

基于正交设计的瓦斯抽采有效半径影响因素分析

Analysis of Factors Affecting Effective Radius of Gas Extraction Based on Orthogonal Design

张卫东 (山西潞安环保能源开发股份有限公司五阳煤矿, 山西 长治 046200)

摘要:为研究初始瓦斯压力、煤层孔隙率、钻孔直径、抽采负压及初始渗透率五个因素对钻孔瓦斯有效抽采半径的影响,利用 COMSOL 数值模拟,结合正交试验及极差分析探究各因素影响情况,并运用 SPSS 软件线性回归分析获得方程。研究结果表明:初始渗透率对瓦斯有效抽采半径影响最大;极差分析影响程度依次为初始渗透率、钻孔直径、抽采负压、孔隙率、初始瓦斯压力,其中有效抽采半径最大时因素水平最优组合为初始瓦斯压力为 1.2 MPa、孔隙率为 0.08、钻孔直径为 94 mm、抽采负压为 20 kPa 及初始渗透率为 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时;多元线性回归方程中决定系数 $R^2 = 90.6\%$,拟合程度良好。

关键词:瓦斯抽采;有效抽采半径;正交试验;极差分析;多元线性回归

中图分类号: TD823 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)06-0049-07

Abstract: In order to study the influence of five factors, namely, initial gas pressure, coal seam porosity, drilling diameter, negative pressure and initial permeability, on the effective radius of gas extraction under the drilling, numerical simulation was constructed by COMSOL, and orthogonal experiments and analysis of polarity were used to explore the influence of the factors, and the equations were obtained by using linear regression analysis of the SPSS software. The results show that the Initial permeability has the greatest influence on the effective radius of gas extraction; the degree of influence of the extreme variance analysis is, in order of magnitude, the initial permeability, drilling diameter, the negative extraction pressure, the porosity, the initial gas pressure; the optimal combination of factor levels with the largest effective extraction radius is when the initial gas pressure is 1.2 MPa, the porosity is 0.08, the drilling diameter is 94 mm, the negative extraction pressure is 20 kPa and the initial permeability is $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$; the coefficient of determination $R^2 = 90.6\%$ in the multiple linear regression equation is a good fit.

Key words: gas drainage; effective extraction radius; orthogonal experiment; extreme variance analysis; multiple linear regression

1 前言

煤炭在很长一段时间仍是我国主要能源^[1]。然而伴随着煤层开采深度逐步增加,煤层瓦斯含量和压力不断增加,煤炭开采条件进一步恶化^[2],势必带来更为严峻的瓦斯灾害问题。

针对瓦斯抽采效率问题,国内外学者开展了大量的讨论。张文豪等^[3]建立瓦斯流动流固耦合模型模拟分析,认为初始渗透率对抽采有效半径最敏感,钻孔直径次之。张飞等^[4]通过数值模拟,借助灰色关联数学模型,得出初始瓦斯压力影响最大、渗透率次之,抽采负压最弱的结论。韩韵等^[5]利用数

值模拟对布孔方案进行研究,发现变间距布孔的瓦斯抽采率比等间距布孔的抽采率更加高效。姜周民^[6]通过数值模拟软件确定了较优的钻孔布置方式。贾进章^[7]等简化了瓦斯涌出量预测建模过程。倪廉钦等^[8]提出了上隅角错距式双埋管瓦斯抽采技术,借助数值模拟和正交试验确定了错距式双埋管抽采空区瓦斯最有效位置。Zhang 等^[9]优化了有效抽采半径的钻孔布局。

由于瓦斯抽采影响因素众多,各因素重要程度仍较为模糊。基于此,拟将初始瓦斯压力、煤层孔隙率、钻孔直径、抽采负压及初始渗透率进行正交试验,借助 COMSOL 数值模拟,结合线性回归分析,来判断影响瓦斯抽采的主次关系,以期对钻孔瓦斯高效抽采提供参考。

2 现场概况

某矿综采工作面走向长 316 m,倾斜长度 136.5 m,煤层倾角 12° ,工程埋深 117 ~ 413 m,工作面标高 +1 436.2 ~ 1 375.8 m,煤层厚度 0.4 ~

[作者简介] 张卫东(1990—),男,辽宁沈阳人,工程师,主要从事矿井“一通三防”工作。

[基金项目] 中央高校基本科研业务费专项资金(2023ZKPYA004);安徽省爆破器材与技术工程实验室(AHBP 2022A-03)

[引用格式] 张卫东. 基于正交设计的瓦斯抽采有效半径影响因素分析[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(6): 49-55.

1.5 m,平均厚度 1.5 m,煤层为中厚煤层,采煤方式为走向长壁后退式,工作面采用全部垮落法控制顶板、支撑掩护式液压支架进行支护,煤层剖面情况如图 1 所示。

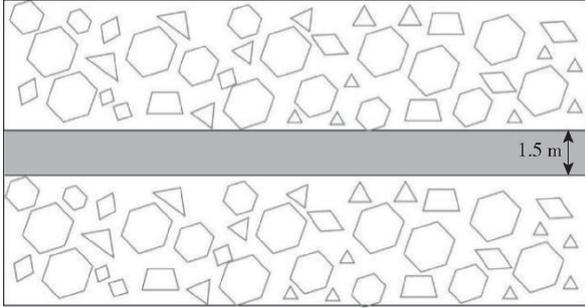


图 1 煤层概况

3 煤层瓦斯抽采模型

3.1 瓦斯流固耦合数学模型

为简化模拟,提出一些基本假设:煤体均匀、煤层符合小变形特性;煤层内瓦斯为理想气体,运移规律满足达西定律;煤层顶底板无瓦斯涌出;瓦斯吸附解吸规律遵循朗缪尔方程。

基于上述条件构建瓦斯抽采数值模型:根据煤体应力平衡方程、几何方程及本构方程获得含瓦斯煤体变形控制方程^[10]:

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu}u_{j,ji} - \beta_j p_{fj} - \beta_m p_{m,i} + F_i = 0 \quad (1)$$

式中, G 为煤体剪切模量,MPa; u 为煤体变形位移; ν 为煤的泊松比; β_j 煤体裂隙有效应力系数; p_f 为裂隙压力,MPa; p_m 为基质瓦斯压力,MPa; β_m 煤体裂隙有效应力系数; F_i 为体积力,MPa。

忽略重力对瓦斯运移的影响,结合瓦斯吸附解吸过程、达西定律,获得裂隙瓦斯渗流控制方程^[11]:

$$p_f \left[\frac{1}{M} \left(\beta_f \frac{\partial p_f}{\partial t} + \beta_m \frac{\partial p_m}{\partial t} \right) + \frac{\varepsilon_L P_L}{(P_L + P_m)^2} \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \frac{\partial p_m}{\partial t} \right] + \phi_f \frac{\partial p_f}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} p_f \nabla p_f \right) + \frac{1}{\tau} (1 - \phi_f) (p_m - p_f) \quad (2)$$

式中, ϕ_f 为煤体裂隙孔隙度,%; M 为轴向约束模量; ε_L 为极限吸附变形; P_L 为 Langmuir 压力常数,MPa; K 为煤体的体积模量,MPa; k 为煤体渗透率, m^2 ; μ 为瓦斯的动力黏度系数, $Pa \cdot s$; τ 为吸附时间。

基质瓦斯扩散控制方程^[12]:

$$\frac{\partial p_m}{\partial t} = - \frac{V_M (p_m - p_f) (P_L + p_m)^2}{\tau V_L RTP_L P_C + \tau \phi_m V_M (P_L + p_m)^2} \quad (3)$$

式中, V_M 为标准条件下甲烷的摩尔质量, m^3/mol ; V_L 为 Langmuir 体积常数, m^3/kg ; R 为理想气体含量; T

为煤体温度,K; ρ_c 为煤的视密度, kg/m^3 ; ϕ_m 为煤基质孔隙率。

3.2 数值模拟

为保证模拟结果可靠性,基于现场 1.5 m 煤厚,构建模型尺寸为 8 m × 1.5 m,具体参数见表 1,利用 COMSOL 模拟软件建立模型如图 2 所示。

表 1 模型初始数据

参数类别	参数值
煤体视密度/ $kg \cdot m^{-3}$	1 250
初始裂隙率	0.012
煤的泊松比	0.339
煤的弹性模量/MPa	2 713
煤基质弹性模量/MPa	8 139
甲烷的动力学黏度/ $Pa \cdot s$	1.08×10^{-5}
Klinkenberg 因子/Pa	7.58×10^5
Langmuir 压力常数/MPa	1
极限吸附体变形量	0.004

模型上覆岩层压力为 6 MPa,模型左右两侧边界均设置为辊支撑,底部为固定边界,煤层四周均为无流动边界条件,钻孔位于模型正中心,物理场控制网格,网格设置为超细化。瞬态求解器全耦合最大迭代次数为 10,模拟时间为 500 天,模拟时间步长为 1 天。

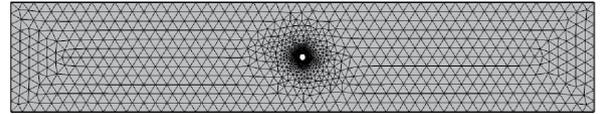


图 2 数值模拟计算几何模型

4 方案设计与分析

4.1 正交试验

正交试验是为探究多因素多水平的设计方法,可筛选典型方案开展试验,降低试验量,显著提高效率。结合文献[3]、文献[4]、文献[7]及该矿实际数据共同确定试验指标,试验选取五因素四水平的正交试验设计方案,试验指标为钻孔瓦斯有效抽采半径 - r (m)。其中五个因素为初始瓦斯压力 - A (MPa)、孔隙率 - B 、钻孔直径 - C (mm)、抽采负压 - D (kPa) 及初始渗透率 - E ($10^{-15} m^2$),上述因素各包含 4 个水平。根据相对瓦斯压力法明确瓦斯抽采有效半径范围,即以瓦斯压力下降 51% 为边界,开展有效抽采半径值的选取^[13]。正交试验设计方案见表 2,记作 $L_{16}(4^5)$ 正交表,共计 16 组模拟试验。表 2 中试验模拟结果中最小有效抽采半径为 0.066 m,最大有效抽采半径为 0.268 m,各组差值较

小,均在 0.003 ~ 0.202 m;第八组模拟试验初始瓦斯压力为 1.2 MPa、孔隙率为 0.09、钻孔直径为 134 mm、抽采负压为 20 kPa 及初始渗透率为 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 时试验指标最大。

表 2 $L_{16}(4^5)$ 正交表及模拟结果

试验 编号	因素					模拟结果 <i>r</i>
	A	B	C	D	E	
1	1(1)	1(0.06)	1(94)	1(13)	1(1)	0.24
2	1(1)	2(0.07)	2(114)	2(20)	2(0.1)	0.136
3	1(1)	3(0.08)	3(134)	3(27)	3(0.01)	0.091
4	1(1)	4(0.09)	4(154)	4(34)	4(0.001)	0.087
5	2(1.2)	1(0.06)	2(114)	3(27)	4(0.001)	0.066
6	2(1.2)	2(0.07)	1(94)	4(34)	3(0.01)	0.069
7	2(1.2)	3(0.08)	4(154)	1(13)	2(0.1)	0.163
8	2(1.2)	4(0.09)	3(134)	2(20)	1(1)	0.268
9	3(1.4)	1(0.06)	3(67)	4(34)	2(0.1)	0.153
10	3(1.4)	2(0.07)	1(94)	3(27)	1(1)	0.231
11	3(1.4)	3(0.08)	4(154)	2(20)	4(0.001)	0.091
12	3(1.4)	4(0.09)	2(114)	1(13)	3(0.01)	0.081
13	4(1.6)	1(0.06)	4(154)	2(20)	3(0.01)	0.1
14	4(1.6)	2(0.07)	3(134)	1(13)	4(0.001)	0.079
15	4(1.6)	3(0.08)	2(114)	4(34)	1(1)	0.25
16	4(1.6)	4(0.09)	1(94)	3(27)	2(0.1)	0.126

参照 $L_{16}(4^5)$ 正交表,利用 COMSOL 模拟获得图 3、图 4。图 3 所示为钻孔开采后煤层的应变云图及应力云图。煤层开采钻孔后,钻孔周围应力集中,一定范围内应力平衡发生破坏,出现卸压现象^[14],由中心向外依次产生 3 块区域:塑性区、弹性区及原始应力区;以钻孔为中心,应力分布呈先剧增后缓慢下降,最后保持稳定的状态。图 4 所示为 100 天后 16 组模拟试验的瓦斯压力分布图。不同开采条件下,瓦斯压力分布图也不同;有效抽采区域仅分布在钻孔附近极小范围内,以钻孔为中心,由近至远,瓦斯压力逐渐增加;钻孔附近损伤区瓦斯压力远远小

于未损伤区域瓦斯压力;损伤区域瓦斯压力最小可低至 0.2 MPa 以下,未损伤区域瓦斯压力与初始值持平。

根据图 4,以钻孔中心为原点绘制瓦斯压力线图,获得图 5。整体来看,压力线图沿钻孔中心轴线呈对称分布。以钻孔右侧为例,瓦斯压力呈对数型增长,增速呈先快后慢的增长趋势,曲率不断趋于 0。距钻孔 0 ~ 3 m 处 16 组数据瓦斯压力均呈先剧增后缓增的状态,距钻孔越近,瓦斯压力变化越明显,曲线越陡直,随着钻孔距离的增加,瓦斯压力也在显著提高,处于钻孔损伤区;3 ~ 4 m 处瓦斯压力保持恒定,处于钻孔未损伤区。第 1、8、10、15 组试验瓦斯压力增速略慢于其他组试验,表征了距钻孔相同位置时,瓦斯压力较低,有效抽采区域较大。第 2、7、9、16 组试验相比之于第 1、8、10、15 组试验,瓦斯压力增速更快,恢复至初始瓦斯压力也更快,钻孔损伤区范围更小,未损伤区更大,有效抽采区域更小;第 3、4、5、6、11、12、13、14 组试验瓦斯压力增速倾角近似 90°,有效抽采区域小。

图 6、图 7 所示分别为 16 组模拟试验残余瓦斯含量线图及具体数值。在 16 组试验中,瓦斯含量下降趋势最明显的是第 1、8、10、15 组,100 天时残余瓦斯含量分别为 4.97 kg/m³、6.56 kg/m³、7.75 kg/m³、9.16 kg/m³;第 2、9、16 组试验瓦斯含量减少量次之,100 天时残余瓦斯含量分别为 15.97 kg/m³、18.24 kg/m³、19.29 kg/m³;剩余九组试验残余瓦斯含量大致均在 90 kg/m³ 以上,近似为第 1、8、10、15 组残余瓦斯含量的 10 ~ 24 倍,且瓦斯减少量的变化趋势较为平缓,与表 2 中分析有效抽采半径所得结论一致。初始渗透率越大,有效抽采半径越大。究其原因是渗透率大的煤层中瓦斯运移更为容易,可以从更远的位置运移至钻孔周围,故而瓦斯抽采更为轻松,瓦斯压力有效降低,有效抽采区域也更大。

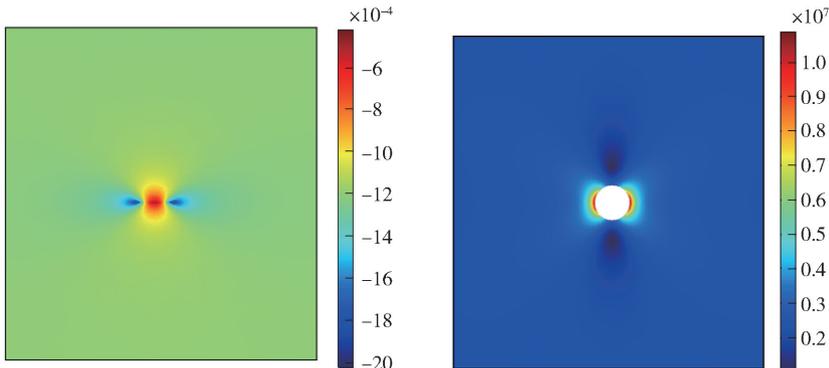


图 3 应变云图(左)及应力云图(右)

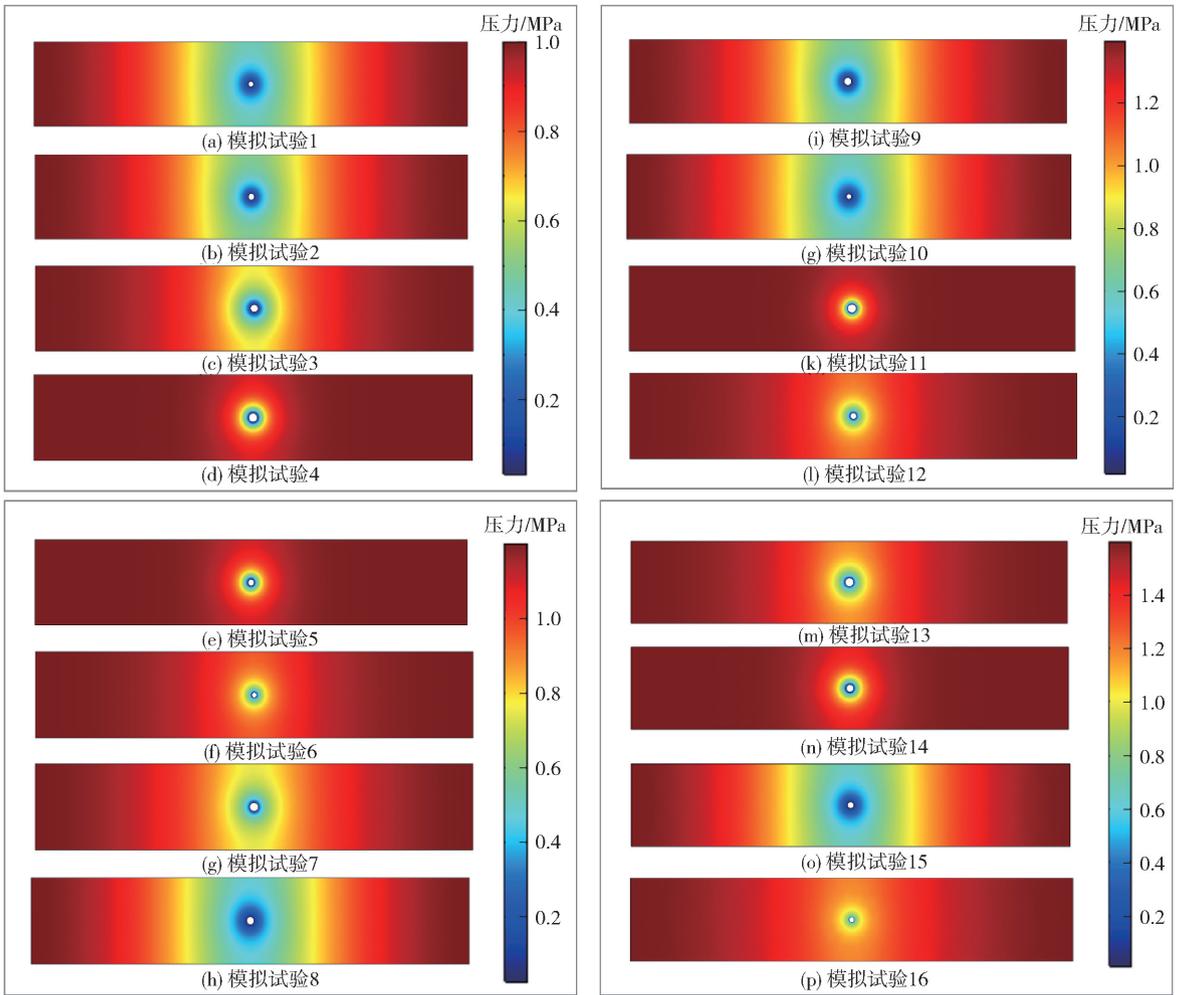


图4 瓦斯浓度分布图

4.2 极差分析

极差分析是正交试验结果分析最常用的方法,简单直观。极差 R 反映某因素水平变动时试验指标的变动幅度, R 越大,说明该因素对试验指标越敏感、影响越大。故通过极差分析可以较为直观的判断各因素对有效抽采半径的影响效果,从而筛选出最显著的因素,公式见(4)、(5)^[15]:

$$R_i = \max \{k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}\} - \min \{k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}\} \quad (4)$$

$$k_i = K_{ij}/s \quad (5)$$

式中, k_{i1} 、 k_{i2} 、 k_{i3} 、 k_{i4} 分别为 i 因素在水平 1,2,3,4 下模拟结果的平均值; $k_{i,j}$ 为正交表 i 元素 j 水平所对应的模拟数据均值; K_{ij} 为正交表 i 元素 j 水平所对应的模拟数据之和; s 为 i 元素 j 水平所出现的次数。

对正交设计的试验结果进行极差分析,得表3,分析可知,各因素对有效抽采半径的影响程度为 $E > C > D > B > A$,即瓦斯有效抽采半径影响因素从强到弱依次为初始渗透率、钻孔直径、抽采负压、孔

表3 有效抽采半径极差分析

水平	A	B	C	D	E
水平 1	0.554	0.559	0.666	0.563	0.989
水平 2	0.566	0.515	0.533	0.595	0.578
水平 3	0.556	0.595	0.591	0.514	0.341
水平 4	0.555	0.562	0.441	0.559	0.323
均值 1	0.139	0.140	0.167	0.140	0.247
均值 2	0.142	0.129	0.133	0.149	0.144
均值 3	0.139	0.149	0.148	0.129	0.085
均值 4	0.139	0.140	0.110	0.140	0.080
极差	0.003	0.011	0.057	0.020	0.167
排序	5	4	2	3	1

隙率、初始瓦斯压力。初始渗透率最大均值为 0.255 m,最小均值为 0.083 m,极差值为 0.172 m,显著影响有效抽采半径;其次是钻孔直径,极差值为 0.058 m;剩余三者抽采负压、孔隙率及初始瓦斯压力对瓦斯有效抽采半径影响不显著,极差值在 0.001 ~ 0.020 m 之间。表3中均值反映各因素各水平对试验指标影响程度的大小,因此选取五个因素

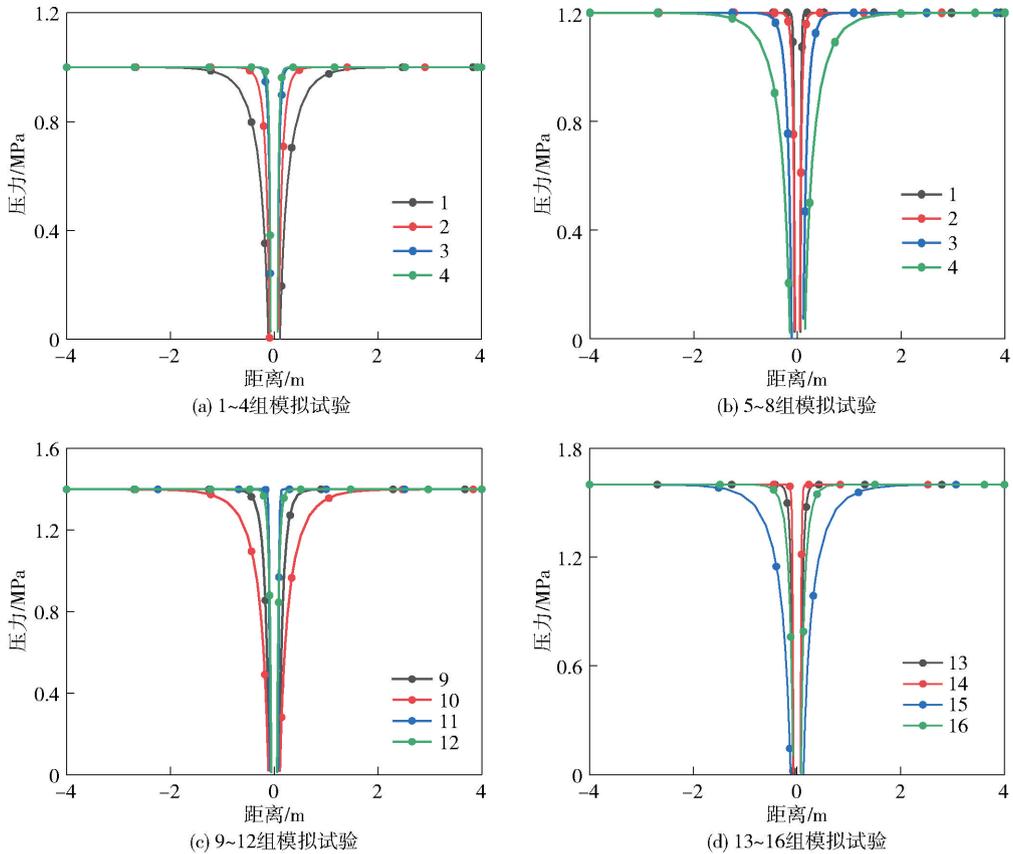


图5 瓦斯压力线图

中均值最大的水平为最优水平。分析表3获得钻孔瓦斯有效抽采半径参数最优组合:初始瓦斯压力1.6 MPa、孔隙率0.08、钻孔直径94 mm、抽采负压20 kPa及初始渗透率 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

为更加直观的分析各因素对有效抽采半径的影响,根据表3绘制图8,图中初始渗透率的水平均值变化最明显,水平均值跨度为0.08~0.25 m;钻孔直径、初始瓦斯压力、孔隙率及抽采负压变化曲线近似,水平均值均在0.1~0.17 m,变化幅度较小,说明这四者因素对瓦斯抽采的影响程度都较初始渗透率低。原因可能在于钻孔开采会打破钻孔周围应力场平衡状态,产生局部破坏^[16];同时钻孔增加了煤体的暴露面积,塑性区范围增大,抽采钻孔径向卸压范围增大^[17];钻孔相当于增大孔周边煤体瓦斯的渗透率,瓦斯更易从更远的位置渗流到钻孔周围,从而提高瓦斯抽采。钻孔直径在一定范围内越大,抽采效果越好,但钻孔直径也不能过大,大孔径往往效率不太高,同时容易在高应力场作用下造成塌孔影响施工效率;抽采负压同理,找到合适的抽采负压区间,可更好的与煤层瓦斯压力形成压力差推动瓦斯运移,从而更好的促进瓦斯抽采。

5 多元线性回归

多元线性回归是定量的用回归方程描述因变量和多个自变量间线性关系的方法。借助多元线性回归方程可更加直观地判断五个因素与试验指标的关系。多元线性回归方程见式(6):

$$y = a_0 + a_1x_{i1} + a_2x_{i2} + \dots + a_{m-1}x_{i,m-1} \quad (6)$$

线性回归矩阵方程:

$$Y = Xa \quad (7)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}_{n \times 1}, a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{m-1} \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (8)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1,m-1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2,m-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{n,m-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,y为因变量;x为自变量;Y为观测变量;X为设计矩阵;a为待估计的未知参数向量。

利用SPSS进行线性回归分析,数据导入后进行多元线性回归分析、DW检验、残差分析及共线性诊

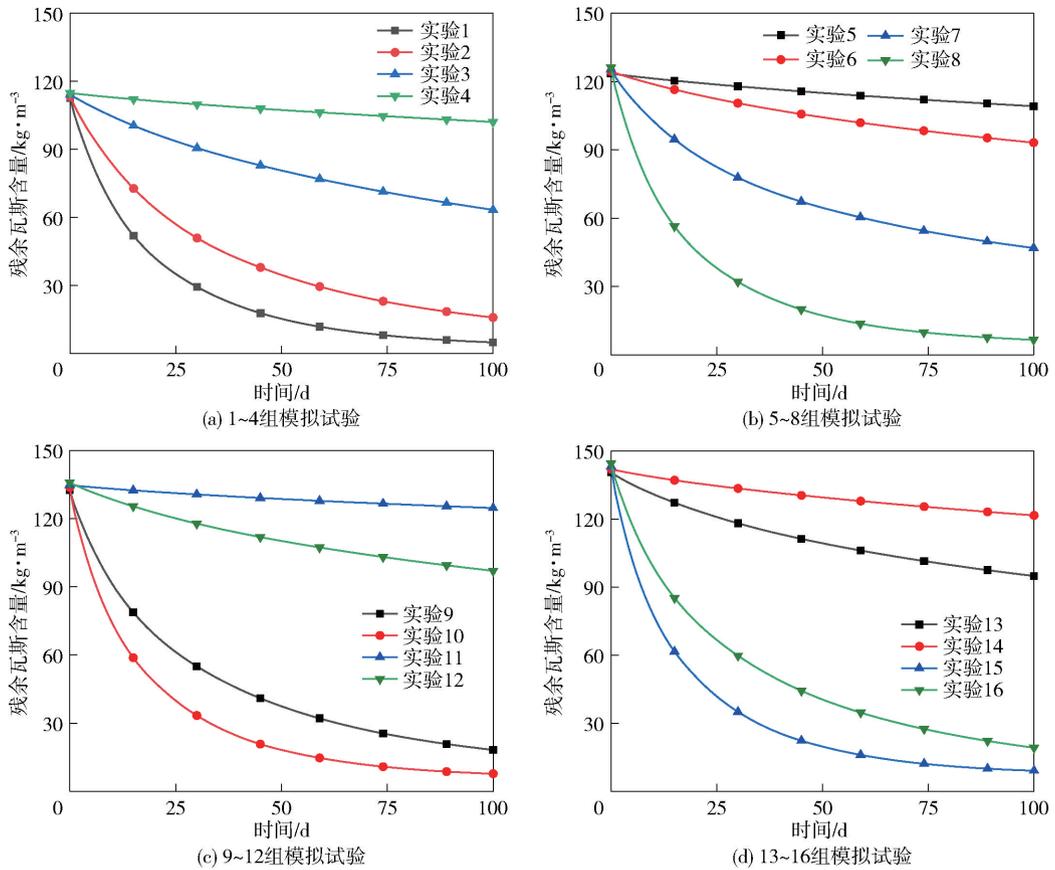


图6 残余瓦斯含量图

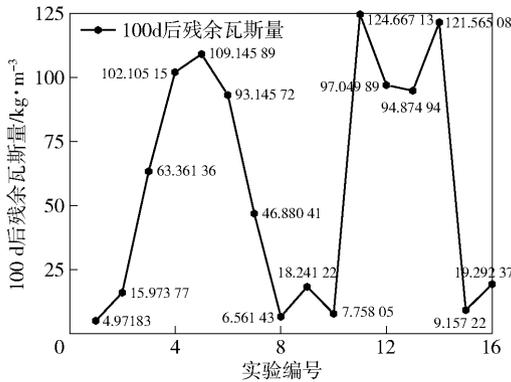


图7 100 d后残余瓦斯量

断,获得表4、表5。其中 Durbin-Watson 是一种检验回归分析残差一阶自相关的方法,公式见式(10):

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \quad (10)$$

式中, $e_i(1, \dots, n)$ 为残差; \bar{e} 为残差序列平均值。

表4中的 R^2 可理解为上述回归方程中的自变量可以解释因变量变化 90.6% 的误差,表明此模型拟合程度较好,回归效果较好;表中 Durbin-Watson 值为 1.708,位于2附近,证明残差和自变量互为独

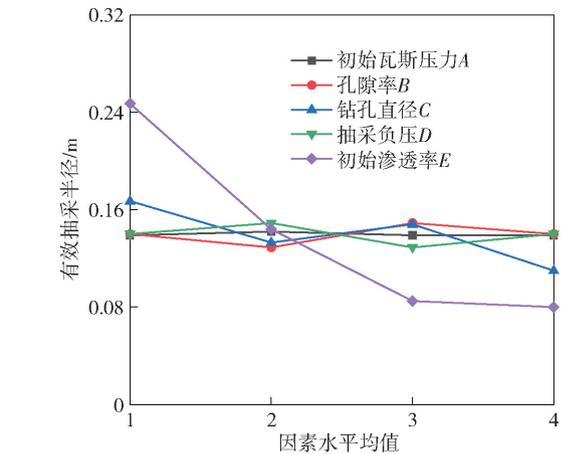


图8 有效抽采半径敏感度分析

表4 模型汇总

模型	R^2	R^2_{adj}	标准估算 的错误	Durbin- Watson
1	0.906	0.859	0.026 510	1.708

立,回归模型结论可靠。

根据表5获得模型中 y 与 x 经验方程式:

$$y = 0.042 - 0.001x_1 + 0.093x_2 + 0.000432x_3 - 0.000429x_4 + 0.163x_5 \quad (11)$$

表5 模型参数

模型	非标准化系数		Beta	Sig	VIF
	B	标准错误			
常数	0.042	0.082	-	0.619	-
瓦斯压力	-0.001	0.030	-0.003	0.977	1.000
孔隙率	0.093	0.601	0.015	0.880	1.028
钻孔直径	0.000 432	0.000	0.141	0.225	1.266
抽采负压	-0.000 429	0.002	-0.019	0.851	1.035
初始渗透率	0.163	0.017	0.998	0.000	1.203

式中, y 为有效抽采半径; x_1 为初始瓦斯压力; x_2 为孔隙率; x_3 钻孔直径; x_4 为抽采负压; x_5 为初始渗透率。

通常情况下 VIF 值大于 2 就可能存在共线性问题,而表 5 中五个方差膨胀因子 VIF 均小于 2,说明五个变量间不存在多重共线性。Sig 代表显著性检验,初始渗透率的 Sig 小于 0.05,说明初始渗透率对有效抽采半径呈差异显著状态;其余自变量中的常数 Sig 值为 0.629,初始瓦斯压力 Sig 值为 0.964,孔隙率 Sig 值为 0.923,钻孔直径 Sig 值为 0.234,抽采负压 Sig 值为 0.981,均大于 0.05,显著性较差,对有效抽采半径影响较小。

对于抽采问题,可以从模拟试验结果入手,进行水力压裂、松动爆破与人工强化增透措施等,提高煤层的初始渗透率,如果改变初始渗透率在一定程度上已使得瓦斯抽采效果最优时,可以从极差分析中影响程度次之的钻孔直径入手,使瓦斯更好的在煤层内发生运移,更易从更远的位置渗流到钻孔,从而提高瓦斯抽采效率。

6 结论

(1) 确定各因素及水平数值,构建正交表进行数值模拟,根据正交试验的极差分析,判断影响钻孔瓦斯有效抽采半径的主导因素。根据正交试验及极差分析可知:煤层初始渗透率对钻孔瓦斯有效抽采半径影响最显著,初始瓦斯压力、孔隙率、钻孔直径和抽采负压影响一般。

(2) 根据正交实验确定钻孔瓦斯有效抽采半径最大时,因素参数最优组合为初始瓦斯压力 1.2 MPa、孔隙率 0.08、钻孔直径 94 mm、抽采负压 20 kPa 及初始渗透率 $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

(3) 线性回归决定系数 $R^2 = 90.6\%$,模型拟合程度较好,获得相应的回归方程式。

(4) 降低瓦斯含量,可先人为提高渗透率,在一定程度上也可改变钻孔直径扩大有效抽采半径范

围,从而提高瓦斯抽采效率。

[参考文献]

- [1] 孙文洁,李文杰,杨文凯,等. 煤炭矿山水环境问题类型划分及治理模式[J]. 煤矿安全,2023,54(5): 35-41.
- [2] 王登科,唐家豪,魏建平,等. 煤层瓦斯多机制流固耦合模型与瓦斯抽采数值模拟分析[J]. 煤炭学报,2023,48(2):763-775.
- [3] 张文豪,贺志宏,孔婧毓,等. 煤层钻孔瓦斯抽采效果影响因素分析[J]. 中国矿业,2023,32(3):98-102.
- [4] 张飞,尚玮玮,罗华贵,等. 煤层钻孔瓦斯抽采有效半径影响因素分析[J]. 矿业安全与环保,2022,49(2): 137-142.
- [5] 韩昀,赵国翔,王晓东,等. 布孔方案对瓦斯抽采的影响规律研究[J]. 煤矿机械,2023,44(7):80-85.
- [6] 姜周民. 基于 COMSOL 的顶板定向长钻孔布置参数研究[J]. 煤炭工程,2023,55(3):127-132.
- [7] 贾进章,柯丁琳,陈怡诺. 基于正交试验-多元回归的煤矿瓦斯涌出量预测[J]. 安全与环境学报,2021,21(5):2037-2044.
- [8] 倪康钦,高杰. 上隅角错距式双埋管瓦斯抽采技术参数研究[J]. 煤炭工程,2022,54(5):63-67.
- [9] ZHANG L, CHU Y, ZHOU Y, et al. The In-Hexagon Borehole Layout for the Optimization of the Effective Radius of Gas Extraction [J]. Sustainability, 2023, 15(17):12711.
- [10] 蔡浩鑫. 多尺度空间条件下煤层瓦斯跨区渗流特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.
- [11] 龚选平,薛生,韩柏青,等. 钻孔瓦斯抽采效果影响因素的响应面分析[J]. 煤矿安全,2022,53(11):176-183.
- [12] 周勇,马桂霞,周爱桃,等. 掘进扰动下断层带煤体瓦斯异常分布特征研究[J]. 煤矿安全,2022,53(10): 173-183.
- [13] 吕风. 基于双孔单渗透模型确定有效抽采半径技术研究[J]. 煤炭与化工,2023,46(5):104-107,111.
- [14] 刘洪永. 远程采动煤岩体变形与卸压瓦斯流动气固耦合动力学模型及其应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.
- [15] 孙海涛,朱墨然,曹偲等. 突出煤层相似材料配比模型构建的正交试验研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(8):116-122.
- [16] 马国强,陈久福. 突出薄煤层顺层瓦斯预抽钻孔合理布置研究[J]. 煤矿安全,2019,50(4):1-5.
- [17] 易书钢,郝殿,赵庆红,等. 机械造穴增透技术在硬煤层穿层抽采钻孔的应用研究[J]. 煤矿机械,2023,44(2):137-140.