

# 大倾角煤层采空区碎石柱承载特性与 沿空留巷稳定机理

贾后省<sup>1,2</sup>, 王艺博<sup>1</sup>, 王卫军<sup>3</sup>, 姚强岭<sup>4</sup>, 刘少伟<sup>1,2</sup>, 李超<sup>5</sup>, 彭博<sup>5</sup>, 张洲平<sup>5</sup>, 弥志伟<sup>5</sup>  
(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003; 3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 4. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 5. 四川川煤华荣能源有限责任公司 花山煤矿, 四川 攀枝花 617000)

**摘要:** 为了揭示大倾角煤层采空区碎石柱承载特性及其对留巷围岩稳定性的影响机制, 以花山矿 24152 大倾角采煤工作面沿空留巷为工程背景, 采用理论分析、数值模拟、现场监测等综合研究方法, 掌握了大倾角煤层采空区碎石柱形成规律与承载特性, 揭示了碎石柱形成对大倾角煤层沿空留巷稳定性的影响机制. 结果表明: 采空区碎石堆积形态主要受煤层倾角、煤层厚度、直接顶厚度等因素影响, 煤层倾角大于自然安息角是碎石柱形成的前提, 采空区碎石柱长度随着煤层倾角的增加而快速增长, 随煤层厚度增加而线性减小, 而随着直接顶厚度增加, 碎石柱长度呈先增长后减小的趋势. 碎石柱密实程度的变化特征与碎石柱形成长度变化特征相对一致, 且决定了碎石柱的承载特性与留巷周边应力环境状态, 在煤层倾角为 40°、煤层厚度为 3.7 m、直接顶厚度为 3 m 的条件下, 对留巷围岩稳定性起主导作用的采空区一侧顶板区域垂直应力与水平应力差值不超过 1 MPa. 依据大倾角煤层采空区碎石柱承载特性以及留巷稳定机理, 提出了大倾角煤层沿空留巷围岩稳定的技术关键, 巷内支架应具有整体强度高、能适应围岩大变形、采空区侧抗冲击等基本特性. 据此, 研发了大倾角煤层沿空留巷刚柔一体化护巷支架, 该支架由单侧支撑式结构与高阻可伸缩横梁组成, 高阻可伸缩横梁与单侧支撑式结构铰接, 可在留巷围岩大变形过程中, 持续保持整体结构稳定, 以协同控制留巷围岩大变形. 现场工程实践结果表明, 碎石柱形成过程及几何形态与理论和数值分析结果高度一致, 刚柔一体化护巷支架工作稳定, 剧烈采动影响期间顶板最大下沉量在支护体允许的范围, 留巷围岩控制效果良好.

**关键词:** 大倾角煤层; 沿空留巷; 碎石柱; 护巷支架

**中图分类号:** TD 322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)03-0561-16

## Bearing characteristics of broken stone column in goaf of large dip angle coal seam and stability mechanism of gob-side entry retaining

JIA Housheng<sup>1,2</sup>, WANG Yibo<sup>1</sup>, WANG Weijun<sup>3</sup>, YAO Qiangling<sup>4</sup>, LIU Shaowei<sup>1,2</sup>,  
LI Chao<sup>5</sup>, PENG Bo<sup>5</sup>, ZHANG Zhouping<sup>5</sup>, MI Zhiwei<sup>5</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China; 2. State

收稿日期: 2025-01-10 修回日期: 2025-03-14 DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.20250013

基金项目: 国家自然科学基金项目(52474095); 河南省优秀青年科学基金项目(252300421107); 河南省重点研发与推广专项项目(252102321161)

通信作者: 王艺博(2000—), 男, 河南省郑州市人, 硕士研究生, 从事沿空留巷围岩控制方面的研究.

E-mail: wyb179319@163.com Tel: 15038295456

引用格式: 贾后省, 王艺博, 王卫军, 等. 大倾角煤层采空区碎石柱承载特性与沿空留巷稳定机理[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(3): 561-576.

JIA Housheng, WANG Yibo, WANG Weijun, et al. Bearing characteristics of broken stone column in goaf of large dip angle coal seam and stability mechanism of gob-side entry retaining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 561-576.

Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo, Henan 454003, China; 3. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 4. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 5. Huashan Coal Mine, Sichuan Chuanmei Huarong Energy Co., Ltd., Panzhihua, Sichuan 617000, China)

**Abstract:** In order to reveal the bearing characteristics of rock pillars in goaf of large dip angle coal seam and its influence mechanism on the stability of surrounding rock of gob-side entry retaining, taking the gob-side entry retaining of 24152 large dip angle coal mining face in Huashan Mine as the engineering background, the formation law and bearing characteristics of rock pillars in goaf of large dip angle coal seam were mastered by theoretical analysis, numerical simulation and field observation, and the influence mechanism of rock pillars on the stability of gob-side entry retaining in large dip angle coal seam was revealed. The results show that the shape of gravel accumulation in goaf is mainly affected by coal seam dip angle, coal seam thickness, direct roof thickness and other factors. The coal seam dip angle is greater than the natural angle of repose is the premise of the formation of gravel column. The length of gravel column in goaf increases rapidly with the increase of coal seam dip angle and decreases linearly with the increase of coal seam thickness. With the increase of direct roof thickness, the length of gravel column increases first and then decreases. The variation characteristics of the compactness of the crushed stone column are relatively consistent with the variation characteristics of the formation length of the crushed stone column, and determine the bearing characteristics of the crushed stone column and the stress environment state around the retained roadway. Under the condition of coal seam dip angle of  $40^\circ$ , coal seam thickness of 3.7 m and direct roof thickness of 3 m, the stress difference of the roof area on the side of the goaf, which plays a leading role in the stability of the surrounding rock of the retained roadway, does not exceed 1 MPa. According to the bearing characteristics of rock pillars in goaf of large dip angle coal seam and the stability mechanism of gob-side entry retaining, the technical key of surrounding rock stability of gob-side entry retaining in large dip angle coal seam is put forward. The support in roadway should have the basic characteristics of high overall strength, large deformation of surrounding rock and impact resistance on the side of goaf. Based on this, a rigid-flexible integrated roadway support for gob-side entry retaining in steeply dipping coal seam is developed. The support is composed of a unilateral support structure and a high-resistance retractable beam. The high-resistance retractable beam is hinged with the unilateral support structure, which can continuously maintain the overall structural stability during the large deformation of the surrounding rock of the retaining roadway, so as to synergistically control the large deformation of the surrounding rock of the retaining roadway. The field engineering practice results show that the formation process and geometric shape of the broken stone column are highly consistent with the theoretical and numerical analysis results. The rigid-flexible integrated roadway support is stable, and the maximum roof subsidence during severe mining is within the allowable range of the support body. The surrounding rock control effect of gob-side entry retaining well effect.

**Key words:** large dip angle coal seam; gob-side entry retaining; broken stone column; roadway support

大倾角煤层在我国西南地区赋存占比高达 80%,这类煤层被国际认为是难采煤层之一. 采掘接替紧张、巷道矿压显现特异、多源灾害频发等难题是大倾角煤层开采的常见特点,为了提高煤炭采出

率、保障巷道围岩稳定性并缓解交替紧张的局面,大倾角煤层沿空留巷技术被广泛应用<sup>[1-4]</sup>. 在大倾角煤层沿空留巷实施过程中,采空区垮落矸石在重力作用下沿着煤层倾角方向会逐渐向下滑落堆积和压

实,形成具有一定承载作用的碎石柱,加之大倾角煤层回采巷道多为异型断面,这导致大倾角沿空留巷的区域应力环境、矿压显现规律与普通倾角煤层沿空留巷截然不同<sup>[5-9]</sup>,围岩稳定性控制机理和对策也必然有较大差异,因此研究大倾角煤层采空区碎石柱的承载特性以及沿空留巷稳定机理具有实际意义。

大倾角煤层沿空留巷过程中,不同空间环境下碎石柱的形态决定了留巷周边的应力环境和围岩稳定性,近年来,众多学者围绕沿空留巷围岩破坏规律、支护对策、巷旁处理方式等方面进行了大量探索和实践.文献<sup>[10-12]</sup>综合分析了沿空留巷、沿空掘巷、跨巷开采及采空区布置巷道等无煤柱开采方法及适用条件,指出无煤柱开采的技术要点应该围绕沿空留巷卸压机理、支卸协同作用原理、稳定可靠的补强支护手段和快速留巷技术等方面展开.文献<sup>[13-17]</sup>进一步以大倾角采煤工作面为研究对象,深入分析了局部充填对大倾角走向长壁采场围岩采动力学行为的调节机制,揭示了充填体对基本顶岩梁的变形破坏及采场倾向下侧煤岩体承载特征的影响规律.在沿空留巷围岩控制技术方面,文献<sup>[18-20]</sup>针对沿空留巷围岩变形大、变形不均匀、维护效果差等状况,分析了巷内支护与围岩变形、应力分布的关系,提出采用高阻让压支护保障沿空留巷围岩承载能力和抗变形能力,以适应沿空留巷阶段性围岩大变形.文献<sup>[21-23]</sup>开发了大倾角煤层沿空留巷弓形柔性掩护支架控制技术,该技术充分发挥了支架的支撑和掩护作用,支架与压实的垮落带形成的组合体结构,能有效控制矿山压力。

以上研究成果对于不同条件下沿空留巷的围岩稳定原理、巷内支护、巷旁处理方式等方面进行了有益探讨,尤其在大倾角煤层沿空留巷方面,亦提出了针对性的围岩控制技术,并取得了显著的工程效果.然而,大倾角煤层沿空留巷的稳定机理仍需进一步明确,一方面,留巷一侧采空区形成碎石柱,需进一步分析此种碎石柱形成的影响因素及其对留巷围岩稳定性的作用机制;另一方面,碎石柱形成过程中,巷旁支护将不同程度的受到来自采空区垮落矸石的冲击,需针对性地提出留巷围岩协同控制对策.据此,以花山矿 24152 大倾角采煤工作面沿空留巷为工程背景,系统分析了不同开采条件下的碎石柱形成规律,以及碎石柱的形成对留巷围岩稳定性的作用机制,研发了大倾角煤层沿空留巷刚柔一体化护巷支架,对于大倾角煤层沿空留巷围岩的稳定性控制具有实际意义。

## 1 工程概况

花山矿主采 15<sup>-5#</sup> 煤层,煤层倾角多为 25°~45°,局部地段倾角在 45°以上,平均厚度为 3.42 m.其 24152 采煤工作面平均埋深为 400 m 左右,基本顶为质地坚硬的粉砂岩、细砂岩,厚度约为 10.0 m,直接顶主要由泥质粉砂岩、细粒砂岩、15<sup>-4#</sup> 煤层组成,平均厚度为 2.87 m.24152 运输巷围岩结构及顶板岩层窥视结果如图 1 所示.从整个 15<sup>-5#</sup> 煤层来看,其煤层及顶底板结构、倾角、厚度等岩层信息变化较大,导致采煤工作面及周边巷道矿压显现特征差异明显。

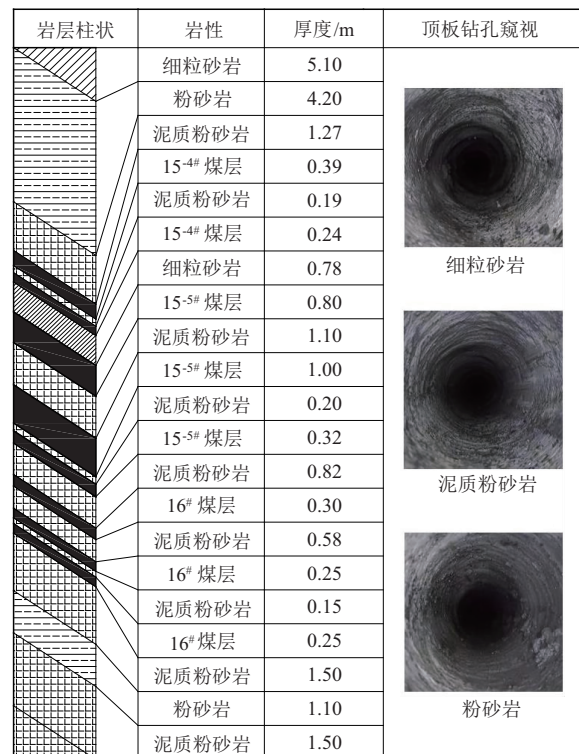


图 1 花山矿 24152 运输巷围岩结构及顶板岩层窥视结果  
Fig. 1 Peeping results of surrounding rock structure and roof strata of 24152 transport roadway in Huashan Coal Mine

为了提高煤炭采出率、降低巷道掘进量、缓解采掘接替紧张,花山矿长期采用沿空留巷技术,其巷旁支护主要依赖混凝土砌块等传统支护方式.然而,煤层倾角较大区域,工作面回采后留巷上部采空区矸石难以自稳,矸石滑落对巷旁支护产生较大的侧向冲击力,巷旁支护难以自稳,出现底部滑移、上部不接顶等现象,留巷围岩控制效果普遍较差,现场留巷照片如图 2 所示.因此,掌握大倾角煤层采空区碎石堆积特征及其所形成的碎石柱承载特性,并进一步明确留巷稳定机理和围岩控制形式是保障大倾角沿空留巷稳定的前提和有效途径。

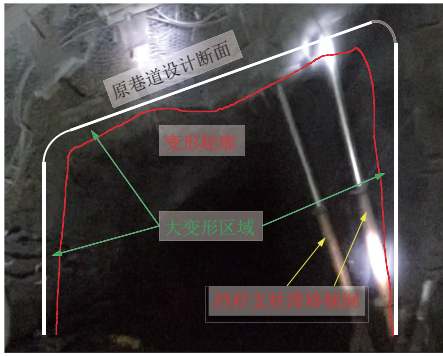


图 2 花山矿 24152 同一煤层留巷现场图片  
Fig. 2 The scene picture of the same coal seam in Huashan mine 24152

## 2 采空区碎石柱堆积效应与碎石柱形成机制

### 2.1 碎石柱形成机制理论分析

大倾角煤层开采后,采空区直接顶垮落矸石在重力作用下沿煤层倾向滑落,在基本顶断裂之前充分向留巷一侧采空区堆积,部分垮落矸石与基本顶接顶形成碎石柱,对随后的基本顶断裂起承载作用.碎石柱的空间形态、几何尺寸影响了其对采空区上覆岩层的承载效果,良好的碎石柱形成效果对留巷围岩稳定性的提升具有积极作用.大倾角煤层采煤工作面受“重力-倾角”<sup>[24]</sup>效应的叠加影响,其堆积形态特征与煤层倾角、自然安息角、煤层厚度和直接顶厚度等因素直接相关,通过观察现场架后采空区碎石柱的形成过程与堆积状态,碎石柱倾向剖面形态近似为“矩形+弧形”,建立采空区碎石柱形成计算模型如图 3 所示.图中, $\alpha$  为煤层倾角, ( $^{\circ}$ );  $h_{AB}$  为挡矸高度, m;  $h_m$  为煤层厚度, m;  $h_1$  为直接顶厚度, m;  $a$  为采空区碎石柱长度, m;  $b$  为采煤工作面倾向长度, m;  $\beta$  为矸石静止面与岩层法线方向的夹角, ( $^{\circ}$ );  $\epsilon$  为直接顶岩层的自然安息角, ( $^{\circ}$ ).

直接顶垮落碎胀后的剖面面积与直接顶垮落前的剖面面积的比值记为  $k$ , 即碎胀系数, 其充填关系有:

$$kh_1b = a(h_m + h_1) + S_{CED}, \quad (1)$$

式中  $S_{CED}$  为半弓形  $CED$  的面积.

由图 3 中的几何关系可知,  $\beta$  可表示为

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha + \epsilon. \quad (2)$$

由于图形  $CED$  为半弓形, 据此将曲线  $CD$  近似为抛物线, 其曲线方程可表示为

$$y = -cx^2 + l_{CE}, \quad (3)$$

式中:  $c$  为抛物线二次项系数;  $l_{CE}$  为  $CE$  段的

长度.

在图形  $CED$  中将线段  $ED$  分为  $n$  段, 选取其中的第  $j$  个矩形单元, 则第  $j$  段面积  $S_j$  为

$$\begin{aligned} S_j &= \left[ -c \left( j \frac{l_{ED}}{n} \right)^2 + l_{CE} \right] \frac{l_{ED}}{n} \\ &= -c \frac{l_{ED}^3}{n^3} j^2 + \frac{l_{CE} \times l_{ED}}{n}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $l_{ED}$  为  $ED$  段长度.

据此可得:

$$S_{CED} = \frac{2}{3} l_{CE} \times l_{ED}. \quad (5)$$

若图形  $CED$  为三角形, 则:

$$S_{\triangle CED} = \frac{1}{2} l_{CE} \times l_{ED}. \quad (6)$$

当图形  $CED$  为三角形时, 其面积与半弓形  $CED$  的面积差值为  $\frac{1}{6} l_{CE} \times l_{ED}$ , 该差值在整个直接顶岩层总面积中占比较低, 且实际工程中  $CED$  多呈现半弓形特征. 因此, 基于为半弓形  $CED$  假设, 联立式(1), (2), (5) 得采空区垮落矸石与基本顶接顶部分的碎石柱长度  $a$  为

$$a = \frac{kh_1b}{h_m + h_1} - \frac{2}{3} (h_m + h_1) \tan\beta. \quad (7)$$

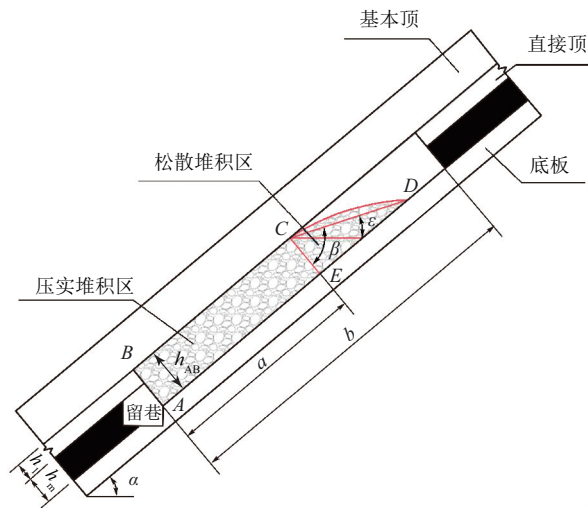


图 3 采空区碎石柱形成计算模型  
Fig. 3 Calculation model of gravel column for mation in goaf

根据式(7)可知采空区碎石柱长度  $a$  与煤层厚度  $h_m$ 、直接顶厚度  $h_1$ 、矸石静止面与岩层法线方向的夹角  $\beta$  相关, 而  $\beta$  与煤层倾角  $\alpha$  和自然安息角  $\epsilon$  相关. 根据现场矸石垮落情况与工程实测统计结果, 采空区矸石自然安息角  $\epsilon$  为  $34^{\circ} \sim 38^{\circ}$ , 花山矿直接顶碎胀系数  $k$  为  $1.3 \sim 1.5$ , 且裂隙较为发育, 节理裂隙尺寸一般在  $0.1 \sim 6.0$  mm. 为探究各

变量因素对碎石柱形成的影响,采用控制变量法对采空区碎石柱填长度  $a$  的影响因素展开分析.采空区碎石柱长度  $a$  随各因素的变化情况如图4所示.由图4可见,影响采空区碎石柱长度的主要因素为:

### 1) 煤层倾角

当煤层倾角小于自然安息角时,直接顶垮落矸石沿底板的滚滑运动特征不明显,无法形成碎石柱;当煤层倾角略大于自然安息角时,直接顶垮落矸石的滑落堆积特征明显,采空区碎石柱长度随着煤层倾角的增加呈现出急剧增长的趋势;随着煤层倾角的增加,采空区碎石柱长度增长速率逐渐减小,增长趋势逐渐趋于平缓.以“ $\epsilon = 36^\circ$ ,  $h_m = 3.7 \text{ m}$ ,  $h_1 = 7 \text{ m}$ ,  $b = 120 \text{ m}$ ”的典型条件为例,当煤层倾角  $\alpha < 38.47^\circ$  时,无法形成碎石柱;当  $38.47^\circ \leq \alpha < 56^\circ$  时,采空区碎石柱长度急剧增加;当  $\alpha \geq 56^\circ$  时,倾角对碎石柱长度增长速率影响逐渐减小.

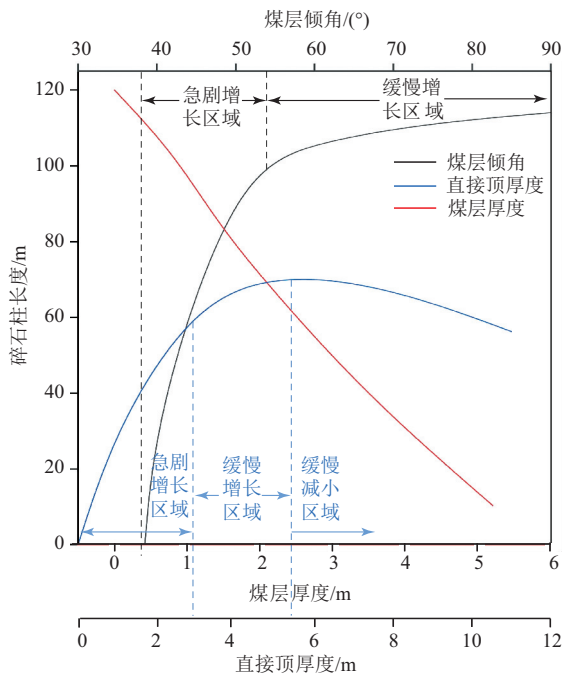


图4 不同影响因素条件下碎石柱长度变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of gravel column length under different influencing factors

### 2) 直接顶厚度

直接顶的厚度影响碎石柱长度的变化趋势相对复杂,随着直接顶厚度的增加,碎石柱长度呈现出先急剧增加,随后平稳过渡,最后缓慢减小的变化趋势.以条件“ $\epsilon = 36^\circ$ ,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $h_m = 2.2 \text{ m}$ ,  $b = 120 \text{ m}$ ”为例,当  $h_1 < 2.7 \text{ m}$  时,碎石柱长度急剧增加;当  $2.7 \text{ m} \leq h_1 < 5.7 \text{ m}$  时,碎石柱长度处于缓慢增长区域,其增长速度逐渐减小;当  $h_1 \geq 5.7 \text{ m}$

时,碎石柱长度处于缓慢减小阶段,直接顶厚度的增加引起碎石柱长度减小.

### 3) 煤层厚度

煤层厚度的变化对碎石柱长度的影响规律较为单一,近似为线性负相关.以条件“ $\epsilon = 36^\circ$ ,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $h_1 = 7 \text{ m}$ ,  $b = 120 \text{ m}$ ”为例,在煤层厚度较小时,由于采动空间较小,直接顶垮落甚至可填满采煤工作面;随着煤层厚度的增加,碎石柱长度不断减小,当煤层厚度超过  $5 \text{ m}$  时,碎石柱长度仅为  $17 \text{ m}$ .

综上所述,碎石柱堆积形态主要受煤层倾角、煤层厚度、直接顶厚度等因素影响.煤层倾角大于自然安息角是碎石柱形成的前提.采空区碎石柱长度随煤层倾角增加而快速增长,随煤层厚度增加而线性减小,随直接顶厚度增加呈先增长后减小的趋势.

## 2.2 碎石柱形成机制数值模拟分析

### 2.2.1 数值模型建立及模拟方案

PFC 数值模拟软件是一款基于细观非连续力学理论开发的通用计算分析程序,研究的介质材料主要分为散体材料和黏结材料,适用于研究材料宏-细观力学特性、颗粒集合体的变形和流动破坏过程等<sup>[25]</sup>.因此,在研究碎石柱形成机制时,选择采用离散元 PFC 数值模拟软件,其可以直观地显示碎石运动过程,对于模拟大倾角工作面覆岩运移条件下采空区碎石柱形成具有较好的适应性.

为研究碎石柱形成机制,通过控制变量法研究各变量因素对碎石柱形成及承载特性的影响,以花山矿 15<sup>-5#</sup> 煤层、直接顶、基本顶结构特征及变化范围为基准,围绕煤层倾角  $\alpha$ 、煤层厚度  $h_m$ 、直接顶厚度  $h_1$  等 3 类影响因素,建立了 10 个数值模型,模型建立方案及基本参数如表 1 所示,煤层及顶底板物理力学参数如表 2 所示.

图 5 为“ $\alpha = 40^\circ$ ,  $h_1 = 7 \text{ m}$ ,  $h_m = 3.7 \text{ m}$ ,  $b = 120 \text{ m}$ ”条件下采煤工作面及周边留巷数值模型,模型尺寸为  $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ .通过对采煤工作面架后垮落矸石的尺寸进行估量和统计,垮落矸石等效半径多在  $0.15 \sim 0.25 \text{ m}$  范围之内.因此,为充分模拟矸石垮落过程、碎石柱形成特征和采煤工作面周边应力分布,将与其密切相关的煤层、直接顶、基本顶等煤岩层的颗粒大小设在  $0.15 \sim 0.25 \text{ m}$  范围之内.而对表土层、上位岩层与下位岩层进行了简化处理,颗粒大小设在  $0.20 \sim 0.35 \text{ m}$  之间<sup>[25-26]</sup>.原岩应力测试结果显示,该采煤工作面所

处区域水平应力为 9.42 MPa,垂直应力为 9.14 MPa. 因此,在模拟加载时,对模型上下边界施加垂直应力 9.14 MPa,左右边界施加水平应力 9.42 MPa,边界应力通过 PFC 伺服机控制,使得留巷开挖过程中边界应力保持恒定.

表 1 模型建立方案及基本参数

Table 1 Model establishment scheme and basic parameters

| 模型序号 | 影响因素  | $\alpha/(^\circ)$ | $h_1/m$ | $h_m/m$ |
|------|-------|-------------------|---------|---------|
| 1    |       | 30                |         |         |
| 2    | 煤层倾角  | 40                | 7       | 3.7     |
| 3    |       | 50                |         |         |
| 4    |       |                   | 1       |         |
| 5    | 直接顶厚度 | 40                | 3       | 2.2     |
| 6    |       | 5                 |         |         |
| 7    |       | 7                 |         |         |
| 8    |       |                   |         | 0.7     |
| 9    | 煤层厚度  | 40                | 7       | 2.2     |
| 10   |       |                   |         | 3.7     |

表 2 煤层及顶底板物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of coal seam and roof and floor

| 岩层   | 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 抗拉强度/<br>MPa | 黏聚力/<br>MPa | 内摩擦角/<br>( $^\circ$ ) |
|------|--|--------------|-------------|-----------------------|
| 上位岩层 | 2 100                                      | 1.35         | 6.52        | 33                    |
| 基本顶  | 2 500                                      | 2.72         | 6.26        | 40                    |
| 直接顶  | 2 100                                      | 1.36         | 3.76        | 33                    |
| 煤层   | 1 400                                      | 1.08         | 2.86        | 30                    |
| 直接底  | 2 200                                      | 2.36         | 7.52        | 35                    |
| 基本底  | 2 240                                      | 5.35         | 7.65        | 40                    |
| 下位岩层 | 2 000                                      | 5.60         | 8.05        | 45                    |

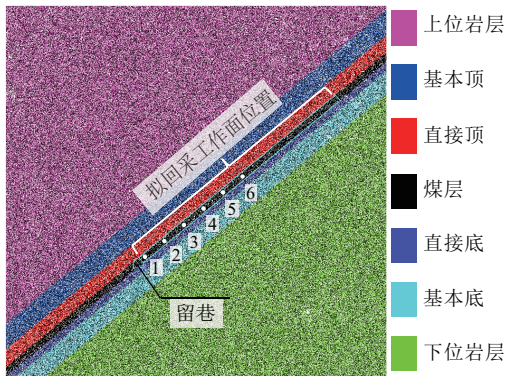


图 5 采煤工作面及周边留巷数值模型

Fig. 5 Numerical model of coal mining face and surrounding roadway retaining

为使模拟过程尽量与采煤工作面覆岩的实际运动规律相对应,首先限制基本顶的垮落,以模拟留巷初期基本顶垮落前的碎石柱形成状态;待直接顶充分垮落堆积,取消对基本顶的限制,以模拟碎石柱的实际承载特性及留巷周边的应力环境.同时,在采空区碎石柱内均匀布置 6 个应力监测

点,测点间距设为 6 m,观测碎石柱从形成到压实承载的全过程应力变化,测点布置见图 5 拟回采工作面区域标注.

2.2.2 碎石柱形成机制影响因素

1) 煤层倾角

随着煤层倾角的增加,当其略大于自然安息角后会形成碎石柱. 不同煤层倾角 ( $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ ) 条件下采空区碎石柱形成状态如图 6 所示. 当煤层倾角为  $30^\circ$  时,矸石垮落后在采空区底板上的滑移不明显,无法形成与采空区上覆岩层接顶的碎石柱;当煤层倾角增至  $40^\circ$  时,矸石垮落后出现明显的滑移堆积并在工作面下部形成与上覆岩层接顶的碎石柱,煤层倾角为  $40^\circ, 50^\circ$  条件下,所形成的碎石柱长度分别为 35, 67 m. 同时,通过对比观察同比例放大的碎石柱形成区域内的颗粒空间分布密度,可以明显看出煤层倾角为  $50^\circ$  条件下碎石柱密实程度相较倾角为  $40^\circ$  时更为紧密.

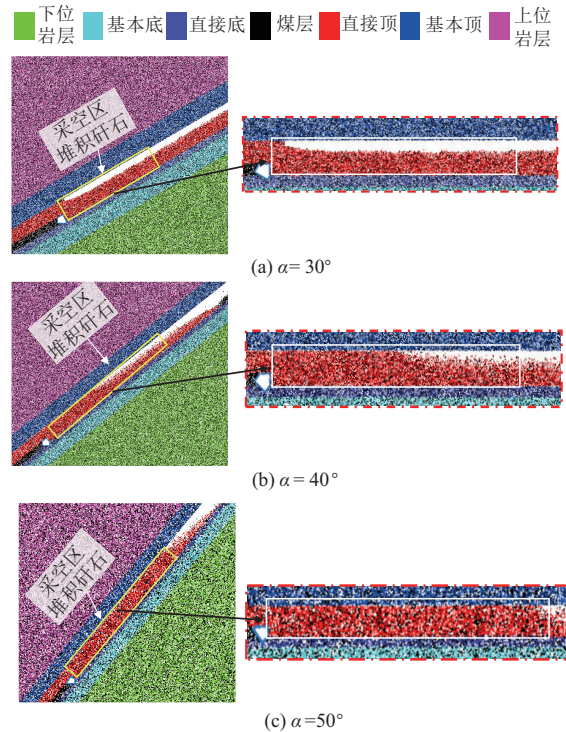


图 6 不同煤层倾角条件下采空区碎石柱形态

Fig. 6 The shape of broken stone column in goaf under different coal seam dip angles

2) 直接顶厚度

直接顶厚度对碎石柱形成的影响较为复杂,不同直接顶厚度下采空区碎石柱的形成状态如图 7 所示. 由图 7 可见,当煤层倾角为  $40^\circ$  时,不同直接顶厚度条件下,都形成了具有一定致密程度的碎石柱. 当直接顶厚度为 1 m 时,采空区矸石垮落后向下滑移并堆积,接顶长度约为 26 m;随着直接

顶厚度增加至 3, 5, 7 m, 碎石柱长度分别增加至 45, 42, 39 m, 随着直接顶厚度增加碎石柱长度呈现出先增加后减小的趋势, 该变化趋势与理论分析基本一致. 从碎石柱密实程度来看, 直接顶厚度为 3 m 条件下相较于 1 m 条件, 碎石柱结构更为紧密; 随着直接顶厚度的继续增加, 碎石柱密实程度无明显差异.

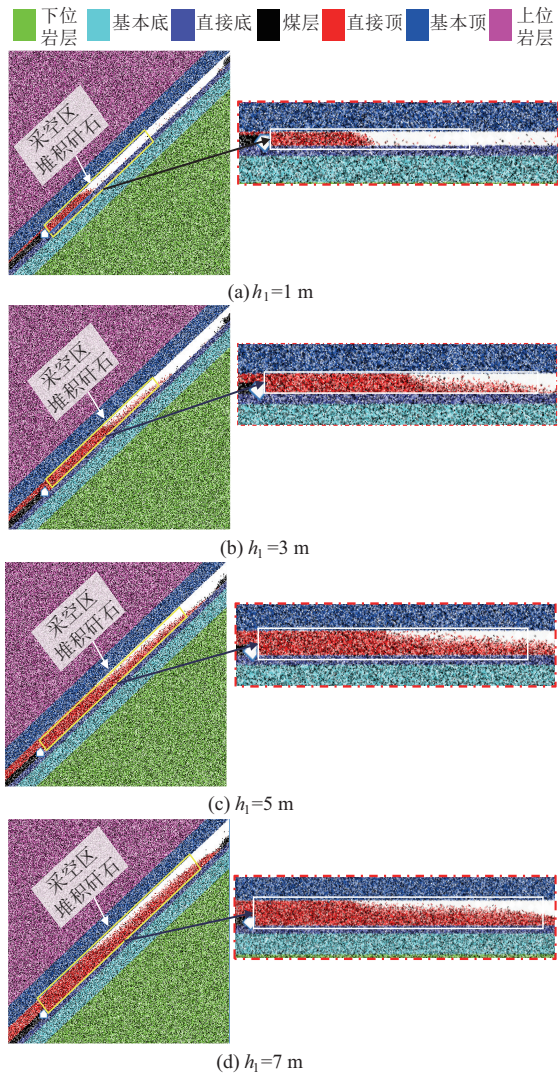


图 7 不同直接顶厚度采空区碎石柱形成状态  
Fig. 7 Formation state of broken stone column in goaf with different direct roof thickness

### 3) 煤层厚度

在一定的直接顶和煤层倾角条件下, 煤层厚度越小, 直接顶垮落后越容易填满采空区, 更有利于碎石柱的形成. 不同煤层厚度下采空区碎石柱的形成状态如图 8 所示. 由图 8 可见, 当煤层厚度为 0.7 m 时, 采空区矸石垮落后向下滑移, 出现明显的堆积现象, 堆积矸石形成碎石柱与上覆岩层接顶, 接顶长度约为 113 m, 接近工作面的倾向长度; 当煤层厚度增加至 2.2 与 3.7 m 时, 随着采动

空间的增加, 堆积高度增加, 碎石柱长度分别减小至 62 与 39 m, 煤层厚度与碎石柱形成长度呈线性负相关, 与理论分析结果一致.

从垮落矸石充填采空区的密实程度上来看, 受矸石自重和堆积过程的影响, 碎石柱内部靠近留巷区域的碎石柱结构更加紧密, 随着煤层厚度的增加, 由于碎石柱长度的减小, 碎石柱堆积密实程度也随之降低.

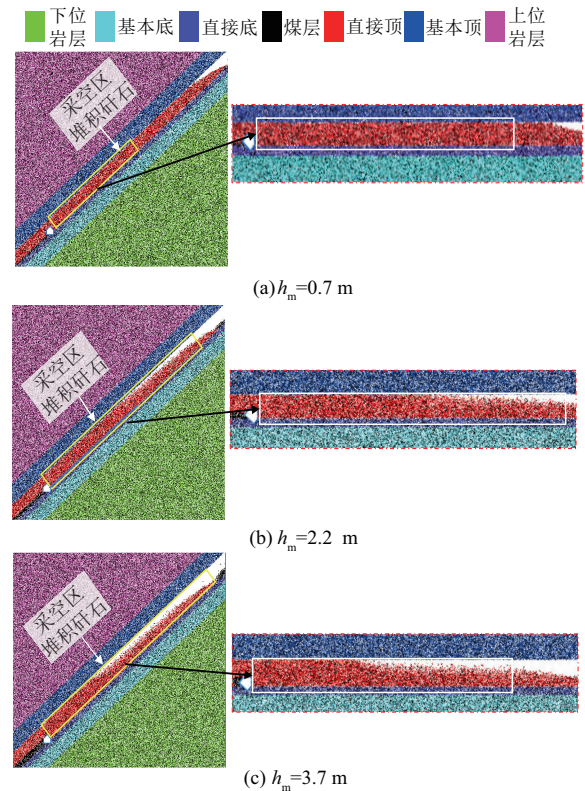


图 8 不同煤层厚度采空区碎石柱形成状态  
Fig. 8 Formation state of broken stone column in goaf with different coal seam thickness

此外, 为了验证直接顶垮落矸石块度对碎石柱形成的影响规律, 在图 5 和表 1 数值模型基础上, 选取典型条件“ $\alpha = 40^\circ, h_m = 2.2 \text{ m}, h_1 = 7 \text{ m}$ ”, 将直接顶垮落矸石块度的等效半径  $d$  分为 0.15~0.25, 0.20~0.30, 0.25~0.35 m 这 3 个等级, 进一步模拟分析了直接顶垮落矸石块度对碎石柱形成的影响规律, 结果如图 9 所示.

随着直接顶垮落矸石块度的增加, 矸石向下滑移并堆积充填采空区的效果更显著, 更有利于碎石柱的形成. 由图 9 可见, 当垮落矸石块度等效半径在 0.25~0.35 m 范围内时, 矸石在垮落后出现明显的滑移堆积并在工作面下部形成与上覆岩层接顶的碎石柱, 碎石柱长度约为 65 m; 随着矸石块度等效半径减小至 0.20~0.30, 0.15~0.25 m 范围时, 所形成碎石柱长度分别为 55, 35 m. 因此,

在垮落矸石块度尺寸范围内,随着矸石等效半径的进一步增加,碎石柱的长度显著增长,较大的矸石块度对碎石柱的形成是有利的。

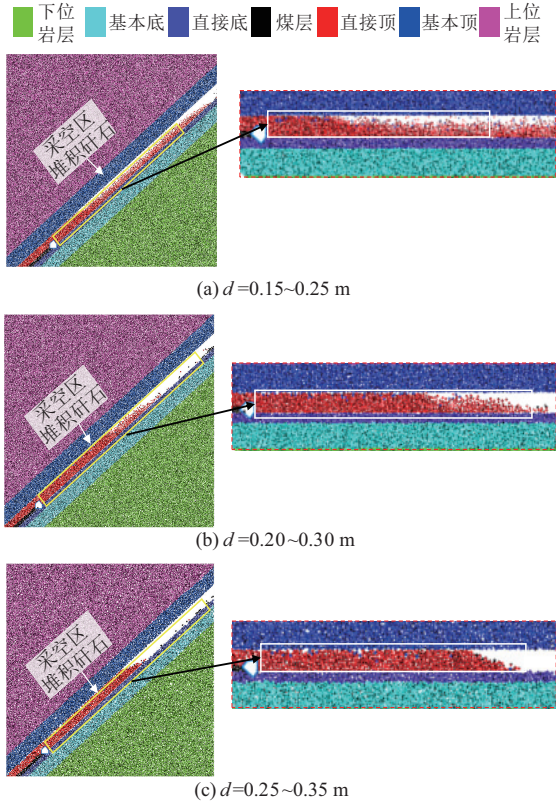


图 9 不同矸石块度采空区碎石柱形成状态  
Fig. 9 Formation state of broken stone column in goaf with different gangue lumpiness

然而,由于直接顶垮落矸石块度的增加,矸石颗粒之间的接触面积和空隙比例也随之变化,从而影响碎石柱的密实度.在垮落矸石块度等效半径小于 0.25 m 时,较大的矸石等效半径有助于增大颗粒之间的接触面积,有利于碎石柱密实度的增加.当矸石等效半径进一步增加时,颗粒之间的空隙随之增大,使得碎石柱的紧密度下降,导致密实程度开始减小.因此,碎石柱的密实程度随着矸石半径的增加呈先增加后减小的趋势。

综合上述数值模拟结果可以看出,从碎石柱长度变化趋势和形态上来看,数值模拟与理论分析结果高度一致.相较于理论分析,数值模拟还显示了碎石柱密实程度的变化,随着煤层倾角的增加,密实程度逐渐增加;随着煤层厚度的增大,采空区碎石柱长度与密实程度均逐渐减小;然而,在变化范围较小时,随着直接顶厚度增加,碎石柱密实程度相应增加,当直接顶厚度超过 3 m 后,碎石柱密实程度没有明显差异.从碎石柱形成形态上来看,同等块度尺寸条件下,碎石柱密实程度的变化特征与碎石柱形成长度变化情况相对一致,即碎石柱形成长度越大,其密实程度越好。

### 2.3 碎石柱承载特性

为了系统揭示碎石柱形成前后不同阶段的采场周边围岩应力分布和演化规律,对采煤工作面回采前、采煤工作面回采后碎石柱形成、基本顶垮落平衡后等主要过程进行了数值模拟分析,采场周边围岩应力演化规律的数值模拟结果如图 10, 11 所示.采煤工作面回采前,巷道处于掘巷扰动稳定阶段,拟留巷道周边围岩应力场呈准静态分布,水平应力和垂直应力分布均与原岩应力保持动态平衡状态.随着采煤工作面的向前推进,直接顶垮落,在基本顶断裂之前,垮落矸石在留巷采空区一侧充分堆积碎石柱,此时巷道周边应力相对均匀.随着采煤工作面的向前推进,当开采活动推进至基本顶断裂失稳阶段时,受上覆岩层回转下沉作用,留巷实体煤侧顶板深部(距留巷顶板 5 m 处)垂直应力出现局部集中现象,峰值应力约为 19 MPa,在留巷右帮 10 m 位置处,水平应力出现局部应力集中现象,应力集中峰值约为 20 MPa,留巷浅部围岩区域的水平应力与垂直应力均无明显应力集中现象,且在碎石柱靠近留巷的区域都有明显的应力减小现象.因此,碎石柱的承载作用有利于留巷围岩的稳定。

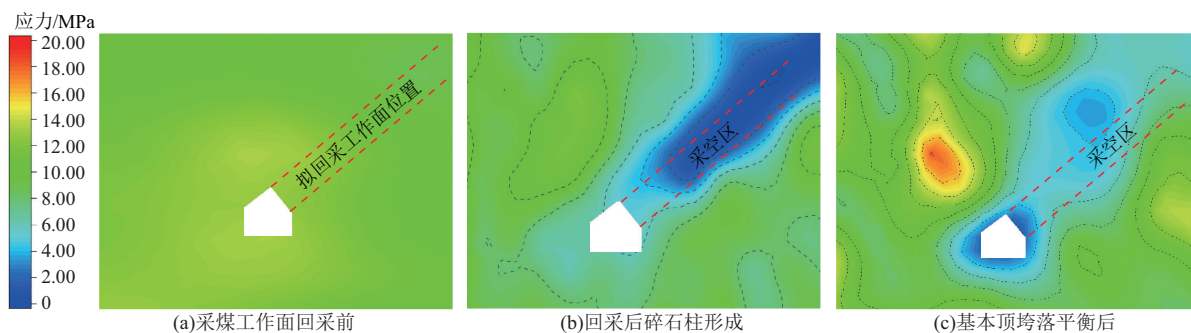


图 10 采场周边围岩垂直应力的演化和分布规律  
Fig. 10 Evolution and distribution law of vertical stress of surrounding rock around stope

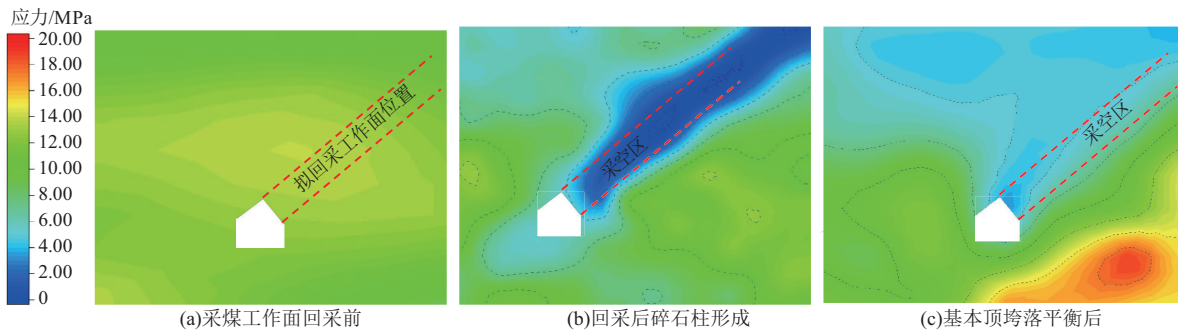


图 11 采场周围围岩水平应力的演化和分布规律

Fig. 11 Evolution and distribution law of horizontal stress of surrounding rock around stope

碎石柱形成之后,随着采煤工作面的继续回采,基本顶垮落,此时碎石柱对上覆岩层开始起承载作用.数值模拟过程中,当直接顶岩层充分垮落堆积形成碎石柱后,解除对基本顶的限制,使基本顶在自重及上覆岩层荷载作用下弯曲下沉,压实采空区碎石柱,通过在碎石柱内部布设应力测点来监测碎石柱对基本顶覆岩的承载特性.由于煤层倾角大于自然安息角是碎石柱形成的前提,且花山矿煤层倾角变化特征显著,所以选取煤层倾角因素来阐述碎石柱承载特性,但由于煤层倾角为 30°条件下不会形成碎石柱,故仅对煤层倾角为 40°与 50°条件下碎石柱承载特性进行探讨分析.基

本顶垮落前后碎石柱形态及其承载效果对比如图 12 所示,碎石柱形成到压实承载的全过程应力变化趋势如图 13 所示.从碎石柱一侧的应力分布来看,煤层倾角为 40°条件下应力变化趋势呈“单峰型”,随距留巷的距离增加,碎石柱应力变化呈先增加后减小的趋势;煤层倾角为 50°条件下应力变化趋势呈“双峰型”,随距留巷距离增加,碎石柱应力先增加,随后平稳减小过渡,之后进入第 2 个波峰,最后呈减小趋势.2 种条件下碎石柱靠近留巷的区域都有应力减小的现象,煤层倾角为 50°条件下靠近留巷区域应力更小.

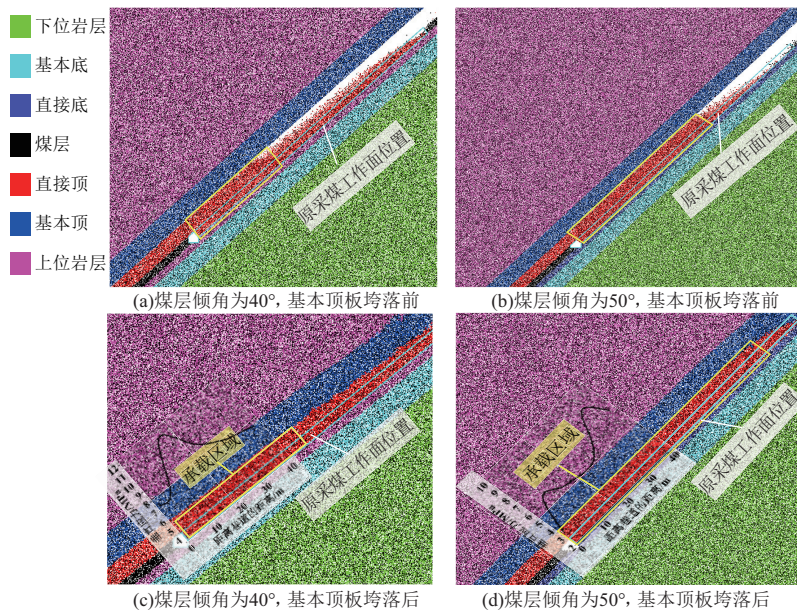


图 12 基本顶垮落前后碎石柱形态及其承载效果对比

Fig. 12 Comparison of the shape and bearing effect of the broken stone column before and after the main roof caving

煤层倾角为 40°,50°条件下在碎石柱承载前,碎石柱内自重垂直应力最大分别为 0.30,1.30 MPa.基本顶垮落后,碎石柱承载上覆岩层,碎石柱内垂直应力逐渐增大,煤层倾角为 40°,50°条件下碎石柱最大垂直应力可分别达到 12.71,7.90 MPa,相较于基

本顶垮落之前,2 种煤层倾角条件下碎石柱的最大垂直应力分别增大大约 40 倍与 6 倍,碎石柱逐渐被压实,对采空区顶板起到承载作用,且煤层倾角为 50°条件下碎石柱内垂直应力最大值小于煤层倾角为 40°条件下的垂直应力最大值.

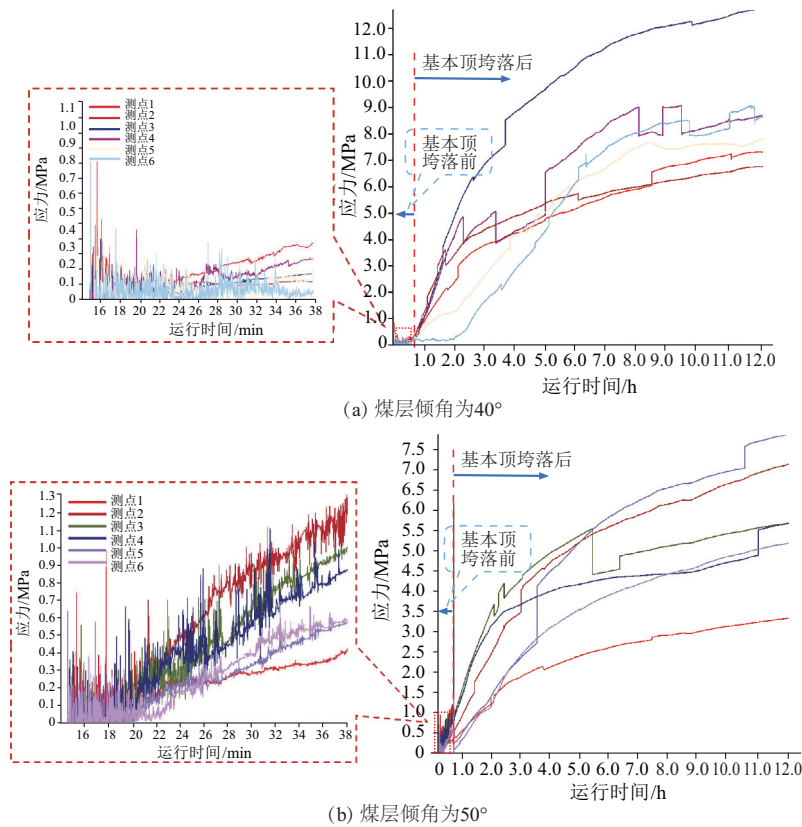


图 13 碎石柱形成到压实承载的全过程垂直应力变化  
 Fig. 13 The vertical stress change of the whole process from the formation of the broken stone column to the compaction bearing

### 3 大倾角煤层沿空留巷稳定机理

由于直接顶岩层厚度变化对碎石柱的形成规律影响更加复杂,随直接顶厚度的增加,碎石柱倾向长度呈先增长后减小的趋势,所以选取直接顶厚度为分析对象来阐述留巷周边垂直应力分布以及碎石柱对留巷围岩稳定性的影响,以更全面地展现不同碎石柱形态下的大倾角煤层沿空留巷稳定机理,结果如图 14 所示.由图 14 可见,由于碎石柱的形成,留巷周边区域有明显的应力减小现象,形成应力分布较为均衡的卸压区域.直接顶厚度为 1 m 条件下,有应力减小的现象,但应力减小幅度与卸压区域范围均小于直接顶厚度为 3,5,7 m 条件下;直接顶厚度为 3 m 条件下,卸压区域范围最广,应力减小的区域最集中,且无明显的应力集中现象;当直接顶厚度增加至 5 m 时,应力减小区域相对分散,应力分布大致呈“双峰型”;当直接顶厚度增加至 7 m 时,应力减小区域相比直接顶厚度为 5 m 时更为分散,应力分布大致呈“单峰型”,在留巷左上侧 30°方向 5 m 左右的位置有应力集中现象.因此,留巷周边卸压区域范围与碎石柱长度变化趋势相对一致,碎石柱长度越长且密实程

度越好,留巷周边区域应力越小,且卸压区域范围越广.

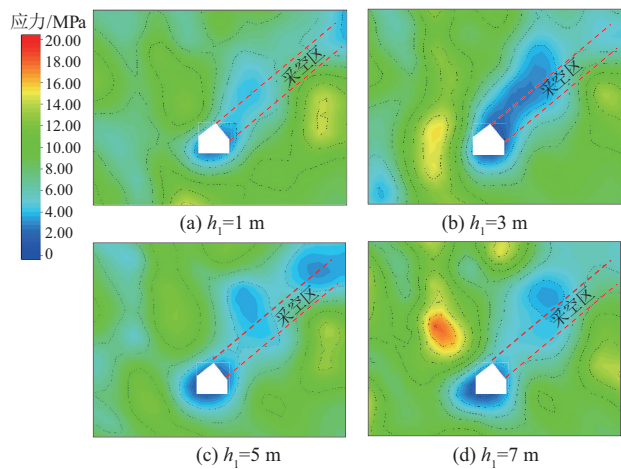


图 14 基本顶垮落后不同直接顶厚度条件下的垂直应力分布云图  
 Fig. 14 The vertical stress distribution cloud diagram under the condition of different direct roof thickness after the main roof collapse

垂直应力与水平应力的差值大小是反映巷道围岩稳定的另一重要指标<sup>[27-28]</sup>.据此,以留巷中心为圆心,在距离留巷 6 m 的位置布置应力监测点,监测点编号为 a,b,c,⋯,l,不同直接顶厚度下留巷

周边测点应力变化如图 15 所示。由图 15 可见，在采空区一侧顶板区域(测点 a,b,c 位置)，测点处的最大应力值及垂直应力与水平应力的差值均较小，其中在测点 c 位置，直接顶厚度为 3 m 条件下，垂直应力与水平应力最小差值不超过 1 MPa。在采空区下方及留巷底板区域(测点 d,e,f,g 位置)，

垂直应力与水平应力差值较大，在测点 e 位置，4 种直接顶厚度条件下，垂直应力与水平应力最大差值均超过 8 MPa，此区域围岩稳定性较差；在实体煤帮侧区域(测点 h,i 位置)，垂直应力与水平应力差值较小，甚至当直接顶厚度为 7 m 时，出现垂直应力与水平应力差值几乎为 0 的情况。

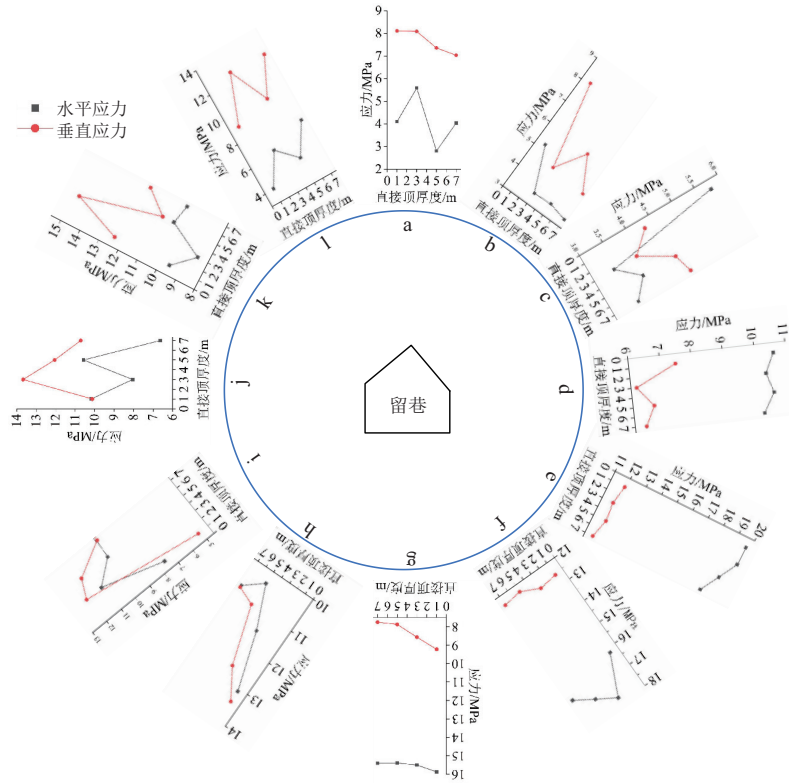


图 15 不同直接顶厚度下留巷周边测点应力变化

Fig. 15 The stress change diagram of the measuring points around the retaining roadway with different direct roof thickness

在实体煤顶板区域(测点 j,k,l 位置)，不同直接顶条件下应力波动剧烈且不具有明显的规律性。因此，碎石柱的形成，可以较好地改变留巷周边的应力环境，有利于留巷围岩稳定。采空区一侧顶板区域经历了采空与矸石堆积形成碎石柱以及碎石柱内矸石承载上覆岩层并压实的过程，该区域对留巷围岩稳定起主导作用，由于碎石柱对上覆岩层的有效承载，可形成卸压区域，在这个区域内，应力绝对值和双向应力差值都有明显的减小趋势，有效地改变了留巷周边应力环境。在直接顶厚度为 3 m 的条件下，形成的碎石柱长度达到最长，此时垂直应力与水平应力差值不超过 1 MPa，所形成的应力环境更有利于留巷围岩稳定；在实体煤帮侧区域留巷围岩较为稳定，该区域应力环境对留巷围岩稳定性的影响弱于采空区一侧顶板区域；在采空区下方及留巷底板区域，留巷围岩稳定性最差。

## 4 大倾角煤层沿空留巷围岩控制技术与应用

### 4.1 大倾角煤层沿空留巷刚柔一体化护巷支架研发

良好的挡杆支架是碎石柱有效形成的前提，然而大倾角条件下，直接顶垮落后，大量矸石下滑对挡杆支架造成冲击，易使支架受损；在碎石柱形成后，随着工作面继续回采，碎石柱会因被进一步压缩，导致其密实度提高，加之周边留巷围岩的进一步破坏，会引起留巷围岩的大变形。因此，确保大倾角煤层沿空留巷围岩稳定的支护结构应具有以下特性：

- 1) 支架本身的强度应能抵御矸石的冲击和留巷周边破碎围岩的重量，并能抑制一部分留巷变形，即支架需具有一定的支护强度和刚度；
- 2) 留巷过程中，围岩产生的大变形所伴随的

强压力远高于支架本身和原有锚杆(索)所能提供的强度,所以留巷支架需具有适应巷道围岩大变形的性能,并且能在围岩大变形过程中提供持续较高的支护阻力,因此支架需要一定的“柔性”;

3) 支架整体结构合理,可与大倾角煤层巷道异形断面相配合,占用留巷空间小,易于安装和拆卸。

据此,研发了大倾角煤层沿空留巷刚柔一体化护巷支架。支架由单侧支撑式结构与高阻可伸缩横梁组成,为确保支架整体具有较高支护强度且在挡矸侧具有足够的抗冲击性能,将高阻可伸缩横梁与单侧支撑式结构连接以保障在矸石快速冲击条件下留巷采空区侧碎石柱的有效形成;同时,单侧支撑式结构在高阻可伸缩横梁与实体巷帮侧的支撑下承载巷道顶板与碎石柱侧的压力。在基本顶断裂旋转下沉过程中,碎石柱内矸石逐渐被压实,同时会引起留巷围岩的大变形。为控制留巷围岩的大变形,设计单侧支撑式结构与高阻可伸缩横梁都为可伸缩结构,单侧支撑式结构设置 3 个铰接点,其可伸缩性可以较好地适应留巷高度与垂直应力的变化;高阻可伸缩横梁,通过其可伸缩的特点,实现与单侧支撑结构上不同铰接点的连接,以适应留巷水平方向位移以及水平应力的变化;两者协同作用,可有效适应沿空留巷围岩大变形。碎石柱与大倾角煤层沿空留巷刚柔一体化护巷支架的组合物可安全控制留巷围岩的稳定性,整个支护系统具备刚性与柔性相结合的特性,能较好地适应留巷围岩应力环境的变化,达到安全护巷的目的,大倾角煤层沿空留巷刚柔一体化护巷支架三维模型如图 16 所示。

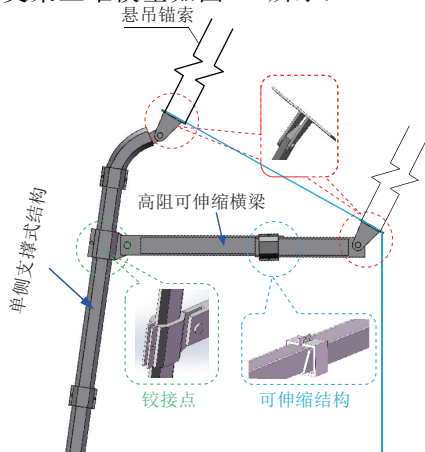


图 16 大倾角煤层沿空留巷刚柔一体化护巷支架三维设计示意

Fig. 16 Three-dimensional design diagram of rigid-flexible integrated roadway support for gob-side entry retaining in large dip angle coal seam

通过在留巷巷旁支护内侧预埋压力测量装置,在花山矿 24152 采煤工作面的邻近 24052 工作面留巷进行了垮落矸石冲击载荷的实测,仪器安装过程及现场照片如图 17 所示。

实测结果显示,在直接顶垮落阶段,支架所受到的垮落矸石最大冲击力约为 0.1 MPa。刚柔一体化护巷支架主梁结构选用矿用 25UY 型钢,其抗拉强度为 560 MPa,采用材料力学中的简支梁力学模型分析,单侧支撑式结构内侧均布荷载<sup>[29]</sup>最大为

$$q = \frac{4R_T z h^2}{3l^2}, \quad (8)$$

式中: $q$  为侧梁内侧均布荷载, kN/m;  $R_T$  为极限抗拉强度, MPa;  $h$  为单侧支撑式结构的高度, mm;  $l$  为单侧支撑式结构主梁的长度, m;  $z$  为单侧支撑式结构的宽度, mm。

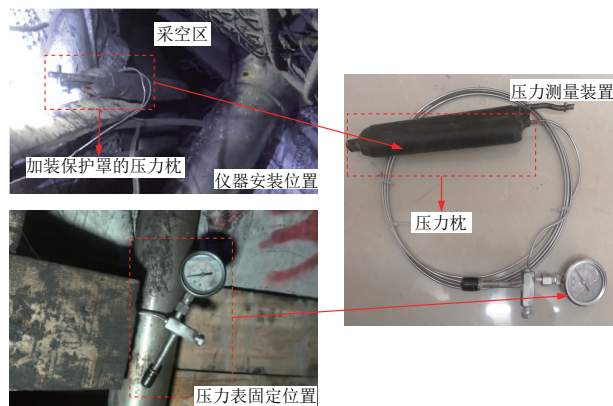


图 17 沿空留巷碎石柱冲击载荷测试方案与仪器  
Fig. 17 Impact load test scheme and instrument of broken stone column in gob-side entry retaining

矿用 25UY 型钢的宽度  $z$  为 130 mm, 高度  $h$  为 110 mm, 极限抗拉强度  $R_T$  为 560 MPa, 单侧支撑式结构侧梁的长度  $l$  取 2.9 m, 代入式(8)可得单侧支撑式结构最大可承受荷载为 165.05 kN/m; 在留巷大变形区域, 支架间距为 0.5 m, 支架支护系统的极限承载力为 0.33 MPa, 可满足抵抗矸石滑落堆积冲击力的要求。

#### 4.2 沿空留巷围岩控制设计及应用

花山矿 24152 采煤工作面煤层倾角为  $30^\circ \sim 38^\circ$ , 煤层厚度为 3.42 m, 直接顶厚度为 2.87 m, 根据理论分析与数值模拟结果可大致确定所形成的碎石柱长度约为 35 m, 结合大倾角煤层沿空留巷稳定机理, 进行沿空留巷围岩支护设计。不同服务阶段巷道围岩支护设计如图 18 所示。图 18a 为超前支护阶段的支护设计, 巷道低帮长 2.0 m, 高帮长 4.0 m, 斜顶长 4.5 m, 底板宽度为 4.0 m, 巷道

顶板与右帮的长度随着煤层倾角变化而改变,即巷道右帮与  $15^{-5^\circ}$  煤层顶板平齐,锚杆(索)排距为 1.0 m. 图 18b 为留巷阶段大倾角煤层沿空留巷刚柔一体化护巷支架,支架间距为 0.8 m,在留巷围

岩大变形区域支架间距为 0.5 m,高阻可伸缩横梁靠下帮顶端、留巷顶板与支架接触处采用尺寸为  $\varnothing 17.8 \text{ mm} \times 6200 \text{ mm}$  的锚索进行锚固.

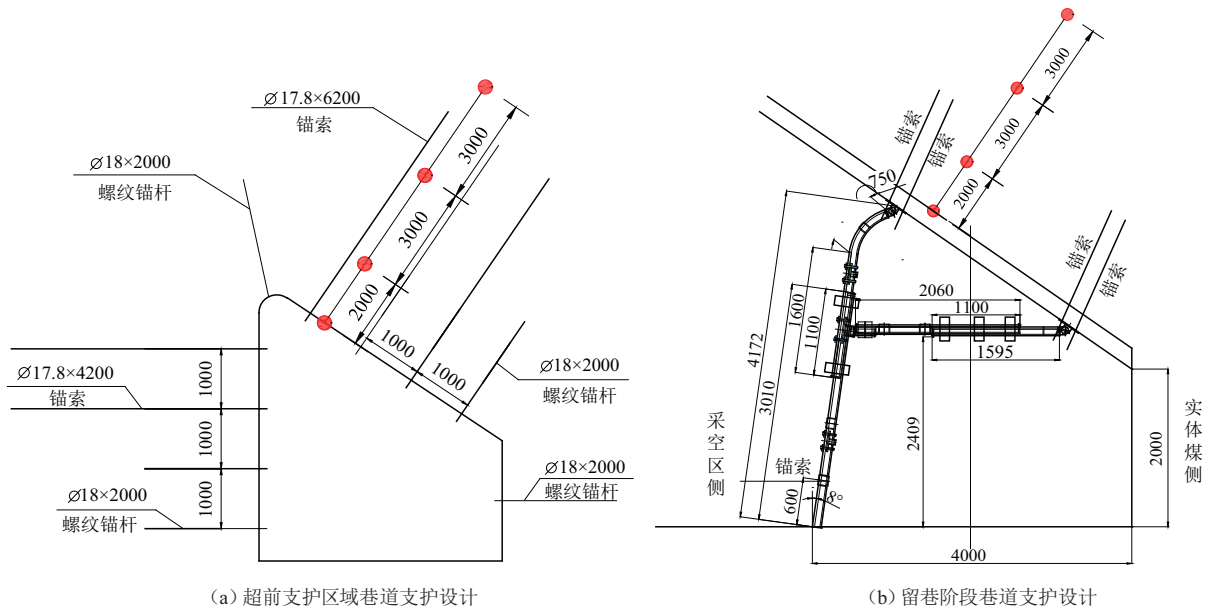


图 18 不同服务阶段巷道围岩支护设计及监测基点布置(单位:mm)

Fig. 18 Surrounding rock support design and monitoring base point layout of roadway in different service stages

### 4.3 工程应用效果

为监测留巷区域留巷顶板稳定性,在超前采煤工作面 50,70 m 处布置了留巷顶板深部位移监测仪,基点深度为煤层倾角垂直方向 2,5,8 m,留巷顶板深部位移测站位置及布置方式如图 18 中红

点所示,当测站距离 24152 工作面后方 120 m 时,监测工作结束,以便能够完全监测沿空留巷在回采过程中的顶板变形. 24152 大倾角采煤工作面留巷顶板深部位移监测结果如图 19 所示.

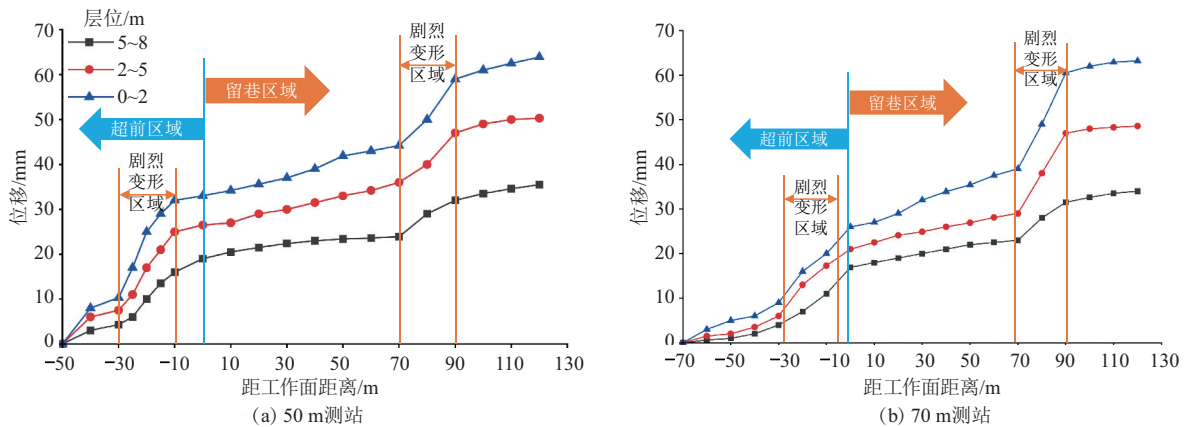


图 19 24152 回采工作面留巷顶板深部位移监测结果

Fig. 19 Monitoring results of deep displacement of entry retaining roof in 24152 working face

监测结果显示,顶板变形破坏较为明显.受采煤工作面超前支承压力与采动的影响,2 个测站分别在超前区域 10~30,0~30 m 与留巷区域 70~90 m 范围内位移变化较大;在留巷区域内,在距采煤工作面后方 0~70,90~120 m 范围内,沿空留巷顶板位移变形趋于稳定,此时大倾角煤层沿空留巷刚柔一体化护巷支架可较好地适应留巷围岩

大变形. 观测期间 2 个测站区域留巷顶板下沉量分别为 145.8,151.7 mm,顶板变形主要集中在 0~2 m 的浅部围岩,主要是由超前支承压力与采动影响发生塑性破坏引发的围岩大变形. 深部层位顶板变形控制效果较好,顶板最大下沉量在支护体允许的范围内,图 20a 为 24152 大倾角采煤工作面沿空留巷断面现场照片.

此外,在留巷过程中,刚柔一体化护巷支架在采空区侧抗冲击性能良好,使得垮落矸石在挡杆侧能形成堆积形态良好的碎石柱. 根据现场观测,碎石柱形态、长度与理论分析、数值模拟结果相吻合,所形成的碎石柱长度约为 35 m,支架充分发挥了刚柔一体化协同作用,在大倾角采煤工作面回采期间,支架无断裂、弯曲变形,焊接处完好. 因此,大倾角煤层沿空留巷应用刚柔一体化护巷支架是安全的、可行的,且支架可回收重复利用,经济效益显著,刚柔一体化支架现场照片如图 20b 所示.

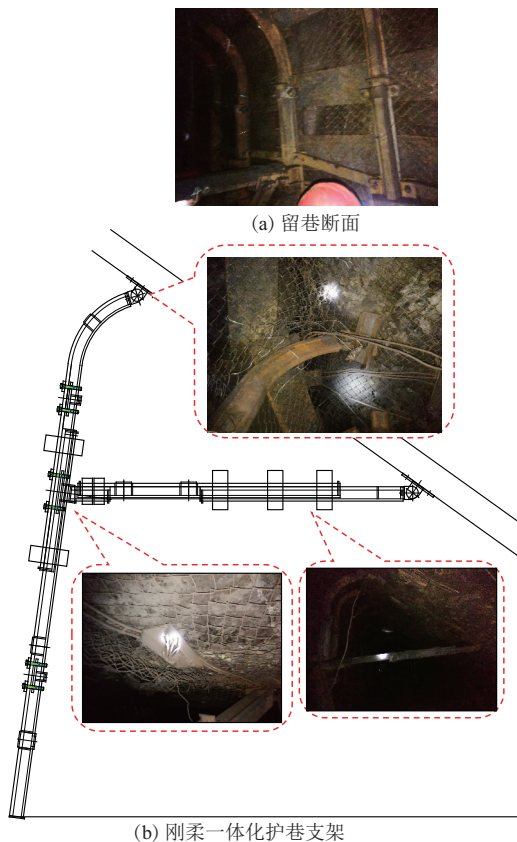


图 20 24152 大倾角采煤工作面沿空留巷现场照片  
Fig. 20 24152 field photos of gob-side entry retaining in large dip angle coal mining face

## 5 结 论

1) 碎石柱堆积形态和密实程度主要受煤层倾角、煤层厚度、直接顶厚度等因素影响. 煤层倾角大于自然安息角是碎石柱形成的前提,采空区碎石柱长度随着煤层倾角的增加而快速增长,随煤层厚度增加而线性减小,然而随着直接顶厚度增加,碎石柱长度呈先增长后减小的趋势;碎石柱密实程度的变化特征与碎石柱形成长度变化特征相对一致,即碎石柱形成长度越大,其密实程度越好.

2) 碎石柱长度与密实程度直接决定了碎石柱的承载特性与留巷周边应力环境状态,在对留巷围岩稳定起主导作用的采空区一侧顶板区域,应力绝对值和垂直应力与水平应力差值具有明显减小的趋势. 在煤层倾角为  $40^\circ$ 、煤层厚度为 3.7 m、直接顶厚度为 3 m 的条件下,留巷周边应力减小区域集中,该区域垂直应力与水平应力差值不超过 1 MPa.

3) 研发了适用于大倾角煤层沿空留巷围岩控制的刚柔一体化护巷支架,该支架由单侧支撑式结构与高阻可伸缩横梁组成,高阻可伸缩横梁与单侧支撑式结构铰接,在留巷围岩大变形过程中,持续保持整体结构稳定,以协同控制留巷围岩大变形. 现场工程实践结果表明,留巷过程中刚柔一体化护巷支架抗冲击挡矸性能优越,留巷围岩整体稳定性较好,顶板最大下沉量为 151.7 mm.

## 参考文献:

- [1] 伍永平, 俞东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采: 进展、实践、科学问题[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 24-34.  
WU Yongping, YUN Dongfeng, XIE Panshi, et al. Progress, practice and scientific issues in steeply dipping coal seams fully-mechanized mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 24-34.
- [2] 胡少轩. 大倾角煤层巷道围岩稳定性分析与控制技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.  
HU Shaoxuan. Study on stability analysis and control technology of surrounding rock in deeply inclined coal seam roadway [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [3] 何满潮, 盖秋凯, 高玉兵, 等. 坚硬顶板无煤柱自成巷碎胀平衡机理与调控研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(5): 831-844.  
HE Manchao, GAI Qiukai, GAO Yubing, et al. Research on the mechanism and control of bulking equilibrium of non-pillar mining with automatic entry formation for hard roof [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(5): 831-844.
- [4] 张自政, 柏建彪, 王襄禹, 等. 我国沿空留巷围岩控制技术进展与展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3979-4000.  
ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Review and development of surrounding rock control technology for gob-side entry retaining in China [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3979-4000.

- [5] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003:271-281.  
QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Rock pressure and strata control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 271-281.
- [6] HUA X Z. Study on gob-side entry retaining technique with roadside packing in longwall top-coal caving technology [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2004, 10(1): 9-12.
- [7] KULAKOV V N. Stress state in the face region of a steep coal bed [J]. Journal of Mining Science, 1995 (9): 161-168.
- [8] LAI X P, SUN H, SHAN P F, et al. Structure instability forecasting and analysis of giant rock pillars in steeply dipping thick coal seams [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2015, 22(12): 1233-1244.
- [9] 谢和平,张吉雄,高峰,等. 煤矿负碳高效充填开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 36-46.  
XIE Heping, ZHANG Jixiong, GAO Feng, et al. Theory and technical conception of carbon-negative and high-efficient backfill mining in coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 36-46.
- [10] 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.
- [11] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展70年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 1-30.  
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1-30.
- [12] 康红普,高富强. 煤矿采动应力演化与围岩控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(1): 1-40.  
KANG Hongpu, GAO Fuqiang. Evolution of mining-induced stress and strata control in underground coal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(1): 1-40.
- [13] 伍永平,皇甫靖宇,解盘石,等. 基于大范围岩层控制技术的大倾角煤层区段煤柱失稳机理[J]. 煤炭学报, 2018, 49(11): 3062-3071.  
WU Yongping, HUANGFU Jingyu, XIE Panshi, et al. Mechanism of instability of section coal pillar in steeply dipping seam based on large-scale strata control technology [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 49(11): 3062-3071.
- [14] WU Y P, XIE P S, YUN D F, et al. Theory and practice of fully mechanized longwall mining in steeply dipping coal seams [J]. Mining Engineering, 2013, 65(1): 35-41.
- [15] 伍永平,皇甫靖宇,王红伟,等. 大倾角走向长壁工作面局部充填无煤柱开采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 280-297.  
WU Yongping, HUANGFU Jingyu, WANG Hongwei, et al. Theory and technology of partial backfill non-pillar mining in longwall faces of steeply dipping coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 280-297.
- [16] XIE P S, HUANG B F, WU Y P, et al. Dip-angle-effect-based deformation and failure law of steeply dipping stope roofs with large mining heights [J]. Archives of Mining Sciences, 2023, 68(3): 507-524.
- [17] 解盘石,黄宝发,伍永平,等. 大倾角煤层伪俯斜采场围岩运移与支架相互作用规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(4): 664-679.  
XIE Panshi, HUANG Baofa, WU Yongping, et al. Study on the interaction between strata movement and support in pitching oblique mining area of steeply dipping seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(4): 664-679.
- [18] 陈 勇,柏建彪,王襄禹,等. 沿空留巷巷内支护技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 903-910.  
CHEN Yong, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Support technology research and application inside roadway of gob-side entry retaining [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 903-910.
- [19] 张自政,柏建彪,陈 勇,等. 沿空留巷充填区域直接顶受力状态探讨与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 1960-1970.  
ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, CHEN Yong, et al. Study on stress state of immediate roof above backfill area in gob-side entry retaining and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1960-1970.
- [20] ZHANG Z Z, DENG M, BAI J B, et al. Stability control of gob-side entry retained under the gob with close distance coal seams [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(2): 321-332.
- [21] 沈 平,姜永东,杨启军,等. 大倾角煤层沿空留巷弓形柔性掩护支架控制技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 37-42.  
SHEN Ping, JIANG Yongdong, YANG Qijun, et al.

- Control technology of flexible bow-shield-supporting system for gob-side entry retaining in highly inclined seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(3):37-42.
- [22] 邹 勇, 姜永东, 杨启军, 等. 急倾斜中厚煤层顶板破断特征及覆岩移动规律[J]. *中国煤炭*, 2023, 49(4):22-28.  
ZOU Yong, JIANG Yongdong, YANG Qijun, et al. Research on the roof breaking characteristics and overburden movement law of steep-inclined and medium-thick coal seam [J]. *China Coal*, 2023, 49(4):22-28.
- [23] 李 腾, 姜永东, 刘华君, 等. 急倾斜大采高综采工作面沿空留巷技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(增 2):1-9.  
LI Teng, JIANG Yongdong, LIU Huajun, et al. Research on gob-side entry retaining technology inclined fully mechanized mining face with large mining height [J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(Sup 2):1-9.
- [24] 伍永平, 解盘石, 贲东风, 等. 大倾角层状采动煤岩体重力-倾角效应与岩层控制[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1):100-113.  
WU Yongping, XIE Panshi, YUN Dongfeng, et al. Gravity-dip effect and strata control in mining of the steeply dipping coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1):100-113.
- [25] POTYONDY D O, OSKAR D. The bonded-particle model as a tool for rock mechanics research and application; Current trends and future directions [J]. *Geosystem Engineering*, 2015, 18(1):1-28.
- [26] 汪 杰, 付建新, 宋卫东, 等. 岩石-充填体组合模型力学特性及微裂纹演化特征颗粒流模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(3):453-462  
WANG Jie, FU Jianxin, SONG Weidong, et al. Particle flow simulation of mechanical properties and microcrack evolution characteristics of rock-backfill combined model [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(3):453-462.
- [27] 赵志强, 马念杰, 郭晓菲, 等. 大变形回采巷道蝶叶型冒顶机理与控制[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(12):2932-2939.  
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, GUO Xiaofei, et al. Falling principle and support design of butterfly-failure roof in large deformation mining roadways [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(12):2932-2939.
- [28] 贾后省, 马念杰, 朱乾坤. 巷道顶板蝶叶塑性区穿透致冒机理与控制方法[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(6):1384-1392.  
JIA Housheng, MA Nianjie, ZHU Qiankun. Mechanism and control method of roof fall resulting from butterfly plastic zone penetration [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6):1384-1392.
- [29] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(I)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009:100-118.  
SUN Xunfang, FANG Xiaoshu, GUAN Laitai. *Material mechanics (I)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009:100-118.

(责任编辑 沈春妮 全 腾)