



切顶留巷矸石帮演化过程及侧向压力分析

李子波 张国华 李豫波 秦涛 陈刚 李佳臻 邹军鹏

引用本文:

李子波, 张国华, 李豫波, 等. 切顶留巷矸石帮演化过程及侧向压力分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 23–35.

LI Zibo, ZHANG Guohua, LI Yubo. Evolution process and lateral pressure distribution of gangue side in roof cutting entry retaining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 23–35.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0613>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Stability analysis of inclined coal seam roadway along goaf considering non-uniform filling of gob gangue

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 30–41 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1348>

采空区冒落矸石承压变形特征及侧向压力分布规律研究

Study on bearing deformation characteristics and lateral pressure distribution law of caved gangue in gob

煤炭科学技术. 2023, 51(6): 20–29 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0223>

深井矸石充填工作面沿空留巷围岩控制原理与技术

Principle and technology of surrounding rock control for gob-side entry retaining in deep mine gangue backfilling face

煤炭科学技术. 2022, 50(6): 68–76 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9c1176a8-1efc-48f9-b23f-71843601b9bb>

深井高应力切顶卸压沿空掘巷围岩控制技术

Surrounding rock control technology of gob-side entry driving in deep shaft with high stress roof cutting and pressure relief

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 173–179 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/7f1c5bc1-b5b6-4d42-a6c1-9d46a6abe1aa>

水力压裂切顶卸压技术在大采高留巷中的应用研究

Application & research on hydraulic fracturing and cutting top pressure relief technology in large mining height retained roadway

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a2f7ac20-1809-4163-a987-243486b664dc>

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

李子波, 张国华, 李豫波, 等. 切顶留巷矸石帮演化过程及侧向压力分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(8): 23–35.
LI Zibo, ZHANG Guohua, LI Yubo, *et al.* Evolution process and lateral pressure distribution of gangue side in roof cutting entry retaining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(8): 23–35.

切顶留巷矸石帮演化过程及侧向压力分析

李子波¹, 张国华², 李豫波¹, 秦涛², 陈刚², 李佳臻², 邹军鹏³

(1. 黑龙江科技大学 安全工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 黑龙江科技大学 矿业工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022;

3. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:切顶留巷挡矸支护成功与否取决于矸石帮演化过程及其侧向压力分布。以杏花煤矿为工程背景, 采用室内试验、相似模拟的方法, 分析了矸石压实力学特性、顶板垮落过程及矸石帮演化过程; 通过理论分析建立力学模型, 分析了不同因素对矸石帮侧向压力的影响; 数值模拟给出采空区边界覆岩压力、矸石帮侧向压力分布规律, 从矸石帮侧向压力影响因素角度给出矸石帮挡矸支护方案。研究表明: ①矸石帮侧向压力大小与采空区矸石演化过程相关: 矸石自组织调整阶段, 矸石帮侧向压力主要由矸石自重产生, 侧向压力大小取决于堆积高度; 矸石被动压实阶段, 在顶板周期来压作用下, 矸石体反复被压实, 矸石帮侧向压力逐渐增大; 矸石稳定阶段, 此阶段矸石体被压实, 对覆岩起到明显支撑作用, 覆岩压力趋于稳定值为 3.81 MPa, 矸石帮侧向压力稳定值为 2.12 MPa。②矸石帮侧向压力由巷道顶板位置至底板位置逐渐增大。③从外部环境角度, 矸石帮侧向压力与顶板覆岩压力呈现明显的正相关关系, 与切顶角度呈现明显的负相关关系; 从矸石自身力学性质角度, 矸石帮侧向压力与矸石内摩擦角呈现明显的正相关关系。基于此, 提出“袋+网+U型钢+斜撑单体”挡矸支护方案, 现场应用效果良好。此研究可为类似工程条件挡矸支护提供借鉴与参考。

关键词:沿空留巷; 切顶卸压; 冒落矸石; 矸石帮侧向压力; 采空区

中图分类号: TD322

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)08-0023-13

Evolution process and lateral pressure distribution of gangue side in roof cutting entry retaining

LI Zibo¹, ZHANG Guohua², LI Yubo¹, QIN Tao², CHEN Gang², LI Jiazhen², ZOU Junpeng³

(1. School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China; 2. School of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China; 3. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The success of gangue support in roof cutting and retaining roadway depends on the evolution process of gangue side and its lateral pressure distribution. Based on the engineering background of Xinghua Coal Mine, this paper analyzes the mechanical characteristics of gangue compaction, the roof caving process, and the gangue side evolution process through indoor experiments and similar simulations. The mechanical model is established through theoretical analysis, and the impact of different factors on the lateral pressure of the gangue side is analyzed. The numerical simulation gives the distribution law of the overburden pressure and the lateral pressure of the gangue side at the boundary of the goaf and gives the gangue side support scheme from the perspective of gangue side lateral pressure influencing factors. The research results show that: ①The lateral pressure of the gangue side is related to the evolution process of the gangue in the goaf. In the self-organizing adjustment stage of the gangue, the lateral pressure of the gangue side is mainly generated by the self-weight of the gangue, and the lateral pressure depends on the accumulated height. In the passive compaction stage of gangue, the gangue body is repeatedly compacted under periodic roof pressure, and the lateral pressure of the gangue side gradually increases. In the stable stage of

收稿日期: 2024-04-08 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2024-0613

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774122); 黑龙江省揭榜挂帅科技攻关资助项目(2021ZXJ02A03)

作者简介: 李子波(1995—), 男, 山西长治人, 博士研究生。E-mail: 1345808805@qq.com

通讯作者: 张国华(1971—), 男, 黑龙江讷河人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: zgh710828131@163.com

gangue, the gangue body is compacted at this stage, which plays an obvious supporting role in the overburdened rock. The stable value of the overburden pressure is 3.81 MPa, and the stable value of the gangue side lateral pressure is 2.12 MPa. ②From the position of the roof of the roadway to the position of the floor, the lateral pressure of the gangue side gradually increases. ③From the perspective of the external environment, the lateral pressure of the gangue side has a significant positive correlation with the roof overburden pressure and a significant negative correlation with the roof cutting angle. From the perspective of the gangue's mechanical properties, the gangue side's lateral pressure and the gangue's internal friction angle show a significant positive correlation. Consequently, the “bag + net + u -shaped steel + inclined support monomer” gangue retaining support scheme is proposed, and the field application effect is good. This study may provide a reference for similar engineering conditions of gangue support.

Key words: gob-side entry retaining; roof cutting pressure relief; caving gangue; lateral pressure of gangue side; goaf

0 引言

随着煤炭资源日益紧张,无煤柱开采沿空留巷方式在我国得到广泛应用。传统沿空留巷通过在巷道邻空侧构筑充填墙,在浅埋深、薄及中厚煤层矿井成功应用^[1-3]。随着我国开采深度逐年增加,充填墙在“高地应力+强采动应力”共同作用下,充填墙与巷道顶底板变形不协调,极易引发充填墙失稳、底板鼓起,从而造成留巷失败^[4-6]。鉴于此,我国学者何满潮院士^[7-8]提出切顶自成巷方式,即在留巷侧进行断顶,切断巷道顶板与采空区顶板应力传递路径,利用顶板垮落碎石充填采空区的同时形成巷帮,此技术相比传统沿空留巷,明显改善巷道围岩应力环境、减小施工量,在多数煤矿成功应用并取得良好效果。为进一步丰富切顶自成巷理论体系及应用效果,学者们研究了切顶参数以及矸石帮稳定性对巷道稳定性的影响。在切顶参数方面,袁超峰等^[9]、陈上元等^[10]结合垮落矸石的碎胀性,以垮落矸石能否充满采空区为依据给出切顶高度计算方法;许旭辉等^[11]建立邻空侧顶板结构力学模型,以顶板拉应力是否大于其抗拉强度为依据,给出切顶角度计算方法;郭金刚等^[12]、张国锋等^[13]采用数值模拟的方法,分析了不同切顶参数下巷道围岩应力分布特征,揭示了切顶参数与巷道围岩应力之间关系,进一步验证了切顶参数的合理性,以上研究为切顶参数的选择提供了参考依据。在矸石帮稳定性方面,马资敏等^[14]研究了采动影响下矸石碎胀规律及其力学特性;宋天奇等^[15]研究了工作面走向方向矸石变形特性与碎胀系数之间关系;蒋力帅等^[16]以矸石压实变形为基础,研究了采动应力与矸石变形之间关系;王海龙等^[17]分析了矸石变形对其侧向应力的影响;马新根等^[18]研究了采空区矸石碎胀系数对其侧向压力的影响;以上学者从单一角度研究了采动应力、矸石变形、碎胀系数对矸石帮稳定性的影响。而矸石帮是否稳定取决于采动影响下垮落矸石作用于支护体上的侧向应

力(矸石帮侧向压力),其是覆岩压力、切缝面、矸石自身力学特性共同作用下的结果,有待于系统研究矸石帮侧向压力分布规律及其影响因素之间关系。

在此基础上,以杏花煤矿 54 号右三回采工作面为工程背景,研究了矸石压实力学特性、切顶留巷顶板垮落过程以及矸石帮演化过程,分析不同因素对矸石帮侧向压力的影响,提出挡矸支护方案,评价挡矸支护效果。此研究对切顶留巷挡矸支护具有重要的参考意义。

1 工程背景

1.1 工程概况

54 号右三回采工作面位于鸡西杏花煤矿二水平西三采区,工作面采用走向长壁综合机械化采煤法,全部垮落法管理顶板。工作面上为 54 号右三回风巷、下为 54 号右三运输巷,右为终采线,走向长度 583 m,倾向长度 143 m,埋深 $H=722 \sim 787$ m,倾角 $1^\circ \sim 4^\circ$,平均倾角 2° ,煤层平均厚度 2.98 m。54 号右三运输巷采用切顶留巷方式进行留巷,作为 54 号右四工作面回风巷使用,巷道断面为矩形,巷道采用锚网索联合支护,断面尺寸为 $3.8 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$ 。巷道布置如图 1 所示。

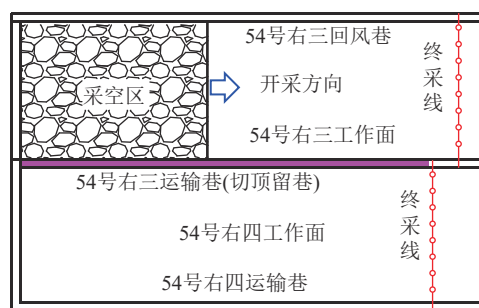


图 1 巷道布置

Fig.1 Roadway layout diagram

54 号煤层结构复杂,主要以光亮型煤为主。该工作面直接顶为厚 3.24 m 的细砂岩和厚 2.70 m 的粉砂岩,基本顶为厚 12.7 m 的中砂岩,直接底为厚 4.8 m

的中砂岩,顶底板岩性柱状如图2所示。结合实验室力学参数测定,基本顶中砂岩单轴抗压强度为65.7 MPa,抗拉强度为7.2 MPa,弹性模量为20.3 GPa,可知基本顶强度高、抵抗变形能力强。

序号	厚度/m	柱状	岩性	岩性描述
1	5.6		中砂岩	灰白色,水平层理
2	9.2		粉砂岩	深灰色,无层理
3	4.0		细砂岩	灰色,水平层理
4	12.7		中砂岩	灰白色,水平层理
5	2.70		粉砂岩	深灰色,无层理
6	3.24		细砂岩	灰色,水平层理
7	2.98		54号煤	光亮型,半光亮型
8	4.8		中砂岩	灰白色,水平层理
9	5.2		粉砂岩	深灰色,无层理
10	4.0		中砂岩	灰白色,水平层理
11	0.7		页岩	深灰色,含少量煤
12	1.30		55号煤	光亮型
13	2.3		细砂岩	灰色,水平层理

图2 顶底板岩性柱状图

Fig.2 Roof and floor lithology histogram

1.2 切顶必要性分析

切顶留巷根本目的在于卸压,其关键在于切断巷道顶板和采空区顶板力学联系。由于此工作面直接顶为细砂岩和粉砂岩,总厚度 $\sum h=5.94$ m,工作面平均采高 M 为2.98 m,现场经验可知碎胀系数 K 取1.3,即 $\sum h < M/(K-1)$,可知工作面回采后直接顶不能充满采空区,垮落矸石对基本顶起不到有效支撑作用,巷道顶板会出现向采空区侧倾斜下沉加剧巷道变形失稳。同时由于基本顶单轴抗压强度大(65.7 MPa)、弹性模量大(20.3 GPa)、整体性强,且留巷邻空侧顶板容易发生破断,若顶板断裂位置位于实体煤上方或巷道上方,对留巷维护极为不利。

若采取人为切顶措施,可使部分基本顶沿切缝面切落,可以避免基本顶在巷道上方或实体煤上方断裂,同时可以保证顶板垮落矸石能够充满采空区,对上覆岩层起到支撑作用,降低巷道顶板应力及实体煤应力,优化巷道围岩应力环境,从而提高留巷安全性。

1.3 切顶关键参数分析

切顶卸压效果取决于切顶参数,切顶参数主要包括切顶高度和切顶角度。优化切顶参数,可以适当调节矿山压力分布,使留巷处于低应力区。切顶

高度和切顶角度^[12]计算分别如式(1)和式(2)所示。

$$H_m = \frac{M}{(K-1)\cos\phi} \quad (1)$$

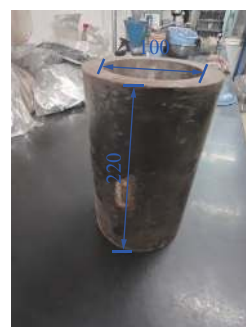
其中: M 为煤层厚度,m; K 为岩石碎胀系数; ϕ 为煤层倾角,(°)。依据实际工况, ϕ 取2°,采高 M 取2.98 m, K 取1.3,代入式(1)可得: H_m 取值为9.94 m。为便于施工,切顶高度取值为10 m。由于直接顶总厚度为5.94 m,故还需切断4.06 m基本顶。

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{(L_R - H_R)}{M} \quad (2)$$

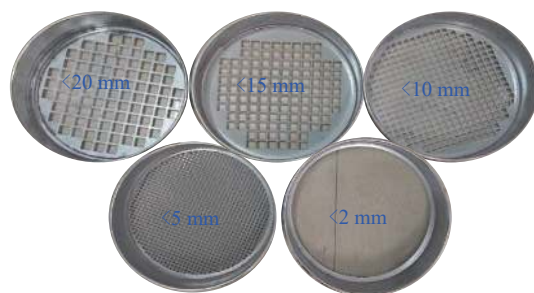
式中: L_R 为周期来压步距,m; H_R 为基本顶厚度,m。依据现场经验, L_R 取23.8 m, H_R 取12.7 m,可知切顶角度为15°。

2 矸石压实力学特性

采空区垮落矸石受采动影响会重新压实,考虑到矸石由细砂岩、粉砂岩、中砂岩组成。为此,本节采用钢筒对3种岩性矸石进行侧限压缩试验,钢筒内径为100 mm、高度为220 mm,依据试验要求,选取矸石最大粒径为20 mm,即选取粒径0~20 mm矸石进行试验,钢筒及矸石筛如图3所示。



(a) 矸石压缩钢筒



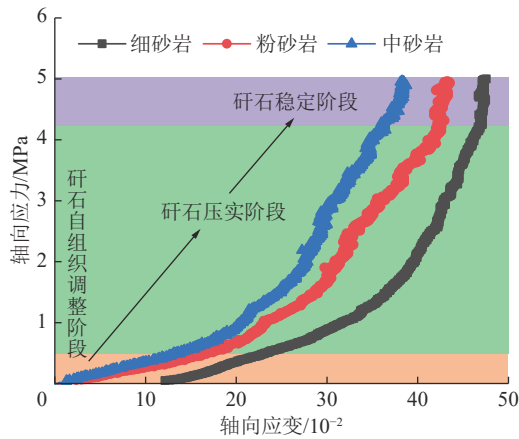
(b) 矸石筛

图3 侧限压缩钢筒及矸石筛

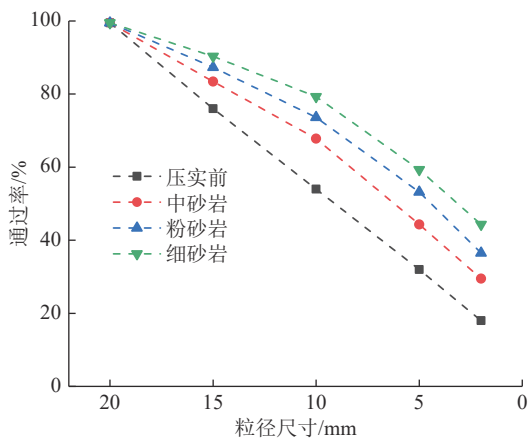
Fig.3 Side limited compression steel cylinder and gangue sieve

为分析压实过程中粒径尺寸变化特征,采用矸石筛对压实前后粒径进行划分。矸石压实应力-应变关系及压实前后粒径变化特征如图4所示。

由图4a可知,矸石自组织调整阶段,破碎矸石



(a) 矽石压实应力-应变曲线



(b) 矽石压实前后粒径分布

图4 矽石压实应力-应变关系及压实前后粒径变化

Fig.4 Compaction stress-strain relationship of gangue and particle size change before and after compaction

近似自然堆积状态,孔隙率高,此阶段应力-应变曲线近似线性关系;矽石压实阶段,矽石颗粒充分接触,孔隙率低,此阶段应力-应变曲线近似指数型关系;矽石稳定阶段,结构基本达到稳定,随应力增大,变形量增加缓慢;轴向应力 5 MPa 时,细砂岩、粉砂岩、中砂岩最大应变分别为 0.475、0.433、0.383,矽石变形能力比较稳定。

由图 4b 可知,矽石压实后通过率明显大于压实前,说明矽石压实过程中颗粒发生破碎,小颗粒数量增加;矽石通过率由大到小依次为:细砂岩、粉砂岩、中砂岩,最大应变由大到小依次为:细砂岩、粉砂岩、中砂岩,说明矽石变形量、破碎程度与岩石强度有关,结合表 1 单轴抗压强度由大到小依次为:中砂岩、粉砂岩、细砂岩,得到抗压强度越小,矽石变形量、破碎程度越大。

3 切顶留巷矽石帮演化特征

巷道邻空侧切顶后,在垮落矽石充填采空区的

表 1 煤岩层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal strata

岩性	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
中砂岩	2 530	65.7	20.3	3.92	42
粉砂岩	2 630	43.2	15.6	3.15	35
细砂岩	2 580	38.5	14.6	2.67	32
中砂岩	2 530	65.7	20.3	3.92	42
粉砂岩	2 630	43.2	15.6	3.15	35
细砂岩	2 580	38.5	14.6	2.67	32
54号煤	1 480	14.3	10.5	1.85	25
中砂岩	2 530	65.7	20.3	3.92	42
粉砂岩	2 630	43.2	15.6	3.15	35
中砂岩	2 530	65.7	20.3	3.92	42
页岩	2 430	23.4	11.3	2.13	28
55号煤	1 480	14.3	10.5	1.85	25
细砂岩	2 580	38.5	14.6	2.67	32

同时形成巷道矽石帮。本节通过切顶留巷相似模拟试验,分析顶板垮落过程及矽石堆积过程。

3.1 相似比例及配比方案确定

根据现场地质条件,采用黑龙江省普通高等学校采矿工程重点实验室的二维实验台,该实验台尺寸为长 100 cm、宽 20 cm、高 100 cm。杏花煤矿煤岩层力学参数见表 1。

采用平面应力模型,并确保实验符合以下相似准则。长度相似比、容重相似比、应力相似比、时间相似比分别如式(3)、(4)、(5)、(6)所示。

$$c_l = \frac{c_m}{c_h} = \frac{1}{100} \quad (3)$$

式中: c_l 为长度相似比; c_m 、 c_h 分别为相似模型、地质原型尺寸, m。

$$c_\gamma = \frac{\gamma_m}{\gamma_h} = \frac{1.70}{2.5} = 0.68 \quad (4)$$

式中: c_γ 为容重相似比; γ_m 、 γ_h 分别为模型、原型容重, kN/m^3 。

$$c_p = \frac{\sigma_m}{\sigma_h} = c_l c_\gamma = 0.0068 \quad (5)$$

式中: c_p 为长度相似比; σ_m 、 σ_h 分别为模型、原型应力, MPa。

$$c_t = \sqrt{c_l} = 0.1 \quad (6)$$

式中: c_t 为时间相似比。

依据相似比例确定材料配比方案。相似模型中以砂子为骨料,碳酸钙、石膏为胶结料。相似模型用料见表 2。

表2 相似模型配比方案
Table 2 Similar model matching scheme

岩性	厚度/cm	材料质量/kg			
		砂子	碳酸钙	石膏	水
中砂岩	5.6	17.08	0.53	1.33	1.84
粉砂岩	9.2	28.06	0.87	2.18	3.03
细砂岩	4.0	12.20	0.38	0.95	1.32
中砂岩	12.7	38.73	1.20	3.02	4.19
粉砂岩	2.7	8.23	0.25	0.64	0.89
细砂岩	3.2	9.76	0.30	0.76	1.05
54号煤	3.0	9.15	0.28	0.71	0.99
中砂岩	4.8	14.60	0.45	1.14	1.58
粉砂岩	5.2	15.80	0.49	1.23	1.71
中砂岩	4.0	12.20	0.38	0.95	1.32
页岩	0.7	2.13	0.06	0.16	0.23
55号煤	1.3	3.96	0.12	0.30	0.42
细砂岩	2.3	7.02	0.21	0.54	0.75

依据现场实际地质条件与相似模型关系,确定模型上方施加应力 σ_p ,如式(7)所示。

$$\sigma_p = \gamma_h (H - H_p) c_p \quad (7)$$

式中, σ_p 为相似模型上方施加应力,MPa; H 为煤层至地表高度,取757 m; H_p 为煤层至模型上方岩层高度,取77 m, γ_h 取2.5 kN/m³,代入式(7)可得模型上方施加应力 σ_p 为0.12 MPa。

3.2 顶板垮落特征

切顶留巷受采动影响明显,顶板垮落形态及其结构演化特征是决定巷帮能否稳定的前提。依据顶板垮落特征将其分为顶板初期垮落阶段、周期垮落阶段和矸石压实阶段,如图5所示。

1)顶板初期垮落阶段。煤层开挖,直接顶的空间位置决定其首先发生垮落。随煤层开挖,采空区上方顶板裸露区域逐渐变大,由于开挖初期扰动较小,部分直接顶无次序垮落,待直接顶垮落至一定高

度,巷道矸石帮初步形成,说明切顶能够有效隔断采空区顶板垮落对巷道顶板的扰动,此时巷道顶板处于悬臂状态,留巷处于亚稳定状态。因矸石自组织调整阶段,采空区垮落矸石粒径不同、杂乱堆积、孔隙率大,其承载能力较低。

2)顶板周期垮落阶段。随工作面持续推进,基本顶上位岩层发生垮落,巷道顶板处于悬空状态,留巷处于不稳定状态。顶板冒落的块体水平方向相互铰接,其垮落形态呈梯形状,巷道矸石帮基本形成。采空区垮落矸石在周期来压作用下逐渐压实,矸石处于被动压实阶段。

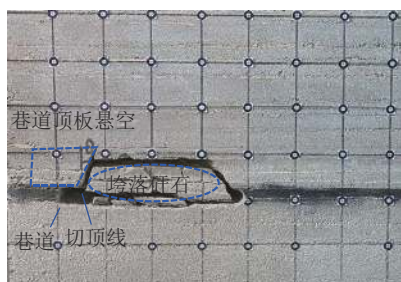
3)矸石压实阶段。采空区矸石被压实后,矸石变形相对比较稳定,且巷道顶板与采空区垮落顶板形成铰接结构,留巷围岩变形逐渐趋于稳定状态,此时巷道矸石帮不仅受到上覆岩层对其作用力,还受到巷道顶板对其作用力。

3.3 矸石帮演化特征

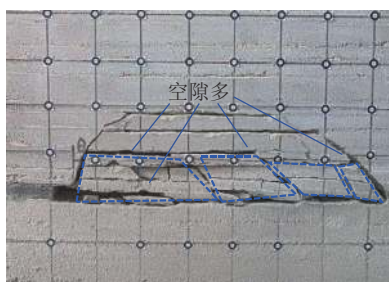
依据3.2内容,切顶留巷顶板垮落特征不同,矸石堆积形态及压实程度不同。顶板初期垮落阶段、周期垮落阶段和矸石压实阶段分别对应于矸石自组织调整、矸石被动压实、矸石稳定3个阶段。矸石帮演化过程如图6所示。

1)矸石自组织调整阶段。矸石自组织调整阶段,受矸石自重作用,颗粒与颗粒之间发生回转、滑移、移动等,矸石颗粒处于自组织调整过程中。由于垮落矸石未与顶板接触,即顶板载荷对其作用力 $q_1=0$ 。该阶段矸石帮侧向压力主要由矸石自重产生,侧向压力大小取决于堆积高度,即矸石堆积高度越高,侧向压力越大。

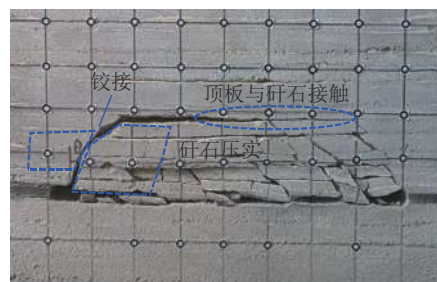
2)矸石被动压实阶段。此阶段矸石基本充满采空区空间,在顶板周期来压作用下,矸石体反复被压实,矸石体承载能力逐渐增强,矸石帮侧向压力也越大,此阶段巷道矸石帮发生横向变形明显。周期来压对矸石表面作用力可采用经验公式(8)计算:



(a) 顶板初期垮落阶段



(b) 顶板周期垮落阶段



(c) 矸石压实阶段

图5 切顶留巷顶板垮落过程

Fig.5 Roof caving process of roof cutting entry retaining

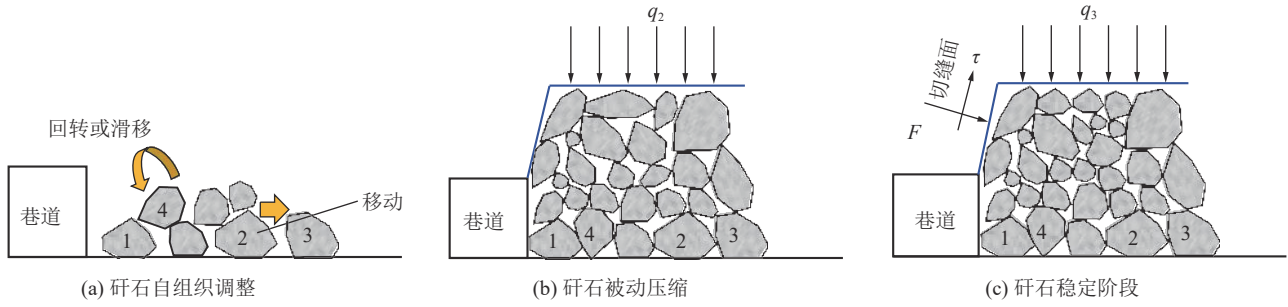


图6 矽石帮演化过程

Fig.6 Evolution process of gangue side

$$q_2 = 2 \times \frac{M}{K-1} \gamma_h \quad (8)$$

3) 矽石稳定阶段。此阶段矽石体被压实, 矽石体趋于稳定状态, 并对覆岩起到明显支撑作用, 此阶段矽石表面所受载荷主要来自于顶板覆岩自重应力, 其计算式(9)为

$$q_3 = \gamma_h(H - H_m) \quad (9)$$

4 矽石帮侧向压力理论计算

由工程实践可知, 在矽石压实过程中, 随着覆岩压力增大, 矽石帮侧向压力也随之增大, 当侧向压力增大至挡矽支护结构的极限强度时, 挡矽支护结构发生侧向膨胀变形, 说明挡矽支护结构发生侧向膨胀变形程度与矽石帮侧向压力密切相关。

4.1 矽石帮侧向压力计算公式推导

为便于对挡矽支护结构进行设计, 对矽石帮侧向压力进行计算。矽石帮侧向压力计算模型如图7所示。

为便于矽石帮侧向应力计算, 对模型进行以下假设: ①假设垮落矽石堆积面为水平面; ②假设顶板垮落后的矽石粒径较小且较为均匀, 即矽石体为均匀的无黏聚力的理想散体; ③假设矽石体受力达到极限平衡状态; ④假设矽石体在覆岩压力和侧向支护作用下会产生沿巷道底板方向的滑移面, 且滑移面受力均匀。

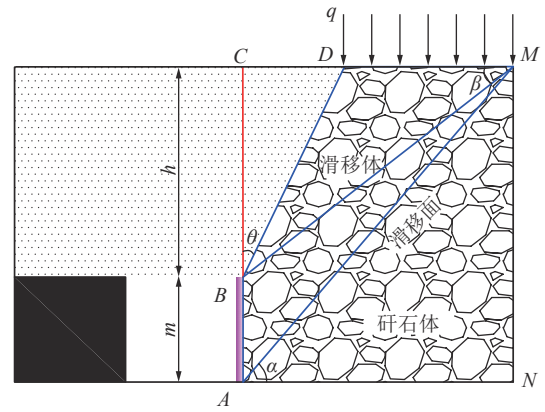
为便于计算, 将滑移体 $ABDM$ 分为2部分, 即三角形滑移体 BDM 和三角形滑移体 ABM , 滑移体 BDM 受力如图8所示, 滑移体 ABM 受力如图9所示。

$$CD = h \tan \theta \quad (10)$$

$$DM = \frac{m+h}{\tan \alpha} - h \tan \theta \quad (11)$$

$$BM = \sqrt{\left[\frac{(m+h)}{\tan \alpha} \right]^2 + h^2} \quad (12)$$

$$\sin \beta = \frac{h \tan \alpha}{m+h} \quad (13)$$



h —顶板高度; $AB=m$ —挡矽支护高度; BD —切缝面; DM —矽石堆积面; AM —矽石滑移面

图7 矽石帮侧向压力计算模型

Fig.7 Lateral pressure calculation model of gangue side

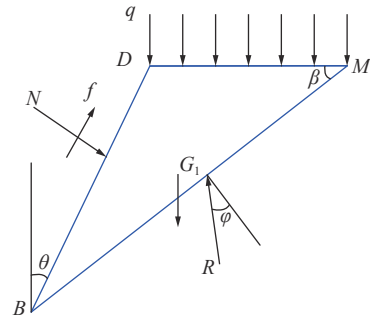
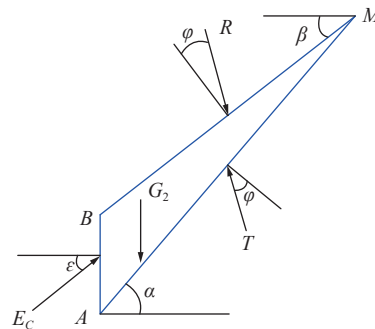
图8 滑移体 BDM 受力模型Fig.8 BDM force model of sliding body图9 滑移体 ABM 受力模型Fig.9 ABM force model of sliding body

图 8 中, N 为切缝面岩体对垮落矸石法向作用力, kN; f 为切缝面岩体与垮落矸石之间摩擦力, kN; G_1 为滑移体 BDM 所受重力, kN; R 为滑移体 ABM 对滑移体 BDM 作用力, kN; q 为上覆岩层均布载荷, kPa, 作用面为 DM , q 在作用面 DM 作用合力为 Q 。 Q 和 G_1 分别如式(14)、式(15)所示, 矸石内摩擦角为 φ , °。

滑移体 BDM 所受重力为

$$G_1 = \frac{1}{2}\gamma \left[\frac{(m+h)h}{\tan \alpha} - h^2 \tan \theta \right] \quad (14)$$

$$Q = q \left(\frac{m+h}{\tan \alpha} - h \tan \theta \right) \quad (15)$$

其中, γ 为岩层容重。如图 8, 假设滑移体 BDM 在 F 、 τ 、 Q 、 G_1 、 R 共同作用下处于极限平衡状态, 水平方向受力平衡方程见式(16), 竖直方向受力平衡方程见式(17)。

$$R \sin \varphi + f \sin(\theta + \beta) + N \cos(\theta + \beta) - (Q + G_1) \sin \beta = 0 \quad (16)$$

$$R \cos \varphi + f \cos(\theta + \beta) - N \sin(\theta + \beta) - (Q + G_1) \cos \beta = 0 \quad (17)$$

$$f = \mu N \quad (18)$$

由式(16)、(17)、(18)求得 R 如式(19)所示。

$$E_x = \frac{(\gamma h + 2q)(\cos \theta + \mu \sin \theta) \sin(\alpha - \beta) \cos \varepsilon}{2 \tan \alpha [\cos(\theta + \beta - \varphi) + \mu \sin(\theta + \beta - \varphi)] \cos(\alpha - \varphi - \varepsilon)} + \frac{(2\gamma m + \gamma h) \sin(\alpha - \varphi) \cos \varepsilon}{2 \tan \alpha \cos(\alpha - \varphi - \varepsilon)} \quad (24)$$

4.2 矸石帮侧向压力影响因素分析

由相关工程经验可知, 矸石帮侧向压力大小是多种因素共同作用下的效果。采用控制变量法, 结合式(24)分析顶板覆岩压力、矸石内摩擦角、切顶角度对矸石帮侧向压力的影响。依据现场条件及实验室测定, 得到 $m=3.0$ m, $h=10$ m, $\varphi=35^\circ$, $\theta=15^\circ$, $\gamma=20$ kN/m³, $\mu=0.3$, $\alpha=60^\circ$, $\beta=7^\circ$, $\varepsilon=20^\circ$ 。因考虑到覆岩压力实测较为困难, 依据现场经验, 采空区边界覆岩压力大小为采空区中部的 20% 左右, 依据式(9), 可知采空区边界覆岩压力大小为 3 000 ~ 5 000 kPa。

1) 顶板覆岩压力对矸石帮侧向压力的影响。其他变量保持不变, 顶板覆岩压力为 0、500、1 000、2 000、3 000、4 000 和 5 000 kPa 时, 矸石帮侧向压力分布如图 10 所示。

由图 10 可知, 矸石帮侧向压力沿巷道高度方向由顶板至底板位置一直增大, 底板位置最大。当覆岩压力为 0 时, 即矸石体未与顶板接触, 此阶段矸石帮侧向压力是由采空区矸石自重所产生的, 矸石帮侧向压力较小; 随着切缝范围外顶板达到极限跨距其发生破断回转, 矸石体逐渐被压实, 当覆岩压力由 500 kPa 增加至 5 000 kPa 时, 矸石帮侧向压力逐渐

$$R = \frac{(Q + G_1)(\cos \theta + \mu \sin \theta)}{\cos(\theta + \beta - \varphi) + \mu \sin(\theta + \beta - \varphi)} \quad (19)$$

图 9 中, R 为滑移体 BDM 对滑移体 ABM 反力, kN; T 为下方稳定矸石体 AMN 对滑移体 BDM 反力, kN; E_c 为挡矸支护装置与滑移体之间作用力, kN; G_2 为滑移体 ABM 所受重力, kN; G_2 如式(20)所示。

$$G_2 = \frac{1}{2}\gamma \left[\frac{(m+h)m}{\tan \alpha} \right] \quad (20)$$

如图 9, 假设滑移体 ABM 在 T 、 G_2 、 R 、 E_c 共同作用下处于极限平衡状态, 水平方向受力平衡方程见式(21), 竖直方向受力平衡方程见式(22)。

$$T \sin \varphi + E_c \cos(\alpha - \varepsilon) - G_2 \sin \alpha - R \sin(\alpha - \beta + \varphi) = 0 \quad (21)$$

$$T \cos \varphi - E_c \sin(\alpha - \varepsilon) - G_2 \cos \alpha - R \cos(\alpha - \beta + \varphi) = 0 \quad (22)$$

由式(21)和(22)即可解得 E_c 如式(23)所示。

$$E_c = \frac{R \sin(\alpha - \beta) + G_2 \sin(\alpha - \varphi)}{\cos(\alpha - \varepsilon - \varphi)} \quad (23)$$

由 $E_h = E_c \cos \varepsilon$, 然后将式(19)、式(20)代入式(23)对 m 求导可得到矸石帮沿高度方向侧向应力分布, 如式(24):

增大, 顶板位置处侧向压力由 323.7 kPa 增加至 2 578.5 kPa, 底板位置处侧向压力由 337.6 kPa 增加至 2 592.4 kPa, 且顶板、底板位置侧向压力与覆岩压力关系符合一次函数表达式, 分别为 $y=73.20+0.50x$ 、 $y=87.05+0.50x$, 可见, 矸石帮侧向压力与顶板覆岩压力呈现明显的正相关关系。

2) 矸石内摩擦角对矸石帮侧向压力的影响。其他变量保持不变, 覆岩压力为 3 000 kPa 时, 矸石体内摩擦角为 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° 时, 矸石帮侧向压力分布如图 11 所示。

随着矸石体内摩擦角由 25° 增加至 45° 时, 巷道顶板、底板位置处侧向压力均逐渐增大, 顶板位置侧向压力由 1 510.9 kPa 增加至 1 761.4 kPa, 底板位置侧向压力由 1 530.2 kPa 增加至 1 778.3 kPa, 且巷道顶板、底板位置侧向压力与内摩擦角关系符合指数函数表达式, 分别为 $y=1\,433.68+9.43e^{0.08x}$ 、 $y=1\,458.26+8.19e^{0.08x}$ 。说明矸石体内摩擦角逐渐增大, 矸石帮侧向压力逐渐增大, 且内摩擦角越大矸石帮侧向压力增加幅度越大, 说明矸石帮侧向压力与内摩擦角呈现明显的正相关关系, 且符合指数函数表达式。若把采空区矸石体视作理想散体, 散体颗粒粒径越大,

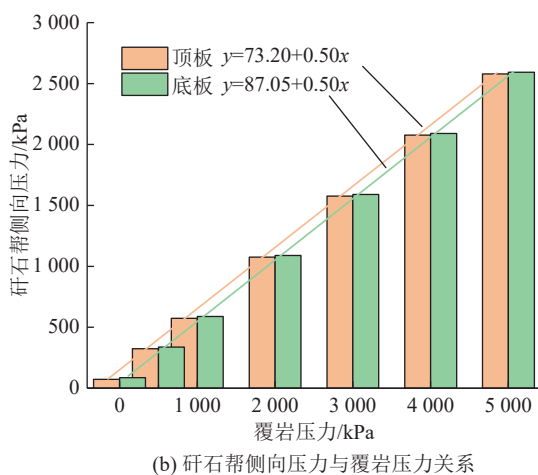
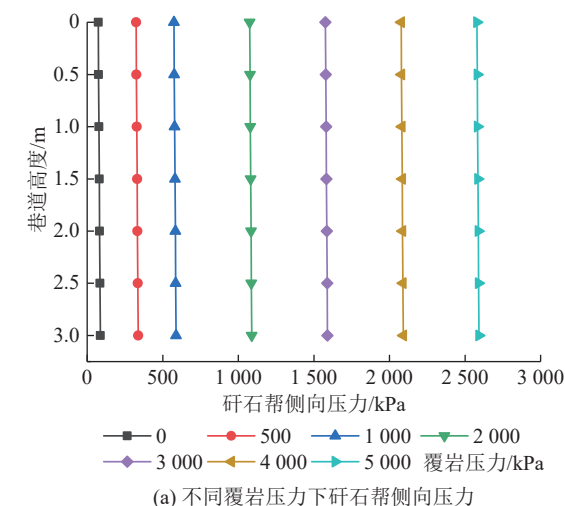


图 10 覆岩压力对矽石帮侧向压力分布的影响

Fig.10 Influence of overburden pressure on lateral pressure distribution of gangue side

内摩擦角越大,同样可以认为矽石体粒径越大,矽石帮侧向压力越大。

3)切顶角度对矽石帮侧向压力的影响。其他变量保持不变,切顶角度为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° ,矽石帮侧向压力分布如图 12 所示。

随着切顶角度由 0° 增加至 25° 时,巷道顶板、底板位置处侧向压力均逐渐减小,顶板位置侧向压力由 $1\,839.6\text{ kPa}$ 减小至 $1\,441.5\text{ kPa}$,底板位置侧向压力由 $1\,853.5\text{ kPa}$ 减小至 $1\,455.3\text{ kPa}$,且巷道顶板、底板位置侧向压力与切顶角度关系符合指数函数表达式,分别为 $y=926.36+912.48e^{-0.023x}$ 、 $y=940.21+912.48e^{-0.023x}$,说明切顶角度越大,矽石帮侧向压力越小,即矽石帮侧向压力与切顶角度呈现明显的负相关关系。对于切顶留巷而言,虽然切顶角度越大,顶板越容易垮落、矽石帮侧向压力越小,越有利于矽石帮挡矽支护;但一味增加切顶角度,会增加巷道邻空侧顶板暴露长度,不利于顶板稳定性控制。因此,切

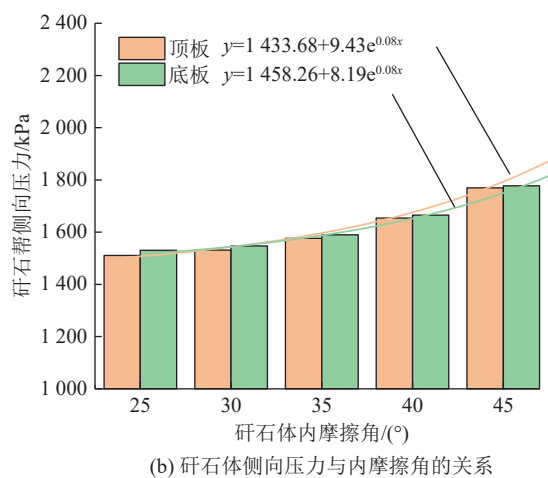
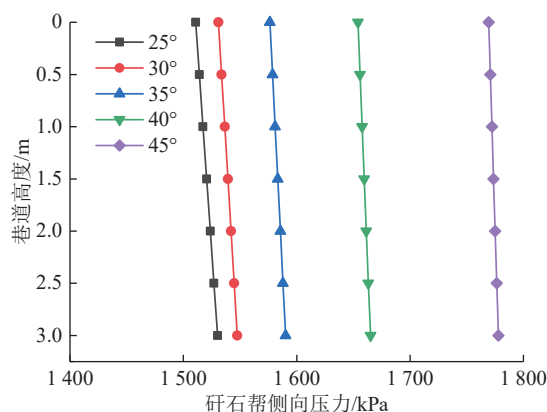


图 11 矽石体内摩擦角对侧向压力分布的影响

Fig.11 Influence of internal friction angle of gangue on lateral pressure distribution

顶角度选择需同时满足巷道围岩应力环境较好、利于顶板垮落、利于挡矽支护,方可成为切顶角度最优解。

5 矽石帮侧向压力模拟分析

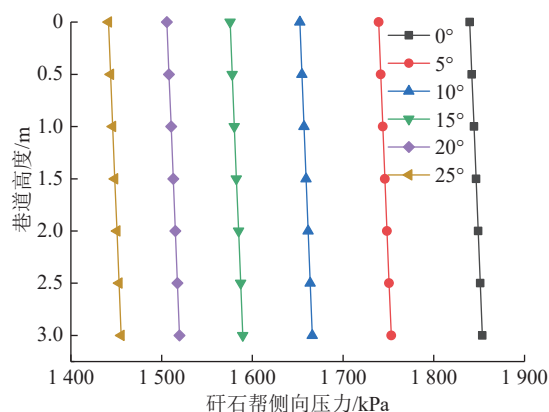
借助 FLAC^{3D} 软件,介绍采空区模型处理方法,分析工作面后方采空区边界覆岩压力、矽石帮侧向压力,对比分析矽石帮侧向压力理论值与模拟值差异。

5.1 模型建立

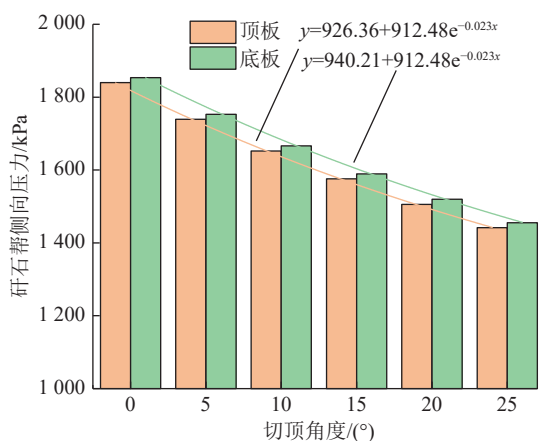
考虑到水平煤层采空区覆岩压力对称性,模型宽度为工作面长度一半,采用 FLAC^{3D} 软件建立数值计算模型,模型尺寸长×宽×高= $200\text{ m}\times 100\text{ m}\times 70\text{ m}$,数值模型如图 13 所示。模型四周边界及下边界均采用位移约束,上边界施加垂直应力 $\sigma_z=\gamma H=17.5\text{ MPa}$,煤岩层力学参数见表 3,煤岩层采用 Mohr-Coulomb 本构模型。侧压系数取 0.8。

5.2 采空区模型处理方法

考虑到 FLAC^{3D} 软件无法模拟采空区顶板垮落过程及充填效应,对采空区垮落矽石作整体等效充填处理,即采空区矽石采用 Double-Yield 本构模型。



(a) 不同切顶角度下矸石帮侧向压力



(b) 矸石帮侧向压力与切顶角度关系

图 12 切顶角度对矸石帮侧向压力的影响

Fig.12 Influence of roof cutting angle on lateral pressure of gangue side



图 13 数值模型

Fig.13 Numerical mode

依据 Salamon 经验公式^[19]得到采空区矸石压实 σ - ε 关系,如式(25)所示,并采用反复尝试的方法得到其他相关参数。

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon}{\left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right)} \quad (25)$$

式中, σ 为采空区矸石垂直应力, MPa; ε 为采空区矸石垂直应力作用下体积应变; ε_m 为采空区矸石垂直应力作用下最大体积应变; E_0 为采空区矸石初始弹性模量, GPa。

采空区矸石最大体积应变 ε_m 和初始弹性模量 E_0 可由式(27)和式(28)求出^[20-22]:

表 3 数值模拟岩层力学参数

Table 3 Numerical simulation of rock mechanics parameters

岩性	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa
中砂岩	2 530	10.21	5.71	3.92	42	7.2
粉砂岩	2 630	7.12	3.65	3.15	35	4.2
细砂岩	2 580	6.53	3.24	2.67	32	3.2
煤	1 480	2.05	1.02	1.85	25	2.0
页岩	2 430	3.02	1.65	2.13	28	2.5

$$K_p = \frac{H_c + M}{H_c} \quad (26)$$

$$\varepsilon_m = \frac{K_p - 1}{K_p} \quad (27)$$

$$E_0 = \frac{10.39 \sigma_c^{1.042}}{K_p^{7.7}} \quad (28)$$

式中: H_c 为垮落带高度, m; M 为采高, m; K_p 为垮落矸石碎胀系数; σ_c 为采空区矸石抗压强度, MPa。

依据工程概况,采空区矸石碎胀系数取 1.3,矸石最大体积应变和弹性模量分别为 0.2 和 0.2 GPa,因此可以得到采空区矸石应力-应变曲线如下,然后采用 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的立方体在数值模拟中反复尝试,数值模拟和理论公式得到采空区矸石应力-应变关系,如图 14 所示。采空区矸石力学参数:密度 $1\,100 \text{ kg/m}^3$; 体积模量 5.12 GPa; 剪切模量 3.20 GPa; 内摩擦角 25° ; 剪胀角 6° 。采空区等效充填方式如图 15 所示。

5.3 模拟结果分析

通过提取工作面后方不同位置处采空区边界位置覆岩压力、矸石帮侧向压力,即可得到图 16。

由图 16 可知,工作面后方大致可以分为矸石自组织调整、矸石压实、矸石稳定阶段。工作面后方 $0 \sim 7 \text{ m}$ 为矸石自组织调整阶段,采空区边界覆岩压力快速下降,由 4.0 MPa 降低至 0.5 MPa ,矸石帮侧向压力较小;工作面后方 $7 \sim 134 \text{ m}$ 为矸石压实阶段,此阶段覆岩压力、矸石帮侧向压力逐渐增大,覆岩压力明显大于矸石帮侧向压力,覆岩压力在工作面后方 120 m 位置趋于稳定值为 3.81 MPa ,矸石帮侧向压力在工作面后方 134 m 位置趋于稳定值为 2.12 MPa ;矸石稳定阶段,覆岩压力、矸石帮侧向压力保持不变。

5.4 煤层倾角对矸石帮侧向压力的影响

不同煤层倾角下矸石帮侧向压力如图 17 所示。由图 17 可知,煤层倾角为 0° 、 2° 、 4° 、 6° 时,采空区矸石分别在工作面后方 137 、 136 、 134 、 132 m 趋于

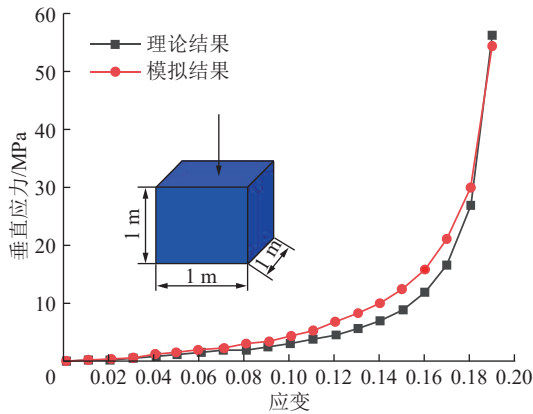


图 14 采空区矸石理论曲线和模拟曲线对比

Fig.14 Comparison of theoretical curve and simulation curve of gangue in goaf

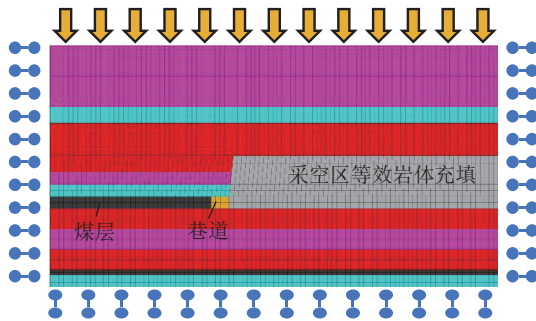


图 15 采空区等效充填示意

Fig.15 Equivalent filling schematic diagram of goaf

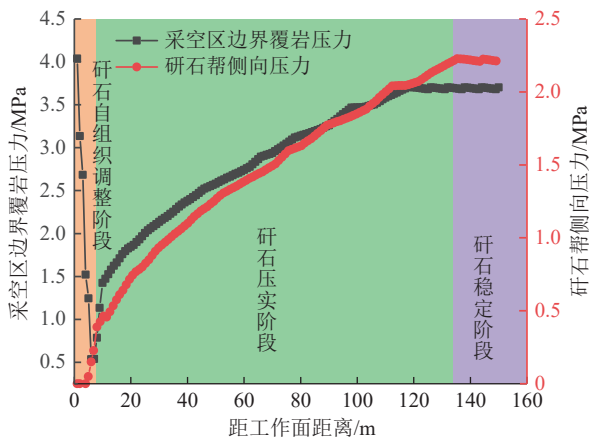


图 16 工作面后方覆岩压力、矸石帮侧向压力分布

Fig.16 Distribution of overburden pressure and lateral pressure of gangue side behind working face

稳定;矸石帮侧向压力稳定值分别为 2.19、2.21、2.27、2.30 MPa;说明一定范围内,煤层倾角越大,矸石帮侧向压力越大,即矸石帮侧向压力与煤层倾角呈现正相关关系。煤层倾角由 0° 增加至 2° ,矸石帮侧向压力仅增加 0.02 MPa,从侧面反映出理论建模的合理性。

5.5 矸石帮侧向压力对比分析

矸石帮侧向压力理论值与模拟值如图 18 所示。

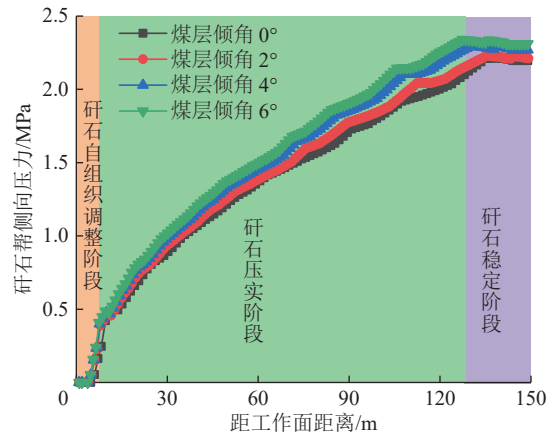


图 17 煤层倾角对矸石帮侧向压力影响

Fig.17 Influence of coal seam dip angle on lateral pressure of gangue side

不同覆岩压力,矸石帮侧向压力理论值与模拟值均符合一次函数表达式;不同矸石体内摩擦角、不同切顶角度,矸石帮侧向压力理论值与模拟值均符合指数函数表达式;且理论值与模拟值差别不大,进一步验证了理论值的正确性。

6 矸石帮挡矸支护方案设计

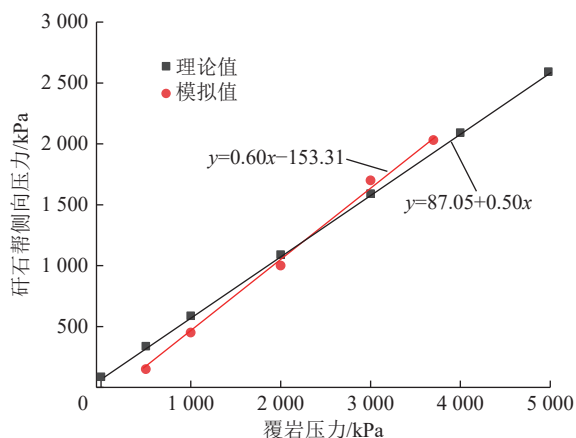
为给出合理的挡矸支护方案,从顶板垮落和采空区矸石压实角度出发,提出矸石帮挡矸支护设计思路,给出挡矸支护方案,进行现场工业试验,评价挡矸支护效果。

6.1 挡矸支护设计思路

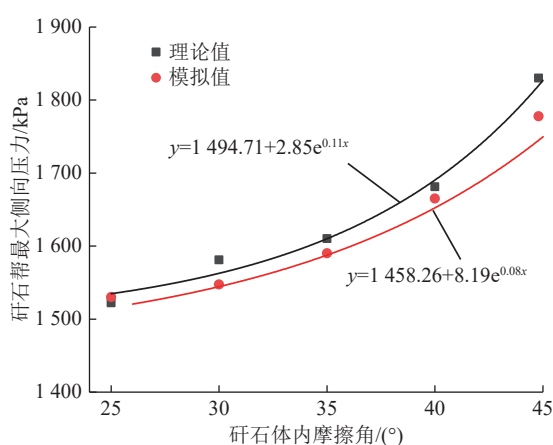
由 3.2 节可知,顶板垮落初期阶段,顶板垮落至采空区,矸石帮会受到冲击载荷作用;随着采空区矸石逐渐压实,矸石帮侧向压力快速增加,其横向变形量也增加。因此,挡矸支护不仅要考虑其冲击载荷作用,还需考虑矸石帮侧向压力。

由 4.2 节分析可知,矸石帮侧向压力与矸石力学特性、切缝面、覆岩压力相关。从矸石体本身性质来看,适当减小矸石体内摩擦角可以降低矸石帮侧向压力,其主要措施是保证预压效果,对于极为破碎的矸石颗粒,可以采取注浆加固的方式。

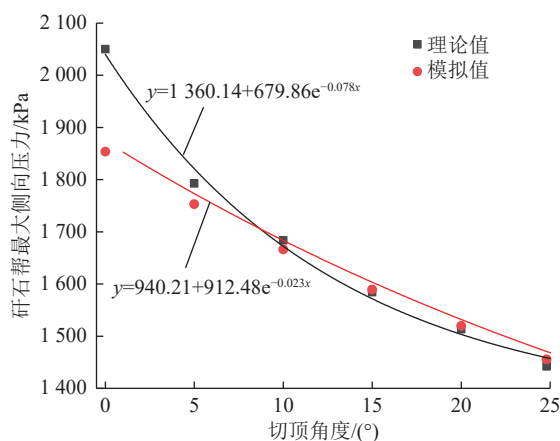
从矸石体外部环境来看,主要与覆岩压力、切缝面有关,从切缝面角度,切顶高度取决于岩石碎胀系数,即切顶高度是定值,适当增大切顶角度可以降低矸石帮侧向压力,但切顶角度不宜过大;从覆岩压力角度,覆岩压力越大,矸石帮侧向压力越大,考虑到覆岩压力大小无法调控,可以采取提高矸石侧向支护强度,最主要措施是提高金属网密度和强度、增加挡矸单体密度。



(a) 覆岩压力对矸石帮侧向压力理论值、模拟值影响



(b) 矸石内摩擦角对矸石帮侧向压力理论值、模拟值影响



(c) 切顶角度对矸石帮侧向压力理论值、模拟值影响

图 18 矸石帮侧向压力理论值与模拟值比较

Fig.18 Comparison of theoretical value and simulated value of lateral pressure of gangue side

6.2 挡矸支护设计方案

切顶留巷挡矸支护施工过程中,为提高挡矸支护安全性,通常在工作面支架巷道侧进行施工;为减弱顶板垮落对矸石帮的冲击作用,通过在巷道邻空侧码设单层粉煤灰丝袋墙,袋墙宽度为 0.8 m,且有

助于垮落矸石形成巷帮、防治漏风、防治小块矸石滑入巷道,同时还可以起到让压作用;为保证挡矸支护设备受力均匀,在袋墙巷道侧布设金属网,金属网规格为 100 mm×100 mm,金属网与金属网之间用铁丝连接,用 U 型卡子将金属网与 U 型钢连接在一起;为防治 U 型钢倾倒,将 U 型钢埋入底板不小于 200 mm 位置;为对采空区矸石提供横向推力抵抗其横向变形,将 U 型钢外侧顶端使用单体柱成 75°~85°角进行斜铰, U 型钢排距 1.2 m,单体柱排距 1.2 m。矸石帮挡矸支护如图 19 所示。

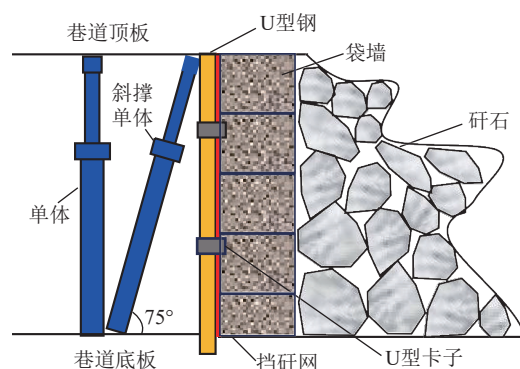


图 19 矸石帮挡矸支护示意

Fig.19 Schematic diagram of gangue support for gangue side

6.3 应用效果分析

为验证挡矸支护设计的合理性及矸石帮侧向压力分布特征,将挡矸压力盒安装于袋墙与 U 型钢之间,分别对巷道顶板位置、底板位置矸石帮侧向压力进行监测,如图 20 所示。现场挡矸效果如图 21 所示。

由图 20a 可知,从整体来看,矸石帮巷道底板位置处侧向压力大于顶板位置处。工作面后方 0~25 m,巷道顶板位置矸石帮侧向压力基本为 0,底板位置侧向压力缓慢增大,说明顶板逐渐垮落,巷道矸石帮逐步形成,此阶段矸石帮侧向压力主要是由于矸石自重所引起的;工作面后方 25~125 m,巷道顶板、底板位置处侧向压力均快速增加,说明此阶段垮落矸石在周期来压作用下逐渐被压实,矸石帮采动影响程度较大;工作面后方 125 m 之后,巷道顶板、底板位置处侧向压力均趋于平稳,顶板、底板位置处矸石帮侧向压力分别保持在 2.11、2.30 MPa 左右,说明此阶段矸石变形进入稳定状态。同时结合图 20b,矸石达到稳定状态,矸石帮侧向压力长期保持不变,其受采动影响程度较小。

由图 21 可知,留巷照片可以看出,巷道整体变形较小,即巷道断面收缩率不大,满足行人、通风要求,留巷整体效果较好。

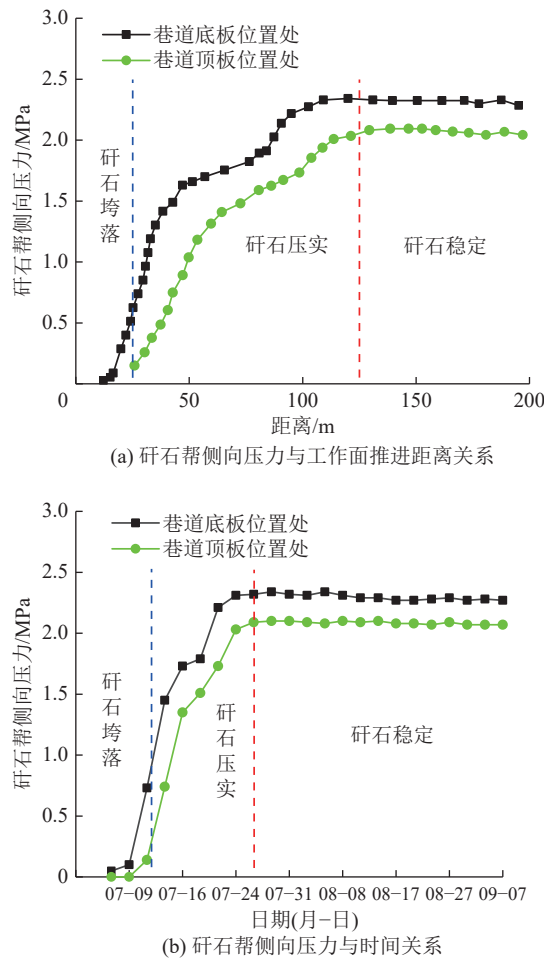


图20 矸石帮侧向压力实测值

Fig.20 Measured value of lateral pressure of gangue side

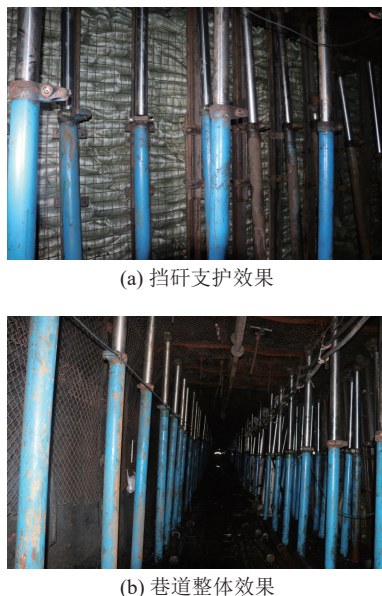


图21 挡矸支护效果

Fig.21 Gangue retaining support effect

7 结 论

1)杏花煤矿切顶必要性条件在于直接顶垮落后

未能充满采空区,且其基本顶强度大、整体性强,确定切顶高度为10 m、切顶角度为15°。

2)矸石压实分为3个阶段。矸石自组织调整阶段,矸石孔隙率高,应力-应变曲线近似线性关系;矸石压实阶段,矸石孔隙率低,应力-应变曲线近似指数型关系;矸石稳定阶段,结构基本达到稳定。矸石变形量、破碎程度与其抗压强度有关。

3)矸石自组织调整阶段,矸石帮侧向压力主要由矸石自重产生,侧向压力大小取决于堆积高度,矸石帮侧向压力较小;矸石被动压实阶段,受顶板周期来压影响矸石反复被压实,矸石帮侧向压力逐渐增大;矸石稳定阶段,此阶段矸石被压实,对覆岩起到明显支撑作用,覆岩压力趋于定值3.81 MPa,矸石帮侧向压力趋于定值2.12 MPa。

4)矸石帮侧向压力由巷道顶板位置至底板位置逐渐增大。矸石帮侧向压力与顶板覆岩压力、内摩擦角呈现明显的正相关关系,与切顶角度呈现明显的负相关关系,矸石帮侧向压力理论值与模拟值差别不大。

5)矸石帮设计思路主要是提高矸石自身力学特性和提高挡矸支护强度,给出“袋+网+U型钢+斜撑单体”挡矸支护方案,工作面后方125 m之后矸石帮侧向压力趋于稳定,其值与理论值、模拟值差别不大,现场应用效果良好。

参考文献(References):

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 康红普,张晓,王东攀,等.无煤柱开采围岩控制技术及应用[J].煤炭学报,2022,47(1):16-44.
KANG Hongpu, ZHANG Xiao, WANG Dongpan, et al. Strata control technology and applications of non-pillar coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 16-44.
- [3] 宋振骐,崔增娣,夏洪春,等.无煤柱矸石充填绿色安全高效开采模式及其工程理论基础研究[J].煤炭学报,2010,35(5):705-710.
SONG Zhenqi, CUI Zengdi, XIA Hongchun, et al. The fundamental theoretical and engineering research on the green safe no coal pillar mining model by mainly using coal gangue backfill[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 705-710.
- [4] 康红普,牛多龙,张镇,等.深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):1977-1987.
KANG Hongpu, NIU Duolong, ZHANG Zhen, et al. Deformation characteristics of surrounding rock and supporting technology of gob-side entry retaining in deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1977-1987.
- [5] 华心祝,杨朋.深井大断面沿空留巷底板变形动态演化特征研究

- [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 494–501.
- HUA Xinzh, YANG Peng. Floor deformation dynamic evolution of gob-side entry retaining with large section in deep mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 494–501.
- [6] 张国华. 主动支护下沿空留巷顶板破碎原因分析[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 429–432.
- ZHANG Guohua. Roof cracking reason analysis about gob-side entry retaining under initiative support[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 429–432.
- [7] 何满潮, 宋振骐, 王安, 等. 长壁开采切顶短壁梁理论及其 110 工法: 第三次矿业科学技术变革[J]. 煤炭科技, 2017(1): 1–9, 13.
- HE Manchao, SONG Zhenqi, WANG An, *et al.* Theory of long-wall mining by using roof cutting shortwall team and 110 method: the third mining science and technology reform[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2017(1): 1–9, 13.
- [8] 何满潮, 陈上元, 郭志彪, 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.
- [9] 袁超峰, 袁永, 朱成, 等. 薄直接顶大采高综采工作面切顶留巷合理参数研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1981–1990.
- YUAN Chaofeng, YUAN Yong, ZHU Cheng, *et al.* Reasonable parameters of roof cutting entry retaining in thin immediate roof and large mining height fully-mechanized face[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1981–1990.
- [10] 陈上元, 赵波, 袁越, 等. 城郊矿深部工作面切顶留巷工程试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(1): 121–129.
- CHEN Shangyuan, ZHAO Bo, YUAN Yue, *et al.* Engineering experiment on gob-side entry retaining by roof cutting of deep mining face in Chengjiao coalmine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(1): 121–129.
- [11] 许旭辉, 何富连, 吕凯, 等. 厚层坚硬顶板切顶留巷合理切顶参数[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3048–3059.
- XU Xuhui, HE Fulian, LYU Kai, *et al.* Research on reasonable cutting roof parameters of gob side entry retaining by roof cutting in thick and hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3048–3059.
- [12] 郭金刚, 李耀晖, 石松豪, 等. 厚硬基本顶切顶卸压成巷及围岩控制技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2853–2864.
- GUO Jingang, LI Yaohui, SHI Songhao, *et al.* Self-forming roadway of roof cutting and surrounding rock control technology under thick and hard basic roof[J]. Journal of the China Coal Society, 2021, 46(9): 2853–2864.
- [13] 张国锋, 刘寄婷, 常爱苹, 等. 东保卫矿倾斜煤层厚硬顶板沿空切顶成巷关键参数研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6): 111–116.
- ZHANG Guofeng, LIU Jiting, CHANG Aiping, *et al.* Study on key parameters of gob-side entry retaining by cutting thick and hard roof in inclined coal seam of Dongbaowei coal mine[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(6): 111–116.
- [14] 马资敏, 郭志彪, 刘晓宇, 等. 切顶留巷冒落矸石碎胀规律与力学特性研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(11): 94–98.
- MA Zimin, GUO Zhibiao, LIU Xiaoyu, *et al.* Study on bulking rule and mechanical characteristics of fallen gangue in roof-cutting entry retaining[J]. Coal Engineering, 2017, 49(11): 94–98.
- [15] 宋天奇, 朱磊, 刘成勇, 等. 采动过程中覆岩破碎区碎胀性走向分布特征[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 9881–9887.
- SONG Tianqi, ZHU Lei, LIU Chengyong, *et al.* Distribution characteristics of dilatancy in overburden fracture zone during mining[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(23): 9881–9887.
- [16] 蒋力帅, 武泉森, 李小裕, 等. 采动应力与采空区压实承载耦合分析方法研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 1951–1959.
- JIANG Lishuai, WU Quansen, LI Xiaoyu, *et al.* Numerical simulation on coupling method between mining-induced stress and goaf compression[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1951–1959.
- [17] 王海龙, 王琦, 赵振华, 等. 采空区冒落矸石承压变形特征及侧向压力分布规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 20–29.
- WANG Hailong, WANG Qi, ZHAO Zhenhua, *et al.* Study on bearing deformation characteristics and lateral pressure distribution law of caved gangue in gob[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 20–29.
- [18] 马新根, 何满潮, 张良, 等. 切顶成巷采空区冒落矸石碎胀系数及侧向压力测定研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(2): 37–41.
- MA Xingen, HE Manchao, ZHANG Liang, *et al.* Determination about bulk increase coefficient and lateral pressure of caving gangue in gob-side entry retaining formed by roof cutting[J]. Coal Engineering, 2019, 51(2): 37–41.
- [19] SALAMON M D G. Mechanism of caving in longwall coal mining[M]. Boca Raton: CRC Press, 2020: 161–168.
- [20] LI W F, BAI J B, PENG S, *et al.* Numerical modeling for yield pillar design: a case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 305–318.
- [21] ZHANG G C, HE F L, JIA H G, *et al.* Analysis of gateroad stability in relation to yield pillar size: a case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(5): 1263–1278.
- [22] 窦林名, 阚吉亮, 李许伟, 等. 断顶爆破防治冲击矿压技术体系及效果评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 24–32.
- DOU Linming, KAN Jiliang, LI Xuwei, *et al.* Study on prevention technology of rock burst by break-tip blasting and its effect estimation[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 24–32.