



# 矿业科学学报

## JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

### “三硬”薄煤层沿空留巷围岩破坏特征及控制技术研究

康志鹏, 罗勇, 任波, 段昌瑞, 肖殿才

**Study on surrounding rock failure characteristics and control technology of gob-side entry retaining in "three hard" thin coal seam**

引用本文:

康志鹏, 罗勇, 任波, 段昌瑞, 肖殿才. “三硬”薄煤层沿空留巷围岩破坏特征及控制技术研究[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(3): 446–454.

KANG Zhipeng, LUO Yong, REN Bo, et al. Study on surrounding rock failure characteristics and control technology of gob-side entry retaining in "three hard" thin coal seam[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(3): 446–454.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 切顶参数对沿空留巷围岩稳定性的影响研究

引用本文: 盛奉天, 张勇, 魏文胜, 等. 切顶参数对沿空留巷围岩稳定性的影响研究[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(3): 322–332.

#### 2. 大倾角煤层切顶成巷顶板结构演化及控制技术

引用本文: 张礼, 赵晶, 王栓林. 大倾角煤层切顶成巷顶板结构演化及控制技术[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(2): 169–178.

#### 3. 两侧采空巷道挤压变形机理与控制对策

引用本文: 李永亮, 王宇轩, 林海, 等. 两侧采空巷道挤压变形机理与控制对策[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(5): 511–518.

#### 4. 深孔爆破切顶对沿空留巷围岩稳定性影响的研究

引用本文: 胡涛, 侯公羽, 李子祥, 等. 深孔爆破切顶对沿空留巷围岩稳定性影响的研究[J]. *矿业科学学报*, 2019, 4(4): 299–307.

#### 5. 高瓦斯矿井内错顶板瓦斯巷合理布设及应用

引用本文: 张宇菲, 郭家豪, 安晨, 等. 高瓦斯矿井内错顶板瓦斯巷合理布设及应用[J]. *矿业科学学报*, 2018, 3(1): 29–38.

康志鹏,罗勇,任波,等. “三硬”薄煤层沿空留巷围岩破坏特征及控制技术研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(3): 446-454. DOI: 10. 19606/ j. cnki. jmst. 2024. 03. 013

KANG Zhipeng, LUO Yong, REN Bo, et al. Study on surrounding rock failure characteristics and control technology of gob-side entry retaining in “three hard” thin coal seam[J]. 2024, 9(3): 446-454. DOI: 10. 19606/ j. cnki. jmst. 2024. 03. 013

## “三硬”薄煤层沿空留巷围岩破坏特征 及控制技术研究

康志鹏, 罗勇, 任波, 段昌瑞, 肖殿才

- 淮南矿业(集团)有限责任公司, 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽淮南 232001;
- 淮河能源控股集团有限责任公司, 深部煤炭开采耦合灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 安徽淮南 232001

**摘要:**为解决薄煤层沿空留巷应力条件复杂、留巷难度大以及巷道围岩长时稳定性的难题,以陕西汇森煤业凉水井煤矿4301工作面为研究对象,采用理论分析、数值模拟、工程实践等方法,对浅埋“三硬”薄煤层沿空留巷围岩破坏特征及控制对策进行研究,分析巷旁支护体结构参数对于巷道稳定性的影响。结果表明:给顶板提供充足的支护强度以及合适的可缩量,是巷旁充填体整体稳定的前提;高水充填材料单轴加压下的力学行为可分为“均匀压密、弹性变形、动态失稳、劣化破坏”4个阶段;在充填体宽度增加过程中,最大应力表现为先增后减再增的趋势,在充填体1.6 m宽时出现稳定承载应力核;理论计算的切顶最佳高度为10.7 m。工程实践表明,工作面后方60 m范围无大变形和明显应力集中,围岩整体控制效果良好、结构稳定,留巷效果达到设计要求。

**关键词:**薄煤层;沿空留巷;高水材料;聚能爆破

中图分类号:TD 322

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2024)03-0446-09

## Study on surrounding rock failure characteristics and control technology of gob-side entry retaining in “three hard” thin coal seam

KANG Zhipeng, LUO Yong, REN Bo, DUAN Changrui, XIAO Diancai

- State Key Laboratory of Deep Coal Mining Environment Protection, Huainan Mining Group Co. Ltd., Huainan Anhui 232001, China;
- Key Laboratory of Coupled Hazards Prevention and Control in Deep Coal Mining National Mine Safety Administration, Huaihe Energy Holding Group Co. Ltd, Huainan Anhui 232001, China

**Abstract:** This study aims to address existing problems of complex stress conditions and difficulties in retaining roadway so as to achieve long-term stability of roadway surrounding rock in gob-side entry in thin coal seam. Specifically, we investigated the 4301 working face of Liangshuijing Coal Mine in Huisen Coal Industry of Shaanxi Province through theoretical analysis, numerical simulation and engineering practice, with an aim to study the failure characteristics and control countermeasures of surrounding rock of gob-side entry retaining in shallow buried “triple hard” thin coal seam, and analyse the influence of structural parameters of roadside support on roadway stability. The results show that 1) maintaining the roadway through roadside filling body requires sufficient support strength and appropriate shrinkage to the roof and ensuring the overall stability of the roadway; 2) the mechanical behaviour of high water fill-

收稿日期:2023-12-28 修回日期:2024-04-17

基金项目:安徽省自然科学基金(2108085ME155);安徽省重点研究和开发计划(201904a07020011, 1804a0802214)

作者简介:康志鹏(1994—),河北张家口人,硕士,工程师,主要从事地下空间围岩控制、绿色智能开采等方面的研究工作。Tel: 18361267579, E-mail: 1457511552@qq.com

ing material under uniaxial compression can be divided into four stages: “uniform compaction, elastic deformation, dynamic instability and deterioration failure”. The numerical simulation results show that in increasing the width of the filling body, the maximum stress first increases, then decreases and then increases, and a stable bearing stress core appears at 1.6 m. Theoretical calculation shows that the optimal height of roof cutting is 10.7 m, and it offers the roof cutting scheme and parameters of shaped blasting. Engineering practice shows that there is no large deformation and no obvious stress concentration in the 60 m range behind the working face. The surrounding rock exhibits good overall control effect and stable structure, and the effect of retaining roadway meets the design requirements.

**Key words:** Thin coal seam; gob-side entry retaining; high water material; energy-gathering blasting

薄煤层为厚度小于1.3 m的煤层,可采储量占比20%以上,实际产量仅为总产量的8%。早期煤矿受采掘条件限制,往往会“采厚丢薄”,浪费较多的煤炭资源。回采一段时间后,矿井普遍面临接替紧张以及资源枯竭的问题,煤炭开采下一步必然会向薄煤层方向延伸<sup>[1]</sup>。在煤层赋存较好、资源丰富的西部地区,做好薄煤层开采的技术储备也有助于可持续发展,能够实现薄煤层安全开采与灾害防治一体化。

薄煤层巷道易出现掘巷速度慢、出矸多、产量较低的问题,对此专家学者进行了研究。张九雨<sup>[2]</sup>论证了普通混凝土薄煤层巷帮支护的可行性;张帅等<sup>[3]</sup>对“双软”顶底板薄煤层沿空留巷底鼓机理进行了分析,验证了其底鼓变形的非对称性;曹树刚等<sup>[4]</sup>研究了“三软”薄煤层群不同开采时序对巷道的动压影响;赵玉翔等<sup>[5]</sup>给出了“两硬”薄煤层沿空留巷合适的充填体参数;王玉峰等<sup>[6]</sup>通过建立充填体与顶板作用力学模型,得出沿空留巷充填体主要影响参数为宽度和切顶阻力;秦玄焯等<sup>[7]</sup>研究了切顶卸压技术在深井薄煤层沿空留巷的应用;高永格等<sup>[8]</sup>实测了沿空留巷顶板覆岩采动裂隙分布规律;朱永建等<sup>[9]</sup>研究了厚硬倾斜顶板沿空留巷围岩分布规律,给出不同应力分区下的巷道支护方案;郭海军等<sup>[10]</sup>提出了沿空留巷“充填体+补强支护”的围岩控制方法,利用数值模拟确定了合理充填体宽度和承载性能进行了研究,构建了采空区等效承载本构方程式;何满潮等<sup>[12]</sup>、胡超文等<sup>[13]</sup>进行了浅埋破碎顶板切顶成巷和中厚煤层切顶成巷的试验研究,提出了切顶自动成巷技术;任广信<sup>[14]</sup>、黄志增等<sup>[15]</sup>分别研究了聚能爆破和深孔预裂爆破条件下沿空留巷顶板的应力分布规律,给出了“锚索补强+单体柱”的临时加强方案。综上所述,合理的沿空留巷充填体参数以及巷道围岩稳定的长时控制,是制约沿空留巷技术发展的关键难题。现有研究对沿空留巷围岩稳定

性控制做了大量工作,但对浅埋薄煤层研究成果较少,尤其是在顶板、煤、底板均质地坚硬的条件下,其留巷方式和参数需要进一步研究。

本文以陕西汇森煤业凉水井煤矿为工程背景,通过研究浅埋“三硬”薄煤层沿空留巷围岩破坏特征及控制技术,构建充填体切顶力学模型,确定了合理的高水材料充填体水灰比及充填宽度,确定了坚硬顶板辅助切顶方案并针对性地给出巷道围岩控制方案,有效解决了薄煤层开采的相关难题,现场应用效果良好。

## 1 工程背景

陕西汇森煤业凉水井矿主采 $4^{-2}$ 煤。为充分发挥矿井规模化生产的优势,达到增产提效的目的,决定布设薄煤层工作面与 $4^{-2}$ 煤工作面配采。试验煤层为 $4^{-3}$ 煤,埋深80~175 m,平均130 m,煤层厚度1.1~1.46 m,平均1.2 m,倾角小于 $2^\circ$ ,为近水平煤层,经地质探查未见异常体及断层。煤层质地坚硬,坚固性系数达2.9。煤层顶板主要为细粒砂岩,底板为粉砂岩。

选取4301工作面为实验面。该工作面宽180 m、长1 800 m,拟将带式输送机巷沿空留巷,巷道沿煤层顶板破底掘进,矩形断面为5.7 m×3.0 m。工作面布置与煤层柱状图如图1所示。

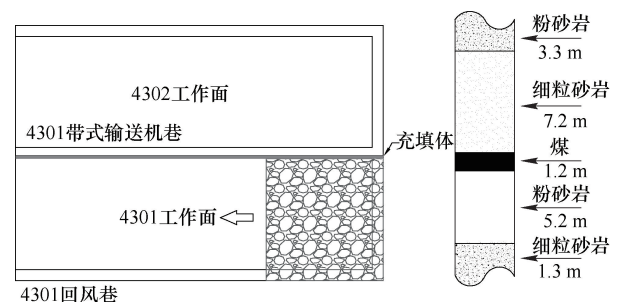


图1 工作面布置及煤层柱状图

Fig. 1 Working face layout and coal seam histogram

## 2 “三硬”薄煤层沿空留巷支护技术

### 2.1 沿空留巷巷旁充填体与顶板作用力学模型

现有研究表明,在对沿空留巷及其围岩稳定性进行力学分析时,将顶板简化为弹性薄板,煤层视为弹性介质,它们共同组成的力学体系,可简化为 Winkler 弹性基础上的 Kirchhoff 板<sup>[16-18]</sup>。工作面回采过程中,采空区侧的顶板隅角由于处于直角固支状态从而产生“角”效应,使得顶板破坏呈弧线型,形成“弧形三角板”,其稳定性是控制巷道稳定的关键。依据充填体“切断”基本顶的极限状态,建立相互作用力学模型如图 2 所示。

根据力学平衡,可得巷旁支护阻力公式为

$$p = \frac{\left[ q_1 L_4 \cos \alpha + \frac{1}{2} (q_1 + q_2) \cos \alpha (L_1 + L_2 + L_3) \right]^2 - \int_0^{L_1} (L_1 - x) dx - q_2 \sin \alpha (L_1 + L_2 + L_3) \left( \frac{h}{2} - \Delta L_1 \right)}{\left( L_1 + L_2 + \frac{L_3}{2} \right)} \quad (1)$$

$$\Delta L_1 = \frac{\Delta L (L_1 + L_2 + L_3)}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4} \quad (2)$$

$$L_4 = \frac{2b}{17} \cdot \frac{b}{L_w} \sqrt{100 + 102 \left( \frac{L_w}{b} \right)^2} - L_1 - L_2 - L_3 \quad (3)$$

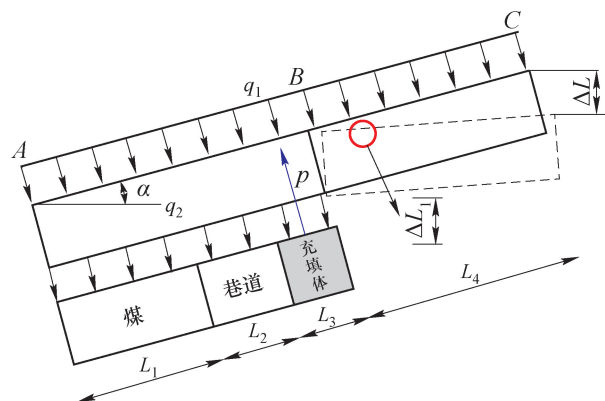
式中, $h$  为基本顶岩层厚度, m;  $b$  为基本顶来压步距, m;  $L_w$  为工作面长度, m。

根据凉水井 4301 工作面实际地质条件,工作面宽 180 m,周期来压步距 15 m,极限平衡区 17 m,留巷后巷宽 4.2 m,充填体宽度 0.8 ~ 2.0 m,煤层倾角 1.5°,上覆岩层自重为 25 kN/m,直接顶自重 17.3 kN/m。将参数代入公式进行计算,得到充填体切顶阻力为 5.3 ~ 8.8 MPa。

### 2.2 巷旁充填体作用机理与位置确定

给顶板提供充足的支护强度以及合适的可缩量,保证巷道整体稳定是巷旁充填体维护巷道的基本原理。通过切断采空区悬空顶板,使得采空区上位岩层及时得到采空区堆叠矸石支撑,适量的可缩量使得采空区顶板在回转下沉时较少侵袭充填体,防止充填体因不均匀下沉导致“偏心压缩”而失去承载能力。

沿空留巷充填体位置选择有 3 种情况:巷道内、部分巷道内、巷道外。巷道内构筑充填体,便于留巷施工且顶板稳定性较好;部分巷道内构筑充填体,能够保留较大的巷道宽度;巷道外构筑充填体,



AB—留巷顶板稳定段;BC—破裂顶板弧形下沉段;  
α—煤层倾角, (°);  $L_1$ —应力极限平衡区宽度, m;  
 $L_2$ —巷道宽度, m;  $L_3$ —充填体宽度, m;  $L_4$ —岩块 BC 长度, m;  
 $\Delta L$ —C 处回转下沉量, m;  $\Delta L_1$ —B 处回转下沉量, m;  
 $q_1$ —基本顶及上覆软弱岩层自重, N/m;  $q_2$ —直接顶自重, N/m

图 2 充填体-顶板相互作用力学模型

Fig. 2 Mechanical model of backfill-roof interaction

留下巷道的宽度最大,原巷道利用率高。但由于 4<sup>-3</sup> 煤为薄煤层,充填体上部铺设锚杆困难,当完全在采空区下构筑充填体时,顶板条件差,工艺复杂且成本较高;如果将充填体部分置于巷道内,采空区侧会出现上下介质差异,沿空侧载荷非均匀分布,易发生斜切破坏,不利于巷道稳定控制。

综上,确定凉水井 4301 工作面充填体完全置于巷道。

### 2.3 高水充填材料巷旁充填体参数确定

高水充填材料具有结石率高、凝结时间短、塑性强度高、单位体积充填用料少、微膨胀性的特点,并且通过调节水灰比可以适应不同工程需要。该材料已经广泛应用于煤矿沿空巷道。

选用中国矿业大学研制的新型双料高水速凝材料(基料为 R·SAC 硫铝酸盐水泥),该材料强度与水灰比呈负相关,在水灰比 3 : 1 时强度为 3.25 MPa。根据理论计算得出充填体切顶阻力在 5.3 ~ 8.8 MPa。为保证高水材料充填体的强度性能,通过制作不同水灰比的高水材料试件进行实验。将不同配比(水灰比 1 : 1、1.5 : 1、2 : 1)高水材料固结并制成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱形试件,共计 30 组,养护 28 d 后,进行单轴压缩试验。试件变形破坏以及应力-应变关系如图 3 所示。

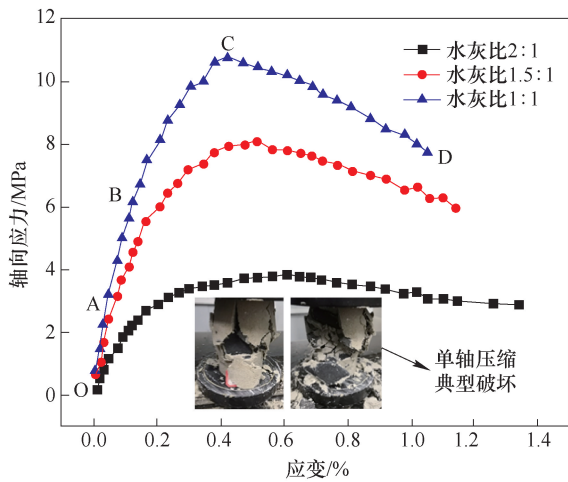


图3 高水材料单轴压缩实验典型破坏现象

Fig.3 Typical failure of high water material in uniaxial compression experiment

加载过程中,试件中部胀裂破坏,破坏形式与混凝土相似。水灰比2:1、1.5:1、1:1对应的极限强度分别为3.85、8.05、10.78 MPa,对应的最大应变为0.62%、0.52%、0.41%。

随着水灰比的增加,充填体的强度呈减小的趋势,而应变逐渐增加(压缩率呈递增趋势)。由不同水灰比条件下充填体应力-应变行为可知,其变化规律趋势大致相同:未达峰值时应力增加较快,竖向应变较小;达到峰值后,强度递减,呈现塑性软化特性。以水灰比1:1为例,其受压变形的力学行为可分为4个阶段:①OA段,高水材料均匀承载压密,曲线斜率增大,变形随应力增大而增大;②AB段,高水材料呈现弹性状态,曲线斜率近似为常数,随应力增加,应变增量增加较小;③BC段,高水材料超出强度极限动态失稳,曲线斜率逐渐减小,达到峰值强度C点;④CD段,高水材料裂隙扩展贯通,逐步劣化最终破坏失稳,在到达D点后彻底破坏,试件压碎。

2.4 沿空留巷巷旁充填体参数数值分析

2.4.1 不同宽度充填体应力分布规律

采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件对沿空留巷巷旁充填体参数进行研究。模型尺寸为长×宽×高=1800 m×180 m×60 m,垂直方向施加3.25 MPa补偿上覆岩层自重应力,模型限制水平位移且固定底部边界,选用Mohr-Coulomb模型作为本构模型,分别研究0.8、1.2、1.6、2.0 m 4种宽度充填体条件下的沿空留巷应力运移规律及塑性区破坏规律。模型岩石力学参数见表1,应力分布如图4所示。

表1 岩石力学参数

Table 1 Parameters of rock mechanics

岩性	厚度/ m	密度/ (kg· m <sup>-3</sup> )	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	内聚力/ MPa	内摩 擦角/ (°)	抗拉 强度/ MPa
粉砂岩	1.3	2 689	18.5	2.5	3.1	45	4.2
细粒砂岩	5.2	2 558	20.9	2.8	3.8	52	5.4
4 <sup>-3</sup> 煤	1.2	1 600	3.9	1.1	1.0	34	0.98
粉砂岩	5.2	2 689	18.5	2.5	3.1	45	4.2
细粒砂岩	1.3	2 558	20.9	2.8	3.8	52	5.4

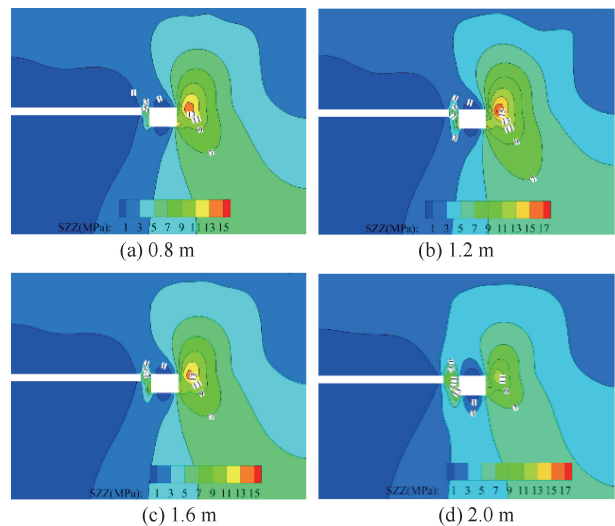


图4 不同充填体宽度留巷围岩应力分布云图

Fig.4 Stress distribution cloud map of surrounding rock with different filling body widths

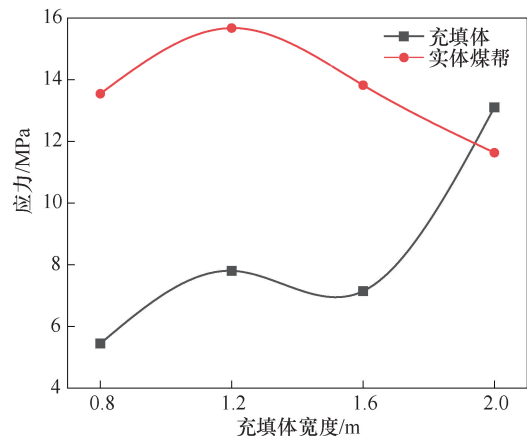


图5 不同充填体宽度最大应力变化

Fig.5 The maximum stress variation of filling body with different width

不同充填体宽度最大应力变化如图5所示,在充填体宽度为0.8、1.2、1.6、2.0 m时,最大应力分别为5.44、7.8、7.14、13.1 MPa,表现为先增后减再增的趋势,充填体宽度在1.2 m及以下巷道内侧应力集中明显,无稳定承载能力;当充填体宽度达到1.6 m后,出现了较稳定的承载应力核,其承载能力及演示稳定性随宽度递增。

2.4.2 不同宽度充填体塑性区分布规律

不同充填体宽度留巷塑性区分布情况如图6所示,随着充填体宽度增加,塑性区破坏深度变化不明显,大部分为剪切破坏,当充填体宽度在1.2 m以下时,顶板上方破坏为明显的拉剪破坏,相对不稳定。

2.4.3 不同时期巷道顶板应力分布规律

掘巷期间巷道应力变化如图7所示,主要在两帮出现应力集中,最大支承应力为6.63 MPa,顶板1 m处应力以巷道中心线为轴对称分布,巷道正上方为应力降低区,肩部部位为应力升高区,最大支承

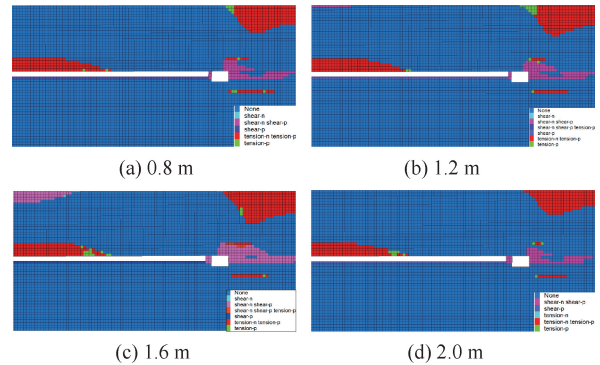
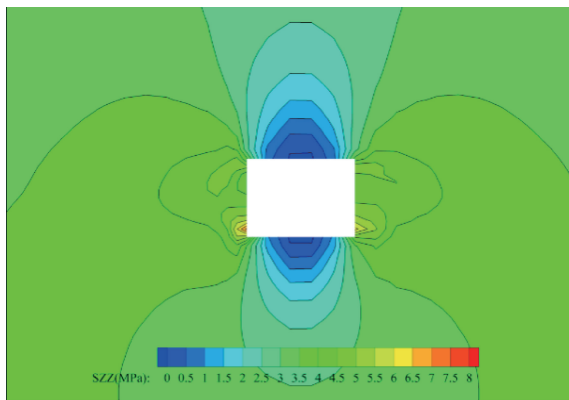


图6 充填体不同宽度留巷塑性区分布  
Fig.6 Distribution of plastic zone in entry retaining with different filling body widths

应力为3.58 MPa。

留巷期间围岩支承应力分布如图8所示,此时巷道位于低应力区,支承应力主要集中在未采煤侧顶板和帮部,充填体内核区支承应力稳定在9 MPa,能够起到有效支撑顶板的作用。



(a) 支承应力云图

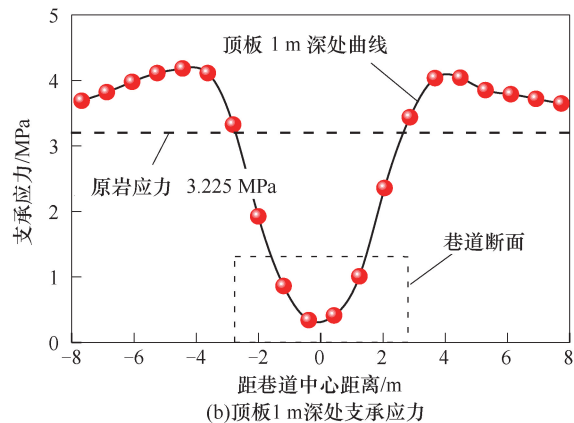
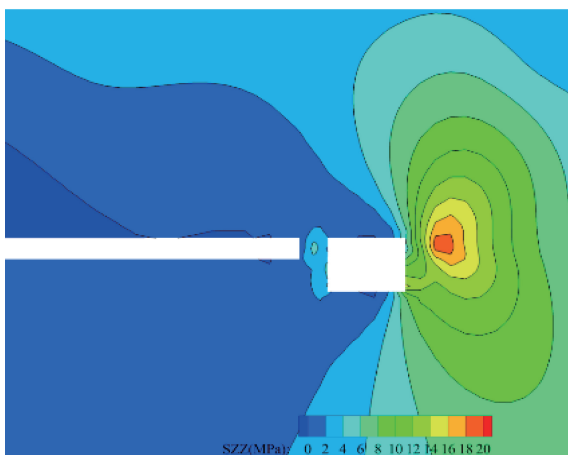


图7 掘巷时期围岩支承应力分布

Fig.7 Distribution of supporting stress of surrounding rock during roadway excavation period



(a) 支承应力云图

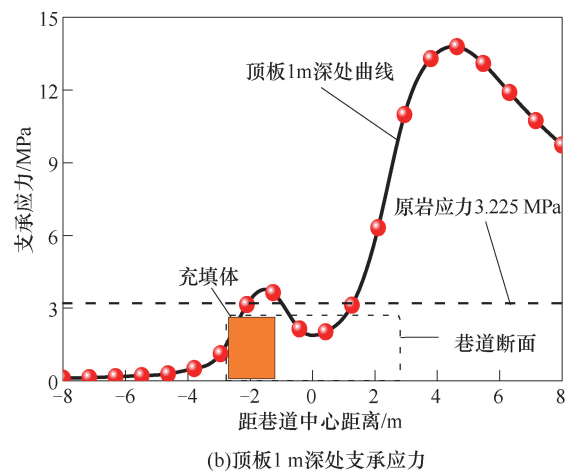


图8 留巷期间围岩支承应力分布

Fig.8 Distribution of supporting stress of surrounding rock during retaining roadway

根据理论计算及数值模拟验证,建议选取水灰比1:1、宽1.6 m的充填体进行本工作面的沿空留巷。

### 3 聚能爆破切顶卸压顶板稳态控制

#### 3.1 切顶卸压高度确定

坚硬顶板工作面回采后顶板不易垮落,易大面积悬顶,威胁矿工生命安全,损害采掘设备。通过切顶卸压的手段,改变工作面顶板结构,切断顶板悬臂梁结构,使得顶板及时垮落。由于岩石具有碎胀特性,垮落顶板会堆积形成高于原顶板厚度的垫层,限制了上位基本顶的回转下沉,切断应力传播途径,改善留巷应力集中状态,形成稳定结构。

合理的切顶高度能够保证垮落矸石充填采空区,从而限制上覆岩层的运动。预裂切顶高度设计公式<sup>[19]</sup>为

$$H_q = \frac{(H_m - \Delta H_1 - \Delta H_2)}{(k - 1)} \quad (4)$$

式中, $H_q$ 为最小切顶高度,m; $H_m$ 为煤层采高,m; $\Delta H_1$ 为顶板弯曲下沉量,m; $\Delta H_2$ 为底鼓量,m; $k$ 为碎胀系数。

根据凉水井矿实际工程地质条件,取采高1.1~1.46 m,碎胀系数1.16,不考虑顶底变形,代入式(4)计算得出切顶高度为6.875~9.125 m。由图1可知,煤层上方7 m处有3.68 m的细砂岩,综合考虑,确定切顶高度10.7 m。

#### 3.2 聚能爆破切顶方案

采用“煤矿许用乳化炸药+D型聚能管”定向预裂爆破的方式,实现顶板高效预裂切顶成缝。D型聚能管可以使炸药产生的爆轰波通过聚能槽变为高能射流,切开相邻炮孔之间的临空弱面,叠加产生稀疏波,在两炮孔连线上切断岩石分子结构、形成裂缝,而后爆破气体沿裂缝进一步贯通,切断岩石。此方案具有切缝整齐、顶板垮落充分的有益效果,且对悬吊锚索无冲击,有利于实现顶板稳态控制。

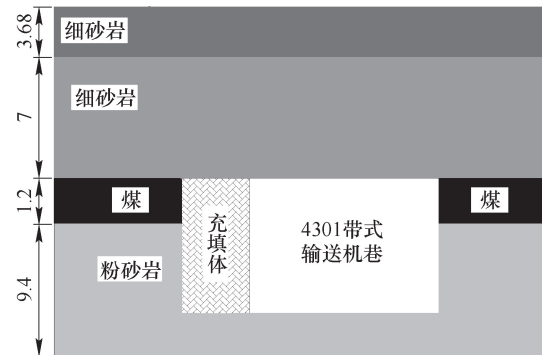
具体爆破参数为:钻孔长度11.5 m(切顶高度10.7 m);理论最优切顶角为90°,由于施工因素限制,取钻孔仰角70°±3°;炸药选取煤矿许用乳化炸药(直径35 mm,长度200 mm,重量200 g/卷),炮孔直径取38 mm;综合考虑应力波叠加作用、顶板岩性及聚能管结构特征等因素,炮孔间距取600 mm。

合理的封孔长度,既要保证封孔段岩体松动预裂,同时又不能产生抛掷爆破漏斗,爆破时封孔长

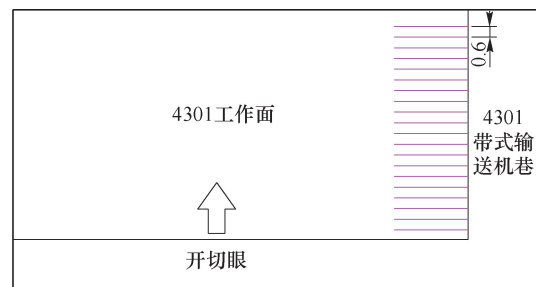
度应为孔深的25%~30%,即2.8~3.5 m,考虑对充填体的保护作用,初次封孔长度定为4 m,后续根据爆破效果可以进一步调整。

#### 3.3 炮孔布置及起爆方式

根据上节确定的聚能爆破切顶方案参数,4301工作面预裂爆破炮孔布置如图9所示。



(a) 巷道内炮孔布置



(b) 工作面炮孔布置

图9 炮孔布置

Fig. 9 Borehole layout

炮孔长度11.5 m,其中装药长度7.5 m,封孔长度4 m。采用正向爆破串联起爆,原因是正向起爆时,炸药爆燃产生的爆轰波和固体颗粒向炮眼底部扩散,安全性更高。采用串联起爆方式,由于其电压均匀分布每一只雷管上,即网路所需总电流小,不会产生外露火花,更加安全。另外,串联起爆能够节省导线,联线简单,操作方便,不易误联或漏联,联线后便于检查。

### 4 沿空留巷具体实施方案及现场验证

#### 4.1 掘巷期

顶板每排布置7根锚杆,间排距900 mm×1 000 mm,肩角锚杆外斜15°布置,其余锚杆垂直顶板布置。为控制充填侧顶板,用两根锚索替代原位置锚杆,锚索间排距1 800 mm×2 000 mm,即顶板支护纯锚杆与锚杆+锚索间隔布置。帮部每排布置3根锚杆,间排距1 000 mm×1 000 mm,顶板外斜15°布置。具体巷道支护情况如图10所示。

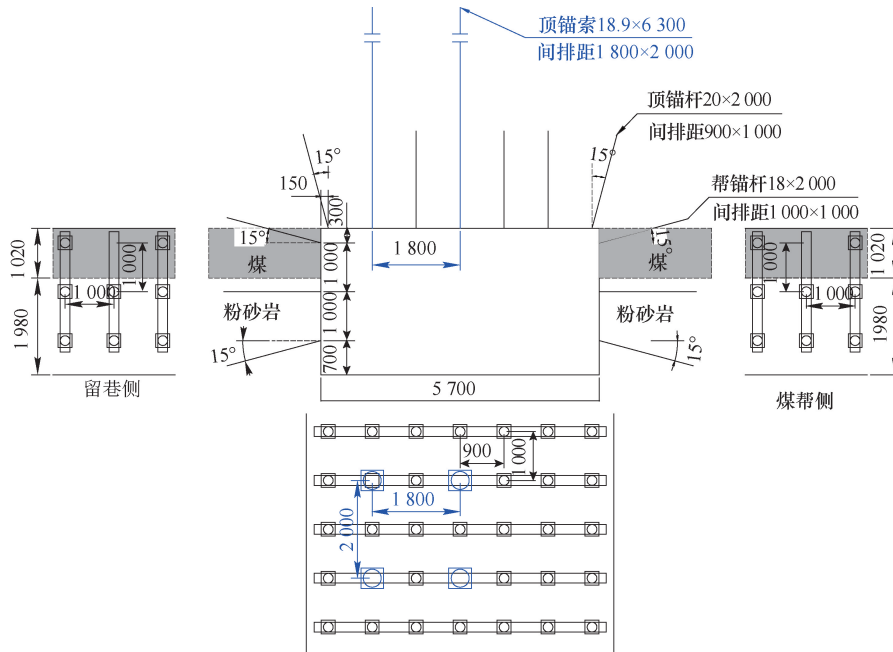


图 10 巷道原始支护(单位:mm)

Fig. 10 Original support of roadway

4.2 留巷期

巷道采用柔模充填体墙+门式支架的方式留巷,门式支架架宽 3 800 mm,架间距 1 000 mm,架腿距充填体和实煤体距离分别为 400 mm、700 mm。采用柔模袋灌注混凝土的方法浇筑充填体,提前在柔模袋中预置间距 1 000 mm×800 mm 的对拉锚杆以加固充填体。具体布置如图 11、图 12 所示。

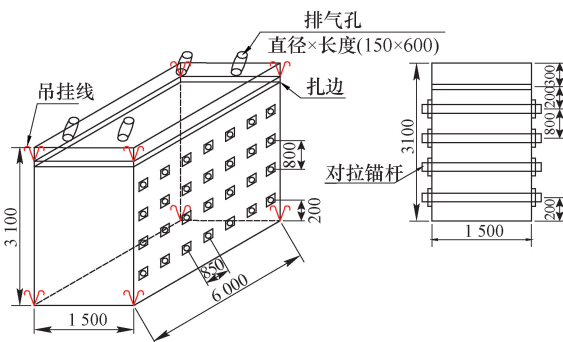


图 11 充填体示意图(单位:mm)

Fig. 11 Schematic diagram of filling body

4.3 现场实测

通过设置测站进行现场监测能够直观反映巷道围岩变形以及应力运移规律,因此在 4301 工作面设置表面位移及锚杆载荷测站对巷道变形进行监测,结果如图 13 所示。

由巷道表面位移观测结果可知,巷道顶板、煤帮、充填帮、底板的变形均呈现“平缓增加、突变激增、趋于稳定”的变化趋势,在 0~20 m 为顶板关

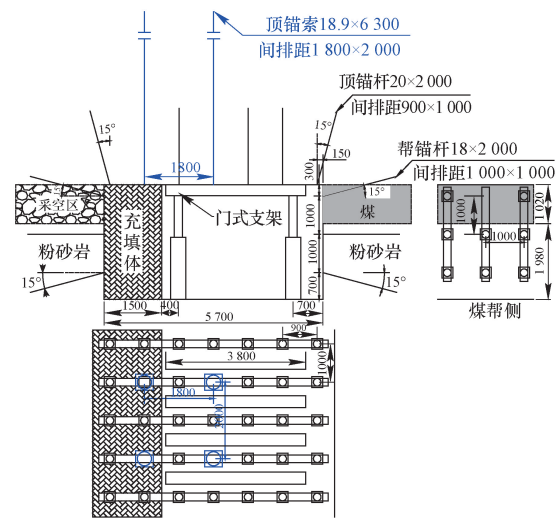


图 12 留巷巷道支护(单位:mm)

Fig. 12 Support of retaining roadway

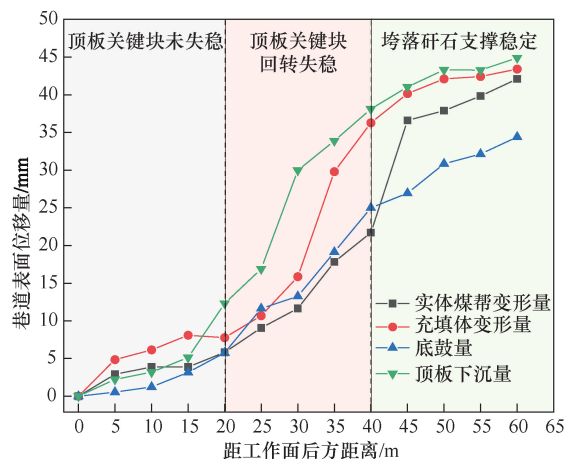


图 13 巷道表面位移观测结果

Fig. 13 Observation of roadway surface displacement

键块未失稳阶段,巷道围岩整体变形较小;20~40 m 为关键块回转下沉阶段,此时巷道顶板靠近充填体一侧活动剧烈,变形速率大;40~60 m 为垮落矸石形成具有承载能力的结构支撑关键块阶段,留巷结构趋于稳定。巷道表面位移变形极值分别为顶板下沉 46 mm、底鼓 34 mm、充填帮 43 mm、实体煤帮 42 mm。巷道整体变形较小,围岩控制效果良好,结构稳定,能够满足安全生产的需要。

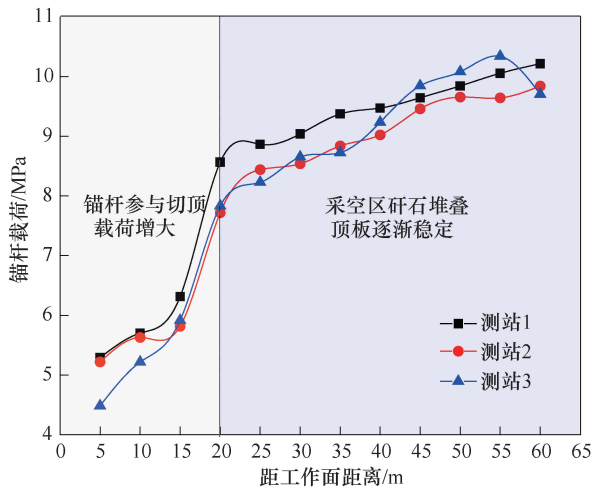


图 14 锚杆载荷观测结果

Fig. 14 Observation of bolt load

锚杆载荷观测结果如图 14 所示,锚杆受力总体呈现逐步增加的趋势,在 5~20 m 之间迅速增加,增加速率较大;在 20~60 m 小幅增加,增加速率较小。这说明锚杆参与到了充填体“切顶”过程并且约束了巷道围岩变形破坏。所有测站数据中锚杆载荷最大值为 10.5 MPa,远小于其破断载荷,有效控制了巷道变形。

综上可得,现场实测结果说明充填体参数及切顶方案合理,工作面后方 60 m 范围无大变形,无明显应力集中,围岩整体控制效果良好、结构稳定,留巷效果达到设计要求。

## 5 结论

(1) 基于浅埋“三硬”薄煤层沿空留巷围岩结构特征,建立了充填体-顶板相互作用力学模型,得出了巷旁充填体支护阻力计算式,根据矿井实际条件,得出最小切顶阻力为 10.3 kN/m。

(2) 对不同水灰比条件下的高水材料进行了力学承载特性研究,选取最佳配比为水灰比 1:1。通过数值模拟分析不同宽度充填体的应力和塑性区分布情况,确定其合适的留巷宽度为 1.6 m。

(3) 采用“煤矿许用乳化炸药+D 型聚能管”

定向预裂爆破的切顶方案,计算得出了切顶高度为 10.7 m,并给出了其他爆破参数。

(4) 给出了巷旁支护和巷内支护围岩强化方案。工程实践表明,测站所有锚杆载荷最大值为 10.5 MPa,远小于其破断载荷,工作面后方 60 m 范围无大变形,无明显应力集中,说明留巷效果达到设计要求,验证了充填体参数和切顶及留巷方案的合理性。

## 参考文献

- [1] 朱妍. 煤炭开采向薄煤层要“厚”效益[N]. 中国能源报,2023-09-11(16).
- [2] 张九雨. 薄煤层厚灰岩下混凝土巷旁充填沿空留巷研究[J]. 煤矿安全,2016,47(9):46-49.  
ZHANG Jiuyu. Study on gob-side entry retaining of concrete filling in thin coal seam and thick limestone roof [J]. Safety in Coal Mines,2016,47(9):46-49.
- [3] 张帅,徐金海,李冲.“双软”顶底板薄煤层沿空留巷底鼓机理分析[J]. 煤炭工程,2022,54(1):112-116.  
ZHANG Shuai,XU Jinhai,LI Chong. Floor heave mechanism of gob-side entry retaining in thin coal seam with soft roof and floor[J]. Coal Engineering,2022,54(1):112-116.
- [4] 曹树刚,邹德均,白燕杰,等. 近距离“三软”薄煤层群回采巷道围岩控制[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(4):524-529.  
CAO Shugang,ZOU Dejun,BAI Yanjie, et al. Surrounding rock control of mining roadway in the thin coal seam group with short distance and “three soft” [J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2011,28(4):524-529.
- [5] 赵玉翔,雷延智,杨晓龙,等.“两硬”薄煤层采空区煤柱下沿空留巷技术[J]. 煤矿安全,2015,46(12):88-91.  
ZHAO Yuxiang,LEI Yanzhi,YANG Xiaolong, et al. Gob-side entry retaining technology under coal pillar of goaf in “two hard” and thin coal seam [J]. Safety in Coal Mines,2015,46(12):88-91.
- [6] 王玉峰. 薄煤层石灰岩顶板巷旁充填沿空留巷关键参数研究与应用[J]. 煤炭工程,2018,50(7):5-9.  
WANG Yufeng. Key parameters of gob-side entry retaining with roadside backfill in thin coal seams with limestone roof and its application [J]. Coal Engineering,2018,50(7):5-9.
- [7] 秦玄烨,张英华,黄志安,等. 深井薄煤层保护层坚硬顶板破断机理及控制技术[J]. 中南大学学报:自然科学版,2021,52(11):4010-4020.

- QIN Xuanye, ZHANG Yinghua, HUANG Zhian, et al. Breaking mechanism and control technology of hard roof in deep and thin coal seam protective layer[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(11):4010-4020.
- [8] 高永格,张强,牛鑫,等. 沿空留巷顶板覆岩二次采动裂隙实测分析[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 78-84.
- GAO Yongge, ZHANG Qiang, NIU Chu, et al. Analysis of actual measurement of cracks in overlying rock on roof of gob-side entry retaining during secondary mining[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(3): 78-84.
- [9] 朱永建,任恒,王平,等. 倾斜厚层坚硬顶板条件下沿空留巷稳定性控制[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2023, 54(3):956-966.
- ZHU Yongjian, REN Heng, WANG Ping, et al. Stability control of gob-side entry retention under the condition of inclined thick layer and hard roof[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2023, 54(3): 956-966.
- [10] 郭海军,杜怀龙. 厚煤层沿空留巷柔模混凝土充填体合理宽度确定[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2):105-112.
- GUO Haijun, DU Huailong. Research and application of flexible formwork concrete gob-side entry retaining technology in thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S2): 105-112.
- [11] 冯超,刘少伟,张小东,等. 切顶条件下综放沿空留巷充填体承载特征及合理宽度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2):232-242.
- FENG Chao, LIU Shaowei, ZHANG Xiaodong, et al. Study on the bearing characteristics and reasonable width of the backfilling body for gob-side entry in fully-mechanized top-coal caving face under the roof cutting condition[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 232-242.
- [12] 何满潮,郭鹏飞,王炯,等. 禾二矿浅埋破碎顶板切顶成巷试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 391-398.
- HE Manchao, GUO Pengfei, WANG Jiong, et al. Experimental study on gob-side entry formed by roof cut of broken roof at shallow depth of Hecaogou No. 2 Coalmine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 391-398.
- [13] 胡超文,王俊虎,何满潮,等. 中厚煤层切顶卸压无煤柱自成巷技术关键参数研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4):117-123.
- HU Chaowen, WANG Junhu, HE Manchao, et al. Study on key parameters of self-formed roadway without coal pillar by roof cutting and pressure relief in medium and thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 117-123.
- [14] 任广信. 复杂薄煤层聚能爆破切顶卸压沿空留巷技术研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(5):17-22.
- REN Guangxin. Study on roof cutting and pressure relief technology of gob side entry retaining by shaped charge blasting in complex thin coal seam[J]. Coal Technology, 2022, 41(5): 17-22.
- [15] 黄志增,高晓进,袁伟茗,等. 深孔预裂爆破沿空留巷技术及顶板应力分布规律[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S2):88-96.
- HUANG Zhizeng, GAO Xiaojin, YUAN Weiming, et al. Stress distribution of cutting roof with deep borehole blasting for gob-side entry retaining technology[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S2): 88-96.
- [16] HAN Changliang, ZHANG Nong, RAN Zhi, et al. Superposed disturbance mechanism of sequential overlying strata collapse for gob-side entry retaining and corresponding control strategies[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(9):2258-2271.
- [17] 龚鹏,马占国,和泽欣,等. 矸石充填工作面沿空留巷围岩结构演化机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(4):764-773, 785.
- GONG Peng, MA Zhanguo, HE Zexin, et al. Structural evolution mechanism of surrounding rock of gob side entry retaining in backfilling mining face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(4): 764-773, 785.
- [18] 李季,李博,张荣光,等. 考虑采空区矸石非均匀充填影响的倾斜煤层沿空留巷稳定性分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6):30-41.
- LI Ji, LI Bo, ZHANG Rongguang, et al. Stability analysis of inclined coal seam roadway along goaf considering non-uniform filling of gob gangue[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 30-41.
- [19] MA Junqiang, LI Xuehua, YAO Qiangling, et al. Numerical simulation on mechanisms of dense drilling for weakening roofs and its application in roof control[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(6):1865-1886.

(责任编辑:王晓玲)