



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402977

引用格式:付金磊,林华颖,衡献伟,等.顺层瓦斯抽采长钻孔封孔深度分析:以贵州黔北矿区抽采工程为例[J].科学技术与工程,2025,25(8):3513-2520.

Fu Jinlei, Lin Huaying, Heng Xianwei, et al. Analysis of sealing depth of long borehole in bedding gas drainage: taking the Guizhou Qianbei mining area extraction project as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3513-2520.

环境科学、安全科学

顺层瓦斯抽采长钻孔封孔深度分析: 以贵州黔北矿区抽采工程为例

付金磊^{1,2}, 林华颖^{1,2*}, 衡献伟^{1,2}, 张书金^{1,2}, 陈蒙磊^{1,2}

(1. 贵州省矿山安全科学研究院有限公司, 贵阳 550025; 2. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵阳 550025)

摘要 为研究顺层瓦斯抽采钻孔合理封孔长度,基于瓦斯-空气双气体模型,采用有限元模拟软件建立三维钻孔抽采模型,对封孔段煤层瓦斯压力进行监测分析,通 20915 运输巷现场试验,考察不同封孔长度瓦斯抽采效果。结果表明:受到负压衰减效应,钻孔抽采负压呈指数函数分布,并且钻孔不同位置煤层瓦斯压力减少幅度不同,越靠近封孔位置瓦斯压力减小幅度越小;封孔段瓦斯压力峰值与封孔长度成正比;根据现场测试,封孔距离为 10 m 瓦斯抽采浓度在 130 d 后减小到约 10%;而封孔长度为 20 m 将保持在约 30%,封孔 30 m 的钻孔 130 d 后抽采浓度保持在 60% 以上。

关键词 长钻孔; 瓦斯抽采; 数值模拟; 瓦斯-空气双气体模型

中图分类号 X936;

文献标志码 A

Analysis of Sealing Depth of Long Borehole in Bedding Gas Drainage: Taking the Guizhou Qianbei Mining Area Extraction Project as an Example

FU Jin-lei^{1,2}, LIN Hua-ying^{1,2*}, HENG Xian-wei^{1,2}, ZHANG Shu-jin^{1,2}, CHEN Meng-lei^{1,2}

(1. Guizhou Mine Safety Scientific Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Coal mine Design Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

[Abstract] In order to study the reasonable sealing length of bedding gas drainage boreholes, based on the gas-air dual gas and the negative pressure attenuation effect of boreholes, a three-dimensional borehole drainage model was established by finite element simulation software to monitor and analyzed the gas pressure of coal seam in the sealing section. Through the field test of 20915 haulage roadway, the gas drainage effects of different sealing lengths were investigated. The results show that under the negative pressure attenuation effect, the negative pressure of borehole drainage is exponential function distribution, and the reduction of gas pressure in coal seams at different positions of borehole is different, and the closer to the sealing position, the smaller the reduction of gas pressure. The peak gas pressure in the sealing section is proportional to the sealing length. According to the field test, the gas drainage concentration decreases to about 10% after 130 days when the sealing distance is 10 m. The sealing length of 20 m maintains at about 30%, and the extraction concentration of the borehole with sealing length of 30 m maintains at above 60% after 130 days.

[Keywords] long hole; gas extraction; numerical simulation; gas-air dual gas model

截至 2023 年底,中国煤炭占一次能源消费比重 50% 以上,仍然占据中国能源主要地位。随着煤炭资源的开采,矿井瓦斯灾害一直困扰着煤矿安全生产与人员安全,目前常用技术是采取煤层瓦斯抽采作为治理手段,但已有结果表明瓦斯抽采效果差异

性较大,究其原因,封孔长度是影响煤层瓦斯抽采效果的关键因素^[1-2],因此研究顺层抽采钻孔封孔长度具有重要意义。

煤层钻孔封孔质量是影响瓦斯抽采效果的主要因素。众多学者对这一问题进行了大量研究,并取得

收稿日期:2024-04-23; 修订日期:2024-09-30

基金项目:贵州省基础研究(自然科学)计划项目(黔科合基础-ZK[2023]一般199);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2024]一般025,黔科合支撑[2021]一般348,黔科合支撑[2020]2Y030号);贵州省科技成果应用及产业化计划项目(黔科合成果[2024]一般150);贵州省科技重大计划(黔科合重大专项[2020]3008-3)

第一作者:付金磊(1994—),男,汉族,黑龙江伊春人,硕士,工程师。研究方向:煤矿瓦斯灾害预测与防治。E-mail:1225118190@qq.com。

*通信作者:林华颖(1995—),男,汉族,贵州铜仁人,硕士,工程师。研究方向:煤矿瓦斯灾害预测与防治。E-mail:eternity37326@gmail.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

了一系列成果。在理论研究中,薛彦平^[3]对煤层钻孔布孔方位以及封孔工艺最优参数进行了研究。Xia等^[4]建立了煤变形与组分流动的完全耦合模型,利用该理论模型研究了封孔长度、漏风率和裂缝宽度对预抽煤层瓦斯效果的影响。陈新等^[5]通过数值模拟软件建立钻孔衰减模型,得出负压衰减效应对抽采存量具有分层效应。Danesh等^[6]在多孔介质本构方程引入蠕变项,得到修正的渗透率模型,用于评价煤层瓦斯抽采效果。此外,在封孔技术方面也取得了突破。金鑫^[7]通过数值模拟软件进行单侧和双侧钻孔抽采对比,表明双侧抽采钻孔流量衰减速率为单侧的1/10。张学博等^[8]通过模拟得出100 m完整钻孔在抽采第一天负压损失0.04%,发生塌孔负压损失增加至5.1%。根据试验等手段对钻孔封孔参数取得一定成果。郑伟等^[9]根据数值模拟与钻孔窥视,封孔距离为巷道外切圆半径3倍以上。牛心刚等^[10]研究提出顺层钻孔封孔长度15 m,封孔压力1.5 MPa为宜。吴泽平等^[11]基于动量和质量分析方法得出钻孔总压衰减是由于动量交换引起的。薛彦平^[12]采用超大直径钻孔治理采空区瓦斯,使其效果提升46%。张飞燕等^[13]提出阶梯测试法经行抽采半径测定。马赞等^[14]对负角度定向钻孔采用护孔工艺能有效提高抽采效果。郭鑫等^[15]通过数值模拟等手段确定保德煤矿定向长钻孔工艺参数。

综上所述,前人研究多集中在普通钻孔及大直径钻孔,而针对长钻孔封孔深度规律的研究尚鲜见报道,因此在考虑瓦斯-空气双气体模型和钻孔负压衰减效应下,建立三维数值模型,研究顺层瓦斯抽采钻孔合理封孔长度,并在林华煤矿进行现场验证,以期对提升长钻孔瓦斯抽采效果提供借鉴。

1 长钻孔抽采模型

1.1 模型假设

煤矿瓦斯抽采经常受到周围扰动影响影响,在抽采钻孔周围将生成大量裂隙。这些裂隙为外部空气进入钻孔提供通道。在封孔过程中,如果没有将裂隙有效封堵,就会使外界气体进入钻孔,导致瓦斯浓度急剧下降。如果能够有效地堵钻孔周围裂隙,则可以显著减少进入钻孔的气体,并提高气体浓度。因此,在建模前假设:①煤体各向同性,并且骨架不可压缩;②煤体视为弹性材料,满足胡克定律;③只考虑瓦斯在裂隙中流动,并且流动满足达西定律;④瓦斯运移视为等过程,不考虑温度场变化对瓦斯运移影响;⑤钻孔内部表面粗糙度固定不变。

1.2 渗透率和孔隙率方程

在理性状态煤体内部瓦斯压力下降,煤体基质将产生收缩变形,煤体孔隙体积增大。根据周军平

等^[16]的研究结果可知,煤体发生瓦斯解吸收缩应变 ε_p 可表示为

$$\varepsilon_p = \frac{4ac\rho_v RT}{9V_m K_m} \ln(1 + bp_m) \quad (1)$$

式(1)中: a 为吸附常数, m^3/t ; b 为吸附常数, MPa^{-1} ; c 为煤可燃部分质量, t/m^3 ; ρ_v 为视密度, kg/m^3 ; R 为理想气体常数; T 为温度, K ; V_m 为标准气体摩尔体积, L/mol ; K_m 为基质弹性模量, GPa ; p_m 为煤基质瓦斯压力, Pa 。

煤体基质吸收瓦斯收缩变形为可逆过程,当煤体瓦斯压力由 p_0 降至 p_m ,基质收缩应变为

$$\varepsilon_p = \frac{4ac\rho_v RT}{9V_m K_m} \ln\left(\frac{1 + bp_0}{1 + bp_m}\right) \quad (2)$$

式(2)中: p_0 为煤体初始瓦斯压力, MPa 。

假设瓦斯解吸不影响煤体体积,将式(2)代入孔隙率计算公式,得到瓦斯解吸后煤体孔隙率的表达式为

$$\varphi_m = \varphi_0 + \frac{4ac\rho_v RT}{9V_m K_m} \ln\left(\frac{1 + bp_0}{1 + bp_m}\right) \quad (3)$$

式(3)中: φ_0 为初始孔隙率。

通过 Kozeny-Carman 方程与式(3)得到基质渗透率为

$$k_m = k_0 \left[1 + \frac{4ac\rho_v RT}{9V_m K_m} \ln\left(\frac{1 + bp_0}{1 + bp_m}\right) \right]^3 \quad (4)$$

式(4)中: k_0 为初始渗透率, m^2 。

1.2.1 有效应力对煤渗透性的影响

考虑有效应力对孔隙度的影响,双重介质中的孔隙度的表达式为

$$\varphi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_{p0} - \Delta V_f}{V_{t0} - \Delta V_f} = \frac{\varphi_0 - \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_v} \quad (5)$$

式(5)中: V_p 为煤变形前后的孔隙, m^3 ; V_t 为孔隙体积, m^3 ; V_{p0} 为煤变形前的孔隙, m^3 ; V_{t0} 为初始孔隙体积, m^3 ; ΔV_f 为裂缝体积变化量, m^3 ; ε_v 为煤体应变。

研究表明,煤体瓦斯压力由 p_0 降至 p_{n1} (p_{n1} 为裂隙中瓦斯组分压力),空气压力由0升至 p_{n2} (p_{n2} 为裂隙中空气组分压力),假设应力只引起应变,忽略基质收缩,煤体应变 $\Delta\sigma$ 可表示为

$$\varepsilon_v = \frac{\alpha(p_0 - p_{n1} + p_{n2})}{K_f} \quad (6)$$

式(6)中: α 为 Boit 系数; K_f 为体积模量。

将式(6)代入式(5)得

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{(1 - \varphi_0)\alpha(p_0 - p_{n1} + p_{n2})}{K_f - \alpha(p_0 - p_{n1} + p_{n2})} \quad (7)$$

通过卡曼-科泽尼方程,选择立方定律得到渗透率方程为

$$k_f = k_0 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3 = k_0 \left\{ 1 - \frac{(1 - \varphi_0)\alpha(p_0 - p_{n1} + p_{n2})}{\varphi_0 [K_f - \alpha(p_0 - p_{n1} + p_{n2})]} \right\}^3 \quad (8)$$

1.2.2 渗透率动态演化方程

将式(2)和式(6)代入孔隙率公式,得到多孔介质孔隙变化方程为

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{(1 - \varphi_0)\alpha(p_0 - p_{f1} + p_{f2})}{K_f - \alpha(p_0 - p_{f1} + p_{f2})} + \frac{4acp_v RT[\ln(1 + bp_0) - \ln(1 + bp_m)]}{9V_m K_m [K_f - \alpha(p_0 - p_{f1} + p_{f2})]} \quad (9)$$

考虑基质收缩与有效应力,得到基质渗透率动态演化方程为

$$k = k_0 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^3 = k_0 \left\{ 1 - \frac{(1 - \varphi_0)\alpha(p_0 - p_{f1} + p_{f2})}{K_f - \alpha(p_0 - p_{f1} + p_{f2})} + \frac{4acp_v RT[\ln(1 + bp_0) - \ln(1 + bp_m)]}{9V_m K_m [K_f - \alpha(p_0 - p_{f1} + p_{f2})]} \right\}^3 \quad (10)$$

式(10)中: k 为基质渗透率, m^2 。

1.3 瓦斯流动方程

瓦斯-空气双气体系统中,只考虑气体在多孔介质扩散,控制方程与单一气体在多孔物质相似。其物质交换方程可表示为^[17]

$$Q_m = D_i \tau (c_{m1} - \rho_{f1}) \quad (11)$$

式(11)中: Q_m 为基质与孔隙裂隙气体交换量; D_i 为流体扩散系数, m^2/s ; τ 为形状因子; c_{m1} 、 ρ_{f1} 分别为基质和孔隙裂隙中流体密度, kg/m^3 ; L_m 为基质尺寸。

Yue等^[18]、Zhao等^[19]研究表明,气体扩散系数是时间的一个函数,采用Liu等^[20]推导公式,即

$$D_i = D_0 e^{-\xi t} + D_r \quad (12)$$

式(12)中: D_0 为气体初始扩散系数, m^2/s ; ξ 为衰减系数; t 为时间, s ; D_r 为剩余气体扩散系数, m^2/s 。

将气体压强公式与式(12)代入式(11)得到质量交换的控制方程为

$$Q_m = \frac{3\pi^2 M_c (p_m - p_{f1}) [D_0 e^{-\xi t} + D_r]}{L_m^2 RT} \quad (13)$$

式(13)中: M_c 为甲烷摩尔质量, kg/mol ; p_m 、 p_{f1} 分别为基质和孔隙裂隙中流体压力, MPa 。

单位质量煤基质含气量可表示为

$$m_p = \frac{abp_m \rho_c M_c}{(1 + bp_p)V_m} + \varphi_p \frac{M_c p_p}{RT} \quad (14)$$

式(14)中: ρ_c 为煤体视密度, kg/m^3 ; M_c 为瓦斯摩尔质量, kg/mol ; φ_p 为基质孔隙率, $\%$ 。

将式(13)和式(14)代入质量守恒方程得到煤体裂隙瓦斯压力分布方程,即

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{M_c \rho_c}{V_m} \frac{V_L p_m}{P_L + p_m} + \varphi_m \frac{M_c p_m}{RT} \right) = - \frac{3\pi^2 M_c (p_m - p_{f1}) [D_0 e^{-\xi t} + D_r]}{L_m^2 RT} \quad (15)$$

式(15)中: V_L 为最大煤体吸附量; P_L 为朗缪尔吸附常数。

1.4 煤变形方程

随着埋深增加,煤体受到地应力与瓦斯压力共同作用。煤体变形方程可由Navier-Stokes方程表示为

$$G u_{i,jj} + \frac{G}{1 - 2\nu} u_{j,i} - \alpha_m p_m - k_i \varepsilon_{s,i} + F_i = 0 \quad (16)$$

式(16)中: G 为剪切模量, $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$,Pa,其中, E

为弹性模量,Pa; ν 为泊松比; α_i 和 α_m 分别为裂隙和煤基质的Biot's系数; $\varepsilon_{s,i}$ 为基质最大应变; F_i 为体积力分量; $u_{i,jj}$ 和 $u_{j,i}$ 为含瓦斯煤变形位移。

1.5 钻孔负压衰减分析

由于抽采负压,钻孔附近煤体基质瓦斯通过裂隙运移至钻孔内,使得钻孔周围煤体气体压力降低,煤体吸附平衡发生改变,更多吸附瓦斯转变为游离态。在抽采负压的驱动下,钻孔内部瓦斯不断向孔口处流动,并且距离孔口越近,气体流动速度越快,负压衰减也越快,因此流体阻力损失为

$$h_f = \frac{\lambda_d l \rho v^2}{2d} \quad (17)$$

式(17)中: l 为钻孔长度, m ; d 为钻孔直径, m ; v 为截面平均流速, m/s ; λ_d 为钻孔沿程阻力系数。

当流体流速过快,流体将呈现紊流态,因此根据刘军^[21]研究得出紊流状态下流体阻力系数为

$$\lambda_d = \left[1.14 - 2 \lg \left(\frac{\varepsilon}{d} + 21.25 Re^{-0.9} \right) \right]^{-2} \quad (18)$$

式(18)中: ε 为管壁粗糙度; Re 为雷诺数。

将钻孔切割为无限块,取其中任意一块作为单元体,假设单元体长度为 L_m ,流入单元体气体流量为 Q_{m-1} ,流出气体流量为 Q_m ,其中,根据质量守恒方程,流出量为流入量加上单元体周围补给量 q_m , q_m 可通过对单元体孔壁瓦斯流速积分得到。由于摩擦阻力的存在,使得钻孔个点气体流速不同,因此采用平均流速进行代替,则单元体平均瓦斯流速为

$$\bar{v} = \frac{2(2Q_m - q_m)}{\pi d^2} \quad (19)$$

将式(19)代入式(17)得到钻孔任意段摩擦阻力为

$$h_{f(m)} = \frac{2\rho \lambda_d L (2Q_m + q_m)^2}{\pi^2 d^5} = \left\{ 2\rho \left[1.14 - 2 \lg \left(\left\{ \frac{\varepsilon}{d} + 21.25 \left[\frac{2\rho(2Q_m + q_m)}{\mu \pi d} \right]^{-2} \right\} \right) \right] L (2Q_m + q_m)^2 \right\} \pi^{-2} d^{-5} \quad (20)$$

式(20)中： μ 为瓦斯动力黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

钻孔整体摩擦阻力为

$$h_f = \sum_{i=1}^m h_{f(i)} \quad (21)$$

2 抽采模拟

以林华煤矿为基础，为避免地应力在二维模型中简单实现，建立煤层瓦斯抽采三维模型。

2.1 模型建立及边界条件

如图 1 所示，构建尺寸为 60 m (宽) × 300 m (深) × 11 m (高) 的模型，其中，中间层设置 3 m 厚煤层，在煤层的顶部设置 4 m 厚顶板，底部设置 4 m 厚底板。随后沿 y 轴在煤层中开挖一条长 60 m、宽 4 m 的巷道。沿 x 轴在巷道中钻孔，长度为 150 m，直径为 0.094 m。

模型顶部施加垂直应力 8 MPa。模型四周采用辊轴约束，底部固定约束。模型四周、顶板和底板设置为无流体流动。根据林华煤矿提供的工业分析、力学及相关实验参数作为模型输入值，模型主要参数如表 1 所示。

2.2 钻孔负压分布规律

钻孔孔底负压设定为 -17 kPa，煤层初始瓦斯

压力 1.4 MPa，封孔压力设定为 1.5 MPa。由图 2 可知，钻孔长度与抽采负压呈 $y = a + be^{cx}$ 函数关系，钻孔越长，抽采负压衰减越小。

在模型 10、20、60、120 和 160 m 处设置观测点，分别绘制该点 120 d 内抽采钻孔抽采段钻孔壁煤层瓦斯压力变化曲线，如图 3 所示。通过观察图可知，10、20、60、120 m 整体趋势随时间不断降低，但降低幅度随时间推移不断减缓。10 m 处位于封孔段，该位置距离煤壁较近，并且由于抽采负压影响使得该处瓦斯压力相较于煤层初始压力较低，但该处压力降低幅度远不止抽采段。20、60、120 m 都处于抽采段，并且越靠近孔底煤层瓦斯压力越低，通过钻孔负压衰减公式可知，孔底负压为最低值，该处瓦斯压力梯度最大，位置越靠近封孔段，瓦斯气体收到阻力越大，孔内外瓦斯压力梯度越小。但随之时间推移，钻孔附近煤体内部瓦斯不断抽出，使得煤体瓦斯压力不断降低，造成瓦斯梯度不断减小，并且受到煤内部阻力影响，离钻孔越远，影响越小，最终存在以特定位置使得瓦斯压力对其作用可忽略不计，而内部影响范围瓦斯压力也将达到平衡，即抽采负压与气体收到的阻力达到平衡。160 m 位于钻孔末端外 10 m，抽采影响范围远小于该值，使得该处瓦斯压力几乎保持不变。

表 1 瓦斯抽采模型参数

Table 1 Gas extraction model parameters

输入参数	数值
初始孔隙率/%	3
煤密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 400
煤的泊松比	0.29
煤弹性模量/MPa	2 713
初始瓦斯扩散系数/($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	5.48×10^{-12}
吸附常数 b/MPa^{-1}	2
初始渗透率/ m^2	1.299×10^{-17}
瓦斯动力黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.05×10^{-6}
初始瓦斯压力/MPa	1.4
煤层温度/K	293.15
吸附常数 $a/(\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1})$	35
煤体骨架弹性模量/MPa	5 139

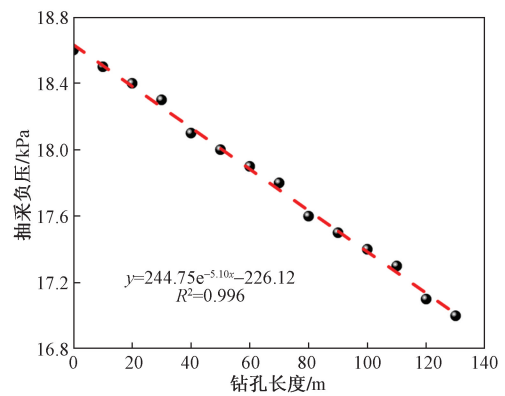


图 2 第 120 天钻孔抽采负压

Fig. 2 Drilling and extraction negative pressure on the 120th day

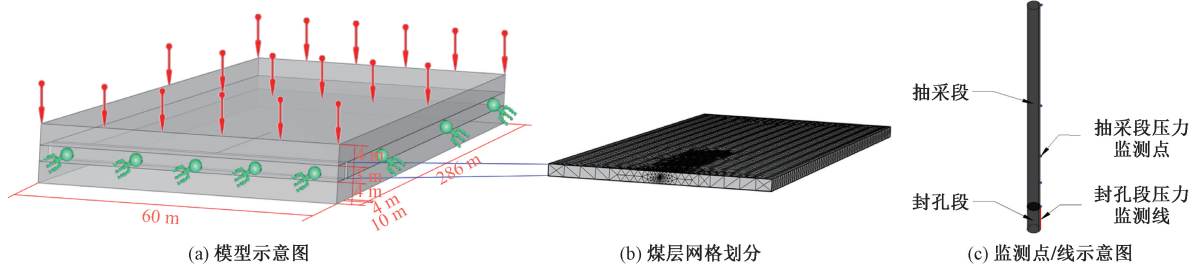


图 1 抽采模型

Fig. 1 Extraction model

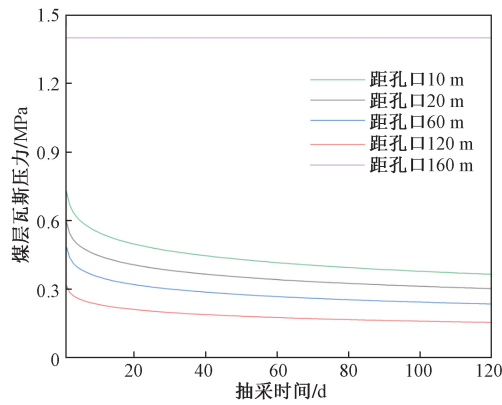


图3 不同测点煤层瓦斯压力曲线

Fig. 3 Gas pressure curves of coal seams at different measurement points

2.3 钻孔合理封孔长度确定

为研究封孔长度不同对封孔段煤层瓦斯压力影响,封孔长度分别设置 5、10、15、20 m,其余边界条件与初始模型相同,为分析不同封孔长度抽采钻孔卸压情况,监测封孔段孔壁煤层瓦斯压力,压力曲线如图 4 所示。可以看出,瓦斯压力曲线出现下降是由于封孔段末端受到抽采负压影响,周围瓦斯被运移至钻孔内造成。

由于煤巷与抽采负压共同影响,封孔段煤层瓦斯压力不断将产生变化。封孔为 5 m 时,距巷道 3.91 m 处瓦斯压力峰值达到 0.92 MPa,相较于初始压力减少了 34%。此时巷道空气通过煤壁断面进入煤层内部,抽采段与外界相连,存在漏气现象,影响抽采效果。随着封孔距离增加到 10 m,瓦斯压力峰值位置后退到 7.07 m,峰值为 1.21 MPa

压力相比原始值降低 13.7%,抽采负压和煤巷对封孔段煤层瓦斯影响逐渐减小;当封孔距离达到 15 m 时,封孔段煤层瓦斯压力趋于原始压力,此时峰值为 1.33 MPa,相比原始值降低 5.0%;当封孔距离继续增加至 20 m 时,封孔段瓦斯压力峰值提升至 1.37 MPa,接近原始压力值,减少量仅为 1.7%。

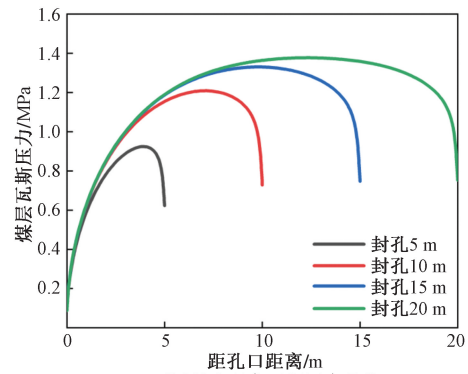
根据模拟可知,封堵率与封孔长度呈指数关系。考虑钻孔封孔成本,设定封堵率大于 97% 作为钻孔较合理封孔长度。

2.4 封孔距离与煤层参数

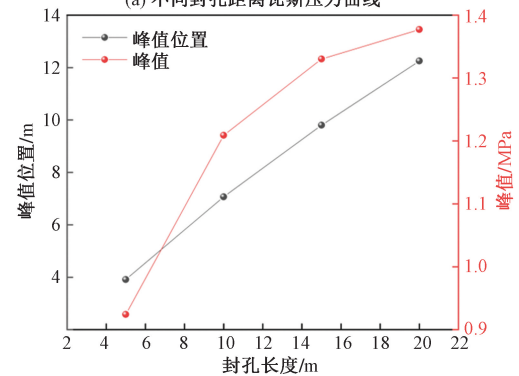
钻孔长度对煤层瓦斯压力存在影响,并且钻孔深度越大,影响范围越大。封孔长度过短使得抽采效果不理想,封孔长度过长将付出更多的人力物力。

2.4.1 煤层初始瓦斯压力对封孔长度影响

抽采钻孔封孔段瓦斯压力受到巷道环境压力



(a) 不同封孔距离瓦斯压力曲线



(b) 不同封孔距离瓦斯压力峰值及峰值位置

图4 不同封孔距离煤层瓦斯压力曲线

Fig. 4 Gas pressure curves of coal seams with different sealing distances

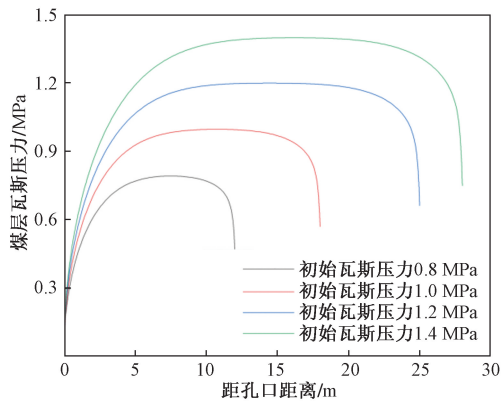
与抽采负压共同影响,当煤壁与煤层瓦斯压力和抽采负压与煤层初始瓦斯压力相差越大,煤层内部气体越容易发生运移。为研究不同煤层瓦斯压力对封孔距离影响,煤层渗透率设定为 $1.1899 \times 10^{-17} \text{ m}^2$,封孔压力设定为 1.5 MPa,其余边界条件不变,不同煤层初始压力封孔段瓦斯压力如图 5 所示。

分析瓦斯压力曲线可知,瓦斯压力越大,需要更长的封孔距离。煤层瓦斯初始压力由 0.8 MPa 提升至 1.4 MPa,封孔距离从 12 m 升至 28 m。由于受气体压力梯度影响,煤层初始瓦斯越高,受影响范围越广,因此在该范围内钻孔封孔长度与煤层初始瓦斯压力成正比关系。

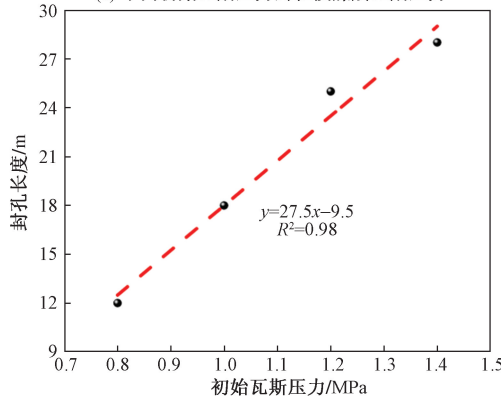
2.4.2 煤层渗透率对封孔长度影响

为研究不同煤层渗透率对封孔距离影响,煤层初始瓦斯压力设为 0.8 MPa,封孔压力设定为 1.5 MPa,其余边界条件不变,不同煤层初始压力封孔段瓦斯压力如图 6 所示。

根据图 6 可知,煤层渗透率对钻孔封孔长度具有明显影响。渗透率由 $1.2899 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 提升至 $3.2899 \times 10^{-17} \text{ m}^2$,钻孔封孔距离由 12 m 提升至 22 m,两者呈正相关。瓦斯在煤体中流动,压力梯度提供动能,气体在运移中分子间以摩擦、碰撞等



(a) 不同初始瓦斯压力封孔段煤层瓦斯压力



(b) 初始瓦斯压力-封孔距离拟合曲线

图5 煤层初始瓦斯压力对封孔长度影响
Fig. 5 Influence of initial gas pressure in coal seams on the length of sealing holes

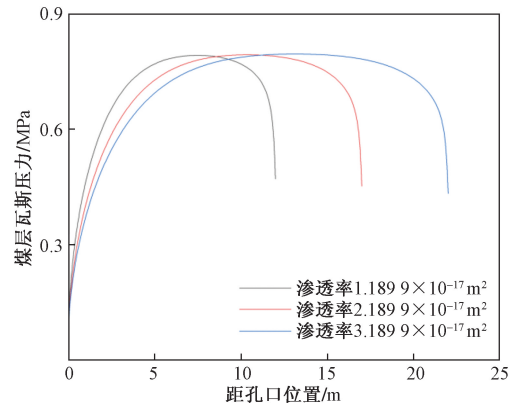
形式损耗能量,通过渗透率间接反映气体运移难易程度,渗透率越大,气体受到的阻力越小,在形同压力梯度下影响范围越大,需要的封孔距离越长。

3 现场试验

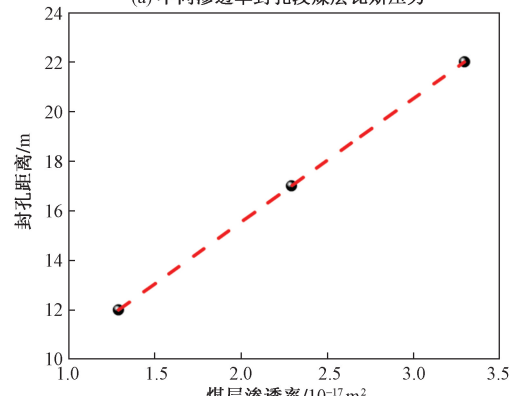
3.1 试验矿井概况

林华煤矿位于贵州省金沙县西部, M9 煤层位于龙潭组的中部, 上段的底部, 层位稳定。井田内厚度最大的中厚煤层, 区内主要可采煤层, 其硫分低, 为优质无烟煤。9 号煤层平均厚度为 2.98 m, 绝对瓦斯涌出量为 74.63 m³/min, 相对瓦斯涌出量为 42.99 m³/t, 采面最大瓦斯涌出量 3.89 m³/min 掘进面最大瓦斯涌出量 3.76 m³/min。在 20915 运输巷中部设计钻孔, 钻孔布置图如图 7 所示。

在搅拌筒内搅拌水泥浆, 其中速凝剂、水泥、水的比例为 0.2:1:1。注浆过程中应坚持“小流量, 长时间”的原则, 使孔内压力逐渐上升, 以便水泥浆能够更多的渗入煤壁, 保证封孔的气密性, 钻孔垂直煤壁, 封孔距离分别采用 10、20 和 30 m, 具体施工参数如表 2 所示。



(a) 不同渗透率封孔段煤层瓦斯压力



(b) 渗透率-封孔距离拟合曲线

图6 不同渗透率瓦斯封孔距离
Fig. 6 Gas sealing distance with different permeability

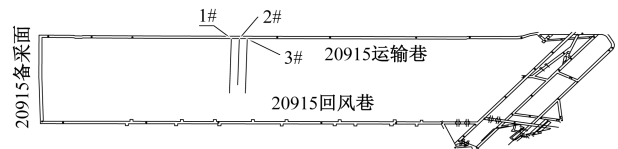


图7 钻孔布置图

Fig. 7 Drilling layout diagram

表2 钻孔参数

Table 2 Drilling parameters

钻孔编号	钻孔孔径/mm	方位/(°)	倾角/(°)	钻孔长度/m	封孔长度/m
1#	94	205	12	106	30
2#	94	205	12	90	20
3#	94	205	12	106	10

3.2 不同封孔长度抽采效果

分别对不同封孔长度抽采钻孔经行 136 d 瓦斯浓度监测, 瓦斯浓度变化曲线如图 8 所示。分析曲线可知, 在抽采初期瓦斯抽采浓度均达到 70% 以上, 随着时间推移, 封孔长度 10 m 钻孔在 40 d 后浓度出现大幅度降低, 浓度由 55% 急降至 16%, 随后变化幅度降低幅度减小并趋于平稳。封孔 20 m 和 30 m 钻孔在 130 d 后保持在 30% 和 70%。

通过工程试验可知,钻孔封孔距离对瓦斯抽采具有重要影响,由于封孔长度不足,将产生漏气现象,抽采初期可能由于封孔段瓦斯运移通道还未形成,在浓度曲线表现不明显,当通道形成后,空气进入钻孔,使得抽采管瓦斯浓度降低,影响抽采效果。

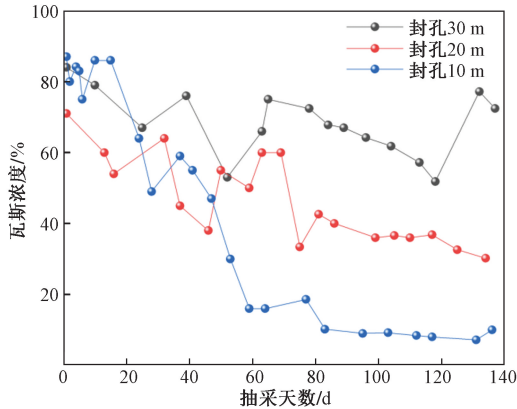


图8 瓦斯浓度随时间变化曲线

Fig. 8 Gas concentration curve over time

4 结论

基于瓦斯-空气双气体模型,采用 COMSOL 建立三维钻孔抽采模型,对封孔段煤层瓦斯压力进行监测分析,通过林华煤矿 20915 运输巷现场试验,考察不同封孔长度瓦斯抽采效果,得到以下结论。

(1) 受到负压衰减影响,钻孔内部抽采负压呈指数函数分布,钻孔底部负压最大,距孔底越远负压衰减越强,但衰减幅度减缓。

(2) 通过数值模拟分析了煤层参数对封孔距离的影响,随着煤层初始瓦斯压力和煤层渗透率增加,钻孔所需封孔长度越长,在抽采应用中可以通过增长封孔长度或降低巷道周围煤的渗透性,以提高抽采质量。

(3) 根据现场试验,封孔距离为 10 m 瓦斯抽采浓度在 40 d 后急剧下降,并维持在约 10%;而封孔长度为 30 m 钻孔最终维持较高的瓦斯浓度。

参 考 文 献

[1] 李杰. 瓦斯抽采钻孔合理封孔参数优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12458-12464.
Li Jie. Optimization of reasonable sealing parameters of gas drainage boreholes[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(29): 12458-12464.

[2] 张天军, 武晋宇, 庞明坤, 等. 抽采钻孔孔周煤体渗流阻力分布特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 645-654.
Zhang Tianjun, Wu Jinyu, Pang Mingkun, et al. Distribution of coal seepage resistance around extraction boreholes: an experimental study[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3):

645-654.

[3] 薛彦平. 瓦斯抽采钻孔布置方案参数优化: 以保德煤矿为例[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(8): 3164-3170.
Xue Yanping. Parameter optimization of gas extraction drilling layout plan: taking Baode Coal Mine as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(8): 3164-3170.

[4] Xia T Q, Zhou F B, Liu J S, et al. Evaluation of the pre-drained coal seam gas quality[J]. Fuel, 2014, 130: 296-305.

[5] 陈新, 马桂霞, 王东旭, 等. 长钻孔负压沿孔长衰减规律及瓦斯抽采效果影响机制研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(9): 177-181.
Chen Xin, Ma Guixia, Wang Dongxu, et al. Study on attenuation law of negative pressure along length of long borehole and influence mechanism of gas drainage effect[J]. Coal Technology, 2023, 42(9): 177-181.

[6] Danesh N N, Chen Z, Aminossadati S M, et al. Impact of creep on the evolution of coal permeability and gas drainage performance[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 469-482.

[7] 金鑫. 煤矿超长定向钻孔双侧瓦斯抽采效果研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 118-121.
Jin Xin. Study on gas drainage effect of double-side of super-long directional drilling borehole in colliery[J]. Coal Technology, 2023, 42(4): 118-121.

[8] 张学博, 王豪, 杨明, 等. 抽采钻孔失稳坍塌对瓦斯抽采的影响机制研究及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3102-3115.
Zhang Xuebo, Wang Hao, Yang Ming, et al. Study and application on influence mechanism of instability and collapse of drainage borehole on gas drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3102-3115.

[9] 郑伟, 张仁松, 张际涛. 巷道“三带”分布与瓦斯抽采钻孔封孔深度计算[J]. 煤炭技术, 2021, 40(7): 122-125.
Zheng Wei, Zhang Rensong, Zhang Jitao. Distribution of “three zones” in tunnels and calculation of sealing depth of gas extraction boreholes[J]. Coal Technology, 2021, 40(7): 122-125.

[10] 牛心刚, 国林东. 顺层瓦斯抽采钻孔合理封孔深度及注浆参数研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 48-54.
Niu Xingang, Guo Lindong. Research on reasonable sealing depth and grouting parameters of bedding gas extraction drilling[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2021, 48(4): 48-54.

[11] 吴泽平, 刘军, 张露伟, 等. 定向长钻孔孔内压力分布规律及影响机制研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(11): 1-8.
Wu Zeping, Liu Jun, Zhang Luwei, et al. Research on pressure distribution law and influence mechanism in long directional borehole[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(11): 1-8.

[12] 薛彦平. 超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究及应用[J]. 煤炭技术, 2021, 40(8): 123-126.
Xue Yanping. Research and application of gas extraction technology in goaf with ultra large diameter boreholes[J]. Coal Technology, 2021, 40(8): 123-126.

[13] 张飞燕, 韩颖, 吕帅, 等. 基于残余瓦斯含量的顺层钻孔抽采有效半径阶式测定法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(6): 10-16.
Zhang Feiyan, Han Ying, Lü Shuai, et al. A stepped method for determining the effective radius of sequential drilling and extraction based on residual gas content[J]. Journal of Henan Polytechnic

- University(Natural Science), 2021, 40(6): 10-16.
- [14] 马赞, 陈冬冬, 解恒星, 等. 负角度定向长钻孔瓦斯抽采完孔工艺研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 62-68.
Ma Zan, Chen Dongdong, Jie Hengxing, et al. Research on gas extraction completion technology of negative angle directional long boreholes [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 62-68.
- [15] 郭鑫, 薛生. 超厚煤层定向钻孔瓦斯抽采负压优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(2): 144-148.
Guo Xin, Xue Sheng. Optimization of negative pressure for directional drilling gas extraction in ultra thick coal seams[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(2): 144-148.
- [16] 周军平, 鲜学福, 姜永东, 等. 基于热力学方法的煤岩吸附变形模型[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 468-472.
Zhou Junping, Xian Xuefu, Jiang Yongdong, et al. A model of adsorption induced coal deformation based on thermodynamics approach[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 468-472.
- [17] Liu T, Lin B, Yang W. Impact of matrix-fracture interactions on coal permeability: model development and analysis [J]. Fuel, 2017, 207: 522-532.
- [18] Yue G, Wang Z, Xie C, et al. Time-dependent methane diffusion behavior in coal: measurement and modeling [J]. Transport in Porous Media, 2017, 116(1): 319-333.
- [19] Zhao W, Cheng Y P, Jiang H N, et al. Modeling and experiments for transient diffusion coefficients in the desorption of methane through coal powders[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017 110: 845-854.
- [20] Liu T, Lin B Q. Time-dependent dynamic diffusion processes in coal: model development and analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, 134: 1-9.
- [21] 刘军. 预抽钻孔负压沿孔长变化特性及对瓦斯抽采效果影响研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
Liu Jun. Study on the variation characteristics of negative pressure along the length of pre drilled holes and its impact on gas extraction efficiency[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.