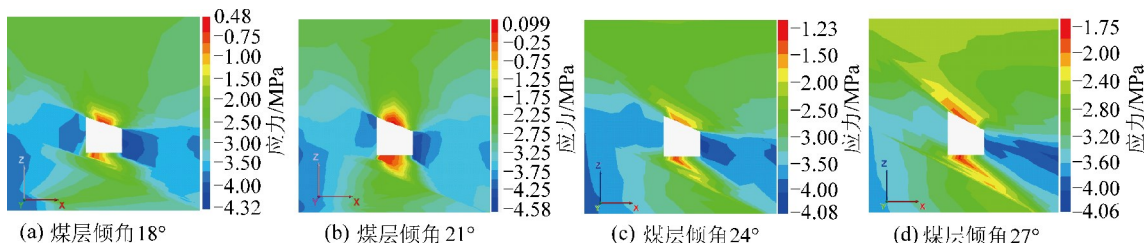


图4 巷道垂直应力

Fig. 4 Vertical stress of roadway

不同倾角倾斜煤层直角梯形巷道两帮的应力集中峰值随模拟地应力 q 的变化曲线如图 5 所示,从图 5 中可看出,巷道两帮的应力集中峰值,随着倾角

和地应力增大而增大,当倾角 18°~27°,低帮应力集中峰值为高帮的 1.07~1.33 倍。但在较小地应力作用下,两帮应力峰值差异不是十分明显,主要是倾角

对其的影响。

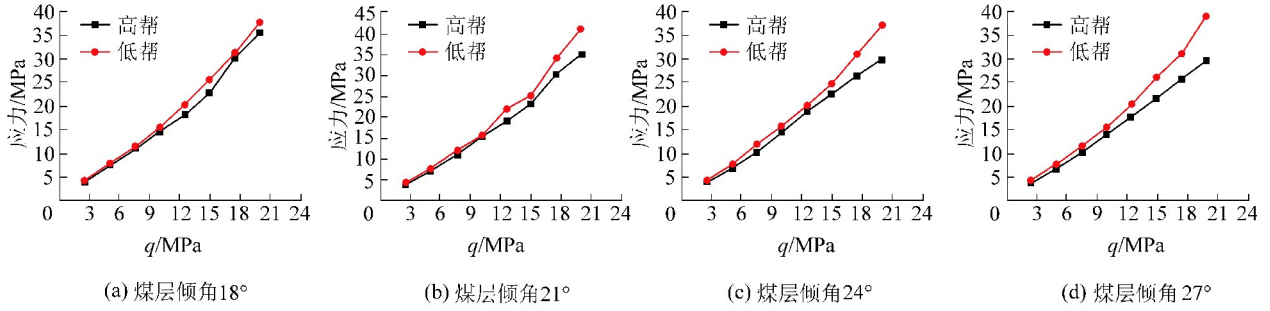


图5 巷道两帮应力集中峰值随地应力的变化对比

Fig. 5 Comparative analysis curves of peak stress with two sides of roadway

不同地应力作用下倾斜煤层直角梯形巷道两帮的应力集中峰值到帮侧距离 s 随倾角的变化曲线如图6所示,从图6可看出,巷道两帮应力集中峰值到帮侧的距离差异明显,并随着倾角和地应力增大而增大。当倾角 $18^\circ \sim 27^\circ$,高帮比低帮大 $1.26 \sim 3.79$ m。当地应力为 $10 \sim 20$ MPa,高帮比低帮大 $1.26 \sim 1.36$ m。但随着倾角的增大,巷道两帮应力集中到帮侧的距离越来越小。

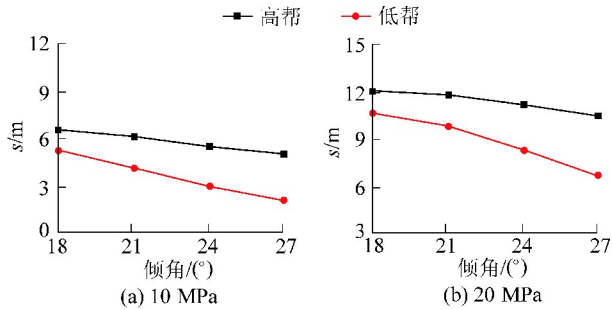


图6 巷道两帮应力集中峰值到帮侧距离随倾角的变化曲线

Fig. 6 Change curves of stress concentration peak to side distance of two sides of roadway with inclination angle

3.2 巷道水平应力分布特征

不同倾角倾斜煤层直角梯形巷道在模拟地应力 2.5 MPa 作用下水平应力如图7所示,从图7可知,与煤层倾角相同方向对称的两尖角处表现为明显的压应力区,而相反方向两尖角处则表现为明显的拉应力区,且压应力和拉应力的最大值均出现在巷道

顶板的两尖角处。随着倾角的增大,巷道低帮尖角处的应力集中也随之增大。

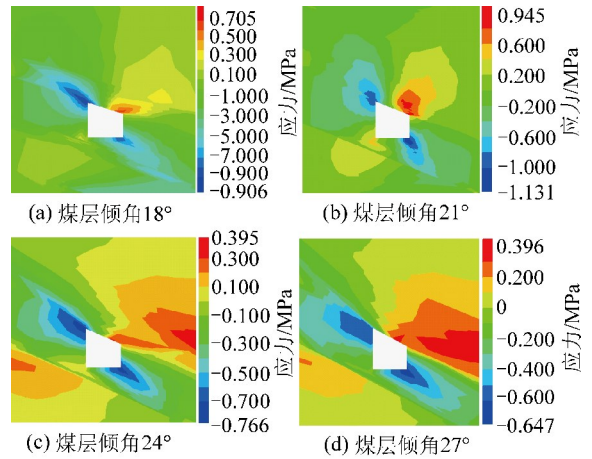


图7 巷道水平应力分布特征

Fig. 7 Characteristic of horizontal stress distribution in roadway

3.3 巷道水平位移特征

巷道水平应力云图和模拟不同地应力 q 不同倾角巷道两帮位移分别如图8、图9所示,从图8、图9中可以看出,巷道两帮的位移差异明显,并随着地应力的增大而增大,当地应力为 $10 \sim 15$ MPa,巷道高帮比低帮大 $15 \sim 37$ mm,但随着倾角增大这种差异明显减小,当倾角为 $18^\circ \sim 27^\circ$,巷道高帮比低帮大 $15 \sim 10$ mm。其主要原因是两帮高度的差异导致应力分布不均所致。

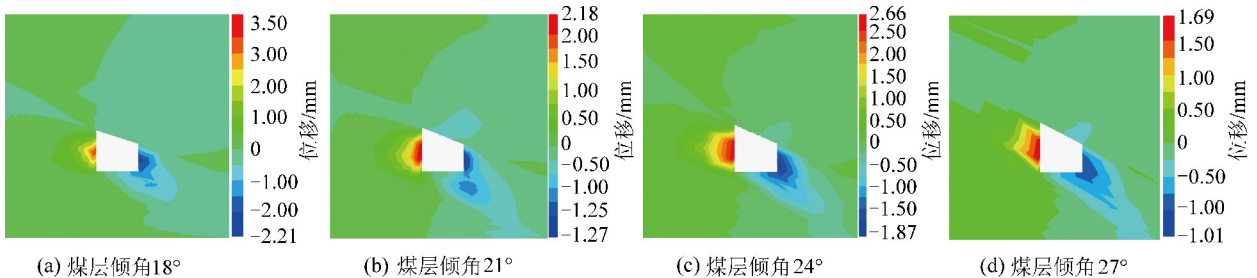


图8 巷道水平应力分布特征

Fig. 8 Characteristic of horizontal stress distribution in roadway

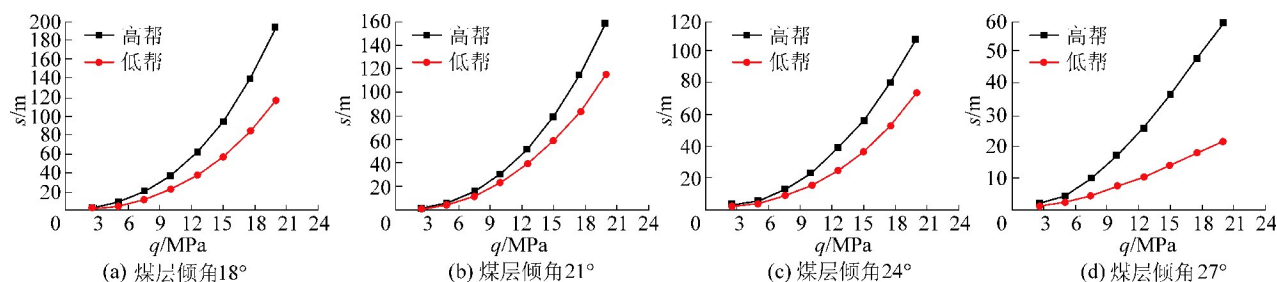


图9 巷道两帮水平位移分析曲线

Fig. 9 Horizontal displacement analysis curves of two roadway-sides

4 模拟结果对比分析

从模拟结果可以看出缓倾斜直角梯形巷道围岩非对称分布规律与大倾角和急倾斜煤层巷道非对称分布规律基本一致,但缓倾斜煤层应力非对称量级远远低于大倾角煤层。其非对称变形破坏特征与物理模型试验结果(图10)和石炭井二矿现场破坏形态相吻合(图11),其变形破坏规律呈现非对称特征,巷道两帮严重鼓出,且右帮(低帮)大于左帮(高帮)。



图10 物理试验巷道的变形破坏

Fig. 10 Deformation failure of physical experiment roadway



图11 石炭井二矿现场巷道的变形破坏

Fig. 11 Deformation failure of site roadway in No.2 Shitanjing Mine

5 结论

以石炭井二矿区为工程背景,在倾斜煤层直角梯形巷道围岩应力非对称分布理论分析的基础上,采用FLAC^{3D}有限差分法对其非对称分布特征进一步分析,得出3条结论。

1) 倾斜煤层直角梯形巷道围岩应力分布呈现明显的非对称特征。主要表现为低帮应力集中峰值大于高帮,高帮距帮侧的距离大于低帮,且随着倾角和地应力的增大,巷道两帮应力集中峰值和距帮部侧壁距离差异越明显,当倾角为 $18^{\circ} \sim 27^{\circ}$,低帮应力集中峰值为高帮的1.07~1.33倍,高帮到巷道帮部

侧壁的距离比低帮大1.26~3.79 m。

2) 在倾斜煤层直角梯形巷道中,与煤层倾角相同方向对称的两尖角处表现为明显的压应力区,而相反方向两尖角处表现为明显的拉应力区,且压应力和拉应力的最大值均出现在巷道顶板的两尖角处。

3) 在非对称应力作用下,巷道围岩变形破坏也呈现非对称特征。巷道两帮出现内挤、错位,及严重变形破坏,但低帮明显大于高帮,其主要原因是两帮高度的差异导致应力分布不均所致。

参考文献(References):

- [1] 李浩春.大倾角特厚复合顶板巷道变形破坏特征与稳定性控制研究[D].太原:太原理工大学,2014.
- [2] 国家发展改革委员会.中华人民共和国能源发展“十一五”规划[R].北京:国家发展改革委员会,2007.
- [3] 何富连,钱鸣高,刘长友.高产高效工作面支架-围岩保障系统[M].徐州:中国矿业大学出版社,1997:1-8.
- [4] 陈守建,王永,伍跃中.西北地区煤炭资源及开发潜力[J].西北地质,2006,39(4):40-56.
CHEN Shoujian, WANG Yong, WU Yuezhong. Coal resources and development potential in northwest China [J]. Northwestern Geology, 2006, 39(4): 40-56.
- [5] 孙晓明,何满潮.深部开采软岩巷道耦合支护技术数值模拟研究[J].中国矿业大学学报,2005,34(2):166-170.
SUN Xiaoming, HE Manchao. Numerical simulation research on coupling support theory of roadway within soft rock at depth [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, 34(2): 166-170.
- [6] 魏思祥,宋锦虎,靖洪文.倾斜煤层动压巷道围岩应力分布规律的数值分析[J].金属矿山,2012,41(3):37-41.
WEI Sixiang, SONG Jinhu, JING Hongwen. Numerical analysis of stress in the surrounding rock of the dynamic pressure tunnel with inclined seams [J]. Metal Mine, 2012, 41(3): 37-41.
- [7] 王红伟,伍永平,解盘石.大倾角煤层开采覆岩应力场形成及演化特征[J].辽宁工程技术大学学报,2013,33(8):1022-1026.
WANG Hongwei, WU Yongping, XIE Panshi. Formation and evolution characteristics of rock stress field in steeply dipping coal seam mining [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2013, 32(8): 1022-1026.

- [18] 王连国, 缪协兴, 董健涛, 等. 深部软岩巷道锚注支护数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 983-985.
WANG Lianguo, MIAO Xiexing, DONG Jiantao, *et al.* Numerical simulation research of bolt-grouting support in deep soft roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 983-985.
- [9] 李波, 张村, 伏映鹏, 等. 特厚煤层仰采综放工作面过断层应力分布与围岩控制[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 27-33.
LI Bo, ZHANG Cun, FU Yingpeng, *et al.* Stress distribution in fault zone and surrounding rock control in upward fully-mechanized top coal caving face of extra thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 27-33.
- [10] 伍永平, 潘洁, 解盘石, 等. 大倾角煤层坚硬顶板预裂弱化的数值分析[J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(1): 7-13.
WU Yongping, PAN Jie, XIE Panshi, *et al.* Numerical analysis of hard roof segment pre-blasting in steep coal seams[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010, 30(1): 7-13.
- [11] 王红伟, 伍永平, 曹沛沛, 等. 大倾角煤层开采大型三维可加载相似模拟试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1505-1511.
WANG Hongwei, WU Yongping, CAO Peipei, *et al.* Large scale loadable 3D-simulation tests on mining steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1505-1511.
- [12] 伍永平, 杜文刚, 王红伟, 等. 大倾角三软煤层巷道变形特征及支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(S2): 1-5.
WU Yongping, DU Wengang, WANG Hongwei, *et al.* Study on roadway deformation characteristics and supporting technology in coal seam with soft coal and soft roof and soft floor[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(S2): 1-5.
- [13] 唐治, 潘一山, 阎海鹏. 急倾斜煤柱开采后对巷道影响的数值模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(2): 64-67.
TANG Zhi, PAN Yishan, YAN Haipeng. Numerical simulation about influences of steep inclined coalpillar after mining on roadway[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(2): 64-67.
- [14] 包海玲, 孟益平, 巫绪涛, 等. 深部倾斜巷道变形机理的数值模拟[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2012, 35(5): 673-677.
BAO Hailing, MENG Yiping, WU Xutao, *et al.* Numerical simulation of deformation mechanism of deep inclined roadway[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2012, 35(5): 673-677.
- [15] 乔元栋. 急倾斜薄煤层仰斜开采覆岩应力分布特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(12): 25-28.
QIAO Yuandong. Study on Stress distribution features of overburden strata for upward mining in steep inclined thin seam[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(12): 25-28.
- [16] 张玉军, 高超. 急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏特征[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 126-132.
ZHANG Yujun, GAO Chao. Overburden rock failure features of steep thick seam horizontalslicing full-mechanized caving mining[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 126-132.
- [17] 张蓓, 曹胜根, 王连国. 大倾角煤层巷道变形破坏机理与支护对策研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 214-219.
ZHANG Bei, CAO Shenggen, WANG Lianguo. Deformation failure mechanism and support measurements in roadway of steeply inclined coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 214-219.
- [18] 高明中, 井欢庆. 巷道非对称底鼓的力学解析[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2012, 32(4): 38-43.
GAO Mingzhong, JING Huanqing. Mechanical analysis of asymmetric floor heave of roadway[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 32(4): 38-43.
- [19] 刘建刚, 曹安业, 郁钟铭, 等. 深部倾斜煤层巷道两帮应力特性的研究[J]. 中国煤炭, 2016, 42(8): 30-34.
LIU Jiangang, CAO Anye, YU Zhongming, *et al.* Study on stress characteristics of roadway's side in deep inclined coal seam[J]. China Coal, 2016, 42(8): 30-34.
- [20] 祁小虎. 大倾角煤层回采巷道围岩变形特征与支护参数研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.