

文章编号:0253-9993(2013)07-1101-08

# 煤与瓦斯共采中煤层增透率理论与模型研究

谢和平<sup>1</sup>,高峰<sup>2</sup>,周宏伟<sup>3</sup>,程红梅<sup>2</sup>,周福宝<sup>4</sup>

(1. 四川大学,四川 成都 610065;2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116;3. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;4. 中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116)

**摘要:**地下开采中瓦斯抽采的针对性与有效性是煤与瓦斯共采的关键问题,其核心是在理论和技术上对采动引起的裂隙网络所形成的增透性进行定义和分析。在综合考虑煤体在不同开采方式形成的支承压力、孔隙压力和瓦斯吸附膨胀耦合作用对损伤裂隙煤体体积改变的影响的基础上,定义了一个新力学量——增透率,来反映单位体积改变下煤体渗透率的变化,推导了4种增透率的理论表达式,并对工程实例进行数值分析,定量描述了开采过程中覆岩和煤层中增透率的分布和演化,结果表明增透率能够反映开采扰动对煤岩体裂隙网络渗透性的影响,为煤与瓦斯共采工程中的煤层增透效果评价提供定量指标和科学方法。

**关键词:**煤与瓦斯共采;增透率;渗透性;支承压力;体积应变

**中图分类号:**TD712.6;TD313 **文献标志码:**A

## On theoretical and modeling approach to mining-enhanced permeability for simultaneous exploitation of coal and gas

XIE He-ping<sup>1</sup>, GAO Feng<sup>2</sup>, ZHOU Hong-wei<sup>3</sup>, CHENG Hong-mei<sup>2</sup>, ZHOU Fu-bao<sup>4</sup>

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Faculty of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The pertinence and effectiveness of gas pumping for underground coal mining is an important issue for simultaneous exploitation of coal and gas. Its core is the definition and analysis of mining-enhanced permeability of mining-induced fracture network from the view point of science and technology. In this paper, considering the volumetric change of damage coal with cracks induced by coupling of the abutment pressure under different mining conditions, pore pressure, expansion caused by gas adsorption, the mechanical definition of a new word of mining-enhanced permeability was obtained. The word means the change in permeability by volumetric change of coal and four kinds of theoretical models were derived. Then an engineering example was studied based on the numerical calculation of the mining-enhanced permeability in the overburden rock and coal seam. The result shows that the mining-enhanced permeability is able to represent the quantitative influence on permeability of coal caused by the evolution of the cracks, and can be the scientific method and strong support for quantitative evaluation of effect on permeability of coal.

**Key words:** simultaneous exploitation of coal and gas; mining-enhanced permeability; permeability; abutment pressure; volumetric strain

我国煤层50%以上为高瓦斯煤层,高突矿井占全国矿井总数的44%,国有重点煤矿中该比例更高,

达72%。由于我国经济高速发展对能源的迫切需求,促使我国煤炭持续进行大规模高强度开采,煤矿

收稿日期:2013-06-21 责任编辑:毕永华

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201201);国家自然科学基金资助项目(51134018)

作者简介:谢和平(1956—),男,湖南双峰人,中国工程院院士。E-mail:xihep@scu.edu.cn

灾害特别是瓦斯灾害事故频发,严重威胁煤矿的安全生产和高效生产<sup>[1-3]</sup>。

对煤矿而言,瓦斯既是煤矿灾害的祸首,同时又是一种不可再生的清洁能源,实现煤与瓦斯共采,是瓦斯灾害治理和资源利用的根本途径。但我国煤层普遍具有瓦斯压力高、含量大、渗透率低、吸附性强的特点,瓦斯抽采难度极大。因此对煤层进行人工增透,增大煤层的透气性成为实现煤与瓦斯共采的有效途径。

瓦斯在煤层中的流动规律是煤矿瓦斯抽采理论的重要课题,为此,众多学者分别对煤岩体的裂隙发育特征、瓦斯流动规律进行了深入研究,取得了大量的研究成果。McKee等开展了应力与煤体孔隙度和渗透率间的关系研究<sup>[4]</sup>;Enever和Henning得到煤体有效应力与渗透率间的影响规律<sup>[5]</sup>;Somerton等得到加载方式、硬度和破碎程度对烟煤渗透特性的影响<sup>[6]</sup>。孙培德通过变化围压与孔隙压力的作用,进行含瓦斯煤体的三轴压缩试验,系统地研究了含瓦斯煤体在变形过程中渗透率的变化规律<sup>[7]</sup>。李祥春等在考虑煤骨架吸附变形特性的条件下,从孔隙率基本定义出发,在理论上给出了渗透率和膨胀变形之间的关系<sup>[8]</sup>。汪有刚等将渗流力学与弹塑性力学相结合,考虑煤层瓦斯和煤体骨架之间的相互作用,建立了煤层瓦斯运移的数学模型<sup>[9]</sup>;程国明等引入等效弹性模量和有效应力系数描述损伤和孔隙压力对顶煤渗透特性的影响,建立了综采顶煤的渗透率模型<sup>[10]</sup>;Connell等利用多孔介质线弹性本构关系,根据孔隙率和体积应变的关系及孔隙率与渗透率的关系建立了三轴应力作用下煤体渗透率演化模型<sup>[11]</sup>;Gu等考虑裂隙的各向异性变形,建立了裂隙煤体各向异性渗透率演化模型<sup>[12]</sup>。Pan等基于煤体各向异性吸附膨胀变形理论,建立了煤体各向异性渗透率演化模型<sup>[13]</sup>。Yuan等利用流固耦合局部劣化方法,根据全应力-应变过程中不同阶段的变形机制,建立了非均质煤岩体全应力-应变过程的渗透率演化模型<sup>[14]</sup>。Maleki等根据考虑裂纹特征的细观损伤变量与渗透率的关系和细观损伤变量与宏观损伤变量的关系,建立了与损伤发展相关的渗透率演化模型<sup>[15]</sup>。

可见,目前工作大多集中在煤的渗透属性、瓦斯运移基本规律的研究,并未考虑煤炭开采过程中支承压力变化和水平应力卸载效应导致的煤体变形破裂以及复杂裂隙网络对煤层渗透性的影响,因而无法描述不同开采方式下煤体渗透率的变化规律。而开采导致的高密度、高联通度的采动裂隙,使煤层的渗透率发生了根本性改变,目前还没有合适的理论来定量

描述这种增透机制和增透效果,更没有评价方法和体系来指导煤与瓦斯共采。笔者针对煤体在支承压力变化和水平应力卸荷作用下产生的高度破裂,即根本上改变煤体的渗透性,以体积改变量为切入点,提出以增透率作为新力学量来反映煤体的增透效果,为煤与瓦斯共采提供理论指导和定量评价依据。

## 1 增透率定义及概念模型

由于开采扰动,深部地下煤岩体的原岩应力平衡状态被打破,煤体所受的应力大小和应力状态都在发生连续改变(图1)<sup>[16]</sup>。图1中 $\gamma$ 为上覆岩层平均容重, $H$ 为煤层采深。

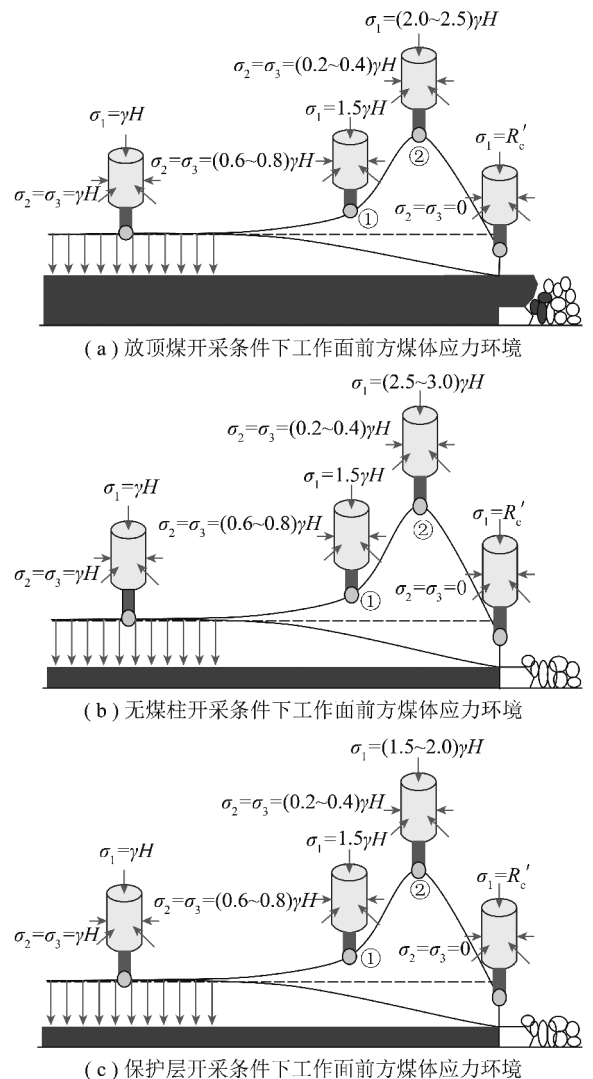


图1 目前煤矿3种典型开采方式下煤体支承压力的变化<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Distribution of abutment pressure under various mining layouts<sup>[16]</sup>

在支承压力作用和释放的过程中,煤体结构也从原始完整状态向裂隙发育、裂隙扩展到煤体开裂直至破碎发生着连续变化,正是这些采动导致的损伤裂隙

与破碎,使煤体的渗透性发生了根本改变,也使瓦斯有效抽采成为可能。

渗透率综合体现了材料结构孔隙的容量以及连通性程度,煤体渗透率的变化与其体积改变密切相关,也与煤体损伤密切相关,我们可以运用损伤裂隙体力学方法来进行分析。

考虑损伤裂隙煤体的一个代表性体积单元,内部包含足够多的煤基质颗粒和孔隙。单元体外边界受总应力为  $\sigma_{ij}$ ,单元体内孔隙瓦斯压力为  $p\delta_{ij}$ ,单元体内煤颗粒表面受到吸附膨胀应力  $\sigma_s\delta_{ij}$ ,其受力情况如图 2 所示。可以将该受力情况看成图 3 中 3 种载荷情况的叠加。

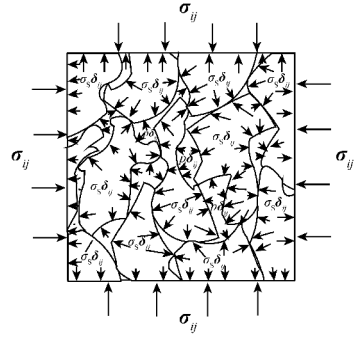


图 2 含瓦斯煤代表性体积单元的受力情况  
Fig. 2 Stress state of representative volumetric element of coal containing gas

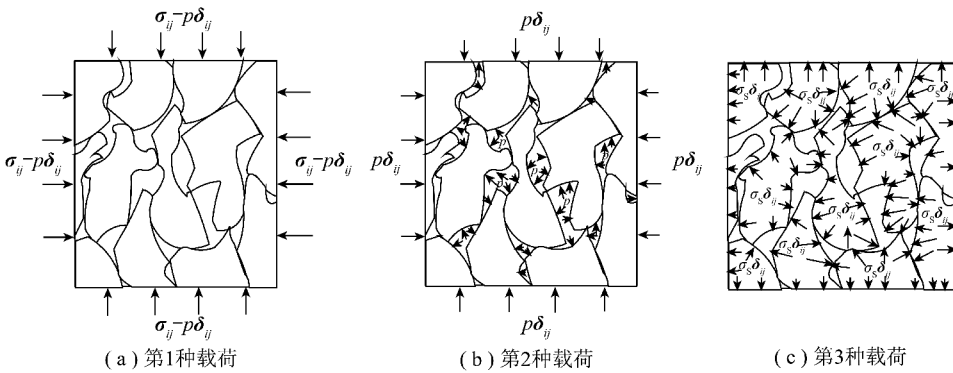


图 3 代表性体积单元的 3 种载荷情况

Fig. 3 Three load cases of representative volumetric element

在第 1 种载荷作用下,由弹性损伤裂隙体本构关系可以得到损伤裂隙单元体的应变为

$$\epsilon_{ij}^1 = C_{ijkl}(D)(\sigma_{lk} - p\delta_{lk}) \quad (1)$$

式中,  $C_{ijkl}(D)$  为损伤裂隙煤体的有效柔度张量,为损伤变量  $D$  的函数。

第 2 种载荷相当于对煤体固体骨架作用均匀的静水压力  $p$ ,并使之产生均匀应变。可以表示为

$$\epsilon_{ij}^2 = C_{ijkl}^m(D)p\delta_{lk} \quad (2)$$

式中,  $C_{ijkl}^m(D)$  为损伤裂隙煤固体颗粒的弹性柔度张量。

第 3 种载荷下损伤裂隙单元体的应变为

$$\epsilon_{ij}^3 = \frac{1}{3}C_s(D)\sigma_s\delta_{ij} \quad (3)$$

式中,  $C_s(D)$  为损伤裂隙体有效吸附模量。

含瓦斯煤体的体积应变可以表示为

$$\epsilon_v = \epsilon_{ii}^1 + \epsilon_{ii}^2 + \epsilon_{ii}^3 = C_{ijkl}(D)\sigma_{lk}\delta_{ji} + [C_{ijkl}^m(D) - C_{ijkl}(D)]p\delta_{lk}\delta_{ji} + C_s(D)\sigma_s \quad (4)$$

该体积应变包含煤体骨架变形、孔隙扩展和瓦斯吸附膨胀 3 个部分。目前人们通常把煤体瓦斯渗透率作为煤体的基本介质属性来研究,但在煤与瓦斯共采工程中,人们更关心的是开采影响下或人工增透措

施作用下煤体中形成的采动裂隙对煤层透气性的影响。笔者认为考虑煤体体积改变对煤体渗透率的贡献更能反映煤层的增透效果。定义增透率  $\chi_p$  为煤体单位体积改变下渗透率的改变量或单位损伤改变下渗透率的改变量:

$$\chi_p = \frac{dk}{d\epsilon_v} \text{ 或 } \chi_p = \frac{dk}{dD} \quad (5)$$

其中,  $k$  为煤体的渗透率;  $\epsilon_v$  为损伤裂隙煤体的体积应变。增透率重点在于描述采动影响下煤体破裂所产生的增透效果,可实现对煤层增透措施的效果和效率的定量评价。

## 2 基于不同渗流模型的增透率解析表述

为了得到增透率的理论表达式,笔者根据定义运用损伤裂隙体力学在现有的渗透率模型上进行推导,得出了基于 4 种渗透率定义的增透率计算公式。

### 2.1 基于达西定律的增透率模型

基于 Darcy 定律可知煤体渗透率<sup>[17-18]</sup>为

$$k = \frac{2\mu Q_0 p_0 L}{A(p_1^2 - p_2^2)} = \frac{2\mu Q_0 p_0 L^2}{V(p_1^2 - p_2^2)} \quad (6)$$

式中,  $\mu$  为动力黏度系数;  $Q_0$  为  $p_0$  是 1 个大气压时的

流量;  $L$  为变形后固体长度;  $A$  为横截面面积;  $p_1$  为进气压力;  $p_2$  为出气压力;  $V$  为变形后固体体积。

由于  $V = (1 + \varepsilon_v) V_0$ ,  $L = (1 + \varepsilon_x) L_0$ , 其中  $V_0, L_0$  分别为初始固体体积和长度,  $\varepsilon_x$  为渗流方向的固体线应变。则渗透率为

$$k = \frac{2\mu Q_0 p_0 (1 + \varepsilon_x)^2 L_0^2}{(p_1^2 - p_2^2) (1 + \varepsilon_v) V_0} \quad (7)$$

假设深部煤体处于静水压力状态, 则渗透率可改写为

$$k = \frac{2\mu Q_0 p_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{3}\right)^2 L_0^2}{(p_1^2 - p_2^2) (1 + \varepsilon_v) V_0} = \frac{2\mu Q_0 p_0 L_0 (3 + \varepsilon_v)^2}{9(p_1^2 - p_2^2) (1 + \varepsilon_v) A_0} \quad (8)$$

由式(5)得增透率为

$$\chi_p = \frac{dk}{d\varepsilon_v} = \frac{4\mu Q_0 p_0 L_0 (3 + \varepsilon_v)^2 \varepsilon_v}{9A_0 (p_1^2 - p_2^2) (1 + \varepsilon_v)^2} \quad (9)$$

## 2.2 基于平板流体理论的增透率模型

对于煤体内含有的  $m$  个裂缝来说, 如其长度和截面积分别为  $L$  和  $lb$ , 当压差为  $\Delta p$  时, 可由 Poiseuille 方程求出流量  $Q_n$  [19-20] 为

$$Q_n = \frac{mb^3 l \Delta p}{12\mu L} \quad (10)$$

根据达西定律可知:

$$Q_n = \frac{Ak \Delta p}{\mu L} \quad (11)$$

由式(10)和式(11), 可求得含有的  $m$  个裂缝煤体的渗透率为

$$k = \frac{mb^3 l}{12A} = \frac{mbllb^2}{12AL} \quad (12)$$

根据煤体变形, 并考虑到深部煤岩体近似处于静水压力状态, 则渗透率可写为

$$k = m \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{3}\right) b_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{3}\right) l_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{3}\right) L_0 \times \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{3}\right)^2 b_0^2 / [12(1 + \varepsilon_v) V_0] \quad (13)$$

式中,  $l_0 b_0$  为初始裂隙截面积;  $L_0$  为初始裂隙长度;  $V_0$  为煤岩体初始体积。

由于煤岩体内初始裂隙体积为  $V_{i0} = mb_0 l_0 L_0$ , 其初始裂隙度可定义为  $\varphi_{i0} = \frac{V_{i0}}{V_0}$ , 则渗透率可写为

$$k = \frac{\varphi_{i0} (3 + \varepsilon_v)^5 b_0^2}{2 \cdot 916 (1 + \varepsilon_v)} \quad (14)$$

由式(5)得增透率为

$$\chi_p = \frac{dk}{d\varepsilon_v} = \frac{\varphi_{i0} b_0^2 (3 + \varepsilon_v)^4 (1 + 2\varepsilon_v)}{1 \cdot 458 (1 + \varepsilon_v)^2} \quad (15)$$

## 2.3 基于多孔介质流体理论的增透率模型

根据 Kozeny-Carman 方程, 渗透率 [21] 可写为

$$k = \frac{n^3}{C(1 - n)^2 S^2} \quad (16)$$

式中,  $C$  为系数;  $n$  为孔隙率;  $S$  为单位体积煤体的表面积。

因煤体孔隙率的改变与损伤裂隙煤体固体结构的体积变形有关, 因此  $n = \frac{n_0 + \varepsilon_v}{1 + \varepsilon_v}$ , 其中,  $n_0$  为初始孔隙率。根据式(16)可知, 其渗透率可表示为

$$k = \frac{(n_0 + \varepsilon_v)^3}{C(1 + \varepsilon_v)(1 - n_0)^2 S^2} \quad (17)$$

设煤层初始渗透率为

$$k_0 = \frac{n_0^3}{C(1 - n_0)^2 S^2} \quad (18)$$

式中,  $k_0$  为初始渗透率。

结合式(17)和式(18)可知渗透率为

$$k = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0}\right)^3 \quad (19)$$

由定义得增透率为

$$\chi_p = \frac{dk}{d\varepsilon_v} = \frac{3k_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0}\right)^2}{n_0(1 + \varepsilon_v)} - \frac{k_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0}\right)^3}{(1 + \varepsilon_v)^2} \quad (20)$$

## 2.4 基于毛细管流体理论的增透率模型

设  $a_0$  为单元初始宽度,  $r_0$  为单元中毛细管初始半径,  $L_m$  为毛细管长度。其初始体积 [22] 为

$$V_{s0} = a_0^2 L_m - \pi r_0^2 L_m \quad (21)$$

则受力变形后体积:

$$V_s = a^2 L_m - \pi r^2 L_m = a^2 L_m - \pi r_0^2 (1 + \varepsilon_r)^2 L_m \quad (22)$$

其中,  $\varepsilon_r$  为径向应变, 由变形后的单元体积为  $a^2 L_m = a_0^2 L_m (1 + \varepsilon_v)$  可得

$$a_0^2 \varepsilon_v = \pi r_0^2 [(1 + \varepsilon_r)^2 - 1] = \pi r_0^2 (2\varepsilon_r + \varepsilon_r^2) \quad (23)$$

略去高阶小量得

$$\varepsilon_r = \frac{a_0^2 \varepsilon_v}{2\pi r_0^2} \quad (24)$$

由 Hagen-Poiseuille 流动方程可以得到:

$$Q = \frac{n\pi r^4 \Delta p}{8\mu L_m} = \frac{n\pi r_0^4 (1 + \varepsilon_r)^4 \Delta p}{8\mu L_m} \quad (25)$$

另由 Darcy 流动方程可知:

$$Q = \frac{nka^2 \Delta p}{\mu L_m} = \frac{nka_0^2 (1 + \varepsilon_v) \Delta p}{\mu L_m} \quad (26)$$

结合式(25)和(26)可以求得渗透率为

$$k = \frac{\pi r_0^4 \left(1 + \frac{a_0^2}{2\pi r_0^2} \varepsilon_V\right)^4}{8a_0^2(1 + \varepsilon_V)} \quad (27)$$

由式(5)得增透率为

$$\chi_p = \frac{dk}{d\varepsilon_V} = \frac{(2\pi r_0^2 + a_0^2 \varepsilon_V)^3 (4a_0^2 + 3a_0^2 \varepsilon_V - 2\pi r_0^2)}{128\pi^3 r_0^4 a_0^2 (1 + \varepsilon_V)^2} \quad (28)$$

### 3 采动影响下煤层增透率的数值模拟分析

为了获得煤与瓦斯共采过程中煤岩体增透率的分布和演化,笔者开发了相应计算程序进行实例分析。考虑到开挖形成采动裂隙、导致煤岩体增透的实际情况,笔者认为多孔介质渗流模型更为合适,因此采用式(20)的增透率公式进行计算分析。

#### 3.1 模型概况

设定某矿一工作面煤层倾向长度 120 m,走向长

度 1 240 m,煤层距地表 705 m,煤层厚 5 m,两侧各留宽 4 m 巷道。计算模拟工作面回采 150 m,分 5 步,每步开挖 30 m。图 4 为煤层开挖步的顶部剖视图,煤岩体物理力学参数见表 1。

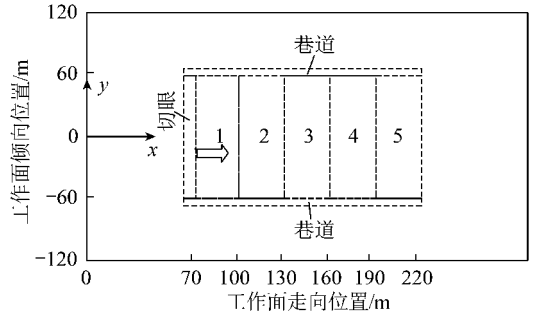


图 4 煤层开挖步的顶部剖视图

Fig. 4 Top view of the excavation steps when mining coal

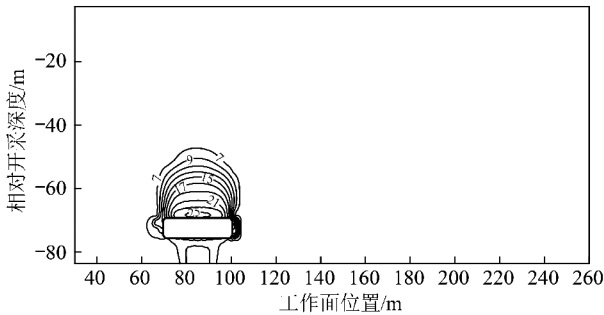
#### 3.2 计算结果及分析

图 5,6 分别为工作面推进过程中上覆岩层和煤

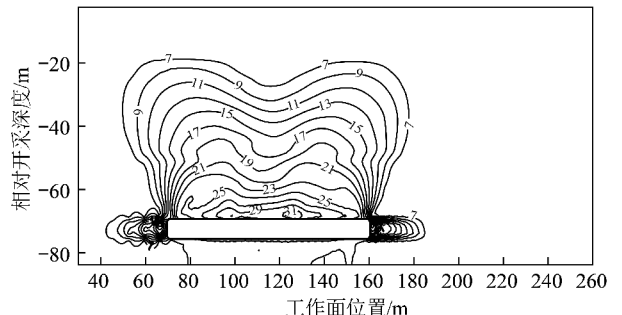
表 1 煤岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal and rocks

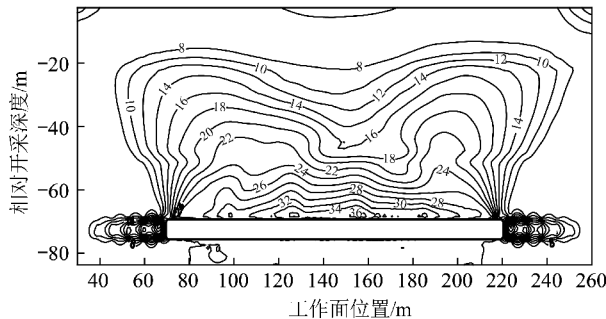
| 岩层名称 | 厚 $h/m$ | 弹性模量 $E/GPa$ | 泊松比 $\mu$ | 内黏聚力/ $MPa$ | 内摩擦角/ $(^\circ)$ | 抗拉强度/ $MPa$ | 容重/ $(N \cdot m^{-3})$ |
|------|---------|--------------|-----------|-------------|------------------|-------------|------------------------|
| 岩层   | 50      | 41.180       | 0.29      | 28.0        | 21.7             | 5.57        | 25 950                 |
| 顶板   | 20      | 57.790       | 0.16      | 26.0        | 25.0             | 8.64        | 27 820                 |
| 煤层   | 5       | 1.238        | 0.31      | 6.6         | 32.0             | 0.99        | 14 130                 |
| 底板   | 10      | 40.310       | 0.18      | 20.6        | 24.3             | 6.71        | 26 760                 |



(a) 工作面推进 30 m 时



(b) 工作面推进 90 m 时



(c) 工作面推进 150 m 时

图 5 沿工作面走向上覆岩层增透率动态演化过程(单位: $10^{-17} m^2$ )

Fig. 5 Evolution of mining-enhanced permeability of overburden rock along strike(unit: $10^{-17} m^2$ )

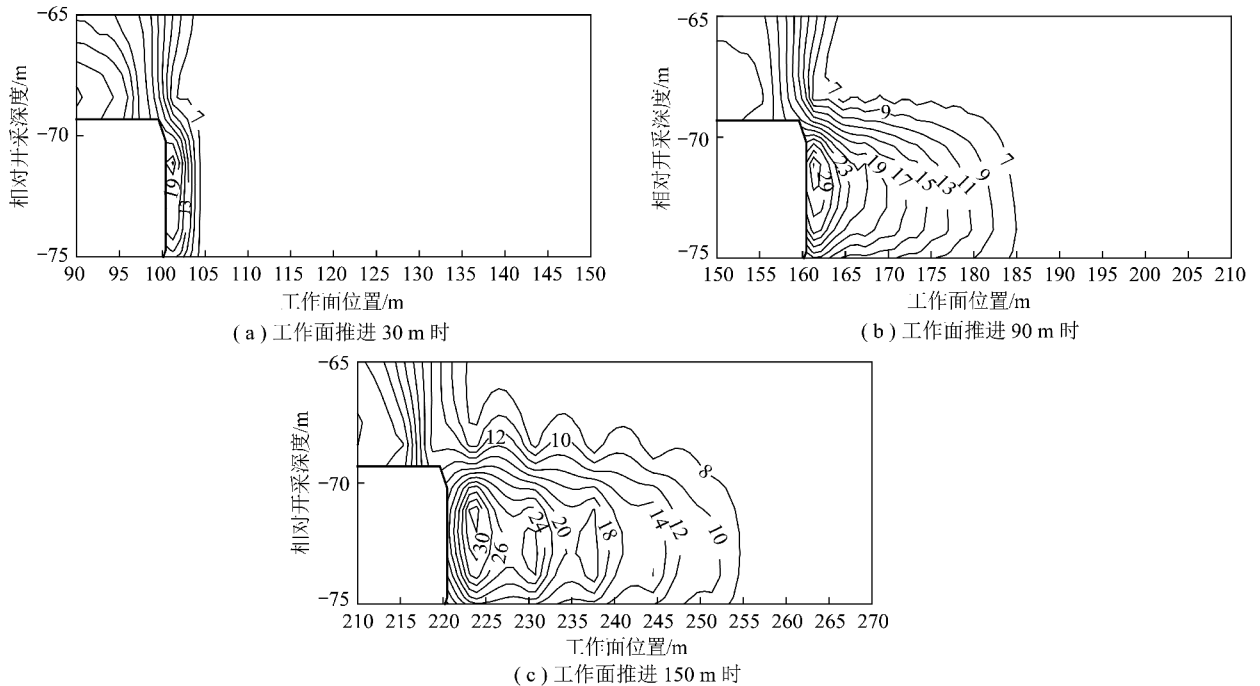


图6 工作面前方煤体增透率动态演化过程(单位: $10^{-17} \text{m}^2$ )

Fig. 6 Evolution of mining-enhanced permeability in the front of mining face (unit: $10^{-17} \text{m}^2$ )

层中增透率分布演化。图中将标高-635 m 设定为模型的上边界,将该处纵坐标值设为 0,因此本计算模型的纵坐标为相对开采深度。

### 3.2.1 工作面上覆岩层增透率分布

从图 5 可知,随着工作面不断向前推进,工作面上覆岩层的采动裂隙场不断发育、扩展,成为瓦斯流动的主要通道,上覆岩层增透率最大值约为  $36 \times 10^{-17} \text{m}^2$ ,影响范围由初期的“拱形”向“碗形”发展,覆岩垂直方向影响深度约达 50 m。

### 3.2.2 工作面推进方向煤层的增透率分布

随着工作面推进,工作面前方将形成支承压力集中区,在高应力作用下,前方煤体将形成采动裂隙场。

图 6 给出了工作面分别推进到 30, 90 和 150 m 时,工作面推进方向煤体增透率分布及演化特征,受开采扰动,工作面前方煤体增透率最大值达  $30 \times 10^{-17} \text{m}^2$ ,影响深度从图 6(a) 的 4 m 左右增大到图 6(c) 的 35 m 左右。

原煤的渗透率(或透气性)与采深、煤的种类、微结构、成藏环境等相关,一般通过采样和实验分析得到其数值,但没有反映强烈的开采扰动对煤层渗透率的影响,因此在图 7 中工作面前方煤体沿走向的渗透率分布基本为一常数。而图 7 中增透率的变化恰当地反映了开采扰动对煤体透气性的本质影响,并给出了定量描述。

### 3.3 物理模拟实验验证

基于淮南潘一矿煤田地质背景,进行了相似模拟

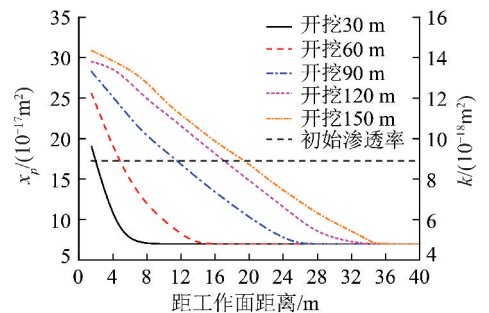


图7 工作面前方煤体沿走向增透率和渗透率分布

Fig. 7 Evolution of mining-enhanced permeability and permeability in the front of mining face along strike

实验<sup>[23]</sup>,同时基于瓦斯渗透耦合试验,得到了潘一矿采场整体的变形分布图与渗透率分布图。因此可以进一步得到不同开挖进度下工作面前方体积应变分布(图 8(a))与渗透率分布(图 8(b))。从图 8(a)中可以看出工作面前方 0~20 m 存在一个明显的体积膨胀区间,其范围基本保持不变,而大于 20 m 的区间随着开挖进度的扩大,膨胀范围也对应着扩大,但由于相似模拟试验尺寸限制,开挖进度越大,其工作面前方可监测点数量越少,如当开挖 215 m 时,膨胀范围已大于 40 m。从图 8(b)可以看出在工作面前方 50 m 区间内,渗透率越靠近工作面越大,而且开挖进度越大其渗透率增幅越大,由于试验室基于室内煤气耦合渗透试验,因此设置了最大渗透率值,但从斜率可以看出,这部分区域的增透效果最好。对比 3.1 节

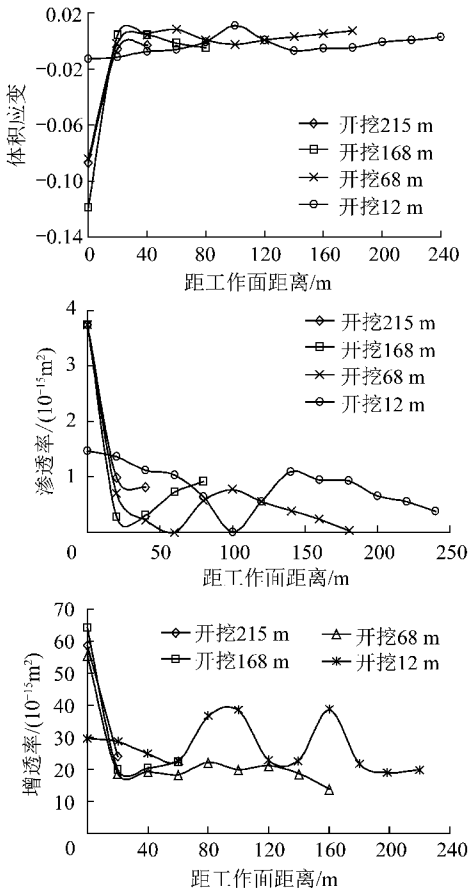


图8 工作面前方煤体体积应变、渗透率、增透率分布

Fig. 8 Distribution of volumetric strain, permeability and mining-enhanced permeability of coal in the front of mining face

中理论分析结果,其增透范围基本一致,随着开采的不断推进增透强度与范围也逐渐增大。

图8(c)给出了工作面前方煤体增透率分布,可见,工作面前方20 m范围内增透效果最好,工作面前方大于20 m范围增透率基本趋于稳定,呈波浪状起伏。工作面前方20 m范围内,渗透率增加2~3个数量级,而增透率在此区间增加3~4个数量级,可见增透率较好反映了采矿工程实际的渗透特征及渗透率的增透区间的变化,同时初步验证了理论模型的合理性。

传统的煤层渗透率一般作为煤体渗流基本属性的一个常数来进行来分析研究,而事实上开采过程中,支撑压力和采动卸压导致的煤体开裂、破碎,形成采动裂隙,实现煤体增透,从而使煤层的渗透率发生了本质上的改变,即由材料属性到结构特征的演化。笔者建立的增透率理论和模型能够对采动裂隙网络的空间分布形成的渗透性进行定量评判研究,克服过去工程上从未对增透效果进行定量评价的缺陷,可以为瓦斯抽采钻孔的布置提供理论与技术支持。

## 4 结 论

(1) 推导建立了基于4种渗流模型的增透率理论表达式,即基于达西定律的增透率模型、基于平板流体理论的增透率模型、基于多孔介质流体理论的增透率模型与基于毛细管流体理论的增透率模型。

(2) 渗透率一直作为煤岩体的一个常数来进行分析研究,而实际上采动引起的增透率应该是一个变化的参数且大几个量级。笔者提出的增透率理论与模型可以对采动裂隙网络引起的渗透率变化进行定量分析计算,且与工程实际具有较好的一致性。

(3) 利用笔者提出的增透率理论与模型能定量推导和计算工作面前方煤岩体随时间和空间变化的增透率图谱,由此可科学地设计布置瓦斯抽采钻孔的位置,使煤与瓦斯共采真正具有科学性、针对性和有效性。

## 参考文献:

- [1] 胡国忠,王宏图,范晓刚,等.低渗透突出煤的瓦斯渗流规律研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2527-2534.  
Hu Guozhong, Wang Hongtu, Fan Xiaogang, et al. Investigation on law of methane gas flow in coal with coal-gas outburst hazard and low permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2527-2534.
- [2] 涂敏,付宝杰.低渗透性煤层卸压瓦斯抽采机理研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(4):433-436.  
Tu Min, Fu Baojie. Extraction mechanism of relieved gas from low permeability seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 433-436.
- [3] 刘保县,黄敬林,王泽云,等.单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):3234-3238.  
Liu Baoxian, Huang Jinglin, Wang Zeyun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3234-3238.
- [4] McKee C R, Bumb A C, Koenig R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal[A]. Fassett J E ed. Geology and Coal bed Methane Resources of the Northern San Juan Basin[C]. Colorado, USA: Rocky Mountain Association of Geologists Guidebook, 1988: 143-153.
- [5] Enever J R E, Henning A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coal-bed methane exploration and reservoir model[A]. Proceedings of the 1997 International Coal bed Methane Symposium. Tuscaloosa [C]. AL, USA: University of Alabama, 1997: 13-22.
- [6] Somerton W H, Soylemezoglu I M, Dudley R C. Effect of stress on permeability of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geological Abstracts, 1975, 12(5/6): 129-145.
- [7] 孙培德,万华根.煤层气越流固气耦合模型及可视化模拟[J].

- 岩石力学与工程学报,2004,23(7):1179-1185.
- Sun Peide, Wan Huagen. Visual simulation on coupling model of solid deformation and gas leak flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1179-1185.
- [8] 李祥春, 郭勇义, 吴世跃. 煤吸附膨胀变形与孔隙率、渗透率关系[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(3): 264-266.
- Li Xiangchun, Guo Yongyi, Wu Shiyue. Analysis of the relation of porosity, permeability and swelling deformation of coal[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(3): 264-266.
- [9] 汪有刚, 刘建军, 杨景贺, 等. 煤层瓦斯流固耦合渗流的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 286-289.
- Wang Yougang, Liu Jianjun, Yang Jinghe, et al. Simulation of fluid-solid coupling flow of coal-bed methane [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 286-289.
- [10] 程国明, 黄侃, 王思敬. 综放开采顶煤裂隙及其对渗透性研究的意义[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6): 19-21.
- Chen Guoming, Huang Kan, Wang Sijing. Top-coal fractures and its implication on the study of permeability in MLTCM[J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(6): 19-21.
- [11] Connell L D, Lu M, Pan Z. An analytical coal permeability model for tri-axial strain and stress conditions[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 84: 103-114.
- [12] Gu F, Chalaturnyk R J. Permeability and porosity models considering anisotropy and discontinuity of coalbeds and application in coupled simulation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 74: 113-131.
- [13] Pan Z, Connell L D. Modeling of anisotropic coal swelling and its impact on permeability behaviour for primary and enhanced coalbed methane recovery[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 85: 257-267.
- [14] Yuan S C, Harrison J P. Development of a hydro-mechanical local degradation approach and its application to modelling fluid flow during progressive fracturing of heterogeneous rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42: 961-984.
- [15] Maleki K, Pouya A. Numerical simulation of damage-permeability relationship in brittle geomaterials [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37: 619-628.
- [16] 谢和平, 周宏伟, 刘建锋, 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 Heping, Zhou Hongwei, Liu Jianfeng, et al. Mining-induced mechanical behavior in coal seams under different mining layouts[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(7): 1067-1074.
- [17] Harpalani S, Schraufnagel R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal[J]. Fuel, 1990, 69: 551-556.
- [18] Guo R, Akkutlu K, Kantzas A. Laboratory investigation on the permeability of coal during primary and enhanced coalbed methane production[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2008, 47(10): 27-32.
- [19] Bear J. Dynamics of fluids in porous media [M]. Elsevier, New York, 1972.
- [20] Louis C. Rock hydraulics [A]. Muller L. Rock Mechanics [C]. Springer-Verlag, Wien, 1974: 299-387.
- [21] 吴世跃. 煤层中的耦合运动理论及其应用-具有吸附作用的气固耦合运动理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 169.
- Wu Shiyue. Research of methane-coalbed coupling movement theory and its application and gas-solid coupling movement theory with adsorption [M]. Beijing: Science Press, 2009: 169.
- [22] Garcia-Bengochea I, Lovell C W, Altschaeffl A G. Pore distribution and permeability of silty clays [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division 1979, 105: 839-856.
- [23] 薛东杰, 周宏伟, 唐威力, 等. 采动煤岩体瓦斯渗透率分布规律与演化过程 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 930-935.
- Xue Dongjie, Zhou Hongwei, Tang Xianli, et al. Evolution of mining-induced enhancement and distribution of gas permeability in coal seam and surrounding rock [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 930-935.