

# 基于流固耦合模型瓦斯抽采钻孔 参数优化研究

Research on Parameter Optimization of Gas Drainage Borehole Based on  
Fluid-solid Coupling Model

刘 虎(贵州省黔西南州兴仁市应急管理局, 贵州 兴仁 562300)

**摘要:**确定合理的顺层钻孔参数是提高煤矿瓦斯抽采效率的重要手段。考虑了瓦斯抽采过程中煤体变形产生的基质收缩以及瓦斯压力变化,借助 COMSOL 模拟软件,以瓦斯压力小于 0.74 MPa 的抽采区域为有效抽采半径区域,分析了不同钻孔间距下双孔及三孔瓦斯抽采效果,并在 9306 巷道进行瓦斯抽采试验。结果表明:双孔布置下瓦斯抽采效果随钻孔间距增加呈现出两个阶段,钻孔间距小于 3 m,抽采时间较短时抽采效率高但后期下降较快,间距大于 3 m,抽采效果均低于钻孔间距  $d=3$  m 的抽采效果,三孔布置下钻孔间距  $d=3.5$  m 时抽采效果最佳。此外,制定了每个钻孔有效抽采区域面积量,通过比较得出了三孔布置且间距  $d=3.5$  m 时瓦斯抽采效果最好,在 9306 巷道进行了瓦斯抽采试验,试验结果与模拟值相差约 2.8%,证明该模型在试验矿井具有良好的适用性,可为钻孔的设计和优化提供一定的理论依据。

**关键词:**瓦斯抽采;流固耦合;数值模拟;钻孔间距

中图分类号:TD726

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2023)01-0054-05

**Abstract:** Determining reasonable bedding drilling parameters is an important means to improve the efficiency of coal mine gas drainage. In the process of gas extraction, the matrix shrinkage and gas pressure changes caused by the deformation of the coal body are considered, and the COMSOL numerical simulation software was used. Two-hole and three-hole gas drainage effects under different drilling spacings, and gas drainage experiments were carried out in the 9306 roadway. The gas extraction effect under double hole arrangement shows two stages with the increase of drill hole spacing. The drill hole spacing is less than 3 m, and the extraction time is short, and the extraction efficiency is high, but it decreases rapidly in the later stage. When the drill hole spacing is more than 3 m, the extraction effect is lower than that of the drill hole spacing  $d=3$  m, and the gas extraction effect under three-hole arrangement is the best when the drill hole spacing  $d=3.5$  m. In addition, the area of the effective drainage area of each borehole is formulated. Through comparison, it is concluded that the gas drainage effect is the best when the three-hole arrangement and the spacing  $d=3.5$  m. The gas extraction test was carried out in 9306 roadway, and the difference between the test result and the simulated value was about 2.8%. The model has good applicability in the test mine, and can provide a certain theoretical basis for the design and optimization of drilling hole.

**Key words:** gas drainage; fluid-structure coupling; numerical simulation; drilling spacing

## 1 前言

瓦斯灾害是威胁煤矿安全生产的重要因素之一<sup>[1-5]</sup>。为确保矿井的安全生产,采用顺层钻孔预抽采瓦斯技术可以有效地降低工作面及采空区瓦斯浓度。但煤岩体及瓦斯赋存条件复杂,钻孔抽采瓦

斯效率是受到多方面因素的影响,因此,现有理论还无法完全解释瓦斯流动的物理现象,导致钻孔参数设计带有一定的经验性,造成瓦斯抽采效率低下。

许多专家学者对钻孔参数优化展开了大量研究<sup>[6-10]</sup>。陈月霞等<sup>[11]</sup>模拟不同的钻孔间距下各抽采间距其有效抽采区域的面积,判断出最佳钻孔抽采间距。徐超等<sup>[12]</sup>对煤岩体进行受力分析,得出了多个影响因素与长钻孔负压衰减机制的关系。郭平等<sup>[13]</sup>结合了吸附膨胀效应和 Klinkenberg 效应,研

[作者简介] 刘虎(1989—),男,从事矿山安全检查工作。

[引用格式] 刘虎.基于流固耦合模型瓦斯抽采钻孔参数优化研究[J].中国矿山工程,2023,52(1):54-58.

究了含瓦斯煤体瓦斯渗透率与孔隙率的变化规律。张伟等<sup>[14]</sup>建立了煤层巷道预排瓦斯带流固耦合模型,研究含瓦斯煤体巷道损伤的时空演化规律。孙康<sup>[15]</sup>研究了煤层温度对瓦斯有效抽采半径的影响,并对钻孔抽采见间距进行了优化设计。周连春<sup>[16]</sup>建立了瓦斯流动方程和气固耦合模型,能有效预测瓦斯涌出量。彭守建等<sup>[17]</sup>运用自主研发的实验装置,对多因素影响下的多物理场耦合作用机制进行了研究分析。李胜等<sup>[18]</sup>分析了气-水两相流动过程,构建了煤岩体孔隙率及裂隙率的动态演化方程,研究了穿层钻孔瓦斯抽采效果。

综上,前人在多物理场耦合状态下瓦斯运移规律及钻孔参数优化方面开展了大量研究,其研究内容对钻孔参数优化具有重要意义,但对不同组合形式钻孔布置方案下钻孔间距的研究较少。本文基于流固耦合模型,分析不同组合形式下钻孔布置方案及钻孔负压对钻孔的有效抽采半径,从而得出抽采钻孔最佳布置参数。

## 2 流固耦合模型

### 2.1 模型假设

在模拟钻孔抽采瓦斯的过程中,建立的瓦斯流动模型应满足下列假设:

- (1) 煤岩体及瓦斯均为各向同性体。
- (2) 煤岩体的变形微小。
- (3) 煤岩体处于线弹性变形阶段。
- (4) 瓦斯在流动过程中温度恒定不变,且渗流规律符合达西定律。

### 2.2 煤岩体孔隙率演化模型

钻孔抽采瓦斯过程中,煤层中的瓦斯总量不变,但随着钻孔不断将瓦斯抽出,因此抽采过程中瓦斯浓度是不断变化的。

$$\rho_g = \frac{M_g p}{RT} \quad (1)$$

式中: $\rho_g$ ——瓦斯密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$M_g$ ——气体分子量,  $\text{kg}/\text{mol}$ ;

$R$ ——气体摩尔常数,  $\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$ ;

$T$ ——温度,  $\text{K}$ ;

$p$ ——瓦斯压力,  $\text{Pa}$ 。

结合吸附有效应力及基质收缩的基础上,建立了煤岩体孔隙率的动态演化模型

$$\phi = \phi_0 + \frac{2\alpha_f}{M}(p - p_0) + \left(\frac{1}{M} - \frac{2}{3K}\right) \frac{2\alpha_f c RT}{3V_m \phi_0} \ln \frac{1 + bp}{1 + bp_0} \quad (2)$$

渗透率与孔隙率之间存在三次方关系:

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^3 = \left[1 + \frac{2\alpha_f}{M\phi_0}(p - p_0) + \left(\frac{1}{M} - \frac{2}{3K}\right) \frac{2\alpha_f c RT}{3v_m \phi_0} \ln \frac{1 + bp}{1 + bp_0}\right]^3 \quad (3)$$

式中: $\phi$ 、 $\phi_0$ ——孔隙率及初始孔隙率;

$E$ ——煤体的弹性模量,  $\text{MPa}$ ;

$\nu$ ——煤体的泊松比;

$\alpha$ ——极限吸附量,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;

$\rho_c$ ——煤体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$v_m$ ——气体摩尔体积,取  $22.4 \text{ L}/\text{mol}$ ;

$b$ ——瓦斯吸附常数,  $\text{MPa}^{-1}$ 。

### 2.3 流固耦合模型

上述假设中煤岩体是完全弹性的,因此,在瓦斯流动过程中,煤岩体应变的表达式可以表示为

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \Delta \sigma_{ij} - \left(\frac{1}{6G} - \frac{1}{9K}\right) \Delta \sigma_{kk} \delta_{ij} + \frac{\alpha}{3K} \Delta p \delta_{ij} + \frac{\Delta \varepsilon_s}{3} \delta_{ij} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{ij}$ ——应变张量;

$\sigma_{ij}$ ——应力张量。

$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s}$  为 Boit 系数;  $\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_L p}{p_L + p}$ , 其中  $\varepsilon_L$  和  $p_L$  分别为瓦斯的 Langmuir 体积应变常数和压力常数。

含瓦斯煤岩体骨架变形的平衡微分方程为

$$s_i + F_i = 0 \quad (5)$$

含瓦斯煤岩体连续性变形的几何方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (6)$$

式中: $F_i$ ——体力;

$u_{i,j}$  和  $u_{j,i}$ ——位移分量,  $\text{m}$ 。

联立含瓦斯煤岩体骨架变形的平衡微分方程式(5)及连续性变形几何方程式(6)代入式(4)中得到瓦斯抽采过程中受煤岩体变形影响的流固耦合模型为

$$G u_{i,jj} + \frac{G}{1 - 2\nu} u_{j,ji} - \left[\alpha + \frac{K\varepsilon_L + p_L}{(p_L + p)^2}\right] p_{,i} + F_i = 0 \quad (7)$$

### 3 数值模拟计算及结果分析

#### 3.1 模拟模型建立

为模拟钻孔抽采瓦斯动态变化过程,借助了COMSOL Multiphysics 建立钻孔抽采模型,前文中假设煤体及瓦斯均处于理想状态,因次可以建立二维模型方便计算。所建立的二维模型网格划分如图1所示,模型 30 m × 10 m,模型的各个边界均设置了边界条件。煤岩体初始瓦斯压力为 1 MPa,设置钻孔抽采负压为 20 kPa。

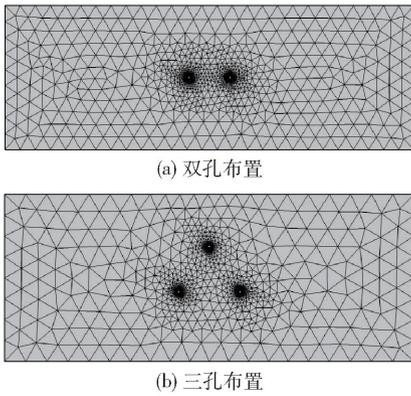


图1 不同布置方案的网格模型划分

#### 3.2 确定瓦斯有效抽采半径

《煤与瓦斯突出危险性区域预测方法》中提到,煤体中残余的瓦斯压力小于 0.74 MPa 或瓦斯残余含量小于 8 m<sup>3</sup>/t 的区域可以预测无突出危险区域,本文以 0.74 MPa 的残余瓦斯压力等值线区域为有效抽采半径。

#### 3.3 不同间距双孔瓦斯抽采模拟

双孔布置模拟不同两个钻孔不同间距模型瓦斯压力及有效抽采范围变化,为模拟钻孔间距对瓦斯抽采效果的影响,在两个钻孔连线中点布置一个测点,分析钻孔间距  $d = 2\text{ m}$ 、 $d = 2.5\text{ m}$ 、 $d = 3\text{ m}$ 、 $d = 3.5\text{ m}$ 、 $d = 4\text{ m}$  及  $d = 4.5\text{ m}$  时下测点的数据变化,测点压力变化如图2所示。

由图中可以看出,测点压力呈现下降趋势,原因是初始瓦斯压力远大于钻孔内负压,瓦斯流速大,前 30 d 压力下降速度最快,对比每增加 0.5 m 的钻孔间距所测得的测点压力变化,测点压力下降速度下降速度都呈现减缓趋势,变化速度趋于稳定。抽采时间大于 30 d,瓦斯压力与抽采负压之间形成的压力差随着抽采时间增加而减小,测点压力变化趋势逐渐稳定。此外,钻孔的失稳破坏导致的钻孔孔周

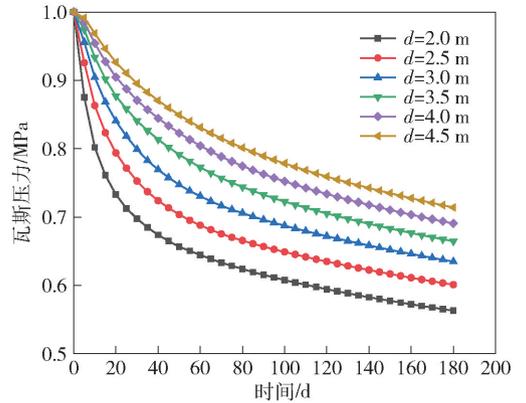
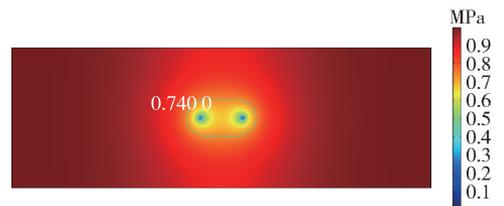
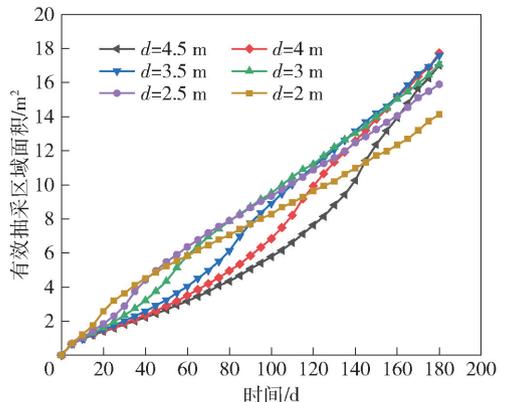


图2 不同间距下测点瓦斯压力值

裂隙增加,瓦斯抽采效率急剧降低,导致残余瓦斯压力较高,含瓦斯煤体需要较长时间的抽采才能达到瓦斯抽采标准。钻孔间距  $d = 3\text{ m}$  时其抽采 120 d 瓦斯压力如图3(a)所示,有效抽采范围变化如图3(b)所示。抽采时间前 60 d,钻孔间距小于 3 m,有效抽采区域面积迅速上升;钻孔间距大于 3 m 时,其有效抽采面积明显小于前者,间距越大,有效抽采面积越小。抽采时间大于 60 d,各间距下曲线均呈上升趋势,且钻孔间距大于 3 m 的曲线斜率略高于小于 3 m 的斜率。抽采时间 180 d,钻孔间距为 2.5 m 与 3 m 时,有效抽采范围最大,最大为 17.73 m<sup>2</sup> 与 17.58 m<sup>2</sup>。双孔布置下瓦斯抽采效果随钻孔间距增加呈现出两个阶段,钻孔间距小于 3 m,抽采时间较



(a) 抽采 120 d 有效抽采范围



(b) 有效抽采面积变化图

图3 瓦斯压力及有效抽采范围变化图

短时抽采效率高但后期下降较快,间距大于 3 m,抽采效果均低于钻孔间距  $d = 3\text{ m}$  的抽采效果。

综合分析认为瓦斯抽采双孔布置钻孔间距最佳为 3 m。60 d、120 d、180 d 瓦斯抽采效果如图 4 所示。

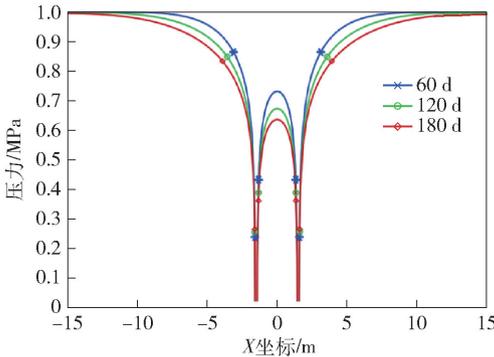


图 4  $d = 3\text{ m}$  抽采 60 d、120 d、180 d 瓦斯压力图

### 3.4 不同间距三孔瓦斯抽采模拟

三孔布置为三个钻孔布置在等边三角形的三个顶点,三角形边长为钻孔间距,选取三角形中点作为测点,模拟钻孔间距  $d = 3\text{ m}$ ,  $d = 3.5\text{ m}$ ,  $d = 4\text{ m}$ ,  $d = 4.5\text{ m}$ ,  $d = 5\text{ m}$  及  $d = 5.5\text{ m}$  时瓦斯压力有效抽采范围,各间距测点压力变化如图 5 所示。较双孔布置,测点所测的压力值与其测值变化趋势相似,但相同间距下,三孔布置所测得的压力值小于双孔所测值,各间距测点压力变化均处于下降状态,变化曲线整体较平缓。抽采时间 0 ~ 45 d,测点瓦斯压力变化稍大,钻孔间距  $d = 3\text{ m}$  时压力变化最小,  $d = 5.5\text{ m}$  时变化最大。抽采时间大于 45 d 后,瓦斯压力变化速度逐渐降低,钻孔间距越大,其变化速度降低越快。

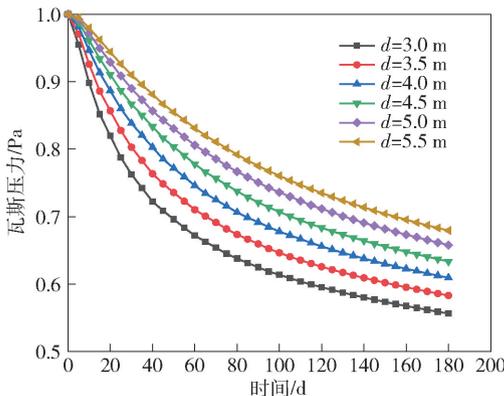
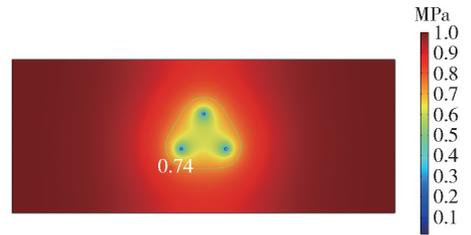


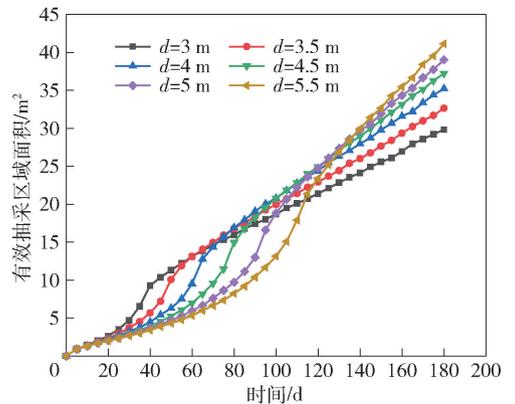
图 5 不同间距下测点瓦斯压力值

各间距有效抽采区域面积变化如图 6(b) 所示,各间距有效抽采区域面积变化趋势均呈现出抽采前

期曲线斜率迅速增大而抽采后期降低的特点,不同的是钻孔间距越大,斜率变化得越慢。抽采时间 40 ~ 50 d,钻孔间距  $d = 3\text{ m}$  及  $d = 3.5\text{ m}$  时,有效抽采区域面积随着钻孔间距增加几乎成线性增加;钻孔间距大于 3.5 m,有效抽采面积明显大幅低于前者。抽采时间 50 d 之后,钻孔间距越大,曲线斜率越大,但由抽采前期的较慢速增长到出现大幅增大的拐点也越大,因此钻孔间距越大,越难在抽采前期达到良好的抽采效果。三孔布置下钻孔间距  $d = 3.5\text{ m}$  时抽采效果最佳,钻孔间距为 3.5 m 时,抽采 120 d 瓦斯压力图及有效抽采范围如图 6(a) 所示,60 d、120 d、180 d 的瓦斯抽采效果如图 7 所示。



(a) 抽采 120 d 有效抽采范围



(b) 有效抽采面积变化

图 6 瓦斯压力及有效抽采范围变化

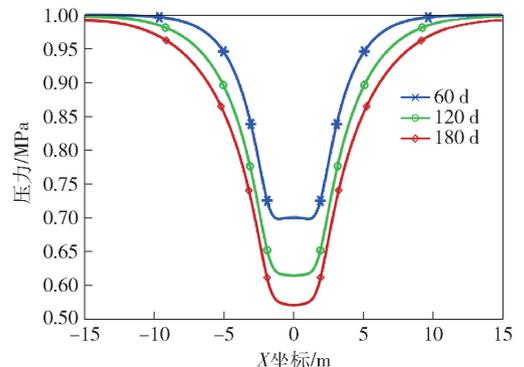


图 7  $d = 3.5\text{ m}$  抽采 60 d、120 d、180 d 瓦斯压力图

### 3.5 方案比较优化

为更好地选择钻孔设计方案,提出了平均每个钻孔瓦斯有效抽采面积量。上述分析表明双孔及三孔布置下钻孔间距为3 m与3.5 m瓦斯抽采效果最佳,通过比较60 d、120 d及180 d时每个钻孔瓦斯有效抽采面积量来选择最佳钻孔设计方案。每个钻孔瓦斯有效抽采面积量为

$$W = \frac{S}{h} \quad (8)$$

式中:  $W$ ——每个钻孔瓦斯有效抽采面积量,  $\text{m}^2$ ;

$S$ ——有效抽采面积,  $\text{m}^2$ ;

$h$ ——钻孔数量。

双孔布置与三孔布置60 d、120 d及180 d时每个钻孔瓦斯有效抽采面积量见表1。

表1 各时间段钻孔瓦斯有效抽采面积量

时间/d	$d=3\text{ m}$ 双孔布置/ $\text{m}^2$	$d=3.5\text{ m}$ 三孔布置/ $\text{m}^2$
60	2.926	4.375
120	5.602	7.813
180	8.539	10.879

由表中数据可知,在任何一个时间节点,三孔布置每个钻孔瓦斯有效抽采面积量几乎均为双孔布置的1.5倍,因此,选择布置钻孔间距 $d=3.5\text{ m}$ 的三个钻孔的抽采方案。

## 4 工程试验

### 4.1 工程概况

试验矿井开采9#煤层,9#煤层为近水平煤层,埋深为-302 m,煤层平均厚度1.5 m,厚度稳定,采高1.5 m,瓦斯含量最大为 $9.2\text{ m}^3/\text{t}$ ,煤层瓦斯压力约为1 MPa。9#煤层下距M10煤层12.44~12.94 m,上距8#煤层14 m~16.55 m,属于典型的多煤层条件。9#煤层顶板为无伪顶,直接顶的岩性为粉砂质泥岩,厚度5.96 m,基本顶为灰岩,厚度4.79 m,直接底为细砂岩,厚度4.56 m,基本底为粉砂岩,厚度8.62 m。

### 4.2 工程试验

结合矿井在9306巷道设置瓦斯抽采试验,钻孔布置参数为三个钻孔抽采且钻孔间距 $d=3.5\text{ m}$ 的抽采方案,瓦斯观测孔位于三角形中心位置。钻孔布置如图8所示,抽采180 d钻孔瓦斯压力变化如

图9所示。数值模拟瓦斯压力变化趋势与试验钻孔测量瓦斯抽采前60 d瓦斯压力迅速下降,120天之后变化逐渐平缓,模拟值与测试值变化趋势大致相同。抽采瓦斯30 d、60 d、90 d与120 d时,模拟瓦斯压力约下降了14.3%、22.9%、28.3%与32.1%,试验钻孔瓦斯压力约下降了16.9%、25.8%、31%与35.1%,模拟与试验压力变化相差2.7%、2.9%、2.7%与3%。综上,模拟瓦斯压力变化与试验瓦斯压力变化值平均相差约2.825%,说明该模型在试验矿井中具有较强的适用性,也验证了本文钻孔参数设计的合理性。

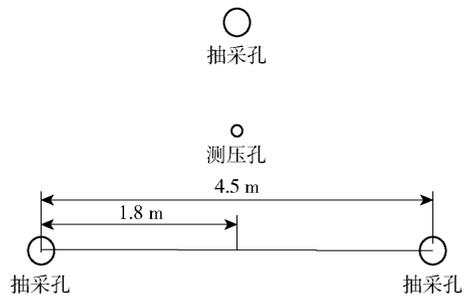


图8 试验钻孔布置

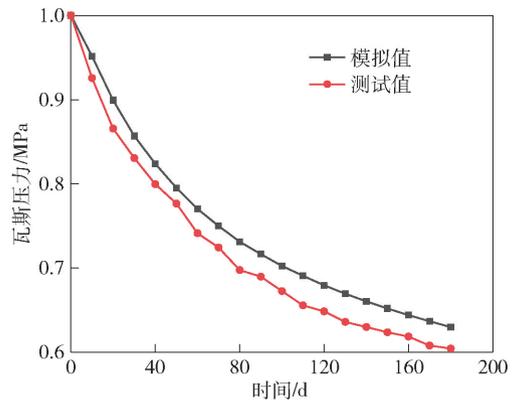


图9 瓦斯压力变化比较

## 5 结论

(1)根据流固耦合模型设计了钻孔瓦斯抽采方案,确定以小于0.74 MPa为有效抽采区域,分析了双孔及三孔布置下各间距瓦斯压力及有效抽采面积变化。得出钻孔间距小于3 m,抽采时间较短时抽采效率高但后期下降较快,间距大于3 m,抽采效果均低于钻孔间距 $d=3\text{ m}$ 的抽采效果,三孔布置下钻孔间距 $d=3.5\text{ m}$ 时抽采效果最佳。

(2)制定了每个钻孔有效抽采面积量,选择了双孔与三孔最佳布置间距进行比较,发现三孔布置

最佳间距下的瓦斯抽采效果在 60 d 前瓦斯抽采效果较好,但是随着抽采时间的增加,三孔布置的瓦斯抽采效果却更好,在第 120 d 和 180 d 的抽采效果是双孔布置的 1.5 倍左右,得出了三孔布置且间距  $d = 3.5$  m 时瓦斯抽采效果最好。

(3)在 9306 巷道进行的钻孔瓦斯抽采试验,钻孔布置参数为三孔成三角形布置,钻孔间距为 3.5 m。试验结果与模拟值相差约 2.8%,说明该模型在试验矿井具有较强的适用性,可为钻孔的设计和优化提供了一定的理论依据。

### [参考文献]

- [1] 程远平,付建华,俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(2):127-139.
- [2] 林海飞,季鹏飞,孔祥国,等. 顺层钻孔预抽煤层瓦斯精准布孔模式及工程实践[J]. 煤炭学报,2022,47(3):1220-1234.
- [3] 程志恒. 底抽巷穿层钻孔封孔深度与布孔间距优化研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(2):76-82.
- [4] 刘佳佳,贾改妮,王丹,等. 基于多物理场耦合的顺层钻孔瓦斯抽采参数优化研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(7):115-119,156.
- [5] 鲁义,申宏敏,秦波涛,等. 顺层钻孔瓦斯抽采半径及布孔间距研究[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(1):156-162.
- [6] 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.
- [7] 王登科,彭明,付启超,等. 瓦斯抽采过程中的煤层透气性动态演化规律与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(4):704-712.
- [8] 许克南,王佰顺,刘青宏. 基于动态流固耦合模型的瓦斯抽采半径及孔间距研究[J]. 煤炭科学技术,2018,46(5):102-108.
- [9] 张鹏冲. 含水煤层热流固耦合模型建立及数值模拟研究[J]. 能源与环保,2021,43(5):29-33.
- [10] 李胜,张浩浩,范超军,等. 考虑基质瓦斯渗流的煤层流固耦合模型[J]. 中国安全科学学报,2018,28(3):114-119.
- [11] 陈月霞,褚廷湘,陈鹏,等. 瓦斯抽采钻孔间距优化三维数值模拟量化研究[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(3):78-84+94.
- [12] 徐超,王建文,杜昌昂,等. 瓦斯抽采长钻孔负压沿孔长衰减机制及影响因素模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报,2021,38(2):419-428.
- [13] 郭平,曹树刚,张遵国,等. 含瓦斯煤体固气耦合数学模型及数值模拟[J]. 煤炭学报,2012,37(S2):330-335.
- [14] 张伟,许开立,雷云. 煤层巷道预排瓦斯带的流固耦合效应数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(11):1628-1632+1642.
- [15] 孙康. 基于 THM 多场耦合的钻孔瓦斯抽采有效半径及钻孔优化数值模拟研究[D]. 重庆:重庆大学,2020.
- [16] 周连春. 高瓦斯矿井超长采煤工作面瓦斯抽采理论及应用研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2021.
- [17] 彭守建,贾立,许江,等. 煤层瓦斯抽采多物理场参数动态响应特征及其耦合规律[J]. 煤炭学报,2022,47(3):1235-1243.
- [18] 李胜,毕慧杰,范超军,等. 基于流固耦合模型的穿层钻孔瓦斯抽采模拟研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(5):121-127.