



## 厚煤层巷旁充填沿空留巷切顶卸压机制与防控技术

赵善坤 申付新 贺光会 李浩男 蒋军军 高海南 赵志军 周志斌 田宇飞

### 引用本文：

赵善坤, 申付新, 贺光会, 等. 厚煤层巷旁充填沿空留巷切顶卸压机制与防控技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 102–114.  
ZHAO Shankun, SHEN Fuxin, HE Guanghui. Mechanism and control technology of roof cutting induced pressure relief in gob-side entry retaining with roadside backfill under thick coal seam conditions[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 102–114.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2025-0751>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 中厚煤层切顶卸压无煤柱自成巷技术关键参数研究

Study on key parameters of self-formed roadway without coal pillar by roof cutting and pressure relief in medium and thick coal seam  
煤炭科学技术. 2022, 50(4): 117–123 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/741f9847-1745-4338-aa7a-fe7d9e8ab757>

##### 倾斜煤层厚硬顶板切顶留巷关键参数优化研究

Study on optimization of key parameters of thick hard roof cutting and retaining roadway in inclined coal seam  
煤炭科学技术. 2024, 52(5): 11–24 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1627>

##### 厚煤层沿空留巷变形漏风机制及多元协同防治技术

Deformation and air leakage mechanism of gob-side entry retaining and multiple collaborative prevention and control technology in thick coal seam  
煤炭科学技术. 2024, 52(10): 114–126 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1139>

##### 浅埋中厚煤层沿空留巷底板变形力学分析及底鼓控制技术

Mechanical analysis of floor deformation and floor heave control technology for gob-side entry retaining in medium thick coal seam with shallow cover depth  
煤炭科学技术. 2024, 52(10): 11–20 <https://doi.org/10.12438/est.2023-1382>

##### 沿空留巷密集钻孔切顶机理及关键参数确定方法

Roof cutting mechanism of dense drilling in gob-side entry retaining and determination method of key parameters  
煤炭科学技术. 2024, 52(2): 23–33 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1760>

##### 再论我国沿空留巷技术发展现状及改进建议

Current situation of gob-side entry retaining and suggestions for its improvement in China  
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 128–145 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2082>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

赵善坤, 申付新, 贺光会, 等. 厚煤层巷旁充填沿空留巷切顶卸压机制与防控技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 102-114.

ZHAO Shankun, SHEN Fuxin, HE Guanghui, et al. Mechanism and control technology of roof cutting induced pressure relief in gob-side entry retaining with roadside backfill under thick coal seam conditions[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 102-114.



赵善坤, 男, 辽宁葫芦岛人, 研究员, 博士生导师, 博士, 中国煤炭科工集团首席科学家, 现任顶板与冲击地压灾害防治煤炭行业重点联合实验室副主任, 煤科院冲击地压团队负责人。长期从事煤岩动力灾害机理与防控技术方面的研究。先后主持和参与各类国家级课题 12 项及企业委托技术服务项目 120 余项, 提出了冲击地压构协同防控理论, 主持开发了冲击地压监测预警与灾害防控系列装备 11 台(套), 带领团队在国内首创了“冲击地压交钥匙”技术工程一体化服务模式, 在国内 10 余个矿区进行推广应用。先后获得国家科技进步二等奖 1 项, 省部级一等奖 10 项, 以第一作者/通讯作者发表论文 46 篇(SCI/Ei 检索 26 篇), 出版专著 4 部, 第一发明人授权发明专利 21 件, 主持/参与制修订了 12 项冲击地压相关国家及行业标准, 计算机软件著作权 10 项, 获得“杰出工程师青年奖”、“中央企业优秀青年科技人才”、“煤炭青年科技奖”、“公共安全青年科技奖”、“中国产学研合作创新(个人)奖”等荣誉称号。

## 厚煤层巷旁充填沿空留巷切顶卸压机制与防控技术

赵善坤<sup>1,2</sup>, 申付新<sup>3</sup>, 贺光会<sup>4</sup>, 李浩男<sup>1,2</sup>, 蒋军军<sup>1,2</sup>, 高海南<sup>1,2</sup>, 赵志军<sup>4</sup>, 周志斌<sup>1,2</sup>, 田宇飞<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤矿灾害防控国家重点实验室, 北京 100013; 3. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083; 4. 晋能控股装备制造集团有限公司, 山西 晋城 048026)

**摘要:** 针对厚煤层充填沿空留巷围岩大变形与稳定性控制难度大等问题, 以某矿 N3-13 工作面为工程背景, 综合运用理论分析、数值模拟以及现场试验的方法, 揭示了厚煤层充填沿空留巷围岩变形特征及其控制难题, 阐明了厚煤层“切顶+充填”沿空留巷的围岩结构演化与卸压机制, 提出了合理切顶高度计算公式, 并系统评估了不同切顶高度的应用效果。结果表明: 厚煤层充填沿空留巷的关键技术难题在于采空区侧顶板外伸悬臂梁结构在覆岩动态载荷下的回转下沉, 直接引发支护失效与围岩大变形; 而“切顶+充填”协同控制机制通过定向预裂切顶主动切断外伸悬臂结构, 实现采空区侧应力高效转移卸压; 同时, 巷旁充填体对切顶短壁梁结构提供持续性支撑, 有效抑制围岩变形; 二者协同促使围岩应力状态由临界转变为稳定。合理切顶高度作为控制巷道围岩稳定性的关键参数, 其增加驱动实体煤帮应力峰值由“单峰”向“双峰”分布转变, 显著降低围岩受力水平, 并将应力集中区向煤岩体深部迁移达 222.38%。经现场试验验证, 预裂切顶高度增加可显著降低巷旁充填体荷载及围岩变形量, 覆岩运动影响周期同步缩短。“切顶+充填”协同作用机制及合理切顶高度确定方法, 为厚煤层沿空留巷围岩稳定性控制提供了技术途径。

**关键词:** 厚煤层; 切顶充填; 沿空留巷; 卸压机制; 切顶高度

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2025)08-0102-13

## Mechanism and control technology of roof cutting induced pressure relief in gob-side entry retaining with roadside backfill under thick coal seam conditions

ZHAO Shankun<sup>1,2</sup>, SHEN Fuxin<sup>3</sup>, HE Guanghui<sup>4</sup>, LI Haonan<sup>1,2</sup>, JIANG Junjun<sup>1,2</sup>,  
GAO Hainan<sup>1,2</sup>, ZHAO Zhijun<sup>4</sup>, ZHOU Zhibin<sup>1,2</sup>, TIAN Yufei<sup>1,2</sup>

收稿日期: 2024-05-28

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 陈思成

DOI: 10.12438/cst.2025-0751

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52474230); 国家重点研发计划资助项目(2024YFC2909504); 天地科技创新创业资金专项重点资助项目(2024-TD-ZD010-01)

作者简介: 赵善坤(1982—), 男, 辽宁葫芦岛人, 研究员, 博士。E-mail: zhaoshankuncom@163.com

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Beijing 100013, China;  
3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083; 4. Shanxi Jincheng Anthracite  
Coal Mining Group, Jincheng 048026, China)

**Abstract:** To address the challenges of large deformation and stability control in filled gob-side entry retaining in thick coal seams, taking the N3-13 working face as the engineering background. Integrated theoretical analysis, numerical simulation, and field experiments reveal the deformation characteristics and control challenges of surrounding rock in backfilled gob-side entries in thick coal seams. The structural evolution and pressure relief mechanism of “roof-cutting + filling” gob-side entry retaining in thick coal seams are clarified. A rational roof-cutting height formula is established, and the application effects of different cutting heights are evaluated. Results demonstrate that the key technical challenge lies in the rotational subsidence of the overhanging cantilever beam structure on the gob-side under dynamic overburden loading, directly inducing support system failure and large surrounding rock deformation. The synergistic control mechanism of “roof-cutting + filling” achieves efficient stress redistribution and relief on the goaf side by proactively severing the overhanging cantilever structure through directional pre-split roof cutting. Concurrently, the roadside filling body provides sustained support for the roof-cut short-wall beam structure, effectively suppressing surrounding rock deformation. Their synergy thus transforms the stress state of the surrounding rock from critical to stable. As the key parameter controlling entry stability, an increase in rational roof-cutting height drives the transformation of stress peak distribution in the solid coal rib from “single-peak” to “double-peak”, significantly reducing the stress level in the surrounding rock and shifting the stress concentration zone deeper into the coal-rock mass by 222.38% relative to baseline conditions. Field tests verified that increased pre-split roof-cutting height substantially reduces roadside filling load and surrounding rock deformation while synchronously shortening the impact cycle of overburden strata movement. The proposed synergistic mechanism of “roof-cutting + filling” and the rational roof-cutting height determination method provide a validated technical solution for controlling surrounding rock stability in gob-side entry retaining within thick coal seams.

**Key words:** thick coal seams; roof cutting and roadside filling; gob-side entry retaining; pressure releasing mechanism; roof cutting height

## 0 引言

厚煤层作为我国煤炭资源的战略储备主体,其储量约占煤炭资源总储量的45%,年产量占比达全国总产量的40%~50%<sup>[1-2]</sup>。然而,在现有主流的留煤柱开采工法下,区段煤柱的平均损失率约为9.03%,年资源损失量高达4亿t<sup>[3-4]</sup>。随着以厚煤层集中化生产为主要特征的大型现代化矿井建设推进,煤矿产能提升迫使工作面煤柱留设规模持续扩大,这不仅导致资源损失率攀升,更引发地表沉降速率超限,严重威胁矿区生态环境安全<sup>[5]</sup>。上述粗放开采模式与国家绿色开采政策明确的“资源高效利用、生态扰动可控”目标形成严重冲突。在此背景下,探究厚煤层安全高效绿色开采技术,既是响应“双碳”目标需求的必然选择,也是破解资源浪费与生态损害双重困境的关键路径。

为实现降本增效与资源的可持续性开采,无煤柱沿空留巷技术近年来发展迅速<sup>[6-7]</sup>。在充填沿空留巷方面,邓雪杰等<sup>[8]</sup>分析了埋深、工作面充实率及巷旁充填体参数对沿空留巷围岩应力演化与变形特征的作用规律;王俊峰等<sup>[9]</sup>揭示了窄柔模墙体沿空留巷围岩偏应力的分布与演化规律,提出了分区非对称耦合控制技术;王平等<sup>[10]</sup>阐明了深井研石充填工作面沿空留巷覆岩运动特征及其围岩承载结构与稳

定性,提出了以“研石墙+钢管混凝土立柱”为主的巷旁支护结构;柏建彪等<sup>[11]</sup>分析了高水材料充填留巷围岩在不同阶段的应力与变形特征;李季等<sup>[12]</sup>量化评估了采空区研石非均匀充填对沿空留巷围岩稳定性的影响;龚鹏等<sup>[13]</sup>揭示了充填沿空留巷“大、小结构”演化机理;刘贞智等<sup>[14]</sup>确定了沿空留巷巷旁充填体中让压层和抗压层材料的最优配比,提升了充填沿空留巷技术体系的稳定性与适应性。

尽管上述研究为充填沿空留巷技术提供了重要理论支撑与实践经验,但在厚煤层开采中,由于采高显著增加,覆岩破断范围扩大、应力集中效应加剧,传统技术体系难以适应此类复杂条件,使得充填沿空留巷技术仍面临以下挑战<sup>[15]</sup>:①强采动导致巷旁充填体承压过大,变形控制困难;②顶煤破碎、漏冒导致巷旁充填体支护滞后;③巷旁充填体初期强度低制约回采效率,脆性开裂引发采空区漏风;④煤层采高大导致采空区研石充实率低、基本顶回转角大,实体煤帮变形及底鼓加剧;⑤顶板活动剧烈引发显著动载现象,支架安全阀频繁开启并伴随活柱急速下缩;⑥局部留巷严重变形,影响沿空留巷二次投用。

为进一步优化围岩应力分布并保证安全开采,何满潮等<sup>[16]</sup>提出了无煤柱自成巷110工法技术,通过在薄煤层<sup>[17-20]</sup>及中厚煤层<sup>[7,21-23]</sup>等条件下的系统

研究,确定了切顶卸压无煤柱开采关键参数,该技术既能实现有效卸压又可确保顶板有序垮落,已在实际工程中取得显著成效。但在传统切顶工艺中,针对厚煤层无煤柱自成巷开采的研究成果较少。由于煤层厚度大,仅依靠垮落矸石碎胀往往难以密实充填采空区,覆岩顶板无序破断引发的高应力与强扰动长周期耦合作用,致使沿空巷道产生大变形破坏并造成支护系统失稳。而无煤柱自成巷110工法的核心工艺<sup>[24]</sup>“预裂切顶”,因其主动预裂、定向卸压的技术特性,在缓解充填体变形等方面展现出独特优势。

因此,笔者以山西某矿厚煤层综放开采N3-13工作面沿空留巷为工程背景,揭示了厚煤层充填沿空留巷围岩变形特征及其控制难题,阐明了厚煤层“切顶+充填”沿空留巷的围岩结构演化与卸压机制,确定了

厚煤层充填沿空留巷的合理切顶高度。研究成果可为厚煤层切顶充填沿空留巷技术的应用提供参考。

## 1 工程背景

试验井田位于潞安矿区中部,整体呈单斜构造,向西倾斜。切顶充填沿空留巷试验巷道为N3-13工作面轨道巷。矿区主采3号煤层,N3-13工作面平均埋深为500 m,平均倾角为2.2°,工作面附近无断层,但轨道巷北侧20 m处存在陷落柱。N3-13工作面倾向长度为260 m,走向长度为923 m,煤层厚度为6.0 m,采用低位放顶煤综放开采技术,机械化开采高度为3.3 m,放顶高度为2.7 m,工作面采出率为93%。巷道为沿3号煤层底板掘进的矩形断面6.0 m×3.7 m(宽×高),采用锚网索联合支护方案,工程地质条件及巷道支护设计方案如图1所示。

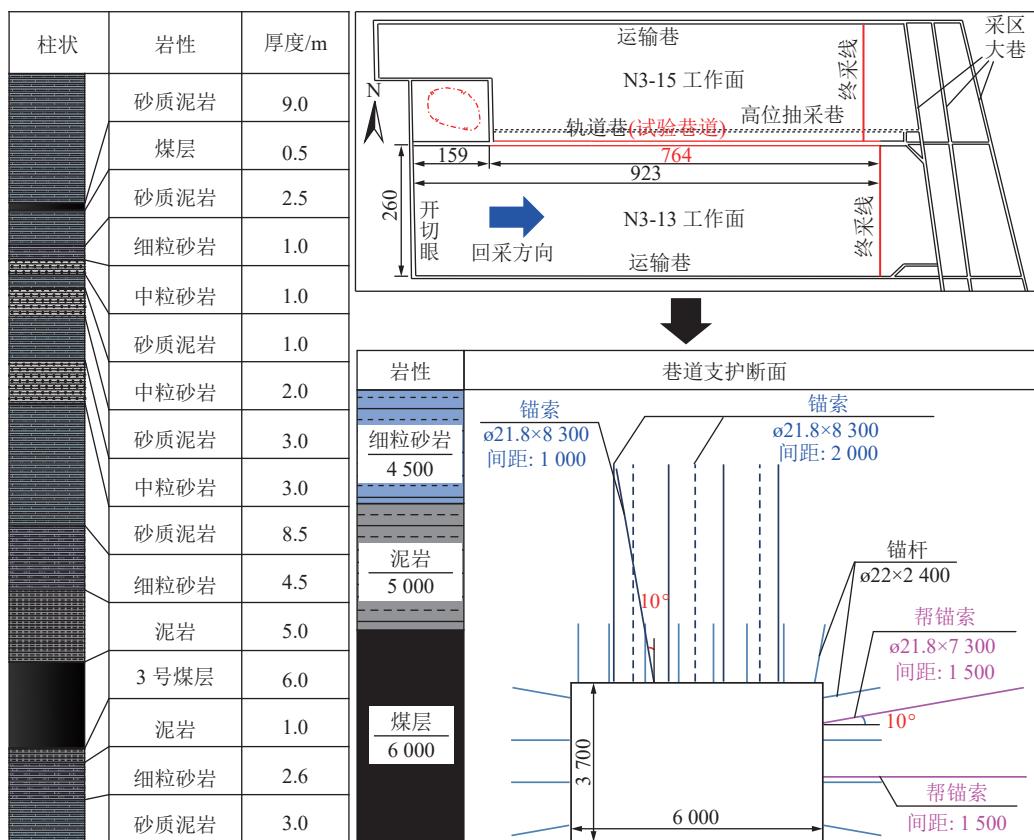


图1 工作面布置及巷道支护与顶底板岩性柱状

Fig.1 Working face layout and roadway support and roof and floor lithology histogram

原采用柔模充填沿空留巷技术,充填宽度为1.5 m,填充混凝土强度约为40 MPa,通过横纵双向钢筋梯子梁连接的对拉锚杆对充填体进行加强支护。但在沿空留巷过程中,围岩大变形现象明显、柔模充填体挤压破坏严重、巷内单体液压支柱不能回撤及多次返修等问题频发,导致留巷成本大幅增加。巷旁柔模充填支护设计及围岩变形情况如图2所示。

## 2 厚煤层沿空留巷充填体失稳分析

### 2.1 沿空巷道围岩区划结构特征

根据采动应力对沿空留巷围岩的扰动强度特征,将沿空留巷过程分为3个区域:留巷巷道受超前工作面采动应力影响,围岩应力与变形开始缓慢增加的区域称为超前影响区;受采场上覆岩层垮落及旋

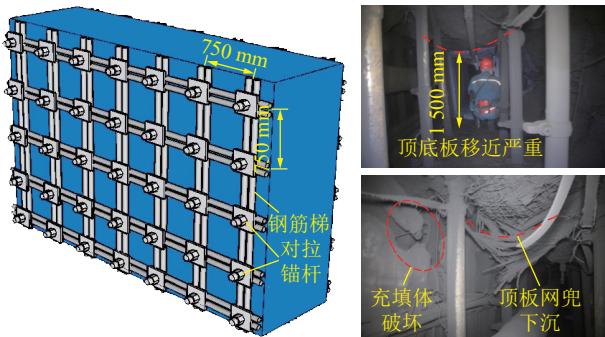


图 2 巷旁充填体支护设计及围岩变形情况

Fig.2 Roadside filling support design and surrounding rock deformation

转下沉影响,滞后工作面采动应力持续转移,围岩应力与变形不断增加的区域称为覆岩运动区;采场覆岩运动逐渐停止,围岩应力区域稳定,变形速率趋于零的区域称为留巷稳定区。不同影响分布区域如图 3 所示。

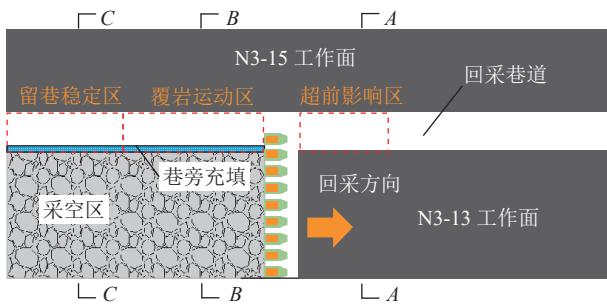


图 3 沿空留巷不同分区示意

Fig.3 Schematic of different areas of gob-side entry retaining

在充填沿空留巷过程中,当巷道受超前采动应力影响时,顶底板岩层结构如图 4a 所示。在超前支护作用下,围岩变形处于可控范围。当工作面开挖后,沿空巷道进入覆岩运动区,采场顶板逐渐从低位向高位垮落碎胀,通过巷旁充填体的支撑作用,沿空留巷顶板采空区侧形成外伸悬臂梁结构。该结构随工作面推进及覆岩载荷持续作用下产生回转下沉,导致支护体破坏失效与围岩显著变形,其围岩结构如图 4b 所示。随着滞后距离增加,覆岩运动趋于稳定,采空区矸石经历局部碎涨—压实过程,并与留巷

顶板的外伸悬臂梁结构悬臂端“触研”,诱发巷道顶板在实体煤侧或顶板上方发生破断<sup>[16,25]</sup>,如图 4c 所示。需特别指出,随着煤层厚度增加,覆岩垮落高度显著增大,导致外伸悬臂梁结构的触研距离增加,弯曲下沉呈非线性攀升现象,致使围岩大变形问题更加突出。为减小围岩大变形,需同步提升巷道支护强度与巷旁充填宽度,但高强度支护可能引发顶板二次破断风险,而充填体宽度增加将导致充填材料消耗量显著增加。二者叠加不仅对安全开采造成影响,还大幅提高了留巷成本与劳动强度。

## 2.2 未切顶条件下充填体载荷计算

为探究未切顶条件下充填体的受力变形特征,采用分离岩块法计算充填体载荷<sup>[26]</sup>。该方法的理论依据为:留巷和巷旁支护上方一定范围内分离岩块的重量构成了巷旁支护载荷。巷旁支护处于未采动煤体的高地压区和采空区冒落矸石之间,是一个卸压区。岩块一边的采空区提供一个主要自由面。因岩块呈层状,可能在一定高度( $H$ )上产生离层,导致岩块与煤壁以  $\alpha$  角破断,进入完全自由状态,成为巷旁支护的载荷,具体力学计算模型如图 5 所示。

巷旁充填体承受分离岩块载荷  $Q_k$  为

$$Q_k = \frac{8htan\alpha + 2(b + b_c + b_p)h(b + b_c + b_p)\gamma\cos\beta}{b_p} + \frac{q(b + b_c + b_p)[4hcot\alpha + 0.5(b + b_c + b_p)]\cos\beta}{b + 0.5b_p} \quad (1)$$

式中:  $Q_k$  为分离岩块自重,  $\text{kN}/\text{m}^2$ ;  $b$  为留巷宽度,  $\text{m}$ , 取  $6 \text{ m}$ ;  $b_p$  为巷旁支护宽度,  $\text{m}$ , 取  $1.5 \text{ m}$ ;  $b_c$  为工作面悬顶距,  $\text{m}$ , 取  $1.0 \text{ m}$ ;  $\gamma$  为分离岩块容重,  $\text{kN}/\text{m}^3$ , 取  $24 \text{ kN}/\text{m}^3$ ;  $h$  为巷道高度,  $\text{m}$ , 取  $3.7 \text{ m}$ ;  $\alpha$  为直接顶垮落角, ( $^\circ$ ), 取  $26^\circ$ ;  $\beta$  为煤层倾角, ( $^\circ$ ), 取  $2.2^\circ$ ;  $H$  为垮落带高度,  $\text{m}$ , 取  $H=4h=14.8 \text{ m}$ ;  $q$  为作用在分离岩块的覆岩载荷,  $\text{MPa}$ , 根据采空区内垂直应力分布规律<sup>[27-28]</sup>取  $0.48 \text{ MPa}$ 。

通过计算可得墙体宽度为  $1.5 \text{ m}$  时所承受载荷为  $23236.87 \text{ kN}/\text{m}^2$ 。由于充填体受工作面采动影响,需要考虑一定的动压影响系数,根据查阅相关资料,

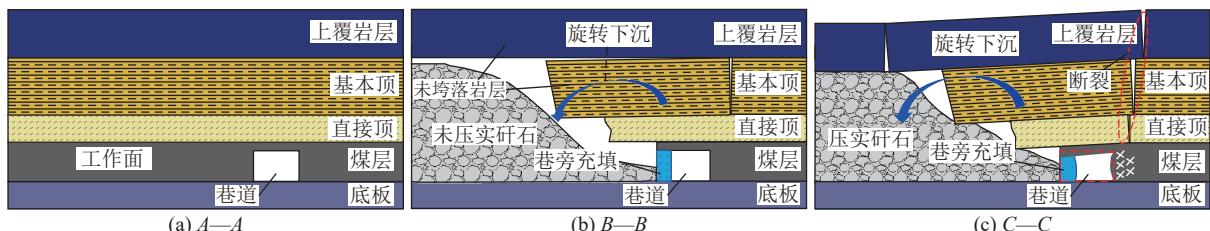


图 4 巷旁充填沿空留巷围岩结构示意

Fig.4 Surrounding rock structure of gob-side entry retaining with roadside filling

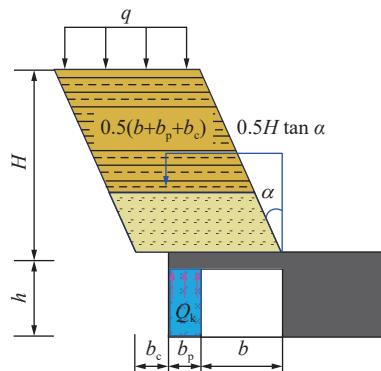


图 5 分离岩块法力学模型

Fig.5 Mechanical model of separation rockblock method

以及本文着重考虑 N3-13 工作面采空区对墙体的影响,故取采动影响系数为 2.5,则巷旁充填体上所承受的最大载荷为

$$23\,236.87 \times 2.5 = 58\,092.2 \text{ kN/m}^2 = 58.09 \text{ MPa} \quad (2)$$

### 2.3 充填体承载能力计算

柔模混凝土的承载力由约束增强体和核心混凝土 2 部分组成。在轴向压力作用下,被约束的核心混凝土产生横向扩容变形,使得锚栓产生拉伸变形,从而形成了作用于核心混凝土的横向约束力,核心混凝土处于三向受压应力状态<sup>[29]</sup>。柔模混凝土墙体的承载力计算式为

$$N = \varphi(f_{\text{cc}} + 4\sigma_{\text{r}})A \quad (3)$$

锚栓的约束应力计算式为

$$\sigma_r = \frac{\pi d^2 \sigma_b}{4a_1 a_2} \quad (4)$$

式中:  $N$  为柔模混凝土墙体的承载能力,  $\text{kN}/\text{m}$ ;  $\varphi$  为素混凝土达到设计强度后的稳定系数, 取 1.0;  $\sigma_r$  为锚栓套箍作用产生的有效应力值,  $\text{MPa}$ ;  $f_{cc}$  为素混凝土抗压强度设计值,  $\text{MPa}$ , 取 40  $\text{MPa}$ ;  $d$  为锚栓直径,  $\text{mm}$ , 取 22  $\text{mm}$ ;  $\sigma_b$  为锚栓材料抗拉强度值,  $\text{MPa}$ , 取 490  $\text{MPa}$ ;  $a_1, a_2$  为锚栓间排距,  $\text{mm}$ , 均取 750  $\text{mm}$ 。

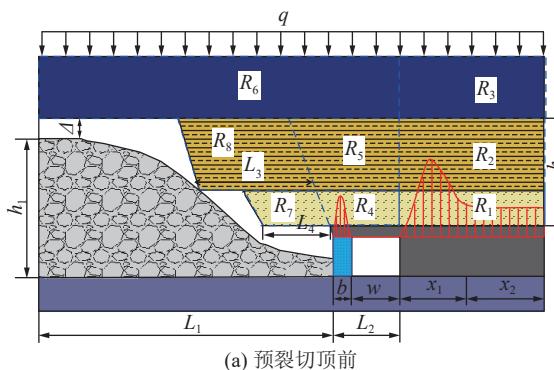


图 6 切顶卸压效应力学计算模型

$$\sigma_r = \frac{3.14 \times 22^2 \times 490}{4 \times 750 \times 750} = 0.33 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$N = 1.0 \times (40 + 4 \times 0.33) \times 1.5 = 61\ 980 \text{ kN/m} \quad (6)$$

通过理论分析可知, 1.5 m 充填体支撑能力为 61 980 kN/m, 转化成应力值为 41.32 MPa, 充填体上方顶板压力为 58.09 MPa, 安全系数为 0.71, 根据文献 [30], 当安全系数<1 时, 柔模混凝土墙体自身的载荷超过其所能承受的极限载荷, 不满足安全支护要求。

### 3 巷旁充填-切顶卸压围岩协同控制力学模型与特征

根据上文分析结果,充填体上方顶板局部悬置导致巷旁垮落不充分,使其成为集中受力体并承载上覆围岩的集中应力。而预裂切顶作为加速采空区顶板垮落速度、提高垮落程度以及优化应力分布环境的有效手段<sup>[16]</sup>,探究其在充填沿空留巷中的应用具有重要意义。

### 3.1 切顶充填留巷协同控制力学模型

当充填沿空留巷时,采场顶板与巷道顶板之间的完整性良好,采场矸石不能充分垮落,充填体采空区侧易形成悬顶,此时沿空留巷围岩结构如图 6a 所示;实施预裂切顶后,采空区侧顶板沿切顶线充分垮落,碎胀后对顶板产生一定的支撑作用,此时沿空留巷围岩结构如图 6b 所示。

根据竖向力学平衡条件,作用在充填沿空留巷中巷旁充填体和实体煤帮的总压力  $O_1$  为

$$Q_1 = \overline{\sigma}_{r1} b + \overline{\sigma}_{c1} (x_1 + x_2) = \\ q(L_1 + L_2 + x_1 + x_2) + \gamma_1 (S_{R_1} + S_{R_4} + S_{R_7}) + \\ \gamma_2 (S_{R_3} + S_{R_5} + S_{R_6}) + \gamma_3 (S_{R_8} + S_{R_9}) \quad (7)$$

当引入预裂切顶时,作用在巷旁充填体与实体煤帮的竖向总压力  $O_3$  为

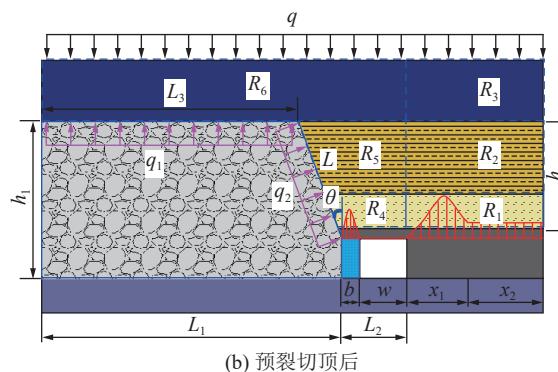


图 6 切顶卸压效应力学计算模型

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= \bar{\sigma}_{r2}b + \bar{\sigma}_{c2}(x_1 + x_2) = \\
 q(L_1 + L_2 + x_1 + x_2) + \gamma_1(S_{R_1} + S_{R_4}) + & \quad (8) \\
 \gamma_2(S_{R_2} + S_{R_5}) + \gamma_3(S_{R_3} + S_{R_6}) - & \\
 q_1L_3 - q_2L\sin\theta &
 \end{aligned}$$

根据式(7)与式(8)可知,作用在巷旁充填体与实体煤帮的竖向支护力减少量为

$$Q_1 - Q_2 = \gamma_1 S_{R_7} + \gamma_2 S_{R_8} + q_1 L_3 + q_2 L \sin\theta \quad (9)$$

式中:  $Q_1$  为充填留巷巷旁充填体与实体煤帮的竖向总支护力, kN;  $Q_2$  为切顶充填协同沿空留巷的巷旁充填体和实体煤帮的竖向总支护力, kN;  $\sigma_{r1}$  为巷旁充填体的竖向平均支撑力, kN/m;  $\sigma_{r2}$  为切顶充填沿空留巷巷旁充填体的竖向平均支撑力, kN/m;  $\sigma_{c1}$  为充填留巷实体煤帮的竖向平均支撑力, kN/m;  $\sigma_{c2}$  为切顶充填沿空留巷实体煤帮的竖向平均支撑力, kN/m;  $x_1$  为实心煤帮的塑性区宽度, m;  $x_1$  为实心煤帮的弹性区宽度, m;  $L_1$  为模型中采空区的宽度, m;  $L_2$  为巷道和巷旁充填体的和宽度, m;  $q$  为模型上的均布荷载, kN/m;  $q_1$  为采空区冒落研石对上覆岩层的均布支护荷载, kN/m;  $q_2$  为垮落研石对巷道顶板的均布支护荷载, kN/m;  $\gamma_1$  为直接顶的容重, kN/m<sup>3</sup>;  $\gamma_2$  为基本顶的容重, kN/m<sup>3</sup>;  $\gamma_3$  为上覆岩层的容重, kN/m<sup>3</sup>;  $S_{R_1}$ 、 $S_{R_2}$ 、 $S_{R_3}$ 、 $S_{R_4}$ 、 $S_{R_5}$ 、 $S_{R_6}$ 、 $S_{R_7}$ 、 $S_{R_8}$  分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_8$  区块的面积, m<sup>2</sup>;  $\theta$  为顶板切割面和垂直方向之间的角度, (°)。

根据式(9)可知,通过预裂切顶将采空区侧悬臂梁切落( $R_7$  和  $R_8$ ),在消除悬顶现象的同时,有效降低了岩梁的上覆载荷与旋转变形力。此消减作用使传递至巷旁充填体及实体煤帮的荷载显著下降,从根本上重构了巷道围岩应力场。同时,切落岩体凭借碎胀特性产生的体积膨胀效应,与巷旁充填体形成协同支撑体系( $q_1$  和  $q_2$ ),共同承担上覆岩层荷载,进而促使覆岩载荷传递路径向采空区偏移,最终在巷道围岩形成稳定的低应力环境。

### 3.2 切顶充填留巷围岩区划结构特征

在切顶充填沿空留巷过程中,在巷旁充填的基础上引入双向聚能定向预裂爆破技术,超前工作面切断采场顶板与巷道顶板之间的联系,如图 7a 所示;工作面回采后,沿巷道采空区侧进行柔模充填浇筑以支撑巷道顶板,切顶高度范围内的采场顶板沿预裂切顶面垮落碎胀后,对上覆岩层起到支撑作用,从而减小采动应力对围岩结构的影响程度,如图 7b 所示;随着垮落研石不断压实,上覆岩层沿预裂切顶面延伸方向发生定向破断,沿空留巷围岩在预裂切顶、柔模充填与碎胀研石的协同作用下形成稳定承载结构。此时巷道顶板形成一侧固支一侧简支的超静定结构,既可实现充填体卸压,又能为切顶悬臂梁的悬臂侧顶板提供高强度支护阻力,围岩结构如图 7c 所示。

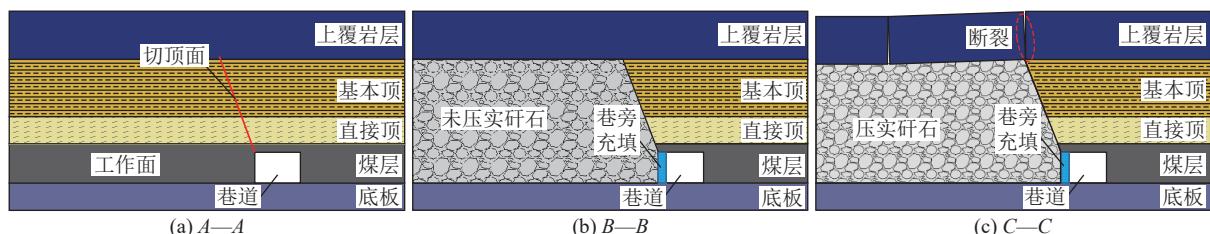


图 7 切顶充填沿空留巷围岩结构示意  
Fig. 7 Surrounding rock structure diagram of GER-RCRF

### 3.3 切顶充填留巷应力特征

围岩中一点的破坏状态可由莫尔-库仑理论中莫尔应力圆与强度包络线的关系判定。采用莫尔-库仑理论可以有效揭示沿空留巷在开挖-支护-切顶-留巷过程中围岩的应力状态演化过程<sup>[31-33]</sup>。取一段巷道(巷段)实体煤侧的一点作为研究对象,在沿空留巷过程中,根据沿空留巷工艺流程,将巷段分为开挖支护、超前工作面和滞后工作面 3 个阶段进行分析:

巷段开挖支护阶段(图 8a):巷段开挖前,岩体处于初始应力状态,莫尔圆位于强度包络线下方(I);开挖后,岩体进入卸压状态,表现为应力值的降低和

应力方向的变化,最小主应力大幅降低。同时也会引起围岩中的应力集中,导致最大主应力增加,对围岩造成 1 次负向扰动。若不及时支护,莫尔圆将与强度包络线相割(II)。通过施加锚杆(索)等措施进行支护,可提高围岩的黏聚力和内摩擦角;同时预应力补偿效应可以在一定程度上使最小主应力增加、最大主应力降低<sup>[25-26]</sup>,对围岩造成 1 次正向补偿,此时莫尔圆处于强度包络线下方(III)。

超前工作面阶段(图 8b):在超前工作面对巷段实施预裂爆破实现主动卸压调控,围岩最大主应力与最小主应力同步减小,对围岩造成 1 次正向补偿,莫尔圆向远离强度包络线方向移动(IV);在超前应

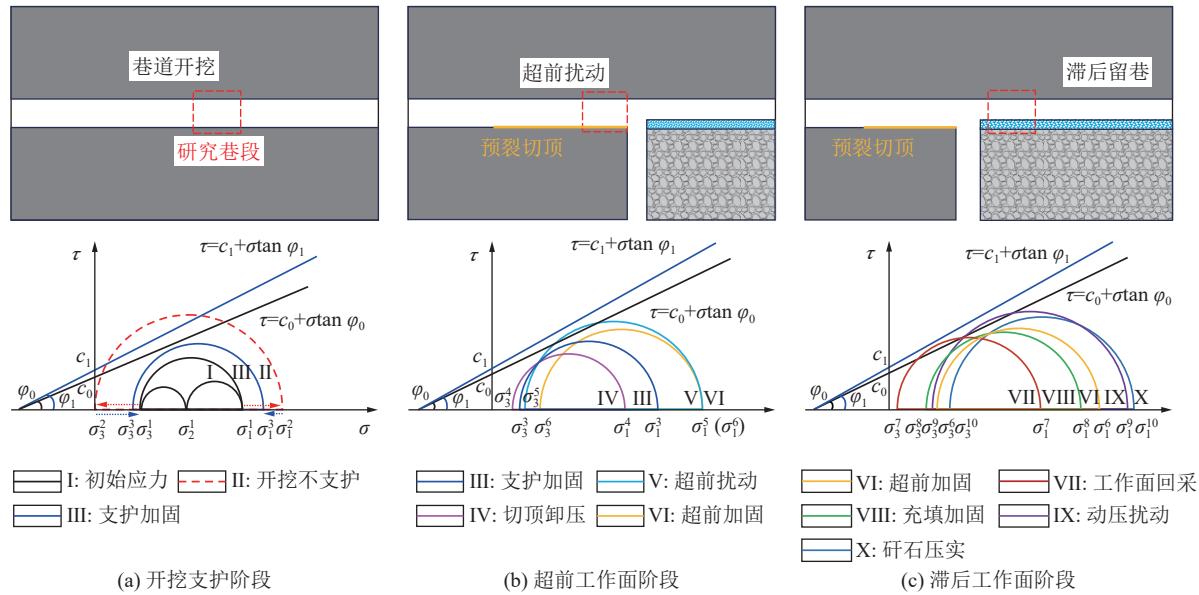


图8 切顶充填沿空留巷围岩应力状态演化分析

Fig.8 Analysis of stress state evolution of surrounding rock in GER-RCRF

力影响范围内,最大主应力和最小主应力同步增加,对围岩造成1次负向扰动,但预裂切顶可有效降低顶板的应力传递强度,此时莫尔圆与第1条强度包络线相隔,但与第2条包络线相离(V);通过巷内临时支护的应力补偿,促使最小主应力增大,对围岩造成1次正向补偿,使莫尔圆向远离强度包络线方向移动(VI),围岩逐步恢复稳定。

滞后工作面阶段(图8c):巷段回采后,开采卸压使沿空留巷围岩的最大主应力和最小主应力大幅降低,对围岩造成1次负向扰动,莫尔圆向靠近强度包络线方向移动(VII);通过在巷道内布置液压单体和柔模充填浇筑,可以实现对围岩的应力补偿,促使最大主应力与最小主应力增大,对围岩造成1次正向补偿,使莫尔圆向远离强度包络线方向移动(VIII);随着巷段远离工作面,覆岩高位岩层逐步垮落,围岩应力集中加剧导致巷道顶板弯曲下沉,对围岩造成1次负向扰动,莫尔圆向靠近强度包络线方向移动(IX);受制于顶板应力传递路径被切断及采场垮落矸石对巷段顶板的支撑作用,有效分担了支护体受力,对围岩造成1次正向补偿,莫尔圆向远离强度包络线方向移动(X)。

#### 4 巷旁充填沿空留巷切顶卸压效应分析

##### 4.1 切顶高度理论分析

切顶高度是指切缝钻孔的最大垂直高度处切断的岩体层位,其应大于采场顶板的初始垮落高度<sup>[22]</sup>,即基于垮落矸石初始碎胀系数计算的高度。对于厚煤层综放开采工作面,基于采场垮落矸石的初始碎

胀系数,同时考虑煤层回采率的切顶高度计算式为

$$L = \frac{(M_c + M_t)c - S_r}{K_e - 1} \quad (10)$$

式中:  $M_c$  为煤层回采厚度, m;  $M_t$  为顶煤厚度, m;  $c$  为煤层采出率;  $K_e$  为碎胀系数;  $S_r$  为沿空留巷切顶高度上方顶板的弯曲下沉量, m。

当切顶高度满足式(10)时,采空区顶板初始垮落碎胀后可有效充填采空区,并对上覆岩层起到支撑作用,减小采动应力对留巷围岩的扰动强度;然而在矸石被压实的过程中,矸石碎胀系数不断减小,采场覆岩不断从高处垮落。当顶板赋存有坚硬和高承载能力的岩层时,岩层以块状形式破断并相互形成咬合关系,在破断前后坚硬岩层均作为承载岩层,对覆岩载荷起主要支撑作用<sup>[34]</sup>,但是在采场矸石不断压实过程中,该岩层的弯曲下沉会加剧围岩变形。因此,切顶高度的确定还需结合坚硬岩层赋存位置进行修正。

当坚硬岩层位于切顶高度范围内时,预裂切顶可以切断坚硬岩层,此时切顶高度以初始碎胀高度确定,如图9a所示。当坚硬岩层位于切顶高度之上时,则需考虑坚硬岩层与初始碎胀高度的位置关系。若距离切顶高度较近,其破断后的弯曲下沉对围岩稳定性影响较大,切顶高度应给予坚硬岩层位置进行修正,如图9b所示。若距离切顶高度较远,则坚硬岩层起到承载层作用,可以减小沿空留巷围岩受力,则切顶高度以初始碎胀高度确定,如图9c所示。

根据现场工程地质条件,  $M_c=3.3$  m,  $M_t=3.3$  m,  $c=93\%$ ,  $K_e=1.25$ , 为了最大程度减小覆岩的弯曲下沉,  $S_r$  取 0, 根据式(10)可知, 基于初始碎胀系数的切顶高

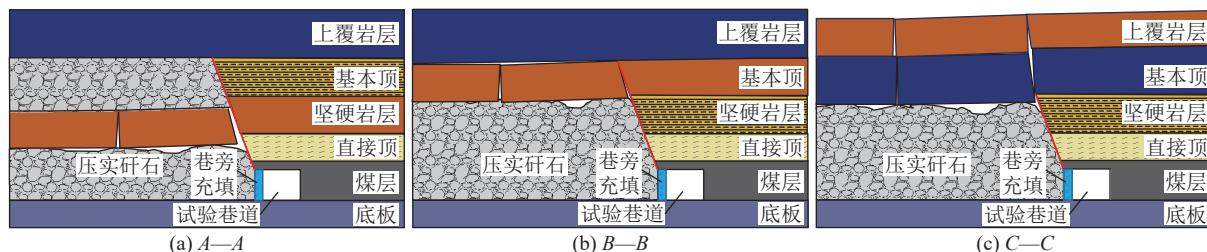


图 9 基于坚硬岩层位置的切顶高度修正示意  
Fig.9 Schematic of roof cutting height correction based on key layer position

度为 22.32 m。切顶层位位于中粒砂岩中部,且不能完全切断该中粒砂岩层,同时距上覆由中粒砂岩、细粒砂岩和砂质泥岩组成的复合岩层间隔仅为 3.0 m。所以应根据坚硬岩层修正原则对切顶高度进行修正,即切顶至厚度为 1.0 m 的细粒砂岩,此时切顶高度修正为 31.3 m。在现场应用时,综合已有厚煤层切顶角度研究成果<sup>[35-36]</sup>及针对潞安矿区的案例研究<sup>[37-38]</sup>,将切顶角度统一确定为 15°,所以基于初始碎胀原则的预裂爆破孔计算深度为 23.1 m,而基于坚硬岩层修正原则的预裂爆破孔计算深度为 32.4 m。

#### 4.2 模型建立

根据 N3-13 工作面地质条件,利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立长为 200 m,高度为 90 m,宽度为 1 m 的数值模型,模型倾向由 N3-13 工作面的一半,N3-15 工作面的一部分和中间的沿空留巷组成,竖向由不同岩层与上下位岩层组成。为了模拟上覆岩层自重,在模型顶部施加 10.8 MPa 的竖向应力,根据地应力测试结果,水平应力系数为 1.0。模型底部固定,四周限制水平移动,数值模型如图 10 所示。在模拟过程中,岩层和巷旁充填体采用弹塑性的 Mohr-Coulomb 本构模型,巷旁充填体宽度为 1.5 m,工作面回采后,采空区选用极软的弹性材料填充,以模拟垮落矸石对顶板的支护效果,弹性材料的杨氏模量为 190 MPa,泊松比为 0.25<sup>[39-40]</sup>。模型中的切顶高度统一取整数,即分别对不切顶、基于初始碎胀原则计算的切顶高度 23 m 和基于坚硬岩层修正原则计算的切顶高度 32 m 时的切顶效果进行研究。根据地质勘察报告与

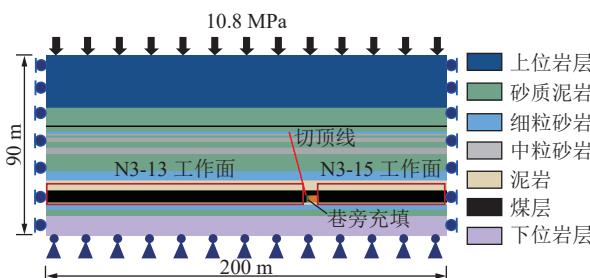


图 10 数值分析模型示意  
Fig.10 Schematic of numerical analysis model

室内岩石力学试验测试结果,模型中各岩层的物理力学参数见表 1。

表 1 模拟岩层主要物理力学参数  
Table 1 Main mechanical parameters of physical model strata

岩性	容重/ (kg·m <sup>-3</sup> )	体积 模量/GPa	剪切 模量/GPa	抗拉 强度/MPa	黏聚 力/MPa	内摩 擦角/(°)
上位岩层	2 500	7.5	5.7	0.80	1.80	24
中粒砂岩	2 700	9.7	7.2	0.90	2.60	30
细粒砂岩	2 650	8.5	6.8	1.05	2.30	32
砂质泥岩	2 100	6.3	4.5	0.70	1.70	26
3号煤层	1 380	2.4	1.3	0.32	1.35	21
泥岩	1 700	4.7	3.4	0.54	1.42	23
下位岩层	2 500	5.4	4.2	0.70	1.80	30
巷旁充填	2 600	9.4	7.3	1.78	3.50	42

#### 4.3 卸压效果分析

不同切顶高度下,卸压效果的应力云图如图 11 所示。当切顶高度为 0(即未切顶原始状态)时,巷道实体煤帮应力集中区域与煤帮距离仅为 6.7 m,应力峰值为 33.10 MPa,巷道顶板低应力区域发育高度仅为 6.5 m;当切顶高度为 23 m 时,巷道实体煤侧应力集中区域向煤体深部转移,应力峰值与煤帮水平距离为 17.2 m,应力集中区域增加,但应力集中峰值减小,为 27.76 MPa,顶板的低应力区高度增加,达 25.7 m;当切顶高度为 32 m 时,实体煤帮侧应力集中区域进一步向煤体深部转移,应力峰值与煤帮水平距离为 21.6 m,应力集中峰值进一步降低,为 24.52 MPa,巷道顶板的低应力区域进一步增加,达到 35.6 m。

提取巷道实体煤帮和巷旁充填体中部倾向的垂直应力值,应力分布特征曲线如图 12 所示。

当切顶高度为 0 时,实体煤帮和充填体内部应力呈“单峰”分布,实体煤帮应力峰值为 30.45 MPa,距煤帮距离 8 m,充填体内部应力峰值为 28.03 MPa。当切顶充填沿空留巷时,预裂切顶通过切断顶板连

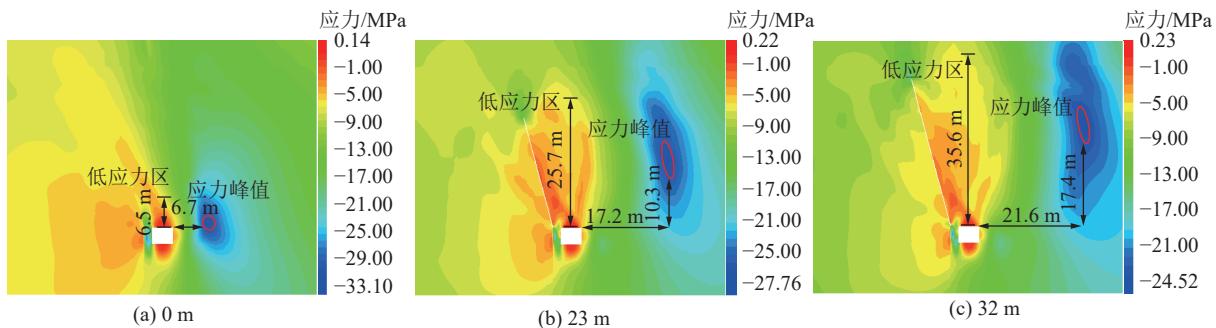


图 11 不同切顶高度卸压效果分析  
Fig.11 Analysis of pressure relief effect of different roof cutting height

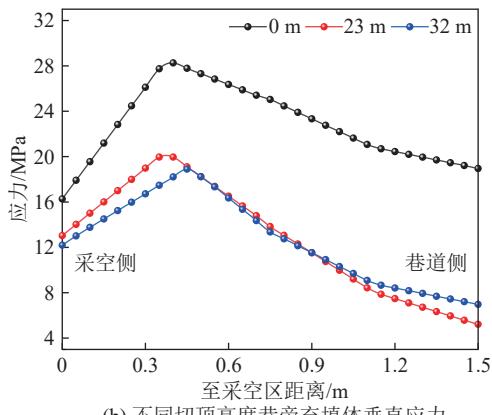
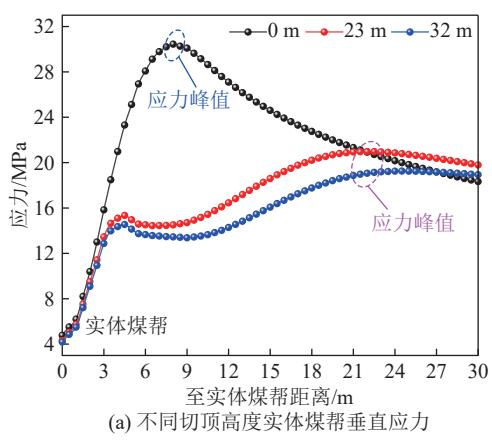


图 12 不同切顶高度两帮围岩垂直应力变化曲线  
Fig.12 Vertical stress variation curves of surrounding rock with different roof cutting heights

续性,将长悬臂梁转化为短悬臂梁结构,显著降低弯矩并使覆岩荷载向深部转移;协同巷旁充填体的高强度支撑作用,驱动集中应力向煤岩体深部扩散。上述机制促使实体煤帮应力集中区由单峰分化为双峰分布:近巷道侧形成残余应力峰,深部岩体则承接转移应力峰。这种“双峰”分布不仅意味着应力峰值大幅降低并向煤岩体深部转移,也表明预裂切顶有效协调了深部煤岩体的协同承载。当切顶高度为32 m时,实体煤帮和巷旁充填体的应力相较于切顶

高度为23 m时有所降低,但降低幅度相对较小。

综合分析表明,预裂切顶后,沿空留巷围岩应力大幅降低,卸压区域增加。该现象归因于预裂切顶后,采场覆岩沿预裂切顶线与切顶线的延伸方向破断下沉,应力传递路径被切断,从而使巷旁充填体与实体煤帮应力大幅减小。实体煤帮应力峰值由“单峰”分布转变为“双峰”分布,应力峰值向煤岩体深部转移距离达原始位置深度的222.38%(绝对位移增量14.9 m),这是由于预裂切顶影响,沿空留巷实体煤帮的覆岩破断线向煤岩体深部转移,进而导致应力峰值向远离巷道方向移动。

## 5 切顶卸压效果现场试验分析

### 5.1 现场切顶试验方案

为了进一步对比分析基于矸石初始碎胀原则与坚硬岩层修正原则的切顶高度对沿空留巷效果的影响,在现场设置试验段切顶高度分别为0、23和32 m的沿空留巷效果进行对比分析,试验段长度为500 m,剩余工作面回采过程中的切顶高度为32 m,不同切顶高度试验段示意如图13所示。

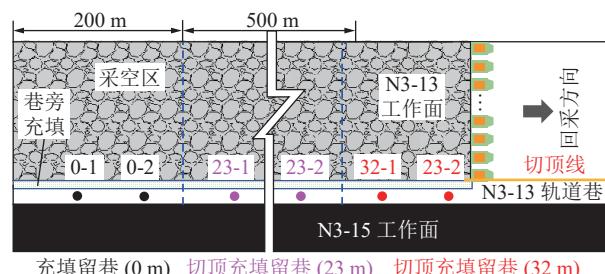


图 13 不同切顶高度试验段示意  
Fig.13 Schematic of test section with different roof cutting heights

在深孔爆破中,封泥长度不应小于孔深的三分之一<sup>[41]</sup>,当切顶高度为23 m时,装药长度为15 m,封泥长度为8 m,可切断切顶高度范围内的坚硬岩层。

当切顶高度为32 m时,封泥长度不小于10.66 m,即不能切断距巷道顶板较近的细粒砂岩,所以现场采用高-低位协同聚能爆破技术,利用高位聚能爆破切断层位较高的坚硬岩层,利用低位聚能爆破切断低位坚硬岩层。

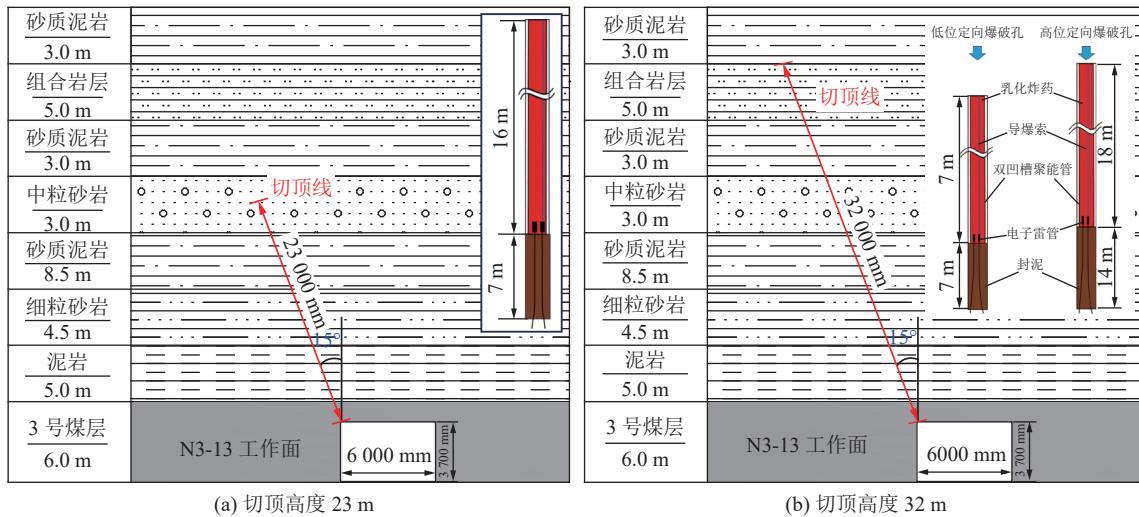


图 14 不同切顶高度及装药方式示意

Fig.14 Schematic of charging methods with different roof cutting heights

## 5.2 试验效果分析

为了对比分析不同切顶高度下沿空留巷的应用效果,在不同切顶高度试验段每隔40 m设置1个压力及变形监测测站,每个试验段分别设置5个测站。选取典型的不同切顶高度条件下的巷旁充填体受力如图15所示。

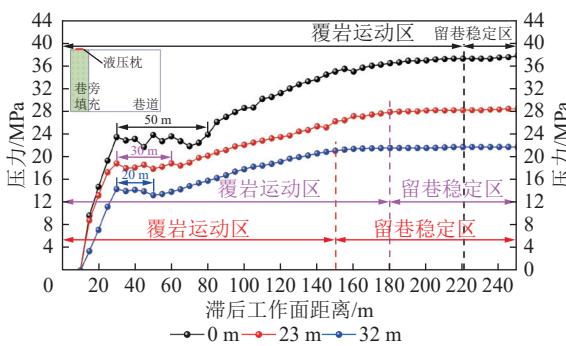


图 15 不同切顶高度巷旁充填体压力曲线

Fig.15 Pressure curves of roadside filling of GER-RCRF with different roof cutting height

随着切顶高度的增加,巷旁充填体压力不断降低,滞后工作面的覆岩运动区长度减小。当不切顶时,巷旁充填体在滞后工作面220 m后受力趋于稳定,稳定压力为38.0 MPa;当切顶高度为23 m时,巷旁充填体在滞后工作面180 m后受力趋于稳定,峰值压力为28.4 MPa;当切顶高度为32 m时,巷旁充

其中高位爆破孔深度为32 m,装药长度为18 m,封泥长度为14 m;低位爆破孔深度为14 m,装药长度为7 m,封泥长度为7 m。高低位爆破孔间隔布置,间距均为1 m。不同切顶高度的切断岩层层位及聚能爆破装药方式如图14所示。

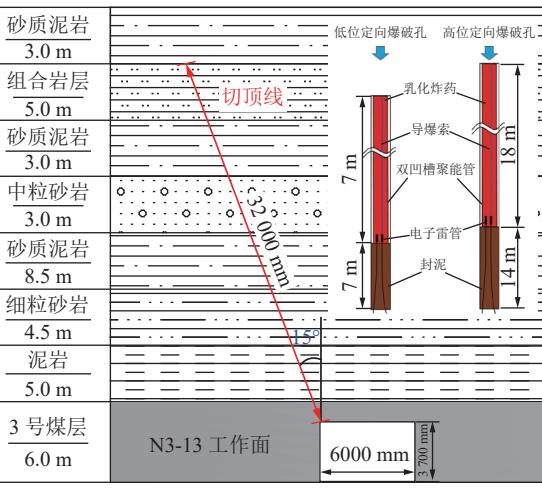


图 14 不同切顶高度及装药方式示意

填体在滞后工作面150 m后受力趋于稳定,峰值压力为22.0 MPa。巷旁充填体受力在滞后工作面25 m处时开始出现波动,且波动段长度随着切顶高度的增加而减小,这主要是在覆岩垮落范围向高位扩展过程中,巷旁充填体对顶板的剪切破断作用导致的。

在工作面回采期间,对不同切顶高度试验段的沿空留巷围岩变形进行监测,每个试验段选取2个测站的数据进行分析,围岩变形监测曲线如图16所示。

不同切顶高度沿空留巷过程中,顶底板移近量最大,两帮缩近量较小,且随着切顶高度的增加,围岩变形量减小,滞后工作面的覆岩运动区长度减小。当切顶高度为0时,围岩顶底板移近量约为850 mm,两帮缩进量约为670 mm,且在滞后工作面220 m后趋于稳定,局部区域充填体压溃,顶板网兜现象严重。

当切顶高度为23 m时,围岩顶底板移近量约为575 mm,两帮缩近量约为365 mm,且在滞后工作面185 m后,围岩变形趋于稳定,较不切顶时的围岩变形量大幅降低,但仍有部分区域行人不能直立通行;当切顶高度为32 m时,围岩顶底板移近量约为280 mm,两帮缩近量约为220 mm,且在滞后工作面150 m后,围岩变形趋于稳定,巷内液压单体回撤后,留巷效果良好。不同试验段围岩变形稳定后的变形情况如图17所示。

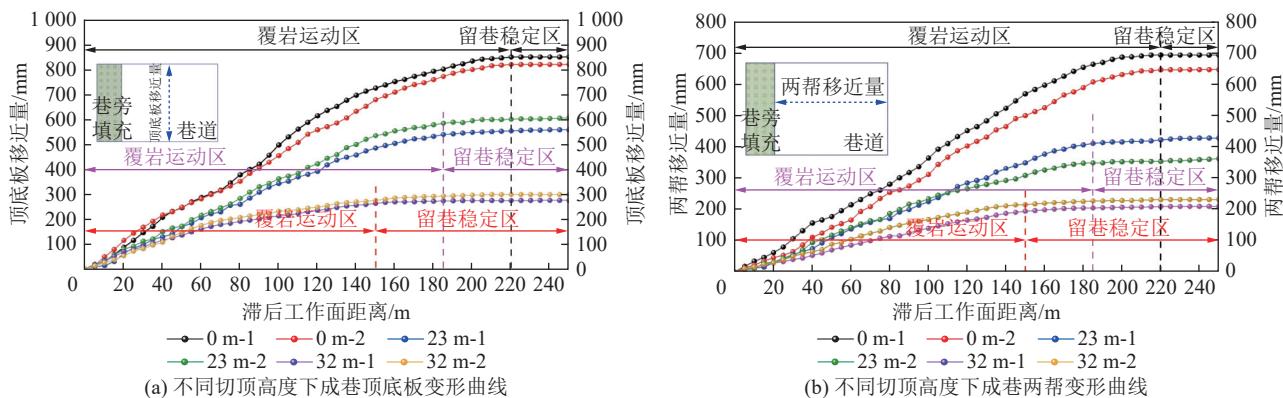


图 16 切顶充填沿空留巷不同切顶高度围岩变形曲线

Fig.16 Deformation curves of surrounding rock of GER-RCRF with different roof cutting heights

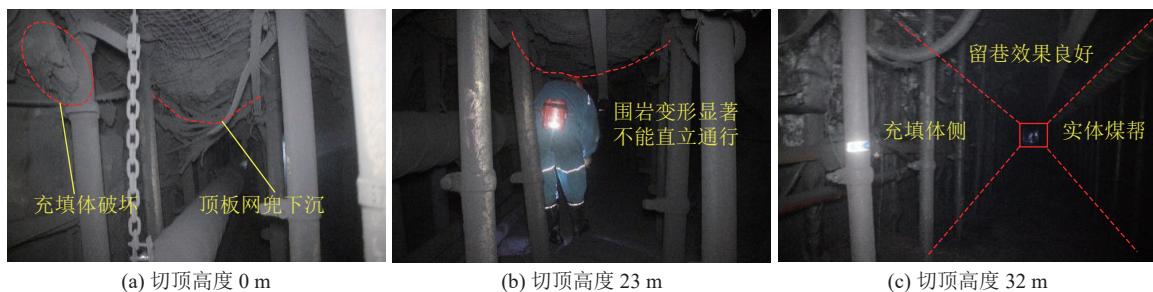


图 17 不同切顶高度现场试验效果

Fig.17 Field experiment effect with different roof cutting height

## 6 结 论

1) 厚煤层充填沿空留巷面临围岩大变形控制难题: 覆岩动态演化引发外伸悬臂梁结构回转下沉, 导致支护体失效; 煤层厚度增加致使覆岩垮落高度增大, 悬臂梁触研距离增大并伴随弯曲下沉非线性攀升, 迫使支护强度与充填宽度持续增加, 显著抬升留巷成本并加剧安全风险。

2) “切顶+充填”协同作用是保障厚煤层沿空留巷围岩稳定的核心机制: 通过预裂切顶可以将外伸长悬臂梁结构改为切顶短悬臂梁结构, 巷旁充填体可以为切顶短悬臂梁的悬臂端提供高强度支撑阻力, 两者的组合作用既可以实现沿空留巷围岩卸压并降低巷旁支护强度, 又可以减小围岩变形。

3) 在厚煤层沿空留巷过程中, 切顶高度需综合垮落研石初始碎胀原则与坚硬岩层修正原则综合确定: 切断距离应靠近基于初始碎胀原则确定的高度范围, 同时定向聚能爆破切断该范围内所有坚硬岩层。

4) 数值模拟结果进一步表明, 随着切顶高度的增加, 沿空留巷顶板的低应力区域高度增加; 实体煤帮和充填体内部的应力集中峰值降低, 实体煤帮内部的应力分布由“单峰”转变为“双峰”, 且应力峰值

向煤岩体深部转移距离达原始位置深度的 222.38%。

5) 现场试验表明, 随着切顶高度的增加, 巷旁充填体受力明显降低, 围岩变形量及覆岩运动区的影响周期减小。这为后续沿空留巷技术在厚煤层中的应用和稳定性控制提供了借鉴意义。

6) 需要指出, 本研究聚焦首次采动影响下沿空留巷的围岩结构演化与卸压机制。鉴于留巷成功的关键在于其能否承受两次采动影响, 且二次采动的高应力扰动与剧烈破坏直接决定留巷最终成败, 本研究结论仅适用于首次采动阶段。需强调的是, 首次采动后巷道状态(围岩损伤、应力分布、支护完整性)构成二次采动响应的初始条件, 其研究是预测与控制二次采动影响的基础。后续研究拟通过数值模拟、力学模型构建及现场试验相结合的方法, 系统揭示二次采动下厚煤层沿空留巷围岩变形机理与应力场演化规律, 并重点评估切顶充填技术的防控效能。

### 参考文献(References):

- [1] WANG J H. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 253-260.
- [2] 王家臣. 我国综放开采技术及其深层次发展问题的探讨[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(1): 14-17.

- WANG Jiachen. Fully mechanized longwall top coal caving technology in China and discussion on issues of further development[J]. *Coal Science and Technology*, 2005, 33(1): 14–17.
- [3] 何满潮, 王亚军, 杨军, 等. 切顶成巷工作面矿压分区特征及其影响因素分析[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(6): 1157–1165.
- HE Manchao, WANG Yajun, YANG Jun, et al. Zonal characteristics and its influence factors of working face pressure using roof cutting and pressure-relief mining method with no pillar and roadway formed automatically[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(6): 1157–1165.
- [4] 强辉. 我国井工煤矿资源损失特点及提高措施探析[J]. *煤炭工程*, 2012, 44(1): 133–135.
- QIANG Hui. Analysis on coal resources lost features of underground mine and improvement measures in China[J]. *Coal Engineering*, 2012, 44(1): 133–135.
- [5] CHEN Y, MA S Q, YU Y. Stability control of underground roadways subjected to stresses caused by extraction of a 10-m-thick coal seam: A case study[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(9): 2511–2520.
- [6] 华心祝. 我国沿空留巷支护技术发展现状及改进建议[J]. *煤炭科学技术*, 2006, 34(12): 78–81.
- HUA Xinzhu. Development status and improved proposals on gob-side entry retaining support technology in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2006, 34(12): 78–81.
- [7] 何满潮, 马资敏, 郭志飚, 等. 深部中厚煤层切顶留巷关键技术参数研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 468–477.
- HE Manchao, MA Zimin, GUO Zhibiao, et al. Key parameters of the gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure release in deep medium-thickness coal seams[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(3): 468–477.
- [8] 邓雪杰, 董超伟, 袁宗萱, 等. 深部充填沿空留巷巷旁支护体变形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 62–72.
- DENG Xuejie, DONG Chaowei, YUAN Zongxuan, et al. Deformation behavior of gob-side filling body of gob-side retaining entry in the deep backfilling workface[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(1): 62–72.
- [9] 王俊峰, 王恩, 陈冬冬, 等. 窄柔模墙体沿空留巷围岩偏应力演化与控制[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(4): 1220–1231.
- WANG Junfeng, WANG En, CHEN Dongdong, et al. Evolution of deviatoric stress and control of surrounding rock at gob-side entry retaining with narrow flexible-formwork wall[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(4): 1220–1231.
- [10] 王平, 曾梓龙, 孙广京, 等. 深井研石充填工作面沿空留巷围岩控制原理与技术[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 68–76.
- WANG Ping, ZENG Zilong, SUN Guangjing, et al. Principle and technology of surrounding rock control for gob-side entry retaining in deep mine gangue backfilling face[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 68–76.
- [11] 柏建彪, 张自政, 王襄禹, 等. 高水材料充填沿空留巷应力控制与围岩强化机理及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 16–28.
- BAI Jianbiao, ZHANG Zizheng, WANG Xiangyu, et al. Stress control and surrounding rock strengthening mechanism of gob-side entry retaining with high-water content material filling and its application[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 16–28.
- [12] 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.
- [13] 龚鹏, 马占国, 和泽欣, 等. 砧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 Zanguo, 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.
- [14] 刘贞智, 刘萍, 罗畅, 等. 沿空留巷巷旁复合充填体分层材料优选研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(10): 21–32.
- LIU Zhenzhi, LIU Ping, LUO Chang, et al. Optimization analysis of layered materials of composite filling body beside gob-side entry retaining[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(10): 21–32.
- [15] 刘子璐. 综放面沿空留巷非连续巷旁支护围岩变形机理及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2024.
- LIU Zilu. Deformation mechanism and application of surrounding rock of discontinuous roadway retaining along goaf in fully mechanized top-coal caving face[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [16] 何满潮, 陈上元, 郭志飚, 等. 切顶卸压沿空留巷围岩结构控制及其工程应用[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 959–969.
- HE Manchao, CHEN Shangyuan, GUO Zhibiao, et al. Control of surrounding rock structure for gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure and its engineering application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(5): 959–969.
- [17] 孙晓明, 刘鑫, 梁广峰, 等. 薄煤层切顶卸压沿空留巷关键参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(7): 1449–1456.
- SUN Xiaoming, LIU Xin, LIANG Guangfeng, et al. Key parameters of gob-side entry retaining formed by roof cut and pressure releasing in thin coal seams[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(7): 1449–1456.
- [18] MA Z M, WANG J, HE M C, et al. Key technologies and application test of an innovative noncoal pillar mining approach: A case study[J]. *Energies*, 2018, 11(10): 2853.
- [19] 郭志飚, 王将, 曹天培, 等. 薄煤层切顶卸压自动成巷关键参数研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 879–885.
- GUO Zhibiao, WANG Jiang, CAO Tianpei, et al. Research on key parameters of gob-side entry retaining automatically formed by roof cutting and pressure release in thin coal seam mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(5): 879–885.

- [20] WANG Q, JIANG Z H, JIANG B, et al. Research on an automatic roadway formation method in deep mining areas by roof cutting with high-strength bolt-grouting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 128: 104264.
- [21] 赵善坤, 苏振国, 侯煜坤, 等. 采动巷道矿压显现特征及力构协同防控技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 61–71.
- ZHAO Shankun, SU Zhenguo, HOU Yukun, et al. Study on mine pressure characteristics and force-structure cooperative prevention and control on mining roadway with deep thick hard roof[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 61–71.
- [22] 赵善坤. 深孔顶板预裂爆破力构协同防冲机理及工程实践[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3419–3432.
- ZHAO Shankun. Mechanism and application of force-structure cooperative prevention and control on rockburst with deep hole roof pre-blasting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3419–3432.
- [23] 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.
- [24] 王琦, 何满潮, 王允偲, 等. 切顶卸压无煤柱自成巷研究进展与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3): 429–447.
- WANG Qi, HE Manchao, WANG Yuncai, et al. Research progress and prospect of automatically formed roadway by roof cutting and pressure relief without pillars[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(3): 429–447.
- [25] 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 Xinzhu. 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.
- [26] 刘忠平. 深井厚煤层柔模泵注混凝土沿空留巷技术应用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- LIU Zhongping. Application research on pumped-concret support based on flexible formwork of gob-side entry retaining in deep mine and thick coal seam[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [27] WILSON A H. The stability of underground workings in the soft rocks of the coal measures[J]. *International Journal of Mining Engineering*, 1983, 1(2): 91–187.
- [28] 程欢, 王方田. 煤与瓦斯突出矿井沿空留巷技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 5–8, 121.
- CHENG Huan, WANG Fangtian. Study on gob-side entry retaining technology in coal and gas outburst mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(5): 5–8, 121.
- [29] 李晓白, 潘海兵, 石景帅, 等. 6 m 大采高沿空留巷巷旁支护研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(5): 78–81.
- LI Xiaobai, PAN Haibing, SHI Jingshuai, et al. Study on roadside support technology of 6m high cutting working face[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(5): 78–81.
- [30] 李刚, 刘航, 迟国铭, 等. 大柳塔煤矿沿空留巷柔模砼墙支护阻力核定及失稳判据研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(1): 145–155.
- LI Gang, LIU Hang, CHI Guoming, et al. Study on the determination of support resistance and instability criteria for flexible concrete wall support in gob-side entry retaining at Daliuta Coal Mine[J]. *Journal of Mine Automation*, 2025, 51(1): 145–155.
- [31] SUN X M, ZHAO W C, SHEN F X, et al. Study on failure mechanism of deep soft rock roadway and high prestress compensation support countermeasure[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 143: 106857.
- [32] WANG Y J, WANG Q, HE M C, et al. Stress and deformation evolution characteristics of gob-side entry retained by the N00 mining method[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Engineering and Geo-Resources*, 2021, 7(3): 84.
- [33] HE M C, WANG Q. Excavation compensation method and key technology for surrounding rock control[J]. *Engineering Geology*, 2022, 307: 106784.
- [34] 钱鸣高, 许家林, 王家臣, 等. 矿山压力与岩层控制 [M]. 3 版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.
- [35] 刘少伟, 李小鹏, 朱雯清, 等. 沿空留巷密集钻孔切顶机理及关键参数确定方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 23–33.
- LIU Shaowei, LI Xiaopeng, ZHU Wenqing, et al. Roof cutting mechanism of dense drilling in gob-side entry retaining and determination method of key parameters[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(2): 23–33.
- [36] 卜若迪. 厚煤层沿空巷道切顶卸压和锚固协同围岩稳定性控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- BU Ruodi. Study on stability control of surrounding rock by roof cutting, pressure relief and anchoring in roadway along gob in thick seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [37] 郝瑞云. 霍尔辛赫煤矿 3502 工作面切顶卸压与围岩控制技术研究[J]. 中国煤炭, 2024, 50(12): 99–107.
- HAO Ruiyun. Research on the technologies of roof-cutting pressure relief and surrounding rock control in 3502 working face of Huoerxinhe Coal Mine[J]. *China Coal*, 2024, 50(12): 99–107.
- [38] 斯苏平. 厚煤层沿空留巷“煤–支护体”组合承载结构力学特性分析[J]. 能源与环保, 2024, 46(2): 256–261, 268.
- JIN Suping. Mechanical characteristics analysis of combined bearing structure of “coal-supporting body” in gob-side entry retaining of thick coal seam[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2024, 46(2): 256–261, 268.
- [39] JIANG Y D, WANG H W, XUE S, et al. Assessment and mitigation of coal bump risk during extraction of an island longwall panel[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 95: 20–33.
- [40] WANG H W, JIANG Y D, ZHAO Y X, et al. Numerical investigation of the dynamic mechanical state of a coal pillar during longwall mining panel extraction[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(5): 1211–1221.
- [41] 中华人民共和国应急管理部. 国家矿山安全监察局编. 煤矿安全规程—2022[M]. 北京: 应急管理出版社, 2022.