

安全技术及工程



移动扫码阅读

林柏泉,宋浩然,杨威,等.基于煤体各向异性的煤层瓦斯有效抽采区域研究[J].煤炭科学技术,2019,47(6):139-145.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.06.021

LIN Baiquan, SONG Haoran, YANG Wei, et al. Study on effective gas drainage area based on anisotropic coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 139-145. doi: 10. 13199/ j. cnki. cst. 2019. 06. 021

基于煤体各向异性的煤层瓦斯有效抽采区域研究

林柏泉^{1,2},宋浩然^{1,2},杨威^{1,2},赵洋^{1,2},查伟^{1,2}

(1.中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;2.中国矿业大学 安全工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:为了探究影响射流割缝钻孔周围有效抽采区域变化的因素,基于煤体的各向异性考虑了瓦斯抽采过程煤体应变场和瓦斯渗流场的耦合作用,探讨了不同垂直地应力、初始瓦斯压力以及初始渗透率等参数对射流割缝钻孔有效抽采区域的影响规律。结果表明:垂直地应力越大,煤体的渗透率越低,有效抽采区域逐渐减小;初始瓦斯压力越大,抽采相同时间后瓦斯压力越难降至0.74 MPa以下,有效抽采区域逐渐减小;初始渗透率越大,煤体裂隙瓦斯流动速度越快,导致在相同抽采负压下有效抽采区域逐渐增大。各向异性煤体的模拟结果与现场测试结果基本相符,证明了各向异性煤层垂直层理方向有效抽采半径是现场布孔的合理指标。

关键词:瓦斯抽采;有效抽采区域;各向异性;多物理场耦合

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)06-0139-07

Study on effective gas drainage area based on anisotropic coal seam

LIN Baiquan^{1,2}, SONG Haoran^{1,2}, YANG Wei^{1,2}, ZHAO Yang^{1,2}, ZHA Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coal Methane and Fire Control, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The paper is devoted to explore parameters that affect the effective drainage area around the hydraulic slotting. The coupling effect of the coal strain field and the gas seepage field in gas drainage is studied based on the anisotropy of coal. The influences of different vertical geostress, initial gas pressure, and initial permeability on the effective drainage area of hydraulic slotting are also analyzed. The results show that higher vertical ground stress is associated with lower coal permeability, which leads to the gradual reduction of effective drainage area. The larger the initial gas pressure is, the more difficulty it is to reduce the gas pressure around the borehole to 0.74 MPa or less, with the effective drainage area being gradually reduced. The larger the initial permeability, the higher the gas flow velocity of the coal body fissure, and the effective drainage area gradually increases under the same drainage negative pressure. The simulation results of anisotropic coal body are basically consistent with the field test results, which proves that the effective drainage radius of the anisotropic coal seam vertical bedding direction is a reasonable index of the field hole.

Key words: gas drainage; effective drainage area; anisotropy; multiphysics coupling

0 引 言

近年来,随着煤炭资源的开采规模和强度越来越

越大,我国煤矿开采深度不断增加^[1]。深部煤层普遍存在“三低一高”(低饱和度、低渗透性、低储层压力、高变质程度)的特点,这使得煤矿的开采难度增

收稿日期:2018-12-21;责任编辑:王晓珍

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801402);国家自然科学基金资助项目(51474211);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(SJCX18_0667)

作者简介:林柏泉(1960—),男,福建龙岩人,教授,博士生导师。E-mail:lbq21405@126.com

通信作者:宋浩然(1993—),男,河南郑州人,硕士研究生。E-mail:414708634@qq.com

大,矿山安全生产受到严重威胁^[2]。射流割缝强化钻孔瓦斯抽采技术能够实现煤层有效卸压,是防止瓦斯动力灾害的重要手段^[3]。而对于各向异性煤层,很难准确测定瓦斯抽采的有效半径。因此,分析钻孔的有效抽采区域并探讨不同特征参数下有效抽采区域的变化规律,对防治煤矿瓦斯灾害和强化瓦斯抽采都有重要的意义。

对于煤层瓦斯抽采有效半径的试验测定,相关学者已经取得了许多有意义的成果。李子文等^[4]推导了抽采半径计算公式,研究了抽采半径与时间的关系,并结合新丰煤矿进行了现场验证。刘厅等^[5]结合消突指标提出了割缝钻孔有效抽采半径的判定指标,通过杨柳矿现场试验验证了指标的可靠性。季准君等^[6]实测了芦岭矿煤层瓦斯有效抽采半径,通过数值模拟确定了影响半径变化的主要因素。徐青伟等^[7]推算了不同煤层穿层钻孔的瓦斯抽采量,并针对青龙煤矿的实际条件得到了整个煤层的有效抽采半径。数值模拟是研究煤层钻孔有效抽采半径的重要方法,具有成本较低、误差较小和操作便捷等优点,相关学者对于多物理场耦合模型开发进行了大量研究工作。林柏泉等^[8]建立了考虑扰动裂隙场、渗流场及变形场多场耦合模型,分析了扰动裂隙范围对割缝钻孔有效抽采半径的影响。梁冰等^[9]进行了考虑煤体变形与瓦斯渗流耦合作用的模拟研究,确定了不同矿区煤层瓦斯地质条件下的钻孔有效抽采半径。岳高伟等^[10]根据煤体的各向异性建立了煤层的气-固耦合渗流模型,分析了不同钻孔方位下抽采有效半径的变化规律。曾春林等^[11]建立了瓦斯渗流和煤体变形的耦合方程,模拟分析了抽采钻孔的合理布置方式。

虽然众多学者在研究煤层钻孔有效抽采半径方面取得了有益的成果,但对于各向异性煤层钻孔有效抽采区域的研究较少。因此,笔者基于煤体的各向异性特征,考虑了瓦斯抽采过程中煤体应变场和瓦斯渗流场的耦合作用,模拟分析了不同特征参数下各向异性煤体钻孔有效抽采区域的变化规律。研究结果有助于煤层钻孔的合理布置,有利于实现煤层瓦斯的安全高效抽采。

1 瓦斯抽采数学模型

1.1 煤体变形控制方程

含瓦斯煤体变形的控制方程^[12]:

$$Gu_i + \frac{G}{1-2\nu}u_k - \alpha p_i - K\varepsilon_i + f_i = 0 \quad (1)$$

式中: G 为煤体的剪切模量,MPa; u_i 和 u_k 分别为不

同方向的位移分量; m ; ν 为煤体的泊松比; α 为Biot系数; p_i 为瓦斯压力,MPa; K 为煤的体积模量,MPa; ε_i 为煤体应变张量; f_i 为煤体的体积力,MPa。

瓦斯的吸附和解吸体积应变 ε_s 在朗格缪尔型曲线上,并通过试验进行了验证^[13]。用朗格缪尔型方程来计算这种体积应变:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_L \frac{p}{P_L + p} \quad (2)$$

式中: ε_L 为Langmuir体积应变常数; p 为瓦斯压力,MPa; P_L 为 $0.5\varepsilon_L$ 时的孔隙压力,MPa。

1.2 裂隙瓦斯流动控制方程

瓦斯渗流符合质量守恒方程,其质量平衡方程可以定义为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g q_g) = Q_s \quad (3)$$

式中: m 为游离瓦斯和吸附瓦斯含量, kg/m^3 ; t 为时间,s; ∇ 为哈密顿算子; ρ_g 为瓦斯密度, kg/m^3 ; q_g 为达西速度向量, m/s ; Q_s 为吸附瓦斯解吸量, m^3/s 。

单位体积煤体裂隙中的瓦斯含量由Langmuir方程计算表示:

$$m = \rho_g \varphi + \rho_{gs} \rho_c \frac{V_L p}{p + P_L} \quad (4)$$

式中: φ 为煤体孔隙率; ρ_{gs} 为标准条件下的气体密度, kg/m^3 ; ρ_c 为煤体密度, kg/m^3 ; V_L 为Langmuir体积常数。

根据达西定律,达西速度 q_g 可以表示为

$$q_g = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (5)$$

式中: μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; k 为渗透率, m^2 。

考虑煤体应变,煤体孔隙率 φ 可以表示为^[14]

$$\varphi = \frac{1}{1+S} [(1+S_0)\varphi_0 + \alpha(S-S_0)] \quad (6)$$

式中: S 为煤体应变变量, $S = \varepsilon_v + \frac{p}{K_s} - \varepsilon_s$; S_0 为初始

应变变量, $S_0 = \frac{p_0}{K_s} - \frac{\varepsilon_L P_0}{p_0 + P_L}$; φ_0 为初始孔隙率; K_s 为煤基质体积模量,MPa; ε_v 为煤基质的体积应变; P_0 为初始瓦斯压力,MPa。

由Kozeny-Carman方程^[15]可知,煤体的渗透率与孔隙率的关系为

$$\frac{k}{k_0} = \left\{ \frac{1}{1+S} \left[(1+S_0) + \frac{\alpha}{\varphi_0} (S-S_0) \right] \right\}^3 \quad (7)$$

式中, k_0 为煤体初始渗透率, m^2 。

将式(4)和式(5)代入式(3)并计算化简,可以得到煤体瓦斯压力随时间变化的控制方程:

$$\left[\varphi + \frac{\rho_c p_a V_L P_L}{(p + P_L)^2} + \frac{(\alpha - \varphi) p}{(1 + S) K_s} - \frac{(\alpha - \varphi) \varepsilon_L P_L p}{(1 + S) (p + P_L)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} p \nabla p \right) = Q_s - \frac{(\alpha - \varphi) p}{(1 + S)} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (8)$$

式中: p_a 为大气压力, 101.325 kPa。

2 瓦斯抽采物理模型

在 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合软件中根据应力场、渗流场相互耦合作用建立了瓦斯抽采几何模型, 如图 1 所示, 模型的尺寸为 20 m × 30 m, 边界条件根据现场情况设定, 模型上部为来自上覆岩层的垂直地应力 F_0 , 底部为固定约束, 左右边界为辊支撑。煤体初始瓦斯压力 P_0 为 2 MPa, 钻孔抽采负压为 16 kPa。模型的基本参数^[16]如下:

温度/K	293.14
弹性模量/MPa	2 713
煤骨架弹性模量/MPa	8 139
泊松比	0.339
煤体密度 $\rho_c / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.25×10^3
标准状态下甲烷密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.717
动力黏度 $\mu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.84×10^{-5}
垂直地应力 F_0 / MPa	2
Langmuir 压力常数/MPa	6.109
Langmuir 体积常数 $/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	0.015
Langmuir 体积应变常数	0.022 95
煤体初始孔隙率	0.005 6
平行层理方向初始渗透率 k_{x0} / m^2	3×10^{-16}
垂直层理方向初始渗透率 k_{y0} / m^2	1×10^{-16}

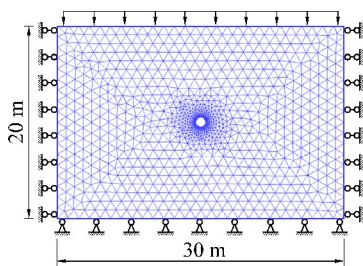


图 1 瓦斯抽采几何模型

Fig.1 Gas drainage geometric model

3 有效抽采区域的探讨

对于各向异性煤体, 根据 AQ 1026—2006《煤矿瓦斯抽采基本指标》的规定, 笔者定义了有效抽采区域: 一定抽采时间内钻孔周围瓦斯压力低于 0.74 MPa 的区域。根据前人的试验研究^[10], 本文数值模拟选用的煤体平行层理方向初始渗透率为垂直层理

方向初始渗透率的 3 倍。为了研究各向异性煤层射流割缝后钻孔的抽采效果, 本节将讨论在不改变其他参数的情况下分别改变垂直地应力 F_0 、煤体初始瓦斯压力 P_0 以及初始渗透率 k_{x0} 和 k_{y0} 对各向异性煤层钻孔有效抽采区域的影响。

3.1 垂直地应力 F_0 的影响

为了研究垂直地应力 F_0 对有效抽采区域的影响, 将其他参数设为定值: $P_0 = 2$ MPa, $k_{x0} = 6 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, $k_{y0} = 2 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。

根据实测地应力分布规律, 拟合得到如图 2 所示的垂直地应力与煤层埋深 H 的关系^[17]。从图 2 可以看出, 随着煤层埋深 H 的增加, 垂直地应力逐渐增加, 煤层埋深 600、800、1 000 m 对应的垂直地应力分别为 14.6、18.8、23.0 MPa。不同垂直地应力下裂隙瓦斯压力变化云图如图 3 所示。

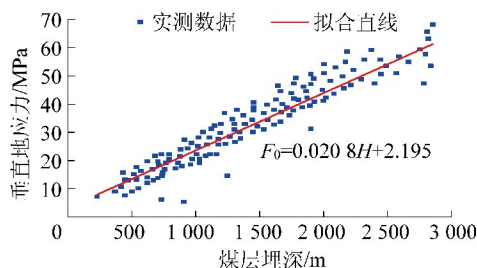


图 2 垂直地应力与煤层埋深的关系

Fig.2 Relationship between vertical ground stress and coal seam depth

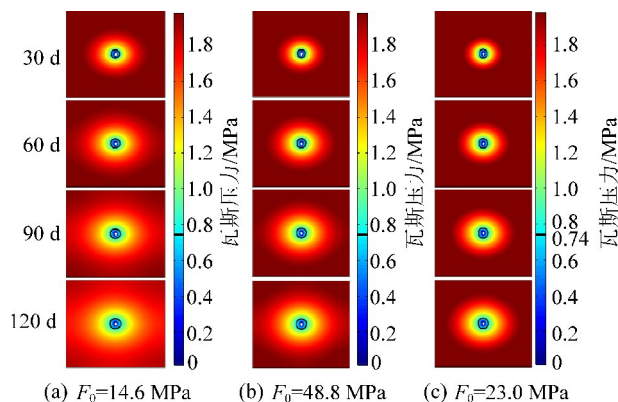


图 3 不同垂直地应力下裂隙瓦斯压力变化

Fig.3 Gas pressure change of fracture under different vertical ground stress

从图 3 可以看出, 各向异性煤体钻孔抽采影响范围呈现椭圆形, 随着抽采时间的增加, 钻孔周围瓦斯压力均逐渐降低, 抽采影响范围均逐渐增大。随着 F_0 逐渐增大, 相同抽采时间内抽采影响范围逐渐减小。图 4 显示了不同垂直地应力下有效抽采区域随抽采时间的变化曲线。由图 4 可知, 有效抽采区

域随着垂直地应力的增大缓慢减小,随着抽采时间的增加逐渐增大。当垂直地应力分别为 14.6、18.8、23.0 MPa 时,有效抽采区域在瓦斯抽采初期均迅速增加而后缓慢增大,3 条曲线差异性不大,地应力对有效抽采区域的影响较小。这是因为,垂直地应力增大时,煤体有效应力增加,煤层裂隙宽度减小,进而导致煤体渗透率降低,在相同抽采负压下裂隙瓦斯较难被抽出,有效抽采区域面积减小。垂直地应力增加 4.2 MPa,对应的渗透率下降幅度较小,所以有效抽采区域面积降幅不大。

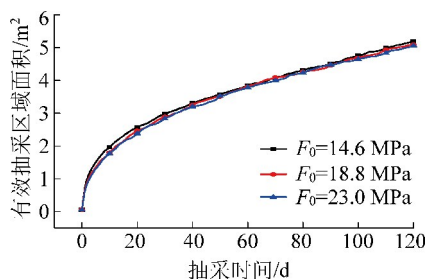


图4 垂直地应力对有效抽采区域的影响
Fig.4 Influence of vertical ground stress on effective drainage area

3.2 初始瓦斯压力 P_0 的影响

为了研究煤体初始瓦斯压力 P_0 对有效抽采区域的影响,将其他参数设为定值: $F_0 = 18.8$ MPa, $k_{x0} = 6 \times 10^{-17}$ m², $k_{y0} = 2 \times 10^{-17}$ m²。

图5显示了各向异性煤体不同初始瓦斯压力下裂隙瓦斯压力变化云图。从图5可以看出,瓦斯压力 0.74 MPa 等值线的形状呈现椭圆形。随着抽采时间的增加,钻孔周围瓦斯压力均逐渐降低,抽采影响均逐渐增大。随着 P_0 逐渐增大,抽采相同时间后,有效抽采区域逐渐减小。

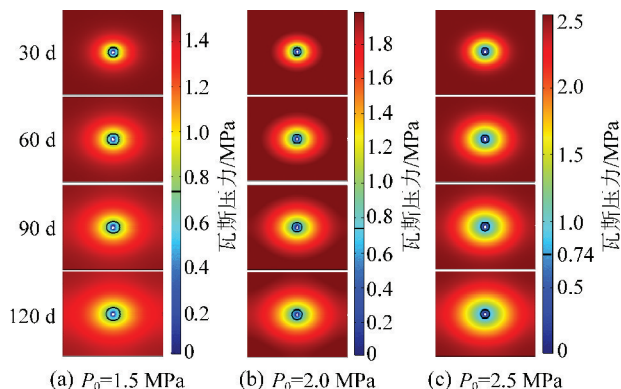


图5 不同初始瓦斯压力下裂隙瓦斯压力变化

Fig.5 Variation of fracture gas pressure under different initial gas pressures

图6显示了不同初始瓦斯压力下有效抽采区域随抽采时间的变化曲线。由图6可知,有效抽采区域面积随着抽采时间的增加逐渐增大,随着初始瓦斯压力的增大逐渐减小。在抽采 120 d 内,有效抽采区域在瓦斯抽采初期均迅速增加而后缓慢增大。在抽采 120 d 后,当 P_0 由 1.5 MPa 增加到 2.0 MPa 时,有效抽采区域面积由 9.47 m² 降低为 5.09 m²,而 P_0 由 2.0 MPa 增加到 2.5 MPa 时,有效抽采区域面积由 5.09 m² 降低为 3.66 m²,降低幅度逐渐减小。这是因为, P_0 增大时,煤层瓦斯的吸附量增加。在抽采过程中,瓦斯不断从煤基质解吸出来进入裂隙系统,抽采相同时间,钻孔周围瓦斯压力较难降至 0.74 MPa 以下。煤层瓦斯吸附量越高,瓦斯解吸需要的时间越长,相同抽采负压下有效抽采区域下降幅度逐渐减小。

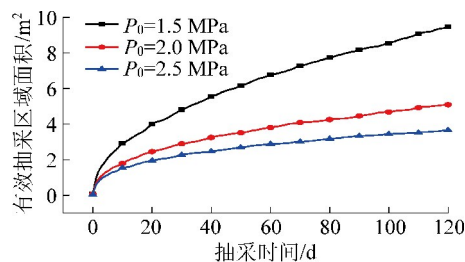


图6 初始瓦斯压力对有效抽采区域的影响
Fig.6 Influence of initial gas pressure on effective drainage area

3.3 初始渗透率 k_{x0} 和 k_{y0} 的影响

为了研究初始渗透率 k_{x0} 和 k_{y0} 对有效抽采区域的影响,将其他参数定为定值: $F_0 = 18.8$ MPa, $P_0 = 2$ MPa。

图7显示了各向异性煤体不同初始渗透率下裂隙瓦斯压力变化云图。从图7中可以看出,随着抽采时间的增加,钻孔周围瓦斯压力均逐渐降低,抽采影响范围均逐渐增大,钻孔有效抽采区域呈现椭圆形。随着 k_{x0} 和 k_{y0} 的降低,相同抽采时间内,抽采影响范围均逐渐减小。图8显示了不同初始渗透率下有效抽采区域随抽采时间的变化曲线。由图8可知,有效抽采区域随着抽采时间的增加逐渐增大,随着初始渗透率的增加逐渐增大。在抽采 120 d 内,当 $k_{x0} \leq 6 \times 10^{-17}$ m² 时,有效抽采区域在抽采初期迅速增加而后平稳增大,而当 $k_{x0} = 3 \times 10^{-16}$ m² 时,有效抽采区域在抽采初期迅速增大然后平缓增加,在抽采后期又迅速增大。在抽采 120 d 后, $k_{x0} = 3 \times 10^{-16}$ m² 条件下的有效抽采区域是 $k_{x0} = 1.2 \times 10^{-16}$ m² 的 6.9 倍。这是因为,由式(7)可知,初始渗透率越大,瓦斯越容易从裂隙中流出,导致裂隙瓦斯压力的快速

降低,进而导致有效抽采区域增大。当 k_{x0} 和 k_{y0} 较小时,裂隙瓦斯流动缓慢,瓦斯抽采效果不佳,导致有效抽采区域缓慢增加;当 k_{x0} 和 k_{y0} 较大时,裂隙瓦斯压力迅速下降,煤体基质收缩,裂隙渗透率增大,有效抽采区域迅速增加。

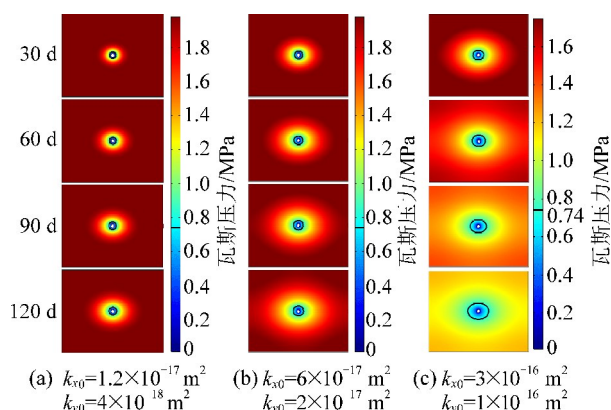


图7 不同初始渗透率下裂隙瓦斯压力变化

Fig.7 Change of fracture gas pressure under different initial permeability

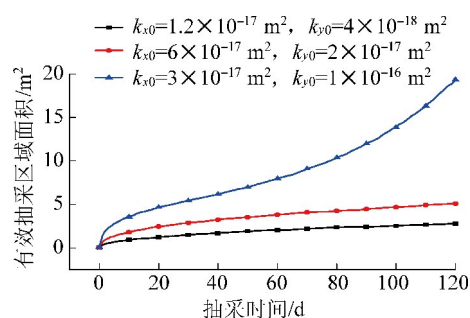


图8 初始渗透率对有效抽采区域的影响

Fig.8 Influence of initial permeability on effective drainage area

4 讨论与验证

图9为各向同性与各向异性煤体有效抽采区域对比。由各向同性和各向异性煤体的模拟结果的对比(图9a)可知,当其他参数相同时,各向同性和各向异性煤体的有效抽采区域分别呈现圆形和椭圆形,两者平行层理方向有效抽采区域范围基本相同,而垂直层理方向的有效抽采区域范围差异明显。因此如图9b所示,各向同性煤体存在有效抽采半径 R ,而各向异性煤体存在平行层理方向和垂直层理方向的有效抽采半径 R 和 r (r 小于 R)。煤矿深部煤层大都为各向异性煤层^[18],若按照前人各向同性煤层的模拟测试结果指导现场的钻孔布置,则会存在大量的无效抽采区域,这会引起煤层部分区域残存瓦斯含量较高,从而威胁煤矿井下的安全生产。因此,为了消除这种潜在危险因素,在对深部煤层进

行钻孔布置时,应当考虑煤层的各向异性特征,采用垂直层理方向有效抽采半径 r 进行布孔,适当增加垂直层理方向的钻孔数量。

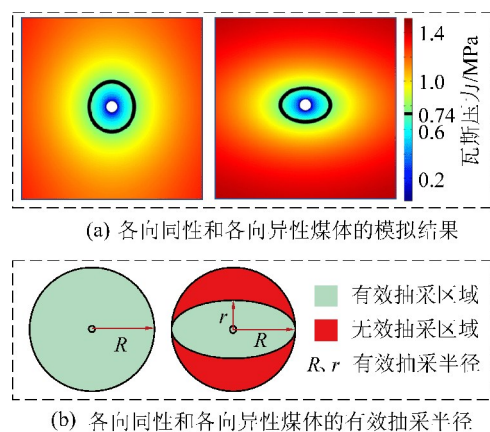


图9 各向同性与各向异性煤体有效抽采区域示意

Fig.9 Schematic diagrams of effective drainage areas of isotropic and anisotropic coals

为了验证模型的合理性,以淮北杨柳煤矿106采区实际条件和表1参数进行数值模拟。采区埋深约500 m,垂直地应力12.5 MPa,初始瓦斯压力2.0 MPa,具有突出危险性。图10是有效抽采区域的模拟结果,可知各向异性煤体的有效抽采区域小于各向同性煤体的有效抽采区域,且各向异性和各向同性煤体的有效抽采半径分别为4.5、8.5 m。

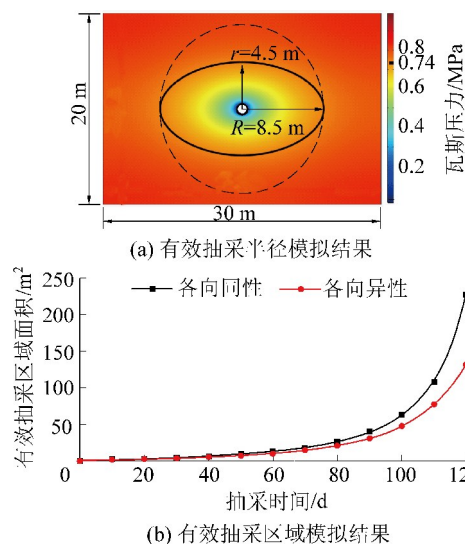


图10 有效抽采半径和区域的模拟结果

Fig.10 Simulation results of effective drainage radius and areas

采区现场利用测定残余瓦斯含量的方法来确定有效抽采半径^[5],如图11所示,现场测试有效抽采半径的结果为5 m,这与本文各向异性煤体的模拟结果之间误差仅为0.5 m,而各向同性煤体的模拟结果明显偏差较大,从而证明了模型的合理性。

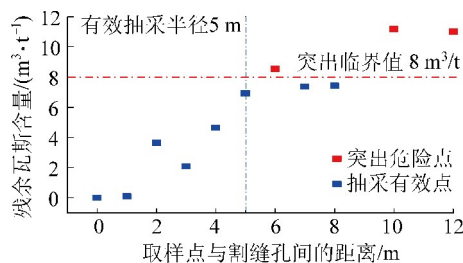
图11 射流割缝钻孔周围残余瓦斯含量分布^[4]

Fig.11 Distribution of residual gas content around hydraulic slotted borehole

5 结 论

1) 根据模拟结果可知,煤体的各向异性影响钻孔瓦斯抽采的效果。各向异性煤层割缝钻孔的有效抽采区域呈现椭圆形,抽采相同时间,平行层理方向的有效抽采区域范围大于垂直层理方向的有效抽采区域范围。

2) 垂直地应力 F_0 越大,煤体有效应力越大,从而导致煤体渗透率降低,有效抽采区域逐渐减小。初始瓦斯压力 P_0 越大,抽采相同时间钻孔周围瓦斯压力越难降至 0.74 MPa 以下,进而有效抽采区域也逐渐减小。而初始渗透率 k_{x0} 和 k_{y0} 越大,煤体裂隙瓦斯流动速度越快,在相同抽采负压下有效抽采区域逐渐增大。

3) 在影响有效抽采区域变化的参数中,垂直地应力 F_0 的影响效果较小,而初始瓦斯压力 P_0 、初始渗透率 k_{x0} 和 k_{y0} 的影响效果显著。各向异性煤体的模拟结果与现场测试结果基本相符,证明了各向异性煤层垂直层理方向有效抽采半径是现场布孔的合理指标。

参考文献 (References):

- [1] 范超军,李 胜,罗明坤,等.基于流-固-热耦合的深部煤层气抽采数值模拟[J].煤炭学报,2016,41(12):3076-3085.
FAN Chaojun, LI Sheng, LUO Mingkun, *et al.* Deep CBM extraction numerical simulation based on hydraulic-mechanical-thermal coupled model [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3076-3085.
- [2] 付建华,程远平.中国煤矿煤与瓦斯突出现状及防治对策[J].采矿与安全工程学报,2007,24(3):253-259.
FU Jianhua, CHENG Yuanping. Situation of coal and gas outburst in china and control countermeasures [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3): 253-259.
- [3] 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 Boquan, LIU Ting, YANG Wei. Solid-gas coupling model for coal seams based on dynamic diffusion and its application [J].

- Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1):32-39.
- [4] 李子文,林柏泉,郭明功,等.基于一维径向流动确定钻孔瓦斯抽采有效影响半径[J].煤炭科学技术,2014,42(12):62-64.
LI Ziwen, LIN Baiquan, GUO Minggong, *et al.* Determination on effective influence radius of gas drainage through borehole based on one-dimensional radial flow [J]. Coal Science And Technology, 2014, 42(12): 62-64.
- [5] 刘 厅,林柏泉,邹全乐,等.基于煤层原始瓦斯含量和压力的割缝钻孔有效抽采半径测定[J].煤矿安全,2014,45(8):8-11.
LIU Ting, LIN Baiquan, ZOU Quanle, *et al.* Measurement of effective drainage radius based on primitive gas content and pressure for slotted drilling [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(8): 8-11.
- [6] 季淮君,李增华,杨永良,等.基于瓦斯流场的抽采半径确定方法[J].采矿与安全工程学报,2013,30(6):917-921.
JI Huaijun, LI Zenghua, YANG Yongliang, *et al.* Drainage radius measurement based on gas flow field [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(6): 917-921.
- [7] 徐青伟,王兆丰,徐书荣,等.多煤层穿层钻孔瓦斯抽采有效抽采半径测定[J].煤炭科学技术,2015,43(7):83-88.
XU Qingwei, WANG Zhaofeng, XU Shurong, *et al.* Measurement on effective gas drainage radius of boreholes passed through multi seams [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 83-88.
- [8] 林柏泉,赵 洋,刘 厅,等.水力割缝煤体多场耦合响应规律研究[J].西安科技大学学报,2017,37(5):662-667.
LIN Baiquan, ZHAO Yang, LIU Ting, *et al.* Coupling response law of multi-field in coal seam after hydraulic slotting [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(5): 662-667.
- [9] 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[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 Mining & Technology, 2014, 43(2): 208-213.
- [10] 岳高伟,王宾宾,曹汉生,等.结构性煤层顺层钻孔方位对有效抽采半径的影响[J].煤炭学报,2017,42(S1):138-147.
YUE Gaowei, WANG Binbin, CAO Hansheng, *et al.* Influence of effective drainage radius by borehole orientation along seam with anisotropic permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 138-147.
- [11] 曾春林,岳高伟,王宾宾,等.基于瓦斯渗透异性的煤层抽采钻孔合理布置[J].重庆大学学报:自然科学版,2018,41(6):102-114.
ZENG Chunlin, YUE Gaowei, WANG Binbin, *et al.* Reasonable layout of drainage boreholes based on anisotropic permeability in coal seam [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2018, 41(6): 102-114.
- [12] LIU Jishan, CHEN Zhongwei, ELSWORTH Derek, *et al.* Linking gas-sorption induced changes in coal permeability to directional strains through a modulus reduction ratio [J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 83(1): 21-30.

- [13] ROBERTSON Eric P, CHRISTIANSEN Richard L. Modeling laboratory permeability in coal using sorption-induced-strain data [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007, 10(3):260-269.
- [14] ZHAO Yang, LIN Baiquan, LIU Ting, *et al.* Gas flow field evolution around hydraulic slotted borehole in anisotropic coal[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 58:189-200.
- [15] LIU Ting, LIN Baiquan, YANG Wei. Impact of matrix-fracture interactions on coal permeability: model development and analysis [J]. Fuel, 2017, 207:522-532.
- [16] ZHANG Hongbin, LIU Jishan, ELSWORTH D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams; a new FE model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8):1226-1236.
- [17] 范超军, 李 胜, 罗明坤, 等. 基于流-固-热耦合的深部煤层气抽采数值模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12):3076-3085.
- FAN Chaojun, LI Sheng, LUO Mingkun, *et al.* Deep CBM extraction numerical simulation based on hydraulic-mechanical-thermal coupled model[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12):3076-3085.
- [18] WANG Liang, LIU Shimin, CHENG Yuanping, *et al.* Reservoir reconstruction technologies for coalbed methane recovery in deep and multiple seams [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(2):277-284.