

基于倾斜煤层采动覆岩卸压边界模型的渗透率空间分布规律

张碧川¹, 邹全乐^{2, 3}, 冯增朝¹, 朱南南⁴, 冉启灿^{2, 3}, 陈子涵^{2, 3}, 刘佳奇¹, 蔡婷婷⁵, 杨雪林⁵

(1. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024; 2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制全国重点实验室, 重庆 400044;
3. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044; 4. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;
5. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为掌握基于倾斜煤层采动覆岩卸压边界模型的覆岩渗透率空间分布规律, 以地表沉降与采空区两侧煤壁应力分布特征为媒介, 通过地表沉降与覆岩应力分布的对应关系并结合覆岩卸压边界定义, 采用理论推导的方法确定了不同倾角煤层覆岩卸压边界, 基于 3DEC 数值模拟并结合 Python 二次开发获得覆岩渗透率空间分布规律。结果表明: 随着煤层倾角由 0° 增加 30°, 采空区高位侧卸压范围由原来的 38.4 m 增加至 54.5 m, 采空区两侧煤壁应力集中位置应力差由 0 MPa 增加至 13.1 MPa, 应力集中位置向低位侧移动了 0.4 m, 使得低位侧卸压边界扩展; 采空区中部应力恢复位置向低位侧移动 28.3 m, 导致中部卸压边界下移, 覆岩最大渗透率由 90 mD 增加到 270 mD。研究表明: 卸压边界模型可以很好地描述覆岩不同位置卸压程度及相应的渗透率空间分布, 为卸压瓦斯优势抽采区域的准确辨识提供了参考。

关键词: 采矿工程; 倾斜煤层; 采动应力; 卸压边界; 瓦斯运移; 覆岩移动

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2025)03-0638-13

Spatial distribution law of permeability based on the mining-induced stress relief boundary model of inclined coal seam in overlying strata

ZHANG Bichuan¹, ZOU Quanle^{2, 3}, FENG Zengchao¹, ZHU Nannan⁴, RAN Qican^{2, 3},
CHEN Zihan^{2, 3}, LIU Jiaqi¹, CAI Tingting⁵, YANG Xuelin⁵

(1. Key Laboratory of In-Situ Property-Improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 5. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: To explore the permeability distribution of overlying strata based on the mining-induced stress relief boundary model in inclined coal seams. With surface subsidence and the stress distribution characteristics of coal walls of the goaf as the medium, based on the correspondence between surface subsidence and overlying strata, then combined with the definition of stress relief boundary, the distribution characteristics of overlying strata relief

收稿日期: 2024-09-02; **修回日期:** 2024-11-05

基金项目: 山西省基础研究计划面上项目(202303021221009); 山西省基础研究计划青年项目(202203021212238)

Supported by the Shanxi Province Basic Research Program General Project(Grant No. 202303021221009) and Shanxi Provincial Basic Research Program Youth Project(Grant No. 202203021212238)

作者简介: 张碧川(1991-), 男, 博士, 2023年毕业于重庆大学矿业工程专业, 现任助理研究员, 主要从事岩层移动与瓦斯灾害防治方面的研究工作。

E-mail: zhangbichuan@tyut.edu.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0652

boundary at different dip angles were determined by theoretical derivation. In addition, the permeability spatial distribution law is obtained through 3DEC numerical simulation and Python secondary development. The results show that with the increase of the coal seam dip angle from 0° to 30° , the stress difference between two sides of the coal walls increases from 0 MPa to 13.1 MPa, and the stress relief region increases from the original 38.4 m to 54.5 m in higher side of the goaf. The stress concentration position shifted by 0.4 m in lower side of the goaf, thus, the stress relief boundary of lower side expanded. While the stress recovery position moved to the low side by 28.3 m in the central goaf, thus, stress relief boundary of goaf moved downward, and the maximum permeability increased from 90 mD to 270 mD in overlying strata. The stress relief boundary model can describe the stress relief degree and the corresponding spatial distribution of permeability well in overlying strata, which provides a reference for the accurate dominant gas drainage area identification.

Key words: mining engineering; inclined coal seam; mining-induced stress; stress relief boundary; gas migration; overlying strata movement

1 引言

采动卸压瓦斯抽采是防治煤矿瓦斯灾害的高效途径之一^[1-2]。众多学者针对采动覆岩卸压程度提出了不同的表征方法,最典型的是提出了覆岩卸压系数,通过该指标量化卸压边界分布,并以此来判定覆岩不同位置的卸压程度^[3]。煤层开挖会导致覆岩破断、垮落和下沉,传递至地表则表现为地表沉降。同时采动作用会导致采空区两侧煤岩发生进一步破坏,导致覆岩卸压位置向采场远处移动^[4]。此外,不同倾角煤层在我国广泛存在,倾斜煤层覆岩卸压区域的范围与卸压程度决定了渗透率空间分布和瓦斯抽采钻孔的布置位置。因此,研究基于倾斜煤层采动覆岩卸压边界模型的渗透率空间分布规律,不仅有助于覆岩高渗透率位置的辨识,而且对于实现卸压瓦斯精准抽采至关重要。

目前,针对采动覆岩卸压后的各类边界,众多学者开展了大量理论、实验、数值模拟和现场研究,取得了丰硕成果。在采动作用下覆岩变形超过相应的强度极限后会发生断裂,典型的岩层破断移动边界模型有“类双曲线”模型、矩形梯台等^[5]。各类采动边界位置的演化与覆岩充分采动程度密切相关,以卸压瓦斯位置判定常采用的“三带”高度为例,在非充分采动阶段裂缝带高度随工作面尺寸增加而增加;在充分采动阶段裂缝带高度达到该地质采矿条件下的最大值且不再随工作面尺寸增加而增加^[6]。此外,余伊河等^[7]提出可用张拉离层裂隙和剪切错动裂隙作为采动裂隙边界的判断依据,并给出了覆岩任意层理面侧向裂隙发育位置、长度和宽度计算方法。刘奇等^[8]发现覆岩不同位置的应力恢复会导致覆岩裂隙异速演变响应,覆岩整体裂隙率演化符合 DoseResp 函数关系。而在煤矿现场中则主要通过钻

孔漏失量、微震等方法进行断裂带范围实测,确定采动裂隙存在的范围和高度^[9]。

另一方面,针对采动影响边界内的渗透率分布,众多学者通过理论分析、室内实验与数值模拟对其进行了大量研究。H. Guo 等^[3]对顾桥矿采空区渗透率进行了模拟分析,并得出覆岩渗透率存在各向异性,并在竖直方向分为贯通渗透区、水平渗透区、低渗透区。徐超等^[10]通过分形计算方法得出覆岩断裂带内渗透率分布存在明显分区现象总体呈现两侧高、中间低的特征。张礼等^[11]构建了“采动裂隙环形体”三维模型及其边界判别方法并结合裂隙岩体渗透率的求解方法构建了裂隙场渗透率计算模型,获得了回风环体-断裂带内渗透率分布。

以上分析表明,目前针对采动多场响应形成的各类采动影响边界及其对应渗透率分布的研究已经取得了显著的进展,并建立了对应的采动响应理论模型,这些研究对于确定卸压瓦斯抽采大致空间范围具有重要意义。然而,对于煤炭开采而言,采动应力是覆岩变形直至破坏的最直接驱动力,采动应力演化会导致采动卸压边界发生扩展,以致位移边界和裂隙边界发生相应变化,导致确定卸压瓦斯运移空间时产生一定误差。此外,井下渗透率实时监测相比于地表沉降的连续监测更为困难,且难以反映采动覆岩的整体渗透率分布。因此,需要通过地表沉降反演覆岩卸压边界并推导覆岩渗透率空间分布,将采动覆岩多场演化过程进行关联,从而确定覆岩渗透率空间分布规律。

基于此,本文以倾斜煤层采动卸压边界模型为基础,将地表沉降与井下两侧煤壁的极限平衡状态相结合,通过采动卸压边界描述覆岩的整体应力分布特征,建立倾斜煤层采动覆岩卸压边界分布模型。运用 3DEC 与 Python 联合仿真,获得不同倾角煤层采动卸压边界分布规律与相应的渗透率空间分

布。研究结果对于覆岩高渗透率空间的准确辨识与卸压瓦斯抽采钻孔的准确布置具有重要的理论与实践意义。

2 倾斜煤层采动覆岩卸压边界模型

2.1 采动作用下覆岩对称卸压边界分布

2.1.1 采动作用下覆岩对称应力分布特征

煤层开采后覆岩会发生变形破坏并向采空区移动,覆岩变形移动程度取决于工作面的几何尺寸、开采高度与覆岩的力学性质等因素^[12]。在近水平煤层开采条件下,覆岩最大垂直位移一般出现在采空区中部,随着时间增加,覆岩被充分压实。因此,地表沉降和覆岩应力分布有一定相关性。地表沉降与覆岩应力的关系^[13]可表示为

$$\sigma(x, z) = \frac{10.39\sigma_c^{1.042}(b-1)W(x)}{b^{8.7}(m-W(x))} \quad (1)$$

式中: b 为碎胀系数, $W(x)$ 为覆岩倾向地表沉降值(m), m 为煤层开采厚度(m), σ_c 为岩石单轴抗压强度(MPa)。

采空区上方覆岩的应力可以用采空区应力减去上方覆岩重力而获得,即通过式(1)减去与煤层顶板间的覆岩重力从而获得覆岩任意一点的垂直应力分布,即

$$\sigma(x, z) = \frac{10.39\sigma_c^{1.042}(b-1)\frac{mq_s \cos \alpha}{r} \int_0^L e^{-\frac{\pi(x-l)^2}{r^2}} dl}{b^{8.7} \left[m - \frac{mq_s \cos \alpha}{r} \int_0^L e^{-\frac{\pi(x-l)^2}{r^2}} dl \right]} - \gamma z \cos \alpha \quad (2)$$

式中: q_s 为沉降系数, α 为煤层倾角($^\circ$), r 为主要影响半径 $r = H_0 / \tan \theta$ (m), θ 为采动影响角($^\circ$), H_0 为平均埋深(m), (x, z) 为覆岩倾向剖面的坐标(m), l 为倾向剖面积分区域的长度(m), L 为倾向剖面积分区域的长度(m)。

通过式(2)可计算得到覆岩应力在煤层顶板的分布规律,由于压力拱对上方覆岩的支撑作用,在压力拱内部形成了一个卸压区域,随着与煤层顶板距离的增加,覆岩应力降低;而在煤层倾向方向上,采空区中部被压实,应力恢复程度增加,近水平煤层开采条件下工作面倾向方向两侧存在明显对称的卸压区域。

采动应力不会凭空增加或消失,采空区覆岩卸压会导致覆岩应力发生转移,使得煤壁侧支撑压力

增大(见图 1^[14])。煤壁侧支撑应力的集中程度与煤体力学强度、顶板断裂位置、关键层等因素密切相关^[15]。支撑压力增大的来源是覆岩的附加载荷,而移动角是描述顶板断裂位置的关键参数之一,其大小对于确定垮落带上方的载荷至关重要^[16]。覆岩的附加载荷是由煤层采动后煤层上方直至地表的三角形或梯形岩层形成。因此,覆岩附加载荷可以通过累积计算而获得^[17]。

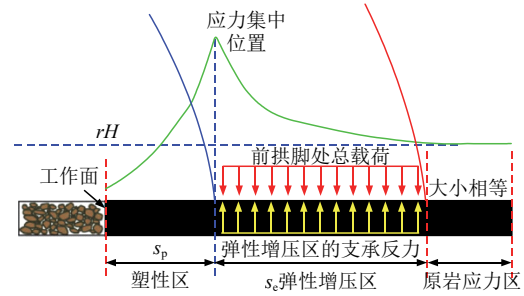


图 1 煤壁侧应力分区分布特征^[14]

Fig.1 Characteristics of stress zone distribution on coal wall side^[14]

在二维对称情况下,覆岩的附加载荷可以通过载荷所占面积进行计算,即

$$\left. \begin{aligned} L_s &= H^2 (\tan \beta) \gamma \quad (\text{三角形载荷}) \\ L_{ss} &= \left(\frac{H \times PW}{2} - \frac{PW^2}{8 \tan \beta} \right) \gamma \quad (\text{梯形载荷}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: H 为埋深(m); PW 为工作面的宽度(m); γ 为覆岩的容重,一般取 $25\,000\text{ N/m}^3$; β 为覆岩垮落角($^\circ$)。

煤壁附近处应力分布可通过下式进行量化表征^[17]:

$$\sigma_a(x) = \frac{3L_s}{D^3} (D-x)^2 \quad (4)$$

式中: D 为应力集中位置,可通过 $D = 5.13\sqrt{H}$ 进行估算(m); L_s 为附加载荷(N/m); x 为其与两侧帮的距离(m); $\sigma_a(x)$ 为垂直应力在水平方向的分布函数。

对于采空区两侧煤壁其塑性长度可用下式^[18]表示:

$$x_b = \frac{m}{2} \left[\left(\frac{q}{p+p'} \right)^{1/(k-1)} - 1 \right] \quad (5)$$

式中: m 为开采高度(m); q 为覆岩载荷,可由 $q = \gamma H$ 计算获得; k 为三轴系数, $k = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$, 其中 ϕ 为内摩擦角。一般而言,屈服或者断裂的材料其强度很小。大量实验结果表明:软弱岩层($\phi = 20^\circ \sim 30^\circ$)、煤($\phi = 37^\circ$)、砂岩($\phi = 40^\circ \sim 50^\circ$)三轴系数取值分别为 2, 3, 4。 p 为围压(MPa); $p' = \sigma'_0 / (k-1)$, 其中 σ'_0 为残余强度。残余强度的

估计可以通过 Hoke-Brown 来获得。 $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$, 其中残余强度可近似取单轴抗压强度的 0.2 倍。

假设在塑性区内从煤壁到应力集中位置应力近似服从线性分布, 而在峰值点外服从式(4)的分布, 则煤壁侧垂直应力分布如下:

$$\sigma_a(x) = \begin{cases} \left[\frac{3L_s}{D^3} (D-x)^2 + \gamma H \right] \frac{x}{x_b} & (x < x_b) \\ \frac{3L_s}{D^3} (D-x)^2 + \gamma H & (x \geq x_b) \end{cases} \quad (6)$$

2.1.2 采动作用下覆岩卸压边界对称分布规律

为了获得覆岩垂直方向不同位置的卸压边界曲线, 需要对垂直方向的应力分布进行修正。通过式(3)减去在移动角影响范围下部的覆岩载荷可得垂直附加载荷为

$$\left. \begin{aligned} L_s &= H^2 \gamma \tan \beta - z^2 \gamma \tan \beta \quad (\text{三角形载荷}) \\ L_{ss} &= \left(\frac{H \times PW}{2} - \frac{PW^2}{8 \tan \beta} \right) \gamma - z^2 \gamma \tan \beta \quad (\text{梯形载荷}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: z 为与煤层顶板的距离(m)。式(7)可以反映距离煤层顶板任意距离覆岩所承受的附加载荷。同时对式(4)进行修正, 从而确定倾斜煤层煤壁两侧的垂

直应力分布为

$$\sigma_a(x, z) = \frac{3L_s}{D^3} (D-x-z \tan \beta)^2 \quad (8)$$

其中: D 为特定覆岩的应力集中位置, 其大小与不同埋深相对应, 由于距离煤层顶板距离不同, 相应应力集中位置也会发生相应改变, 对式(4)进行与埋深相关的修正, 可得

$$D = 5.13 \sqrt{H-z} \quad (9)$$

随着工作面推进距离的增加, 覆岩趋于充分采动。因此, 下面以充分采动条件为例进行覆岩卸压边界的确定。将采动覆岩内侧卸压特征与两侧的应力分布规律相结合, 可以得到对称采动下覆岩的整体应力分布规律。除充分采动程度外, 开采高度和埋深对于采动应力的分布有重要影响^[19], 从而影响覆岩卸压程度和卸压范围。因此, 需要明确不同采高和埋深条件下覆岩的应力分布。将覆岩内侧应力分布和两侧的卸压分布相结合, 并对其中的采高和埋深进行分别赋值, 可以获得不同埋深和采高下覆岩应力分布如图 2 所示。整体而言, 随着埋深增加整体呈现逐渐收缩的“马鞍形”应力分布, 应力绝对值和集中程度随着埋深的增加而增大, 而卸压区范围和卸压程度没有呈现明显的变化, 这可能是由于压力拱的存在, 在一定程度上屏蔽了埋深导致的

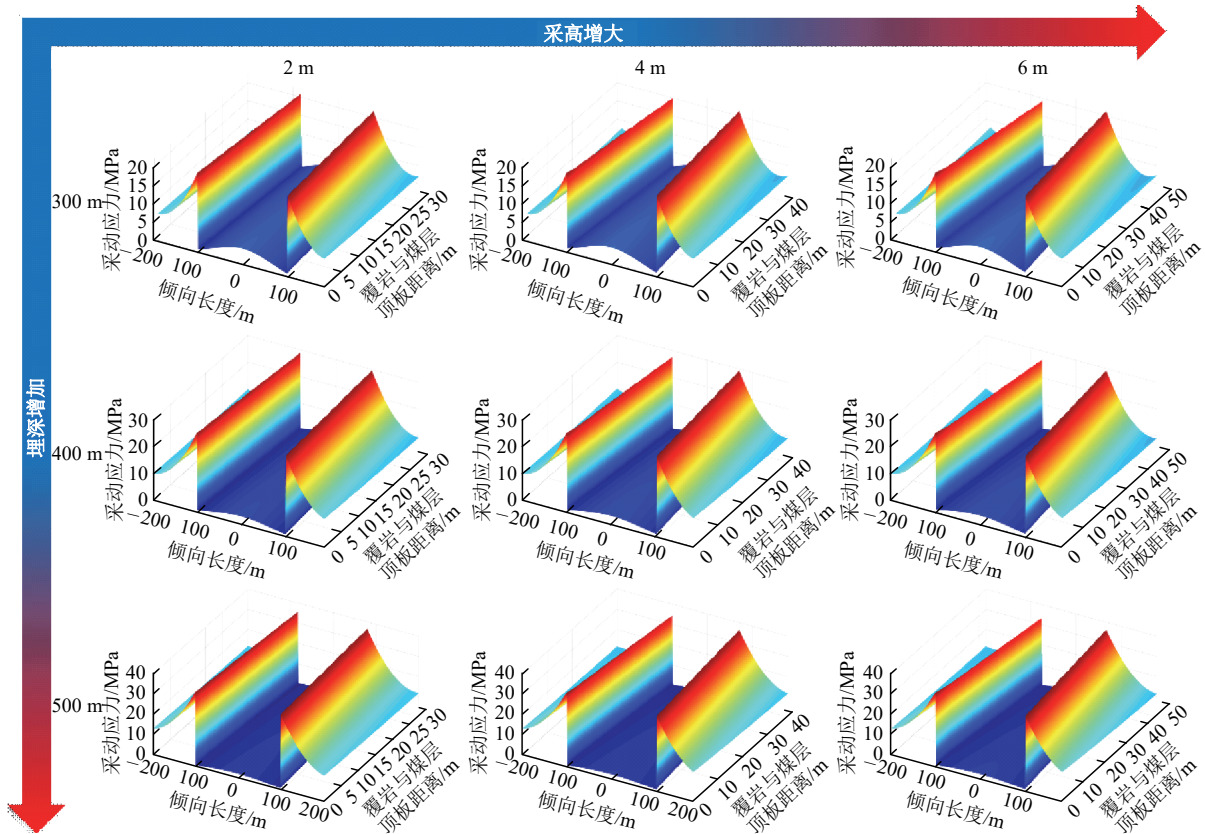


图 2 不同埋深及采高下覆岩应力分布

Fig.2 Mining-induced stress distribution of overlying strata under different buried depths and mining heights

应力集中向覆岩中部的传递。而随着采高的增加,覆岩采动应力集中程度也随之增加。

根据卸压系数的定义,特定卸压系数均有与之对应的卸压应力绝对值。因此,令卸压应力值为 σ_d ,则其边界为

$$z = \frac{D - x - \sqrt{\frac{\sigma_d D^3}{3L_s}}}{\tan \beta} \quad (10)$$

图3为采动作用下不同卸压程度卸压边界分布。由图可知:随着与煤层顶板距离的增加,覆岩卸压区域逐渐缩小,但卸压程度并未降低。在覆岩中部应力逐渐恢复,但随着与煤层顶板距离的增加,其垂直应力逐渐减小,由于覆岩顶部压力拱的存在,采动应力分布由压力拱控制。在压力拱内覆岩应力相对较小,压力拱内呈现卸压状态。

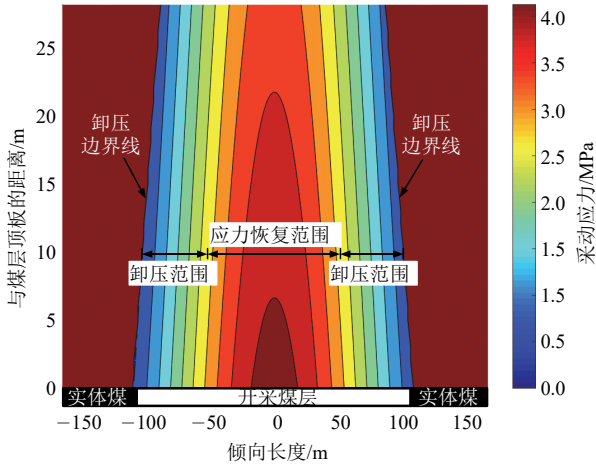


图3 近水平煤层采动覆岩卸压边界分布

Fig.3 Boundary distribution of overlying strata in near-horizontal coal seams

2.2 倾斜煤层采动卸压边界非对称分布特征

覆岩的应力分布受压力拱的影响,压力拱的非对称演化对于覆岩应力分布有着至关重要的作用。随着倾斜煤层工作面推进距离的增加,沿煤层走向压力拱逐渐向开切眼后方与工作面前方扩展;压力拱高度随着推进距离的增加而增加,压力拱高度随着推进距离的增加增速放缓,直到与倾斜长度相近时达到最大值。

在煤层倾向方向,随着推进距离的增加压力拱也会逐渐向外部空间扩展,但压力拱的发育和扩展明显更倾向于高位侧,直到走向推进到与倾向相同的距离时倾向方向压力拱高度趋于稳定。

此外,采动作用传导至地表后会产生地表沉降,覆岩充分采动情况与地表的沉降情况存在明显对应关系,如图4所示。因此,可以通过地表沉降与覆岩应力分布相联系。倾角的存在使得覆岩地表沉降与压力拱呈现非对称分布特征。由于非对称压力拱的存在,覆岩不同位置压实程度相较近水平煤层有明显不同,使得覆岩采动应力分布也存在明显差异。通过式(2)计算可得不同非对称程度下覆岩内部的应力分布特征。随着倾角的增大,覆岩应力恢复程度没有明显增加,但是采动覆岩内部应力恢复位置向低位侧移动,在高位侧能保持相对较大的卸压区域。煤层倾角是导致倾斜煤层开采围岩采动力学行为复杂的根源之一,导致采场空间不同区域围岩的损伤变形与破坏运动等存在显著差异。煤层倾角对覆岩应力分布的影响主要体现在:移动角、覆岩载荷、非对称应力,现对所需参数进行修正以计算煤层倾角影响下覆岩应力分布。

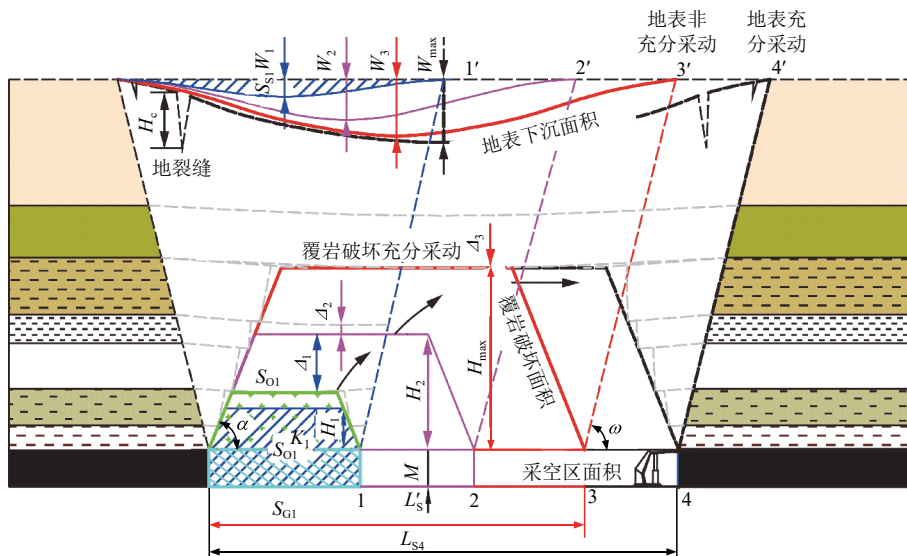


图4 煤层开采地表沉降特征^[6]

Fig.4 Surface subsidence characteristics of coal seam mining^[6]

煤层倾角对于岩层移动最为直接的影响在于其对两侧移动角大小的影响, 上山移动角为 β_1 , 下山移动角为 β_2 (见图 5), 且二者皆为煤层倾角的函数。倾角对二者的函数关系可表示为 $\beta_1(\alpha)$, $\beta_2(\alpha)$, 其中 α 为煤层倾角。同时覆岩应力集中位置也是倾角的函数, 设高位处的埋深为 H , 低位处的埋深为: $H + PW \sin \alpha$ 。通过对式(9)修正可得则工作面煤壁两侧的垂直应力集中位置分别为

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= 5.31\sqrt{H} & (\text{高位侧}) \\ D_2 &= 5.31\sqrt{H + PW \sin \alpha} & (\text{低位侧}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

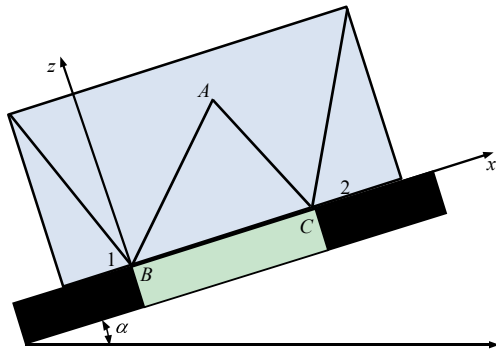


图 5 非对称采动覆岩两侧附加载荷

Fig.5 Additional loading on both sides of overlying strata under asymmetric mining

图 5 中垮落的部分是三角形 ABC , 其余部分为未垮落部分, 若要计算上侧或下侧岩层, 则必须对上述三角形进行求解, 即

$$\frac{\sin(\beta_1 + \beta_2)}{PW} = \frac{\sin(90^\circ - \beta_1)}{AC} = \frac{\sin(90^\circ - \beta_2)}{BC} \quad (12)$$

将海伦公式代入式(12), 有

$$A = \sqrt{s(s - PW)(s - AC)(s - BC)} \quad (13)$$

其中,

$$s = \frac{1}{2}(PW + AC + BC)$$

同时三角形面积也可以用底边乘以高表示:

$$A = \frac{1}{2}PW h_2 \quad (14)$$

因此, 联立式(12)~(14)可得三角形高 h_2 。将覆岩两侧应力代入式(7)可得非对称两侧的附加垂直载荷如下:

$$\left. \begin{aligned} L_{ss1} &= \frac{1}{2}(2H - h_2)h_2 \tan \beta_1 \gamma \\ L_{ss2} &= \frac{1}{2}(2H - h_2)h_2 \tan \beta_2 \gamma - \frac{1}{2}PW h_2 \frac{\sin \alpha}{\tan \beta_2} \gamma \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: L_{ss1} 为未断裂覆岩的载荷, L_{ss2} 为低位侧覆岩的载荷减去垮落岩层的载荷。

通过式(15)计算可得不同埋深、倾角覆岩附加载荷: 随着倾角增大, 附加载荷整体应力水平增长明显, 梯形覆岩附加载荷较三角形载荷演化更加平缓, 说明覆岩采动作用是否传导于地表对于煤壁两侧的载荷有重要影响。在倾角增加到一定程度后, 埋深成为影响附加载荷大小的主控因素。随着埋深的增加, 高位侧和低位侧之间的应力差在整个附加载荷中占比减小, 此时倾角效应会有一定程度弱化。

将式(15)代入式(10)中, 得出覆岩两侧的覆岩垂直应力分布如下:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a(x_1, z_1) &= \frac{6L_{ss1}}{D_1^3} (D_1 - x_1 - z_1 \tan \beta_1)^2 \\ \sigma_a(x_2, z_2) &= \frac{6L_{ss2}}{D_2^3} (D_2 - x_2 - z_2 \tan \beta_2)^2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: x_1, x_2, z_1, z_2 为两侧坐标(m)。

整体而言, 应力分布依旧呈马鞍状, 低位则鞍状较高, 而高位侧应力相对较低。随着煤层倾角由 0° 增加 30° , 采空区两侧煤壁应力集中位置的应力差也由 0 MPa 相应增加至 13.1 MPa。但从图 6 中可以看出, 随着非对称程度的增加, 低位侧应力较高位侧明显增大, 非对称特征明显, 而在卸压区内仍旧能够保持一定的卸压状态。但卸压区内高位侧卸压作用明显, 低位侧卸压空间随着倾角的增加而减小。将式(16)与式(2)联立可得

$$\sigma_{x,z} = \begin{cases} \frac{6L_{ss1}}{D_1^3} (D_1 - x_1 - z_1 \tan \beta_1)^2 & (\text{低位侧覆岩}) \\ \frac{10.39\sigma_c^{1.042}(b-1)}{r} \frac{mq \cos \alpha}{r} \int_0^L e^{-\pi \frac{(x-l)^2}{r^2}} dl - \frac{b^{8.7} \left[h - \frac{mq \cos \alpha}{r} \int_0^L e^{-\pi \frac{(x-l)^2}{r^2}} dl \right]}{\gamma(H_0 - z) \cos \alpha} & (\text{中部覆岩}) \\ \frac{6L_{ss2}}{D_2^3} (D_2 - x_2 - z_2 \tan \beta_2)^2 & (\text{高位侧覆岩}) \end{cases} \quad (17)$$

通过式(17)计算可得不同非对称程度下覆岩的应力分布特征(见图 6)。将式(16)代入式(10)中得两侧的卸压边界可用下式表达:

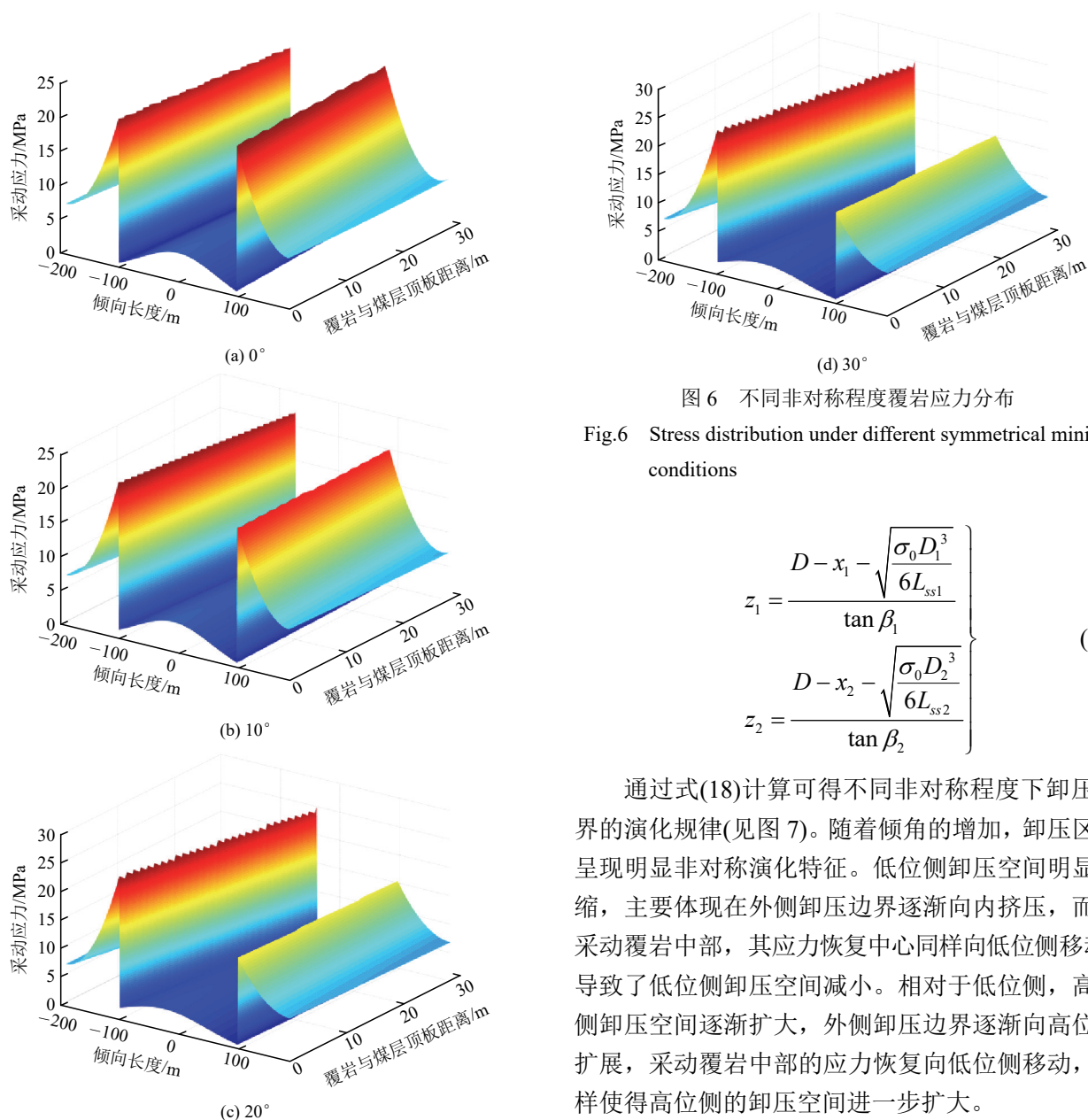


图6 不同非对称程度覆岩应力分布

Fig.6 Stress distribution under different symmetrical mining conditions

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{D - x_1 - \sqrt{\frac{\sigma_0 D_1^3}{6L_{ss1}}}}{\tan \beta_1} \\ z_2 &= \frac{D - x_2 - \sqrt{\frac{\sigma_0 D_2^3}{6L_{ss2}}}}{\tan \beta_2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

通过式(18)计算可得不同非对称程度下卸压边界的演化规律(见图7)。随着倾角的增加,卸压区域呈现明显非对称演化特征。低位侧卸压空间明显压缩,主要体现在外侧卸压边界逐渐向内挤压,而在采动覆岩中部,其应力恢复中心同样向低位侧移动,导致了低位侧卸压空间减小。相对于低位侧,高位侧卸压空间逐渐扩大,外侧卸压边界逐渐向高位侧扩展,采动覆岩中部的应力恢复向低位侧移动,同样使得高位侧的卸压空间进一步扩大。

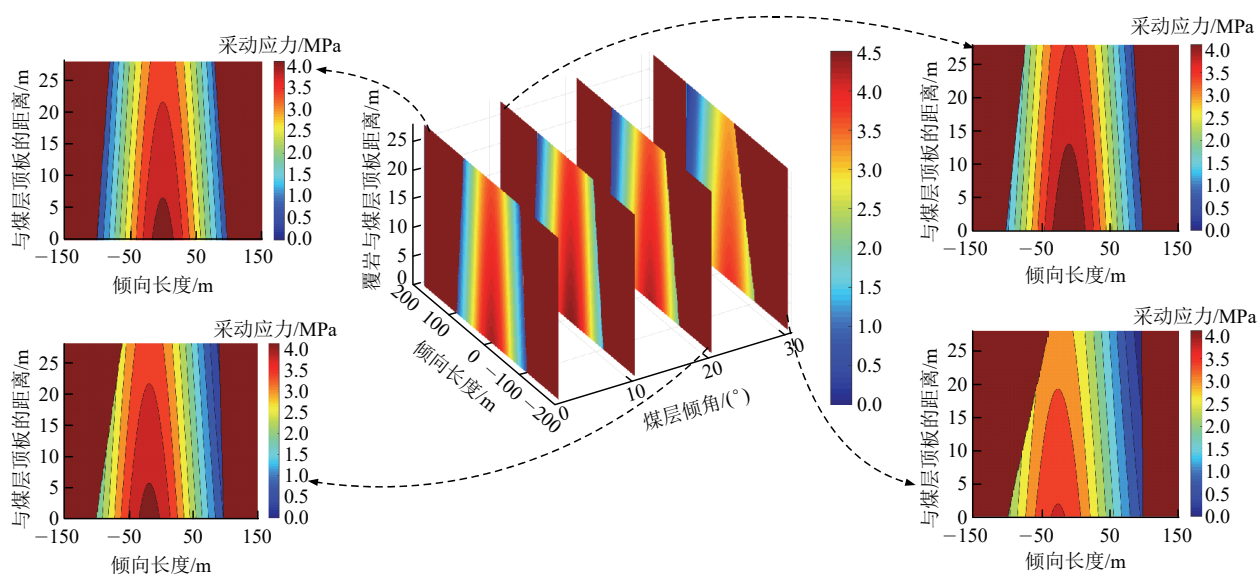


图7 不同非对称程度卸压边界分布

Fig.7 Boundary distribution of pressure relief under different degrees of asymmetry

随着煤层倾角由 0° 增加 30° ，采空区高位侧卸压范围由原来的 38.4 m 增加至 54.5 m，中部覆岩应力恢复位置由向低位侧移动 28.3 m，低位侧应力集中位置向实体煤侧延伸了 0.4 m。在距离煤层顶板 30 m 范围内的覆岩仍旧能够保持较高的压程度，有利于卸压瓦斯的快速运移。

3 地表沉降与瓦斯运移空间对应关系

3.1 模型建立

为了验证节 2 中采动卸压边界模型的正确性，本文采用 3DEC 数值模拟对不同倾角煤层开采进行数值模拟，并通过 Python 基于采动卸压边界分布的二次开发获得不同倾角煤层覆岩渗透率的分布规律。

3DEC 数值计算软件主要特点是允许覆岩产生大变形，节理面滑动、块体滑动、转动和脱离冒落，能够识别新产生的非连续面等特点。而煤矿开采过程中会相继出现采动裂隙生成、顶板冒落和地表沉降等现象，这些特点与 3DEC 能够模拟块体和裂隙行为的功能非常吻合。同时 3DEC7.0 在 2021 年发布以后内置了与 Fish 并行的 Python 二次开发语言，使得基于 3DEC 的二次开发更为容易。

在进行数值模拟前需要对研究对象进行合理的抽象简化，充分考虑计算时间、内存、网格划分等限制条件对计算速度的影响，从而在有限时间和精度下得出合理的模拟结果。除此以外，同时也应当设立合理的数据监测位置以便进行后期处理和分析。

由于岩体组成和结构的复杂性，且所获得的整体地质参数较少，在模型计算中很难将全部非连续结构考虑进来。同时，由于模拟的是煤系地层，煤

系地层为沉积岩，每一层的物理力学性质相似，因此在计算中同一地层均按同一属性进行处理。地层在形成过程中可能经历了多次板块构造运动，其岩层形态不可能十分规则，但目前收集到的岩层基本性质多为一个测点的数据，很难获得覆岩整体的形态。为了简化计算，在计算中假设岩层交界面平整且不考虑交界面的影响。只考虑倾角对于覆岩移动的影响，如图 8 所示。

倾斜煤层开挖数值模型在 x 轴方向长度为 600 m，在 y 轴方向高度为 400 m，工作面倾向长度为 200 m，数值模拟中煤层倾角分别为 0° ， 10° ， 20° 和 30° ，采高为 2 m。在计算模型两侧各留 200 m 煤柱，以降低边界影响并研究采动所导致的多场响应规律。模型左右和前后边界施加水平位移约束，底部为固定支撑边界，顶部为自由边界。为了较好地研究不同非对称程度覆岩多场响应机制，建立了 4 个模型，每个模型每次开采 40 m，不同倾角工作面长度相同，均为 200 m。通过 5 次开挖，完成整个回采过程。

在本次数值模拟研究中假设模型仅受重力影响，不考虑各类构造对采动覆岩非对称多场响应的影响，本构关系采用莫尔-库仑模型，模型中各岩层、岩块的物理力学参数见表 1，块之间节理裂隙物理力学参数见表 2。

3.2 计算结果与讨论

3.2.1 覆岩应力与地表沉降正向对应特征

由于地层分层沉积特性，岩层物理力学性质各不相同，导致在煤炭开采后覆岩形成的裂隙会有明显的差异。此外，不同倾角的煤层，即使在相同的采动响应下，其覆岩移动角、破碎程度和块体运动方式也不尽相同，导致覆岩采动应力分布也会呈现明显的非对称状态。

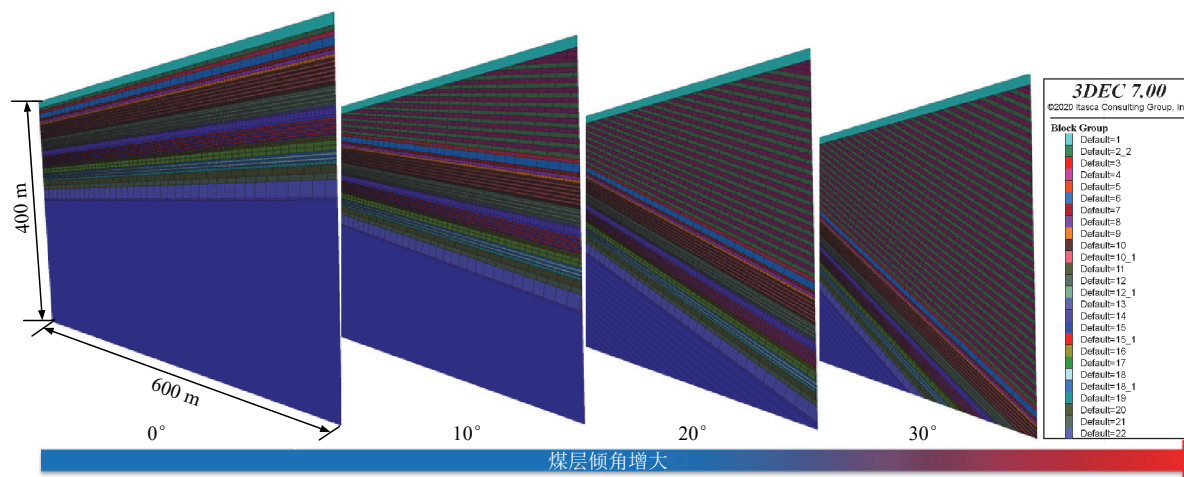


图 8 不同倾角煤层开采数值模型

Fig.8 Numerical models of coal seam mining with different inclinations angles

表 1 煤岩层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of coal and rock mass

序号	煤岩层名称	厚度/ m	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模 量/GPa	剪切模 量/GPa	内摩 擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	抗拉强 度/MPa
1	表土层	20.00	1 600	1.6	0.6	17	0.2	0.6
2	粉砂岩	1.80	2 300	28.0	12.8	34	4.8	5.6
3	中砂岩	3.20	2 450	43.0	26.0	35	5.6	6.2
4	1-1#煤层	1.80	1 350	16.2	6.2	20	2.8	3.2
5	粉砂岩	1.70	2 400	38.4	16.8	33	4.4	5.2
6	1-2#煤层	1.40	1 350	16.2	6.2	20	2.8	3.2
7	粉砂岩	2.00	2 300	28.0	12.8	34	4.8	5.6
8	粗砂岩	7.00	2 450	43.0	26.0	35	5.6	6.2
9	2-1#煤层	4.00	1 350	16.2	6.2	20	2.8	3.2
10	粉砂岩	3.30	2 300	28.0	12.8	28	4.8	5.6
11	2-2#煤层	3.40	1 350	16.2	6.2	20	2.8	3.2
12	粉砂岩	2.50	2 400	38.4	16.8	28	4.4	5.2
13	中砂岩	19.60	2 450	43.0	26.0	35	5.6	6.2
14	粗砂岩	2.50	2 300	28.0	12.8	34	4.8	5.6
15	3#煤层	1.56	1 350	16.2	6.2	20	2.8	3.2
16	中砂岩	3.65	2 450	43.0	26.0	35	5.6	6.2
17	粗砂岩	11.70	2 300	28.0	12.8	34	4.8	5.6
18	砾岩	1.50	2 400	38.4	16.8	33	4.4	5.2
19	4#煤层	2.81	1 350	16.2	6.2	20	2.8	3.2
20	泥岩	2.50	2 400	38.4	16.8	33	4.4	5.2
21	中砂岩	4.60	2 400	38.4	16.8	33	4.4	5.2
22	粗砂岩	4.10	2 400	30.4	15.8	30	6.0	5.2
23	中砂岩	8.60	2 400	38.4	16.8	33	4.4	5.2
24	粗砂岩	6.30	2 450	43.0	26.0	35	5.6	6.2
25	中砂岩	1.80	2 300	28.0	12.8	34	4.8	5.6
26	5#煤层	5.23	1 350	16.2	6.2	20	2.8	3.2
27	粉砂岩	2.50	2 400	38.4	16.8	33	4.4	5.2
28	中砂岩	7.00	2 400	38.4	16.8	33	4.4	5.2
29	砾岩	3.20	2 300	28.0	12.8	34	4.8	5.6
30	粗砂岩	9.10	2 400	38.4	16.8	33	4.4	5.2
31	6#煤层	3.60	1 350	16.2	6.2	20	2.8	3.2
32	粉砂岩	4.10	2 300	28.0	12.8	34	4.8	5.6
33	粗砂岩	3.90	2 400	30.4	15.8	30	6.0	5.2
34	粗砂岩	3.60	2 400	30.4	15.8	30	6.0	5.2
35	砾岩	4.20	2 300	28.0	12.8	34	4.8	5.6

表 2 煤岩层节理面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of coal seam joint surface

煤岩层名称	法向刚度/ GPa	剪切刚度/ GPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa
表土层	28.7	21.5	15.0	0.08	0.088
粉砂岩	131.6	98.7	26.3	1.92	2.112
中砂岩	291.9	218.9	30.0	1.12	1.232
煤	875.0	656.3	33.8	2.24	2.464
粗砂岩	437.5	328.1	35.0	2.24	2.464
砾岩	178.5	133.9	33.8	1.76	1.936
泥岩	102.0	76.5	32.5	1.76	1.936

图 9 为不同倾角煤层开采全过程中覆岩破坏与应力分布特征。由图可知：随着煤层倾角增加，位于工作面回风巷侧的岩层移动角大于工作面运输巷的岩层移动角。覆岩垮落后，高位侧仍能保持一定的离层区域，而低位侧的覆岩压实程度较高，碎胀系数也相对较小。煤层倾角的存在使得高位侧出现较低位侧明显的裂隙发育区。

由图 9 可知：当工作面推进到一定距离时，直接顶发生弯曲，且与上位岩层分离。随着离层裂隙扩展，在顶板两端面发生断裂。距离煤层顶板足够距离时，发生破断的可能性降低，但是覆岩的卸压范围已经传递到了较高位岩层中，随着煤层倾角增加，覆岩卸压范围也逐渐向高位侧倾斜。随着开采尺寸的增加，覆岩中部垮落岩块间裂隙逐步闭合。同时，由于分次开采，覆岩断裂有其非连续性，因此，会在整个采场形成大压力拱，而在采场内部会形成几个小压力拱。最终在采场中部形成几个增压、卸压交替出现的区域，而在采场两侧形成增压区域。

为了阐明覆岩地表沉降与煤层顶板覆岩采动应力分布相关关系，在地表和煤层顶板布置测线，图 10 为不同非对称程度覆岩应力与地表沉降对应关系图，由图可知：覆岩整体应力分布与位移沉降呈现比较好的对应关系。在采动影响区域地表沉降较小的位置覆岩卸压明显，而在地表沉降较大的位置其采动应力有明显的恢复。

在倾角为 0° 时覆岩地表沉降与应力分布呈现较好的对应关系，体现了覆岩采动应力和地表沉降关系有很好的对应性，但随着煤层倾角增加，覆岩地表沉降关系逐渐只能适用于覆岩内部，两侧采动影响区地表沉降与应力分布的对应关系相对较差，从而说明了采用分部计算不同倾角覆岩载荷的合理性。

相较基于连续介质理论的覆岩应力分布理论分析，在 3DEC 可以更好地模拟中覆岩运动非连续情况。与理论计算获得的连续应力分布不同的是，在采用离散元软件对其进行计算时，覆岩分阶段垮落，整体应力分布与理论计算较为一致，但受覆岩结构影响，在覆岩不同位置仍会呈现多个应力相对集中的位置，这是由于在垮落结构内部仍会存在多个小的压力拱，压力拱拱脚会有一定程度应力集中，导致了理论推导与数值模拟之间存在差异。但理论分析和数值模拟结果均表明：在覆岩倾向两侧均存

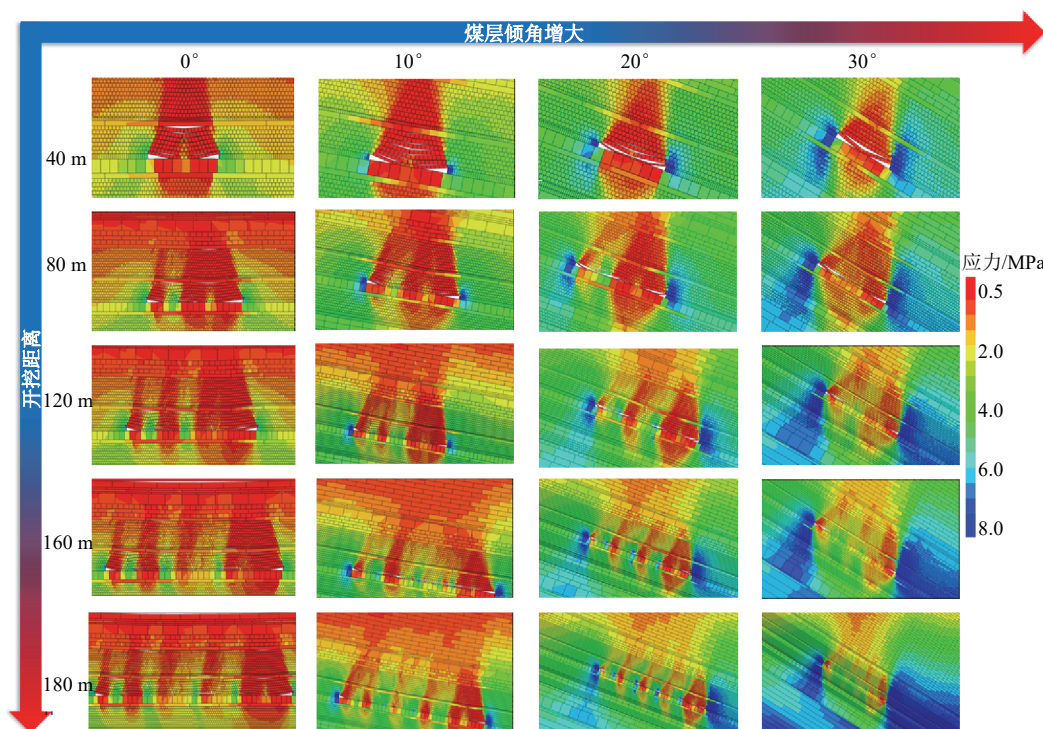


图 9 不同开挖距离与非对称程度下覆岩应力分布

Fig.9 Mining-induced stress distribution of overlying strata under different excavation distances and asymmetric degrees

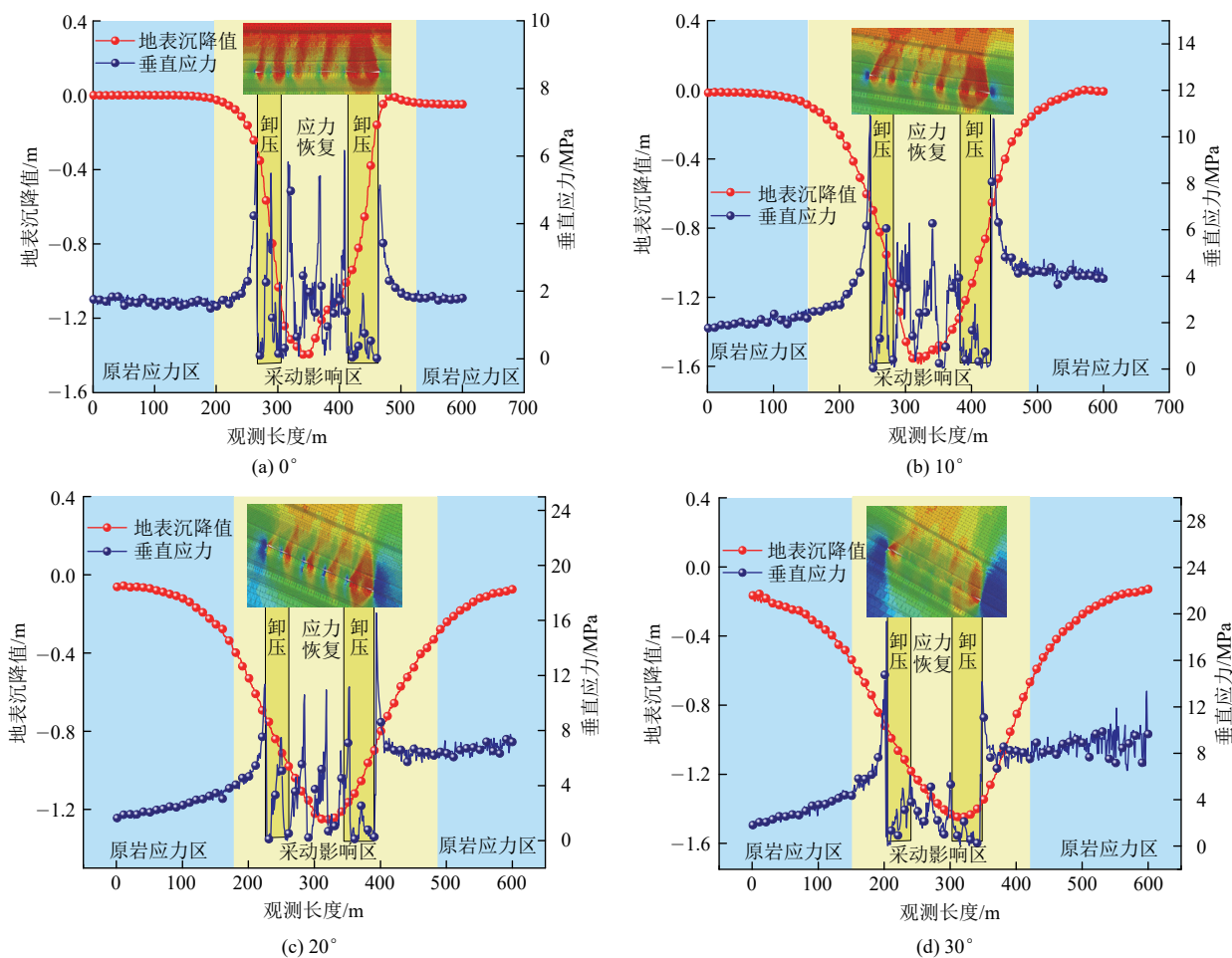


图 10 不同非对称程度下覆岩应力与地表沉降对应关系

Fig.10 Correspondence between mining-induced stress and surface subsidence under different asymmetric degrees

在卸压程度较高的卸压位置,是卸压瓦斯抽采的可能位置。

3.2.2 覆岩应力与渗透率非线性响应

采动作用后卸压区域是瓦斯快速运移的可能空间,因此理清不同时间点覆岩渗透率分布特征对于特定时间点选择与之相匹配的抽采位置至关重要。覆岩在卸压范围内会产生采动裂隙,裂隙渗透率与地应力密切相关,地应力的变化会导致渗透率呈指数型变化。卸压区渗透率可通过下式^[20]表示:

$$k = k_0 \exp[-0.25(\sigma_{x,z} - \sigma_{z0})] \quad (19)$$

式中: k_0 为原始渗透率(mD); k 为采动后渗透率(mD); σ_{z0} 为覆岩初始应力(MPa),其值一般可通过其相应的埋深进行估算:

$$\sigma_{z0} = \gamma z \cos \alpha \quad (20)$$

因此,将式(19)代入式(17)中可得覆岩不同位置的渗透率分布为

$$k = \begin{cases} k_0 \exp \left[-0.25 \left(\frac{6L_{ss1}}{D_1(t)^3} (D_1(t) - x_1 - z_1 \tan \beta_1)^2 - \gamma z \cos \alpha \right) \right] & \text{(低位侧覆岩)} \\ k_0 \exp \left\{ -0.25 \left\{ \left[10.39 \sigma_c^{1.042} (b-1) \frac{mq \cos \alpha}{r} \cdot \int_0^L e^{-\pi \frac{(x-l)^2}{r^2}} dl \right] / \left\{ b^{8.7} \left[h - \frac{mq \cos \alpha}{r} \int_0^L e^{-\pi \frac{(x-l)^2}{r^2}} dl \right] \right\} \right. \right. \\ \left. \left. [1 + f \exp(-gt)] \right\} - \gamma (H_0 - z) \cos \alpha - \gamma z \cos \alpha \right\} & \text{(中部覆岩)} \\ k_0 \exp \left\{ -0.25 \left[\frac{6L_{ss2}}{D_2(t)^3} [D_2(t) - x_2 - z_2 \tan \beta_2]^2 - \gamma z \cos \alpha \right] \right\} & \text{(高位侧覆岩)} \end{cases} \quad (21)$$

通过 3DEC 中内置的 Python 语言计算获得不同倾角煤层开采覆岩渗透率时空演化特征如图 11 所示。

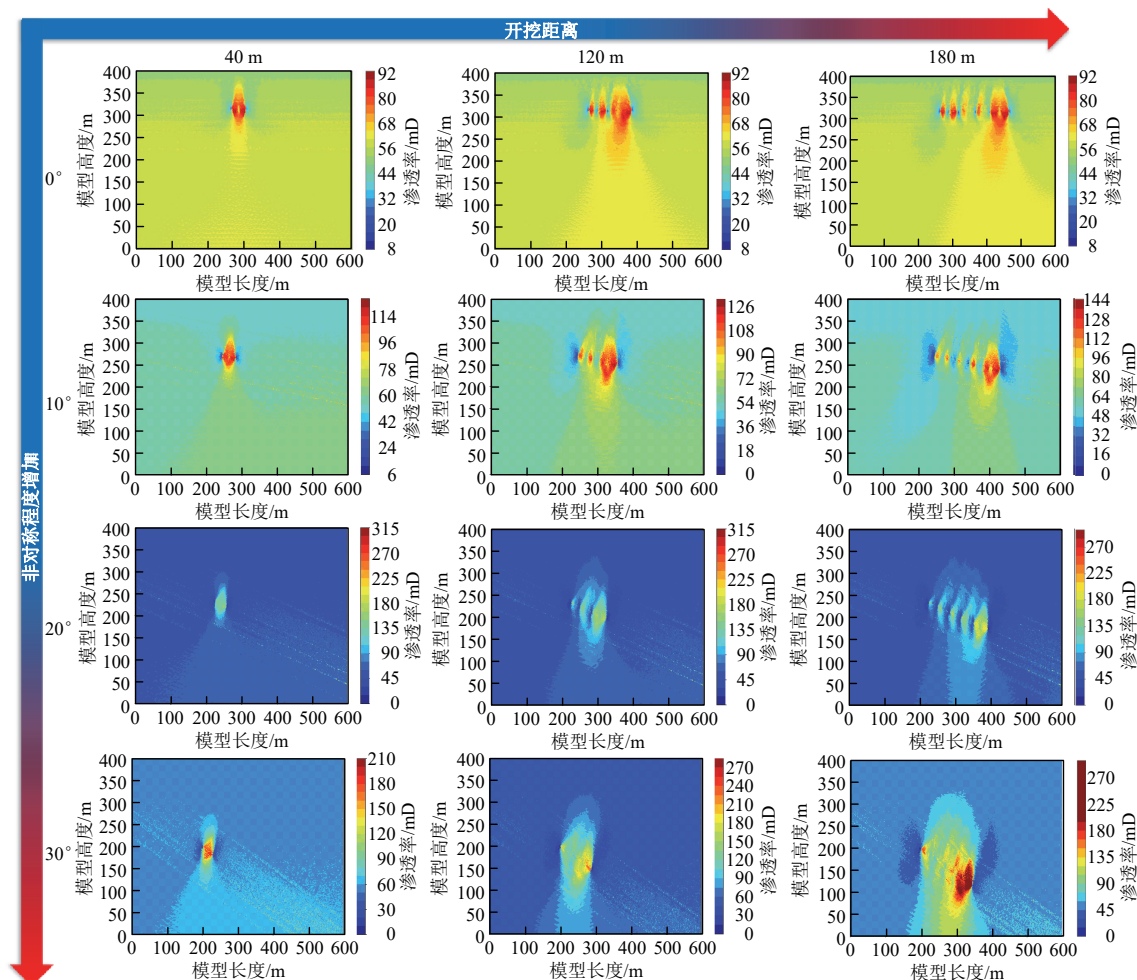


图 11 不同开挖距离与非对称程度下覆岩渗透率分布

Fig.11 Distribution of overlying strata permeability under different excavation distances and asymmetric degrees

随着煤层倾角增大, 覆岩渗透率最大值明显增加, 这是由于覆岩移动过程中, 在覆岩内部卸压会向高位侧倾斜, 高位侧覆岩应力变化大, 导致覆岩渗透率急剧增加。随着煤层倾角由 0° 增加到 30° , 覆岩最大渗透率由 90 mD 增加到 270 mD, 表明高位侧是卸压瓦斯抽采措施的重点区域, 非对称程度增加。覆岩高渗透率范围也相应扩大, 在一定程度上有助于覆岩瓦斯流动和富集。

随着开挖距离增加, 覆岩渗透率呈现更为明显的“一大拱内嵌多个小拱”的渗透率分布特征。覆岩渗透率变化与覆岩应力演化密切相关, 而覆岩应力分布受覆岩离散块体运动与搭接方式控制。垮落后覆岩与邻近断裂岩体形成了小型压力拱, 在小型压力拱内部覆岩渗透率升高, 但小型压力拱的形成受不同层位岩层垮落影响, 其分布与覆岩破断块体大小和程度密切相关, 很难实现精准定位。

在工作面进风巷与回风巷两侧, 覆岩能够保持较高渗透性, 是卸压瓦斯抽采的可能位置与空间, 但考虑到瓦斯密度较空气较小, 更易向高位侧富集, 因此, 卸压瓦斯抽采的有利空间只能是覆岩高位侧。另外, 在覆岩垮落后形成的“大拱内嵌多个小拱”结构中, 与煤层顶板距离较小位置覆岩呈现高渗区与低渗区交替出现的特征, 钻孔布置难以确定, 但在大拱内部且位于小拱上方的位置, 整体渗透率均较高, 是卸压瓦斯抽采的有利位置, 这也是卸压瓦斯抽采钻孔布置在裂隙带的重要原因。

4 结 论

(1) 建立了基于地表沉降与采动应力的正相关关系的覆岩非对称卸压边界模型。以地表沉降为核心参数反演不同倾角煤层采动覆岩的卸压范围与卸压程度, 定量表征覆岩卸压空间位置。随着煤层倾角由 0° 增加 30° , 采空区两侧煤壁应力集中位置应力差也由 0 MPa 增加至 13.1 MPa, 采空区高位侧卸压范围由原来的 38.4 m 增加至 54.5 m。

(2) 确定了倾斜煤层采动覆岩卸压边界“低位侧扩展-内侧下移”的特征。当煤层倾角由 0° 增加 30° 时, 低位侧实体煤破坏加剧, 导致应力集中位置向低位侧移动了 0.4 m, 低位侧卸压边界扩展; 同时在采空区中部垮落岩石也向低位侧堆集, 中部覆岩应力恢复位置向低位侧移动 28.3 m, 导致采空区中

部卸压边界下移。

(3) 揭示了采动作用下不同非对称程度覆岩多场演化规律。随着开挖的进行, 垮落后的覆岩逐步得到压实, 离层也逐步闭合, 整个煤层开采过程是覆岩不断破断和被压实的过程, 也是小压力拱逐步形成和大压力拱逐步扩大的过程。覆岩位移与渗透率分布的非对称特征逐渐明显与扩大, 覆岩最大渗透率由 90 mD 增加到 270 mD。

参考文献(References):

- [1] 李树刚, 杨二豪, 林海飞, 等. 深部开采卸压瓦斯精准抽采体系构建及实践[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 1-10.(LI Shugang, YANG Erhao, LIN Haifei, et al. Construction and practice of accurate gas drainage system for pressure relief gas in deep mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 1-10.(in Chinese))
- [2] 冉启灿, 梁运培, 邹全乐, 等. 倾斜煤层群覆岩“三场”非对称特征及靶向抽采机制[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 177-192.(RAN Qican, LIANG Yunpei, ZOU Quanle, et al. Asymmetric characteristics of “three-field” in overburden of inclined coal seam groups and target extraction mechanism[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 177-192.(in Chinese))
- [3] GUO H, YUAN L, SHEN B T, et al. Mining-induced strata stress changes, fractures and gas flow dynamics in multi-seam longwall mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 54(9): 129-139.
- [4] CHAI Y J, DOU L M, WU C, et al. Experimental investigation into damage and failure process of coal-rock composite structures with different roof lithologies under mining-induced stress loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 170(10): 105479.
- [5] 左建平, 吴根水, 孙运江, 等. 岩层移动内外“类双曲线”整体模型研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 333-343.(ZUO Jianping, WU Genshui, SUN Yunjiang, et al. Investigation on the inner and outer analogous hyperbola model(AHM) of strata movement[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 333-343.(in Chinese))
- [6] 郭文兵, 赵高博, 白二虎. 煤矿高强度长壁开采覆岩破坏充分采动及其判据[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3 657-3 666.(GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, BAI Erhu. Critical failure of overlying rock strata and its criteria induced by high-intensity longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3 657-3 666.(in Chinese))
- [7] 余伊河, 马立强, 张东升, 等. 长壁工作面采动覆岩层理开裂机制及侧向裂隙发育规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(增2): 527-541.(YU

- Yihe, MA Liqiang, ZHANG Dongsheng, et al. Mechanism of bedding cracking and development laws of lateral fracture in overlying strata induced by longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(Supp.2): 527 - 541.(in Chinese))
- [8] 刘 奇, 笪雨欣, 曹广勇, 等. 裂隙发育过程对采动裂隙抛带压实区的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 52(5): 25 - 35.(LIU Qi, DA Yuxin, CAO Guangyong, et al. Study on the influence of fracture development process on the compaction area of overlying strata in working face[J]. Coal Science and Technology, 2023, 52(5): 25 - 35.(in Chinese))
- [9] MONDAL D, ROY P, KUMAR M. Monitoring the strata behavior in the distressed zone of a shallow Indian longwall panel with hard sandstone cover using mine-microseismicity and borehole televiewer data[J]. Engineering Geology, 2020, 271(6): 105593.
- [10] 徐 超, 王 凯, 郭 琳, 等. 采动覆岩裂隙与渗流分形演化规律及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(12): 2 389 - 2 403. (XU Chao, WANG Kai, GUO Lin, et al. Fractal evolution law of overlying rock fracture and seepage caused by mining and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(12): 2 389 - 2 403.(in Chinese))
- [11] 张 礼, 齐庆新, 张 勇, 等. 采动覆岩裂隙场三维形态特征及其渗透特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(4): 695 - 705. (ZHANG Li, QI Qingxin, ZHANG Yong, et al. Study on three-dimensional shape and permeability of mining-induced fractured field in overburden rock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(4): 695 - 705.(in Chinese))
- [12] 陈荣华, 白海波, 冯梅梅. 综放面覆岩导水裂隙带高度的确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(2): 220 - 223.(CHEN Ronghua, BAI Haibo, FENG Meimei. Determination of the height of water flowing fractured zone in overburden strata above fully-mechanized top-coal caving face[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(2): 220 - 223.(in Chinese))
- [13] PENG S. Surface subsidence engineering: theory and practice[M]. Balkema: Csiro Publishing, 2020: 133 - 136.
- [14] 李 亮, 何富连, 许旭辉, 等. 近距离煤层应力拱形态与支承压力分布演化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 295 - 303.(LI Liang, HE Fulian, XU Xuhui, et al. Study on the evolution of stress arch shape and abutment pressure distribution in close distance coal seams[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2023, 40(2): 295 - 303.(in Chinese))
- [15] 韩红凯. 关键层对支承压力分布影响规律的理论研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.(HAN Hongkai. Theoretical study on the influence of key strata on abutment pressure distribution[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.(in Chinese))
- [16] 刘正和, 赵阳升, 弓培林, 等. 回采巷道顶板大深度切缝后煤柱应力分布特征[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 18 - 23.(LIU Zhenghe, ZHAO Yangsheng, GONG Peilin, et al. Distribution characteristics of coal pillar stress after the roadway roof being large depth cutting seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 18 - 23.(in Chinese))
- [17] TUNCAY D, TULU I, KLEMETTI T. Re-analysis of Abutment angle method for moderate and deep cover retreat room and pillar mines and investigation of loading mechanics using finite volume modeling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(7): 3 447 - 3 468.
- [18] WILSON A. The stability of underground workings in the soft rocks of the coal measures[J]. International Journal of Mining Engineering, 1983, 1(2): 91 - 187.
- [19] 谢广祥. 采高对工作面及围岩应力壳的力学特征影响[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 6 - 10.(XIE Guangxiang. Influence of mining thickness on mechanical characteristics of working face and surrounding rock stress shell[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 6 - 10.(in Chinese))
- [20] LIU A, LIU S M, WANG G, et al. Continuous compaction and permeability evolution in longwall gob materials[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(12): 5 489 - 5 510.