

煤层注水参数的数量化理论正交设计优化法的研究

秦书玉¹, 秦伟瀚²

(1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程系, 辽宁阜新 123000;

2. 天津工业大学机械电子学院, 天津 300160)

[摘要] 应用正交设计优化煤层注水工艺参数的组合, 对地质条件稳定的煤层是实现最佳注水效果的一种较好的方法。但是, 对于地质条件不断变化的煤层, 采用该方法, 其效果不一定能满足注水工程要求。为此, 针对地质因素为不稳定状态下的煤层及影响煤层注水的地质因素既有定性变量又有定量变量的特征, 提出利用数量化理论与正交设计2种方法确定注水工艺参数的最优组合, 并进行了工程试验优化研究。试验结果表明, 此法节省注水试验工程量, 接近实际工程要求。

[关键词] 数量化理论; 工艺参数; 正交设计; 煤层注水; 试验研究

[中图分类号] TD713.33 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)10-0052-04

1 引言

利用正交试验方法确定煤层注水工艺参数的最佳组合, 仅适用于确定煤层地质条件为稳定状态下的注水^[1, 2]。随着注水工程的进展, 如果注水煤层的某一地质因素发生了变化, 仍采用原组合参数注水, 其效果不一定满足注水工程要求。因此, 为保证煤层注水效果, 必须重新确定最优组合参数。显然, 对于地质因素不断变化的煤层, 如果仍采用正交试验方法确定组合参数, 那么注水将永远处于试验状态, 所以这种优化法不适应地质因素不断变化的煤层注水需要。为此, 提出将正交设计方法与数量化理论结合起来, 确定地质因素为不稳定状态下的煤层注水参数的最优组合。为证明该方法的实用性, 选择本溪暖河子煤矿进行了工程试验。

2 数学方法的确定

研究地质因素不断变化的煤层注水参数的最优组合, 实质是研究地质因素和注水工艺参数2类因素共同对煤层注水效果的影响。这种情况, 不仅有定量变量, 还有定性变量。例如, 裂隙、孔隙、层

理、节理、地质构造等是定性变量; 湿润边角、煤的硬度、地压、瓦斯压力、煤层埋藏深度和注水工艺参数则为定量变量。处理含有定性变量和定量变量关系问题, 一般常用数量化理论。用这一理论建立的具有多个(随机)定量变量兼有定性变量的数学模型, 能充分利用可能搜集到的一切信息, 全面揭示煤层注水的影响因素之间与煤层注水效果的内在相关关系。因此, 将正交设计与数量化理论2种数学方法结合起来确定注水工艺参数的组合。

3 基本原理

采用正交设计与数量化理论确定地质因素为不稳定状态的煤层注水工艺参数的最优组合, 是利用正交实验方案所做的注水试验工程获得的定量及定性的各种信息量, 运用数量化理论^[3]建立煤层注水效果预测数学模型, 然后将正交设计确定的方案(数据)及预注水的煤层地质因素代入预测数学模型, 得到一组注水预测水分增值(相当于按正交设计确定的方案进行注水试验所得到的水分增值), 再应用正交试验法确定注水工艺参数的最佳组合。

根据数量化理论I, 设描述注水效果的水分增

[收稿日期] 2003-04-02; 修回日期 2003-06-29

[基金项目] 辽宁省自然科学基金资助项目(2002105786)

[作者简介] 秦书玉(1948-), 男, 辽宁朝阳市人, 硕士, 辽宁工程技术大学高级工程师

值为基准变量 y ，影响注水效果的因素为说明变量 x ，称为项目。用若干等分方法将注水参数及湿润边角和煤的硬度等定量变量因素转化为定性变量，把裂隙等定性变量的各种不同取“值”设为类目 b ，对于第 j 项目的 k 类目在第 i 的基准变量的反应，用下式确定：

$$\delta_i(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{当第 } i \text{ 基准变量 } j \text{ 项目的} \\ & \text{定性数据为 } k \text{ 类目时,} \\ 0 & \text{否则。} \end{cases} \quad (1)$$

根据正交试验设计确定的注水方案所获得的全部注水试验工程信息，依据式 (1) 的原则，记入项目类目表中的反应矩阵

$$X = \begin{bmatrix} \delta_1(1,1) & \cdots & \delta_1(1,\gamma_1) & \delta_1(2,1) & \cdots & \delta_1(2,\gamma_2) & \cdots & \delta_1(m,1) & \cdots & \delta_1(m,\gamma_m) \\ \delta_2(1,1) & \cdots & \delta_2(1,\gamma_1) & \delta_2(2,1) & \cdots & \delta_2(2,\gamma_2) & \cdots & \delta_2(m,1) & \cdots & \delta_2(m,\gamma_m) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \delta_n(1,1) & \cdots & \delta_n(1,\gamma_1) & \delta_n(2,1) & \cdots & \delta_n(2,\gamma_2) & \cdots & \delta_n(m,1) & \cdots & \delta_n(m,\gamma_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

在数量化理论 I 中，假定基准变量与各项目类目的反应之间遵循下列线性模型

$$\hat{y} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{\gamma_j} \delta_i(j, k) \hat{b}_{jk} \quad (6)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{\gamma_j} \delta_i(j, k) b_{jk} + \epsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

式中 b_{jk} 是依赖于 j 项目的 k 类目的常数， ϵ_i 是第 i 次抽样中的随机误差，根据最小二乘法原理，求出 b_{jk} 估计值，即得煤层注水效果预测方程

4 基本方法

为说明用数量化理论正交设计优化注水参数方法及该方法的可靠性和实用价值，以本溪暖河子煤矿为例。

4.1 项目与类目的确定

由文献 [2] 可知，影响煤层注水效果的注水工艺参数主要为注水压力、注水时间、注水强度、孔距、孔深；地质因素为湿润边角、孔隙率、煤的硬度、层理、节理、地质构造、地压、瓦斯压力、煤层埋藏深度等，所以项目为：

$$q = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{\gamma_j} \delta_i(j, k) b_{jk} \right]^2 \rightarrow \text{最小}.$$

对上式求偏导，则有

$$\frac{\partial q}{\partial b_{uv}} = -2 \sum_{i=1}^n \left[y_i - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{\gamma_j} \delta_i(j, k) b_{jk} \right] \delta_i(u, v) = 0,$$

$$u = 1, 2, \dots, m; v = 1, 2, \dots, \gamma_u,$$

得线性方程组

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{\gamma_j} \left[\sum_{i=1}^n \delta_i(j, k) \delta_i(u, v) \right] \hat{b}_{jk} = \sum_{i=1}^n \delta_i(u, v) y_i \quad (4)$$

式 (4) 写成矩阵形式，则有

$$X^T X \hat{B} = X^T Y, \quad (5)$$

其中 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$,

即
$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix},$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} \hat{b}_{11} & \hat{b}_{12} & \cdots & \hat{b}_{1\gamma_1} \\ \hat{b}_{21} & \hat{b}_{22} & \cdots & \hat{b}_{2\gamma_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{b}_{m1} & \hat{b}_{m2} & \cdots & \hat{b}_{m\gamma_m} \end{bmatrix}.$$

将 X 及 X^T 用式 (2) 取代，解线性方程组式 (5)，得 \hat{b}_{jk} ，于是预测数学模型为

- x_1 注水压力 /kPa, x_2 注水强度 /L·(m·h)⁻¹,
- x_3 注水时间 /h, x_4 钻孔深度 /m,
- x_5 孔距 /m, x_6 湿润边角 /(^{\circ}),
- x_7 孔隙率 /%, x_8 煤的硬度,
- x_9 层理, x_{10} 节理,
- x_{11} 地质构造 (落差 1 m 以下的小断层)。

根据暖河子煤矿煤层注水试验方案，实际注水工程要求及煤层注水难易程度的分类划分如下：

- x_1 $30 \times 98.1 \leq b_{11} < 45 \times 98.1,$
 $45 \times 98.1 \leq b_{12} < 60 \times 98.1,$
 $60 \times 98.1 \leq b_{13} < 75 \times 98.1,$
 $75 \times 98.1 \leq b_{14};$
- x_2 $6 \leq b_{21} < 12, 12 \leq b_{22} < 18,$
 $18 \leq b_{23} < 24, 24 \leq b_{24};$
- x_3 $24 \leq b_{31} < 36, 36 \leq b_{32} < 48,$
- x_4 $50 \leq b_{41} < 55, 55 \leq b_{42} < 60,$
 $60 \leq b_{43} < 65, 65 \leq b_{44} < 100;$

x_5 $10 \leq b_{51} < 15$, $15 \leq b_{52} < 19$, $19 \leq b_{53} < 30$;

x_6 $0^\circ \leq b_{61} < 45^\circ$, $45^\circ \leq b_{62} < 90^\circ$, $90^\circ \leq b_{63}$;

x_7 $b_{71} < 4\%$, $4\% \leq b_{72} < 20\%$, $20\% < b_{73}$;

x_8 $1 \leq b_{81} \leq 3$, $3 < b_{82}$;

x_9 b_{91} 为层理、节理发育,

b_{92} 为层理、节理不发育。

4.2 建立反应矩阵特征表求反应矩阵

为表示方便, 反应矩阵一般用反应矩阵特征表代替。根据文献 [2] 中的“表 2”及该矿注水煤层地质因素实际考察的数据, 建立反应矩阵 (略)。

4.3 建立预测方程

根据建立的反应矩阵和式 (5), 经计算机计算, 暖河子矿煤层注水效果预测方程为:

$$y = 1.343379x_{11} + 0.097425x_{12} + 0.4624601x_{13} + 0.7114253x_{14} + 0.0000001x_{21} + 0.043026x_{22} + 0.2310719x_{23} + 0.2310436x_{24} + 0.0000002x_{31} + 0.1327366x_{32} + 0.0004278x_{33} + 0.20587x_{34} + 0.0000001x_{41} + 0.2011304x_{42} + 0.0936604x_{43} + 0.2325604x_{44} + 0.0000001x_{51} + 0.042088x_{52} + 0.0954972x_{53} + 0.0000008x_{61} + 0.440099x_{62} + 0.1161472x_{63} + 0.00007x_{71} + 0.3577774x_{72} + 0.120249x_{73} + 0.000009x_{81} + 0.2594537x_{82} + 0.2014007x_{91} + 0.1963663x_{92} \quad (7)$$

4.4 检验预测方程预测结果的精度

检验预测方程预测结果的精度, 采用剩余均

方, 即

$$f = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 / (n - m - 1) \quad (8)$$

计算剩余均方 $f = 0.0259$, 说明预测方程所得的预测效果精度比较高, 故可用该方程估计由正交设计确定的注水工艺参数在不同地质条件下的煤层注水效果。

4.5 确定煤层预注的水分增值

根据文献 [2] 确定的注水试验方案, 在煤层湿润边角为 49.8° , 煤层硬度平均为 0.7 ($0.2 \sim 1.19$), 煤层的孔隙率为 $12\% \sim 16\%$, 煤的自然含水率为 2.01% , 饱和含水率为 24.45% , 小构造及层理、节理均比较发育的条件下, $7^\#$ 层注水由式 (7) 计算。其各种组合参数试验注水水分增值的预测值和实测值见表 1。

4.6 预测与实测结果确定参数的最佳组合

根据试验测定值与预测结果, 用综合比较直观法, 分别计算出指标中各个因素的各个水平的和——I, II, III, IV 各个水平的平均效果 I/4, II/4, III/4, IV/4 及极差 R, 从计算结果确定较优水平及因素的主次顺序如表 2 所示。从表 2 可知, 不论从实测数据分析, 还是用预测方程求出的预测结果分析, 在暖河子矿 $7^\#$ 层注水参数的最佳组合均为注水压力的第一水平, 其余参数为第四水平, 即 $A1 = 30 \times 98$ kPa, $B4 = 25$ L/m·h, $C4 = 60$ h, $D4 = 70$ m, $E4 = 20$ m。

表 1 各组合参数试验注水的水分增值

Table 1 The increase volume of injection parameter composition in the test

因素	A 注水压力 /kPa	B 注水量 /L·(m·h) ⁻¹	C 注水时间 /h	D 孔深 /m	E 孔距 /m	水分增值 y /%	
						实测值	预测值
1	30×98	6	24	50	10	2.431 0	2.310
2	30×98	12	36	55	13	2.603 7	2.580
3	30×98	20	48	60	16	2.684 6	2.640
4	30×98	25	60	70	20	3.473 7	3.480
5	45×98	6	36	60	20	1.419 3	1.510
6	45×98	12	24	70	16	1.390 2	1.400
7	45×98	20	60	50	13	1.534 3	1.500
8	45×98	25	48	55	10	1.422 5	1.390
9	60×98	6	48	70	13	1.374 4	1.380
10	60×98	12	60	60	10	1.805 1	1.900
11	60×98	20	24	55	20	1.990 1	2.000
12	60×98	25	36	50	16	1.821 4	1.800
13	80×98	6	60	55	16	2.027 2	2.100
14	80×98	12	48	50	20	1.850 3	1.900
15	80×98	20	36	70	10	2.308 7	2.200
16	80×98	25	24	60	13	2.176 0	2.200

表 2 注水参数结果分析

Table 2 Injection parameter analysis

	A 注水压力/kPa		B 注水量/L·(m·h) ⁻¹		C 注水时间/h		D 孔深/m		E 孔距/m	
	实测分析	预测分析	实测分析	预测分析	实测分析	预测分析	实测分析	预测分析	实测分析	预测分析
I	11.010	11.102	7.300	7.161 9	7.910	7.897 3	7.510	7.547 0	7.800	7.877 3
II	5.800	5.764 4	7.780	7.649 3	8.090	8.153 4	8.070	8.043 5	7.660	7.544 3
III	7.080	6.911 0	8.340	8.517 7	7.310	7.381 8	8.250	8.085 0	7.940	7.923 4
IV	8.400	8.362 2	8.870	8.893 3	8.980	8.840 3	8.460	8.547 0	8.890	8.733 4
I/4	2.752 6	2.775 5	1.825 0	1.790 5	1.977 5	1.974 3	1.877 5	1.886 8	1.950 0	1.969 3
II/4	1.450 0	1.441 1	1.945 0	7.912 3	2.022 5	2.038 3	2.017 5	2.010 9	1.915 0	1.886 1
III/4	1.770 0	1.747 6	2.085 0	2.129 4	1.827 5	1.833 0	2.062 5	2.021 3	1.985 0	1.980 9
IV/4	2.100 0	2.090 6	2.217 5	2.223 3	2.245 0	2.210 1	2.115 0	2.136 8	2.222 5	2.183 4
R	1.302 6	1.334 4	0.392 5	0.432 8	0.417 5	0.377 1	0.237 0	0.250 0	0.310 0	0.297 3
较优水平	A1	A1	B4	B4	C4	C4	D4	D4	E4	E4
因素主次	1	1	3	2	2	3	5	5	4	4

采用上述优化出的最优组合参数，在地质条件基本稳定的 7# 煤层中，分别在 33 个钻孔进行煤层工程注水，煤层水分增值的实测值和用文献 [4] 方法检测的预测水分增值见表 3。

表 3 本溪暖河子煤矿 7# 注水煤层的水分增值的实测值与预测值比较^[5,6]

Table 3 The injection increase volume compare with forecast data for Benxi Nuanhezi coal mine 7# coal-seam %

孔号	实测值	预测值 y_i	剩余值	孔号	实测值	预测值 y_i	剩余值
1	1.80	1.723 73	0.076 27	18	1.77	1.879 12	-0.109 18
2	1.78	1.685 66	0.094 34	19	1.61	1.673 30	-0.063 30
3	1.81	1.840 01	-0.030 01	20	1.69	1.682 95	0.007 05
4	1.81	1.721 90	0.088 10	21	1.71	1.689 23	0.020 77
5	1.84	1.927 45	-0.087 45	22	1.75	1.693 67	0.056 33
6	1.82	1.804 95	0.015 05	23	1.75	1.727 3	0.022 70
7	1.83	1.886 64	-0.056 64	24	1.73	1.715 82	0.014 18
8	1.85	1.949 65	-0.099 65	25	1.70	1.844 15	-0.114 15
9	1.89	1.860 54	0.029 46	26	1.61	1.609 52	0.000 48
10	1.92	1.983 04	-0.063 04	27	1.74	1.944 78	-0.204 78
11	1.83	1.844 61	-0.014 61	28	1.77	1.592 22	0.177 78
12	1.95	1.993 76	-0.043 76	29	2.07	2.062 89	0.007 11
13	1.95	1.927 94	0.022 06	30	2.06	2.040 69	0.019 31
14	2.1	2.074 07	0.025 93	31	2.98	2.049 98	-0.069 90
15	2.05	2.063 35	-0.013 35	32	1.81	1.689 83	0.120 17
16	2.15	2.092 68	0.057 32	33	1.68	1.585 94	0.094 06
17	2.06	2.008 56	0.051 44				

5 结论

利用正交设计和数量化理论两种数学方法确定的煤层最佳组合注水参数，具有较高的可靠性和适用性，适用于地质因素不稳定的任何煤层，可直接用于煤层的实际注水工程。这种方法不仅考虑了影响煤层注水效果的工艺参数，还考虑了地质因素；不仅考虑了定量变量，还考虑了定性变量，减少了大量的注水试验工程；是一种更接近于注水工程实际的优化方法。

参考文献

[1] 上海市科学技术交流站. 正交试验设计法 [M]. 上海: 上海人民出版社, 1975

[2] 秦书玉, 海国治, 李宗翔. 煤层注水参数的正交试验优化法 [J]. 煤炭工程师, 1992, (3): 24~27

[3] 董文泉. 数量化理论及其应用 [M]. 长春: 吉林人民出版社, 1979. 4~24

[4] 秦书玉, 海国治, 李宗翔. 煤层注水效果的分析与参数调节 [J]. 煤炭工程师, 1993. (3): 22~24

[5] 秦书玉, 张永吉, 秦伟瀚. 煤层注水技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001, 132~133

[6] 秦书玉, 海国治, 秦伟瀚. 本溪暖河子煤矿注水实验报告 [R]. 辽宁: 辽宁工程技术大学情报室, 1993. 98~106

(下转第 77 页)

The Basic Study for Quench Detection in Superconducting Electric Equipments

Yu Xiaoyan, Li Jingdong, Tang Yuejin

(*Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

[**Abstract**] Quench of superconducting electric equipments is an important problem for superconducting electric power systems and will affect its operation. This paper presents the quench detection of SMES in power system operation, and puts forward forecast theory for quench detection.

[**Key words**] superconducting electric equipments; quench detection; superconducting electric power system; forecast theory

(cont. from p. 55)

Engineering Experiment Research of the Quantity Theoretical Orthogonal Design Optimal Method for the Coal-seam Injection Parameters

Qin Shuyu¹, Qin Weihai²

(*1. Department of Electronics and Information Engineering, Liaoning University of Technology, Fuxin, Liaoning 12300, China; 2. College of Mechanics and Electronics, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China*)

[**Abstract**] To apply the orthogonal design to the optimization of the coal-seam injection technical parameters' combination is a better method that realizes the best effect of injection for the coal-seam with steady geological conditions. But with this method, its effect cannot definitely satisfy the injection engineering requirement for the coal-seam with changing geological conditions. For this reason, in view of the coal-seam with unsteady geological factors and the characteristic that the geological factors have both qualitative and quantitative variables, one method that applies the quantity theory and orthogonal design to determine the optimal combination of injection technical parameters is raised and the engineering experimental study has been made. The experiments show that this method can save the quantity of injection experiment engineering and are approaching to the actual engineering requirement.

[**Key words**] quantity theory; technical parameter; orthogonal design; coal-seam injection; experimental study