

中文引用格式:王虹玉,程志恒,王朋,等. 孤岛工作面覆岩结构演化及区段煤柱稳定性[J]. 中国安全科学学报,2024,34(11):108-118.
英文引用格式:WANG Hongyu, CHENG Zhiheng, WANG Peng, et al. Evolution of overburden structure and stability of coal pillars in isolated island working face [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11): 108-118.

孤岛工作面覆岩结构演化及区段煤柱稳定性*

王虹玉^{1,2}副教授,程志恒³副研究员,王朋^{**3},陈亮³副研究员,
曲晓明⁴高级工程师,郭凯⁵

(1 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院,北京 100083;2 华北科技学院 文法学院,河北 廊坊 065201;3 华北科技学院 矿山安全学院,河北 廊坊 065201;4 中煤科工集团沈阳研究院有限公司,辽宁 沈阳 113122;5 北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.0682

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(52074120);国家自然科学基金青年基金资助(52204133,52104131)。

【摘要】 为探究浅埋煤层孤岛工作面开采时覆岩结构演化及区段煤柱稳定性,以泰华煤矿 50104 工作面为工程背景,采用理论分析、数值模拟、现场实测相结合的研究手段,分析其两侧区段煤柱承载能力及区段煤柱覆岩结构演化特征;并利用 FLAC^{3D} 数值软件,模拟塑性区分布情况以及采动应力演化特征。结果表明:50104 工作面推进过程中,东西两侧区段煤柱塑性破坏滞后于工作面推进过程,位于工作面后方采空区处的区段煤柱处于塑性破坏状态,而位于工作面煤壁前方的煤柱存在稳定的弹性区,整体保持稳定,且两侧区段煤柱应力分布呈现相同特征,2 条 11 m 煤柱高应力集中区域保持对称,均位于工作面后方;工作面区段煤柱高应力破坏区域发展速度滞后于工作面推进速度,工作面前方区段煤柱中心区域平均应力值从 3.35 MPa 增加至 3.54 MPa,但始终未超过理论计算得到的煤柱承载强度值;通过分析 50104 工作面的矿压监测数据,得出实测初撑力均值为 3932.4 kN,占液压支架额定初撑力的 55%;平均最大工作阻力 5 812.3 kN,占额定工作阻力的 61.2%;加权平均阻力均值为 4 836.6 kN/架,占额定工作阻力的 50.9%;最大来压 6 013 kN,支架应力约 2.35 MPa,证明 11 m 煤柱稳定,位于工作面煤壁前方区段煤柱的整体稳定性较好。

【关键词】 孤岛工作面; 覆岩结构; 区段煤柱; 浅埋煤层; 煤柱稳定性; 数值模拟

Evolution of overburden structure and stability of coal pillars in isolated island working face

WANG Hongyu^{1,2}, CHENG Zhiheng³, WANG Peng³, CHEN Liang³, QU Xiaoming⁴, GUO Kai⁵

(1 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2 School of Grammar and Law, North China Institute of Science and Technology, Langfang Hebei 065201, China; 3 School of Mine Safety, North China Institute of Science and Technology, Langfang Hebei 065201, China; 4 China Coal Science and Technology Group Shenyang Research Institute Co., Ltd., Shenyang Liaoning 113122, China; 5 School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

* 文章编号:1003-3033(2024)11-0108-11; 收稿日期:2024-05-14; 修稿日期:2024-08-29

** 通信作者:王朋(1998—),男,贵州毕节人,硕士研究生,主要方向为煤矿灾害防控。E-mail:706849319@qq.com。

Abstract: To investigate the evolution of overburden structure and the stability of district coal pillars during the mining of shallow-buried coal seam island faces, a study was conducted with the 50104 working face of Taihua coal mine as the engineering background. The research employed a combination of theoretical analysis, numerical simulation, and on-site measurement to analyze the load-bearing capacity of the district coal pillars and the characteristics of overburden structure evolution on both sides. The FLAC^{3D} numerical software was utilized to simulate the distribution of plastic zones and the evolution of mining-induced stress. The results indicate that during the advancement of the 50104 working face, the plastic destruction of the district coal pillars on both sides lagged behind the progress of the working face. The district coal pillars located in the goaf area behind the working face were in a state of plastic destruction, while those in front of the working face coal wall maintained a stable elastic zone, overall remaining stable. Throughout the working face advancement, the stress distribution of the district coal pillars on both sides exhibited the same characteristics, with two 11 m coal pillars showing symmetric high-stress concentration areas, both located behind the working face. The development speed of the high-stress destruction area of the district coal pillars lagged behind the advancement speed of the working face. The average stress value in the central area of the district coal pillars in front of the working face increased from 3.35 MPa to 3.54 MPa, but it never exceeded the coal pillar bearing capacity value calculated theoretically. Analysis of the mine pressure monitoring data from the 50104 working face revealed that the average initial support force was 3 932.4 kN, accounting for 55% of the rated initial support force of hydraulic support. The average maximum working resistance was 5 812.3 kN, representing 61.2% of the rated working resistance. The weighted average resistance was 4 836.6 kN per support, which is 50.9% of the rated working resistance. The maximum pressure was 6 013 kN, with a support stress of about 2.35 MPa, proving the stability of 11 m coal pillars and indicating that the overall stability of the district coal pillars in front of the working face coal wall is relatively good.

Keywords: island working face; overlying rock structure; section coal pillar; pillar stability; shallow coal seam; numerical simulation

0 引言

煤层开采过程受地质条件、煤层赋存条件、采掘衔接以及生产布局等不合理因素影响,在工作面布置上,常使用间隔式采矿方式,形成孤岛工作面^[1]。孤岛工作面通常表现出顶板破碎度较高,来压步距较短,来压强度较大,煤壁前方支承应力明显增加^[2],且易受到冲击,存在较强的冲击倾向性。因此,现代化矿井亟须解决孤岛工作面的安全和高效开采,以实现对煤炭资源的有效回收^[3]。

诸多学者开展了孤岛工作面开采稳定性研究,并针对巷道围岩变形破碎严重、孤岛工作面瓦斯灾害防治,提出相应的措施,如邢世坤等^[4]为解决深部孤岛充填工作面沿空掘巷围岩控制难题,提出“高强度锚杆+大直径高延伸率锚索”协同支护方案;郭欢欢等^[5]分析了突出煤层孤岛工作面多场演化特征及瓦斯灾害防治;陈晓祥等^[6]研究了孤岛工作面动压回采巷道平移变形力学机制及控制技术,提出“携顶底,控两帮”的支护思路;杨光宇等^[7]基

于冲击地压发生的强度、能量及冲击倾向性理论,研究了煤矿冲击地压危险性的工程判据,提出针对中硬及以上煤体的冲击危险性的工程判别方法;谢广祥等^[8]应用弹塑性极限平衡理论,分析了孤岛工作面基本顶变形特征及破断距;葛海军等^[9]得出浅埋深孤岛工作面下行开采过上覆遗留煤柱强矿压特征及防治技术;朱广安等^[10]研究了临断层孤岛面冲击危险与断层滑移;程利兴^[11]、范志忠^[12]等开展了深部孤岛工作面巷道围岩、覆岩垮落结构特征研究;周贤等^[13]提出“锚网索+钢带+金属网+注浆”联合支护技术加固巷道;董文卓等^[14]针对上覆不规则煤柱孤岛工作面冲击地压问题,提出制造弱结构调控方法;李润芝^[15]采用理论分析、数值模拟与现场验证,确定非对称支护参数,实现“卸-支平衡”协同控制;朱斯陶等^[16]将我国整体失稳型冲击地压分为孤岛工作面、大巷煤柱及底煤整体滑移 3 类。建立各类型力学模型,提出评估方法与防治对策,揭示其发生机制。

综上,上述研究多为孤岛工作面开采扰动导致

围岩大变形失稳以及上覆岩层矿压显现特征,并针对巷道围岩变形破碎严重,提出相应的措施,但对于浅埋煤层孤岛工作面覆岩结构演化特征及稳定性研究却鲜有提及。鉴于此,笔者拟以陕西神木泰华煤业有限公司煤矿(简称泰华煤矿)为工程背景,将结合采场覆岩结构、区段煤柱稳定性及数值模拟仿真试验展开相关探索,着重分析浅埋煤层开采孤岛工作面覆岩结构演化特征及区段煤柱稳定性,为浅埋煤层合理控制采场矿压及巷道维护,确保孤岛工作面安全开采,提供一定的理论依据。

1 工作面开采条件

泰华煤矿 50104 工作面开采 5⁻¹ 煤层,煤层平均厚度为 4.72 m,工作面长度 114 m,平均埋深 90 m。西与 50105 工作面采空区保护煤柱相邻,南与 501 盘区回风大巷相邻,东侧东北端 80 m 范围为榆家梁井田扩大区,东侧其余部分与已采的 50103 工作面采空区保护煤柱相邻,其中,50103 工作面及 50105 工作面已开采,50104 工作面处于孤岛状态。工作面采用倾斜长壁后退式采煤法,全部垮落法管理顶板。5⁻¹ 煤层综合柱状如图 1 所示。

柱状	厚度/ m	岩性描述
	12.0	黄土: 黄色粉土沉积物, 常含有古土壤层及钙质结核层, 垂直节理发育
	22.0	黏土: 由硅酸盐矿物在地球表面风化后形成成分主要为氧化硅与氧化铝
	4.0	粉砂岩: 粉砂岩的碎屑组分一般比较简单, 以石英为主
	9.0	砂质泥岩: 深灰黑色, 致密。块状, 平坦状断口, 局部为泥岩, 含植物化石
	10.0	粉砂岩: 粉砂岩的碎屑组分一般比较简单, 以石英为主
	6.0	细粒砂岩: 风化面黄褐色, 新鲜面灰绿色, 细粒结构, 块状构造
	19.28	中粒砂岩: 风化面棕黄色, 新鲜面灰白色, 中砂结构, 块状构造
	4.72	5 ⁻¹ 煤: 黑色, 较硬
	3.0	粉砂岩: 以石英为主, 岩屑较少
		下伏岩层

图 1 5⁻¹ 煤层综合柱状

Fig. 1 5⁻¹ Comprehensive pillar diagram of coal seam

2 区段煤柱覆岩结构演化特征

为保证孤岛工作面安全开采,研究其覆岩结构,

在整个采掘过程中,区段煤柱上方围岩结构的变形主要经历巷道掘进期、上区段开采期和本区段开采期 3 个阶段。

2.1 巷道掘进期间

根据工作面上覆岩体结构的特点,在巷道掘进阶段,由于掘进活动远离大结构,巷道外部应力和围岩未发生明显变化,主要变形由掘进后围岩应力重新分布引起,影响上覆岩体结构的稳定性,尤其是在开采扰动的作用下,围岩的应力状态发生显著变化。因此,支护小结构和煤柱设计在应对应力和载荷变化中能够有效缓解巷道围岩的变形风险,确保巷道的安全性与稳定性。巷道掘进期间区段煤柱与上覆岩体结构如图 2 所示。

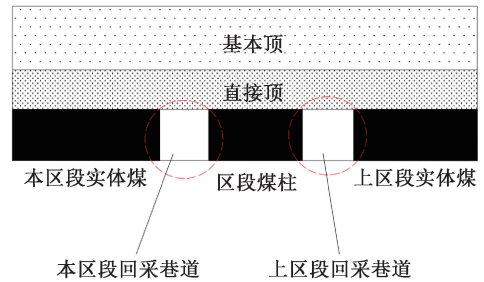


图 2 巷道掘进期间区段煤柱与上覆岩体结构

Fig. 2 Structure of coal pillars and overlying rock mass during tunnel excavation

2.2 上区段开采期间

上区段开采初期,基本顶回转下沉较小,围岩的应力分布相对均匀。随着工作面推进,在回转力矩 m 和 m_1 的共同作用下,岩块 1 逐渐发生回转下沉,且运动的幅度和频率也随之加大。这种动态变化加剧了围岩的应力重新分布,煤柱承受来自顶板和悬臂部分岩块施加的载荷,导致其应力状态呈现出单侧“单峰”分布特征,其结构如图 3 所示^[17]。

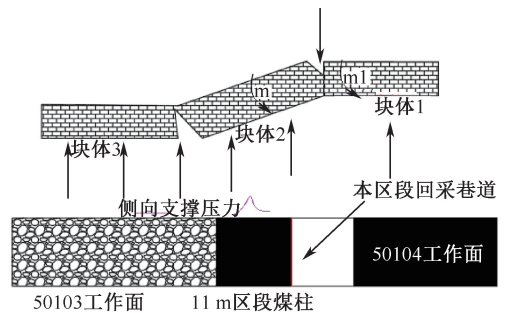


图 3 上区段开采期间煤柱与上覆岩层结构变化

Fig. 3 Schematic diagram of structural changes in coal pillars and overlying strata during upper section mining period

2.3 本区段开采期间

由于基本顶岩块在采空区发生断裂,煤柱及其后方的开采巷道承受来自顶板和悬臂部分的静态载荷,以及基本顶断裂所产生的动态载荷。当基本顶岩层断裂后,长边断裂线直接与原有关键块衔接,岩块 1 在回转力矩 m 和 m_1 的共同作用下,向本区段产生较大程度的回转下沉。煤柱的垂直应力受到周围工作面变动影响,导致支承应力的叠加,使煤柱的应力分布呈现出明显的“双峰”特征,如图 4 所示。

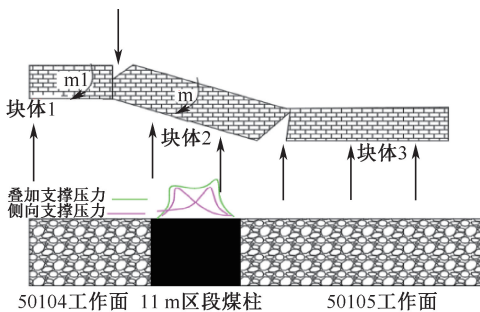


图 4 本区段开采期间煤柱与上覆岩层结构变化

Fig. 4 Structural changes in coal pillars and overlying strata during mining period of this section

上述 3 个阶段中,掘进和开采阶段中巷道围岩应力的来源有所不同。掘进阶段应力集中相对较小,主要受到局部地质条件影响。开采阶段,随着上覆岩层的断裂和外部力学环境的变化,围岩应力的集中程度明显提高,影响巷道的稳定性。尽管岩块的支承条件保持不变,岩块间的受力情况却会因应力重新分布发生变化。因此,合理设计煤柱和支护参数确保巷道浅部围岩形成稳定的结构,避免在采掘活动中遭受损伤,确保采掘活动不会受到破坏。

3 区段煤柱稳定性研究

3.1 区段煤柱载荷确定

区段煤柱的稳定性变化主要受工作面一二次开采扰动以及岩体本身流变性影响^[18]。煤柱从初期稳定到最终破坏的过程中,其内部的应力分布始终处于不断变化的状态,变化过程主要体现在以下 4 个发展阶段:

第 1 阶段为原始地应力分布阶段。煤柱内部的应力状态主要受原始地应力的影响,持续时间相对较短。

第 2 阶段为一侧开采应力分布阶段。煤柱受到工作面一侧开采的应力影响,形成一侧开采应力分布。持续时间相对较长,且随着开采的进行,应力分

布逐渐向煤柱内部转移。

第 3 阶段为两侧开采应力分布阶段。煤柱受到来自工作面两侧开采的应力影响,形成两侧开采应力分布。该阶段的持续时间相对较短,但应力分布迅速向煤柱内部转移,导致煤柱内部的应力状态迅速升高。

第 4 阶段为煤柱屈服应力分布阶段。煤柱内部的应力状态达到屈服应力,导致煤柱发生屈服变形。该阶段的持续时间相对较长,且随着开采的进行,煤柱的屈服变形逐渐加剧。

受开采扰动影响,区段煤柱内部的应力分布由原始地应力(均布载荷)阶段变化到开采后的(马鞍形)应力分布阶段,煤柱应力变化特征如图 5 所示,内部应力分布特征如图 6 所示。

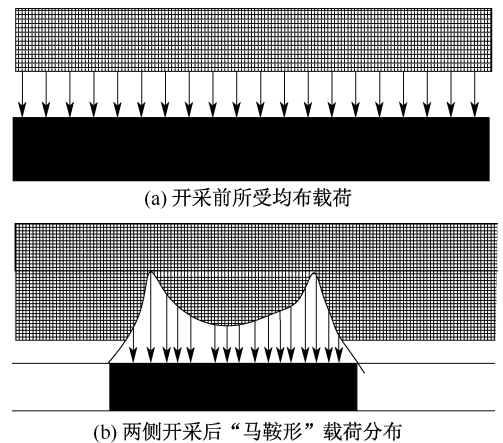
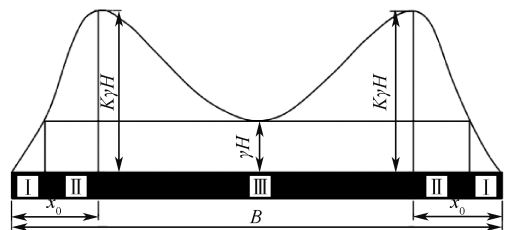


图 5 煤柱应力变化特征

Fig. 5 Stress variation of coal pillar



注: I 为破裂区; II 为塑性区; III 为弹性应力增加区; K 为应力集中系数; γ 为上覆岩层平均容重, kN/m^3 ; H 为煤层层深, m ; B 为区段煤柱宽度, m 。

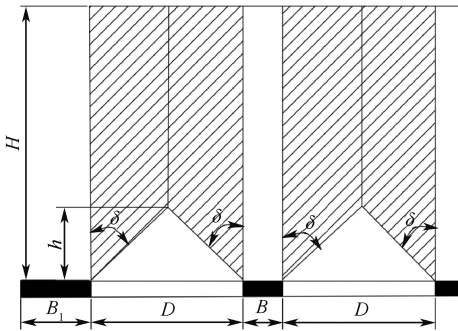
图 6 区段煤柱内部应力分布特征

Fig. 6 Characteristics of stress distribution inside section coal pillars

随着煤柱的宽度逐渐缩减,其内部的弹性区域范围也在不断收缩。当煤柱的设定宽度变得小于其两侧塑性区的总宽度时,即当煤柱的宽度 B 小于或等于两侧塑性区宽度的 2 倍(即 $B \leq 2x_0$) 时,煤柱中将不再有弹性区域存在。此时,整个煤柱会完全陷

入塑性不稳定状态。

研究表明:煤柱上承受的载荷主要来源于2个方面^[19],①煤柱上覆岩层的重量,②采空区悬挂在煤柱一侧或两侧的岩层部分重量,如图7所示。



注:D为50104工作面采空区宽度,m; δ 为50104工作面采空区上覆岩层垮落角,(°)。

图7 区段煤柱载荷估算模型

Fig.7 Section coal pillar load estimation model

代入相关参数可得50104孤岛工作面区段煤柱的载荷值为21.17 MPa。

3.2 煤柱承载强度确定

煤柱的强度承载能力受到多种因素的影响,包括煤块的强度、煤柱的尺寸、承载载荷以及随时间的演化等^[20]。为解决煤体参数尺度效应的问题,消除尺度效应的影响。采用Hustrulid的方法,将实验室煤样的强度转化为现场临界立方体试件的单轴抗压强度。

通过实验室测得5⁻¹煤层煤样的单轴抗压强度为25.4 MPa,试件形状为圆柱形,直径为0.05 m,高度为0.1 m。根据Hustrulid的方法,将实验室测得的煤样强度转换为现场煤体临界立方体单轴抗压强度,计算结果为 $\sigma_m = 18.03$ MPa。

得到现场煤柱临界单轴抗压强度后,采用Obert. Dvwall/Wang公式计算煤柱的承载强度:

$$\sigma_q = \sigma_m \left[0.778 + 0.222 \left(\frac{B}{h} \right) \right] \quad (1)$$

取50104工作面运输巷与回风巷侧的区段煤柱的高度均为3.8 m,代入式(1)可得 $\sigma_q = 25.62$ MPa。

3.3 煤柱稳定性分析

为提高煤炭资源的开采率与保护煤柱不受破坏以防止上覆岩层失稳,需引入煤柱稳定性系数作为评估煤柱从稳定到破坏状态的指标,即煤柱承受的平均应力与通过现场取煤样计算得出的煤柱抗压强度的比值。代入得50104区段煤柱的稳定性系数为1.21。

煤柱高度在 $2\text{ m} < h \leq 4\text{ m}$ 时,煤柱稳定性判别指标为:①当 $k < 1.0$ 时,煤柱处于失稳和残余变形状态;②当 $1.0 < k < 1.5$ 时,煤柱处于亚稳定状态;③当 $k = 1.5$ 时,煤柱处于极限平衡状态;④当 $1.5 < k \leq 2$ 时,煤柱处于安全稳定状态;⑤当 $k \geq 2.5$ 时,煤柱处于绝对安全稳定状态。

根据上述分析50104工作面区段煤柱的高度在 $2\text{ m} < h \leq 4\text{ m}$,区段煤柱的稳定性系数为1.21,判定50104工作面开采后采空区的煤柱处于亚稳定状态,因此,为准确评估50104工作面推进过程中,煤壁前方区段煤柱的稳定性,有必要通过数值模拟进一步研究推进过程煤壁前方区段煤柱的塑性区分布与应力状态。

4 区段煤柱稳定性数值模拟研究

为研究50104工作面推进过程中,位于煤壁前方区段煤柱的稳定性,采用FLAC^{3D}值模拟软件对其进行数值模拟分析。根据泰华煤矿50104工作面5⁻¹煤层的矿井地质资料建立长408 m、宽660 m、高100 m的走向模型,边界处留设100 m的保护煤柱。50104工作面西侧与50105工作面采空区保护煤柱相邻,东侧与50103工作面采空区保护煤柱相邻,且数值模型在开挖50104工作面之前50103、50105工作面均已开采完毕,50103工作面、50105工作面开挖尺寸与50104工作面一致,即边界处留设100 m的保护煤柱,立体模型如图8所示。

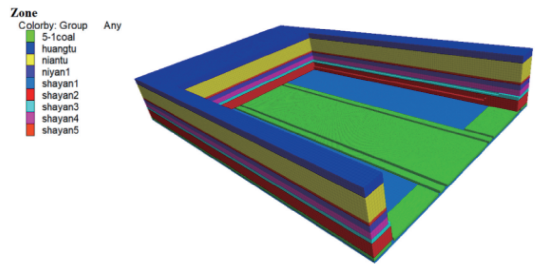


图8 立体模型

Fig.8 Stereoscopic diagram

将模型中物理性质相似的岩层划分为单一岩层,对于模型的边界条件,进行适当的约束设置。模型的上边界被定义为自由边界,底部边界被设定为固定边界,而左右边界以及前后边界则被限定为单约束边界。岩体本构关系采用Mohr-Coulomb准则,其煤岩物理力学参数主要来自现场数据收集及实验室试验,物理力学参数见表1。

按简化边界,突出模拟重点区域的原则,设计数

表 1 煤岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal and rock

序号	岩石名称	层厚/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
1	黄土	12.00	1 700	18	0.1	0.2	1.2
2	黏土	22.00	1 800	22	0.15	0.5	1.4
3	粉砂岩	4.00	2 350	25	2.75	1.51	19.5
5	砂质泥岩	9.00	2 280	36	2.16	0.75	5.42
6	粉砂岩	10.00	2 350	25	2.75	1.51	19.5
7	细粒砂岩	6.00	2 870	42	3.42	1.29	33.1
8	中粒砂岩	19.28	2 550	37	4.0	1.20	5.99
9	5 ⁻¹ 煤	4.72	1 450	34	1.25	0.19	5.3
10	粉砂岩	3.00	2 350	25	2.75	1.51	19.5

值模拟方案。根据盘区规划,数值模拟区域划分为 50104 接续综采面,50105 和 50103 综采面采空区。其中,50104 工作面西侧和东侧分别与采空区区段煤柱相邻,区段煤柱各宽 11 m。重点模拟 50104 孤岛工作面推进至南侧终采线过程中,东西两侧区段煤柱的稳定性。平面模拟模型如图 9 所示。

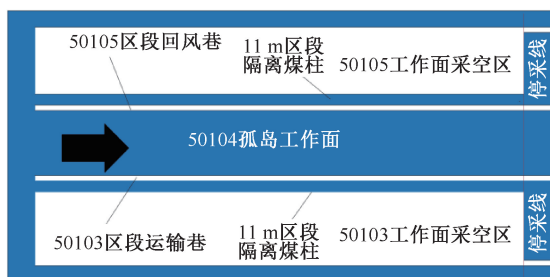


图 9 平面模型

Fig. 9 Plane model diagram

4.1 煤柱塑性区分布情况

为清晰呈现 50104 综合采区两侧煤柱内部塑性区随工作面推进时的变化特征,提取模型在垂直于 Z 轴方向的剖面。泰华煤矿 50104 综采工作面推进过程中两侧 11 m 区段煤柱塑性区的演化情况如图 10 所示。

图 10a 表示 50104 工作面推进 30 m 时,区段煤柱塑性区分布情况,受相邻工作面 50105 和 50103 采空区的影响,造成 11 m 区段煤柱段外侧 1~2 m 范围内的连续塑性破坏,但这种破坏并没有影响到煤柱整体结构的稳定性,外部塑性破坏局部而煤柱整体仍保持稳定。

图 10b 中,当推进 110 m 时,50104 工作面后方东西两侧 11 m 区段煤柱发生失稳,剪切塑性破坏贯穿后方区段煤柱,两侧破坏范围呈对称状态,采动影响开始显现。

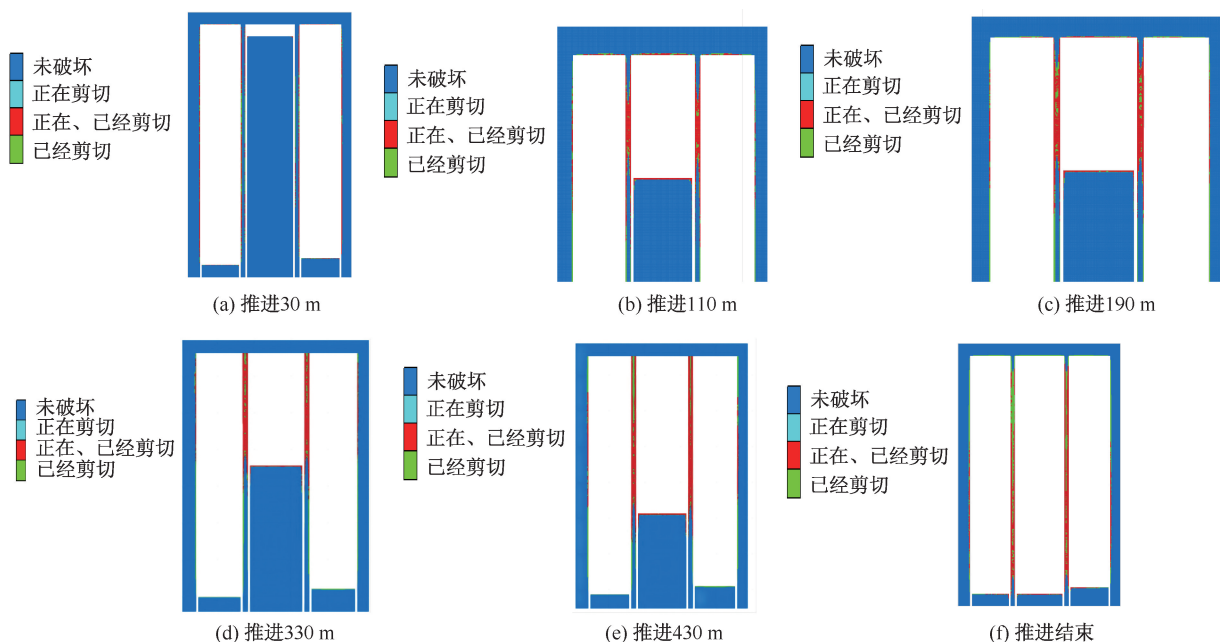


图 10 50104 工作面推进过程区段煤柱塑性区演化

Fig. 10 Coal pillar plastic zone evolution during advancing process of 50104 working face

图 10c 中,当推进至 190 m 时,采动影响进一步加剧。50104 工作面后方东西两侧 11 m 区段煤柱破坏长度沿推进方向持续发展,累计 160 m。区段煤柱塑性破坏呈“H”型,即煤壁侧塑性破坏多,煤柱内部塑性破坏较少,端部仍保留部分稳定煤体,但由于塑性区已贯穿后方区段煤柱,后方整体煤柱已发生失稳。

图 10d—图 11e 为 50104 工作面推进 330~530 m 时区段煤柱塑性的破坏分布情况,对比分析发现,随着推进距离的增加,区段煤柱破坏特征基本一致,均

呈现“H”型贯穿破坏。区段煤柱破坏范围始终处于工作面后方,破坏长度沿推进方向共计 470 m。

图 10f 中,当推进结束时,工作面后方煤柱已全部失稳,区段煤柱沿工作面推进方向失稳长度 560 m,仅存在 30 m 左右稳定区域。

4.2 煤柱采动应力演化研究

50104 工作面推进过程中 50103 以及 50105 采空区两侧 11 m 区段煤柱应力云图分布演化情况如图 11 所示。

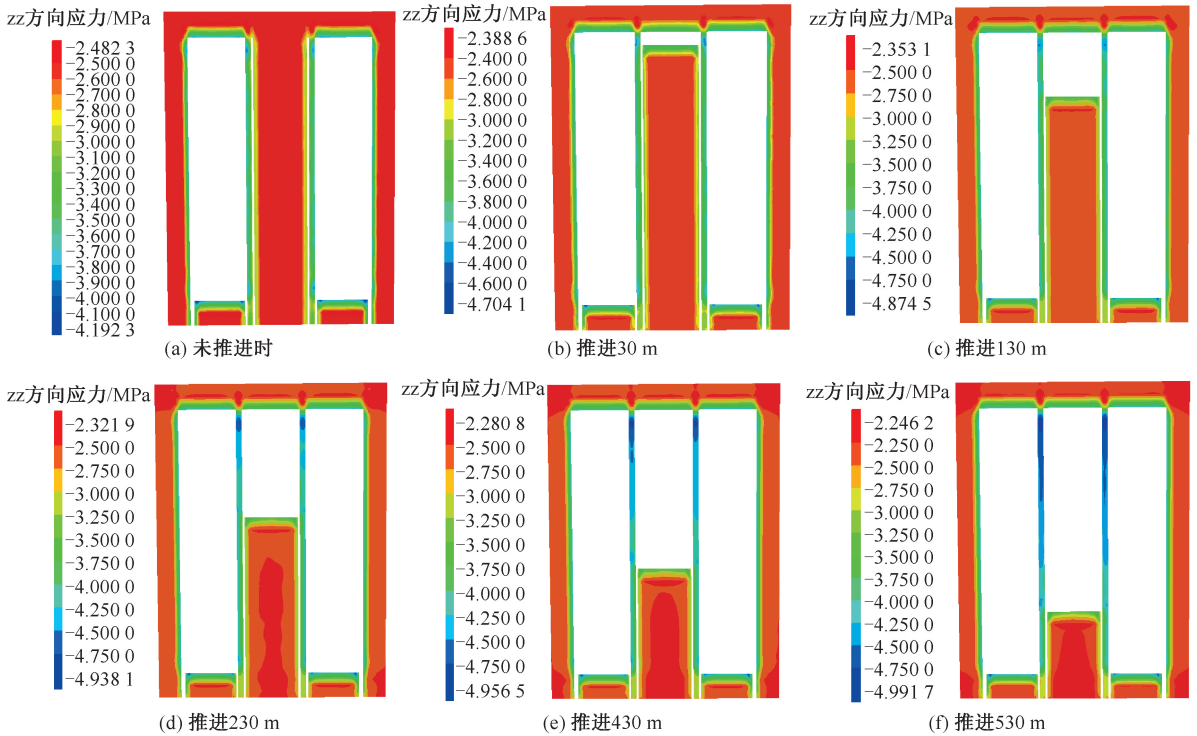


图 11 50104 工作面推进过程区段煤柱应力演化过程

Fig. 11 Diagram of coal pillar stress evolution process in advancing process of 50104 working face

图 11a 表明:两侧区段煤柱中心垂向应力值为 2.5~4.19 MPa,宽度 11 m 的煤柱内部应力稳定,仅靠近采空区侧部分煤壁发生应力集中现象,煤柱整体稳定无破坏。

图 11b 表明:50104 工作面后方区段煤柱靠近采空区侧应力增加,从未开采时平均 3.35 MPa 上升至 3.54 MPa,该区域已处于失稳的临界应力状态,区段煤柱应力集中区域沿工作面推进长度累计 30 m。

图 11c 对比上述塑性破坏分布可以看出,当区段煤柱上的应力平均值超过 3.61 MPa 时,煤柱处于失稳状态,失稳煤柱最高处应力值可达 4.87 MPa,反映出推进距离越远,工作面后方区段煤柱已发

生失稳。但工作面前方区段煤柱中心区域应力值平均 3.5 MPa,未达到破坏极限,仍然处于稳定状态。

图 11 d—图 11f 中,当 50104 工作面由 230 m 推进至 530 m 时,区段煤柱应力特征整个过程保持一致,2 条区段煤柱高应力集中区域保持对称,均位于工作面后方。而工作面前方两侧区段煤柱在整个推进过程中,除了煤柱外侧受两侧采空区的影响产生高应力,中心区域始终未出现超过 3.61 MPa 的现象,说明工作面前方东西两侧的区段煤柱在整个模拟开采的过程中始终处于稳定的应力状态。当推进至停采线时,宽度 11 m 的 2 条区段煤柱沿工作面推进方向全部达到破坏极限。

5 现场监测分析

50104 工作面液压支柱选用 ZY9500/2.55/55 两柱掩护式支架,为分析 50104 孤岛工作面推进过程中,区段煤柱宽度矿压显现情况。50104 工作面总长 908 m,煤层平均厚度为 4.72 m,支架移架步距 800 mm,初撑力 24 MPa,支护强度 1.02~1.06 MPa。

5.1 矿压监测方案

50104 工作面支架工作阻力(工况)监测采用在线自动监测方式,工作面共安装支架 37 架。在工作面长度方向上共设置 6 条测线,分别沿工作面上、中、下 3 个测站位置布置。其中,上部测站设置 2 个测点,分别为 31 号架和 35 号架;中部测站设置 2 个测点,分别为 18 号架和 24 号架;下部测站设置 2 个测点,分别为 5 号架和 11 号架。观测时间为 3 个月,现场矿压观测测站和测线的布置情况如图 12 所示。

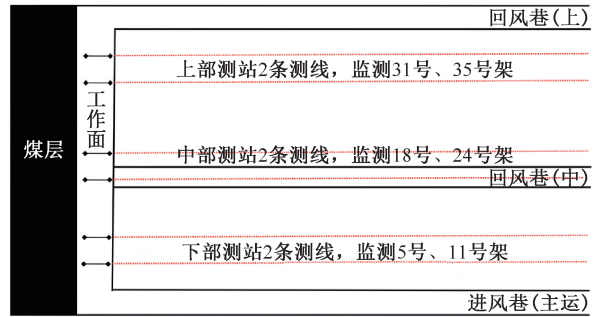


图 12 50104 工作面测站与测线布置

Fig. 12 50104 layout of measuring stations and lines on working face

5.2 矿压监测结果

为分析观测期间来压状况,现场观测上部测站 31 号架、35 号架;中部测站 18 号架、24 号架;下部测站 5 号架、11 号架并整理数据。以工作面实测工作阻力平均值 \bar{P}_0 加其一倍均方差 S_{p_0} 为基本顶来压

表 2 50104 工作面基本顶来压判据

Table 2 50104 working face pressure criterion

测站	支架	初撑力/kN			最大工作阻力/kN			加权平均工作阻力/kN		
		平均值 \bar{P}_0	均方差 S_{p_0}	判据 $P'_0 = \bar{P}_0 + S_{p_0}$	平均值 \bar{P}_m	均方差 S_{p_m}	判据 $P'_m = \bar{P}_m + S_{p_m}$	平均值 \bar{P}_t	均方差 S_{p_t}	判据 $P'_t = \bar{P}_t + S_{p_t}$
上部测站	31 号	4 594.7	872	5 466.7	5 920.8	423	6 343.8	5 275.8	589	5 864.8
	35 号	3 611.5	729.5	4 341	5 870.1	748	6 618.1	4 941.1	939.7	5 880.8
中部测站	18 号	4 718.1	716.7	5 434.8	5 808.9	436	6 244.9	4 888.9	765	5 653.8
	24 号	3 824.7	1 166.2	4 990.9	5 409	1 046.3	6 455.3	4 027.3	1 173.5	5 200.8
下部测站	5 号	3 468.9	628.1	4 097	5 851.7	750.5	6 602.2	4 795.6	789.2	5 584.8
	11 号	3 376.5	703.8	4 080.3	6 013	496.2	6 509.2	5 090.8	930.8	6 021.6

注: \bar{P}_m 为最大工作阻力平均值; S_{p_m} 为最大工作阻力均方差; P'_m 最大工作阻力判据; \bar{P}_t 加权平均工作阻力平均值; S_{p_t} 代表加权平均工作阻力均方差; P'_t 代表加权平均工作阻力均方差。

的判据 P'_m ,算得各测站的来压判据。通过在工作面实测工作阻力的分布总图上标出判据线,以大于 P'_m 的数据或峰值为主,参考大于 P'_0 和 P'_t 的数据或峰值,确定基本顶来压的性质、位置和顺序见表 2。

50104 工作面自 2020 年 6 月 30 日—9 月 27 日共推进 294.5 m,观测期间工作面实测工作阻力如图 13 所示。分析图 13 相关监测数据可知:工作面上部、中部、下部测站周期来压步距均值分别为 21.5、20.6、23.2 m,工作面周期来压步距均值为 21.8 m。

通过分析 50104 工作面的矿压监测数据,得出整个 50104 工作面实测初撑力均值为 3 932.4 kN,此值相当于 ZY9500/2.55/55 液压支架额定初撑力 7 144 kN 的 55%,工作面平均最大工作阻力为 5 812.3 kN,相当于液压支架额定工作阻力 9 500 kN

的 61.2%;整个工作面实测加权平均阻力为 4 836.6 kN/架,此值相当于液压支架额定工作阻力的 50.9%。50104 工作面选用的 ZY9500/2.55/55 液压支架的额定工作阻力富余量接近 40%。由矿压监测分析得出 50104 工作面来压最大为 6 013 kN,根据 ZY9500/2.55/55 液压支架的宽度 1 660~1 860 mm,由此可推断出支架承受的应力约为 2.35 MPa,进一步验证了 11 m 煤柱宽度在开采期间,矿压显现始终未超过 3.61 MPa,区段煤柱处于稳定状态。

6 结论

1) 采掘过程中,区段煤柱上方围岩变形分 3 阶段,即掘进期、上区段开采期、本区段开采期。掘进期,扰动不影响大结构稳定,围岩变形源于应力重分

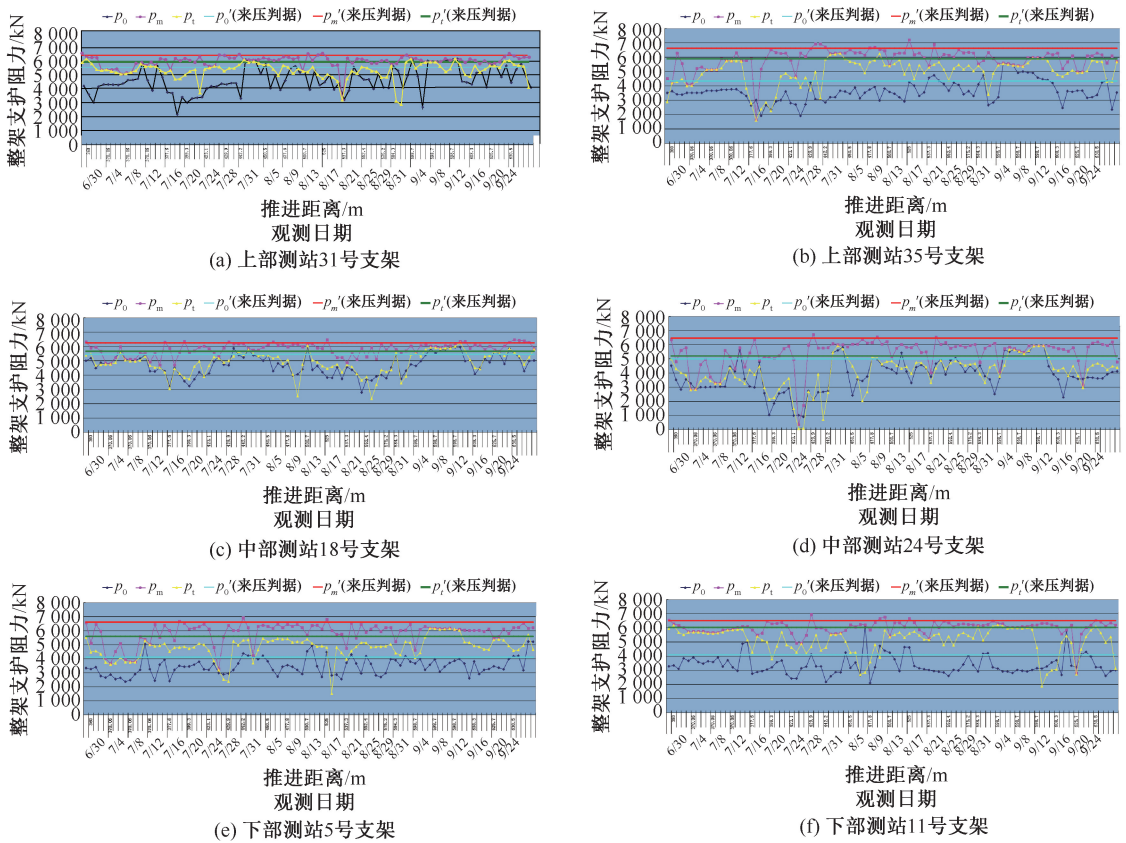


图 13 上部测站 31 号支架实测工作阻力变化曲线

Fig. 13 Change curve of working resistance measured by No. 31 bracket of upper measuring station

布。巷内支护和煤柱形成新支护结构。上区段开采期,侧向岩层受采空区影响,煤柱承受直接顶及悬臂岩块载荷,垂直应力单侧“单峰”分布。本区段开采期,基本顶断裂,煤柱需承载多源载荷,垂直应力受两侧开采影响,支承载力叠加,呈“双峰”分布。

2) 采用 FLAC^{3D} 数值模拟得出:50104 工作面推进过程中,东西两侧区段煤柱塑性破坏滞后于工作面推进过程,位于工作面后方采空区处的区段煤柱处于塑性破坏状态,而位于工作面煤壁前方的煤柱存在稳定的弹性区,整体保持稳定。工作面推进过程中,两侧区段煤柱应力分布呈现相同特征,2 条 11 m 煤柱高应力集中区域保持对称,均位于工作面后方。50104 工作面区段煤柱高应力破坏区域发展

速度滞后于工作面推进速度,工作面前方区段煤柱中心区域平均应力值从 3.35 MPa 增加至 3.54 MPa,但始终未超过理论计算得到的煤柱承载强度值。

3) 通过分析 50104 工作面的矿压监测数据,得出实测初撑力均值 3 932.4 kN,占 ZY9500/2.55/55 液压支架额定初撑力的 55%。平均最大工作阻力 5 812.3 kN,占额定工作阻力的 61.2%。加权平均阻力均值 4 836.6 kN/架,占额定工作阻力的 50.9%。选用的 ZY9500/2.55/55 液压支架富余量近 40%。最大来压 6 013 kN,支架应力约 2.35 MPa,证明 11 m 煤柱稳定,位于工作面煤壁前方区段煤柱的整体稳定性较好。

参考文献

[1] 张修峰,陈洋. 煤柱型冲击地压类型、发生机理与防治对策研究[J]. 煤炭科学技术,2023,51(10):1-11.
ZHANG Xiufeng, CHEN Yang. Research on the type and occurrence mechanism and prevention of coal pillar rockbursts [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 1-11.

[2] 李广贺,呼子桓,王东,等. 露天矿端帮开采支撑煤柱失稳判据研究[J]. 中国安全科学学报,2023,33(9):122-128.

- LI Guanghe, HU Zihuan, WANG Dong, et al. Study on instability criterion of rib pillars in open-pit during highwall mining[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(9): 122–128.
- [3] 刘宏军. 深部构造区域厚煤层工作面冲击地压防治技术[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(2): 109–113.
- LIU Hongjun. Mine pressure bump prevention technology of coal mining face in thick seam of mine deep structure area[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(2): 109–113.
- [4] 邢世坤, 李辉, 冯少华. 深部孤岛充填工作面沿空掘巷围岩偏应力演化与控制[J]. *河南理工大学学报: 自然科学版*, 2024, 43(4): 39–47.
- XING Shikun, LI Hui, FENG Shaohua. Evolution and control of deviatoric stress in surrounding rock of gob-side entry in deep island filling face[J]. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science* 2024, 43(4): 39–47.
- [5] 郭欢欢, 胡家瑜, 邱黎明. 突出煤层孤岛工作面多场演化规律及瓦斯灾害防治技术[J]. *西安科技大学学报*, 2022, 42(2): 227–236.
- GUO Huanhuan, HU Jiayu, QIU Liming. Overburden behaviour change and gas control of isolated working face of outburst coal seam[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42(2): 227–236.
- [6] 陈晓祥, 王雷超, 付东辉. 孤岛工作面动压回采巷道平移变形力学机制及控制技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(4): 552–558.
- CHEN Xiaoxiang, WANG Leichao, FU Donghui. A study on inward movement deformation mechanism and control technology of dynamic pressure gateway of island mining face[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32(4): 552–558.
- [7] 杨光宇, 姜福兴, 李琳, 等. 煤矿冲击地压危险性的工程判据研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(6): 1 200–1 207, 1 216.
- YANG Guangyu, JIANG Fuxing, LI Lin, et al. Engineering criterion study on coal mining rock burst hazard[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(6): 1 200–1 207, 1 216.
- [8] 谢广祥, 杨科, 刘全明. 综放面倾向煤柱支承压力分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(3): 545–549.
- XIE Guangxiang, YANG Ke, LIU Quanming. Study on distribution laws of stress in inclined coal pillar for fully-mechanized top-coal caving face [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 545–549.
- [9] 葛海军, 冯志忠, 李彩云. 浅埋深孤岛工作面下行开采过上覆遗留煤柱强矿压特征及防治技术[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(增 1): 36–41.
- GE Haijun, FENG Zhizhong, LI Caiyun. Strong ground pressure characteristics and prevention technology when shallow buried island working face goes down through overlying residual coal pillar [J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(S1): 36–41.
- [10] 朱广安, 窦林名, 王红胜, 等. 临断层孤岛面冲击危险与断层滑移数值反演: 以朝阳煤矿 3108 工作面为例[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 533–541.
- ZHU Guang'an, DOU Linming, WANG Hongsheng, et al. Back analysis of rock burst risk and fault slip due to mining in the island panel along fault: a case study of island panel 3108 in Chaoyang coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 533–541.
- [11] 程利兴, 姜鹏飞, 杨建威, 等. 深井孤岛工作面巷道围岩采动应力分区演化特征[J]. *岩土力学*, 2020, 41(12): 4 078–4 086.
- CHENG Lixing, JIANG Pengfei, YANG Jianwei, et al. Evolution characteristics of mining-induced stress partition of roadway surrounding rock on working face of deep island [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 4 078–4 086.
- [12] 范志忠, 付书俊, 潘黎明. 深部超长孤岛工作面覆岩垮落结构特征研究[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(2): 86–90.
- FAN Zhizhong, FU Shujun, PAN Liming. Study on caving structure characteristics of overlying strata in deep super long island working face [J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(2): 86–90.
- [13] 周贤, 马建, 辛崇伟, 等. 孤岛工作面巷道围岩变形特征及修复加固技术研究[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(9): 35–40.
- ZHOU Xian, MA Jian, XIN Chongwei, et al. Deformation characteristics of surrounding rock in isolated working face and its

- repair and reinforcement technology[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(9): 35-40.
- [14] 董文卓,陈理强,王文杰,等. 上覆不规则煤柱孤岛工作面冲击地压弱结构法防治技术[J]. *矿业安全与环保*, 2024, 51(2): 40-45, 52.
DONG Wenzhuo, CHEN Liqiang, WANG Wenjie, et al. Prevention technology of weak structure against rock burst in island working face of overlying irregular coal pillar[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2024, 51(2): 40-45, 52.
- [15] 李润芝. 动压影响孤岛工作面巷道围岩“卸-支平衡”协同控制技术[J]. *煤矿安全*, 2024, 55(3): 199-208.
LI Runzhi. Research on collaborative control technology of "unloading and support balance" for surrounding rock of isolated roadway under the influence of dynamic pressure[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(3): 199-208.
- [16] 朱斯陶,姜福兴,刘金海,等. 我国煤矿整体失稳型冲击地压类型、发生机理及防治[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(11): 3 667-3 677.
ZHU Sitao, JIANG Fuxing, LIU Jinhai, et al. Types, occurrence mechanism and prevention of overall instability induced rockbursts in China coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3 667-3 677.
- [17] 张杰,白文勇,王斌,等. 浅埋煤层孤岛工作面区段煤柱宽度优化[J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(6): 988-996.
ZHANG Jie, BAI Wenyong, WANG Bin, et al. Width optimization of section coal pillar in the island working face of shallow coal seam[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(6): 988-996.
- [18] 张宇,李炜博,杨少雄. 浅埋煤层孤岛工作面合理区段煤柱宽度研究[J]. *山东煤炭科技*, 2021, 39(12): 15-17.
ZHANG Yu, LI Weibo, YANG Shaoxiong. Study on reasonable coal pillar width of isolated island working face in shallow coal seam[J]. *Shandong Coal Technology*, 2021, 39(12): 15-17.
- [19] 张杰,陈诚,张建辰,等. 浅埋厚层间距煤层过上覆采空区煤柱矿压显现机理研究[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(12): 63-68.
ZHANG Jie, CHEN Cheng, ZHANG Jianchen, et al. Study on developing mechanism of coal pillar pressure of shallow coal seams with thick seam spacing passing through overlying goaf[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(12): 63-68.
- [20] 张金贵,浦仕江,闫亚楠,等. 切顶卸压对重复扰动条件下的煤柱稳定性影响分析[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(2): 48-53.
ZHANG Jingui, PU Shijiang, YAN Ya'nán, et al. Influence of roof cutting pressure releasing on coal pillar stability under secondary disturbance[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(2): 48-53.

作者简介: 王虹玉 (1982—),女,江西婺源人,博士研究生,副教授,主要研究方向为安全管理与技术、安全生产法等。E-mail: whyu@ncist.edu.cn。