



# 大倾角厚煤层走向长壁分层开采再生顶板力学行为与稳定控制

池小楼 杨科 付强 张寨男

## 引用本文：

池小楼, 杨科, 付强, 等. 大倾角厚煤层走向长壁分层开采再生顶板力学行为与稳定控制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 1-10.

CHI Xiaolou, YANG Ke, FU Qiang. Mechanical behavior and stability control of regenerated roof in long wall stratified mining of thick steeply dipping coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 1-10.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0334>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制与防控技术

Catastrophe mechanism and prevention and control technology on soft coal mining with large inclination angle under thick and hard roof

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 12-20 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.002>

#### 大倾角煤层长壁综采支架典型应用实例及改进研究

Typical application examples and improvement research of hydraulic powered support applied to fully-mechanized longwall coal mining face in steep dipping seam

煤炭科学技术. 2017(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c7a6448b-51b0-43e0-862d-c7b4deb9040b>

#### 大倾角长壁工作面飞矸灾害区域治理技术

Flying gangue regional control technology in longwall mining face of steeply dipping seam

煤炭科学技术. 2017(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ff2c28d5-8638-406b-9262-19bfa7446c18>

#### 大倾角过断层综采工作面支架失稳机理及控制技术

Mechanism and control technology of support instability in fully-mechanized mining face in thick coal seam with large dip angle and fault

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 16-22 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d602a4ea-91fc-4576-97ce-e8db6893dc71>

#### 厚煤层沿空留巷围岩综合控制技术

Comprehensive control technology of surrounding rock for gob-side entry retaining in thick coal seam

煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fb808854-bfa7-4ef6-a6a1-52030ecc96c9>

#### 深部中厚煤层切顶留巷围岩变形规律与控制研究

Study on deformation law and control of surrounding rock in roofcutting gateway retained along goaf in deep medium thick seam

煤炭科学技术. 2018(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/86b54ee0-6094-48d1-9fc4-4d729db0f02a>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 采矿科学与工程



池小楼,杨科,付强,等.大倾角厚煤层走向长壁分层开采再生顶板力学行为与稳定控制[J].煤炭科学技术,2023,51(6):1-10.

CHI Xiaolou, YANG Ke, FU Qiang, et al. Mechanical behavior and stability control of regenerated roof in long wall stratified mining of thick steeply dipping coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 1-10.

移动扫码阅读

## 大倾角厚煤层走向长壁分层开采再生顶板 力学行为与稳定控制

池小楼<sup>1,2</sup>,杨科<sup>1,2</sup>,付强<sup>1,2</sup>,张寨男<sup>1,2</sup>

(1.安徽理工大学 矿业工程学院,安徽淮南 232001;2.安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽淮南 232001)

**摘要:**针对大倾角厚煤层走向长壁分层开采再生顶板稳定性控制工程难题,结合淮南潘北煤矿1212(3)厚煤层分层工作面地质与工程条件,综合运用矸石侧限压缩试验、三维成像钻孔探测试验以及物理模拟与数值模拟等研究方法,分析了含水率、压缩率和粒径级配等因素对矸石压缩特性的机理及其对再生顶板稳定性影响程度的关联特征,获得了再生顶板结构特征与应力状态,揭示了再生顶板采动力学行为,制定了再生顶板稳定性控制措施,评价了再生顶板稳定性控制效果。研究结果表明:采空区泥岩与砂质泥岩黏土矿物含量高,利于矸石二次胶结;矸石受载压缩过程中的接触状态与应力状态不断调整,表现为再生顶板结构垂向上,下部与上部矸石压缩胶结程度均高于中部,倾向上,中上部矸石压缩胶结程度最小,再生顶板更易破坏;矸石粒径级配是影响再生顶板抗剪强度的主要因素,随矸石粒径增大,再生顶板表现出沿剪切线滑移到矸石颗粒错动鼓出的延性破坏,即再生顶板倾向下部采动破断剧烈程度较中上部缓和,中上部是再生顶板稳定性控制的重点防控区;主应力偏转驱动下分层采场空间不同区域再生顶板破断,提出再生顶板冒顶和煤壁片帮注浆与架棚加固方案,通过监测煤壁片帮深度与支架压力,再生顶板稳定性控制效果良好。

**关键词:**大倾角厚煤层;重复采动;再生顶板;分层开采;围岩控制

**中图分类号:**TD325   **文献标志码:**A   **文章编号:**0253-2336(2023)06-0001-10

## Mechanical behavior and stability control of regenerated roof in long wall stratified mining of thick steeply dipping coal seam

CHI Xiaolou<sup>1,2</sup>, YANG Ke<sup>1,2</sup>, FU Qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhainan<sup>1,2</sup>

(1. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** This study focused on the stability control of roof in long wall stratified mining of large dip angle thick coal seam. Taking Panbei Coal Mine in Huainan as an example, the effect mechanism of water content, compression ratio and grain size grading on the compression characteristics of gangue is analyzed by comprehensive application of gangue lateral compression test, 3D imaging borehole detection test, physical simulation and numerical simulation method. In addition, the effect of these factors on the stability of the reclaimed roof were also analyzed, the structural characteristics and stress state of the reclaimed roof were obtained, the dynamic behavior of the reclaimed roof was revealed, the stability control measures of the reclaimed roof were formulated, and the control effect of the reclaimed roof stability was evaluated. The research results indicate that the clay minerals of goaf mudstone and sandy mudstone are beneficial for the secondary cementation of gangue. The contact state and stress state of the gangue during compression under load are constantly adjusted, manifested as the compression and bonding degree of the lower and upper gangue being higher than that of the middle, with the compression and bonding degree of the middle and upper gangue being the smallest, and the regenerated roof being more prone to damage. The

收稿日期:2023-03-01    责任编辑:朱恩光    DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0334

基金项目:中国博士后科学基金面上资助项目(2022M721296);安徽理工大学高层次引进人才科研启动基金资助项目(2021yjrc10)

作者简介:池小楼(1992—),男,山东菏泽人,讲师,博士。E-mail: xlchi@aust.edu.cn

通讯作者:杨科(1979—),男,四川叙永人,教授,博士。E-mail: yksp2003@163.com

particle size distribution of gangue is the main factor affecting the shear strength of recycled roof. As the particle size of the gangue increases, the regenerated roof exhibits ductile failure that slides along the shear line to the staggered and bulging of the gangue particles. That is, the degree of mining fracture in the lower part of the regenerated roof tends to be milder than in the middle and upper parts, and the middle and upper parts are the key prevention and control areas for the stability control of the regenerated roof. The deflection of the main stress can lead to the fracture of the regenerated roof, so a plan for the collapse of the regenerated roof and the grouting.

**Key words:** steeply dipping thick coal seam; repeated mining; regenerated roof; stratified mining; surrounding rock control

## 0 引言

大倾角( $35^\circ \sim 55^\circ$ )厚煤层广泛分布于我国各大矿区,且60%以上为优质焦煤或无烟煤,在我国煤炭资源开发中占据相当大的比例<sup>[1]</sup>。受大倾角厚煤层开采与非开采因素交互影响,以两淮矿区为典型代表赋存大倾角、厚(4~6 m)、松软(普氏系数 $f=0.1 \sim 0.8$ )、高瓦斯(相对瓦斯涌出量 $10 \sim 36 \text{ m}^3/\text{t}$ )和高承压富水松散层特征的难采煤层,常采用走向长壁分层开采<sup>[2-3]</sup>。区别于一次采全高,分层开采过程中的顶板漏冒、煤壁片帮、支架倒滑和飞矸伤人等灾害更为频繁,且较难控制<sup>[4-7]</sup>。对于下分层而言,再生顶板稳定性亦是大倾角厚煤层安全高效分层开采的核心问题,在我国部分矿井已是当务之急。因此,实现大倾角厚煤层安全高效分层开采对保障我国“易采”与“难采”煤炭资源并行可持续开发具有重要意义。

在厚煤层分层开采中,上分层采空区矸石在上覆岩层载荷作用下逐渐压实,胶结成具有一定强度的再生顶板<sup>[8-9]</sup>。矸石压实胶结能力直接影响再生顶板强度,因此,分析多种因素影响下的矸石压缩特性,获得再生顶板胶结强度参数及其重复采动后的力学行为特征,将是保障下分层再生顶板稳定性的关键。目前矸石侧限压缩特性研究主要集中在采空区充填开采领域<sup>[10]</sup>,有关专家学者通过建立考虑矸石粒径和多种颗粒介质及接触界面的颗粒流模型<sup>[11-13]</sup>,发现多数力链集中在较大矸石颗粒单元附近,形成“骨架力链”现象,裂纹亦主要产生在较大矸石颗粒单元周围,揭示了矸石骨料和胶结材料等因素对矸石在承载过程中瞬时与蠕变压缩变形的影响机制<sup>[14]</sup>。下分层开采迫使再生顶板结构活化,相较于完整岩体在不同应力路径与加载围压条件下的强度特征、变形参数和破坏模式,再生顶板破断力学参数与矸石粒径级配等因素存在密切联系<sup>[15]</sup>。

综上所述,众多学者研究了矸石压缩过程中的强度与变形特征,得到了系列压实参数随时间等变化规律。但大倾角厚煤层走向长壁分层开采中,上分层顶板垮落矸石在自重倾向分量作用下,沿底板向下滚/滑,形成矸石粒径在采空区倾向“上大下小”

的非均匀充填带<sup>[16]</sup>,受采空区空间不同区域应力状态与矸石粒径级配等因素影响,再生顶板强度与变形特征的非对称性显著。下分层开采中,在重复采动应力驱动作用下,再生顶板结构二次活化,破断力学参数的区域效应亦将显著。因此,掌握再生顶板压实胶结状态及其采动力学行为将显得尤为重要。笔者首先测定了采空区泥岩和砂质泥岩2种岩性矸石的矿物种类及含量,分析微观形态结构;然后采用自制的压缩装置对矸石进行侧限压缩正交试验,分析含水率、压缩率和粒径级配等因素对矸石压缩特性的影响规律,分析各因素对再生顶板剪切破坏的敏感度;最后通过现场钻孔窥视、数值模拟与物理模拟结果综合分析再生顶板采动力学行为,提出再生顶板稳定性控制措施,并进行现场效果评价。

## 1 工程概况与矸石矿物成分测定

### 1.1 研究工作面条件

安徽淮南潘北煤矿13号煤层赋存稳定,平均埋深435 m,平均倾角45°,平均厚度5.5 m,普氏系数 $f$ 为0.3~0.5;煤层顶板依次为厚2.5 m泥岩、厚6.8 m砂质泥岩,底板为厚3 m泥岩、厚4.6 m砂质泥岩,泥岩与砂质泥岩硬度系数较低,平均普氏系数 $f$ 为3,属于大倾角“三软”煤层。

1212(3)工作面东起-490 m西翼采区石门,西至十东线附近,南至-400 m等高线,北至-460 m等高线,工作面东侧为潘北矿工业广场保护煤柱,如图1所示。上分层6年前已回采完毕,平均采高2.5 m,斜长120 m;下分层平均采高3.0 m,斜长90 m,综合机械化采煤方法,全部垮落法管理顶板。

### 1.2 采空区矸石矿物成分测定

根据现场勘查,上分层采空区主要由岩性为泥岩与砂质泥岩的矸石组成。为了解泥岩和砂质泥岩胶结能力,测定了2种岩性矸石的矿物种类与含量,如图2所示,2种岩性矸石矿物成分均含石英、云母与绿泥石,其中,泥岩矿物成分中石英含量33.2%,砂质泥岩为28.2%,构成了各自的固相骨架;泥岩黏土矿物中绿泥石含量31.8%,砂质泥岩为14.1%,泥岩胶结能力强于砂质泥岩。

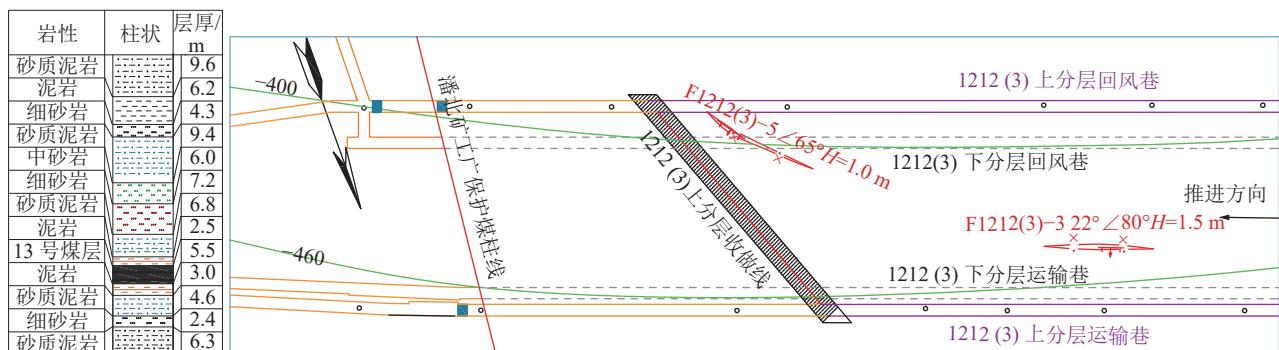


图1 工作面综合柱状与布置

Fig.1 Comprehensive columnar and layout of working face

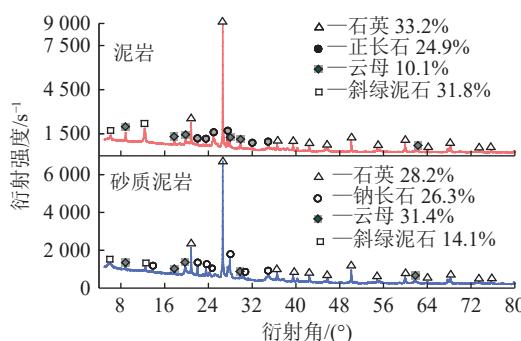


图2 砾石矿物成分组成

Fig.2 Composition of gangue minerals

泥岩与砂质泥岩断口微观形貌结构如图3所示,受黏土矿物含量差异,泥岩断面平整,泥质胶结且致密;砂质泥岩断口微孔洞发育,凹凸不平,可见大小不均、随机分布、棱角分明的石英与长石颗粒,表面附着鳞片黏土矿物。在煤层倾角影响下,上分层开采泥岩和砂质泥岩破断块体沿采空区向下滚/滑并充分混合,在上覆岩层载荷作用下,黏土矿物易挤入2种岩性砾石断口微孔洞而固结形成下分层再生顶板。

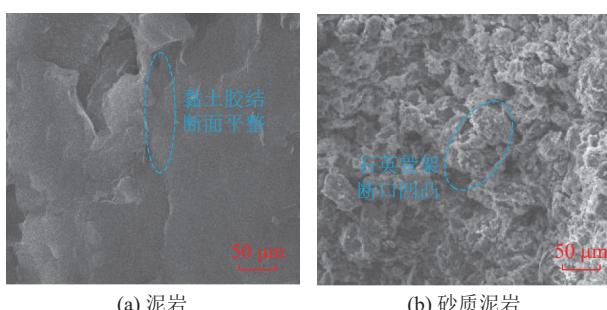


图3 砾石微观形貌结构

Fig.3 Microstructure of gangue

## 2 砾石压缩特性与再生顶板稳定性

### 2.1 试验设计

考虑到砾石粒径尺寸效应影响,根据有关专家学者研究<sup>[17-19]</sup>,要求试样直径与砾石最大粒径的比

值  $D/d_{\max} \geq 5$ ,本次试验模具直径 50 mm,试验选取最大砾石粒径 10 mm。将现场采集的大块砾石经破碎机破碎,通过分级筛筛选得到 4 种粒径级配( $<1$  mm、 $1 \sim 3$  mm、 $3 \sim 5$  mm、 $5 \sim 10$  mm)的泥岩和砂质泥颗粒。

选取砾石压缩影响因素中含水率、压缩率、粒径级配与体积级配进行 4 因素 4 水平正交试验,选取正交表为 L16(45),见表 1。上分层回采后,取冒落砾石的碎胀系数 1.7<sup>[20]</sup>,砾石在上覆岩层载荷作用下重新压实、固结,取砾石残余碎胀系数 1.4<sup>[20]</sup>,计算得砾石压缩率为 17.6%。基于分析,取压缩率因素的 4 个水平为 18%、21%、27%、30%,压缸中颗粒填充高度 135 mm,则对应压缩量为 24.3、28.4、36.5、40.5 mm。含水率因素的 4 个水平设置为 5%、6%、7%、8%,根据正交试验设计原则,共设计 16 组试验。

表1 正交试验的因素和水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	含水率/%	压缩率/%	粒径级配	体积级配
1	5	18(24.3 mm)	$\leq 1$	砂质泥岩
2	6	21(28.4 mm)	1~3	泥岩
3	7	27(36.5 mm)	3~5	$V(\text{砂质泥岩}):V(\text{泥岩})=2:1$
4	8	30(40.5 mm)	5~10	$V(\text{砂质泥岩}):V(\text{泥岩})=1:2$

注:括号内为压缩量。

压缸由内径 50 mm、高 140 mm 的高强钢自制而成,包括双开缸筒、底座、紧固圈与压头。侧限压缩加载采用 WAW-2000 岩石万能试验机,位移加载,速率 0.01 mm/s,加载至设定值后试验机稳压,时间 5 min。依据 GB/T 23561 系列标准第 11 部分煤和岩石抗剪强度测定方法,设计 3 组圆柱内径 50 mm、高 50 mm 的变角剪切夹具(45°、50°、55°),测定再生顶板抗剪强度,计算黏聚力与内摩擦角。试验前在模具剪切面涂抹润滑油,减小试验过程上下剪切面

间摩擦。采用高清数码摄像机拍摄再生顶板剪切破坏过程,试验设计如图4所示。

## 2.2 研石侧限压缩力学特性

研石侧限压缩过程应力-时间动态演化可划分为初始调整、应力上升和压密固结3个时期,如图5所示,压缩初期研石颗粒松散、棱角分明,表现出压缩变形量大,持续时间长(约占总压缩时长的50%),压实应力小(约占总压实应力的10%)的特点,细小研石颗粒填充空隙,接触状态调整缓慢;随压缩行程增

加,研石颗粒间呈密实接触,研石颗粒棱角相互挤压-破碎-细化,黏土矿物迁移充填断口石英骨架,加速研石颗粒间接触状态调整,2种岩性研石逐渐胶结,应力状态向三轴应力状态转变,进入应力上升期,此时期压实应力呈指数增长(约占总压实应力的48%);随压缩行程进一步增加,进入形变量小、持续时间短、压实应力变化小的压密固结期,最终形成以粗粒径研石颗粒为骨架、细粒径岩块充填空隙的再生顶板。

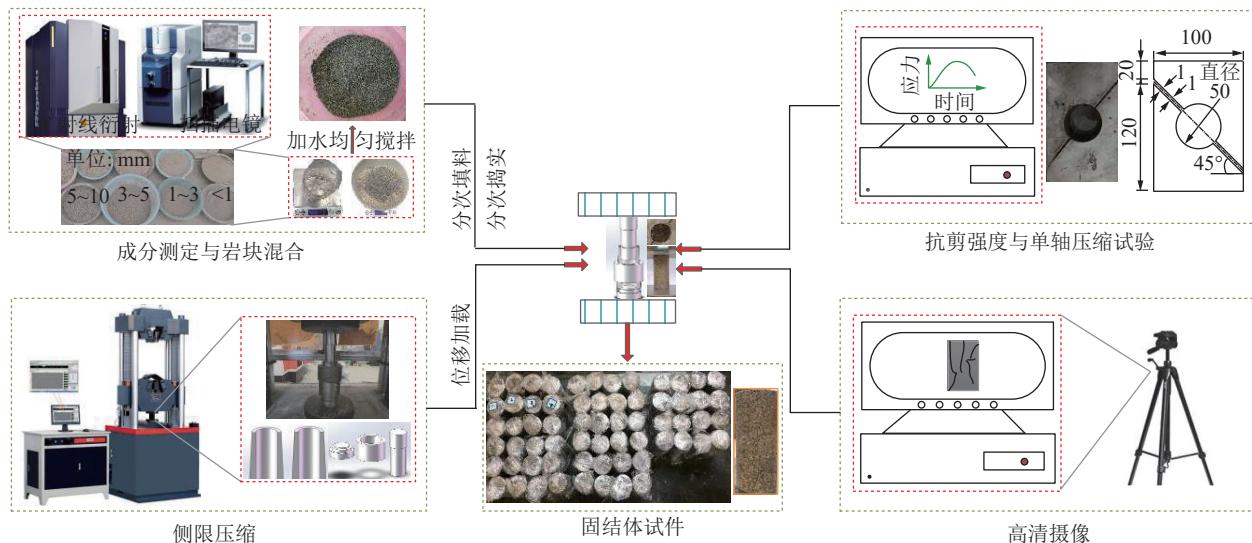


图4 研石侧限压缩与再生顶板剪切试验设计

Fig.4 Side limited compression of gangue and shear test design of regenerated roof

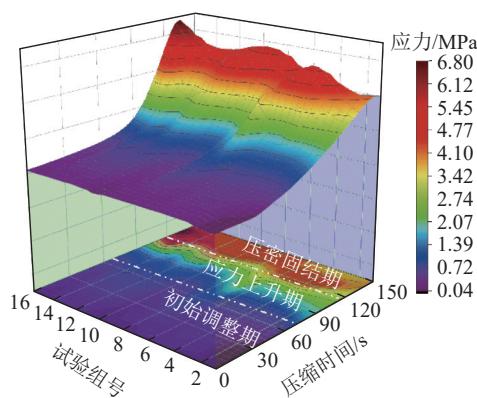


图5 研石压缩过程应力-时间演化

Fig.5 Stress-time evolution of gangue compression process

采用多元非线性回归方法,借助Matlab软件,分析含水率、压缩率、粒径级配因素对研石颗粒压实应力影响程度,将获得的数学模型进行3D可视化显示,如图6所示,研石颗粒粒径越小、压缩率越大、含水率越高,压实应力越大。大倾角厚煤层走向长壁上分层开采中,采空区自上而下研石破碎程度在其垮落-滚/滑过程中逐渐增强,在上覆岩层载荷作用下,

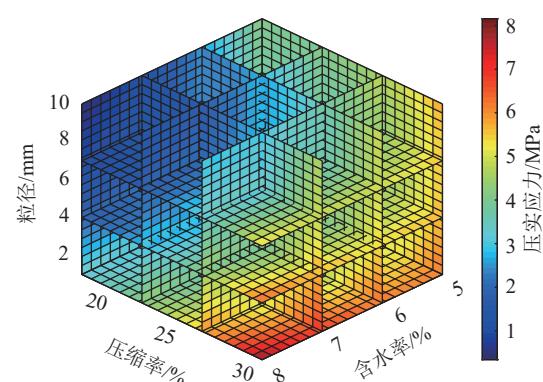


图6 多因素影响研石压实应力3D显示

Fig.6 3D display of compaction stress of gangue under influence of multiple factors

研石压缩密实程度亦表现出非对称特征,具体为自下而上再生顶板结构胶结密实至空洞发育的特征。

## 2.3 再生顶板剪切滑移特征

采用自制变角剪切夹具,试验获取3种角度下典型再生顶板抗剪强度与加载时间曲线,如图7所示,角度越大,再生顶板抗剪强度降低,且表现出较

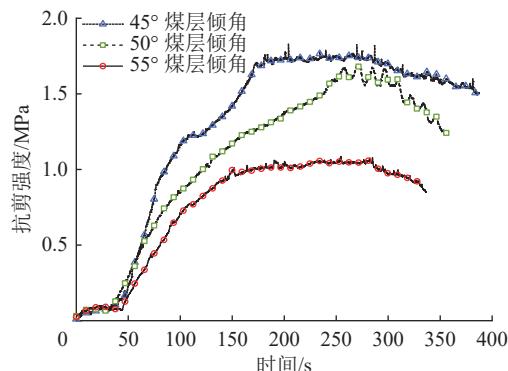


图 7 典型再生顶板抗剪强度与加载时间曲线

Fig.7 Curve of shear strength and loading time of typical regenerated roof

强的延性破坏特征。剪切试验初期,再生顶板二次压缩,细粒径砾石持续填充空隙;随着压力机载荷升高,再生顶板抗剪能力一方面靠断口黏土矿物间的胶结程度,另一方面则为砾石棱角嵌合处岩石自身强度,剪切夹具角度越大,在高剪应力作用下再生顶板内部结构中的砾石颗粒回转增强,抗剪强度波动明显,砾石棱角嵌合能力降低,再生顶板抵抗剪切滑移破坏能力降低。

大倾角厚煤层走向长壁下分层开采迫使再生顶板结构二次活化,且煤层倾角越大,在平行岩层层面方向的切向载荷作用下再生顶板发生剪切滑移破坏越强,相较于完整岩体破断力学特性和剪切变形,再生顶板的破断力学参数与含水率、压缩率、粒径级配与体积级配等存在密切联系。基于 16 组抗剪强度试验数据,求出 3 种角度下的正应力与剪应力,计算获得再生顶板黏聚力与内摩擦角,见表 2。将影响砾石黏聚力与内摩擦角的 4 个因素中相同水平求平均值,继而求得 4 个因素极差值,如图 8 所示,试验因素中砾石粒径级配极差均高于含水率、压缩率与体积级配,砾石粒径级配对再生顶板黏聚力和内摩擦角极差的敏感度最高,对再生顶板剪切强度参数影响程度由大到小依次为粒径级配、压缩率、含水率、体积级配。

为进一步分析粒径级配对再生顶板抗剪强度影响,分析 4 种粒径级配下再生顶板剪切破坏特征,如图 9 所示,再生顶板表现出沿剪切面裂纹萌生扩展形成剪切线到沿剪切面不规则变形形成剪切槽再到沿剪切面岩块挤碎鼓出而错动掉落的延性破坏特征。

粒径较小时,砾石颗粒间空隙调整充分,断口接触面广,侧限压缩下泥岩与砂质泥岩砾石中黏土矿物在颗粒断口表面二次胶结程度高,形成的再生顶板结构密实;粒径越大,再生顶板抵抗剪切破坏的方

表 2 抗剪强度试验结果  
Table 2 Shear strength test results

试验编号	含水率水平	压缩量水平	粒径水平	体积级配水平	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1	1	1	1	1	0.175	31.65
2	1	2	2	2	0.154	39.27
3	1	3	3	3	0.147	38.41
4	1	4	4	4	0.310	34.64
5	2	1	3	4	0.088	42.12
6	2	2	4	3	0.094	40.55
7	2	3	1	2	0.396	31.75
8	2	4	2	1	0.145	28.09
9	3	1	4	2	0.147	42.11
10	3	2	3	1	0.132	35.82
11	3	3	2	4	0.151	41.35
12	3	4	1	3	0.291	36.87
13	4	1	2	3	0.104	41.35
14	4	2	1	4	0.154	40.62
15	4	3	4	1	0.160	41.43
16	4	4	3	2	0.119	42.26

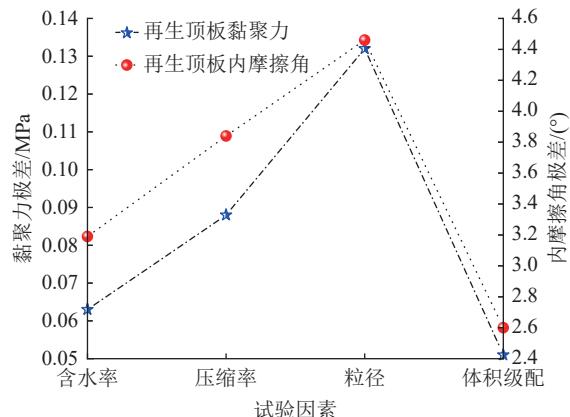


图 8 多因素影响再生顶板剪切强度参数敏感度  
Fig.8 Multiple factors affecting the sensitivity of shear strength parameters of regenerated roof

式主要为砾石棱角接触面的胶结程度与砾石棱角处岩石自身强度。从图 9 亦可知,细粒径砾石压缩胶结再生顶板抵抗剪切破坏的能力高于粗粒径砾石,反映至大倾角厚煤层走向长壁下分层开采过程中,工作面下部再生顶板采动破断剧烈程度较中上部缓和,即下分层中上部是再生顶板稳定性控制的重点防控区。

### 3 再生顶板钻孔内裂纹数量与方位

为进一步掌握再生顶板结构特征,在大倾角厚

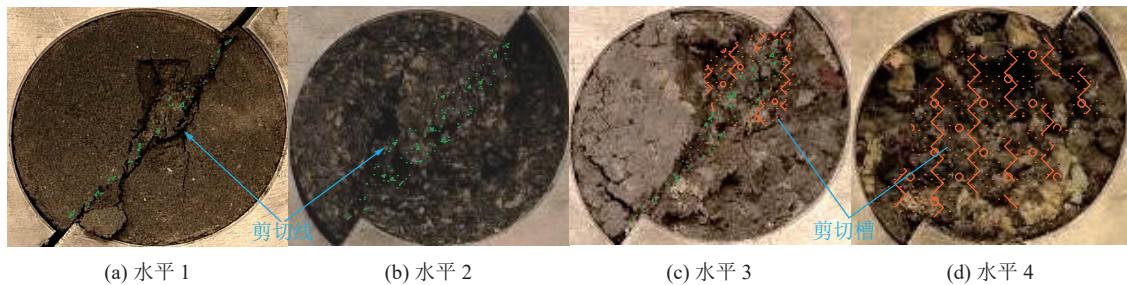


图9 不同粒径水平胶结再生顶板剪切破坏特征

Fig.9 Shear failure characteristics of cemented regenerated roof with different particle sizes

煤层走向长壁下分层开切眼倾向上中下区域布置3个深8 m、内径32 mm的钻孔,具体钻孔位置如图10所示,按每隔1.25 m钻孔深度绘制孔壁裂纹数量与方向玫瑰花图。1~3号钻孔,在长0~1.25 m裂纹数量分别为3、2、1条,长1.25~2.50 m裂纹数量分别为9、8、4条,长2.50~3.75 m裂纹数量分别

为6、5、5条,长3.75~5.00 m裂纹数量分别为5、4、3条。综合分析可知,再生顶板结构垂直方向上,下部与上部研石压缩胶结程度均高于中部;再生顶板结构在煤层倾斜方向上,下部研石压缩胶结程度最高,上部最小,中部次之,即再生顶板在其倾向与垂向上的压缩胶结状态均呈非对称特征。

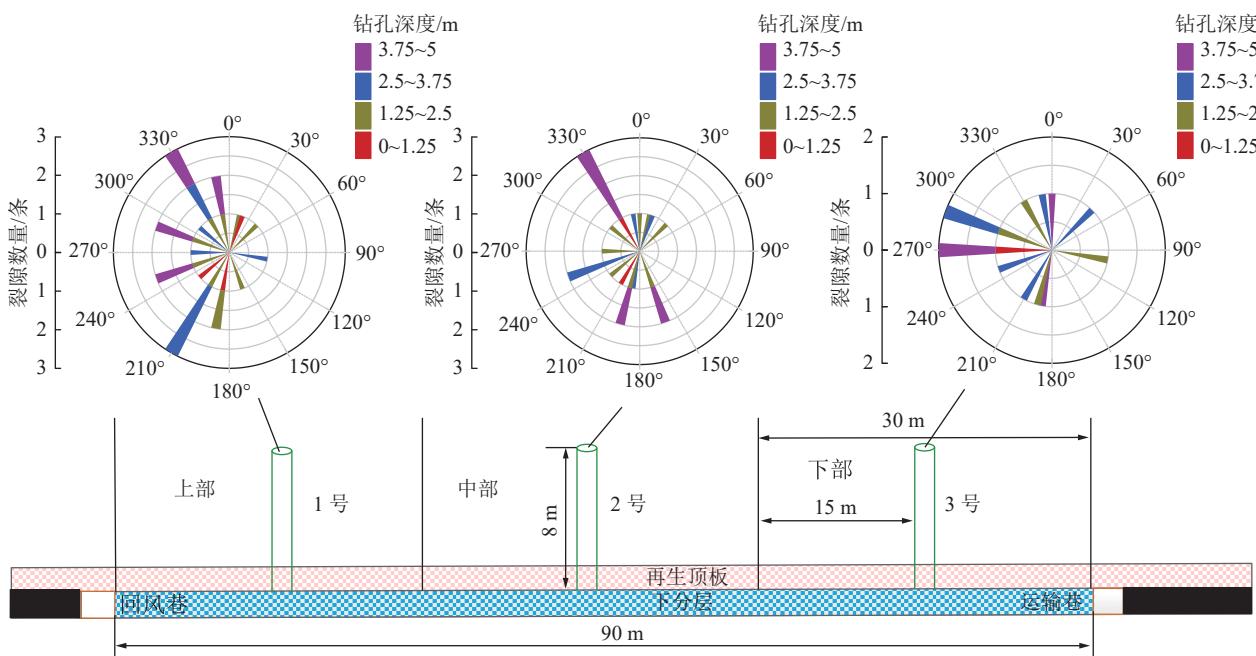


图10 钻孔孔壁裂纹数量与方位

Fig.10 Number and orientation of cracks in borehole wall

1号孔壁裂纹方位分布中,5条分布在0°~180°范围,18条分布在180°~360°;2号孔壁裂纹方位分布中,5条分布在0°~180°,14条分布在180°~360°;3号孔壁裂纹方位分布中,2条分布在0°~180°,11条分布在180°~360°。综合分析可知,3个钻孔孔壁裂纹方位主要分布在180°~360°区域,下分层开切眼3个钻孔的正N方位在实际方位的南偏西20°方向,如图1所示,即3个钻孔中的孔壁裂纹方位主要分布在20°~200°区域,即再生顶板胶结主要受真方位角北偏西方向应力场影响较大。大倾角煤层地质

构造往往较为复杂,在上分层采空区复杂应力环境下,胶结形成的再生顶板结构特征区域效应显著。

## 4 再生顶板采动力学行为与稳定控制

### 4.1 再生顶板采动力学行为

大倾角厚煤层走向长壁下分层再生顶板复杂采动力学行为是内因和外因综合作用的结果,内因是多因素影响研石受载胶结再生顶板形成过程(再生顶板结构特征),外因是二次采动应力场非均匀演化驱动再生顶板破断(再生顶板所处应力环境)。通过

研石侧限压缩、再生顶板剪切破坏与现场钻孔窥视试验,并结合笔者前期研究<sup>[21-22]</sup>工作发现,煤层倾角影响倾向研石粒径级配,在采空区复杂应力环境下,再生顶板在其倾向与垂向上的压缩胶结状态均呈非对称特征;下分层开采打破一次采动应力的平衡状态,再生顶板倾向受研石粒径级配影响,其主应力大小渐变与方向偏转亦呈非对称特征,具体表现出下部主应力大小高于中上部,中上部主应力方向旋转明显,如图 11 所示。

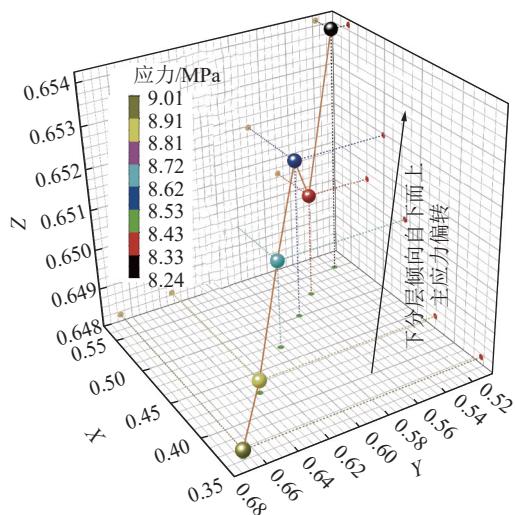


图 11 再生顶板倾向主应力矢量

Fig.11 Regenerative roof dip principal stress vector

研石粒径级配影响再生顶板结构状态,粒径越小,再生顶板内部胶结密实,随着粒径增大,再生顶板内部裂隙增多,下分层开采引起主应力方向与再生顶板裂隙面夹角向优势裂隙扩展角转变,再生顶板承载能力在倾向由下而上逐渐降低,且在垂向上均以中下部首先发生破坏为主,如图 12 所示。

主应力偏转驱动下分层采场空间低位悬臂梁结构持续离层、破断与滑移,位移矢量呈垂直与平行煤层方向,高位铰接岩梁下方出现离层,在达到极限跨距时而发生弯曲下沉,位移矢量呈垂直煤层方向,“双梁”层间横向与竖向裂纹发育;二次破断研石粒径更小,易在架间与架前漏冒,下分层空间不同区域研石充填特征表现为下部密实、粒径小,中部形态规则、粒径变大,上部形态不规则、密实程度低,支架易接顶不实、护帮无力,易发煤壁片帮,如图 13 所示。

#### 4.2 再生顶板稳定性控制

受煤层倾角影响,再生顶板结构与破断特征均表现为非对称特征。因此,为控制大倾角厚煤层走向长壁下分层开采再生顶板稳定性,沿煤壁与再生顶板交界处施工仰角 15°~20°、孔径 43 mm 的注浆

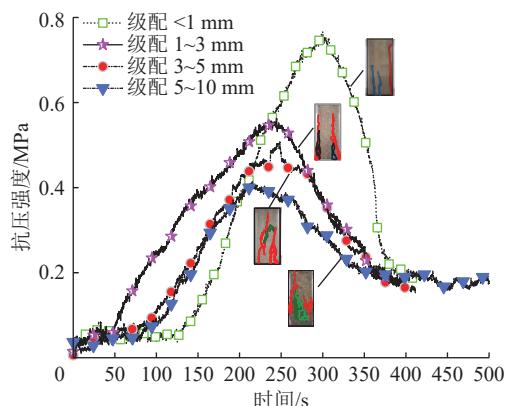


图 12 典型再生顶板抗压强度与加载时间曲线  
Fig.12 Curve of typical recycled roof compressive strength and loading time

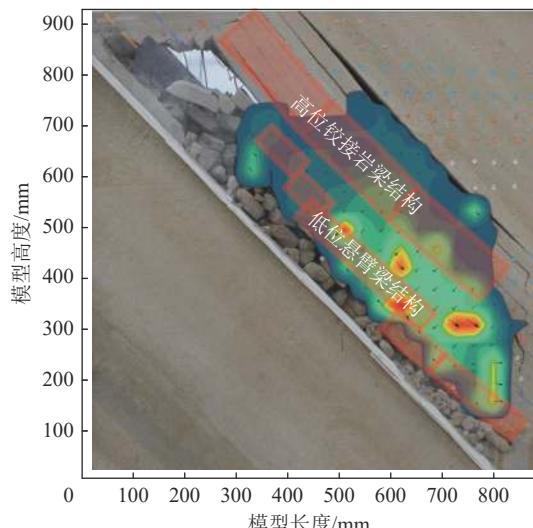


图 13 再生顶板破断特征  
Fig.13 Fracture characteristics of regenerated roof

钻孔(图 14 蓝色),采用久米纳矿用无机加固注浆材料,两钻孔距离为 3~5 m,交叉施工的顺煤层钻孔距离再生顶板 0.5~1.5 m(图 14 红色)。

除注浆加固外,在下分层支架顶梁和再生顶板接触面铺设规格为 5.0 m×1.0 m、网孔为 40 mm×40 mm 的菱形 10 号编织孔金属网,采用 16 号铁丝联网,联网距应大于 200 mm;对于下分层下部再生顶板胶结研石粒径细,更易架间漏冒,采用铺设双层金属网措施控制再生顶板漏冒。若再生顶板在架前漏网,煤壁片帮,采取支架前探梁架 1~2 根直径大于 0.16 m 的走向棚,走向棚一端架于支架前探梁,且搭接距离大于 0.3 m,另一端架在煤帮顶板上,使用合适的单体支撑走向棚,必要时使用顺山棚托住走向棚,其上用木料接实再生顶板;架间漏网,采用在支架前探梁结网方式防治兜网现象,现场施工如图 15 所示。

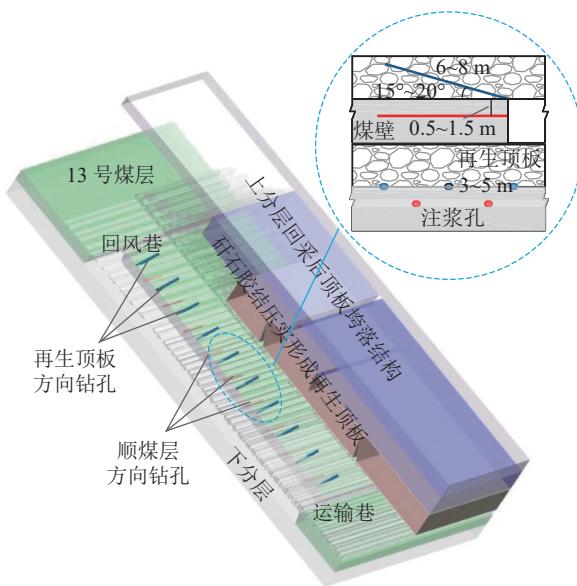


图 14 再生顶板与煤壁注浆加固措施

Fig.14 Grouting reinforcement measures of regenerated roof and coal wall

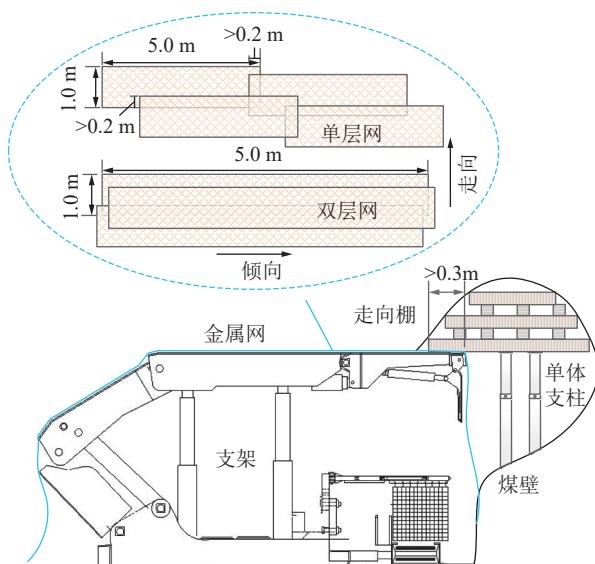


图 15 再生顶板与煤壁铺网架棚防漏措施

Fig.15 Leakage prevention measures of grid shed for regenerated roof and coal wall

#### 4.3 再生顶板稳定性控制效果评价

统计分析大倾角厚煤层走向长壁下分层退尺 102~249 m 间煤壁片帮位置与深度以及支架工作阻力值(支架编号沿采场倾向自下而上依次为 1~56 号), 如图 16 与图 17 所示。下分层回采过程中, 煤壁片帮主要集中在工作面上部, 整个回采过程片帮深度在 5~15 cm, 高于 20 cm 深度的片帮位置较少。工作面支架工作阻力分布呈现中上部高于下部的非对称特征, 随着系列再生顶板与煤壁防控措施的实施, 支架工作阻力高于 20 MPa(矿井规定的

支架工作阻力下限值)的位置分布逐渐由下部转移至中部继而转移至上部, 说明下分层下部再生顶板控制效果良好, 研石在架间与架前无漏冒, 支架工作阻力大小为 22~26 MPa, 中上部再生顶板结构演化较下部剧烈, 支架工作阻力高, 大小在 34~38 MPa。

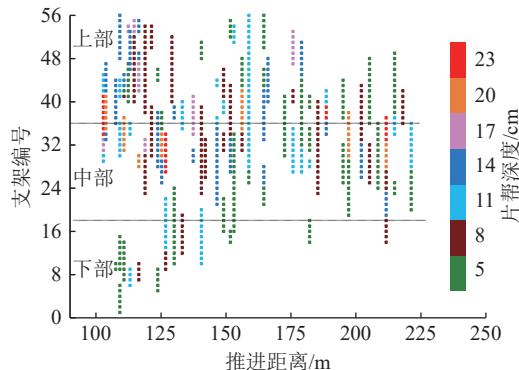


图 16 片帮深度统计

Fig.16 Statistics of the depth of coal wall spalling

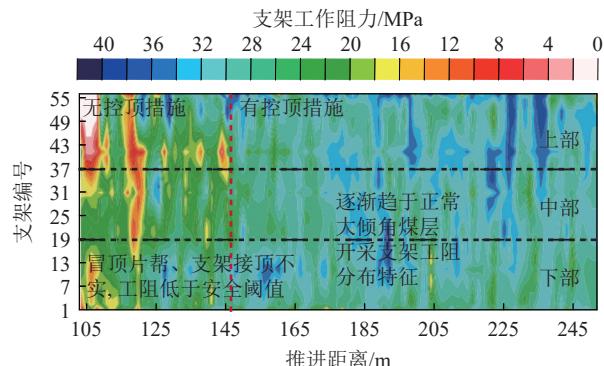


图 17 支架压力分布

Fig.17 Pressure distribution of hydraulic support

## 5 结 论

1) 采空区泥岩和砂质泥岩富含黏土矿物, 利于研石固结二次成岩; 研石压缩固结过程可分为初始调整期、应力上升期与压密固结期 3 个阶段, 并将含水率、压缩率与粒径级配影响研石压实应力 3D 可视化显示, 直观反映各因素对研石压缩特性的影响规律。

2) 研石粒径级配是影响再生顶板延性剪切滑移破坏的主要因素; 再生顶板抵抗剪切滑移破坏一是靠断口黏土矿物间的胶结程度, 二是研石棱角嵌合处岩石自身强度; 侧限压缩胶结过程中细粒径研石断口处黏土矿物胶结充分, 抵抗剪切破坏能力强, 粗粒径研石颗粒间空隙大, 抵抗剪切破坏靠其棱角接触面的胶结程度与棱角处研石自身强度。

3) 煤层倾角影响倾向研石粒径级配, 再生顶板

钻孔孔壁裂纹数量与方位表现出非对称特征；垂直维度上，再生顶板中部裂纹数量高于下部与上部，倾斜维度上，再生顶板中上部裂纹数量高于下部，即再生顶板在其倾向与垂向上的压缩胶结状态均呈非对称特征。

4) 主应力偏转驱动再生顶板中上部破断剧烈程度高于下部，下分层中上部是再生顶板稳定性控制的重点防控区，提出再生顶板冒顶和煤壁片帮注浆与架棚加固方案，通过监测煤壁片帮深度与支架压力，再生顶板稳定性控制效果良好。

#### 参考文献(References):

- [1] 伍永平, 负东风, 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] 杨科, 池小楼, 刘钦节, 等. 大倾角煤层综采工作面再生顶板与支架失稳机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3045–3053.  
YANG Ke, CHI Xiaolou, LIU Qinjie, et al. Cataclastic regenerated roof and instability mechanism of support in fully mechanized mining face of steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3045–3053.
- [3] 翟晓荣, 吴基文, 胡儒, 等. 分岔煤层下分层再生顶板地面预注浆加固区域研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 30–39.  
ZHAI Xiaorong, WU Jiwen, HU Ru, et al. Study on surface pre-grouting reinforcement layer of stratified regenerated roof under bifurcated coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 30–39.
- [4] 解盘石, 张颖异, 张艳丽, 等. 大倾角大采高煤研互层顶板失稳规律及对支架的影响[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 344–356.  
XIE Panshi, ZHANG Yingyi, ZHANG Yanli, et al. Instability law of the coal-rock interbedded roof and its influence on supports in large mining height working face with steeply dipping coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 344–356.
- [5] YAO Qiangling, LI Xuehua, SUN Boyang, et al. Numerical investigation of the effects of coal seam dip angle on coal wall stability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 100: 298–309.
- [6] 袁永, 屠世浩, 窦凤金, 等. 大倾角综放面支架失稳机理及控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 430–434.  
YUAN Yong, TU Shihao, DOU Fengjin, et al. Instability mechanism and control of large dip angle fully mechanized caving face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(4): 430–434.
- [7] WU Yongping, HU Bosheng, LANG Ding, et al. Risk assessment approach for rockfall hazards in steeply dipping coal seams[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104626.
- [8] 王平, 冯涛, 蒋运良, 等. 软弱再生顶板巷道围岩失稳机理及其控制原理与技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10): 2953–2965.  
WANG Ping, FENG Tao, JIANG Yunliang, et al. Control principle and technology and instability mechanism of surrounding rock in weak regenerated roof[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10): 2953–2965.
- [9] MA Wenqinag, WANG Tongxu. Instability mechanism and control countermeasure of a cataclastic roadway regenerated roof in the extraction of the remaining mineral resources: a case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 2437–2457.
- [10] 闫浩, 张吉雄, 张升, 等. 散体充填材料压实力学特性的宏细观研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 413–420.  
YAN Hao, ZHANG Jixiong, ZHANG Sheng, et al. Macro and mesoscopic study on the compressive properties of bulk filling materials[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 413–420.
- [11] 吴疆宇, 靖洪文, 浦海, 等. 分形研石胶结充填体的宏细观力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2083–2100.  
WU Jiangyu, JING Hongwen, PU Hai, et al. Macroscopic and mesoscopic mechanical properties of cemented waste rock backfill using fractal gangue[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 2083–2100.
- [12] 巨峰, 宁湃, 何泽全, 等. 压实过程中煤矸石颗粒流细观演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 183–191.  
JU Feng, NING Pai, HE Zequan, et al. Study on particle flow mesoscopic evolution law of coal gangue in compaction process[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(1): 183–191.
- [13] HUANG Yanli, LI Junmeng, MA Dan, et al. Triaxial compression behaviour of gangue solid wastes under effects of particle size and confining pressure[J]. Science of the Total Environment, 2019, 693(25): 133607.
- [14] 李猛, 张卫清, 李艾玲, 等. 砾石充填材料承载压缩变形时效性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 147–154.  
LI Meng, ZHANG Weiqing, LI Ailing, et al. Experimental study on time effect of bearing compression deformation of gangue filling materials[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(1): 147–154.
- [15] 钱自卫, 曹丽文, 姜振泉, 等. 煤矸石侧限加载-浸水-卸载实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 578–582.  
QIAN Ziwei, CAO Liwen, JIANG Zhenquan, et al. Experimental study on confined loading-water immersion-unloading of coal gangue[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 578–582.
- [16] 罗生虎, 伍永平, 刘孔智, 等. 大倾角大采高综采工作面煤壁非对称受载失稳特征[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1829–1836.  
LUO Shenghu, WU Yongping, LIU Kongzhi, et al. Asymmetric load and instability characteristics of coal wall at large mining height fully-mechanized face in steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1829–1836.
- [17] 张超, 展旭财, 杨春和. 粒粗料强度及变形特性的细观模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2077–2083.  
ZHANG Chao, ZHAN Xucai, YANG Chunhe. Mesoscopic simu-

- lation of strength and deformation characteristics of coarse grained materials[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34( 7) : 2077–2083.
- [ 18 ] BISHOP W A HENKEL-D-J. The measurement of soils properties in triaxial test[R]. London: Edward Arnold Ltd, 1962.
- [ 19 ] 胡炳南, 郭爱国. 研石充填材料压缩仿真实验研究[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(8): 1076–1080.  
HU Bingnan, GUO Aiguo. Testing study on coal waste back filling material compression simulation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(8): 1076–1080.
- [ 20 ] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(4): 973–984.  
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(4): 973–984.
- [ 21 ] 池小楼, 杨科, 刘文杰, 等. 大倾角煤层分层综采再生顶板破断规律研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(5): 1391–1400.  
CHI Xiaolou, YANG Ke, LIU Wenjie, et al. Study on the broken law of regenerated roof in fully mechanized coal seam with large dip Angle[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43( 5) : 1391–1400.
- [ 22 ] 池小楼, 杨科, 付强, 等. 大倾角煤层分层综采再生顶板应力分布规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(5): 891–900.  
CHI Xiaolou, YANG Ke, FU Qiang, et al. Study on stress distribution law of regenerated roof in fully-mechanized slicing mining of steeply dipping coal seam[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 39(5): 891–900.