

# 采动工作面前方煤岩体积变形及瓦斯增透研究

薛东杰, 周宏伟, 唐咸力, 赵宇峰

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 研究工作面前方煤岩体瓦斯渗透率分布对合理抽取瓦斯具有技术指导意义。通过简化孔隙、裂隙等效力学模型, 建立标准圆柱煤岩体试件的等效力学模型, 推导含单一裂隙的纯煤岩试样等效轴向、径向与体积应变, 并推广应用到含多种裂隙的多种介质组合结构, 通过试验验证理论力学模型具有较好的可靠性。以淮南张集矿 11-2 煤层工作面回采为原型, 通过数值计算得到 3 种典型开采的支承压力峰值集中系数, 并推导出支承压力与水平应力分布表达式, 其能综合考虑开采条件、影响范围与采动卸压产生的体积膨胀变形。建立体积应变与渗透率之间的多项式关系式, 并给出采动条件下不同开采方式下的体积应变分布曲线与渗透率分布曲线, 根据其各阶段的特征差异划分为不同的阶段, 为工作面抽采瓦斯提供了理论依据。

**关键词:** 工作面; 等效力学模型; 体积应变; 采动卸压

中图分类号: TU458.3

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2013)02 - 0328 - 09

**作者简介:** 薛东杰(1986 - ), 男, 山东微山人, 博士, 主要从事煤与瓦斯共采及岩土工程等方面的研究。E-mail: xuedongjie@163.com。

## Mechanism of deformation-induced damage and gas permeability enhancement of coal under typical mining layouts

XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, TANG Xian-li, ZHAO Yu-feng

(School of Mechanics, Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Study on permeability distribution of coalface is of guiding significance in reasonable exploitation of gas. An equivalent mechanical model is established by simplifying the characteristics of pores and cracks. From the establishment of the equivalent mechanical model for a standard cylindrical coal-rock specimen, the equivalent formulas for axial, radial and volumetric strains are derived for coal-rock samples containing a single crack, and then are extended to the application in a variety of media combinations containing multiple cracks. The theoretical mechanical model shows good reliability by experimental verification. Based on the prototype of 11-2 coal seam mining face of Zhangji Mine in Huainan, the peak concentration factors of abutment pressure under three typical mining layouts are obtained by numerical calculation. An expression for the distribution of abutment pressure and horizontal stress is derived considering different mining layouts, different stages and volume expansion induced by mining. By establishing a polynomial relationship between volumetric strain and permeability, the distribution of volumetric strain and permeability under different mining layouts is obtained, and divided into different stages according to their various characteristics. It may provide a theoretical basis for the coal mine methane.

**Key words:** coalface; equivalent mechanical model; volumetric strain; mining-induced pressure

## 0 引 言

根据安全开采与绿色开采要求, 目前先抽后采综合治理瓦斯技术已经成为高瓦斯矿井防突防爆的关键技术, 同时为煤与瓦斯共采防治其产生的突出灾害(瓦斯浓度超标、瓦斯爆炸等)提供安全保障<sup>[1-3]</sup>。尤其是工作面的瓦斯治理与防治对提高矿工安全作业环境与提高工作面产能具有重要意义。随着工作面向前推进, 前方煤岩体应力环境发生周期性的变化, 支承压力主要分为原始应力区、升压区与降压区, 三区随采动向

前移动, 即超前支承压力峰值前移, 而水平应力从原始应力区逐渐减小过渡到工作面。从煤岩体变形的角度三区依次可以划分为弹性区、塑性区与破裂区。目前国内学者开展了大量的试验集中研究工作面前方三区的划分<sup>[4-10]</sup>, 而针对三区的划分如何有效地指导瓦斯抽采钻孔的布置与深度, 如何根据前方煤岩体的真

基金项目: 国家 973 项目(2011CB201201); 国家自然科学基金项目(51134018); 国家科技支撑计划课题项目(2008BAB36B07)

收稿日期: 2012 - 03 - 31

实应力状态定量判断其变形与瓦斯解析增透效果的研究还较少。陈忠辉等<sup>[4]</sup>针对综放开采煤壁前方支承压力的分布特征, 应用统计损伤力学建立了一个简单的力学模型, 在给定变形条件下研究支承压力的分布规律。王同旭等<sup>[5]</sup>采用数值软件模拟了孤岛工作面侧向支承压力的分布规律, 并利用雷达探测研究了塑性破坏区沿倾斜方向的变化规律, 找出了支承压力高峰位置及应力降低区范围。浦海等<sup>[6]</sup>在岩层控制的关键层理论上, 运用 RFP2000 软件, 模拟了综放采动覆岩的冒落过程, 得到了采动覆岩的破断垮落规律和围岩支承压力的动态分布规律, 进而得到了综放采空区的支承压力分布情况。李树刚等<sup>[7]</sup>认为采场卸压瓦斯的运移规律明显受支承压力的影响。谢广祥等<sup>[8]</sup>应用弹性极限平衡理论, 考虑煤层厚度及倾角的影响, 分析得出综放面倾向煤柱支承压力峰值位置的计算式及分布规律。史红等<sup>[9]</sup>基于微地震监测建立覆岩空间结构下的采场倾向支承压力计算模型。刘金海等<sup>[10]</sup>采用冲击地压实时监测预警系统现场研究深井特厚煤层综放工作面支承压力分布特征。

上述研究主要集中在根据三区的划分定性判断前方煤岩体裂隙分布规律, 因此, 综合定量考虑煤岩体真实应力环境与煤岩体变形产生裂隙及瓦斯解析增透机理尤为重要。考虑煤岩体真实赋存地质环境(倾角等)与煤岩体横观各向同性力学性质, 推导其三轴应力状态下含孔隙裂隙的圆柱状煤岩体的轴向应变、径向应变与体积应变理论公式, 以淮南张集矿 11-2 煤层工作面回采为原型, 并根据三种典型开采条件下(放顶煤、保护层与无煤柱)前方煤岩体的采动应力环境, 分析了其煤岩体变形、裂隙分布及瓦斯增透效果, 并给出工作面前方的瓦斯增透效果分布, 为不同开采方式下煤与瓦斯共采提供理论参考。

### 1 煤岩体变形理论推导

沉积与地质构造运动等造成实际煤层具有不同角度的倾向, 而上覆岩层压力对煤层的作用并非垂直于其层理方向而是具有一定角度, 真实还原煤岩体实际赋存地质环境对监测分析煤岩位移变形具有工程指导意义。煤岩作为典型的沉积岩具有明显的层理性, 即具有横观各向同性, 同时由于变质原因等造成煤岩体具有不同的孔隙与裂隙结构, 导致煤岩体局部的各向异性。煤岩体通常含较大尺度的裂隙与较小尺度的孔隙, 如图 1 所示, 煤基岩考虑为横向各向同性材料, 裂隙考虑为莫尔库仑材料, 孔隙考虑为各向同性材料。事实上孔隙、裂隙尺度上并没有严格的区分定义, 并且孔隙的形状各异。因此建立孔隙等效模型(见图 2

(a)), 即孔隙形状统一为圆球状, 孔隙率不变; 建立裂隙等效模型(见图 2 (b)), 忽略其界面分形效应, 其长度尺寸不变, 但考虑一定厚度煤岩体介质。

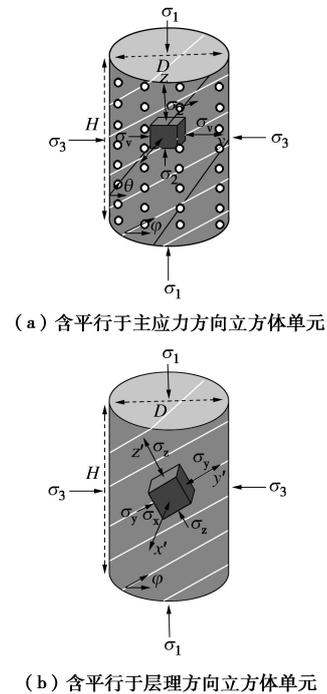


图 1 煤岩体等效力学模型

Fig. 1 Equivalent mechanical model of coal-rock

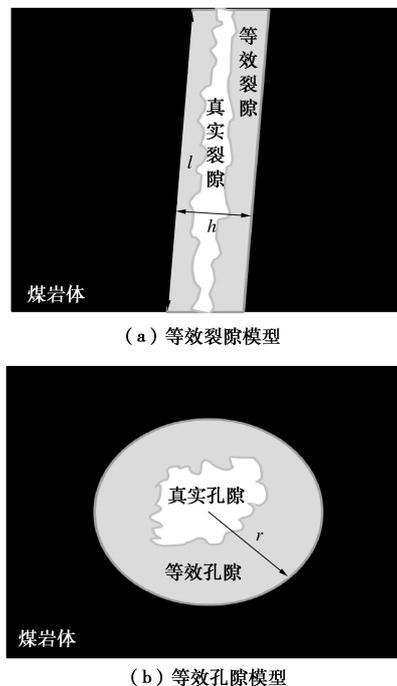


图 2 等效孔隙裂隙平面模型

Fig. 2 Equivalent mechanical model of porosity and cracks

处在深部的煤岩体通常受力状态为静水压力状态, 坐标系在不转变的条件下, 圆柱煤岩体内立方体单元的应力状态(平行于主应力方向)也应该为静水

压力状态。假设深部垂直方向应变为零，将圆柱煤岩体简化成平面应变问题。为方便求解建立极坐标系并求解径向应力与环向应力，先从含孔圆盘模型求解，如图3所示，圆盘直径为 $D$ ，即半径 $b = D/2$ ，圆孔半径为 $a$  ( $a < b$ )，应力对称分布，设应力函数与极角无关，求解可得<sup>[11]</sup>

$$\sigma_r = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \cdot \frac{\sigma_3' - \sigma_3}{r^2} + \frac{a^2 \sigma_3' - b^2 \sigma_3}{b^2 - a^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 b^2}{a^2 - b^2} \cdot \frac{\sigma_3' - \sigma_3}{r^2} + \frac{a^2 \sigma_3' - b^2 \sigma_3}{b^2 - a^2} \quad (2)$$

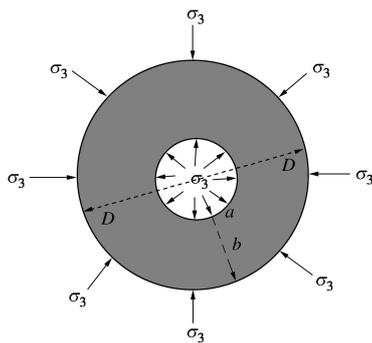


图3 简化平面力学模型  
Fig. 3 Simplified planar mechanical model

煤岩体为实心圆柱，即满足 $\sigma_3' = 0$ 与 $a = 0$ ，代入上式，得

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \sigma_3 \quad (3)$$

可见整体上煤岩体单元呈假三轴受压状态，轴向应力为 $\sigma_1$ ，如图1(a)所示，建立三维坐标系 $xyz$ ， $z$ 坐标轴通过煤岩体柱体轴线，垂直端平面，并在 $xyz$ 坐标中取煤岩体单元，其方向与坐标系方向一致，同时建立极坐标系， $z$ 坐标轴与三维坐标系相同。由于 $\sigma_1$ 在这两种坐标系下具有不变性，因此可推导出直角坐标系与极坐标系中应力分量关系：

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_\theta \sin^2 \theta' + \sigma_r \cos^2 \theta' - 2\sigma_{r\theta'} \sin \theta' \cos \theta', \\ \sigma_{xy} = -\sigma_\theta \sin \theta' \cos \theta' + \sigma_r \sin \theta' \cos \theta' - \sigma_{r\theta'} \sin^2 \theta' + \sigma_{r\theta'} \cos^2 \theta', \\ \sigma_y = \sigma_\theta \cos^2 \theta' + \sigma_r \sin^2 \theta' + 2\sigma_{r\theta'} \sin \theta' \cos \theta'. \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)中，可见在 $xyz$ 坐标系下煤岩体单元应力状态为

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

因为两个空间坐标系 $x$ 轴方向重合，因此 $x'y'z'$ 空间立方体单元(见图1(b))应力状态为

$$[\sigma'] = [T][\sigma][T]^{-1}, \quad (6)$$

式中，坐标转换公式 $[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$ 及其逆矩

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

代入整理得

$$[\sigma'] = \begin{bmatrix} \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_1 \sin^2 \phi + \sigma_3 \cos^2 \phi & (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \phi \cos \phi \\ 0 & (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \phi \cos \phi & \sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_3 \sin^2 \phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

横观各向同性材料模型独立的弹性常数为5个，分别为 $x'$ 方向的变形模量 $E_{x'}$ 和泊松比 $\nu_{x'y'}$ ， $z'$ 方向的变形模量 $E_{z'}$ 和泊松比 $\nu_{z'}$ ，与 $x'$ 轴垂直平面内的剪切模量 $G'$ ，根据广义虎克定律，则其本构方程(不考虑切应变)可表示为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \varepsilon_{z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_{x'} & -\nu_{x'y'}/E_{x'} & -\nu_{z'}/E_{z'} \\ -\nu_{x'y'}/E_{x'} & 1/E_{x'} & -\nu_{z'}/E_{z'} \\ -\nu_{z'}/E_{z'} & -\nu_{z'}/E_{z'} & 1/E_{z'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{y'} \\ \sigma_{z'} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将其分解转换到 $xyz$ 坐标系中：

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \varepsilon_{z'} \end{bmatrix} \quad (9)$$

进一步考虑单一裂隙的影响，定义其法向刚度为 $k_n$ ，切向平行于裂隙角度刚度为 $k_{s//}$ ，切向垂直于裂隙角度刚度为 $k_{s\perp}$ ，则根据莫尔库仑准则得

$$\begin{cases} \sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta \\ \tau_{s//} = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta \\ \tau_{s\perp} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

可见，垂直于裂隙角度切应力分量为零，则其法向与切向应变分别为

$$\begin{cases} \varepsilon_n = \sigma_n / k_n, \\ \varepsilon_{s//} = \tau_{s//} / k_{s//}. \end{cases} \quad (11)$$

将其分解叠加，可得单一裂隙在 $xyz$ 坐标系中的应变分量为

$$\begin{cases} \varepsilon_{rx} = 0 \\ \varepsilon_{ry} = \cos^2 \theta \sin \theta \frac{k_{s//} - k_n}{k_{s//} k_n} \sigma_1 + \left( \frac{\sin^2 \theta}{k_n} + \frac{\cos^2 \theta}{k_{s//}} \right) \sin \theta \sigma_3 \\ \varepsilon_{rz} = \left( \frac{\cos^2 \theta}{k_n} + \frac{\sin^2 \theta}{k_{s//}} \right) \cos \theta \sigma_1 + \sin^2 \theta \cos \theta \frac{k_{s//} - k_n}{k_{s//} k_n} \sigma_3 \end{cases} \quad (12)$$

孔隙事实上为一空隙，不含介质，但由于孔隙的存在改变了其周边包围孔隙的煤岩体基质的受力特征，在这里将包含孔隙的足够小的煤岩体基质作为孔

隙一部分, 作为各向同性弹性介质考虑, 设其弹性模量为  $E_\phi$ , 则  $xyz$  坐标系中各应变分量为

$$\begin{cases} \varepsilon_{\phi x} = (\sigma_3 - \nu_\phi \sigma_1 - \nu_\phi \sigma_3) / E_\phi, \\ \varepsilon_{\phi y} = (\sigma_3 - \nu_\phi \sigma_1 - \nu_\phi \sigma_3) / E_\phi, \\ \varepsilon_{\phi z} = (\sigma_1 - 2\nu_\phi \sigma_3) / E_\phi. \end{cases} \quad (13)$$

取煤岩体整体高度  $H$ , 直径  $D$ , 含  $n$  组裂隙, 单条裂隙宽度  $h_i$ , 长度  $l_i = D / \cos \theta_i$ , 孔隙率为  $\phi$ , 孔隙等效球半径为  $r$ , 若孔隙平均分布整个体积, 可得沿轴向平均孔隙个数为  $H\phi / 2r$ , 沿径向平均孔隙个数为  $D\phi / 2r$ , 联立式 (13) 与式 (14), 故沿  $x$  方向 (径向) 孔隙总位移  $\delta_{\phi x}$ 、沿  $y$  方向 (径向) 孔隙总位移  $\delta_{\phi y}$  与沿  $z$  方向 (径向) 煤岩孔隙总位移  $\delta_{\phi z}$  分别为

$$\begin{cases} \delta_{\phi x} = D\phi\varepsilon_{\phi x}, \\ \delta_{\phi y} = D\phi\varepsilon_{\phi y}, \\ \delta_{\phi z} = H\phi\varepsilon_{\phi z}. \end{cases} \quad (14)$$

多组裂隙沿  $x$  方向 (径向) 总位移  $\delta_{tx}$ 、沿  $y$  方向 (径向) 总位移  $\delta_{ty}$  与沿  $z$  方向 (径向) 煤岩总位移  $\delta_{tz}$  分别为

$$\begin{cases} \delta_{tx} = 0 \\ \delta_{ty} = \sum_{i=1}^n \left\{ \cos^2 \theta_i \sin \theta_i \frac{k_{is//} h_i - k_{in} l_i}{k_{is//} k_{in}} \sigma_1 + \left( \frac{h_i \sin^2 \theta_i}{k_{in}} + \frac{l_i \cos^2 \theta_i}{k_{is//}} \right) \sin \theta_i \sigma_3 \right\} \\ \delta_{tz} = \sum_{i=1}^n \left\{ \left( \frac{h_i \cos^2 \theta_i}{k_{in}} + \frac{l_i \sin^2 \theta_i}{2k_{is//}} \right) \cos \theta_i \sigma_1 + \sin^2 \theta_i \cos \theta_i \frac{2k_{is//} h_i - k_{in} l_i}{2k_{is//} k_{in}} \sigma_3 \right\} \end{cases} \quad (15)$$

煤岩基质沿  $x$  方向 (径向) 总位移  $\delta_{ox}$ 、沿  $y$  方向 (径向) 总位移  $\delta_{oy}$  与沿  $z$  方向 (径向) 煤岩总位移  $\delta_{oz}$  分别为

$$\begin{cases} \delta_{ox} = \varepsilon_x \left( D - D\phi - \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\sin \theta_i} \right), \\ \delta_{oy} = \varepsilon_y \left( D - D\phi - \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\sin \theta_i} \right), \\ \delta_{oz} = \varepsilon_z \left( H - H\phi - \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\cos \theta_i} \right). \end{cases} \quad (16)$$

因此煤岩体整体沿  $x$  方向 (径向) 总位移  $\tilde{\delta}_x$ 、沿  $y$  方向 (径向) 总位移  $\tilde{\delta}_y$  与沿  $z$  方向 (径向) 煤岩总位移  $\tilde{\delta}_z$  分别为

$$\begin{cases} \tilde{\delta}_x = \delta_{\phi x} + \delta_{tx} + \delta_{ox}, \\ \tilde{\delta}_y = \delta_{\phi y} + \delta_{ty} + \delta_{oy}, \\ \tilde{\delta}_z = \delta_{\phi z} + \delta_{tz} + \delta_{oz}. \end{cases} \quad (17)$$

从而可得到等效模型的沿  $x$  方向 (径向) 等效应变  $\tilde{\varepsilon}_x$ 、沿  $y$  方向 (径向) 等效应变  $\tilde{\varepsilon}_y$  与沿  $z$  方向 (径向) 等效应变  $\tilde{\varepsilon}_z$  分别为

$$\begin{cases} \tilde{\varepsilon}_x = \tilde{\delta}_x / D, \\ \tilde{\varepsilon}_y = \tilde{\delta}_y / D, \\ \tilde{\varepsilon}_z = \tilde{\delta}_z / H, \end{cases} \quad (18)$$

因此等效体积应变为

$$\tilde{\varepsilon}_v = \tilde{\varepsilon}_x + \tilde{\varepsilon}_y + \tilde{\varepsilon}_z. \quad (19)$$

## 2 理论与试验对比验证

煤岩岩样取自淮南张集煤矿 11-2 煤层 1122 (1) 工作面, 工作面标高 -700.9 ~ -663.5 m, 煤层产状为:  $150^\circ \sim 180^\circ \angle 4^\circ \sim 7^\circ$ , 以块状及粉末状为主, 内生裂隙发育, 但 11-2 煤层瓦斯相对涌出量为:  $6 \sim 8 \text{ m}^3/\text{t}$ , 瓦斯含量较高, 瓦斯压力为  $0.5 \sim 3 \text{ MPa}$ , 根据《防治煤与瓦斯突出规定》(2009) 为瓦斯突出危险区。由于从工作面处取得为大煤块, 需加工成所需标准圆柱状试件 ( $\phi 50 \text{ mm} \times H 100 \text{ mm}$ )。同时加工时考虑煤层层理与垂直应力角度, 则层理角度为  $7^\circ$ , 如图 4 所示。试样长度 10.4 cm, 截面面积  $19.63 \text{ cm}^2$ , 表观体积  $204.15 \text{ cm}^3$ , 岩样干重 269.2 g, 密度  $1.32 \text{ g/cm}^3$ 。考虑应力与瓦斯的耦合效应, 开展全应力应变过程渗透试验: 将试样放在三轴压力室中并固定住, 采用位移加载的方式施加轴压, 速率为  $0.1 \text{ mm/min}$ , 围压保持设定为  $6 \text{ MPa}$ , 轴压逐渐增加至试样完全破坏。

煤岩体正面具有一条主裂隙, 两条短裂隙相互平行, 但不贯穿试样。背面具有一条主裂隙, 两条相交短裂隙, 贯穿试样顶部, 两条主裂隙基本贯穿整个试样, 对试样的宏观力学性质产生一定影响。将较短裂隙的长度与宽度加权平均到主裂隙, 因此只需考虑两条主裂隙的影响。目前关于煤岩体横观各向同性的基本力学参数试验较少, 统计文献[12]给出的具体煤样试验数据<sup>[12]</sup>, 弹性模量与泊松比垂直层理方向是平行层理方向倍数范围分别为:  $2.5 \sim 7.7$ ,  $1.8 \sim 3.1$ , 分别取其 5.0 与 1.8, 则各组成部分的具体力学参数见表 1。

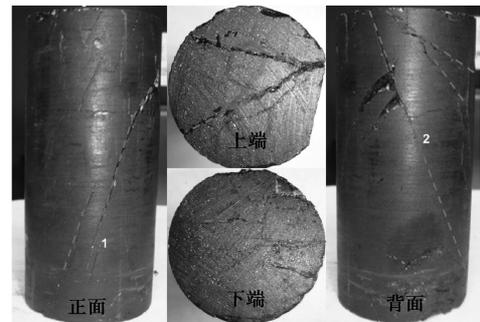


图 4 煤岩试样结构特征

Fig. 4 Structural characteristics of coal-rock samples



表1 煤岩试样各组成结构力学性质参数

Table 1 Mechanical parameters of composition in coal-rock samples

组成结构	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	法向刚度 $k_n/\text{MPa}$	切向刚度 $k_s/\text{MPa}$	裂隙角度 $\theta/(\text{°})$
主裂隙1	—	0.03cm (宽度)	3500	1100	73
主裂隙2	—	0.2cm (宽度)	3500	1100	69
孔隙介质	2700	0.3	—	—	6% (孔隙率)
煤岩块	3500 (垂直层理)	0.35 (垂直层理)	1400 (剪切模量)	—	—
基质	700 (平行层理)	0.2 (平行层理)	—	—	—

图5为试验得到的全应力应变曲线,从形变角度看,主要经历了初始煤岩体压密、线弹性变形、峰后破坏阶段,总体上看由于煤岩致密强度较高破坏方式为脆性破坏。当围压6 MPa,轴压在0~30 MPa范围内,为线弹性阶段,此时对应的轴向应变范围为0~0.01525,径向应变范围为-0.00534~0,体积应变范围为0~-0.00534。图6为理论计算的线弹性范围应力应变曲线,无论是轴向、径向应变,还是体积应变都与试验曲线有较好的一致性,虽然其值略大于试验值,但可以基本反映煤岩体试件变形规律。事实上在推导上述公式中,并未考虑非线性因素,因此其适用范围仅限于线弹性范围,即基于横观各向同性的包含孔隙裂隙煤岩力学模型可以较好地反映实际试验线弹性范围内试件的变形。

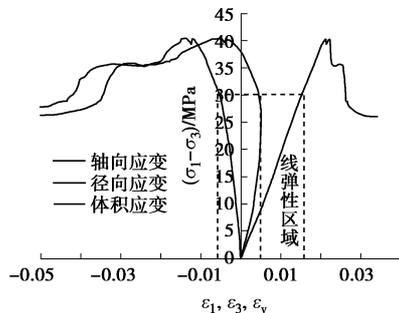


图5 全应力应变过程曲线图

Fig. 5 Complete stress-strain curves

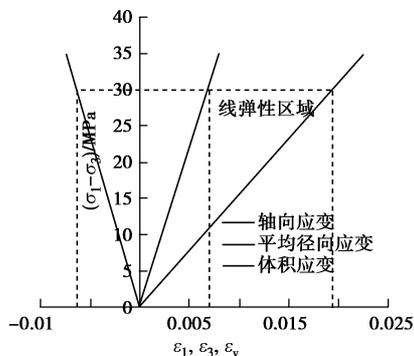


图6 理论应力应变过程曲线(线弹性)

Fig. 6 Theoretical stress-strain curves in linear elastic range

### 3 3种典型开采条件下煤岩体受力特征

随着工作面的推进,工作面前方煤岩体的受力状

态不断经历着原始应力区、增压区与卸压区的转换,与此同时伴随着煤岩体的变形区域的转移,即塑性区不断随开采向前推移,而裂隙的产生亦随之产生并向周围扩散。裂隙又是瓦斯流动的主要通道,因此工作面前方煤岩体裂隙分布与瓦斯渗透规律对合理抽取瓦斯具有指导意义,对防止瓦斯突出具有安全意义。放顶煤开采、无煤柱开采与保护层开采作为3种不同角度定义的开采形式,具有典型的但不同的采动支承压力分布特征,谢和平等<sup>[13]</sup>指出保护层开采支承压力峰值集中系数范围为1.5~2.0,放顶煤约为2.0~2.5,而无煤柱开采的应力集中系数最高,范围约2.5~3.0,而水平应力则是从原始应力状态卸压至临空工作面单轴应力状态。通常煤岩体的变形特征取决于其受力状态,分析工作面前方煤岩体3种不同的应力状态分布即可得知其前方不同的变形分布,进一步通过变形与瓦斯渗透关系分析获得瓦斯增透效果分布。

淮南张集煤矿所在区域煤(岩)层的总体构造形态为单斜构造,地质构造相对简单。煤岩成分以暗煤为主,次为亮煤,属半暗型。煤层厚度较为稳定,局部含有一至二层泥岩夹矸,单层夹矸厚为0~0.68 m,煤厚1.45~3.86 m,平均2.68 m。直接顶为泥岩,厚度0~5.99/0.94,灰色—深灰色,块状—碎块状结构;老顶为粉细砂岩,厚度4.5~13.04/8.19,灰色—深灰色,块状—碎块状结构;直接底为泥岩,厚度0~2.72/1.34,灰—深灰色,块状结构;老底为砂质泥岩,厚3.01~9.60/5.52,灰色—深灰色,脆性。瓦斯地质情况:11-2煤层为突出危险区,预计瓦斯相对涌出量为:6~8 m<sup>3</sup>/t。13-1煤层位于保护层上部,距其顶板距离为82 m,平均厚度6.63 m,瓦斯含量与11-2煤层相同,为预防13-1煤层煤与瓦斯突出,首先开采11-2较薄煤层。以淮南1122(1)工作面综合机械化开采为背景,利用FLAC<sup>3D</sup>建立数值模型:长(x)420 m,宽(y)25 m,高(z)128 m,共47层,煤层有3层,开挖层为第41层,属于第2煤层;边界条件:四周边界(约束水平方向),底部(约束垂直方向),顶部(等效边界条件,埋深600 m,均布荷载约15 MPa);材料模型:莫尔库仑准则,见图7。保护层开采模型设置成薄层煤开采,放顶煤开采设置成厚煤层大采高

开采, 无煤柱开采设置成沿空留巷形式, 支承压力及水平压力模拟见图 8 (b)、9 (b)、10 (b), 支承压力峰值集中系数保护层、放顶煤与无煤柱开采具体为 1.75, 2.17 与 2.95, 相对大小比值为 (1.75 : 2.17 : 2.95=1 : 1.24 : 1.69), 与文献[13]定义较为一致, 但 3 种不同开采方式下三区的划分并不完全相同。

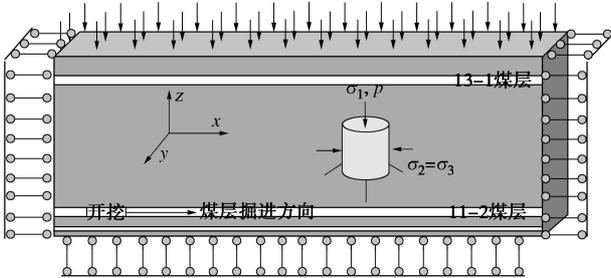
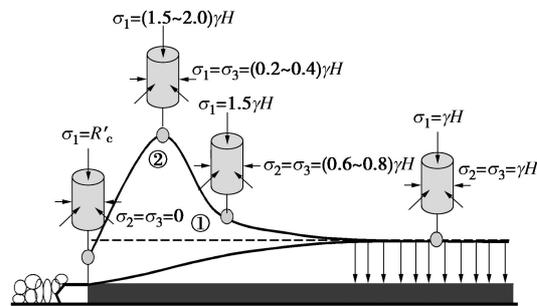
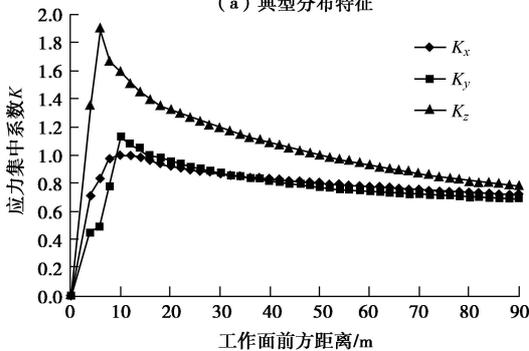


图 7 数值计算模型

Fig. 7 Computational model



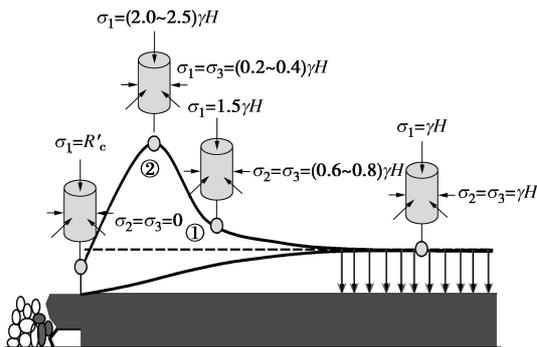
(a) 典型分布特征



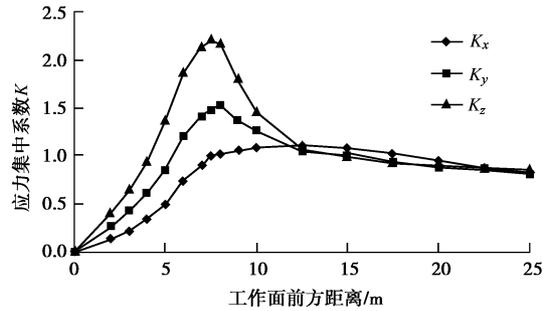
(b) 模拟分布特征

图 8 保护层开采工作面前方煤岩体受力特征

Fig. 8 Characteristics of stress distribution of coal in coalface under protective coal seam mining



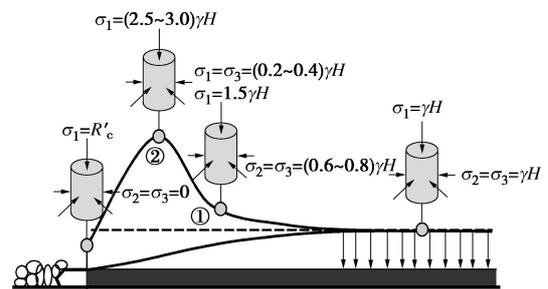
(a) 典型分布特征



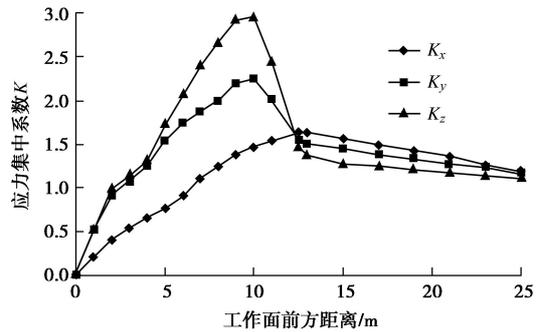
(b) 模拟分布特征

图 9 放顶煤开采工作面前方煤岩体受力特征

Fig. 9 Characteristics of stress distribution of coal in coalface under top-coal caving



(a) 典型分布特征



(b) 模拟分布特征

图 10 无煤柱开采工作面前方煤岩体受力特征

Fig. 10 Characteristics of stress distribution of coal in coalface under non-pillar mining

可见不同的开采方式对煤岩体的扰动具有差异性, 图 11 为 3 种典型开采条件工作面前方支承压力分布特征对比, 总体上讲, 无煤柱开采对前方煤岩体影响无论是强度还是范围都较大, 放顶煤次之, 保护层最小, 根据谢和平等<sup>[13]</sup>提出的不同的 3 种典型开采条件采动卸荷的采动力学的水平应力表达式: ①峰值点  $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1 / 5\alpha$  ( $\alpha = 2.0, 2.5, 3.0$ ), ②增压区中部曲线反转点  $\sigma_2 = \sigma_3 = 2\sigma_1 / 5$ , 结合以淮南张集矿为原型的 3 种典型开采方式数值模拟结果, 即保护层、放顶煤与无煤柱开采支承压力峰值集中系数  $\alpha$  分别为 1.75, 2.17 与 2.95, 提炼 3 种典型开采的共性特征: 如图 12 所示, 虽然 3 种典型开采方式支承压力峰值系数与影响范围不同, 但总体上支承压力曲线升压区段可以进一步划

分为缓慢增压区(②③区间)与急速增压区(①③区间),  $L_1$ ,  $L_2$  与  $L_3$  为对应三区间的长度, 具体数值根据现场实测数据; 水平应力曲线划分为急速降压区(②③区间)与缓慢降压区, 而临空工作面煤岩单元体支撑压力为残余压力  $R'_c$  与水平应力  $0$ 。将 3 种典型开采影响范围考虑, 引入影响因子  $\beta$ , 分别取值为 1 (保护层)、1.24 (放顶煤) 与 1.69 (无煤柱), 因此工作面前方煤岩体的支撑压力分布函数可表示成

$$\sigma_1 = \begin{cases} \frac{(\alpha\gamma h - R'_c)}{\beta L_1} x + R'_c, & (0 \leq x < \beta L_1) \\ -\frac{(\alpha - 1.5)}{\beta L_2} \gamma h x + \frac{(\alpha - 1.5)L_1 + \alpha L_2}{L_2} \gamma h, & (\beta L_1 \leq x < \beta L_1 + \beta L_2) \\ -\frac{0.5\gamma h}{\beta L_3} x + \frac{L_1 + L_2 + 3L_3}{2L_3} \gamma h, & (\beta L_1 + \beta L_2 \leq x \leq \beta L_1 + \beta L_2 + \beta L_3) \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $\gamma$  为上覆岩层平均重度, 取  $25000 \text{ N/m}^3$ ,  $h$  为埋深 (m),  $\alpha$  为支撑压力峰值系数, 取 1.75 (保护层)、2.17 (放顶煤) 与 2.95 (无煤柱),  $x$  为距工作面距离 (m), 内涵关系式为  $L_2 = 2L_1$ , 则对应的水平应力分布函数表达式为

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \begin{cases} \frac{\gamma h}{5\beta L_1} x & (0 \leq x < \beta L_1 + \beta L_2) \\ \frac{2\gamma h}{5\beta L_3} x + \frac{3\gamma h}{5} \left(1 - \frac{2L_1}{L_3}\right) & (\beta L_1 + \beta L_2 \leq x \leq \beta L_1 + \beta L_2 + \beta L_3) \end{cases} \quad (20)$$

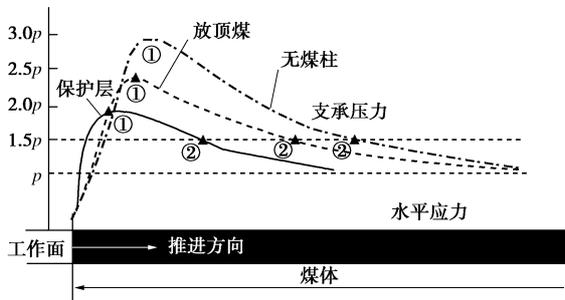


图 11 3 种典型开采条件工作面前方支撑压力分布特征  
Fig. 11 Distribution of abutment pressure of coalface under three typical mining layouts

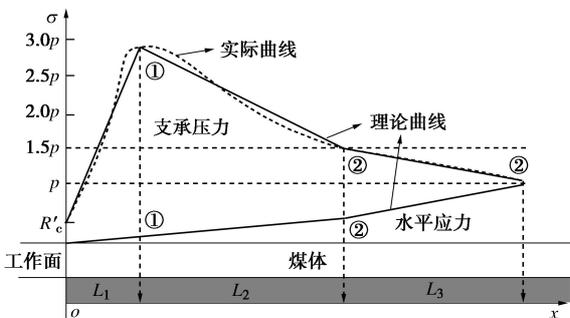


图 12 工作面前方煤岩体支撑压力与水平压力理论分布特征  
Fig. 12 Theoretical distribution of abutment pressure and horizontal stress

通过上述分析, 可以得到不同开采条件下考虑采

动影响的工作面前方煤岩体的应力状态方程, 通过支撑压力峰值系数  $\alpha$ , 方程可以反映不同开采条件下的支撑压力与水平应力分布特征, 通过影响因子  $\beta$ , 方程可以反映 3 种典型开采条件下的不同的影响范围。传统的煤岩体破坏力学行为的轴向变形、径向变形和体积变形均在峰值应力时突然下跌, 对应体积变形相对初始状态始终为体积压缩, 整个破坏过程未出现体积膨胀, 是材料本征力学行为, 而煤岩体的采动力学行为为基于煤岩体初始应力状态下考虑采动影响的以体积膨胀为明显特征的变形行为, 可以真实反映卸荷状态下煤岩体的变形特征。

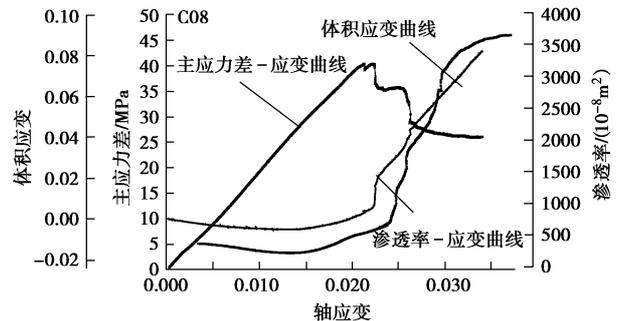


图 13 典型应变 - 渗透曲线

Fig. 13 Typical strain-permeability curve

图 13 为上述试件的全应力 - 应变过程中的渗透率变化曲线, 可观测到总体上煤岩试件的应变 - 渗透率曲线与应力 - 应变曲线的变化趋势基本一致, 但渗透率的变化明显滞后于应变变化, 其不同阶段有不同的变化趋势, 分析总结如下:

(1) 体积压缩阶段。煤岩体初始孔裂隙闭合阻碍了瓦斯的渗透, 从而导致渗透率降低总体上表现为渗透率随轴应变的增加而减少。

(2) 线弹性变形阶段。其渗透率大约是在煤岩线弹性阶段的中点处达到最小, 随后煤岩的渗透率的变化趋势发生明显变化, 由随应变增加而减小的趋势变为随应变增加而增加趋势, 可见煤岩体孔裂隙并未完全闭合。随着轴压的增大, 煤岩中开始产生新的孔裂隙并随之贯通, 瓦斯的流动通道扩大, 渗透率随之增大。

(3) 体积急剧膨胀阶段。随着轴向力的逐渐增加, 煤岩内部裂隙进一步扩展、贯通, 开始逐渐出现宏观裂缝, 当体积应变达到 0.015 时, 体积迅速膨胀, 此后煤岩的渗透率由缓慢的增大演化为急剧增大。随着裂隙逐渐连同形成宏观裂缝, 瓦斯基本上以宏观流动为主。随着变形越大渗透率急剧增加, 当体积应变达到峰值, 渗透率也达到峰值。

图 14 为体积应变 - 渗透率关系曲线, 除初始体

加其渗透率逐渐增大直至稳定, 将试验数据利用多项式拟合, 得到理论体积应变 ( $\varepsilon_v$ ) - 渗透率 ( $k$ ) 关系方程

$$k = -410461\varepsilon_v^2 - 71713\varepsilon_v + 602.59 \quad (21)$$

根据式 (19) 与式 (20) 可以计算得到保护层开采、放顶煤开采与无煤柱开采工作面前方煤岩体的体积应变的分布曲线 (见图 15), 可见煤岩体本征行为体积应变均大于 0, 以压缩变形为主, 而采动力学行为体积应变均小于等于 0, 以膨胀变形为主。总体上看, 工作面开采卸压导致前方煤岩体变形膨胀, 保护层开采与放顶煤开采体积应变分布曲线基本分为 4 个变形阶段, 其分界范围基本与支承压力分布范围一致, 分别为变形剧烈阶段、变形增长阶段、变形初始阶段与稳定阶段。但无煤柱开采升压区体积应变变化较一致, 未有明显变化为, 其变形初始与增长阶段界限模糊。从工作面临空区到原始应力区, 体积膨胀变形逐渐减小直至减小到 0, 而卸压区变形较大, 变化趋势也较大, 其中无煤柱开采产生的卸压区范围间最大。

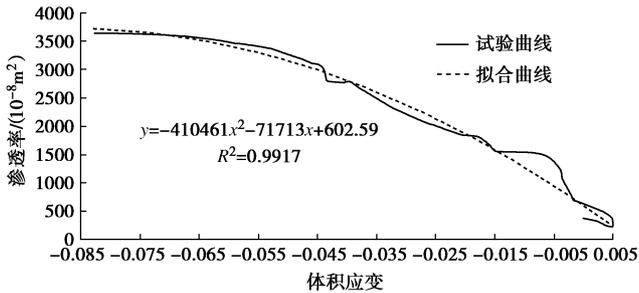


图 14 体积应变渗透率关系曲线

Fig. 14 Relationship between volumetric strain and permeability

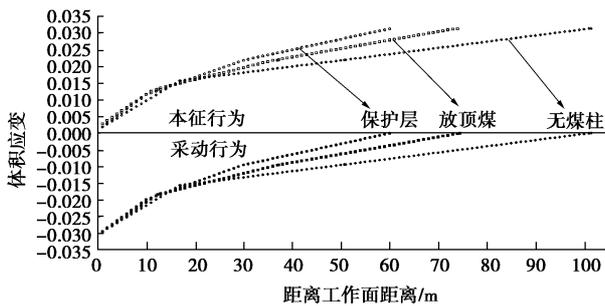


图 15 体积应变分布曲线

Fig. 15 Distribution of volumetric strain under different conditions

图 16 为工作面前方煤岩体, 其分布趋势与体积应变分布趋势基本一致, 分为 3 个主要阶段: 急速增加阶段、增长阶段与缓慢增加阶段, 但不同开采方式其三区分布范围不同, 缓慢增加阶段与增长阶段分界点渗透率约为初始渗透率的 2 倍左右, 保护层开采约为 30 m, 放顶煤开采约为 37.2 m, 无煤柱开采约为 50.7 m。增长阶段与渗透率急剧增加阶段分界点约为

初始渗透率的 3 倍左右, 但 3 种开采条件下范围基本一致, 约为 17 m 左右, 处在增压区范围, 可见在卸压区范围内抽采瓦斯, 其渗透率高, 瓦斯抽采效果较好, 若煤矿瓦斯含量较高, 瓦斯抽采孔可以穿过卸压区, 也应止于增压区, 因为渗透率已经有明显下降。随着工作面向前推进, 支承压力峰值前移, 煤岩体体积应变与渗透率的随之动态演化调整。

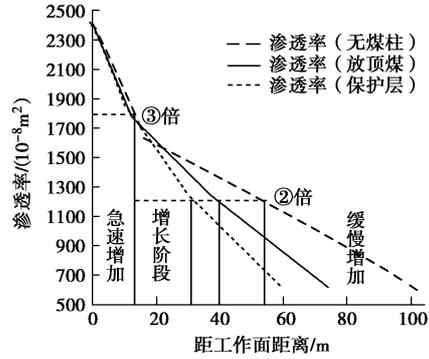


图 16 渗透率分布曲线

Fig. 16 Distribution of coalface permeability

### 4 结 论

上述研究表明, 工作面开采引起前方煤岩体变形及瓦斯渗透变化是一个复杂的过程, 其主要特点及规律如下:

(1) 建立了等效孔隙、裂隙模型, 并推导了三维空间状态下可以考虑含孔隙裂隙的横向各向同性煤岩体力学模型, 其能真正考虑基于倾角的煤岩体真实赋存应力状态, 给出煤岩体等效轴向应变、径向应变与体积应变表示式, 通过与试验比较, 理论模型可以较好地反映煤岩体真实变形。

(2) 基于淮南张集矿 11-2 工作面开采, 结合 3 种典型开采条件, 得到保护层、放顶煤与无煤柱 3 种典型开采的支承压力峰值系数分别为 1.75, 2.17 与 2.95, 进一步提炼不同开采方式的共性特征, 并推导出支承压力与水平应力分布公式, 其能综合考虑不同开采方式及影响范围下的煤岩体采动力学行为。

(3) 全应力 - 应变过程渗透率变化曲线基本分为 3 个阶段: 体积压缩阶段, 线弹性变形阶段及体积急剧膨胀阶段, 并且当体积应变达到 0.015 时, 渗透率急剧增大。

(4) 建立体积应变与渗透率之间的多项式关系方程, 并给出采动条件下 3 种不同开采方式下的体积应变分布曲线与渗透率分布曲线。保护层开采与放顶煤开采体积应变分布曲线基本分为 4 个变形阶段, 其分界范围基本与支承压力分布范围一致, 分别为变形剧烈阶段、变形增长阶段、变形初始阶段与稳定阶段。但无煤柱开采升压区体积应变变化较一致, 未有明显

变化为,其变形初始与增长阶段界限模糊。而渗透率分布曲线分为3个主要阶段:急速增加阶段、增长阶段与缓慢增加阶段,但不同开采方式其三区分布范围不同。

#### 参考文献:

- [1] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(7): 1067 - 1074. (YUAN Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(7): 1067 - 1074. (in Chinese))
- [2] 李晓泉, 尹光志. 含瓦斯煤的有效体积应力与渗透率关系[J]. 重庆大学学报, 2011, **34**(8): 103 - 109. (LI Xiao-quan, YIN Guang-zhi. Relationship between effective volumetric stress and permeability of gas-filled coal[J]. Journal of Chongqing University, 2011, **34**(8): 103 - 109. (in Chinese))
- [3] 尹光志, 蒋长宝, 王维忠, 等. 不同卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和瓦斯渗流特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(1): 68 - 77. (YIN Guang-zhi, JIANG Chang-bao, WANG Wei-zhong, et al. Experimental study of influence of confining pressure unloading speed on mechanical properties and gas permeability of containing-gas coal rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(1): 68 - 77. (in Chinese))
- [4] 陈忠辉, 谢和平. 综放采场支承压力分布的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(4): 436 - 439. (CHEN Zhong-hui, XIE He-ping. Damage mechanics analysis on the distribution of abutment pressure around a coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(4): 436 - 439. (in Chinese))
- [5] 王同旭, 刘传孝, 王小平. 孤岛煤柱侧向支承压力分布的数值模拟与雷达探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(增刊2): 2484 - 2487. (WANG Tong-xu, LIU Chuan-xiao, WANG Xiao-ping. FLAC3D numerical simulation and radar detection of lateral abutment pressure distribution of isolated coal pillar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(S2): 2484 - 2487. (in Chinese))
- [6] 浦海, 缪协兴. 综放采场覆岩冒落与围岩支承压力动态分布规律的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(7): 1122 - 1126. (PU Hai, MIAO Xie-xing. Numerical simulation of dynamic falling of overlying rocks and abutment pressure in surrounding rocks for fully-mechanized top-coal caving stope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(7): 1122 - 1126. (in Chinese))
- [7] 李树刚, 林海飞, 成连华. 综放开采支承压力与卸压瓦斯运移关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(19): 3288 - 3291. (LI Shu-gang, LIN Hai-fei, CHENG Lian-hua. Relation between abutment pressure and relieved gas delivery for fully-mechanized top coal caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(19): 3288 - 3291. (in Chinese))
- [8] 谢广祥, 杨科, 刘全明. 综放面倾向煤柱支承压力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(3): 545 - 549. (XIE Guang-xiang, YANG Ke, LIU Quan-ming. Study on distribution laws of stress in inclined coal pillar for fully-mechanized top-coal caving face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(3): 545 - 549. (in Chinese))
- [9] 史红, 姜福兴. 基于微地震监测的覆岩多层空间结构倾向支承压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊1): 3274 - 3280. (SHI Hong, JIANG Fu-xing. Study on abutment pressure rule of overlying strata spatial structures based on micro-seismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 3274 - 3280. (in Chinese))
- [10] 刘金海, 姜福兴, 王乃国, 等. 深井特厚煤层综放工作面支承压力分布特征的实测研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(增刊1): 18 - 22. (LIU Jin-hai, JIANG Fu-xing, WANG Nai-guo, et al. Survey on abutment pressure distribution of fully-mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep shaft[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(S1): 18 - 22. (in Chinese))
- [11] 王龙甫. 弹性理论[M]. 北京: 科学出版社, 1979. (WANG Long-fu. Theory of elasticity[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [12] 李同林, 乌效鸣, 屠厚泽. 煤岩力学性质测试分析与应用[J]. 地质与勘探, 2000, **36**(2): 85 - 88. (LI Tong-lin, WU Xiao-ming, TU Hou-ze. The measurement and analysis and application on the mechanical property of coal seam[J]. Geology and Prospecting, 2000, **36**(2): 85 - 88. (in Chinese))
- [13] 谢和平, 周宏伟, 刘建峰, 等. 不同开采条件下采动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(7): 1067 - 1074. (XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, LIU Jian-feng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(7): 1067 - 1074. (in Chinese))