

文章编号:1671-251X(2020)10-0104-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17533

综放工作面煤柱周围应力分布特征研究

刘明, 曹民远, 李波

(神华新疆能源有限责任公司 屯宝煤矿, 新疆 昌吉 831114)



扫码移动阅读

摘要:对高瓦斯及断层赋存的综放工作面来说,合理宽度的留设煤柱不仅可以起到支撑上覆岩层压力的作用,还能隔绝采空区瓦斯,减少瓦斯扩散。但目前缺乏对不同煤柱合理留设宽度条件下围岩应力分布特征的研究,同时不同矿井影响煤柱宽度的因素各异,造成煤柱留设宽度的计算依据难以准确确定。针对上述问题,以屯宝煤矿综放工作面 M_{9-10} 煤层为工程背景,采用理论计算方式得到煤柱留设宽度的最小值,采用数值模拟方式对 M_{9-10} 煤层不同宽度的煤柱周围应力分布特征进行研究。研究结果表明:煤柱的合理留设宽度为30~40 m;煤柱内的水平应力随着煤柱宽度加大趋向于采空区侧,说明加大煤柱宽度可以转移水平应力对巷道的影 响,从而提高巷道稳定性;煤柱垂直应力具有双波峰特征,巷道侧和采空区侧垂直应力峰值与应力集中系数均随煤柱宽度的加大而降低;巷道侧应力峰值在距巷道 2.5 m 处,之后随着距巷道距离的增加,垂直应力先急速减小,然后缓慢增加,在采空区侧出现应力峰值后缓慢减小。为验证 40 m 煤柱宽度的合理性,在该综放工作面进行钻孔应力及瓦斯浓度现场监测,结果表明,40 m 煤柱留设宽度能够满足巷道支护强度和瓦斯扩散实际要求。

关键词:煤炭深部开采;综放工作面;巷道支护;瓦斯管控;留设煤柱;煤柱宽度;小煤柱;围岩应力分布

中图分类号:TD713 文献标志码:A

Research on stress distribution characteristics of coal pillar in fully mechanized caving face

LIU Ming, CAO Minyuan, LI Bo
(Tunbao Coal Mine of Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., Changji 831114, China)

Abstract: For fully mechanized caving face with high gas and fault occurrence, coal pillar with reasonable reserved width can not only support overlying strata pressure, but also isolate gas in goaf and reduce gas diffusion. However, there is a lack of research on distribution characteristics of surrounding rock stress under the condition of reasonable reserved width of different coal pillars at present, and it is difficult to accurately determine the basis for calculating reserved width of coal pillars because factors affecting coal pillar width in different mines are different. For the above problems, taking M_{9-10} coal seam on fully mechanized caving face of Tunbao Coal Mine as engineering background, the minimum width of coal pillar is obtained by theoretical calculation, and stress distribution characteristics around coal pillars with different width are studied by numerical simulation. The results show that: reasonable coal pillar width is 30-40 m; horizontal stress in coal pillar tends to goaf side with the increase of coal pillar width, which verifies that the increase of coal pillar width can transfer influence of horizontal stress on roadway, so as to improve roadway stability; vertical stress of coal pillar has characteristics of double wave peaks, and the vertical stress peak and stress concentration coefficient at roadway side and goaf side decrease with the increase of coal pillar width; location of stress peak at roadway side is 2.5 m away from the roadway,

收稿日期:2019-11-29;**修回日期:**2020-08-20;**责任编辑:**王晖,郑海霞。
作者简介:刘明(1973—),男,新疆乌鲁木齐人,工程师,主要从事煤矿“一通三防”和顶板管控研究工作,E-mail:819045811@qq.com。
引用格式:刘明,曹民远,李波.综放工作面煤柱周围应力分布特征研究[J].工矿自动化,2020,46(10):104-108.
LIU Ming,CAO Minyuan,LI Bo. Research on stress distribution characteristics of coal pillar in fully mechanized caving face[J]. Industry and Mine Automation,2020,46(10):104-108.

then as the distance from the roadway increases, the vertical stress first decreases rapidly and then increases slowly, and then slowly decreases after the stress peak appears on the goaf side. In order to verify rationality of 40 m coal pillar width, field monitoring of drilling stress and gas concentration is carried out on the fully mechanized caving face. The result shows that the coal pillar width of 40 m can meet actual requirements of roadway support strength and gas diffusion.

Key words: deep coal mining; fully mechanized caving face; roadway support; gas control; reserved coal pillar; coal pillar width; small coal pillar; surround rock stress distribution

0 引言

随着煤矿开采深度的增加,在深部高地应力、复杂构造条件等因素作用下,巷道变形越发严重,诱发煤岩动力灾害,威胁煤炭安全回采^[1-4]。留设煤柱是煤矿传统的护巷方法之一,合理宽度的留设煤柱能与支护结构体及巷道围岩形成具有一定承载能力的支护整体,特别是对高瓦斯及断层赋存的综放工作面来说,不仅可以起到支撑上覆岩层压力的作用,还能隔绝采空区瓦斯,减少瓦斯扩散^[5],对于保障工作面安全具有重要意义。

一些学者开展了煤柱留设宽度的理论研究和实践应用^[6-8],通过理论计算、数值模拟、工程经验等方法确定煤柱合理留设宽度^[9-11],但对不同煤柱留设宽度条件下围岩应力分布特征缺乏深入研究。同时不同矿井影响煤柱宽度的因素各异,造成煤柱留设宽度的计算依据难以准确确定。

神华新疆能源有限责任公司屯宝煤矿地质构造复杂,回采工作面走向范围内断层分布较多,受采动影响,小煤柱导致综放工作面巷道变形严重、采空区瓦斯气体管控难。针对上述问题,本文以综放工作面 M₉₋₁₀ 煤层为工程背景,通过理论计算、数值模拟方式对 M₉₋₁₀ 煤层不同宽度的煤柱周围应力分布特征进行研究,并对其承压作用及瓦斯隔离效果进行工程验证。

1 工程背景

屯宝煤矿位于昌吉市硫磺沟镇,井田含煤地层为中侏罗统西山窑组,可采煤层(组)由上而下共有 4 组,依次为 M₄₋₅, M₇, M₉₋₁₀, M₁₄₋₁₅ 煤层。M₉₋₁₀ 煤层含有 M₉, M₁₀ 2 个分层,组合煤层平均厚度为 9.3 m,中间夹矸 3 层,夹矸平均厚度为 0.88 m,煤层倾角为 15~18°,属于缓倾斜特厚煤层。M₉₋₁₀ 煤层顶板为灰褐色粉砂岩,饱和状态下单轴抗压强度为 0.04~20.16 MPa,平均为 6.99 MPa,为极不稳定顶板;底板为灰黑色粉砂岩或泥岩,饱和状态下单向抗压强度为 1.29~31.30 MPa,平均为 15.06 MPa,为不稳定底板。受地应力、构造应力与

采掘活动等因素的影响,巷道变形量较大,瓦斯赋存量较大。经测定,矿井相对瓦斯涌出量为 3.8 m³/t,绝对瓦斯涌出量为 15.83 m³/min,采煤工作面绝对瓦斯涌出量为 11.84 m³/min,属于高瓦斯矿井。

在 M₉₋₁₀ 煤层共布置 1191,1192,1193 三个综放工作面,采用长壁走向综采放顶煤采煤方法,一水平工作面采用上行开采。首采工作面为 1191 综放工作面。3 个综放工作面分别由 13,40 m 留设区段煤柱隔开,如图 1 所示。1191,1192,1193 综放工作面倾斜长度分别为 147,196,132 m,回采走向长度分别为 1 100,1 180,1 250 m,平均仰角为 18°。

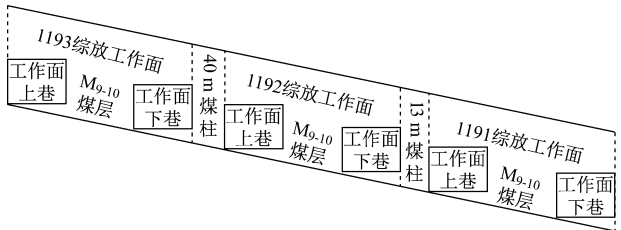


图 1 M₉₋₁₀ 煤层回采工作面布置
Fig. 1 Layout of working face of M₉₋₁₀ coal seam

2 煤柱留设宽度理论计算

2.1 煤柱宽度理论公式

M₉₋₁₀ 煤层综放工作面煤柱一侧为采空区,一侧为工作面巷道,采空区与工作面巷道在煤柱两侧形成各自的弹性区。区段煤柱保持巷道稳定的基本条件:煤柱两侧产生弹性变形后,在煤柱中央存在一定宽度的弹性核,弹性核宽度不小于煤柱高度的 2 倍^[12-14]。考虑瓦斯的影响,煤柱宽度的最小值为

$$B_{\min} = x_0 + 2h + x_1 \tag{1}$$

式中: x_0 为采空区侧弹性区宽度, m; h 为采煤高度, m; x_1 为巷道侧弹性区宽度, m。

以 Mohr-Coulomb 为屈服准则得到采空区侧和巷道侧弹性区宽度公式:

$$x_0 = \frac{h}{2\epsilon f} \ln \frac{\sigma_0 + K_1 \gamma H}{\epsilon (P_b + \sigma_0)} \tag{2}$$

$$x_1 = \beta r_1 \left[\frac{(\sigma_0 + \gamma H)(1 - \sin \varphi)}{P + \sigma_0} \right]^\epsilon \tag{3}$$

式中: ϵ 为三轴应力系数, $\epsilon = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$, φ 为内摩擦角, (°); f 为煤层与顶底板接触面的摩擦

因数, $f=\tan(\varphi/4)$; σ_0 为水平主应力, MPa; K_1 为应力集中系数; γ 为覆岩容重, $\gamma=\rho g$, ρ 为覆岩密度, kg/m^3 , g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为埋深, m; P_b 为矸石约束力, MPa; β 为弹性区宽度修正系数, 取值参考表 1; r_1 为巷道的截面半径, m; P 为巷道支护力, MPa。

表 1 矩形巷道弹性区宽度修正系数
Table 1 Correction coefficient of plastic zone width of rectangular roadway

巷道宽高比	0.75~1.5	<0.75	>1.5
β	1.4	1.6	1.6

2.2 M₉₋₁₀ 煤层煤柱宽度计算

1192 综放工作面地表标高为 +1 274 ~ +1 338 m, 开采提高为 +903 m ~ +968 m, 埋深为 306 ~ 435 m, 平均埋深为 370 m; 1193 综放工作面地表标高为 +1 275 ~ +1 358 m, 开采标高为

表 2 M₉₋₁₀ 煤层围岩试样物理性质实测结果

Table 2 Measured results of physical properties of surrounding rock samples of M₉₋₁₀ coal seam

煤岩层	视密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率/%	单向抗压 强度/MPa	单向抗拉 强度/MPa	弹性模 量/GPa	泊松比	粘结力/ MPa	内摩擦 角/(°)
M ₉ 煤层	1 328.39	13.41	11.45	0.81	3.43	0.23	3.0	36
M ₉ 煤层顶板	2 516.77	1.07	25.91	2.07	9.85	0.13	6.4	37
M ₁₀ 煤层	1 283.12	10.91	14.05	1.04	2.08	0.24	2.8	37
M ₁₀ 煤层底板	2 449.19	1.17	35.30	2.11	23.09	0.12	6.5	37

通过式(1)计算得 1192, 1193 综放工作面煤柱理论宽度的最小值分别为 26.509, 24.667 m。

3 煤柱周围应力分布特征数值模拟

开采实践中, 1192 综放工作面煤柱宽度留设 13 m 时工作面下巷变形严重, 1193 综放工作面煤柱宽度留设 40 m 时巷道较为稳定。1192, 1193 综放工作面煤柱理论宽度的最小值分别为 26.509, 24.667 m, 在 25 m 左右, 为计算方便, 将煤柱宽度方案设为 13, 20, 25, 30, 35, 40 m 共 6 种。以 1193 综放工作面地质及开采设计为原型构建 FLAC3D 数值计算模型, 研究采动应力与断层构造应力耦合作用下不同煤柱宽度围岩应力变化规律。M₉₋₁₀ 煤层围岩在不同剪切角度下抗剪切强度测试结果见表 3, 工作面区段煤柱模型如图 2 所示。

3.1 煤柱周围水平应力分布特征

M₉₋₁₀ 煤层不同宽度煤柱周围水平应力分布特征如图 3 所示。在煤柱宽度为 13 m 时, 水平应力在煤柱的巷道侧和采空区出现了连通, 这表明煤柱宽度过小, 在覆岩应力作用下达到承载极限时会出现屈服、坍塌。随着煤柱宽度加大, 煤柱内的水平应力

+981 ~ +1 029 m, 埋深为 266 ~ 377 m, 平均埋深为 322 m。

M₉₋₁₀ 煤层围岩试样物理性质实测结果见表 2。根据实测结果, 取 M₉₋₁₀ 煤层的内摩擦角 $\varphi=36.5^\circ$, 水平主应力 $\sigma_0=3.92$ MPa, 经计算得三轴应力系数 $\epsilon=3.936$, 摩擦因数 $f=0.25$ 。1192 综放工作面下巷和 1193 综放工作面上巷均为矩形巷道, 巷道宽度 $B_0=4.7$ m, 巷道高度 $h_0=3.7$ m, 对应的巷道截面半径 $r_1=2.35$ m, 由表 1 可知其弹性区宽度修正系数 $\beta=1.4$ 。应力集中系数 K_1 一般取 2 ~ 4, 由于综放工作面压力较大, 取 $K_1=4$ 。采煤高度 $h=9.3$ m。矸石约束力一般忽略不计, 即 $P_b=0$ 。巷道支护力 $P=0.3$ MPa, 覆岩密度 $\rho=2\,000$ kg/m^3 。将各参数带入式(2)和式(3), 计算得 1192 综放工作面采空区侧和巷道侧弹性区宽度分别为 3.572, 4.337 m, 1193 综放工作面采空区侧和巷道侧弹性区宽度分别为 3.009, 3.068 m。

表 3 M₉₋₁₀ 煤层围岩在不同剪切角度下抗剪切强度测试结果

Table 3 Shear strength test results of surrounding rock of M₉₋₁₀ coal seam at different shear angles

煤岩层	45°		53°		61°	
	正应力/ MPa	剪应力/ MPa	正应力/ MPa	剪应力/ MPa	正应力/ MPa	剪应力/ MPa
M ₉ 煤层	10.32	10.32	5.27	7.00	2.82	5.09
M ₉ 煤层 顶板	24.75	24.75	12.65	16.79	5.84	10.54
M ₁₀ 煤层	10.85	10.85	5.60	7.43	2.55	4.60
M ₁₀ 煤层 底板	23.59	23.59	14.95	19.84	5.75	10.37

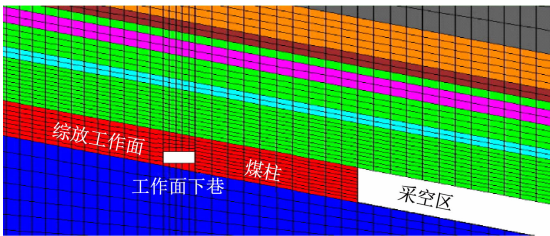


图 2 工作面区段煤柱模型

Fig. 2 Coal pillar model of working face section

主要趋向于采空区侧, 表明加大煤柱宽度可以转移

水平应力对巷道的影响,从而提高巷道稳定性。

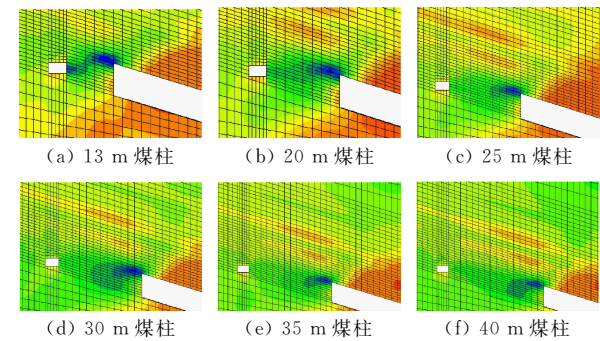


图3 不同宽度煤柱周围水平应力分布特征
Fig. 3 Distribution characteristics of horizontal stress around coal pillars with different widths

3.2 煤柱周围垂直应力分布特征

采动应力与断层构造应力耦合作用下不同宽度煤柱周围垂直应力分布特征如图4所示。可以看出垂直应力表现出双波峰特征,随着煤柱宽度加大,巷道侧和采空区侧垂直应力峰值均出现了下降。煤柱内部应力峰值与应力集中系数见表4,可以看出加大煤柱宽度可以降低应力集中系数,从而降低综放工作面动压影响范围与程度,提高巷道稳定性。

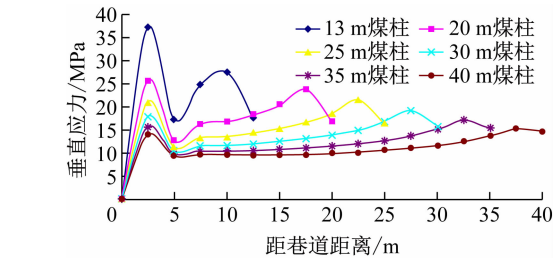


图4 不同宽度煤柱周围垂直应力分布特征
Fig. 4 Distribution characteristics of vertical stress around coal pillars with different widths

表4 煤柱内部应力峰值与应力集中系数

Table 4 Stress peak and stress concentration coefficient in coal pillar

煤柱宽度/m	应力峰值/MPa	应力集中系数	煤柱宽度/m	应力峰值/MPa	应力集中系数
13	37.31	5.04	30	17.85	2.41
20	25.65	3.47	35	15.64	2.11
25	20.99	2.84	40	14	1.89

由图4还可看出,巷道侧应力峰值基本在2.5 m位置处,此后随着距巷道距离增加,煤柱周围垂直应力先急速减小,然后呈缓慢增加趋势,采空区侧出现应力峰值,然后呈缓慢减小趋势;13 m煤柱由于其宽度过小,应力变化剧烈,20,25,30,35,40 m煤柱内的应力变化趋势较为平缓。考虑到煤柱理论宽度最小为24.667 m,故认为煤柱的合理宽度为30~40 m。

4 煤柱周围应力与瓦斯涌出工程监测

为充分验证40 m煤柱宽度的合理性,在1193综放工作面开展了钻孔应力及瓦斯监测。在工作面下巷煤壁侧及煤柱侧安装钻孔应力计,应力计位置超前工作面50 m,埋设深度均为3 m,钻孔施工高度为1.5 m。钻孔应力监测结果如图5所示。

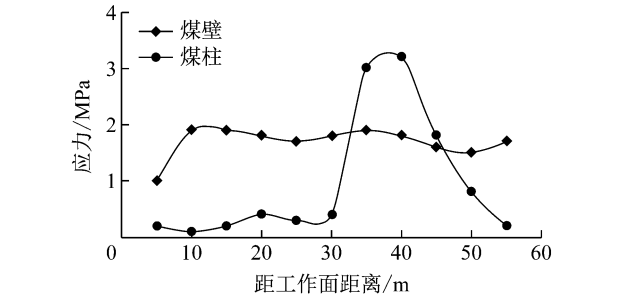


图5 钻孔应力监测结果
Fig. 5 Monitoring results of borehole stress

由图5可知,受工作面回采影响,工作面前方产生采动应力集中。煤壁侧应力集中在1~2 MPa,且波动较小,在10~20 m区域有一定的应力集中,但集中程度并不大;煤柱侧应力集中在0~3.2 MPa,且在30~40 m区域应力集中程度较大。在距工作面0~30 m区域内,煤壁侧应力和煤柱侧应力变化均较小;在33~46 m区域内,煤柱承受的应力大于煤壁承受应力。由表4可以看出,相对于13 m煤柱宽度,煤柱宽度为40 m时,应力集中系数从5.04降至1.89,能够显著降低应力集中现象。因此,40 m煤柱宽度能够满足应力需求。

经现场实测,工作面回采过程中,回风流平均瓦斯体积分数为0.25%,上隅角瓦斯体积分数长期维持在0.3%左右。1193综放工作面瓦斯监测结果如图6所示。可以看出,回采期间工作面瓦斯涌出最大值为18.26 m³/min,平均值为14 m³/min;风排瓦斯量最大值为5.2 m³/min,超过5 m³/min仅有1次,平均风排瓦斯量为3.5 m³/min;高位钻孔抽采量最大值为14.46 m³/min,平均值为10 m³/min,满足生产要求,且在工作面过断层期间煤柱侧瓦斯监测未现异常。这表明,煤柱宽度为40 m时,满足

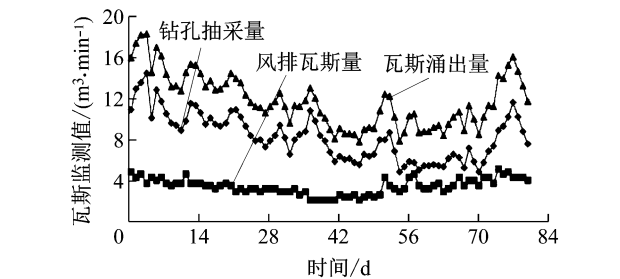


图6 工作面瓦斯监测结果
Fig. 6 Gas monitoring results in working face

瓦斯实际扩散需求。

现场应力和瓦斯监测结果表明,40 m 预设煤柱能够满足矿井要求。需要指出的是,小煤柱应力集中明显,而大煤柱的煤损较大,无煤柱沿空掘巷工艺是未来应用方向。

5 结论

(1) 基于煤柱周围弹性区分布特征,分别对 M_{9-10} 煤层的 2 个综放工作面煤柱宽度进行了理论计算与数值模拟,确定了屯宝煤矿 M_{9-10} 煤层煤柱的合理宽度范围为 30~40 m。

(2) 数值模拟结果表明:煤柱内的水平应力随着煤柱宽度加大趋向于采空区侧,加大煤柱宽度可以转移水平应力对巷道的影响,从而提高巷道的稳定性;煤柱侧垂直应力具有双波峰特征,巷道侧和采空区侧垂直应力峰值与应力集中系数均随着煤柱宽度的加大而降低;巷道侧应力峰值在距巷道 2.5 m 处,随着距巷道距离增加,垂直应力先急速减小,然后缓慢增加,采空区侧出现应力峰值后呈缓慢减小趋势。

(3) 1193 综放工作面围岩钻孔应力与瓦斯监测数据表明,合理的煤柱留设宽度能够满足巷道支护强度和瓦斯实际扩散需求。

参考文献(References):

- [1] 王国法,范京道,徐亚军,等.煤炭智能化开采关键技术创新进展与展望[J].工矿自动化,2018,44(2):5-12.
WANG Guofa, FAN Jingdao, XU Yajun, et al. Innovation progress and prospect on key technologies of intelligent coal mining[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(2): 5-12.
- [2] 潘俊锋,刘少虹,马文涛,等.深部冲击地压智能防控方法与发展路径[J].工矿自动化,2019,45(8):19-24.
PAN Junfeng, LIU Shaohong, MA Wentao, et al. Intelligent prevention and control method of deep rock burst and its development[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(8): 19-24.
- [3] 邱黎明,李忠辉,王恩元,等.煤与瓦斯突出远程智能监测预警系统研究[J].工矿自动化,2018,44(1):17-21.
QIU Liming, LI Zhonghui, WANG Enyuan, et al. Research on remote intelligent monitoring and early warning system for coal and gas outburst[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(1): 17-21.
- [4] 高亚斌,林柏泉,杨威,等.不渗透小断层群瓦斯异常赋存特点及防治研究[J].中国矿业大学学报,2013,

42(6):989-995.

GAO Yabin, LIN Baiquan, YANG Wei, et al. Research on the abnormal occurrence characteristics of gas in impermeable small fault group and its control technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(6): 989-995.

- [5] 谭凯,孙中光,林引,等.双巷布置综采工作面煤柱合理宽度研究[J].煤炭工程,2017,49(3):8-10.
TAN Kai, SUN Zhongguang, LIN Yin, et al. Research on rational width of coal pillar in double-lane fully-mechanized working face[J]. Coal Engineering, 2017, 49(3): 8-10.
- [6] 柏建彪,侯朝炯,黄汉富.沿空掘巷窄煤柱稳定性数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):3475-3479.
BAI Jianbiao, HOU Chaojiong, HUANG Hanfu. Numerical simulation study on stability of narrow coal pillar of roadway driving along goaf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3475-3479.
- [7] 王德超,李术才,王琦,等.深部厚煤层综放沿空掘巷煤柱合理宽度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(3):539-548.
WANG Dechao, LI Shucai, WANG Qi, et al. Experimental study of reasonable coal pillar width in fully mechanized top coal caving face of deep thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 539-548.
- [8] 张国华,张雪峰,蒲文龙,等.中厚煤层区段煤柱留设宽度理论确定[J].西安科技大学学报,2009,29(5):521-526.
ZHANG Guohua, ZHANG Xuefeng, PU Wenlong, et al. Theoretical determination of the section coal pillar's reserve width in medium thick coal seam[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(5): 521-526.
- [9] 李鹏飞,刘启蒙,陈秀艳,等.破碎带宽度对断层活化及煤柱留设的影响研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(3):36-41.
LI Pengfei, LIU Qimeng, CHEN Xiuyan, et al. Research on influence of width of fracture zone on fault activation and design of coal pillar[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(3): 36-41.
- [10] 王宇.保德煤矿 8# 煤层护巷煤柱合理宽度的确定[J].煤炭工程,2017,49(12):41-45.
WANG Yu. Determination of reasonable coal pillar width in No. 8 coal seam of Baode Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2017, 49(12): 41-44.
- [11] 杨光宇,姜福兴,李琳,等.复合动力灾害条件下孤岛

工作面区段煤柱宽度留设研究[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(8):145-151.

YANG Guangyu,JIANG Fuxing,LI Lin,et al. Study on width retaining of section coal pillar in isolated working face under the conditions of compound dynamic disasters[J]. Journal of Safety Science and Technology,2017,13(8):145-151.

[12] 张常光,祁航,赵均海,等. 倾斜煤层条带煤柱留设宽度统一解[J]. 采矿与安全工程学报,2019,36(2): 248-255.

ZHANG Changguang,QI Hang,ZHAO Junhai,et al. Unified solutions to remained width for inclined strip coal pillars [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2019,36(2):248-255.

[13] 张保亮. 浅埋煤层开采覆岩运动规律及区段煤柱宽度留设研究[D]. 青岛:山东科技大学,2014.

ZHANG Baoliang. Study on the movement of surrounding rocks and sectional coal pillar width setting during shallow seam mining [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology,2014.

[14] 王文渊. 深井综放开采区段煤柱合理宽度研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.

WANG Wenyuan. The research on the reasonable size of coal pillar with fully mechanized caving in deep mines [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2014.