

近距离煤层群上位煤层开采底板破坏特征分析

杨建华¹, 汪东^{2,3,4}

(1. 华晋焦煤有限责任公司,山西 吕梁 033300;2. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院,北京 100013;

3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;4. 北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083)

摘要:针对高瓦斯近距离煤层群下伏煤层回采巷道变形、破坏严重并影响工作面安全高效开采的难题,通过实验室试验对近距离煤层及其顶底板力学参数进行了测试,结合底板滑移线理论给出了上位煤层开采后底板破坏带分区,应用离散元数值软件计算分析了上位煤层开采对底板造成的破坏程度,得到了底板最大集中应力沿底板水平及垂直方向的分布曲线。结果表明:近距离煤层群上位煤层开采后,沿底板岩体垂直方向底板破坏岩层厚度呈线性增长,沿水平方向岩层塑性破坏以扇形方式扩展且其最大厚度在工作面边缘。

关键词:底板破坏;近距离煤层群;应力分布;塑性区分布

中图分类号:TD323 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)07-0007-05

Analysis on floor damage characteristic of the upper coal seam mining in contiguous coal seams

Yang Jianhua¹, Wang Dong^{2,3,4}

(1. Huajin Coking Coal Company Limited, Lyuliang 033300, China;2. Safety Branch, China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;

3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China;4. Department of Civil and Resource Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 10083, China)

Abstract: In order to solve the problem of large deformation and serious damage of mine roadway in the underline coal seam of contiguous coal seams, which had an effect on safety and high-efficiency mining, the mechanical parameters of coal and roof and floor were tested in the laboratory. Comining with slip-line theory of floor damage rock mass, floor damage partitions were given after the upper coal seam mining. It calculated the floor damage degree of the upper coal seam mining with the distinct element numerical software. And distribution curves of maximum concentrated stress along the horizontal direction and vertical direction of floor were concluded. The results showed that after the upper coal seam of contiguous coal seams mining, the thickness of floor damaged rock strata increased linearly along the floor vertical direction. Along the floor horizontal direction, the rock plastic damaged zone extended by fan shape, and its maximum thickness was at the edge of working face.

Key words: floor damage; contiguous coal seams; stress distribution; plastic zone distribution

0 引言

近距离煤层开采过程中,受上位煤层开采影响,下伏煤层开采前顶板完整性被破坏,并引起其顶板结构和应力环境变化,加上残留煤柱内积聚的大量弹性应变能,下伏煤层开采时在上位煤层重复采动影响下极易导致顶板冒落、煤壁片帮、回采巷道与煤

柱失稳等围岩灾变,甚至导致残留煤柱失稳诱发煤与瓦斯突出或动力冲击事故;且煤层间距越小,下伏煤层回采受上位煤层重复采动影响越大。为此,掌握上位煤层开采对底板破坏的规律是确定下位煤层安全、高效开采的关键,更是提高煤矿整体效益的重中之重^[1-5]。

当前,许多专家学者针对上位煤层开采后底板

收稿日期:2017-01-25;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.07.002

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51604154);国家科技重大专项资助项目(2016ZX05067-005-005)

作者简介:杨建华(1963—),男,山西介休人,高级工程师,现任华晋焦煤有限责任公司董事长。E-mail:Hjscyjg@163.com

引用格式:杨建华,汪东.近距离煤层群上位煤层开采底板破坏特征分析[J].煤炭科学技术,2017,45(7):7-11.

Yang Jianhua, Wang Dong. Analysis on floor damage characteristic of the upper coal seam mining in contiguous coal seams [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7):7-11.

的破坏规律已开展了大量研究工作,王连国等^[6]针对煤层开采后采空区四周形成不同程度的支承压力带以及应力卸载与集中会向底板深部传递进而影响到底板的破坏深度与范围现象,推导了综合考虑工作面走向与倾向受力特点的底板垂直应力迭代计算式,采用数学软件 MATHCAD 计算出了不同深度处底板的应力分布情况。段宏飞等^[7]选取采深、采高、斜长、倾角、底板岩性组合与顶板岩性组合等参数进行底板破坏深度研究,并开展了 6 因素 5 水平正交数值试验,明确了顶板岩性组合是影响底板破坏深度的关键因素;建立了斜长-顶底板岩性组合-采深-采高-倾角的采动底板破坏深度预测模型,对底板破坏深度的研究以及工程应用具有积极的指导意义。姜耀东等^[8]应用自行研制的工作面底板水压模拟装置,开展了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,并运用非接触

的光学测量技术对全场位移值进行观测,得出了底板位移场变化规律。同时,国内众多学者^[9-18]针对高承压水上及高瓦斯煤层开采时的底板破坏研究较多,而对高瓦斯近距离煤层群上位煤层开采对下伏煤层围岩破坏的影响研究较少,基于此,笔者针对沙曲矿高瓦斯近距离煤层群 2 号煤层开采对底板破坏的影响进行分析,以期为现场工作面提供指导。

1 工程概况

沙曲煤矿 22201 工作面处于矿井 +400 m 水平,开采山西组 2 号煤层,下伏 3+4 号煤层及 5 号煤层,3+4 煤层距 2 号煤层及 5 号煤层的间距分别为 12.5 m,工作面倾斜长 246 m,走向长 1 600 m,底板标高 +354—+467 m,地面标高 +885—+1 077 m,采用倾斜长壁式采煤法。煤层顶底板岩性特征见表 1。

表 1 2 号煤顶底板岩体特征

Table 1 Characteristics of No.2 coal seam and roof and floor

岩层	厚度/m	密度/(g·cm ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗压强度/MPa
泥岩	12.5	2.85	0.93	0.52	41	2.12	3.33
砂质泥岩	10.1	2.51	1.58	0.51	41	1.28	0.21
2号煤	1.0	1.29	0.99	0.49	35	1.79	0.78
砂质泥岩	1.8	2.51	1.58	0.51	41	1.28	0.21
中粒砂岩	4.5	2.59	3.71	1.10	38	4.80	4.12
砂质泥岩	1.3	2.51	1.58	0.51	41	1.28	0.21
细粒砂岩	1.4	2.59	5.99	3.99	16	1.99	1.49
泥岩	5.6	2.85	0.93	0.52	41	2.12	3.33
3+4号煤	1.1	1.37	0.99	0.60	39	1.79	0.80
中粒砂岩	1.0	2.59	3.71	1.10	38	4.80	4.12
粉砂岩	2.5	2.49	6.99	5.99	29	3.19	2.11
泥岩	2.0	2.85	0.93	0.52	41	2.12	3.33

2 上位煤层开采底板破坏范围计算

据煤层底板岩体破坏滑移线理论^[19]可知,底板岩体破坏滑移线场如图 1 所示。

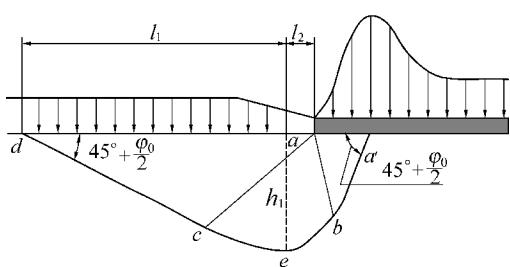


图 1 底板岩体破坏滑移线场

Fig. 1 Slip-line field of floor damage rock mass

2 号煤层开采后,在支承压力作用下底板岩体(图 1 中区域 aa'b)应力超过其极限强度后将产生

塑性变形,同时,沿水平方向向采空区底板临空面挤压膨胀,并将应力传递至区域 abc,进而形成了底板破坏的最大深度 h_1 见式(1)。

$$h_1 = \frac{x_a \cos \varphi_0}{2 \cos(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2})} e^{(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_0}{2}) \tan \varphi_0} \quad (1)$$

式中: φ_0 为底板岩体的内摩擦角,取 38° ; x_a 为开采煤层屈服区长度,取 5.2 m 。

计算可得 $h_1 = 11.18\text{ m}$, 2 号煤层底板最大破坏深度处距采场煤壁的水平距离 l_1 为

$$l_2 = h_1 \tan \varphi_0 \quad (2)$$

计算得 $L_2 = 8.73\text{ m}$, 沿水平方向, 采空区底板破坏区的最大长度范围 l_1 为

$$l_1 = x_a \tan(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_0}{2}) e^{\frac{\pi}{2} \tan \varphi_0} \quad (3)$$

计算得 $L_1 = 36.35 \text{ m}$, 根据式(1)一式(3)计算结果, 绘制了沙曲矿 2 号煤层底板破坏带形态分布情况, 如图 2 所示。由于在工作面两端顶板冒落不充分, 有较大的自由空间, 从而形成了支承压力破坏区域。在工作面中部, 由于顶板中部冒落的比较充分, 采空区中部充填较密实, 工作面回采后逐渐形成了重新压实区域。

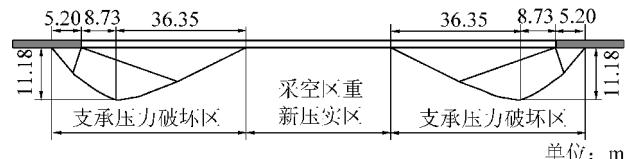


图 2 22201 工作面底板破坏带划分

Fig. 2 Floor damage partitions of No.22201 working face

3 2号煤层开采对底板的破坏形态分析

3.1 底板破坏模型建立

依据现场开采技术条件, 并充分考虑模型边界

表 2 煤岩接触面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of coal and rock contact

岩层	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
泥岩	4.9	2.1	28.0	0.20	0.16
砂质泥岩	7.9	3.9	32.0	0.11	0.05
2号煤层	2.2	1.7	22.5	0.16	0.40
砂质泥岩	7.9	3.9	32.0	0.11	0.05
中粒砂岩	15.9	7.9	35.0	0.45	0.19
砂质泥岩	7.9	3.9	32.0	0.11	0.05
细粒砂岩	12.9	6.9	33.0	0.33	0.17
泥岩	4.9	2.1	28.0	0.20	0.16
3+4号煤	2.9	1.9	22.0	0.16	0.05
中粒砂岩	15.9	7.9	35.0	0.45	0.19
粉砂岩	11.9	5.9	31.0	0.22	0.14
泥岩	4.9	2.1	28.0	0.20	0.16

3.2 近距离煤层群上位煤层开采底板应力场演化

通过 UDEC 模型计算分析 22201 工作面开采后, 运算 500、1 500、2 500、3 500 时步 4 种情况下应力场的演化规律, 不同运行步数下工作面底板应力

影响, 建立长 660 m、高 47.9 m 的长方形平面地质模型, 如图 3 所示, 上边界载荷按采深 513.95 m 计算; 巷道围岩本构关系采用摩尔-库仑模型, 模型底边界和侧边界施加约束; 数值模拟计算中对应的各岩层岩性力学参数见表 1 和表 2。

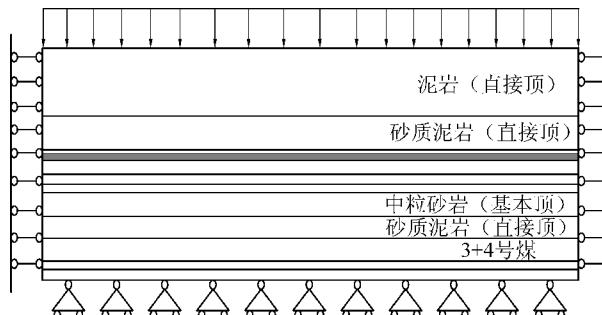


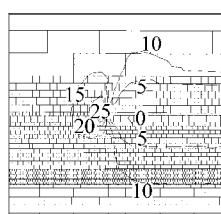
图 3 数值模拟模型

Fig. 3 Numerical simulation model

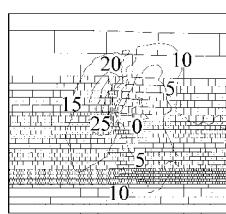
表 2 煤岩接触面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of coal and rock contact

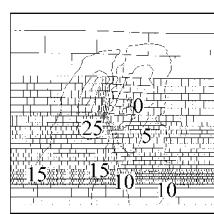
分布如图 4 所示。近距离煤层群上位 2 号煤层开采后, 沿水平方向(X 轴方向)及垂直方向(Y 轴方向)分别统计监测了 2 号煤层底板的应力分布范围, 运算不同时步其底板应力演化规律如图 5 所示。



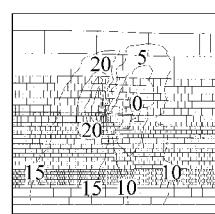
(a) 时步 500



(b) 时步 1 500



(c) 时步 2 500



(d) 时步 3 500

单位: MPa

图 4 底板应力演化规律

Fig. 4 Evolution rule of floor stress

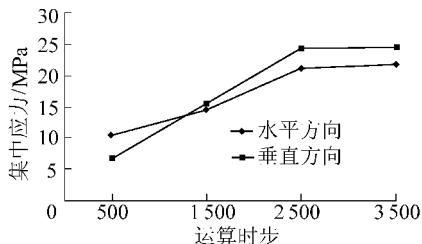
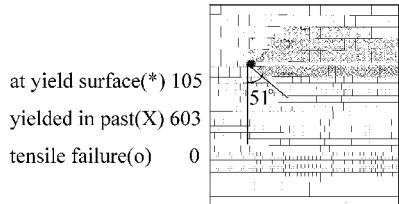


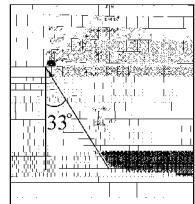
图5 底板应力演化曲线

Fig. 5 Floor stress evolution curves

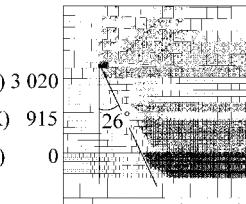
由图4—图5可知,煤层开采后,随着时间的推移,煤层开采边缘的应力集中程度逐渐加剧,集中应



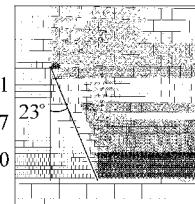
(a) 模型运行500时步



(b) 模型运行710时步



(c) 模型运行810时步



(d) 模型运行1500时步

图6 近距离煤层群开采底板破碎区演化规律

Fig. 6 Contiguous coal seams mining floor damage zone evolution

统计了上位煤层开采后底板塑性区破坏范围与竖直方向的夹角 α 及底板塑性区岩层厚度 M 的变化规律如图7所示。

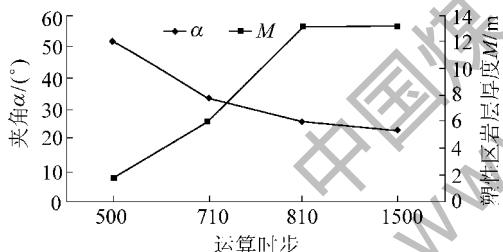


图7 近距离煤层群开采塑性岩层厚度及破坏角演化

Fig. 7 Thickness and damage angle of plastic rock formation in contiguous coal seams

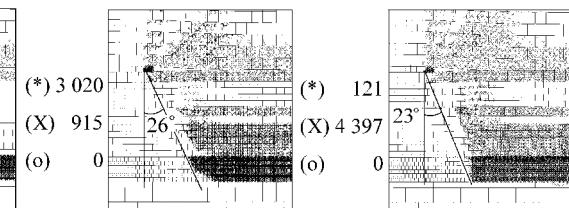
由图6和图7可知,2号煤层开采后,煤层直接底首先进入塑性破坏状态,随时间延长,上位煤层底板强度较低岩层紧随其后,而坚硬岩层进入塑性破坏的时间最迟。同时,随时间继续延长,沿底板垂向,底板塑性破坏区深度不断增加并最终趋向稳定;沿水平方向, α 减小至一定值后也趋向稳定。工作面底板岩层在煤层开采边缘附近塑性区的面积最大,在工作面中部塑性区面积最小。

结合前述知,近距离煤层群上位煤层开采后底板煤岩体在满足其极限强度后将逐渐形成塑性破坏形态,沿底板垂向塑性破坏区的深度基本呈线性增加,而沿水平方向呈扇形扩展,且岩层塑性破坏的最

力由25 MPa增至35 MPa;沿X轴方向及Y轴方向,同一应力水平的等值线逐渐向底板深处扩展,并最终趋向稳定,进而导致了下伏3+4号煤层内围岩应力增高。故近距离煤层群下行开采时,下伏煤层回采巷道的布置及支护应结合上位煤层回采与下伏煤层间的时空关系,从而保证下伏煤层巷道围岩稳定。

3.3 近距离煤层群上位煤层开采底板破碎区演化

通过UDEC模型计算分析22201工作面开采后,时步500、710、810、1500时4种情况下破碎区的演化规律,如图6所示。



(e) 模型运行3020时步

(f) 模型运行121时步

(g) 模型运行4397时步

(h) 模型运行0时步

大厚度在工作面开采边缘附近。因此,在近距离煤层群下行开采时,在较小层间距作用下,位于上位煤层底板的下伏煤层煤体由于强度较小首先进入塑性破坏状态,故巷道开掘时巷道两帮煤体较为破碎,若煤体顶底板岩体强度较低,巷道开掘时顶底板的围岩条件也较差。

4 结 论

1) 通过理论计算分析了2号煤层开采后对底板应力分布规律的影响:22201回采工作面煤层屈服区长度为5.20 m,底板最大破坏深度处距采场煤壁的水平距离为8.73 m,底板破坏区在采空内的最大水平长度为36.35 m,并给出了上位煤层开采后底板的破坏形态图。

2) 通过数值模拟对22201工作面开采后底板应力演化分布规律及破碎区演化规律进行分析,确定了底板最大集中应力沿X、Y轴的分布曲线;确定了底板岩层塑性区破坏的范围,即在垂直方向破坏岩层厚度基本呈现线性增长,水平方向以扇形方式扩展且岩层塑性破坏的最大厚度在工作面开采边缘。

参考文献(References):

- [1] 弓培林,胡耀青,赵阳升,等.带压开采底板变形破坏规律的三维相似模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4396-4402.

- Gong Peilin, Hu Yaoqing, Zhao Yangsheng, et al. Three-dimensional simulation study on law of deformation and breakage of coal floor on mining above aquifer [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4396–4402.
- [2] 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 Industry: Natural Science Edition, 1999, 18(4): 11–18.
- [3] 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): 288–293.
Zhang Hualei Wang Lianguo. Computation of mining induced floor additional stress and its application [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 288–293.
- [4] 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): 191–195.
Zhu Shuyun, Jiang zhenquan, Yao Pu, et al. Application of analytic method in calculating of floor stress of a working face [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2007, 24(2): 191–195.
- [5] 曹树刚, 徐光明, 陈林顿. 盘区巷道底板应力分布的研究 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1993, 10(S1): 177–180.
Cao Shugang, Xu Guangming, Chen Lindun. Study on the stress distribution of the floor of the roadway [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1993, 10(S1): 177–180.
- [6] 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): 318–322.
Wang Lianguo, Han Meng, Wang Zhansheng, et al. Stress distribution and damage law of the mining area [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3): 318–322.
- [7] 段宏飞. 底板破坏深度六因素线性预测模型 [J]. 岩土力学, 2014, 35(11): 3323–3330.
Duan Hongfei. Six factors linear prediction model of depth of in damage floor [J]. Geotechnical Mechanics, 2014, 35(11): 3323–3330.
- [8] 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, Lyu 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.
- [9] 张百胜, 杨双锁, 康立勋. 极近距离煤层回采巷道合理位置确定方法探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 97–101.
Zhang Baisheng, Yang Shuangshuo, Kang Lixun. Discussion on method for determining reasonable position of roadway for ultra-close multi-seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 97–101.
- [10] 赵启峰, 孟祥瑞, 刘庆林. 采动过程中底板岩层变形破坏与损伤机制分析 [J]. 煤矿安全, 2008, 39(4): 12–16.
Zhao Qifeng, Meng Xiangrui, Liu Qinglin. Damage mechanism analysis of deformation failure characteristics in floor strata [J]. Safety in Coal Mines, 2008, 39(4): 12–16.
- [11] 刘德君. 采空区的围岩应力分布及其与底板突水的关系 [J]. 煤矿安全, 1988, 19(7): 35–39.
Liu Dejun. Stress distribution of surrounding rock in goaf and its relationship with floor water inrush [J]. Safety in Coal Mines, 1988, 19(7): 35–39.
- [12] 孟祥瑞, 徐鍇辉, 高召宁, 等. 采场底板应力分布及破坏机理 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1832–1836.
Meng Xiangrui, Xu Chenghui, Gao Zhaoning, et al. Stress distribution and damage mechanism of mining floor [J]. Journal of China Coal Science, 2010, 35(11): 1832–1836.
- [13] 钱鸣高, 缪协兴, 黎良杰. 采场底板岩层破断规律的理论研究 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 55–62.
Qian Minggao Miu Xiexing, Li Liangjie. Mechanism for the fracture behaviors of main floor in longwall mining [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 17(6): 55–62.
- [14] 李迎富, 华心祝. 沿空留巷上覆岩层关键块稳定性力学分析及巷旁充填体宽度确定 [J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1134–1140.
Li Yingfu, Hua Xinzhuz. Mechanical analysis of stability of key blocks of overlying strata for gob-side entry retaining and calculating width of roadside backfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1134–1140.
- [15] 谢文兵, 史振凡, 殷少举. 近距离跨采对巷道围岩稳定性影响分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 1986–1991.
Xie Wenbing, Shi Zhenfan, Yin Shaoju. Stability analysis of surrounding rock masses of roadway under overhead mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 1986–1991.
- [16] 方新秋, 郭敏江, 吕志强. 近距离煤层群回采巷道失稳机制及其防治 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2059–2067.
Fang xinqi, Guo minjiang, Lyu Zhiqiang. Instability mechanism and prevention of roadway under close-distance seam group mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2059–2067.
- [17] 程志恒, 齐庆新, 孔维一, 等. 近距离煤层群下位煤层沿空留巷合理布置研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 453–458,
Cheng Zhiheng, Qi Qingxin, Kong Weiyi. Study on the reasonable layout of gob-side remained gateway of lower coal seam close to coal seam group [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(3): 453–458.
- [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: 20–46.