



移动扫码阅读

王明中,孙玉宁,郝富昌.渗流-应力耦合作用下巷道预排瓦斯宽度研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):109-115. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.12.013

WANG Mingzhong, SUN Yuning, HAO Fuchang. Research on pre-drainage gas width of roadway under seepage-stress coupling[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 109-115. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.12.013

渗流-应力耦合作用下巷道预排瓦斯等值宽度研究

王明中¹,孙玉宁¹,郝富昌²

(1.河南理工大学 能源科学与工程学院,河南 焦作 454003;2.河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454003)

摘要:准确确定巷道预排瓦斯等值宽度,对于矿井瓦斯涌出量预测、抽采达标评判及提高掘进工作面瓦斯灾害防治效果具有重要意义。为了确定合理的巷道预排瓦斯等值宽度,推导了考虑应变软化和扩容特性的巷道周围煤体弹塑性力学模型,得到了巷道周围煤体应力及体积应变的解析表达式,以渗透率为桥梁建立了考虑巷道卸压及基质收缩效应的瓦斯运移耦合模型,得出了巷道周围煤体瓦斯运移规律及影响因素,确定了不同条件下的巷道预排瓦斯等值宽度。研究结果表明:巷道周围煤体瓦斯运移受到应力场和渗流场的控制,巷道卸压范围越大,其周围煤体渗透率提高得越多,越有利于瓦斯排放;排放时间、煤层透气性系数、地应力、煤体强度、支护应力、巷道尺寸和煤变质程度是影响巷道预排瓦斯等值宽的主要因素;排放时间 60、120、180、240 d 的巷道预排瓦斯等值宽度分别为 9.2、11.9、13.8、15.3 m,随着排放时间的增加而增大;较难抽采煤层排放 180 d 的巷道预排瓦斯等值宽度小于 15 m,可以抽采煤层为 15~20 m,容易抽采煤层厚度大于 20 m,巷道预排瓦斯等值宽度随煤层透气性系数的升高逐渐增大;地应力、煤体强度、支护应力和巷道尺寸通过控制煤体变形而影响瓦斯运移,巷道预排瓦斯等值宽度与排放时间、煤层透气性系数和巷道尺寸呈正比关系,与煤体强度、地应力、支护应力及变质程度呈反比关系;确定了试验巷道排放时间 120 d 的预排瓦斯等值宽度为 11.9 m,瓦斯含量测试结果表明确定的预排瓦斯等值宽度合理可靠。

关键词:巷道预排瓦斯等值宽度;渗流-应力耦合;塑性软化;扩容特性;瓦斯运移

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0109-07

Research on pre-drainage gas equivalent width of roadway under seepage-stress coupling

WANG Mingzhong¹, SUN Yuning¹, HAO Fuchang²

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: It is of great significance to accurately determine the pre-drainage gas width of roadway for prediction of mine gas emission, evaluation of drainage standards and improvement of prevention and control effect of gas disaster in roadway. In order to determine reasonable pre-drainage gas width of roadway, the elastoplastic mechanical model of the coal body around the roadway considering the strain softening and dilatancy characteristics was deduced, and the analytical expressions of the stress and volume strain of the coal around the roadway were obtained, and the gas migration coupling model considering the roadway pressure relief and matrix shrinkage effect was established based on the permeability as a bridge. The gas migration law and influencing factors of coal around the roadway was found out, and pre-discharge gas equivalent widths with different conditions were determined. The results show that: the gas migration around the roadway is controlled by the stress field and the seepage field, and the larger the roadway pressure relief range is, the more the coal body's permeability increases, which is more favorable for gas discharge. Discharge time, permeability coefficient of coal seam, ground stress, coal body strength, supporting stress, roadway size and metamorphic grade are the main factors to control pre-discharge gas equivalent width. The pre-dis-

收稿日期:2020-04-15;责任编辑:郭 鑫

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51604092);河南省自然科学基金资助项目(182300410128);河南省科技攻关资助项目(182102310828)

作者简介:王明中(1979—),男,河南南阳人,博士研究生。E-mail: wangmingzhong@hpu.edu.cn

charge gas equivalent width with discharge time of 60, 120, 180, and 240 d are 9.2, 11.9, 13.8, and 15.3 m, which increase with the increase of discharge time. The pre-drainage gas width of coal layer for 180 d that is difficult to gas drainage is less than 15 m, and the coal layer that can be drainaged is 15~20 m, and the easy drainage of the coal layer is more than 20 m, and the pre-drainage gas width of roadway gradually increases with the increase of the coal permeability coefficient. Ground stress, coal body strength, supporting stress and roadway size affect gas migration by controlling coal body deformation. The pre-drainage gas width of roadway is directly proportional to discharge time, coal seam permeability coefficient and roadway size, and coal body strength, ground stress, supporting stress and metamorphic degree are inversely proportional. Pre-discharge gas equivalent width of test roadway with discharge time 120 d is determined 11.9 m, and the gas content test result shows that it is reasonable and reliable.

Key words: pre-drainage gas width of roadway; seepage-stress coupling; plastic softening; dilatancy; gas migration

0 引言

巷道预排瓦斯等值宽度一般指瓦斯抽采后巷道周围煤体原始瓦斯含量降低了10%以上的范围,是进行矿井瓦斯涌出量预测和确定原始瓦斯含量采样深度的关键参数,也是进行煤矿瓦斯抽采达标评判的重要指标,准确确定巷道预排瓦斯等值宽度对于矿井瓦斯涌出量预测、抽采达标评判及提高掘进工作面瓦斯灾害防治效果具有重要意义。在巷道预排瓦斯等值宽度研究方面,《矿井瓦斯涌出量预测方法》^[1]和《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》^[2]考虑排放时间及煤的变质程度的影响,给出了巷道预排瓦斯等值宽度的参考值;李宵尖^[3]、韩宝山等^[4]确定了不同排放时间的巷道预排瓦斯等值宽度。综上所述,前人研究成果主要考虑排放时间及煤的变质程度对巷道预排瓦斯等值宽度的影响,但是不同巷道的尺寸、所受应力、煤体强度及支护应力等大不相同,受其影响,巷道周围煤体卸压范围及预排瓦斯等值宽度也并不相同,仅考虑排放时间和变质程度因素确定的巷道预排瓦斯等值宽度存在着较大的误差,有必要对其进行深入研究。准确确定巷道预排瓦斯等值宽度的关键是查明巷道周围煤体瓦斯运移规律。巷道施工完毕后,一方面其周围煤体会形成卸压区、应力集中区和原岩应力区,同时产生大量的裂隙和裂缝,由于煤体渗透率对地应力的变化极为敏感,导致卸压区煤体渗透率会增大几个数量级^[5-6];另一方面,在瓦斯排放过程中巷道周围煤体瓦斯压力逐渐降低,产生基质收缩效应,又会提高煤体的渗透率^[7-9],因此巷道周围煤体瓦斯运移受应力场和渗流场的控制,是瓦斯运移与煤体变形耦合作用的过程。国内外学者考虑有效应力、基质收缩、Klikenberg效应、吸附和扩散等因素的影响,对瓦斯运移流固耦合模型进行了较为深入的研究,取得了丰富的研究成果^[10-18]。但是在瓦斯运移流固耦合模型研究方面,前人把研究重心更多集中在渗流场方向,而应力场方面的研究多把煤体假定为纯弹性

体,采用胡克定律建立应力场方程;而巷道周围煤体强度较低,属弹塑性体,采用弹塑性力学模型才更符合实际工程应用。此外,煤岩体具有塑性软化和扩容特性^[19-22],综合考虑应变软化和扩容特性的巷道周围煤体瓦斯运移耦合模型鲜有文献报道。拟建立考虑煤的塑性软化和扩容特性巷道周围煤体弹塑性力学模型,并考虑吸附、Klikenberg和基质收缩效应,构建巷道周围煤体瓦斯运移流固耦合模型,确定不同条件下的巷道预排瓦斯等值宽度,查明排放时间、煤层渗透率、地应力、煤体强度、支护应力及巷道尺寸等因素对巷道预排瓦斯等值宽度的控制作用机理,为矿井瓦斯涌出量预测、抽采达标评判及掘进工作面瓦斯治理提供参数依据。

1 巷道周围煤体瓦斯运移流固耦合模型

1.1 渗透率动态演化模型

渗透率是应力场和渗流场耦合的桥梁,由孔隙率定义及 Kozeny-Carman 方程可得巷道周围煤体渗透率的动态演化模型^[23],即

$$K = \frac{K_0}{1 + \varepsilon_v} \left\{ 1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0} + \frac{\varepsilon_p}{n_0} \right\}^3 \quad (1)$$

其中: K 为动态渗透率, 10^{-15} m^2 ; K_0 为初始渗透率, 10^{-15} m^2 ; ε_v 为体积应变; ε_p 为基质收缩效应产生的应变; n_0 为初始孔隙率。并有以下关系^[23]:

$$\varepsilon_p = \frac{2a\rho_s RT(1-2\nu)}{3EV(1-\eta_0)} [\ln(1+bP_0) - \ln(1+bP)] \quad (2)$$

式中: a 、 b 为煤的吸附常数,单位分别为 m^3/t , MPa^{-1} ; ρ_s 为煤的视密度, g/cm^3 ; R 为普适气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K ; ν 为泊松比; E 为弹性模量, MPa ; V 为气体摩尔体积, m^3/mol ; P_0 为煤层原始瓦斯压力, MPa ; P 为巷道周围煤体的瓦斯压力, 随瓦斯排放不断发生变化, MPa 。

从式(1)可以看出,巷道周围煤体渗透率主要受到煤体变形及基质收缩效应的控制,基质收缩效应可由

式(2)得出,而煤体变形通过体积应变 ε_v 来反映。

1.2 巷道周围煤体体积应变方程

1)力学模型。巷道开挖后其周围煤体受力分析如图1所示。

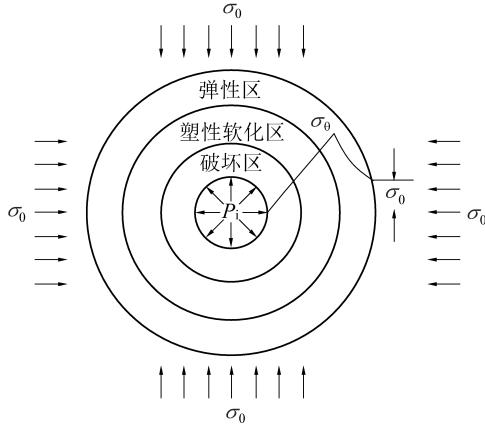


图1 巷道周围煤体力学模型

Fig.1 Mechanical model around roadway

为简化计算做出如下假设:巷道为圆形巷道,半径为 r_0 ,所受支护应力为 P_i ;巷道处于静水应力场,其初始应力为 σ_0 ,巷道周围煤体为均质且各向同性;巷道周围煤体形成破坏区、塑性软化区和弹性区,以下分析中分别用 d、l、e 来表示。

按平面应变问题对巷道周围煤体进行受力分析,其平衡方程及几何方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (4)$$

式中: σ_r 为径向应力, MPa; ε_r 、 ε_θ 分别为径向应变和切向应变; r 为距离巷道中心的距离, m; u 为径向位移, m。

2)弹性区的体积应变。弹性区煤体变形满足胡克定律,其径向位移 u^e 为^[19-20]

$$u^e = \frac{(1+\nu)[\sigma_0(1-K_l) - \sigma_c]R_l^2}{E(1+K_l)} \quad (5)$$

式中: σ_c 为单轴抗压强度, MPa; R_l 为塑性软化区半

$$\begin{cases} u^d = 2Ar \left\{ \frac{1}{1+\eta_1} + \frac{1}{1+\eta_2} \left[\left(\frac{R_d}{r} \right)^{1+\eta_2} - 1 \right] \right\} \left(\frac{R_l}{R_d} \right)^{1+\eta_1} + \frac{\eta_1 - 1}{2(1+\eta_1)} \\ \varepsilon_r^d = 2A \left\{ \frac{1}{1+\eta_1} - \frac{\eta_2}{1+\eta_2} \left(\frac{R_d}{r} \right)^{1+\eta_2} - \frac{1}{1+\eta_2} \right\} \left(\frac{R_l}{R_d} \right)^{1+\eta_1} + \frac{\eta_1 - 1}{2(1+\eta_1)} \\ \varepsilon_\theta^d = 2A \left\{ \frac{1}{1+\eta_1} + \frac{1}{1+\eta_2} \left[\left(\frac{R_d}{r} \right)^{1+\eta_2} - 1 \right] \right\} \left(\frac{R_l}{R_d} \right)^{1+\eta_1} + \frac{\eta_1 - 1}{2(1+\eta_1)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: R_d 为破坏区半径, m。

径, m;与支护应力 P_i 有关^[20]。 $K_l = (1+\sin\beta)/(1-\sin\beta)$, β 为内摩擦角, (°)。

$$\text{令 } A = \frac{(1+\nu)[\sigma_0(1-K_l) - \sigma_c]}{E(1+K_l)} \quad (6)$$

由式(4)和式(5)可得

$$\varepsilon_r^e = -\frac{AR_l^2}{r^2}, \varepsilon_\theta^e = \frac{AR_l^2}{r^2}, \varepsilon_v^e = 0 \quad (7)$$

式中: ε_r^e 、 ε_θ^e 和 ε_v^e 分别为弹性区的径向应变、切向应变和体积应变。

3)塑性软化区的体积应变。塑性软化区存在着塑性软化及扩容现象,煤体变形满足摩尔-库伦准则^[19],有

$$\Delta\varepsilon_r^l + \eta_1 \Delta\varepsilon_\theta^l = 0 \quad (8)$$

式中: $\Delta\varepsilon_\theta^l$ 和 $\Delta\varepsilon_r^l$ 分别为塑性软化区的切向应变增量和径向应变增量; η_1 为塑性软化区的扩容系数,有 $\eta_1 = (1+\sin\varphi)/(1-\sin\varphi)$, φ 为煤的膨胀角, (°)。

由式(4)、式(8)及非关联流动法则,可得塑性软化区的位移 u^d 、径向应变 ε_r^d 和切向应变 ε_θ^d 方程:

$$\begin{cases} u^d = \frac{2Ar}{\eta_1 + 1} \left(\frac{R_l}{r} \right)^{\eta_1 + 1} + \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1 + 1} Ar \\ \varepsilon_r^d = -\frac{2A\eta_1}{\eta_1 + 1} \left(\frac{R_l}{r} \right)^{\eta_1 + 1} + \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1 + 1} A \\ \varepsilon_\theta^d = \frac{2A}{\eta_1 + 1} \left(\frac{R_l}{r} \right)^{\eta_1 + 1} + \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1 + 1} A \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得塑性软化区体积应变为

$$\varepsilon_v^l = \frac{2A(1-\eta_1)}{1+\eta_1} \left(\frac{R_l}{r} \right)^{\eta_1 + 1} + \frac{\eta_1 - 1}{\eta_1 + 1} 2A \quad (10)$$

4)破坏区的体积应变方程。破坏区煤体变形满足摩尔-库伦准则,存在着扩容现象^[19],有

$$\Delta\varepsilon_r^d + \eta_2 \Delta\varepsilon_\theta^d = 0 \quad (11)$$

式中: $\Delta\varepsilon_\theta^d$ 和 $\Delta\varepsilon_r^d$ 分别为破坏区的切向应变和径向应变增量; η_2 为破坏区的扩容系数。

式(4)、式(11)及非关联流动法则,可得破坏区的位移 u^d 、径向应变 ε_r^d 和切向应变 ε_θ^d 方程为

由式(12)可得破坏区总体积应变 ε_v^d 为

$$\varepsilon_v^d = 2A \left\{ \left(\frac{2}{1 + \eta_1} - \frac{2}{1 + \eta_2} + \frac{1 - \eta_2}{1 + \eta_2} \left(\frac{R_d}{r} \right)^{1 + \eta_2} \right) \left(\frac{R_1}{R_d} \right)^{1 + \eta_1} + \frac{\eta_1 - 1}{1 + \eta_1} \right\} \quad (13)$$

由式(7)、式(10)和式(13)可确定巷道周围煤体不同位置的体积应变 ε_v ,进而结合式(1)和式(2)可以查明不同排放时间巷道周围煤体的渗透率。

1.3 巷道周围煤体瓦斯渗流方程

巷道周围煤体瓦斯运移符合 Darcy 定律,并考虑煤体吸附及 Klikenberg 效应,可得巷道周围煤体瓦斯渗流方程^[24]:

$$\begin{aligned} & \frac{2P(1 - n_0)}{(1 + \varepsilon_v)^2} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{n_0 + \varepsilon_v}{P(1 + \varepsilon_v)} \frac{\partial P^2}{\partial t} + \\ & \frac{abc\rho_n}{(1 + bP)^2} \frac{\partial P^2}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ \frac{K}{\mu} \left(1 + \frac{q}{P} \right) \nabla P^2 \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: ρ_n 为瓦斯密度, kg/m^3 ; c 为校正参数, kg/m^3 ; q 为滑脱因子; μ 为气体动力黏性系数 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

由式(1)和式(14)联立求解,即可查明不同排放时间巷道周围煤体的瓦斯分布规律,确定不同条件下的巷道预排瓦斯等值宽度。

2 不同条件下巷道预排瓦斯等值宽度

2.1 数值模拟参数及边界条件

试验矿井主采二₁煤层,试验地点煤层厚度为 7.9 m,煤质较为松软,实测煤的坚固性系数 f 仅为 0.3,实测原始瓦斯含量为 12.02 m^3/t ,煤层透气性系数为 0.052 4 $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,属于较难抽采煤层。试验掘进工作面断面近似为半径 2.5 m 的圆型巷道,其周围煤体所受初始地应力为 12.96 MPa,巷道采用锚网支护工艺,支护应力为 0.25 MPa。试验地点煤体参数如下:

单轴抗压强度 σ_c / MPa	3.17
残余抗压强度 σ_c^* / MPa	0.3
内摩擦角 β / (°)	30
膨胀角 φ / (°)	10
初始孔隙率 n_0 / %	4
弹性模量 E / MPa	1 200
煤的软化模量 M_c / MPa	1 920
泊松比 ν	0.3
扩容系数 η	1.4
支护应力 P_i / MPa	0.25
初始地应力 σ_0 / MPa	12.96
动力黏性系数 μ / (Pa · s)	1.08×10^{-5}
吸附常数 a / ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	36.569

吸附常数 b / (MPa ⁻¹)	0.526
煤的密度 ρ_s / ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.47
通用气体常数 R / J / (mol · K)	8.314 3
温度 T / K	295
气体摩尔体积 V / ($\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$)	0.022 4
瓦斯密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.716
校正参数 c / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 250
滑脱因子 q	0.2
原始瓦斯含量 W / ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	12.02

边界条件:瓦斯仅在煤层中运移,假定煤层顶底板为不透气边界,距巷道边界 30 m 位置的原始瓦斯含量为 12.02 m^3/t 。

2.2 巷道预排瓦斯等值宽度的影响因素

1) 排放时间。采用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件进行数值模拟,选用 PDE 系数模型,将瓦斯运移流固耦合模型嵌入到 COMSOL 软件中,代入表 1 参数,可得到不同排放时间巷道周围煤体瓦斯含量分布曲线(图 2)。

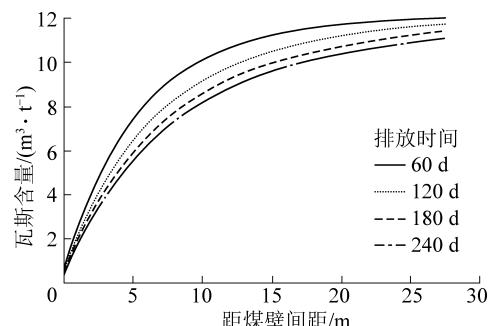


图 2 不同排放时间巷道周围煤体瓦斯含量分布曲线

Fig.2 Gas content distribution curve around coal body roadway with different drainage time

由图 2 可知,排放时间越长,巷道周围煤体瓦斯含量降低越多。笔者把原始瓦斯含量降低了 10% 的范围称为巷道预排瓦斯等值宽度;该煤层原始瓦斯含量 12.02 m^3/t ,即瓦斯含量小于 10.82 m^3/t 的范围为巷道预排瓦斯等值宽度。从图 2 还可知,60 d 的巷道预排瓦斯等值宽度为 9.2 m,120 d 为 11.9 m,180 d 为 13.8 m,240 d 为 15.3 m,随着排放时间的增加,巷道预排瓦斯等值宽度逐渐增大,但是增加幅度逐渐缩小。在巷道采用顺层钻孔测试煤层原始瓦斯含量时,为了提高测试精度,采样深度应该大于预排瓦斯等值宽度,为此测试原始瓦斯含量钻孔应尽量布置在新掘煤巷。

2) 煤层透气性系数。煤层透气性系数是评价瓦斯运移难易程度的主要参数,透气性系数越高,煤层渗透率越大,巷道周围煤体瓦斯排放越容易,巷道预排瓦斯等值宽度越大。将煤体参数值代入式(14)进行计算,改变煤体渗透率,分别采用COMSOL软件对其进行求解,可得不同透系数煤层巷道周围煤体的瓦斯含量分布曲线,将瓦斯含量降低了10%以上的范围定为巷道预排瓦斯等值宽度,其中:较难抽采煤层排放180 d的巷道预排瓦斯等值宽度小于15 m,可以抽采煤层为15~20 m,容易抽采煤层为20 m以上,巷道预排瓦斯等值宽度随煤层透气性系数的升高逐渐增大,因此在高透气性煤层测试原始瓦斯含量时,应加大采样深度。

3) 地应力。地应力对巷道预排瓦斯等值宽度的影响主要有2方面:①随着地应力的升高,煤层透气性系数逐渐降低,从而缩小巷道预排瓦斯等值宽度;②随着地应力的升高,巷道周围煤体的卸压范围逐渐增大,受采掘影响巷道周边的透气性系数增加的范围越高,又会导致巷道预排瓦斯等值宽度的增大。煤层渗透率 K 与有效应力具有如下关系^[25]:

$$K = K_0 e^{-3C_p \Delta \sigma_e} \quad (15)$$

式中: C_p 为孔隙压缩系数; $\Delta \sigma_e$ 为有效应力的变化,MPa。

将煤体参数值代入式(14)和式(15),改变地应力,分别采用COMSOL软件对其进行求解,可得不同地应力巷道周围煤体的瓦斯含重分布曲线,由此计算不同地应力巷道预排瓦斯等值宽度 h_K ,如图3所示。由图3可知,巷道预排瓦斯等值宽度与地应力成反比关系,随地应力升高,煤层渗透率逐渐降低,巷道预排瓦斯等值宽度逐渐减小。

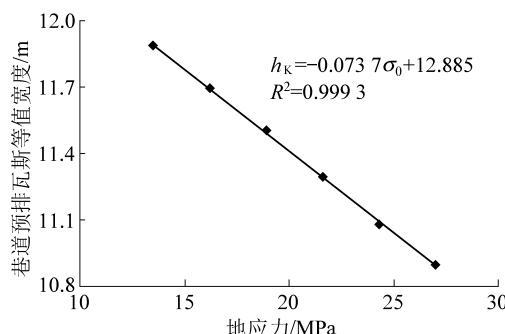


图3 不同地应力巷道预排瓦斯等值宽度

Fig.3 Pre-drainage gas width of roadway with different stress

4) 煤体强度。煤体单轴抗压强度 σ_c 与煤的坚固系数 f 的关系为

$$\sigma_c = 9.9268f + 0.1898 \quad (16)$$

将不同强度煤体参数代入式(14)中,改变煤体坚固系数,分别采用COMSOL软件对其进行求解,

可得出不同强度煤体巷道预排瓦斯等值宽度,如图4所示。由图4可知,巷道预排瓦斯等值宽度与煤的坚固系数呈反比关系:煤体强度越高,巷道预排瓦斯等值宽度越小。分析其原因认为,随着煤体强度的升高,煤体抵抗破坏的能力越强,巷道周围煤体的卸压范围逐渐减少,受采掘影响巷道周边煤体透气性系数增加的范围越窄,巷道预排瓦斯等值宽度越小。因此,在松软煤层测试原始瓦斯含量时,应加大采样深度。

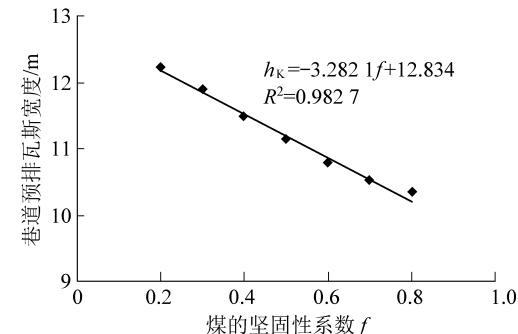


图4 不同强度煤体巷道预排瓦斯等值宽度

Fig.4 Pre-drainage gas width of roadway with different hardness coal seam

5) 支护应力。将煤体参数值代入式(14),改变支护应力,分别采用COMSOL软件对其进行求解,可得不同支护应力巷道预排瓦斯等值宽度,如图5所示。

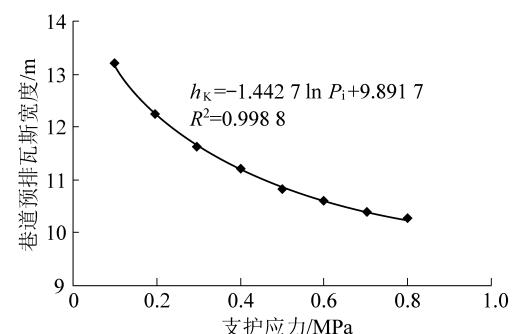


图5 不同支护应力的巷道预排瓦斯等值宽度

Fig.5 Pre-drainage gas width of roadway with different supporting stress

由图5可知,支护应力越大,巷道周围煤体的卸压范围越小,巷道的支护应力越大,受采掘影响巷道周边煤体透气性系数增加的范围越窄,巷道预排瓦斯等值宽度越小。

6) 巷道尺寸。将煤体参数值代入式(14),改变巷道尺寸,分别采用COMSOL软件对其进行求解,可得不同尺寸巷道预排瓦斯等值宽度,如图6所示。由图6可以知,巷道预排瓦斯等值宽度与巷道半径成正比关系,巷道预排瓦斯等值宽度随巷道尺寸的

增加而增大。因此,在大断面巷道测试原始瓦斯含量时,应加长采样深度。

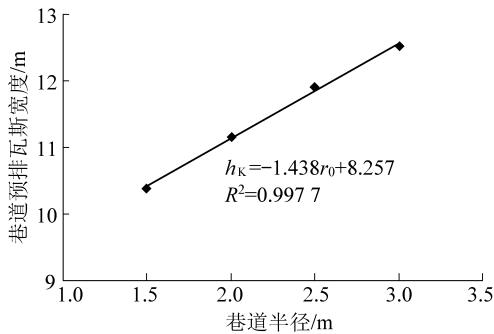


图 6 不同尺寸巷道预排瓦斯等值宽度

Fig.6 Pre-drainage gas width of different size roadway

7) 变质程度。煤的变质程度越高,煤吸附甲烷的能力越强,在相同排放时间瓦斯含量的降低幅度越小,巷道预排瓦斯等值宽度相对较小。因此,在低变质程度煤层测试原始瓦斯含量时,应加大采样深度。

3 现场验证

在豫西某矿 11119 进风巷进行验证,巷道及周围煤体力学参数如第 2.1 节所述,该巷道暴露 4 个月。将相关参数代入式(14),可得此巷道排放 4 个月的巷道预排瓦斯等值宽度为 11.9 m。为验证数值计算结果的可靠性,在该巷道布置钻孔测试不同采样深度的瓦斯含量,测试结果见表 2。

表 2 不同采样深度的瓦斯含量

Table 2 Gas content of different sampling depth

采样深度/m	7.5	10.5	11.0	12.0	13.5	14.0
瓦斯含量/(m ³ · t ⁻¹)	4.35	9.20	8.21	10.57	12.02	12.00

由表2可知,该处的原始瓦斯含量为 $12.02\text{ m}^3/\text{t}$,随着采样深度的增加,实测瓦斯含量逐渐增大,距煤壁12.0 m时,瓦斯含量达 $10.57\text{ m}^3/\text{t}$,可确定巷道预测瓦斯等值宽度为12.0 m左右,与数值计算结果相吻合,说明数值模拟结果较为可靠。

4 结 论

1) 考虑煤的塑性软化和扩容特性,建立了巷道周围煤体瓦斯运移流固耦合模型,查明了不同排放时间巷道周围煤体的瓦斯分布规律,确定了不同条件下的巷道预排瓦斯等值宽度,认为排放时间、煤层透气性系数、地应力、煤体强度、支护应力、巷道尺寸和煤的变质程度是控制巷道预排瓦斯等值宽度的主要因素。

2) 排放时间 60、120、180 和 240 d 的巷道预

排瓦斯等值宽度分别为 9.2、11.9、13.8 和 15.3 m；较难抽采煤层排放 180 d 的巷道预排瓦斯等值宽度小于 15 m，可以抽采煤层为 15~20 m，容易抽采煤层厚度小于 20 m，巷道预排瓦斯等值宽度随煤层透气性系数的升高逐渐增大。

3)巷道预排瓦斯等值宽度与排放时间、煤层透
气性系数和巷道尺寸呈正比关系,与煤体强度、地应
力、支护应力及变质程度呈反比关系;确定了试验巷
道排放时间 120 d 的预排瓦斯等值宽度为 11.9 m,
采用瓦斯含量测试法对其进行现场验证,表明确定
的巷道预排瓦斯等值宽度合理可靠。

参考文献(References) :

- [1] AQ 1018—2006,矿井瓦斯涌出量预测方法[S].
 - [2] 国家安全生产监督管理总局,国家发展和改革委员会,国家能源局,等,煤矿瓦斯抽采达标暂行规定[S].
 - [3] 李宵尖,李炎涛,王兆丰.煤层巷道周围瓦斯排放宽度研究[J].煤矿安全,2012,43(11):1-4.
LI Xiaojian, LI Yantao, WANG Zhaofeng. Study on the gas drainage width of roadway surrounding coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43 (11): 1-4.
 - [4] 韩保山,赵继展,王战锋.巷道对煤层瓦斯含量的影响范围探讨[J].煤田地质与勘探,2007,35(3):36-39.
HAN Baoshan, ZHAO Jizhan, WANG Zhanfeng. Discussion on incidence of underground roadway to gas content of coal seam [J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35 (3): 36-39.
 - [5] ARMAND G, LEVEAU F, NUSSBAUM C, et al. Geometry and properties of the excavation-induced fractures at the Meuse Haute-Marne URL drifts [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47 (1): 21-41.
 - [6] ZHANG N, LI X R, CHENG H M, et al. A coupled damage-hydro-mechanical model for gas drainage in low-permeability coalbeds [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 35: 1032-1043.
 - [7] PAN Z J, CONNELL L D. Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 92(1): 1-44.
 - [8] MAZUMDER S, SCOTT M, JIANG J. Permeability increase in Bowen Basin coal as a result of matrix shrinkage during primary depletion [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 96(1): 109-119.
 - [9] CHAREONSUPPANIMIT P, MOHAMMAD S A, ROBINSON R L, et al. Modeling gas adsorption-induced swelling and permeability changes in coals [J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 121(1): 98-109.
 - [10] 傅雪海,李大华,秦勇,等.煤基质收缩对渗透率影响的实验研究[J].中国矿业大学学报,2002,31(2):129-137.
FU Xuehai, LI Dahua, QIN Yong, et al. Experimental research on influence of coal matrix shrinkage on permeability [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31 (2): 129-137.
 - [11] 张先敏,同登科.考虑基质收缩影响的煤层气流动模型及应用[J].中国科学 E 辑:技术科学,2008,38(5):790-796.
ZHANG Xianmin, TONG Dengke. Coal seam gas flow model considering matrix shrinkage and its application [J]. Chinese Science B: Engineering Sciences, 2008, 38 (5): 790-796.

- ing the matrix shrinkage effect and its application [J]. *Science in China press, E: Science technology*, 2008, 38(5): 790-796.
- [12] SHI J Q, DURUCAN S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recovery [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2005, 8(4): 291-299.
- [13] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends upon stress and pore pressure in coal bed: A new model [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1998; 539-544.
- [14] 林柏泉, 刘 厅, 杨 威. 基于动态扩散的煤层多场耦合模型建立及应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 32-39.
- LIN Baiquan, LIU Ting, YANG Wei. Solid-gas coupling model for coalseams based on dynamic diffusion and its application [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 32-39.
- [15] LIU Ting, LIN Baiquan, YANG Wei, et al.. Dynamic diffusion-based multifield coupling model for gas drainage [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 44: 233-249.
- [16] 梁 冰, 袁欣鹏, 孙维吉. 本煤层顺层瓦斯抽采渗流耦合模型及应用研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(2): 208-213.
- LIANG Bing, YUAN Xinpeng, SUN Weiji. Seepage coupling model of in-seam gas extraction and its applications [J]. *Journal of China University of Ming & Technology*, 2014, 43(2): 208-213.
- [17] 卢义玉, 贾亚杰, 葛兆龙, 等. 割缝后煤层瓦斯的流-固耦合模型及应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(1): 23-29.
- LU Yiyu, JIA Yajie, GE Zhaolong, et al. Coupled fluid solid model of coal bed methane and its application after slotting by high pressure water jet [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 43(1): 23-29.
- [18] 刘世奇, 方辉煌, 桑树勋, 等. 基于多物理场耦合求解的煤层 CO_2 -ECBM 数值模拟研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(9): 51-59.
- LIU Shiqi, FANG Huihuang, SANG Shuxun, et al. Numerical simulation study on coal seam CO_2 -ECBM based on multi-physics fields coupling solution [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 51-59.
- [19] 郝富昌, 孙丽娟, 刘明举. 考虑塑性软化和扩容特性的最短封孔深度研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(5): 789-793.
- HAO Fuchang, SUN Lijuan, LIU Mingju. Study on shortest sealing depth considering plastic softening and dilatancy [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(5): 789-793.
- [20] 姚国圣, 李镜培, 谷栓成. 考虑岩体扩容和塑性软化的软岩巷道变形解析 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(2): 463-467.
- YAO Guosheng, LI Jingpei, GU Shuancheng. Analytic solution to deformation of soft rock tunnel considering dilatancy and plastic softening of rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 463-467.
- [21] 周 建, 杨新安. 考虑围岩峰后强度脆性跌落的洞室黏弹性解 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S2): 439-446.
- ZHOU Jian, YANG Xin'an. Visco-elastoplastic solution for surrounding rock cavern by considering brittle drop of postpeak strength [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 439-446.
- [22] 谢广祥, 殷志强, 胡祖祥, 等. 深井瓦斯煤层采动扩容致灾力学机理 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 24-29.
- XIE Guangxiang, YIN Zhiqiang, HU Zuxiang, et al. Disaster-causing mechanical mechanism of coal mining dilatancy of gassy seam in deep mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 24-29.
- [23] 郝富昌, 刘彦伟, 龙威成, 等. 蠕变-渗流耦合作用下不同埋深有效抽采半径研究 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2616-2622.
- HAO Fuchang, LIU Yanwei, LONG Weicheng, et al. Research on effective gas extraction radius of different burial depths under creep-seepage coupling [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2616-2622.
- [24] 郝富昌, 孙丽娟, 刘明举. 考虑卸压和抽采效果的水力冲孔布孔参数优化研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(5): 756-763.
- HAO Fuchang, SUN Lijuan, LIU Mingju. Research on boreholes space optimization of hydraulic flushing considering press relief and gas drainage effect [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(5): 756-763.
- [25] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1988, 3(1): 81-91.