

# 近距离煤层群联合开采覆岩破断规律研究

方汪庆, 张华磊

安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年5月6日; 录用日期: 2026年6月9日; 发布日期: 2026年7月22日

## 摘要

为揭示近距离煤层群联合开采条件下的覆岩破断规律, 解决二次采动时顶板控制难题, 以淮北矿区许疃煤矿7<sub>2</sub>煤与8<sub>2</sub>煤联合开采为工程背景, 采用理论分析(基于弹性地基梁与损伤力学理论, 构建层间岩层稳定性判据)与FLAC3D数值模拟相结合的方法, 系统研究初次与二次采动全过程覆岩塑性区、应力场的动态演化规律。结果表明: 7<sub>2</sub>煤初次采动时, 工作面推进50 m基本顶初次破断, 底板呈剪切破坏; 推进90 m出现周期来压, 覆岩破坏区呈“中间低、两端高”的马鞍形分布。8<sub>2</sub>煤二次采动时, 工作面推进40 m层间岩层转为剪切破坏, 基本顶破断, 周期来压强度弱化, 但仍保持稳定周期性; 上覆岩层经历“压实-卸压”动态过程, 破坏区域向两侧转移并扩大。研究揭示了近距离煤层群二次采动覆岩破断的“层间耦合”效应与“压实-卸压”动态过程, 可为煤层群联合开采顶板控制及下伏煤层巷道支护设计提供理论依据。

## 关键词

煤层群联合开采, 覆岩破断, 数值模拟, 层间耦合效应, 损伤劣化

# A Study on Overburden Fracture Laws in Close-Distance Coal Seam Group Mining

Wangqing Fang, Hualei Zhang

School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: May 6, 2026; accepted: June 9, 2026; published: July 22, 2026

## Abstract

To reveal the fracture laws of overburden strata under close-distance coal seam group mining and address the challenges of roof control during secondary mining, this study investigates the combined mining of the No. 7<sub>2</sub> and No. 8<sub>2</sub> coal seams in the Xutuan Coal Mine, Huaibei mining area. A methodology integrating theoretical analysis based on elastic foundation beam and damage mechanics theories to establish stability criteria for interlayer strata, and FLAC3D numerical simulation was employed to

systematically study the dynamic evolution of the plastic zone and stress field in the overburden during both the initial and secondary mining stages. The results indicate that during the initial mining of the No. 7<sub>2</sub> coal seam, the main roof experienced its first fracture when the working face advanced 50 m, with the floor strata failing in shear. Periodic weighting occurred after an advance of 90 m, and the overburden failure zone exhibited a saddle-shaped distribution, described as “lower in the middle and higher on both sides”. During the secondary mining of the No. 8<sub>2</sub> coal seam, the interlayer rock strata transitioned to shear failure and the main roof fractured when the face advanced 40 m; the intensity of periodic weighting weakened, but it still maintained a stable periodicity. The overlying strata underwent a dynamic “compaction-decompression” process, causing the failure zone to shift and expand laterally. This study elucidates the “interlayer coupling” effect and the dynamic “compaction-decompression” process governing overburden fracture during secondary mining in close-distance coal seam groups, providing a theoretical basis for roof control in multi-seam mining and support design for roadways in underlying seams.

## Keywords

**Multi-Seam Combined Mining, Overburden Fracture, Numerical Simulation, Interlayer Coupling Effect, Damage Degradation**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在“双碳”战略持续推进以及能源安全需求不断提升的背景下,煤炭在我国能源结构中仍占据主体地位,并将在较长时期内承担能源安全兜底保障作用[1]。我国近距离煤层群在淮北、淮南、平顶山及晋陕蒙等矿区广泛发育,重复采动条件下覆岩结构演化复杂、矿压显现强烈,对工作面安全回采及巷道围岩稳定具有重要影响[2]-[4]。随着煤炭开采逐步向深部及复杂地质条件转移,近距离煤层群联合开采过程中覆岩失稳、应力重分布及动力灾害问题日益突出[5][6]。因此,研究近距离煤层群联合开采条件下覆岩破断与应力演化规律,具有重要理论意义与工程价值。

围绕煤层采动覆岩破断机理与运移特征,国内外已开展大量研究并形成较完善的理论体系。研究表明,采动应力场会诱发覆岩结构性破断并导致矿压显现。黄庆亨等[7]结合现场实测与相似模拟,确立了浅埋煤层群双关键层的三类组合结构模型;窦林名等[8]将采场覆岩划分为O-X、F、T三类结构,阐明了各类结构的运移规律并提出了针对性防控方法;尹希文等[9]建立了浅埋煤层“切落体”模型,揭示了覆岩滑落失稳机理。针对下行开采覆岩运移难题,研究者通过多方法融合进行了深入探讨:伍永平、刘荣亮等[10]基于FLAC3D揭示了不同倾角下重复采动的矿压规律;李树刚、许鸣皋等[11]通过物理模拟发现,下煤层冒落带破碎度高于上煤层,并明确了应力与裂隙场的演化特征。

综上,现有研究已在采场覆岩结构模型及近距离煤层群覆岩运移机制方面取得丰富成果,但由于地质条件复杂,近距离煤层群联合开采过程中覆岩“初次损伤-二次劣化”叠加扰动明显,下煤层开采对上层稳定结构再活化机制、层间岩层损伤累积与二次破断启动条件,以及覆岩破坏空间转移机理仍不明确,现有理论尚难满足工程需求。基于淮北许疃煤矿7<sub>2</sub>、8<sub>2</sub>煤近距离煤层群开采条件,本文采用理论分析与FLAC3D数值模拟相结合的方法,重点研究:1)二次采动基本顶破断步距缩短机制;2)覆岩破坏向采空区两侧转移的力学成因;3)煤层群联合开采覆岩破断的层间耦合机制,以期类似条件下围岩控制与巷道支护优化提供理论依据。

2. 工程地质概况

许疃煤矿主采 7<sub>2</sub> 煤和 8<sub>2</sub> 煤, 两煤层平均厚度均为 3.80 m, 层间距平均 15.0 m。8<sub>2</sub>26 工作面位于 7<sub>2</sub>26、7<sub>2</sub>28 工作面采空区下方, 工作面走向长 1353.5 m, 倾向宽 240 m, 平均埋深 520 m。8<sub>2</sub>26 工作面直接顶为泥岩, 厚 0~3.10 m; 基本顶为细砂岩, 厚 6.15~17.83 m, 呈灰白色, 以石英为主, 含少量暗色矿物及鲕粒, 分选性较好, 发育薄层状水平及缓波状层理, 顶底部为砂泥岩互层。直接底为浅灰色泥岩, 厚 2.20~4.70 m, 呈厚层块状, 含植物根部化石; 基本底为灰白色细砂岩, 厚 3.15~8.40 m, 以石英为主, 硅质胶结, 发育薄层状水平层理, 底部含黑色泥岩碎屑。8<sub>2</sub>26 工作面平面布置如图 1 所示, 相关煤岩体物理力学参数见表 1。

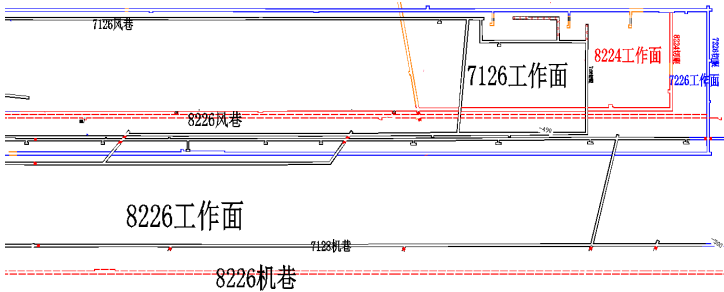


Figure 1. 8<sub>2</sub>26 working face layout  
图 1. 8<sub>2</sub>26 工作面平面图

Table 1. Rock mass physico-mechanical parameters  
表 1. 岩体物理力学参数

| 岩性               | 密度(kg/m <sup>3</sup> ) | 体积模量/GPa | 剪切模量/GPa | 内聚力/MPa | 内摩擦角/° | 抗拉强度/MPa |
|------------------|------------------------|----------|----------|---------|--------|----------|
| 7 <sub>2</sub> 煤 | 1400                   | 2.1      | 1.2      | 2.7     | 38     | 1.5      |
| 泥岩               | 2500                   | 1.96     | 0.51     | 1.1     | 34     | 0.3      |
| 细砂岩              | 2500                   | 6        | 4.8      | 3.2     | 32     | 2.6      |
| 8 <sub>2</sub> 煤 | 1400                   | 2.5      | 1.3      | 1.5     | 25     | 0.8      |

注: 表中岩体力学参数来源于许疃煤矿 8<sub>2</sub>26 工作面及相邻区域钻孔取芯后的室内标准岩石力学试验(执行 GB/T 23561-2009 标准)。考虑到工程现场岩体中广泛发育的层理、原生节理裂隙以及尺度效应, 本文基于 Hoek-Brown 强度准则与 GSI(地质强度指标)体系, 对室内试验获取的完整岩块参数进行了均质化折减(整体折减系数取 0.70~0.82), 最终获取适用于 FLAC3D 宏观数值模拟的岩体力学参数。

3. 煤层群联合开采覆岩破断理论分析

立足于淮北矿区许疃煤矿 7<sub>2</sub>、8<sub>2</sub> 煤近距离煤层群的地质赋存特征, 本研究深度融合关键层理论、砌体梁理论及弹性地基梁理论, 分别构建单一煤层初次采动覆岩破断力学模型与煤层群二次采动层间岩层损伤劣化力学模型, 揭示二次采动下覆岩破断的层间耦合效应, 建立层间岩层稳定性判据。

3.1. 单一煤层初次采动覆岩破断力学模型

基于弹性地基梁理论, 将基本顶简化为两端固支的弹性梁, 其极限抗弯承载力满足:

$$M_{lim} = \frac{R_t h^2}{6} \tag{1}$$

式中:  $M_{lim}$  为岩梁极限抗弯承载力, kN·m;  $R_t$  为岩层抗拉强度, MPa;  $h$  为基本顶岩层厚度, m。令  $M_{max} = M_{lim}$ , 推导得到基本顶初次破断极限跨距计算公式:

$$L_0 = h \sqrt{\frac{2R_t}{q}} \quad (2)$$

式中:  $L_0$  为基本顶初次破断极限跨距, m;  $q$  为作用于基本顶的均布载荷, MPa, 包括岩层自重与上覆岩层传递的载荷。结合许疃煤矿  $7_2$  煤工程地质参数,  $7_2$  煤基本顶为细砂岩, 取平均厚度  $h = 12.0$  m, 抗拉强度  $R_t = 2.6$  MPa, 上覆均布载荷经计算  $q \approx 0.31$  MPa, 代入式(2)得  $7_2$  煤基本顶初次破断理论极限跨距  $L_0 \approx 49.1$  m。该理论计算结果与数值模拟规律总体接近, 表明本文建立的理论模型能够较好反映近距离煤层群条件下覆岩周期破断的演化趋势。

### 基本顶周期破断步距

基本顶初次破断后, 固支梁结构失稳, 采空区覆岩逐渐形成铰接结构, 并随工作面推进发生周期性断裂。针对周期破断演化规律, 本文在构建理论模型时, 明确采用“稳定期砌体梁模型”进行推导。需要指出的是, 该模型主要适用于初次周期来压之后、岩块铰接结构完全形成且趋于稳定时的周期来压步距分析; 而在初次周期来压阶段, 由于采空区矸石尚未充分压实、岩块间有效咬合铰接尚未完全形成, 其破断所需的推进距离通常显著大于稳定周期来压步距。此外, 初次来压还受关键层完整性、上覆采空区残余结构及层间损伤等因素共同影响, 因此其理论结果仅用于定性表征覆岩破断的稳定态特征。

基本顶周期破断步距的理论计算公式为:

$$L_1 = h \sqrt{\frac{R_t}{3q}} \quad (3)$$

式中:  $L_1$  为基本顶稳定周期破断步距, m。

代入  $7_2$  煤岩层参数计算得稳定周期破断理论步距  $L_1 \approx 20.0$  m。需要指出的是, 数值模拟中工作面推进至 90 m 时才出现显著的初次周期来压现象(即初次破断步距 50 m + 初次周期步距 40 m)。理论计算的稳定周期步距(20 m)与模拟的初次周期步距(40 m)存在显著差异, 其根本原因在于力学模型的适用边界不同: 悬臂梁理论模型主要适用于描述岩块间已形成稳定“砌体梁”铰接结构后的稳定周期来压阶段; 而在初次周期来压阶段, 采空区垮落矸石尚未充分压实, 基本顶岩块的回转下沉空间较大, 且岩块间的有效咬合尚未形成, 导致其破断所需的极限弯矩和推进距离远大于稳定期。此外, 理论模型假设岩体为均质弹性体, 未计入岩体原生节理及塑性损伤累积对破断过程的延迟效应, 这也导致了初次周期来压步距的延长。

## 3.2. 近距离煤层群二次采动覆岩破断的层间耦合效应

$8_2$  煤回采为二次采动, 其覆岩破断过程并非单一煤层采动的简单重复, 而是在上煤层  $7_2$  煤采动造成的岩层初始损伤、应力重分布基础上, 发生的“初次损伤 - 二次劣化”叠加扰动过程, 其覆岩破断规律与层间耦合效应可分为三个核心维度。

### 3.2.1. 层间岩层初始损伤与强度劣化机制

底板剪切破坏会导致下部煤层顶板受损,  $7_2$  煤初次采动诱发的底板剪切塑性区, 会使 15 m 层间岩层产生不可逆的初始损伤, 导致岩层力学参数发生劣化。引入损伤变量  $D$  表征岩层的损伤程度, 定义为塑性区体积与岩层总体积的比值, 取值范围为  $0 \leq D \leq 1$ ,  $D = 0$  表示岩层无损伤,  $D = 1$  表示岩层完全破坏。考虑初始损伤的层间岩层残余力学参数满足:

$$c' = c(1 - D), \varphi' = \varphi(1 - kD) \quad (4)$$

$$R_t' = R_t(1 - D) \quad (5)$$

式中:  $c'$ 、 $\varphi'$ 、 $R_t'$  分别为损伤后岩层的残余内聚力、内摩擦角与抗拉强度;  $c$ 、 $\varphi$ 、 $R_t$  分别为岩层完整状态



下的力学参数; $k$  为内摩擦角折减系数。针对损伤折减系数  $k$  的取值, 本文结合许疃煤矿实际地质条件(基本顶含大量水平缓波状层理, 抗拉强度极易受扰动劣化)进行了多次参数反演与敏感性分析。当  $k$  取值大于 0.4 时, 理论极限抗拉强度衰减不足, 无法解释现场 8<sub>2</sub> 煤层“初次来压步距大幅缩短至 40 m 左右”的实测矿压规律; 当  $k$  取值小于 0.2 时, 模型在推进初期即出现大范围非理性切顶。综合反演结果与现场实测, 选取  $k = 0.3$  能够最准确地表征该工程背景下近距离煤层群层间岩层的损伤演化状态。

由式(2)与式(5)可知, 层间岩层初始损伤会导致等效抗拉强度降低, 进而使 8<sub>2</sub> 煤基本顶初次破断极限跨距显著减小, 代入损伤后的力学参数( $D \approx 0.25$ )计算得 8<sub>2</sub> 煤基本顶初次破断理论极限跨距  $L_0' \approx 38.7$  m, 与数值模拟中工作面推进 40 m 即发生基本顶破断的结果基本吻合, 揭示了二次采动基本顶破断步距缩短的内在机理。

### 3.2.2. 二次采动覆岩“压实-卸压”动态演化机制

7<sub>2</sub> 煤回采结束后, 采空区覆岩经历“垮落-压实-应力恢复”过程, 最终形成“中部压实、两侧卸压”的应力壳结构: 采空区中部垮落岩体被上覆岩层压实, 应力恢复至原岩应力水平; 采空区两侧煤柱上方与边界区域岩层处于持续卸压状态, 应力低于原岩应力。

8<sub>2</sub> 煤二次采动过程中, 工作面沿走向推进的扰动会打破已稳定的应力壳结构, 使层间岩层与上覆岩层先后经历“卸压→再加载→二次卸压”的动态应力路径。采动应力的反复作用会使原有塑性裂隙进一步扩展, 新生剪切裂隙持续发育, 最终导致覆岩破坏区域不再沿工作面推进方向同步前移, 而是向采空区两侧持续转移并扩大。

## 4. 数值模型构建

采用 FLAC3D 有限差分程序建立三维数值模型, 本构模型采用摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)模型。模型尺寸为走向(X 方向) 550 m、倾向(Y 方向) 440 m、高度(Z 方向) 150 m。7<sub>2</sub>26、7<sub>2</sub>28 工作面长度分别为 180 m、155 m, 中间留设 5 m 区段煤柱, 7<sub>2</sub> 煤工作面推进长度 300 m, 采高 3.8 m。8<sub>2</sub>26 工作面长度 240 m, 推进长度 300 m。模型倾向两侧及走向两端均留设足够尺寸的边界煤柱, 以消除边界效应。模型底面固定垂直位移, 四周约束法向位移, 模型顶部根据平均埋深 520 m 施加等效垂直应力 12.5 MPa, 所建立的模型如图 2 所示。

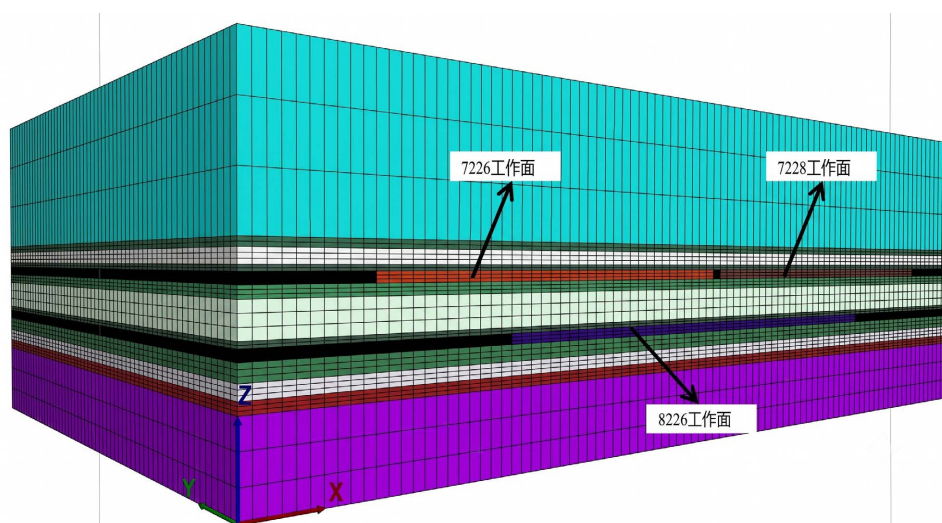


Figure 2. Schematic diagram of 3D model

图 2. 三维模型示意图

#### 4.1. 模拟方案

模拟采用分步开挖策略, 以还原实际开采时序。首先, 一次性开挖 7<sub>2</sub>26 和 7<sub>2</sub>28 两个 7<sub>2</sub> 煤工作面, 模拟初次采动过程, 并计算至模型达到新的力学平衡。待模型稳定后, 在 7<sub>2</sub> 煤采空区下方, 开挖 8<sub>2</sub>26 工作面, 模拟二次采动过程。通过监测和分析每一步开挖后模型的塑性区, 研究覆岩破断规律。开采示意图如图 3 所示。

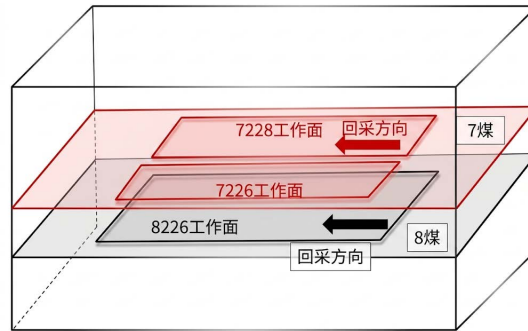


Figure 3. Schematic diagram of mining

图 3. 开采示意图

#### 4.2. 监测方案

为定量揭示覆岩“压实-卸压”动态过程及超前支承压力演变规律, 在模型中设置 3 组监测点。如图 4 所示, 层间岩层监测点: 位于 7<sub>2</sub> 煤底板下方 7.5 m (层间岩层中部), 沿走向每隔 50 m 布置 1 个, 共 6 个(编号 A1~A6); 上覆基本顶监测点: 位于 7<sub>2</sub> 煤顶板上方 10 m (7<sub>2</sub> 煤基本顶中部), 沿走向每隔 50 m 布置 1 个, 共 6 个(编号 B1~B6); 工作面前方煤体监测点: 位于 8<sub>2</sub> 煤工作面前方 10 m 处, 随工作面推进同步移动, 监测超前支承压力变化。

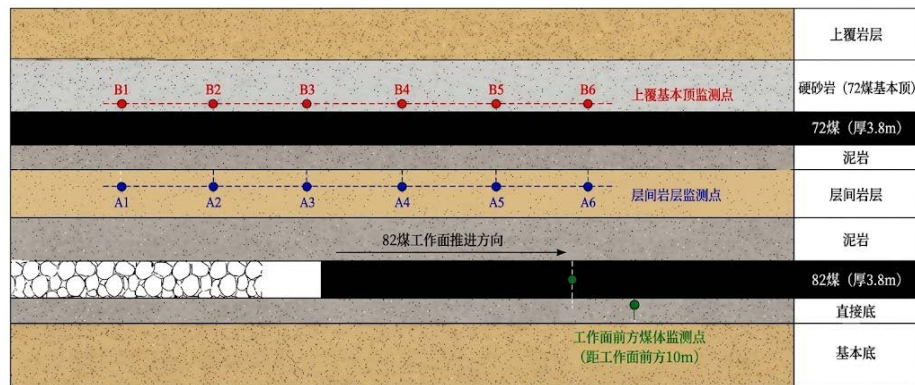


Figure 4. Layout of monitoring points

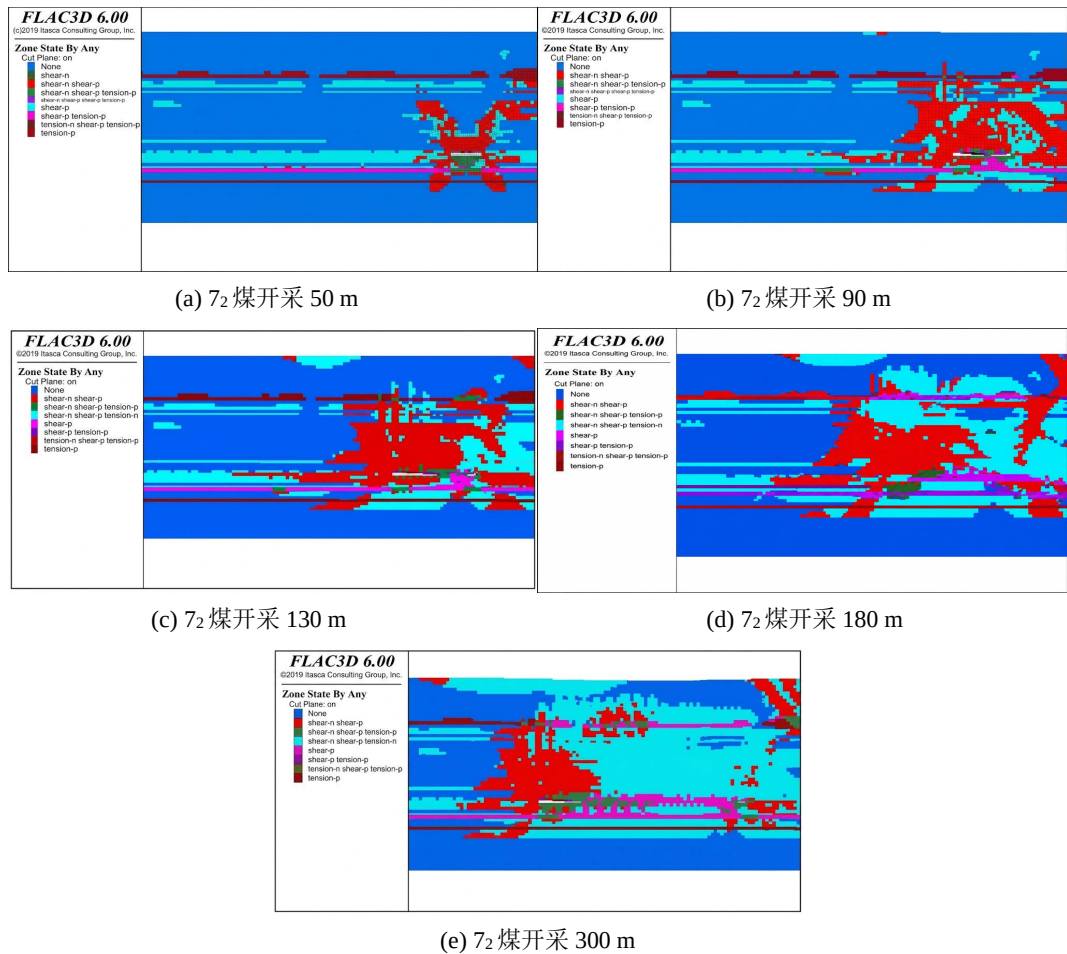
图 4. 监测点布置示意图

### 5. 煤层群联合开采的覆岩破断规律分析

#### 5.1. 7<sub>2</sub> 初次采动覆岩破断演化特征

在煤层群开采过程中, 覆岩塑性区的分布特征能够精准反映开采全过程中覆岩破断状态的演化规律。图 5 为 7<sub>2</sub> 煤工作面回采推进过程中覆岩塑性区的演化分布示意图。图中不同标识对应岩体的不同受力破坏状态: None 表示弹性状态; shear-n 表示当前剪切破坏; tension-n 表示当前拉伸破坏; shear-p 表示历史

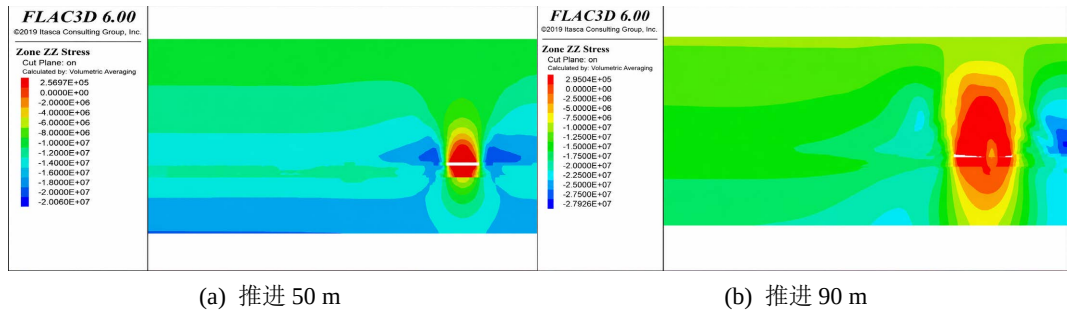
剪切破坏; tension-p 表示历史拉伸破坏。

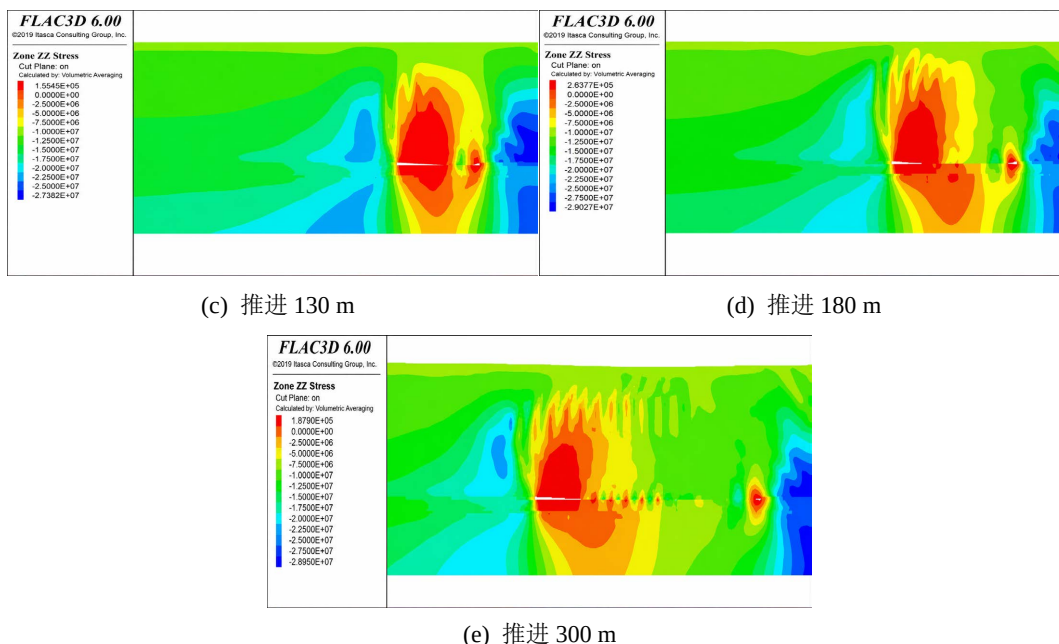


**Figure 5.** Schematic diagram of plastic zone variation and distribution in the mining face of No. 7<sub>2</sub> coal seam  
**图 5.** 7<sub>2</sub> 煤层开采工作面的塑性区变化分布示意图

如图 5 所示, 7<sub>2</sub> 煤工作面推进至 50 m 时, 底板岩层大范围剪切屈服, 基本顶发生初次破断。随着工作面持续推进(90~180 m), 采空区顶底板塑性破坏区呈“马鞍形”大幅扩展, 并表现出特征步距约 20 m 的周期性拉伸破坏, 与理论稳定周期来压步距一致。底板剪切破坏深度与覆岩垮落同步发育, 直接构成下伏 8<sub>2</sub> 煤层回采时的初始损伤源。

为直观展示初次采动后“应力壳”的形成形态, 7<sub>2</sub> 煤开采 300 m (采后稳定) 时走向关键剖面的垂向应力分布云图如图 6 所示。





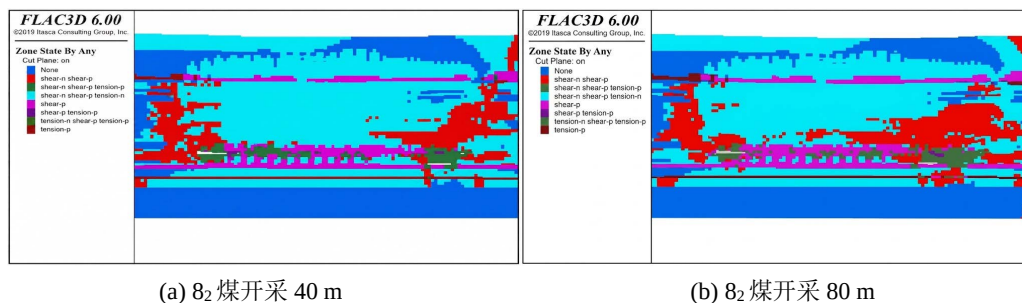
**Figure 6.** Contour plots of vertical stress distribution in the No. 72 coal mining face along the strike direction  
**图 6.** 7<sub>2</sub> 煤工作面随走向推进垂直应力分布状态云图

伴随回采作业的持续进行, 采动应力场扰动诱发上覆岩体发生塑性屈服与层间离层等复合损伤。煤层开挖打破了原岩应力场的静力平衡状态, 致使采场围岩应力发生显著迁移与重构。监测数据显示, 当工作面推进至 50 m 时, 应力增高区主要聚焦于工作面煤壁前方及后方实体煤柱区域。随着采空区跨度增大, 中部顶板下沉量及扰动剧烈程度加剧; 受两侧遗留煤柱强支撑效应影响, 该区域形成显著的应力集中带。与此同时, 采空区顶部岩层因弯曲变形产生显著的拉张应力, 且呈“拱形”力学结构向上部岩层逐层传递。该拉应力的出现标志着顶板岩层已进入拉伸破坏阶段, 拉应力是诱发覆岩拉伸破坏的重要力学因素。

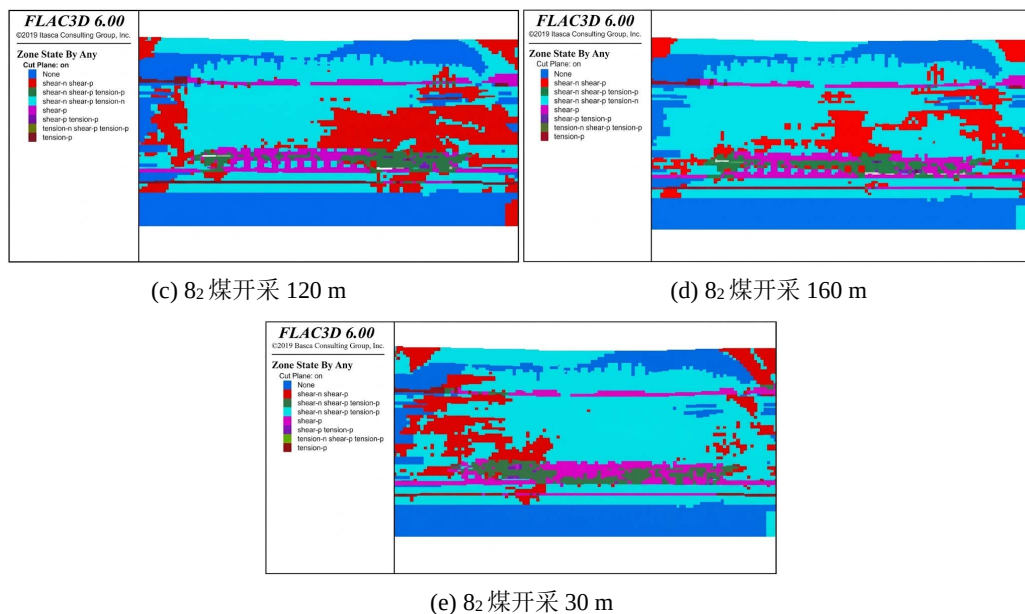
## 5.2. 8<sub>2</sub> 煤二次采动覆岩破断演化特征

如图 7 所示, 受上部 7<sub>2</sub> 煤采动损伤影响, 8<sub>2</sub> 煤层回采的覆岩破断特征发生显著变异。推进至 40 m 时, 层间岩层产生新生剪切破坏, 基本顶提前发生初次破断。在后续推进阶段(图 7(b)~(e)), 塑性区不再呈集中贯通式扩展, 而是弥散式延伸。这表明受上覆采空区垮落矸石缓冲及初始损伤的层间耦合作用, 二次采动的周期来压绝对强度弱化。值得注意的是, 受限于连续介质模型的本构局限, 塑性云图未能离散出清晰的周期断裂边界, 但覆岩已整体经历了彻底的“再次卸压”过程, 破坏范围持续向采空区两侧深部转移。

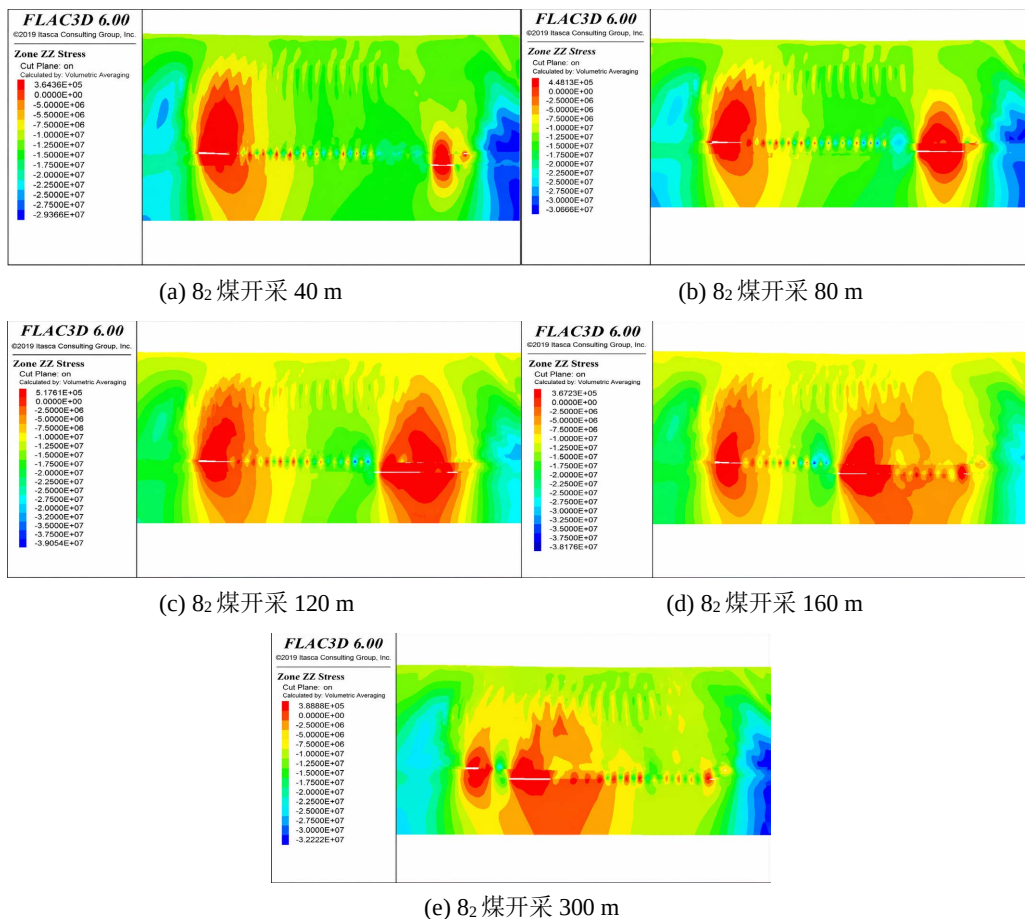
为揭示二次采动中应力壳的演化规律, 8<sub>2</sub> 煤走向推进的垂向应力分布云图如图 8 所示。



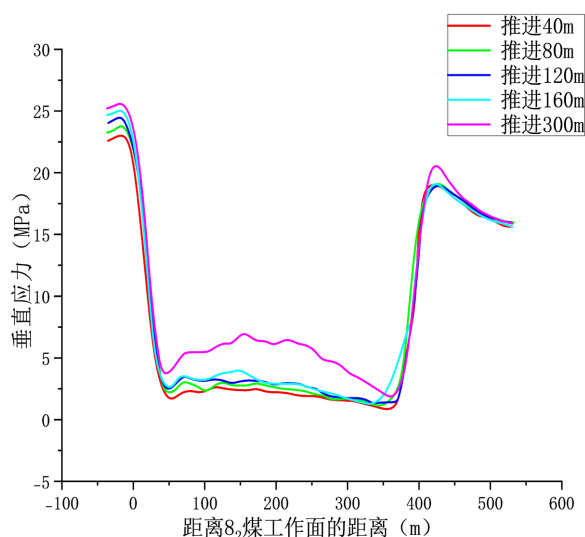




**Figure 7.** Schematic diagram of plastic zone variation and distribution in the mining face of No. 82 coal seam  
**图 7.** 82 煤层开采工作面的塑性区变化分布示意图



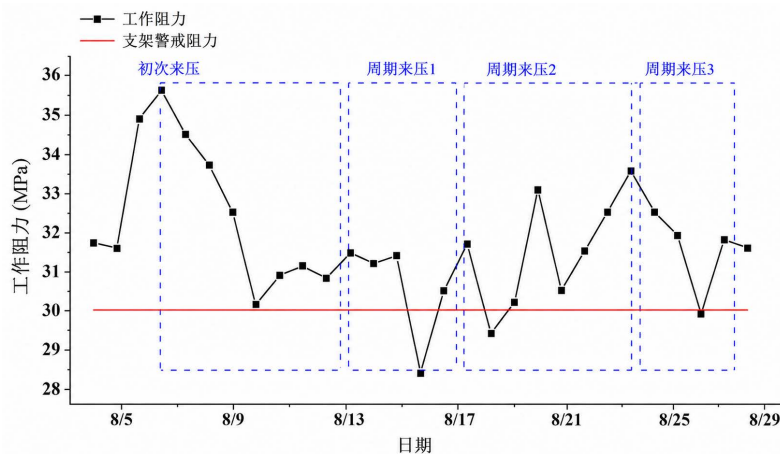
**Figure 8.** Contour plots of vertical stress distribution in the No. 82 coal mining face along the strike direction  
**图 8.** 82 煤工作面随走向推进垂直应力分布状态云图



**Figure 9.** Evolution curves of vertical stress in overburden strata during working face advancement  
**图 9.** 覆岩垂向应力随工作面推进演化曲线

结合图 8 (垂向应力云图)与图 9 (监测点应力演化曲线)可知, 8<sub>2</sub> 煤二次采动彻底打破了上覆 7<sub>2</sub> 煤采后形成的残余应力平衡结构。定量监测数据显示: 在 8<sub>2</sub> 煤工作面前方 10 m 处, 超前支承压力随工作面推进呈现剧烈波动并产生显著的应力集中(峰值高达 30~35 MPa), 且其应力集中系数高于单煤层开采。而在工作面后方的采空区内部, 应力演化表现出典型的“压实-卸压-再加载”动态特征。位于层间岩层中部的监测点(A1~A6)数据显示, 随着工作面经过, 该区域应力首先急剧跌落至 2 MPa 以下(卸压阶段); 同时, 上覆基本顶监测点(B1~B6)的数据同步显示, 受下部垮落带及断裂带发育影响, 该区域同样经历了与层间岩层协同的卸压与二次承载过程, 但其应力波动幅值较层间岩层更为滞后且平缓。随后, 随着上部已垮落岩体在自重及新一轮采动影响下发生二次压实, 应力逐渐回升至 10~15 MPa (再加载压实阶段)。正是由于采空区中部这种“压实区”逐渐具备承载能力, 使得原本集中于中部的应力向采空区四周的未破坏岩体发生侧向转移, 最终在空间上塑造出“两侧卸压扩展、中部再压实”的拱形应力壳结构。

### 5.3. 8<sub>2</sub>26 工作面实测矿压显现特征与验证



**Figure 10.** Working resistance curve of hydraulic supports in the 8<sub>2</sub>26 working face  
**图 10.** 8<sub>2</sub>26 工作面液压支架工作阻力曲线

为验证层间岩层损伤理论及数值模拟结果的可靠性, 提取许疃煤矿 8<sub>2</sub>26 工作面(二次采动)液压支架阻力监测数据进行对比分析。选取 80#液压支架工作阻力数据绘制变化曲线(见图 10)。监测结果表明: 当工作面推进至 39.5 m 左右时, 支架阻力首次出现显著峰值(35.6 MPa), 表明基本顶发生初次破断; 随后在 55.2 m、71.4 m 和 85.8 m 附近再次出现峰值, 呈现明显周期来压特征。综合分析得到, 8<sub>2</sub>26 工作面实际初次来压步距约为 38.5~41.2 m, 平均周期来压步距约为 14.3~16.2 m。

现场实测初次破断步距(约 40 m)与理论计算极限跨距(38.7 m)及 FLAC3D 模拟结果(40 m)基本一致, 表明上覆 7<sub>2</sub> 煤层初次采动造成的层间岩层初始损伤, 会导致下伏 8<sub>2</sub> 煤层基本顶破断步距明显缩短。理论稳定周期来压步距约为 20 m, 而模型初次周期来压步距偏大, 主要原因在于: 经典悬臂梁与砌体梁模型适用于岩块形成稳定铰接结构后的状态, 而初次周期来压阶段采空区矸石尚未压实, 层间岩层仍处于大尺度回转下沉阶段, 岩块间未形成有效咬合, 导致初次周期来压步距大于理论稳定值。随着工作面持续推进, 实测周期步距(14.3~16.2 m)逐渐趋近并略低于理论稳定周期步距。

## 6. 结论

1) 7<sub>2</sub> 煤初次采动时, 基本顶初次破断步距约 50 m, 稳定周期来压步距约 20 m, 覆岩破坏呈“马鞍形”动态演化特征。

2) 8<sub>2</sub> 煤二次采动条件下, 层间岩层初始损伤导致基本顶破断步距缩短至 40 m, 周期来压强度弱化, 但仍保持稳定周期性。

3) 二次采动过程中, 覆岩内部形成“中部压实、两侧卸压”的应力壳结构, 覆岩经历“压实 - 卸压 - 再压实”的动态演化过程。

4) 覆岩破坏表现出明显的渐进式特征, 其微观本质为循环采动应力驱动下“初始损伤 - 裂隙尖端应力集中 - 裂隙扩展与交汇 - 整体失稳”的连续损伤演化过程。由于采空区中部压实区的形成, 高应力向两侧转移, 导致覆岩破坏区不断向边界煤岩体扩展。

5) 工程实践建议: 综合覆岩破断规律与侧向应力壳演化特征, 建议下伏 8<sub>2</sub> 煤层回采巷道布置时, 应与上覆采空区边界保持 20~25 m 的最小安全避让距离, 以规避侧向支承压力峰值与层间耦合损伤区, 为近距离煤层群巷道支护设计提供可靠依据。

## 参考文献

- [1] 袁亮. 煤炭工业碳中和发展战略构想[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 103-110.
- [2] 谭云亮, 李学斌, 刘学生, 等. 近距离煤层群覆岩结构致灾机理与防控技术[J]. 煤炭学报, 2026, 51(1): 314-337.
- [3] 刘洪涛, 韩洲, 韩子俊, 等. 近距离煤层下行采动应力场分布规律与巷道合理位置研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 1-10.
- [4] 高彬, 惠博, 李军, 等. 近距离煤层群下行开采过切眼岩层变形机理研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(1): 59-63.
- [5] 王敏. 全国人大代表、中国工程院院士袁亮: 加强深部煤炭安全开采科技支持[J]. 科学新闻, 2023, 25(2): 24.
- [6] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
- [7] 黄庆享, 赵萌桦, 黄克军. 浅埋煤层群开采顶板双关键层结构及支护阻力研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 71-77, 86.
- [8] 窦林名, 贺虎. 煤矿覆岩空间结构 OX-F-T 演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 453-460.
- [9] 尹希文. 浅埋超大采高工作面覆岩“切落体”结构模型及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1961-1970.
- [10] 刘荣亮. 近距离煤层群采动影响下煤层顶底板复合破坏特征研究[J]. 中国煤炭, 2013, 39(4): 48-52.
- [11] 许鸣皋. 近距离煤层群上行开采覆岩运移与应力-裂隙演化特征研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.