

基于模糊数学方法优化煤层气井底流压下降制度

胡彦林¹,张遂安¹,高志华²,李丹琼^{1,3},刘 岩^{1,4},张守仁³,吴 见³,何志君⁵

(1. 中国石油大学(北京) 气体能源开发与利用教育部工程研究中心,北京 102249;2. 中国石油大学(北京),北京 102249;
3. 中联煤层气有限责任公司,北京 100011;4. 中国石油华北油田公司 煤层气勘探开发分公司,山西 晋城 048000;
5. 中石化西南油气田分公司 川西采气厂,四川 德阳 618000)

摘 要:合理的煤层气井井底流压初期下降制度是决定煤层气井高产和稳产的重要因素,应用模糊数学的基本方法分析柿庄南区块煤层气排采初期高产井井底流压下降制度,将影响煤层气排采初期井底流压下降制度的因素记作一个模糊集合,确定其权重分配并构造隶属函数,为调整煤层气低产井的井底流压下降制度或为未投入运行井制定合理的井底流压下降制度提供依据。通过某高产井 L-1 的验证,该方法确定的压降制度在区域 7 内与实际压降制度符合较好,压降特征参数的相对误差均小于 20%,说明模糊数学方法能够用以优化煤层气排采初期井底初期流压下降制度。

关键词:煤层气;井底流压;压降制度;模糊综合评判

中图分类号:TE121

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2015)03-0064-04

Optimization of hole bottom fluid pressure drop system in CBM wells based on Fuzzy Mathematical Method

HU Yan-lin¹,ZHANG Sui-an¹,GAO Zhi-hua²,LI Dan-qiong^{1,3},LIU Yan^{1,4},
ZHANG Shou-ren³,WU Jian³,HE Zhi-jun⁵

(1. Engineering Research Center of the Ministry of Education for Gas Energy Development & Utilization, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. China United Coalbed Methane Corporation, Ltd., Beijing 100011, China; 4. Coalbed Methane Gas Exploration and Development Branch, Petro China Huabei Oilfield Company, Jincheng 048000, China; 5. West Sichuan Gas Production Plant, Southwest Oil/Gas Field Branch, SINOPEC, Deyang 618000, China)

Abstract: The reasonable hole bottom fluid pressure drop control of coalbed methane (CBM) well was important to make the well get the high and stable production. A new method to optimize the reasonable hole bottom fluid pressure drop control had been put forward in this paper. Based on the analysis of the characteristics of high production wells' hole bottom fluid pressure drop in Shizhuang South Block, this paper viewed those factors that influenced the hole bottom fluid pressure drop system as a fuzzy set, decided the weight of every factor and used subordinate function to optimize the production of CBM wells, which meant adjusting the hole bottom fluid pressure drop system for the low-production CBM wells or making the reasonable and scientific scheme of hole bottom fluid pressure drop for those wells that had not been put into service. This method was verified through some high-production Well L-1 and the hole bottom fluid pressure drop system determined by this method coincided well with the actual system of Area 7 and the errors of the influencing factors were all less than 20%. This example proved that Fuzzy Mathematical Method could be used to optimize the hole bottom fluid pressure drop system.

Key words: coalbed methane; hole bottom fluid pressure; pressure drop system; fuzzy comprehensive judgement

0 引 言

我国煤层气资源量巨大,但是多数资源在现有

开发条件下难以利用^[1]。煤层气排采过程中,逐级降低井底流压能扩大煤层气井压降漏斗的面积,使煤层气解吸范围增大,从而增大煤层气的累积采气

收稿日期:2014-10-13;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2015.03.016

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2011ZX05042)

作者简介:胡彦林(1989—),男,河北衡水人,硕士研究生。通信作者:张遂安,教授,博士生导师。E-mail:sazhang@263.com

引用格式:胡彦林,张遂安,高志华,等.基于模糊数学方法优化煤层气井底流压下降制度[J].煤炭科学技术,2015,43(3):64-67,72.

HU Yan-lin, ZHANG Sui-an, GAO Zhi-hua, et al. Optimization of hole bottom fluid pressure drop system in CBM wells based on Fuzzy Mathematical Method[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 64-67, 72.

量^[2]。但是,针对某个具体的煤层气区块,如何分级降压以确定合理的井底流压下降制度,目前相关研究较少。煤层气井井底流压下降影响因素较多,常规方法难以分析处理;相对于一些传统方法,模糊数学法在分析多因素问题时有其独有的优越性,并在一些实例应用中得到验证^[3-5]。以柿庄南区块为研究对象,依据现有排采资料,综合分析不同高产井区排采初期井底流压的下降特征,运用模糊数学方法,评判影响井底流压下降特征参数的因素,为低产井井底流压下降制度优化或未投入运行井井底流压下降制度确定提供了理论依据。

1 煤储层地质概况

柿庄南区块位于山西省晋城市沁水县与高平市境内,东南方向距晋城市 60 km,北距太原市 260 km。区块地层自下而上发育下古生界中奥陶统峰峰组(O₂f),上古生界上石炭统本溪组(C₂b)、太原组(C₂t),下二叠统山西组(P₁s)和下石盒子组(P₁x),中二叠统上石盒子组(P₂s),上统石前峰组(P₃sh),新生界第四系(Q)^[6]。

区块构造简单,太原组 15 号煤层和山西组 3 号煤层厚度较大,全区分布稳定,是煤层气勘探和生产的主要目的层。煤层含气量高,煤储层渗透率较高,煤储层温度较低,气体吸附量大;煤储层压力低,能够较快达到煤层气临界解吸压力,从而有利于煤层气产出^[6-7]。笔者主要研究 3 号煤层煤层气的排采情况。

2 模糊评判数学模型

设有 n 个主要因素影响煤层气排采时井底流压下降特征参数,则该 n 个影响因素 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 组成一个因素集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。

由 m 个已知井底流压下降特征参数地区 $y_j (j=1, 2, \dots, m)$ 构成一个评价集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 。

对于第 i 个影响因素 x_i 的单因素评判 R_i 是 Y 上的模糊子集 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ 。

则影响因素的评判矩阵 R 表示为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

其中, r_{ij} 是第 i 个影响因素对第 j 个已知参数地区的隶属度,由隶属函数求得。

各影响因素所占的权重组成的矩阵记为 A , 记作: $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ 。其中 a_i 为第 i 个影响因素所占的权重。

则对该评判对象的模糊综合评判矩阵 B 是 Y 上的子集矩阵: $B = R \cdot A = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$ 。

根据加权平均型计算评价结果,取 b_j 为

$$b_j = \min \left\{ 1, \sum_{i=1}^n a_i r_{ij} \right\}$$

b_j 为对第 j 个已知井底流压下降特征参数区域与某一低产井或未投入运行井接近的程度的综合评价,根据 b_j 和最大隶属原则便可以优化煤层气排采时井底流压的下降制度,即调整低产井的井底流压下降制度,或为未投入运行井制定合理的井底流压下降制度提供理论依据^[3-4]。

3 煤层气井排采初期井底流压下降特征及其影响因素

3.1 排采初期井底流压下降特征

统计分析柿庄南区块数百口井的产量,将日平均产气量高于 1 500 m³ 的井称为高产井,低于 1 000 m³ 井称为低产井。高产井排采初期的井底流压均呈现出二级降压的特征(图 1),高产井区分布在区内 8 个区域(图 2)。

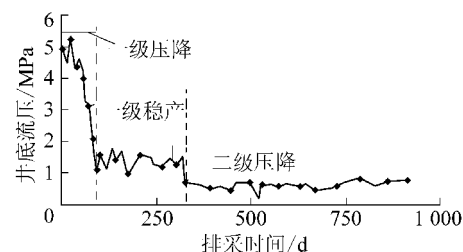


图 1 柿庄南区块 L-1 井底流压下降曲线

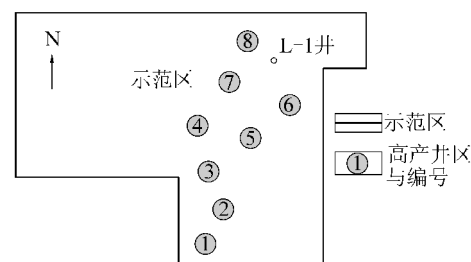


图 2 柿庄南区块煤层气高产井区分布位置

由于煤储层特征等存在差异,导致不同区域内煤层气井的井底流压在各级下降过程中呈现出不同的特征(表 1),总结出 5 个表征压降的参数,分别为一级压降速度(记为 Y_1)、一级压降百分比(即一级井底压力降低值与一级压降前井底压力的比值,记

为 Y_2)、一级稳产时间(记为 Y_3)、二级压降速度(记为 Y_4)和二级压降百分比(即二级井底压力降低值与二级降压前井底压力的比值,记为 Y_5)。需要指出的是:①由于煤层气排采过程中实际操作的限制以及排采时间等原因,该处二级降压中的各级压降过程是一个长期的、整体的概念;②由于高产区域内高产井相距较近,各影响因素可以视为相同,所以每个高产区域的压降特征参数取用该高产区域内的所有高产井压降特征参数的算数平均值。

表 1 柿庄南区块煤层气高产区域井底流压下降特征参数

区域	深度/m	$Y_1/(MPa \cdot d^{-1})$	$Y_2/\%$	Y_3/d	$Y_4/(MPa \cdot d^{-1})$	$Y_5/\%$
1	740.76	0.026	75.39	50	0.013	33.33
2	767.45	0.023	70.46	76	0.024	54.76
3	634.20	0.037	64.40	60	0.036	59.26
4	679.70	0.039	66.50	100	0.080	54.39
5	766.15	0.040	71.79	65	0.078	52.83
6	570.55	0.012	43.51	90	0.012	66.66
7	640.67	0.021	35.63	60	0.018	31.82
8	761.20	0.028	58.53	210	0.024	55.93

3.2 井底流压下降特征参数的影响因素

分析柿庄南区块已有资料,认为影响井底流压下降特征影响的因素共 8 个(表 2),分别为煤层深

$$X = \begin{bmatrix} 740.76 & 9.270 & 0.930 & 34.060 & 2.24 & 5.35 & 0.040 & 0 & 3.047 & 6 \\ 767.45 & 8.995 & 0.810 & 35.975 & 2.51 & 4.16 & 0.037 & 5 & 3.554 & 5 \\ 634.20 & 15.240 & 2.495 & 31.960 & 2.62 & 4.96 & 0.010 & 0 & 3.792 & 0 \\ 679.70 & 10.020 & 1.180 & 35.130 & 2.83 & 3.86 & 0.040 & 0 & 4.254 & 3 \\ 766.15 & 13.067 & 1.893 & 33.937 & 2.67 & 4.30 & 0.031 & 0 & 4.696 & 5 \\ 570.55 & 19.160 & 3.320 & 31.550 & 2.35 & 5.20 & 0.052 & 0 & 2.655 & 5 \\ 640.67 & 15.240 & 2.495 & 31.960 & 2.62 & 4.97 & 0.046 & 0 & 3.506 & 7 \\ 761.20 & 17.035 & 2.810 & 33.070 & 2.37 & 5.23 & 0.032 & 0 & 3.556 & 9 \end{bmatrix}$$

将上述特征矩阵进行归一化,并计算影响因素特征矩阵的模糊相似矩阵,进而使用 Matlab 软件,求得模糊相似矩阵的传递闭包为

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.724 & 1 & 0.724 & 1 & 0.724 & 1 & 0.724 & 1 & 0.724 & 1 & 0.790 & 6 & 0.763 & 2 \\ 0.724 & 1 & 1.000 & 0 & 0.724 & 1 & 0.695 & 8 & 0.721 & 6 & 0.686 & 8 & 0.790 & 6 & 0.763 & 2 \\ 0.724 & 1 & 0.724 & 1 & 1.000 & 0 & 0.724 & 1 & 0.724 & 1 & 0.724 & 1 & 0.790 & 6 & 0.763 & 2 \\ 0.724 & 1 & 0.695 & 8 & 0.724 & 1 & 1.000 & 0 & 0.721 & 6 & 0.695 & 8 & 0.790 & 6 & 0.763 & 2 \\ 0.724 & 1 & 0.721 & 6 & 0.724 & 1 & 0.721 & 6 & 1.000 & 0 & 0.721 & 6 & 0.790 & 6 & 0.763 & 2 \\ 0.724 & 1 & 0.686 & 8 & 0.724 & 1 & 0.695 & 8 & 0.721 & 6 & 1.000 & 0 & 0.790 & 6 & 0.763 & 2 \\ 0.790 & 6 & 0.790 & 6 & 0.790 & 6 & 0.790 & 6 & 0.790 & 6 & 0.790 & 6 & 1.000 & 0 & 0.790 & 6 \\ 0.763 & 2 & 0.763 & 2 & 0.763 & 2 & 0.763 & 2 & 0.763 & 2 & 0.763 & 2 & 0.790 & 6 & 1.000 & 0 \end{bmatrix}$$

根据上述传递闭包,确定不同置信度水平时的分类情况,并求得各置信度水平时系统的初始熵。删除某一因素(如“深度”)后重复上述步骤,确定在删除该因素下各个置信水平系统的条件熵。根据各

度(记为 X_1)、含气量(记为 X_2)、临界解吸压力(记为 X_3)、朗格缪尔体积(记为 X_4)、朗格缪尔压力(记为 X_5)、孔隙度(记为 X_6)、渗透率(记为 X_7)和初始井底压力(记为 X_8)。柿庄南区块煤储层压力和地应力与深度之间存在一定的线性关系,所以“深度”这一因素涵盖了储层压力和地应力的信息^[8]。

表 2 高产井井底流压下降特征参数影响因素量值

区 域	X_1/m	$X_2/(cm^3 \cdot g^{-1})$	X_3/MPa	$X_4/(cm^3 \cdot g^{-1})$	X_5/MPa	$X_6/\%$	$X_7/10^{-3} \mu m^2$	X_8/MPa
1	740.76	9.270	0.930	34.060	2.24	5.35	0.040	3.048
2	767.45	8.995	0.810	35.975	2.51	4.16	0.038	3.555
3	634.20	15.240	2.495	31.960	2.62	4.96	0.010	3.792
4	679.70	10.020	1.180	35.130	2.83	3.86	0.040	4.254
5	766.15	13.067	1.893	33.937	2.67	4.30	0.031	4.697
6	570.55	19.160	3.320	31.550	2.35	5.20	0.052	2.656
7	640.67	15.240	2.495	31.960	2.62	4.97	0.046	3.507
8	761.20	17.035	2.810	33.070	2.37	5.23	0.032	3.557

4 煤层气井排采初期合理井底压降

4.1 影响因素的权重分配

根据表 2 给出的影响因素量值,可得影响因素特征矩阵 X 为

1.514 9, $M(X_4) = 2.873\ 4$, $M(X_5) = 3.748\ 8$, $M(X_6) = 1.402\ 0$, $M(X_7) = 3.793\ 6$, $M(X_8) = 3.345\ 8$ 。

再令 $W(X_i)$ 表示 X_i 因素的权重(其中 $i=1,2,3,\dots,8$);根据公式 $W(X_i) = M(X_i) / \sum_{i=1}^8 M(X_i)$, 计算出各影响因素的权重为 $W(X_1) = 0.113\ 3$, $W(X_2) = 0.163\ 2$, $W(X_3) = 0.065\ 7$, $W(X_4) = 0.124\ 7$, $W(X_5) = 0.162\ 6$, $W(X_6) = 0.060\ 8$, $W(X_7) = 0.164\ 6$, $W(X_8) = 0.145\ 1$ 。由此,得到权重向量 $A = (0.113\ 3\ 0.163\ 2\ 0.065\ 7\ 0.124\ 7\ 0.162\ 6\ 0.060\ 8\ 0.164\ 6\ 0.145\ 1)^T$ 。

4.2 井底流压压降制度优化步骤

搜集低产井或未投入运行井的相关资料,确定各个影响因素的量值。

根据各影响因素的量值和相应的隶属函数计算 r_{ij} 并构造评判矩阵 R : $r_{ij} = u_R(u_i, v_j)$, $R = [r_{ij}]_{n \times m}$ 。

求出综合评判矩阵 $B = R \cdot A = (b_1, b_2, \dots, b_8)^T$ 。最后,确定井底压降时需调整或确定的压降特征参数。

根据最大隶属原则,若 $b_k = \max\{b_j\} (j=1,2,\dots,$

$$R = \begin{bmatrix} 0.660\ 3 & 0.612\ 5 & 0.846\ 9 & 0.810\ 7 & 0.614\ 7 & 0.673\ 8 & 0.877\ 4 & 0.623\ 1 \\ 0.537\ 1 & 0.521\ 9 & 0.688\ 0 & 0.581\ 5 & 0.873\ 1 & 0.450\ 5 & 0.688\ 0 & 0.562\ 9 \\ 0.151\ 5 & 0.130\ 5 & 0.501\ 5 & 0.197\ 1 & 0.344\ 5 & 1.000\ 0 & 0.501\ 5 & 0.608\ 1 \\ 0.633\ 6 & 0.567\ 0 & 0.724\ 5 & 0.595\ 0 & 0.638\ 3 & 0.746\ 1 & 0.724\ 5 & 0.673\ 3 \\ 0.592\ 5 & 0.730\ 9 & 0.821\ 7 & 0.794\ 1 & 0.881\ 1 & 0.643\ 3 & 0.821\ 7 & 0.653\ 4 \\ 0.729\ 9 & 0.610\ 7 & 0.955\ 7 & 0.541\ 9 & 0.647\ 0 & 0.785\ 8 & 0.955\ 7 & 0.771\ 0 \\ 0.861\ 3 & 0.740\ 6 & 0.227\ 9 & 0.861\ 3 & 0.561\ 5 & 0.540\ 1 & 0.689\ 9 & 0.584\ 0 \\ 0.912\ 9 & 0.660\ 1 & 0.592\ 5 & 0.485\ 7 & 0.401\ 1 & 0.724\ 5 & 0.675\ 4 & 0.659\ 4 \end{bmatrix}$$

L-1 井的综合评判矩阵为 $B = R \cdot A = (0.666\ 4\ 0.607\ 5\ 0.646\ 7\ 0.648\ 2\ 0.647\ 6\ 0.655\ 0\ 0.738\ 3\ 0.631\ 3)^T$ 。

根据综合评判矩阵可知, $b_k = \max\{b_j\} (j=1,2,\dots,8) = 0.738\ 3$, 其中 $k=7$ 。区域 7 的压降特征参数与 L-1 井的压降特征参数对比情况及其相对误差的数据见表 3。

表 3 区域 7 与 L-1 井的压降特征参数及其相对误差对比

井区	$Y_1 /$ (MPa · d ⁻¹)	$Y_2 / \%$	Y_3 / d	$Y_4 /$ (MPa · d ⁻¹)	$Y_5 / \%$
L-1 井	0.018 2	30.28	70	0.016 7	47.620
区域 7	0.020 9	35.63	60	0.017 5	45.320
相对误差 / %	12.92	15.02	16.67	4.57	5.08

分析表 3 对比数据可知, L-1 井与区域 7 高产井的井底流压特征参数相近, 相对误差较小, 说明方

8), 可知该低产井或未投入运行井的影响因素与第 k 个区域中的高产井的影响因素综合作用最相近。对于低产井, 可以将压降制度调整为第 k 个区域内高产井的压降制度; 对于未投入运行井, 则制定该井的压降制度时可以取用第 k 个区域的压降制度。

5 实例验证

选取柿庄南区块某高产井(记为 L-1 井, 如图 2 所示)进行验证。

5.1 L-1 井的影响因素量值

对 L-1 井的相关资料进行搜集, 该井井底流压下降特征参数影响因素的量值分别为 $X_1 = 652.20\ m$, $X_2 = 13.375\ cm^3/g$, $X_3 = 3.32\ MPa$, $X_4 = 29.23\ cm^3/g$, $X_5 = 2.71\ MPa$, $X_6 = 4.955\ %$, $X_7 = 0.041 \times 10^{-3}\ \mu m^2$, $X_8 = 3.012\ MPa$ 。

5.2 井底流压下降方案的验证

根据第 4.2 节, 可构造出 L-1 井的评判矩阵 R 为

法科学合理, 可以用来调整低产井的压降制度或为未投入运行井制定合理的压降制度。

6 结 论

1) 根据柿庄南区块煤层气高产井井底流压下降制度的特点, 提出了利用模糊数学的方法确定或调整井底流压下降制度, 为优化煤层气井井流压下降制度这一复杂问题提供了一种新的方法和途径。

2) 运用模糊数学的评判准则和方法, 按照各个因素对井底流压下降制度的影响权重, 能够较为全面、客观地体现出煤层气排采时各因素的综合影响, 使评价结果科学可信。

3) 运用模糊数学方法调整低产井的井底流压压降制度, 或为未投入运行井制定合理井底流压 (下转第 72 页)

为2~3,基本不存在压缩效应;压力在10~206 MPa时,分维值为3~4,压缩效应和孔隙填充效应同时存在,以压缩效应为主;当压力高于206 MPa时,分形特征不明显,不能用该研究的压缩校正方法来推算真实的孔径分布。因此采用10~206 MPa压力段的压汞数据来计算煤的可压缩系数。

2)通过压汞法校正,该研究煤样的压缩系数为 $0.671 \times 10^{-10} \sim 1.23 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$,低于前人结果,这与煤样孔容相对较低有关。校正后总孔容(孔径范围6 nm~10 μm)与校正前相差48.62%~54.89%,校正后相应孔径区间的孔容与液氮吸附的结果更加接近。

3)在以压缩效应为主的压力区间(10~206 MPa)内,累计孔隙填充量与累计基质压缩量之间存在幂函数关系,可用于估算压汞过程中压缩效应和孔隙填充效应的相对贡献。

参考文献:

- [1] GB/T 21650.1—2008,压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第1部分:压汞法[S].
- [2] Van Krevelen D W. coal[M]. Amsterdam:Elsevier,1981.
- [3] Suuberg E M,Deevi S C,Yun Y. Elastic behaviour of coals studied by mercury porosimetry[J]. Fuel,1995,74(10):1522-1530.
- [4] Ritter H L,Dake L C. Pressure porosimeter and determination of complete Macropore-Size distributions[J]. Ind Eng Chem Analyt Ed,1945,17(12):782-786.
- [5] Toda Y,Toyoda S. Application of mercury porosimetry to coal[J]. Fuel,1972,51(3):199-201.
- [6] Dickinson J M,Shore J W. Observations concerning the determina-

tion of porosities in graphites[J]. Carbon,1968,6(6):937-941.

- [7] Li Y. Compressibility and fractal dimension of fine coal particles in relation to pore structure characterisation using mercury porosimetry[J]. Part Syst Charact,1999,16(1):25-31.
- [8] Smith D M,Schentrup S. Mercury porosimetry of fine particles:Particle interaction and compression effects[J]. Powder Technology,1987,49(3):241-247.
- [9] Friesen W I,Mikula R J. Mercury porosimetry of coals:Pore volume distribution and compressibility[J]. Fuel,1988,67(11):1516-1520.
- [10] Guo X Q,Liu D M,Li J Q,et al. Influence of pressure on application of mercury injection capillary pressure for determining coal compressibility[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,295:2726-2731.
- [11] SY/T 6154—1995,岩石比表面积和孔径分布测定:静态氮吸附容量法[S].
- [12] Avnir D,Farin D,Pfeifer P. A discussion of some aspects of surface fractality and of its determination[J]. New Journal of Chemistry,1992,16(4):439-449.
- [13] Cai Y,Liu D,Pan Z,et al. Pore structure and its impact on CH₄ adsorption capacity and flow capability of bituminous and sub-bituminous coals from Northeast China[J]. Fuel,2013,103:258-268.
- [14] Spitzer Z. Mercury porosimetry and its application to the analysis of coal pore structure[J]. Powder Technology,1981,29(1):177-186.
- [15] Nelson J R,Mahajan O P,Walker P L. Measurement of swelling of coals in organic liquids: A new approach[J]. Fuel,1980,59(12):831-837.
- [16] 陈家良,邵震杰,秦勇. 能源地质学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2004.

(上接第67页)

下降制度,通过实例得到了验证,说明该方法具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 秦勇,袁亮,胡千庭,等. 我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J]. 煤炭科学技术,2012,40(10):1-6.
- [2] 康永尚,赵群,王红岩,等. 煤层气井开发效率及排采制度的研究[J]. 天然气工业,2007,27(7):79-82.
- [3] 段健,金龙哲,欧盛南,等. 模糊数学方法优选高炉喷吹煤[J]. 煤炭学报,2011,36(9):1560-1562.
- [4] 申宝宏,刘天泉. 模糊集合理论及其在煤炭科研中的应用[J]. 煤炭科学技术,1988,26(5):44-49.
- [5] 胡友建,王建华. 应用模糊数学方法确定岩移参数[J]. 焦作矿业学院学报,1992,27(2):57-63.

- [6] 孙强,孙建平,张健,等. 沁水盆地南部柿庄南区块煤层气地质特征[J]. 中国煤炭地质,2010,22(6):9-12.
- [7] 叶建平,彭小妹,张小朋,等. 山西沁水盆地煤层气勘探方向和开发建议[J]. 中国煤层气,2009,6(3):7-11.
- [8] 景兴鹏. 沁水盆地南部储层压力分布规律和控制因素研究[J]. 煤炭科学技术,2012,40(2):116-124.
- [9] 黄定轩. 基于客观信息熵的多因素权重分配方法[J]. 系统工程理论方法应用,2002,12(4):321-324.
- [10] 张文修,吴伟志,梁吉业,等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [11] 刘青. Rough集及Rough推理[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [12] 王勇. 关于条件熵的质疑[EB/OL]. <http://www.paper.edu.cn>,2007-08-06.
- [13] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京:科学出版社,2005.