

突出煤层瓦斯抽采顺层钻孔设计效果分析

黄佑洪

贵州省煤矿设计研究院有限公司安全技术分院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年8月18日; 录用日期: 2024年9月12日; 发布日期: 2024年9月23日

摘要

针对突出煤层工作面预抽钻孔预抽浓度低、钻孔衰减系数大、瓦斯预抽时间长等难题, 以某煤矿111805工作面为研究对象。通过对该工作面地质条件、瓦斯赋存状态及开采工艺的综合分析, 对111805工作面钻孔布孔方式以及管径最优参数进行研究, 并利用数值模拟软件进行辅证。结果表明: 顺层钻孔抽采瓦斯在30 d后有效抽采半径为2.33 m, 50 d后有效抽采半径为3 m。对模拟数据进行回归分析, 得到的抽采有效半径 r 与抽采时间 t 的线性拟合关系, 通过结合实际分析, 确定抽采钻孔方式为顺层钻孔设计, 布置间距约为4 m, 瓦斯抽采管径为 $\Phi 200$ mm抽采管连网抽采。以此为依据, 得出工作面瓦斯抽采钻孔最佳布置参数。研究成果为突出煤层工作面预抽钻孔设计提供了参考依据。

关键词

突出煤层, 瓦斯抽采, 钻孔设计, 数值模拟

Analysis of the Design Effect of Drilling along the Bed of Outburst Coal Seam Gas Extraction

Youhong Huang

Safety Technology Branch of Guizhou Coal Mine Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: Aug. 18th, 2024; accepted: Sep. 12th, 2024; published: Sep. 23rd, 2024

Abstract

In response to the challenges of low pre-drilling pre-extraction concentration, large drilling decay coefficient, and long gas pre-extraction time in the working face of outburst-prone coal seams, a study was conducted with the 111805 working face of a coal mine as the research object. Through a comprehensive analysis of the geological conditions, gas occurrence state, and mining technology of

the working face, the optimal parameters of drilling layout and pipe diameter for the 111805 working face were studied, and numerical simulation software was used for auxiliary verification. The results showed that the effective extraction radius of the gas extraction from the in-seam drilling was 2.33 meters after 30 days and 3 meters after 50 days. Through regression analysis of the simulation data, a linear fitting relationship between the effective extraction radius r and the extraction time t was obtained. By combining with practical analysis, the drilling method was determined to be in-seam drilling design, with a layout spacing of approximately 4 meters and a gas extraction pipe diameter of 200 mm connected in a network for extraction. Based on this, the optimal layout parameters for gas extraction drilling in the working face were derived. The research results provide a reference for the design of pre-drilling in outburst-prone coal seam working faces.

Keywords

Outburst-Prone Coal Seam, Gas Drainage, Borehole Design, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

瓦斯突出与爆炸是煤矿中最为严峻的灾害威胁之一，极有可能导致井下作业区域发生大规模的人员伤亡，对作业人员的生命安全构成极大危害。瓦斯抽采[1]-[3]对提高煤矿井下采掘效率、保障矿井生产安全有着至关重要的作用。部分专家学者[4]-[7]研究表明，对矿井煤层进行瓦斯预抽可以有效解决矿井巷道内瓦斯浓度超限问题，抽采钻孔参数的优化是提高瓦斯抽采效率的途径之一，有效管理和控制采掘工作面的煤与瓦斯突出危险，是确保煤矿作业安全的关键环节，能够显著降低或消除因瓦斯积聚而引发的灾害风险。值得注意的是，我国煤矿在瓦斯抽采过程中普遍面临的一个挑战是抽采浓度相对较低，这在一定程度上增加了瓦斯治理的难度和成本。据统计，一半以上的煤矿回采工作面瓦斯预抽采浓度低于30%，成为限制抽采瓦斯规模化利用的瓶颈[8]-[11]。随着矿井采掘技术和设备的不断进步，工作面生产效率持续提升，同时矿井的开采活动也逐渐向更深层次推进，这导致了瓦斯涌出量的逐渐增加。部分原本低瓦斯矿井也逐渐转变为高瓦斯矿井[12][13]。为了控制瓦斯浓度，保障生产安全，主要采用抽采钻孔技术预先抽取媒体内的瓦斯。然而，在施工过程中，媒体内部的孔隙、裂隙和地质结构等因素会导致瓦斯在不同方向上呈现出显著的运移差异[14]-[16]。同时，钻孔施工还可能引发媒体破碎、裂隙扩大，形成漏气通道，给封孔工作带来挑战，从而影响到瓦斯抽采的效率和浓度，延长了抽采达标的時間，并可能导致矿井在抽采、掘进和开采之间的衔接紧张[17][18]。选择合理的钻孔布置方案和抽采管径，以进一步提高瓦斯抽采效率，对于确保矿井的安全高效生产具有至关重要的意义[19]。

针对某煤矿回采工作面瓦斯涌出量偏高的问题，经过细致的现场实测与深入研究分析，决定在111805工作面实施顺层平行钻孔的煤层瓦斯抽采设计，采用计算机数值模拟软件。根据瓦斯压力变化情况得出瓦斯抽采钻孔的有效抽采半径[20]。通过精确计算，确定合理的预埋管径。以期能实现煤层瓦斯的高效抽采，确保工作面的安全生产，为煤矿的稳定运营提供坚实保障。

2. 工程概况

某煤矿位于盘州市城北东方向，方位角 56° 。18#煤位于宣威组中段上部，上距17#煤层间距11m，含0~1层夹矸，煤层平均厚2.96m，煤层坡度 $18^\circ\sim 20^\circ$ 之间。111805工作面位于某煤矿的西翼+1400m至

+1438 m 区段, 本工作面上部 18 #煤 11803 工作面、上覆 17 #煤层 111705 工作面已全部回采、15 #煤层 111503 工作面未开采。该工作面为 18 #煤层 111805 综采煤工作面。平均走向长 273 m, 工作面斜长为 116 m。工作面运输巷采用锚网索支护, 净宽 5 m, 净高 2.7 m。顺层抽采钻孔于 111805 工作面运输巷上帮施工。

根据《某煤矿+1408 m 水平 15、17、18 煤层瓦斯基础参数测定报告》, 18 #煤原始瓦斯含量 16.01 m³/t, 原始瓦斯压力 2.1 MPa, 抽采半径 2 m, 坚固性系数 0.21, 煤的破坏类型为 III 类, 透气性系数 0.09~0.30 m³/MPa²·d, 瓦斯放散初速度 12.5。视密度 1.36 t/m³, 吸附常数 a 值为 28.944 m³/g, 吸附常数 b 值 0.555 MPa。

3. 抽采瓦斯方法与工艺

3.1. 储量计算范围及煤炭储量

3.1.1. 储量计算范围

抽采钻孔设计控制范围: 111805 工作面平均走向长 273 m、倾向 116 m(工作面整个回采区域)。煤层储量:

$$G = L \times H \times m \times r \quad (1)$$

式中:

- G ——煤层储量, t;
 - L ——控制煤层走向长度, 273 m;
 - H ——控制煤层宽度, 11 m;
 - m ——平均煤层厚度, 取 2.96 m;
 - r ——煤的密度, 取 1.45 t/m³。
- 计算得煤层储量为 135,919 t。

3.1.2. 瓦斯储量及预抽量

1) 煤层原始瓦斯含量

$$Q_{\text{总}} = G \times W \times K \quad (2)$$

式中:

- $Q_{\text{总}}$ ——煤层瓦斯储量, m³;
 - G ——煤层资源储量, t;
 - W ——吨煤瓦斯含量, 取 4.6369 m³/t。(运输巷效果检验最大残余瓦斯含量);
 - K ——岩瓦斯涌出系数, 取 1.2(围岩瓦斯涌出系数为 1.05~1.2, 具体可根据邻近层瓦斯涌出量的大小确定)。
- 代值计算得煤层原始瓦斯含量为 756,291 m³。

2) 预抽瓦斯量

$$Q_{\text{抽}} = G \times (W - W_{\text{残}}) \quad (3)$$

式中:

- $Q_{\text{抽}}$ ——预抽瓦斯量, m³;
 - G ——煤层资源储量, t;
 - W ——吨煤瓦斯含量, 4.6369 m³/min。(运输巷效果检验最大残余瓦斯含量)
 - $W_{\text{残}}$ ——《防突细则》规定的残余瓦斯含量, 小于 8 m³/t; (111805 工作面为保护层开采, 取值 2 m³/t)
- 即 $Q_{\text{抽}} = 358405 \text{ m}^3$ 。

3) 预抽时间的确定

$$T = Q_{\text{抽}} \div Q_{\text{纯}} \div 1440 \quad (4)$$

式中:

T ——预抽时间, 天;

$Q_{\text{抽}}$ ——预抽量, m^3 ;

$Q_{\text{纯}}$ ——预计抽采纯流量, 参照邻近 111806 工作面抽采负压、浓度、流量等情况, (混合流量为 $22 \text{ m}^3/\text{min}$ 、平均抽采瓦斯浓度 33%) 抽采纯流量取 $7.26 \text{ m}^3/\text{min}$ 。预抽天数为 35 天。

3.2. 顺层抽采钻孔设计

根据 111805 采矿工作面巷道布置平面图, 从距 111805 运输巷绕道口 6 m 处施工上向顺层抽采钻孔, 钻孔编号 1 #~61 #, 钻孔控制 111805 工作面整个回采区域(平均走向长 273 m、倾向长 116 m); 1 #~46 # 钻孔按单排布置, 开孔间距为 4 m, 47 #~61 # 钻孔按三排五列布置, 开孔列间距为 0.3 m, 排间距 0.4 m, 最底钻孔距底板高度为 1.5 m, 终孔间距 4 m。18#煤有效抽采半径 2 m, 终孔间距 4 m。钻孔施工先采用 $\Phi 93 \text{ mm}$ 的钻头施工 15 m (用于封孔), 再使用 $\Phi 73 \text{ mm}$ 的钻头施工到设计深度。设计钻孔 61 个, 抽采钻孔进尺共计 5490 m。完成了工作面预抽钻孔的施工之后, 采用了“两堵一注, 带压封孔”的专业封孔技术来进行封孔作业。为确保封孔效果达到最佳, 使用屑量测定的方法, 确定了合理的封孔长度为 15 m。有效地保证了钻孔的封闭性和工作面的安全性

3.3. 抽采瓦斯管径选择

$$D = 0.1457(Q/V)^{1/2} \quad (5)$$

式中:

D ——抽采瓦斯管内径, m;

Q ——瓦斯管中混合瓦斯流量, 按 33% 抽采浓度、纯流量 $7.26 \text{ m}^3/\text{min}$ 计算, 取混合流量 $22 \text{ m}^3/\text{min}$;

V ——瓦斯管中混合气体平均流速, 取 12 m/s 。

代入式中得 D 等于 0.197 mm , 最终确定利用 $\Phi 200 \text{ mm}$ 抽采管连网抽采 111805 工作面煤层瓦斯, 满足要求。

4. 抽采效果分析

4.1. 理论耦合模型

物理模型同时满足以下假设:

- ① 煤层气储层是均质的且为各向同性;
- ② 在等温条件下忽略煤层瓦斯的黏度变化;
- ③ 煤岩只发生体线弹性变形。

4.1.1. 瓦斯在煤体中的扩散方程

本文将煤基块理想化为规则立方体, 其形状因子定义如下:

$$\sigma_c = \frac{3\pi^2}{L^2} \quad (6)$$

式中: σ_c ——煤基块形状因子, m^{-2} ; L ——裂缝之间间距, m。

假设煤基质的瓦斯扩散由浓度梯度驱动, 则气体交换速率可由下式表示:

$$Q_s = D\sigma_c \times (C_m - C_f) \quad [21] \quad (7)$$

式中： Q_s ——煤基块的气体交换速率， $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； C_m ——基块中的气体浓度， kg/m^3 ； C_f ——裂缝中的气体浓度， kg/m^3 ； D ——气体扩散系数， m^2/s 。

$$\frac{\partial m_m}{\partial t} = -\frac{Mc}{\tau RT} \times (C_m - C_f) \quad (8)$$

式中： Mm ——煤基块所含吸附气体及游离气体量[22]， kg/m^3 。

通过朗缪尔方程和理想气体定律计算可得：

$$m_m = \frac{V_L P_m}{P_m + P_L} \times \rho_c \times \rho_{gs} + \phi \times \frac{Mc}{RT} \times P_m \quad (9)$$

$$\rho_{gs} = \frac{Mc}{V_M} \quad (10)$$

式中： ρ_c ——煤密度， kg/m^3 ； ρ_{gs} ——标准条件下的气体密度， kg/m^3 ； P_L ——朗缪尔压力常数， Pa ； ϕ_m ——煤基质孔隙率，%； V_L ——煤的最大吸附能力， m^3/kg ； V_M ——标准条件下甲烷的摩尔体积， m^3/mol 。

联立方程(6)至式(10)，可得到瓦斯在煤体中的扩散方程：

$$\frac{\partial P_m}{\partial t} = \frac{\sigma D e^{-\beta t} (P_m - P_f) (P_m + P_L)^2}{V_L R T P_L \rho_c + \phi_m V_M (P_m + P_L)^2} \quad (11)$$

4.1.2. 瓦斯在煤裂隙中的渗流方程

游离瓦斯气体在煤层裂隙中的运移受到如下质量守恒方程控制：

$$\frac{\partial(\phi_f \rho_{gs})}{\partial t} = -\nabla(\rho_{gs} V) + Q_m (1 - \phi_f) \quad (12)$$

式中： ϕ_f ——煤裂隙孔隙度，%； V ——瓦斯渗流速度， m/s 。

煤裂隙中瓦斯的流动符合 Darcy 渗流定律：

$$V = -\frac{k}{\mu} \nabla P_f \quad (13)$$

式中： k ——渗透率， m^2 ； μ ——气体动力黏度系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

联立解得：

$$\phi_f \frac{\partial P_f}{\partial t} + P_f \frac{\partial \phi_f}{\partial t} = \nabla \left(\frac{k}{\mu} P_f \nabla P_f \right) + \sigma D e^{-\beta t} (1 - \phi_f) (P_m - P_f) \quad (14)$$

4.1.3. 煤体孔隙率及渗透率动态演化方程

考虑 Klinkenberg 效应并对初始孔隙率进行修正[23]得：

$$k = k_\infty \left(1 + \frac{b}{P_f} \left\{ 1 + \frac{1}{M \phi_{f0}} \left[\beta (P_f - P_{f0}) + \beta (P_m - P_{m0}) \right] + \frac{\varepsilon L}{\phi_{f0}} \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \left(\frac{P_f}{P_L + P_m} - \frac{P_{m0}}{P_L + P_{m0}} \right) \right\} \right) \quad (15)$$

式中： b ——Klinkenberg 系数， $b = 0.251 k_\infty^{0.3}$ [24]。

4.2. 数值模型构建

根据该煤矿的 18#煤层的地质条件，采用 FLUENT 数值模拟软件建立如图 1 所示的数值模型。该煤

层平均厚度为 2.96 m。设定模型中的煤层厚度为 2.96 m，长度为 60 m，在煤层中布置半径 200 mm 的钻孔，计算网格采用较细化，建立的数值模型如图 1 所示：

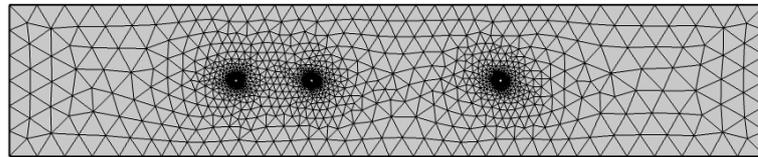


Figure 1. Numerical model of gas drainage borehole in coal seam
图 1. 煤层瓦斯抽采钻孔数值模型

4.3. 边界条件及参数确定

Table 1. Numerical model characteristic parameter table
表 1. 数值模型特性参数表

模型参数	参数值
温度/K	293.14
煤弹性模量/MPa	2713
煤骨架弹性模量/MPa	8139
泊松比	0.339
煤体密度 ρ_c /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.450×10^3
标准状态下甲烷密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.717
动力黏度 μ /($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.080×10^{-5}
垂直地应力 σ_v /MPa	17.027
吸附常数 a /($\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$)	28.944
吸附常数 b /(MPa^{-1})	0.555
煤体初始孔隙率/%	3.47
初始渗透率 k_{x0} /m ²	1.740×10^{-17}

数值模拟基础参数如表 1，构建煤层瓦斯抽采的数值模拟模型，底部为固定边界，模型顶部施加 10 MPa 的边界载荷模拟上覆岩层的重量以及可能存在的其他地质应力，钻孔内壁被设定为自由边界。煤裂隙初始瓦斯压力均设置为 2 MPa，且不考虑煤层周围物质的流动(即假设边界为零通量边界)，同时设定钻孔内壁为狄利克雷边界条件，模拟抽采负压 13 kPa。

4.4. 数值模拟结果

钻孔周围的瓦斯压力与抽采时间之间存在着明显的反相关关系。即随着抽采时间的不断延长，抽采作业在煤层中形成的低压区域持续扩大。。 $t = 1 \text{ d}$ 、 30 d 、 50 d 、 70 d 、 90 d 时的瓦斯压力分布情况如图 2 所示，对比不同抽采时长的煤层瓦斯压力分布情况可以发现在瓦斯抽采的初始阶段，压力衰减速率显著较快，这主要是由于煤层与外部环境之间存在着显著的压力梯度。随着抽采过程的进行， $t = 30 \text{ d}$ 后，这一速率逐渐减缓。此现象归因于，初期时煤层中的瓦斯在强大压力差驱动下，迅速通过钻孔释放至外部，导致煤层内部与外部环境的压力差逐渐缩小，直至最终趋于平衡状态。随着压力差的减小，瓦斯释放

的动力减弱, 进而表现为瓦斯压力衰减速率的明显下降。

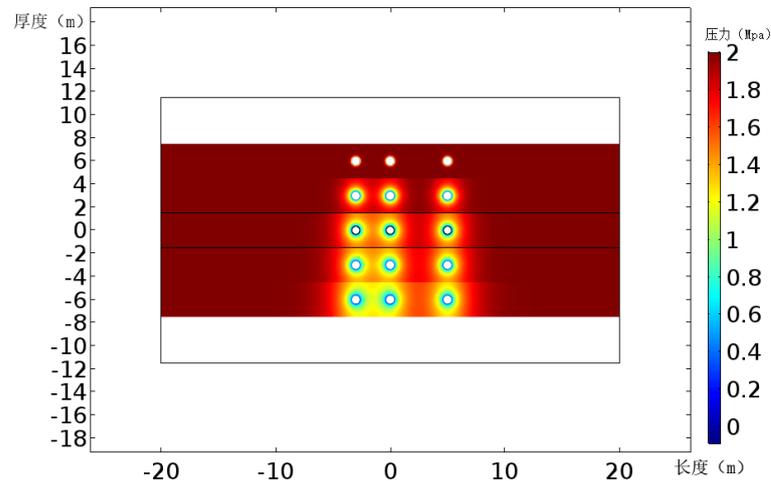


Figure 2. Cloud map of gas pressure variation in bedding borehole
图 2. 顺层钻孔瓦斯压力变化云图

在模型中设置监测点以监测距钻孔不同位置的瓦斯压力, 其监测数据如图 2 所示。图中几个监测点所得数据均呈下降趋势, 即瓦斯压力不断降低, 且离钻孔越远, 下降速率越慢, 下降幅度越小。

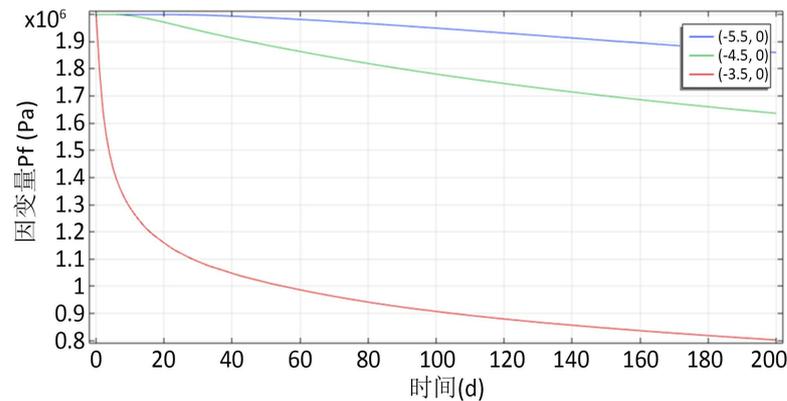


Figure 3. Monitoring data of gas pressure at different distances from the borehole
图 3. 距钻孔不同距离瓦斯压力监测数据

图 3 为不同抽采时间下煤层瓦斯抽采过程中压力沿煤层走向的分布规律, 距离抽采孔越近的区域, 瓦斯压力的下降幅度越为显著。这一现象体现了瓦斯在压力梯度作用下的迁移规律, 即高压区的瓦斯会向低压区(即抽采孔内)流动。随着抽采时间的不断延长, 抽采活动对煤层中瓦斯压力分布的影响范围也逐渐扩大, $t = 50 \text{ d}$ 时, 抽采的影响半径达到了 3 m 。

对生成的云图数据进行了深入的处理与分析, 从中提取出了关键信息——顺层定向钻孔的有效抽采半径变化规律。如图 4。

从图 5 中分析可以明确观察到, 随着抽采时间的延长, 顺层定向钻孔的抽采有效半径呈现出相应的增长趋势。具体而言, 当抽采时间达到 30 天时, 顺层定向钻孔的抽采有效半径为 2.33 m 。而当抽采时间延长至 50 天时, 顺层定向钻孔的抽采有效半径为 3 m 。对表中数据进行回归分析, 得到的抽采孔抽采有效半径 r 与抽采时间 t 的线性拟合关系如式(16), 相关系数 $R^2 = 0.9995$ 。

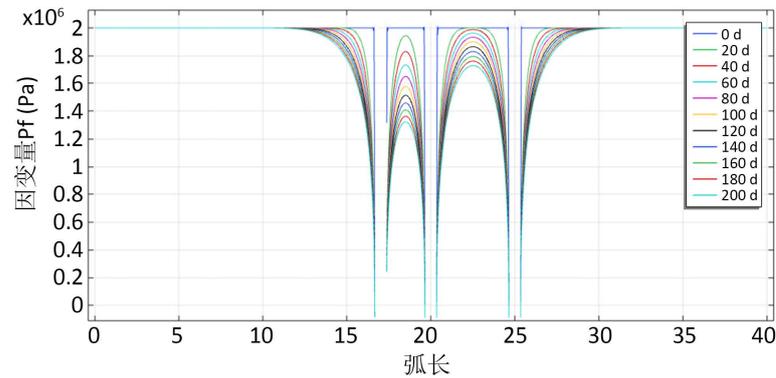


Figure 4. Variation of gas pressure along the strike of the coal seam at different extraction times

图 4. 不同抽采时间的瓦斯压力沿煤层走向变化情况

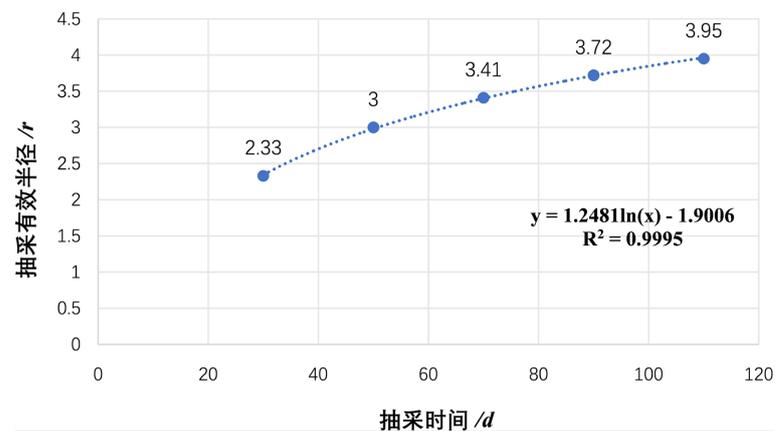


Figure 5. Variation of effective radius of gas drainage over time for bedding directional boreholes

图 5. 顺层定向钻孔抽采有效半径随时间变化规律

$$y = 1.2481 \ln(x) - 1.9006 \tag{16}$$

本设计预抽采时间为 35 d，代入公式(16)计算得理论抽采有效半径为 2.54 m，即在理想条件下，35 d 后钻孔能够有效抽取气体的最大半径。综合考虑该煤层的地质条件以及抽采效率、成本、施工难度等。实际钻孔间距设计为 4 m。

5. 结论

1) 针对 111805 工作面的实际情况，经过综合考量，采用顺层平行钻孔的方式来抽采本煤层的瓦斯。煤层顺层钻孔瓦斯抽采方法的有效实施，可以为 111805 工作面的安全生产构筑了坚实的防线，降低瓦斯积聚的风险，从而确保了采掘作业的安全进行。为该煤矿其他工作面乃至类似地质条件的矿井在瓦斯抽采工作上提供了极具价值的参考案例与宝贵经验。

2) 利用多物理场耦合仿真模拟软件模拟顺层抽采瓦斯有效半径，得出结果与本设计方案中的间距相吻合，验证了该设计方案的可行性。

基金项目

感谢国家自然科学基金资助项目(项目编号：50902110)。

参考文献

- [1] 张天军, 庞明坤, 蒋兴科, 等. 负压对抽采钻孔周煤体瓦斯渗流特性的影响[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2517-2524.
- [2] 王刚, 李文鑫, 杜文州, 等. 变轴压加载煤体变形破坏及瓦斯渗流试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 175-182.
- [3] 张波, 谢雄刚, 许石青. 某矿顺层钻孔瓦斯抽采及布孔参数数值模拟[J]. 工矿自动化, 2018, 44(11): 49-56.
- [4] 李飞, 薛彦平, 赵凯凯, 等. 煤层大直径钻孔瓦斯治理技术研究与应用[J]. 煤炭工程, 2021, 53(3): 84-88.
- [5] 宋晋云. 有效提高煤矿瓦斯抽采效果途径的分析与探讨[J]. 当代化工研究, 2022(7): 13-15.
- [6] 王一琦, 杨雷, 范超军. 高瓦斯厚煤层顺层钻孔有效抽采区及参数优化研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(10): 212-221.
- [7] 于丽雅, 张宗良. 高瓦斯厚煤层本煤层预抽钻孔布置优化研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(7): 78-83.
- [8] 周厚权, 申凯, 陈宾. 瓦斯抽采钻孔漏气类型划分与高效封孔技术应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(1): 33-36+42.
- [9] 刘延保. 瓦斯抽采钻孔封孔成套技术及应用研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(4): 32-35.
- [10] 黄致鹏, 魏国营. 全煤巷道顺层瓦斯抽采钻孔合理封孔深度研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(1): 101-104+100.
- [11] 张伟峰. 顺层瓦斯抽采钻孔封孔技术优化[J]. 煤, 2024, 33(7): 42-44+75.
- [12] 王晓蕾, 姬治岗, 谢怡婷, 等. 采煤工作面瓦斯涌出量预测技术现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 1-9.
- [13] 陈静, 崔啸, 王磊, 等. 不同埋深煤体孔隙结构特征及瓦斯吸附特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(3): 166-171.
- [14] 周洋, 赵宇, 张志强, 等. 隧道通风管道布置参数对瓦斯运移特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12718-12726.
- [15] 赵洋. 深部低透煤层孔内卸压强化瓦斯抽采过程中的多场耦合机制[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
- [16] 陈建强, 胡延伟, 刘昆轮, 等. 急倾斜特厚煤层水平分段开采瓦斯预抽技术[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(34): 14034-14038.
- [17] 岑培山, 田坤云, 魏二剑, 等. 多级加卸载下层理裂隙煤体瓦斯渗流轴向效应及应用[J]. 煤矿安全, 2021, 52(12): 9-14.
- [18] 王晓蕾. 低渗透煤层提高瓦斯采收率技术现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(17): 9-17.
- [19] 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.
- [20] 李波, 孙东辉, 张路路. 煤矿顺层钻孔瓦斯抽采合理布孔间距研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 121-126+155.
- [21] Mora, C.A. and Wattenbarger, R.A. (2009) Analysis and Verification of Dual Porosity and CBM Shape Factors. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **48**, 17-21. <https://doi.org/10.2118/09-02-17>
- [22] Liu, Q., Cheng, Y., Zhou, H., Guo, P., An, F. and Chen, H. (2014) A Mathematical Model of Coupled Gas Flow and Coal Deformation with Gas Diffusion and Klinkenberg Effects. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **48**, 1163-1180. <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0594-9>
- [23] Li, J., Chen, Z., Wu, K., Li, R., Xu, J., Liu, Q., et al. (2018) Effect of Water Saturation on Gas Slippage in Tight Rocks. *Fuel*, **225**, 519-532. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.186>
- [24] Hu, G., Wang, H., Fan, X., Yuan, Z. and Hong, S. (2008) Mathematical Model of Coalbed Gas Flow with Klinkenberg Effects in Multi-Physical Fields and Its Analytic Solution. *Transport in Porous Media*, **76**, 407-420. <https://doi.org/10.1007/s11242-008-9254-4>