

安全技术及工程

高瓦斯突出煤层底抽巷合理布置研究

刘志伟, 张 帅

(中国煤炭科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)



扫码移动阅读

摘 要:为解决新田煤矿高瓦斯突出煤层快速掘进及安全高效回采问题,提出沿工作面走向布置底抽巷,利用超高压水力割缝增透技术预抽煤巷条带瓦斯,同时用作回采期间Y型通风方式的回风巷。采用底板滑移线场理论计算、FLAC^{3D}数值模拟计算底板破坏深度,确定底抽巷的层位距离4号煤层底板约14 m;数值模拟巷道开挖扰动应力集中区在两帮5 m范围内,避免巷道应力集中区叠加,界定了底抽巷布置范围,其后建立每排钻孔总长度表达式,并进行最优解求解为125 m,最终确定水平距离轨道巷约10 m。结果表明:底抽巷水力割缝卸压增透实现轨道巷条带15 d抽采达标;回采期间底抽巷和轨道巷顶底板变形量分别在约20 cm和15 cm后基本稳定,保障了工作面安全高效回采。

关键词:高瓦斯突出煤层;超高压水力割缝;滑移线场理论;FLAC^{3D}数值模拟;底板破坏深度

中图分类号:TD713

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)10-0155-06

Study on rational layout of floor gas drainage gateway in high gassy-outburst seam

LIU Zhiwei, ZHANG Shuai

(Chongqing Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Chongqing 400037, China)

Abstract: In order to solve the rapid heading and safe and high efficient mining in the high gassy-outburst seam of Xintian Coal Mine, a floor gas drainage gateway headed along strike direction of the coal mining face was provided. An ultra high hydraulic slotting and permeability improved technology was applied to the gas pre-drainage along the seam gateway. Meanwhile, during the mining period, the seam gateway could be applied as an air return gateway with a Y type ventilation mode. The theoretical calculation of the floor slip line field and the FLAC^{3D} numerical simulation were applied to calculate the floor failure depth and to determine the layer location of the floor gas drainage gateway with a distance of about 14 m to the floor of No.4 seam. The excavation disturbance stress concentration zones of the numerical simulation gateway were within a 5 m scope along the two sidewalls of the gateway. A superposition of the stress concentration zone in the gateway could be avoided. The layout scope of the floor gas drainage gateway was defined. And the total length expression of each borehole raw was established and the best solution was conducted as 125 m. Finally, the horizontal distance to the transportation gateway was determined as about 10 m. The results showed that the hydraulic slotting, pressure released and permeability improvement of the floor gas drainage gateway could realize the 15 days gas drainage target of the transportation gateway. The deformation volume of the roof and floor in the floor gas drainage gateway were about 20 cm and 15 cm and late the gateways were stabilized. Thus, a safety and high efficient mining of the coal mining face could be ensured.

Key words: high gassy-outburst seam; ultra-high pressure hydraulic slotting; slip line field theory; FLAC^{3D} numerical simulation; floor failure depth

0 引 言

随着煤矿机械化、自动化、智能化的发展,工作

面推进强度、效率越来越高,采掘接替紧张是煤矿普遍存在的一个问题,特别是高突低渗煤层,瓦斯预抽时间长,接替问题更为突出^[1-2]。目前高突煤层瓦

收稿日期:2018-05-30;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.10.024

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804208)

作者简介:刘志伟(1980—),男,河北唐山人,副研究员。E-mail:578803683@qq.com

引用格式:刘志伟,张 帅.高瓦斯突出煤层底抽巷合理布置研究[J].煤炭科学技术,2018,46(10):155-160.

LIU Zhiwei, ZHANG Shuai. Study on rational layout of floor gas drainage gateway in high gassy-outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 155-160.

斯治理的方法主要有保护层开采和预抽煤层瓦斯^[3],不具备保护层开采条件的煤层简单地采用底抽巷预抽钻孔抽采煤层瓦斯,效率低下,难以满足工作面回采进度,因此学者对提高煤层透气性的方法进行了大量的研究,如水力压裂^[4-6]、水力冲孔^[7-8]、CO₂相变致裂^[9-11]、松动爆破等物理化学增透技术^[12],CO₂相变致裂存在成本高、工序复杂的特点,水力冲孔在一定程度上能增大钻孔的抽采半径,但影响范围较小,水力压裂可控性差,易诱发灾害事故的发生。笔者经前期大量研究认为,在工作面走向底抽巷布置超高压水力割缝穿层钻孔预抽煤巷条带瓦斯是一种良好的快速消突方式。

超高压水力割缝穿层钻孔若要取得良好的消突效果,底抽巷合理布置参数的确定极其关键。李胜等^[13]对底抽巷穿层钻孔与掘进工作面顺层钻孔立体抽采系统进行了研究,李永恩^[14]通过理论分析及数值模拟对深部承压水上底抽巷围岩破坏规律及合理位置进行了研究,蒋先统^[15]依据非线性多元回归理论对浅埋复合关键层工作面底抽巷布置进行了研究,程志恒^[16]基于钻场围岩破碎区及其应力集中区对底抽巷钻孔设计和封孔深度进行了研究。但是对需要布置穿层水力割缝钻孔的底抽巷布置研究较少,因此对其研究,提高此类底抽巷布置的科学性具有重要意义。笔者结合新田煤矿 1402 工作面地质条件,提出 1402 工作面底抽巷用于超高水力割缝穿层钻孔预抽煤巷条带瓦斯的同时,在工作面回采期间,用作 Y 型通风方式工作面的回风巷,实现底抽巷的一巷两用。

1 工作面概况

永贵能源新田煤矿一期工程设计生产能力 60 万 t/a,服务年限 71.8 a。可采煤层共 5 层,分别为 4、5、8、9、12 号煤层,采用下行开采方式,现首采 4 号煤层位于龙潭组上部,煤层吸附能力强(吸附常数 $a=39.070 \text{ m}^3/\text{t}$ 、 $b=1.209 \text{ Pa}^{-1}$),透气性差,煤层瓦斯压力高达 4.854 MPa 左右,原始瓦斯含量为 24.48 m³/t 左右,为高瓦斯突出煤层。1402 工作面位于北翼 3 条大巷以北,东南侧与 1401 采空区相邻、西南侧毗邻 1404 未采工作面,煤层厚 1.40~3.20 m,平均 2.7 m,倾角 3°,埋深处于 350~420 m,倾向长度 1 150 m,走向长度 148 m。工作面布置如图 1 所示。1402 工作面准备期间采用底抽巷超高压水

力割缝的方法强化预抽煤巷条带煤层瓦斯;回采期间,采用沿空留巷 Y 型通风,底抽巷用作回风巷的方式治理工作面瓦斯涌出。

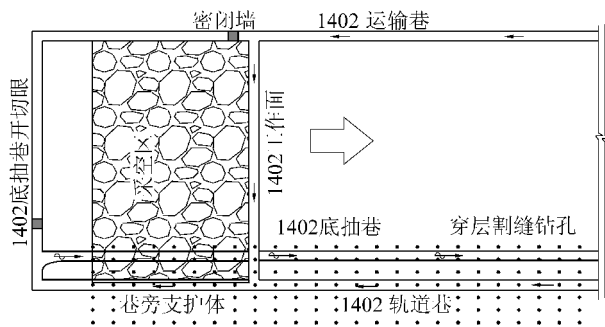


图 1 工作面布置示意

Fig.1 Layout of the mining face

底抽巷穿层钻孔利用超高压水射流切割煤体能够增大煤体暴露面积,降低煤层应力,提高煤层透气性,为瓦斯快速解吸和运移提供便利条件。常压水经高低压转化器喷射出来的高压水体压力可达 100 MPa,随前螺旋割缝钻杆旋转过程中冲击切割煤体,形成扁平缝槽,缝槽半径可达 2 m 左右,改善煤层中的瓦斯流动状态,改变了煤体的原始应力和裂隙状况,可以削弱或消除煤层瓦斯动能,又可提高煤层的强度,实现快速消突作用效果,产生的煤屑依靠尾水冲刷、自身重力和煤体释放的瓦斯动能排出孔外。

2 底抽巷布置要求

1402 工作面底抽巷一方面用于预抽煤巷条带煤层瓦斯;另一方面用作回采期间的回风巷,如果底抽巷布置层位过深,施工的穿层割缝钻孔工程量大,成本高,如果层位过浅,容易引起 4 号突出煤层突破岩柱威胁巷道安全,若在工作面回采底板破坏深度以内,则容易引起工作面回采后期巷道维护困难,回风通道堵塞等问题。因此底抽巷布置最浅层位应满足以下条件:

1)《防治煤与瓦斯突出规定》第二十一条:所有突出煤层外的掘进巷道(包括钻场等)距离突出煤层的最小法向距离小于 10 m 时(在地质构造破坏带小于 20 m 时),必须边探边掘,确保最小法向距离不小于 5 m^[3]。

2)根据割缝返渣顺畅程度水力割缝穿层钻孔倾角不小于 18°为宜。

3)层位至煤层底板的距离应不小于工作面回采期间底板的最大破坏深度。

3 底抽巷空间参数确定

3.1 底抽巷布置层位分析

3.1.1 底抽巷破坏深度理论分析

1402 工作面在推进过程中,煤壁前方支撑压力向煤层底板传递,超过其承载极限发生塑性变形破坏,形成塑性变形破坏区,沿工作面回采方向可分为主动极限区 I、被动极限区 III 及过渡区 II,如图 2 所示^[17-18]。

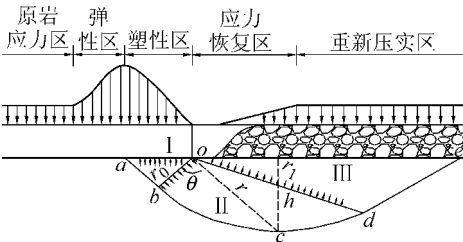


图 2 回采工作面底板破坏力学模型

Fig.2 Fracture mechanics model of mining face floor

基于底板滑移线场理论,建立了煤层底板破坏模型,底板破坏深度表达式为^[19]

$$h = \frac{\cos^2 \alpha}{\pi \gamma} \times \left[\frac{(k+1) \gamma H}{2} - P \right] \times \left[\theta \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi_0} \right) - \frac{\sin \theta}{\sin \varphi_0} \right] + \frac{C \cos \alpha}{\gamma \tan \varphi_0} + \frac{M}{\lambda - 1} \quad (1)$$

令 $dh/d\theta = 0$, $\theta = \arccos(\cos \alpha \sin \varphi_0 - \sin \alpha)$, 令 $\beta = \arccos(\cos \alpha \sin \varphi_0 - \sin \alpha)$, 将 β 代入式(1)可得,沿煤层走向,工作面底板采动最大破坏深度为

$$h_{\max} = \frac{\cos^2 \alpha}{\pi \gamma} \times \left[\frac{(k+1) \gamma H}{2} - P \right] \times \left[\beta \left(\cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi_0} \right) - \frac{\sin \beta}{\sin \varphi_0} \right] + \frac{C \cos \alpha}{\gamma \tan \varphi_0} + \frac{M}{\lambda - 1} \quad (2)$$

其中: h 为煤层底板破坏深度, m; h_{\max} 为煤层底板最大破坏深度, m; M 为煤层厚度, 取 2.7 m; k 为工作面超前支承压力集中系数, 取 1.5; P 为承压水压力, 取 5 MPa; H 为煤层采深, 取 0.39 km; φ_0 为底板岩体平均内摩擦角, 取 30°; C 为煤层底板平均黏聚力, 取 5 MPa; α 为回采方向煤层倾角, 取 3°; γ 为采场底板岩层容重, 取 2.55 kN/m³; λ 为采空区顶板垮落碎

胀系数, 取 1.3。

通过计算, 1402 工作面回采过程中最大底板破坏深度为 13.82 m, 为底抽巷布置最低层位提供了依据, 而层位过低又会增大穿层钻孔的工程量, 因此底抽巷布置层位距离煤层底板应在 14 m 左右。

3.1.2 底抽巷破坏深度数值分析

为了进一步探究 1402 工作面轨道巷与底抽巷的应力影响范围, 工作面底板的破坏深度, 依据其地质条件, 简化计算模型, 采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对工作面底板破坏深度、巷道围岩应力影响范围进行模拟, 模型尺寸为 240 m×260 m×150 m (长×宽×高), 工作面宽度 150 m, 回采巷道宽 5 m, 在模型两侧留 50 m 煤柱, 降低模型边界效应。模型求解选用 Mohr-Coulumb 模型, 1402 工作面煤层岩层物理力学参数见表 1。

表 1 1402 工作面顶底板岩层物理力学参数

Table 1 Roof and floor physical mechanical properties of No.1402 mining face

岩性	密度/ (kg·m ⁻³)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	抗拉强 度/MPa	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/(°)
石灰岩	2 700	18.30	9.80	3.54	15.21	33
煤	1 440	4.72	2.89	1.53	5.60	26
泥岩	2 400	6.72	3.56	1.62	2.87	28
细砂岩	2 540	8.65	5.14	2.15	3.65	30
铁质 砂岩	2 640	12.35	7.41	2.46	8.35	31
泥质 粉砂岩	2 460	5.78	3.48	1.51	3.48	30
粉砂质 泥岩	2 500	6.71	3.89	1.75	2.65	28
泥灰岩	2 340	4.83	3.10	1.41	3.55	27

根据 1402 工作面实际地质应力环境, 经计算不平衡系数不大于 10⁻⁵ 以后认定模型已处于平衡状态, 在 4 号煤层底板 14 m 的层位模拟开挖底抽巷, 工作面每天割煤 3 刀, 每刀割煤深度 1 m, 每天进尺回采 3 m, 因此模拟中每次开挖 3 m 进行一次平衡, 开挖 18、36、54、72 m 后, 底板岩体的应力状态如图 3 所示。

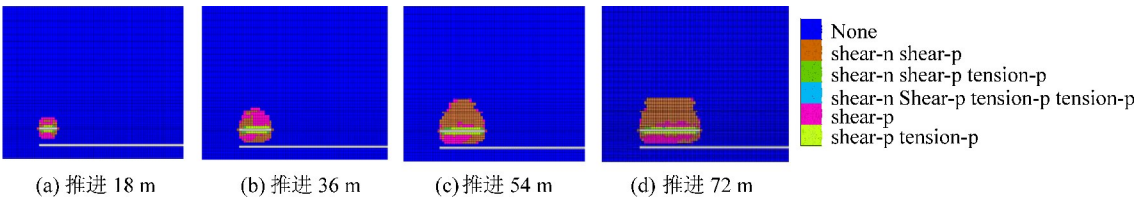


图 3 工作面回采底板破坏塑性区分布

Fig.3 Plastic zone distribution of mining face floor damages

图 3 中 shear-p 代表过去发生的剪切破坏, shear-n 代表现在发生的剪切破坏, tension-p 代表过去发生的拉伸破坏, tension-n 代表现在发生的拉伸破坏,煤层开挖 54 m 以后,工作面继续回采,底板破坏深度在 13 m 左右不再向下延伸,即此时底板破坏深度的范围为充分采动后底板破坏的深度,与理论计算一致,验证了底抽巷布置层位的正确性。

3.2 底抽巷距 1402 轨道巷水平距离确定

为了准确描述巷道开挖引起的周围岩体应力重新分布的剧烈影响范围,对底抽巷和运输巷开挖进行了数值模拟,巷道开挖后垂直应力分布模拟结果如图 4 所示。

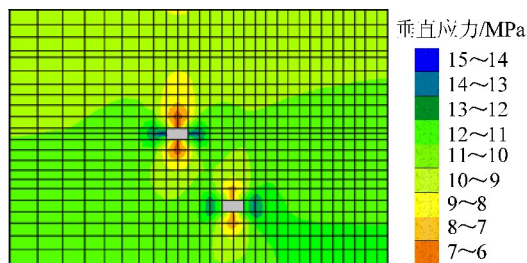


图 4 巷道开挖相互扰动影响范围

Fig.4 Influence scope of roadway excavation mutual disturbance

通过分析图 4 可知,巷道开挖以后上覆岩层荷载向两帮转移,两帮出现了应力集中,顶底板得到了卸压,笔者在前期研究基础之上认为应力集中系数大于 1.5 的区域为应力重新分布的剧烈影响区,则巷道两帮剧烈影响距离为 5 m 左右,即为避免巷道两帮应力叠加,两巷道水平距离应不小于 10 m。

在确定 1402 工作面底抽巷层位的基础之上,通过巷道开挖应力重新分布剧烈影响的范围和水力割缝钻孔施工的最小倾角,进一步界定了底抽巷布置的范围,如图 5 所示。当底抽巷沿 BC 段移动时,底抽巷层位加大,巷道水平间距不断增大,虽然对轨道

巷的影响越来越小,但是,施工钻孔工程量明显增大,显然是不合理的,因此底抽巷只有在 AB 段上移动是比较合理的。

1402 工作面运输巷煤巷条带 15 d 实现预抽达标的超高压水力割缝钻孔有效抽采半径为 4 m 左右,根据钻孔布置原则布置钻孔,每排 7 个钻孔,控制回采巷道两帮距离为 15 m,钻孔见煤点间距 d 约为 5.8 m,排间距为 6 m×6 m,每排钻孔成扇形分布。当底抽巷在 AB 段移动式,依据水力割缝钻孔的几何关系,则每排钻孔总长度 $f(x)$ 的表达式为

$$f(x) = \sqrt{(3u+x)^2 + n^2} + \sqrt{(2u+x)^2 + n^2} + \sqrt{(u+x)^2 + n^2} + \sqrt{x^2 + n^2} + \sqrt{(u-x)^2 + n^2} + \sqrt{(2u-x)^2 + n^2} + \sqrt{(3u-x)^2 + n^2} \quad (3)$$

式中: x 为底抽巷距离运输巷的水平距离, m; α 为超高压水力割缝穿层钻孔最小倾角, 18° ; b 为底抽巷水平距离运输巷的极限距离, m。

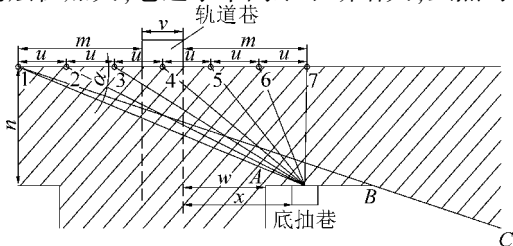
底抽巷至 1402 运输巷水平距离的范围为: $w \leq x \leq bcot \theta$, 令 $df(x)/dx = 0$, 则 $x = 0$, 当 $w \leq x \leq bcot \theta$ 时, $df(x)/dx > 0$, 所以 $f(x)$ 在 $w \leq x \leq bcot \theta$ 范围内不断增大, 即 $f(x)$ 在 $x = w$ 时取得最小值, 为 125 m。即底抽巷与 1402 运输巷相近两帮水平距离 10 m 时最佳。

4 现场应用效果分析

通过监测工作面回采前后底抽巷顶底板的位移并进行统计,其巷道顶底板变形量如图 6 所示,从图 6 可以看出,在工作面运输巷开挖的过程中和穿层割缝钻孔施工的过程中,底抽巷顶底板变形量在 2 cm 左右,即运输巷开挖和割缝钻孔施工对底抽巷的扰动影响较小。

工作面在推进过程中,煤壁前方支撑峰值应力不断前移,支撑应力向煤层底板传递,引起工作面前方 50 m 范围内底抽巷的变形量逐渐增大,随着工作面的推进,工作面后方的采空区逐渐压实,恢复其原岩应力状态,底抽巷顶底板移动也随之变缓直至消失,移近量峰值在 20 cm 左右,达到相对稳定的状态,确保工作面通风,实现了沿空留巷 Y 型通风条件下工作面的正常回采。

1402 工作面运输巷掘进期间巷道围岩比较稳定,变形量较小,回采期间采用 30 cm×20 cm×20 cm 的混凝土块进行巷旁支护,支护宽度 1.2 m,顶底板



m —煤巷条带瓦斯治理控制两帮的距离, 15 m; n —底抽巷至煤层底板的距离, 14 m; v —轨道巷宽度, 5 m; u —钻孔见煤点间距, 5.8 m; w —为避免应力叠加,底抽巷至轨道巷的距离, 10 m; 1~7—钻孔编号

图 5 底抽巷界定范围

Fig.5 Floor gas drainage gateway arrangement

产生 15 cm 左右的变形量以后,变形速度逐渐趋近于零,完整地保留了原有巷道。

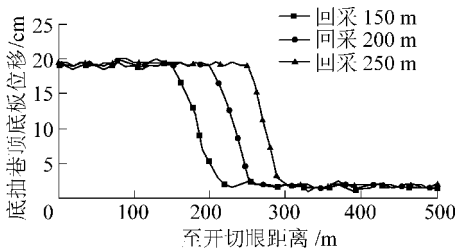


图 6 底抽巷顶底板位移

Fig.6 Displacement between roof and floor of floor gas drainage gateway

5 结 论

1)底抽巷布置煤层底板穿层钻孔,利用超高压水射流切割煤体,增大煤层暴露面积,降低煤层压力,提高煤层瓦斯渗透率,并在底抽巷抽采管路负压作用下预抽,实现 15 d 内抽采达标。

2)采用底板滑移线场理论计算、FLAC^{3D} 数值模拟计算底板破坏深度,确定底抽巷的层位距离 4 号煤层底板约 14 m;数值模拟巷道开挖扰动应力集中区在两帮 5 m 范围内,避免巷道应力集中区叠加,进一步界定底抽巷布置范围,最终确定水平距离运输巷约 10 m。

3)掘进及工作面回采期间,底抽巷顶底板移近量达到 20 cm,运输巷变形量达到 15 cm 以后基本稳定,实现了工作面安全高效回采。

4)采用巷旁支护沿空留巷,为实现 Y 型通风方式提供了条件,避免上隅角瓦斯超限问题,充分利用底抽巷,实现底抽巷“一巷两用”。

参考文献(References):

- [1] 孙庆刚.中国煤矿瓦斯灾害现状及防治对策研究[J].中国煤炭,2014,40(3):116-119.
SUN Qinggang. Research on status quo and prevention counter measures of coal mine gas disaster in China[J].China Coal,2014,40(3):116-119.
- [2] 程远平,俞启香.中国煤矿区域性瓦斯治理技术的发展[J].采矿与安全工程学报,2007,24(4):383-390.
CHENG Yuanping, YU Qixiang. Development of regional gas control technology for Chinese Coal Mines[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2007,24(4):383-390.
- [3] 国家煤矿安全监察局.《防治煤与瓦斯突出规定》读本[M].北京:煤炭工业出版社,2013.
- [4] 孙四清,张群,闫志铭,等.碎软低渗高突煤层井下长钻孔整体水力压裂增透工程实践[J].煤炭学报,2017,42(9):

2337-2344.

SUN Siqing,ZHANG Qun,YAN Zhiming,*et al.*Practice of permeability enhancement through overall hydraulic fracturing of long hole in outburst-prone soft crushed coal seam with low permeability [J].Journal of China Coal Society,2017,42(9):2337-2344.

- [5] 张春华,张勇志,李江涛,等.深部煤层单段/多段水力压裂增透效果对比[J].煤炭科学技术,2017,45(6):50-54.
ZHANG Chunhua,ZHANG Yongzhi,LI Jiangtao,*et al.*Comparison analysis on permeability improved effect of single and multi-section hydraulic fracturing in deep depth seam[J].Coal Science and Technology,2017,45(6):50-54.
- [6] 袁志刚,任梅清,沈永红,等.穿层钻孔煤巷条带水力压裂防突技术及应用[J].重庆大学学报,2016,39(1):72-78.
YUAN Zhigang,REN Meiqing,SHEN Yonghong,*et al.*Hydraulic fracturing technology by drilling through strata for outburst prevention in coal roadway stripes and its application [J].Journal of Chongqing University,2016,39(1):72-78.
- [7] 陶云奇,冯丹,马耕,等.水力冲孔物理模拟试验及其卸压增透效果研究[J].煤炭科学技术,2017,45(6):55-60.
TAO Yunqi,FENG Dan,MA Geng,*et al.*Study on physical simulation experiment of hydraulic borehole flushing and pressure released and permeability improved effect [J].Coal Science and Technology,2017,45(6):55-60.
- [8] 冯丹,许江,陶云奇,等.水力冲孔物理模拟试验系统研制及其应用[J].采矿与安全工程学报,2017,34(4):782-788.
FENG Dan,XU Jiang,TAO Yunqi,*et al.*Development of hydraulic punching test system and its application[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2017,34(4):782-788.
- [9] 罗朝义,江泽标,郑昌盛,等.CO₂相变致裂技术在顺煤层钻孔增透中的应用[J].煤炭科学技术,2017,45(11):138-143.
LUO Zhaoyi,JIANG Zebiao,ZHENG Changsheng,*et al.*Application on permeability improvement technology with CO₂ phase change to borehole drilling along coal seam [J].Coal Science and Technology,2017,45(11):138-143.
- [10] 曹运兴,张军胜,田林,等.低渗煤层定向多簇气相压裂瓦斯治理技术研究与实践[J].煤炭学报,2017,42(10):2631-2641.
CAO Yunxing,ZHANG Junsheng,TIAN Lin,*et al.*Research and application of CO₂ gas fracturing for gas control in low permeability coal seams[J].Journal of China Coal Society,2017,42(10):2631-2641.
- [11] 赵龙,王兆丰,孙矩正,等.液态CO₂相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用[J].煤炭科学技术,2016,44(3):75-79.
ZHAO Long,WANG Zhaofeng,SUN Juzheng,*et al.*Application of permeability improvement technology with liquid CO₂ phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam[J].Coal Science and Technology,2016,44(3):75-79.
- [12] 赵宝友,王海东.深孔爆破技术在高地应力低透气性高瓦斯煤层增透防突中的适用性[J].爆炸与冲击,2014,34(2):145-152.

- ZHAO Baoyou, WANG Haidong. Feasibility of deep-hole blasting technology for outburst prevention and permeability enhancement in high-gas-content coal seams with low-permeability subjected to high geo-stress [J]. *Blasting and Impact*, 2014, 34(2): 145-152.
- [13] 李 胜, 罗明坤, 周利峰, 等. 高瓦斯综采工作面瓦斯立体抽采技术与应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2018, 37(2): 244-250.
- LI Sheng, LUO Mingkun, ZHOU Lifeng, *et al.* Technology and application of gas stereo drainage in high gas fully mechanized working face [J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2018, 37(2): 244-250.
- [14] 李永恩. 深部承压水上底抽巷围岩破坏规律及合理位置 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- [15] 蒋先统. 浅埋复合关键层工作面底抽巷布置研究 [J]. 煤炭技术, 2017, 36(12): 53-56.
- JIANG Xiantong. Study on layout of bottom roadway of key stratum in shallow buried coal seam [J]. *Coal Technology*, 2015, 43(5): 62-66.
- [16] 程志恒. 底抽巷穿层钻孔封孔深度与布孔间距优化研究 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 76-82.
- CHENG Zhiheng. Study on optimization of strata passing borehole sealing depth and borehole layout space in floor gas drainage gateway [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(2): 76-82.
- [17] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 70-84.
- [18] 张金才, 张玉卓, 刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 19-32.
- [19] 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 Dianrui, 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.