

文章编号: 1673-3363-(2015)06-0898-07

基于未确知测度理论的薄基岩厚松散 含水层下煤层安全开采区域划定

曾佳龙^{1,2}, 刘琼¹, 黄锐¹, 关燕鹤^{1,3}, 刘博¹, 汤宗超⁴, 况成彬⁵, 张少军²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 金诚信矿业管理股份有限公司武山项目经理部, 江西 九江 332204; 3. 湖南工学院安全与环境工程学院, 湖南 衡阳 421002;
4. 淮北矿业集团海孜矿, 安徽 淮北 235146; 5. 淮北矿业集团桃园矿, 安徽 淮北 234116)

摘要 厚松散层底部含水层单位涌水量、厚松散层底部黏土层厚度、覆岩厚度、导水断裂带高度和采高5个因素为影响薄基岩厚松散含水层下采煤安全性的关键因素。将关键因素进行处理分析, 找到关键因素影响开采安全性的4个联结点, 即底部含水层单位涌水量、覆岩厚度与采高平方根之比、底部黏土层厚度与采高之比、导水断裂带高度与采高平方根之比4个评价因子。将评价因子划分为5个等级, 进而量化开采安全性。引入信息熵和未确知测度理论, 建立综合评价模型, 以某矿105个钻孔数据为例, 进行开采安全性评价, 并根据评价结果对可安全开采区域进行划定和预测。将评价、划定和预测结果, 同工程实践及已有研究结果进行对比, 发现吻合度较高。结果表明, 在所研究的煤层赋存条件下未确知测度模型是可行的、有效的。

关键词 薄基岩厚松散含水层; 安全开采区域; 未确知测度; 熵

中图分类号 TD 325 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.06.005

Safety area delimiting of coal mining under thick loosened aquifer with thin bedrock based on unascertained measure theory

ZENG Jialong^{1,2}, LIU Qiong¹, HUANG Rui¹, GUAN Yanhe^{1,3},

LIU Bo¹, TANG Zongchao⁴, KUANG Chengbin⁵, ZHANG Shaojun²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
2. Project Section of Wushan, JCHX Group Company Limited, Jiujiang, Jiangxi 332204, China;
3. Institute of Safety and Environmental Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang, Hunan 421002, China;
4. Haizi Mine, Huaibei Mining Group Company Limited, Huaibei, Anhui 235146, China;
5. Taoyuan Mine, Huaibei Mining Group Company Limited, Huaibei, Anhui 234116, China)

Abstract The specific yield of aquifer at the bottom of thick unconsolidated layers, thickness of clay layer at the bottom of thick unconsolidated layers, thickness of strata, water flowing fracture height and mining height are five key factors for safety mining under thick unconsolidated aquifer with thin bedrock. By analyzing and processing the key factors, four junction points influenced the mining safety were found out, namely, the unit water inflow in bottom aquifer, the ratio of overburden thickness and mining height's square root, the ratio of the thickness of bottom clay layer and mining height, and the

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51206191); 中南大学自由探索计划课题项目(2011QNZT084)

作者简介: 曾佳龙(1988—), 男, 湖南省湘潭市人, 研究生, 从事矿山深部开采水能资源方面的研究。

通信作者: 黄锐

E-mail: huangrui@csu.edu.cn

Tel: 13787792851

ratio of water flowing fracture height and mining height's square root. Evaluation factors were divided into five grades, to quantify the mining safety. The information entropy and unascertained measure theory were introduced to establish comprehensive evaluation model. 105 drilling data in one mine were used to evaluate mining safety, divide and predict the safety mining area according to the evaluation results. The evaluation and prediction results are quite consistent with the engineering practice and existing research results. The results show that the unascertained measurement model is feasible and effective under the studied coal seam condition.

Key words thick loosened aquifer with thin bedrock; safety mining area; unascertained measure; entropy

薄基岩厚松散含水层下采煤属特殊地质条件下的开采问题。厚松散含水层主要由第四系、新近系的部分富水性松散层构成,其含水层或流砂层与煤层隐伏露头接近或直接接触,常将其划为水体下开采的范畴。薄基岩条件下,导水裂隙易受采动影响而贯通基岩,导致工作面突水、涌砂^[1-3]。薄基岩、超薄基岩与正常基岩在结构及物理力学性质方面差异较大,其抗压、抗拉强度和弹性模量等远小于正常基岩;受采动影响后,基岩的力学状态、覆岩的破坏及垮落等情况与正常情况差别较大。薄基岩层在开采过程中不能形成砌体梁一类的稳定“大结构”,上覆岩层较厚且松散时,易出现“全厚切落式”来压;基岩被整体切落,上覆岩层重量全部作用于基本顶。来压与非来压期间矿压差异明显,来压期间矿压急且剧烈,支架载荷大大增加,甚至超过支架最大载荷,发生压架事故。经典采矿理论认为:厚松散含水层下煤层尤其基岩较薄的情况,由于距新地层底部的含水层近,受沉积环境影响,煤层顶板岩层裂隙发育明显,岩体孔隙率高、强度衰减快、自稳性和耐压能力差;顶板难以管理,受开采扰动影响,垮落带和导水裂隙带易导通底部含水层,发生突水、溃砂事故,危及矿井安全生产。因而,一直将其视为开采禁区^[4]。

国内两淮、三江平原等地区存在大量隐伏型煤田,仅两淮地区的估计储量就高达6亿t。这些煤田中,煤层上通常覆有100~400m不等的中或厚松散层,松散层层底通常存在富水性强度较大的含水层,基岩薄甚至超薄^[5]。因而,研究薄基岩厚松散含水层下采煤的安全性、安全等级及安全开采区域的预测和划定是有必要的,且具有极大的经济意义。再者,开采单位对开采区域薄基岩厚松散含水层下采煤的安全性的估计,直接影响预留煤柱的大小和数量,过大或者过多的预留煤柱势必造成大量有限资源的浪费^[6-7]。薄基岩厚松散含水层下采煤安

全性的现有研究多集中于开采上限、预留煤柱、顶板压力控制、事故发生机理、突水量预测、突水危险性评价等方面。对突水、溃砂、压架等事故的发生机理及形成条件已解析较为全面^[8]。但是,笔者发现,对薄基岩厚松散含水层下采煤安全性进行综合评价非单一评价(单一评价诸如突水危险性评价),量化开采安全性,并对安全开采区域进行划定和预测的鲜有。而薄基岩厚松散含水层下采煤安全性恰恰受诸如突水、溃砂、顶板压力等多因素共同影响,且各因素之间并不相容,无明显定量关系^[9]。

在王文学等^[10]的研究基础之上,笔者系统分析,初步得出影响薄基岩厚松散含水层下采煤综合安全性的关键因素,并找出关键因素影响开采安全性的联结点,即评价因子。引入信息熵和未确知测度理论,试图尽可能地利用数据本身所提供的信息,对薄基岩厚松散含水层下采煤安全性进行综合评价,量化薄基岩厚松散含水层下采煤的综合安全性,并对可安全开采区域进行划定和预测。为验证结论的正确性,笔者将评价、划定及预测结果同工程实践和王文学等人的评价结果进行比较。

1 未确知测度计算理论

设 r_1, r_2, \dots, r_n 为 n 个对象,则对象空间可由 $R=\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 表示,称为论域。每个对象即 $r_i(i=1, 2, \dots, n)$ 有 m 个单向评价指标,记为 t_1, t_2, \dots, t_m ,则 r_i 的评价指标空间可表示为 $T=\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$,同时, r_i 可由一个 m 维向量 $\{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}\}$ 表示,其中, $r_{ij}(j=1, 2, \dots, m)$ 表示评价对象关于评价指标的观测值。若每一个子项 r_{ij} 都有 p 个评价等级记为 e_1, e_2, \dots, e_p ,则评价等级空间可记为 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_p\}$,其中 $e_k(k=1, 2, \dots, p)$ 表示第 k 个评价等级。假设第 k 级总比第 $k+1$ 级强,即 $e_k > e_{k+1}$,则称 $\{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ 为评价空间 E 上的一个有序分割类^[11-15]。

1.1 单指标未确知测度

设 $u_{ijk}=u(r_{ij} \in e_k)$ 表示测量值 r_{ij} 属于第 k 个评价等级 e_k 的程度, 要求 \mathbf{u} 满足:

$$0 \leq u(r_{ij} \in e_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$u(r_{ij} \in E) = 1 \quad (2)$$

$$u\left(r_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k e_l\right) = \sum_{l=1}^k u(r_{ij} \in e_l) \quad (3)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, p$ 。

$$\text{令 } (u_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} u_{i11} & u_{i12} & \cdots & u_{i1p} \\ u_{i21} & u_{i22} & \cdots & u_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{im1} & u_{im2} & \cdots & u_{imp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(1)表示 \mathbf{u} 满足“非负有界性”; 式(2)表示 \mathbf{u} 对评价空间 E 满足“归一性”; 式(3)表示 \mathbf{u} 对评价空间 E 满足“可加性”; 同时满足式(1), (2), (3), 则称 \mathbf{u} 为未确知测度(uncertainty measure), 简称测度^[12], 称 $(u_{ijk})_{m \times p}$ 为单指标测度评价矩阵, 该矩阵的第 j 行组成的向量 $\{u_{ij1}, u_{ij2}, \dots, u_{ijp}\}$ 为 r_{ij} 的单指标测度评价向量。

单指标测度函数的构造是计算测度和构建测度评价矩阵的基础, 必须满足非负有界性、归一性和可加性。测度函数的主要类型有直线型、指数型、抛物线型及正弦型。实际使用中, 根据指标变化特点构造合适的测度函数。

1.2 指标权重的确定

指标权重的确定目前采用得比较多的方法有: 层次分析法、模糊评价法、功效系数法、专家调查法等等, 这些方法大都属于主观赋权法。权值的偏差, 受评价人员主观因素影响较大, 甚至能产生方向性偏差。对观测数据有关的不确定性描述, 即为不确定性在数量上的度量, 它是观测数据分布的泛函, 属于信息熵的范畴。故笔者在评价中引入信息熵进行计算, 以期达到减少主观因素对权值偏差的影响和提高评价结果可信度的目的^[15]。

自然状态空间 $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为不可控制的, 其中 x_i 为实际发生状态, \mathbf{X} 中各状态发生的先验概率分布为 $\mathbf{P}(\mathbf{X})=\{P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)\}$, 则该状态的未确知程度的熵函数可表示为

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n P(x_i) \ln P(x_i), \quad (0 \leq P(x_i) \leq 1, \sum_{i=1}^n P_i = 1)$$

评价矩阵中, $u_{ijk}=u(r_{ij} \in e_k)$ 表示测量值 r_{ij} 属于第 k 个评价等级 e_k 的程度, 故可将未确知测度 $u_{ijk}=u(r_{ij} \in e_k)$ 视为 $P(x_i)$ 。即有

$$H(u_{ij}) = -\sum_{k=1}^p u_{ijk} \ln u_{ijk} \quad (5)$$

设 $\omega_{ij}=(0 \leq \omega_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^m \omega_{ij}=1)$ 为单向评价指标 $t_j(j=1, 2, \dots, m)$ 相对于其他指标的重要程度, 即 t_j 的权重为 ω_{ij} 。并令

$$v_{ij} = 1 - \frac{1}{\ln p} H(u_{ij}) = 1 + \frac{1}{\ln p} \sum_{k=1}^p u_{ijk} \ln u_{ijk} \quad (6)$$

$$\text{则有 } \omega_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum_{j=1}^m v_{ij}} \quad (7)$$

1.3 多指标综合测度

设 $u_{ik}=u(r_i \in e_k)$ 表示评价对象 r_i 属于第 k 个评价等级 e_k 的程度, 即评价对象的多指标综合测度, 根据已确定的各单向评价指标权重, 则有

$$u_{ik} = \sum_{j=1}^m \omega_{ij} u_{ijk} \quad (8)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, p$ 。

$$0 \leq u_{ik} = u(r_i \in e_k) \leq 1 \quad (9)$$

$$u(r_i \in E) = \sum_{k=1}^p u_{ik} = 1 \quad (10)$$

$$u\left(r_i \in \bigcup_{l=1}^k e_l\right) = \sum_{l=1}^k u(r_i \in e_l) \quad (11)$$

得到一个 p 维向量 $\{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ip}\}$ 令为 \mathbf{U} , $\mathbf{U}=\{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ip}\}$ 即为 r_i 的多指标综合测度评价向量。

识别准则 $e_1 > e_2 > \dots > e_p$ 时, 即 $\{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ 有序, 此时, 最大隶属度识别准则失效, 须引入置信度识别准则。设 δ 为置信度 ($\delta \geq 0.5$, 通常取 $\delta=0.6$ 或 0.7), 其识别模型为

$$s = \min \left\{ k : \sum_{l=1}^k u_{il} \geq \delta, \quad 1 \leq k \leq p \right\} \quad (12)$$

当 k 的取值满足识别模型, 得到 s 的取值, 继而得到 e_s , 此时, 认为评价对象 r_i 属于第 s 个评价等级 e_s 。

2 安全性评价指标体系

薄基岩厚松散含水层下采煤, 富含水层或流砂层直接与煤层隐伏露头接触或接近, 通常认为其属于水体下开采的范畴。薄基岩条件下, 受煤层采动影响, 导水裂隙带易贯通基岩, 导致工作面突水、涌砂; 上覆松散层易随薄基岩垮落, 增加甚至大大增加支架载荷。针对上述特性, 通过对其下煤层赋

存的水文地质特征进行全面分析，结合水体下采煤和地下水体(富含水层)下采煤的工程经验，集合相关领域多位专家的观点并系统查阅国内外文献；发现厚松散层底部含水层单位涌水量、厚松散层底部黏土层厚度、覆岩厚度、导水断裂带高度和采高 5 个因素，对薄基岩厚松散含水层下采煤的综合安全性影响最大。

2.1 单向评价指标选取及评价等级划分

开采层上覆厚松散层底部含水层的单位涌水量及水头高度，对突水、溃砂现象有重要影响，其富水性强度决定了预留煤柱的类型。参考《煤矿防治水规定》，根据单位涌水量，笔者将含水层的富水性初步划分为 5 个等级。开采工程实例和模型试验研究表明：受采动产生的裂隙影响，底部黏土层层厚大于煤层开采厚度时，底部黏土层可基本起保护作用；层厚与采厚相当时，底部黏土层将有出现局部拉破坏的可能，但仍可形成再生隔水层；而层厚小于采厚时，难以形成再生隔水层；底部黏土层很薄甚至缺失形成“天窗”时，将直接导通底部含水层。故笔者将底部黏土层厚度与采高之比的数量关系划分为 5 个等级。通过查阅文献，发现覆岩强度是影响导水断裂带发育高度的重要因素。根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中的导水断裂带高度计算公式，在煤层倾角小于 54° 时，导水裂隙发育的高度与采高平方根呈线性关系。本文暂且只考虑煤层倾角小于 54° 的情况，且将导水断裂带高度与采高平方根之比划分为 5 个等级。现有研究结果显示：覆岩厚度大于最大导水断裂带高度，开采裂隙不会导通底部含水层，覆岩保护层层厚由底部黏土层与煤层采厚之比决定，比值越小，须预留的保护层厚度越大。本文

根据研究区底部黏土层分布状况及实际开采经验，取 $5\sqrt{A}$ 作为保护层厚度，相当于《“三下”采煤规程》中保护层层厚取 $3A$ (A 为煤层采厚)，并将底部黏土层层厚与煤层采厚之比划分成 5 个等级^[10]。

综上，笔者在王文学等人的研究基础上，将底部含水层单位涌水量 t_1 、覆岩厚度与采高平方根之比 t_2 ^[16]、底部黏土层层厚与采高之比 t_3 、导水断裂带高度与采高平方根之比 t_4 等 4 项作为单向评价指标，即评价指标空间 $T=\{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ ，并将薄基岩厚松散含水层下采煤的综合安全性划分为 1~5 这 5 个等级。其中，1 级表示综合安全性最优，5 级表示综合安全性最差，1~3 级表示煤层可安全开采。详细划分见表 1。

表 1 单向评价指标及等级划分
Table 1 One-way evaluation index and grand standard

单向指标	评价等级				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
$t_1/(\text{L}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1})$	≤ 0.01	0.01~0.10	0.10~0.50	0.50~1.00	>1.00
t_2	>40	30~40	15~30	10~15	<10
t_3	>4.0	2.0~4.0	1.2~2.0	0.4~1.2	<0.4
t_4	<5	5~10	10~25	25~35	>35

2.2 单指标测度函数的构造

根据评价因子和实际开采的特点，本文首先考虑在区间内进行线性插值，即采用分段插值的思想在每个评价指标的分级区间内插入线性点，依据所插点构造直线型测度函数。经多次计算和反复比较，在所研究的开采条件下，基于选定的评价因子，直线型测度函数优于其他类型的测度函数，能较好地吻合实际开采情况，并且可操作性强。各单向评价指标的测度函数见图 1。

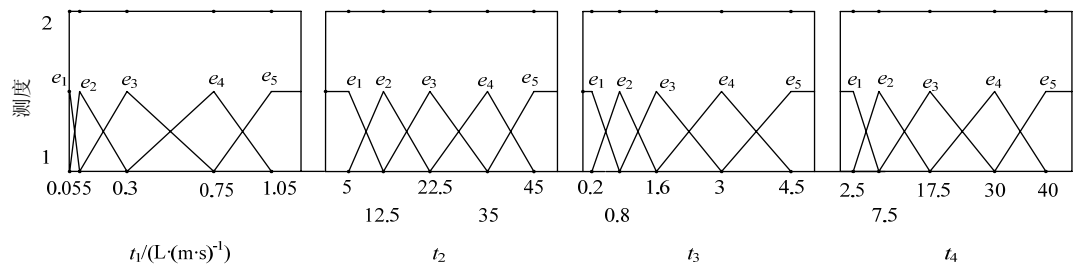


图 1 单指标测度函数
Fig.1 Uncertainty measurement function of single index

3 应用研究

为验证所建模型的有效性和可行性，笔者将所建模型应用于 5 个有此赋存情况的矿山，将评价结

果同王文学等人所建模型的评价结果比较，并与矿山实际开采状况对比。因篇幅所限，钻孔数据过多，现以其中一个矿山为例进行详细说明。

3.1 指标观测值的获取

根据收集的矿区钻孔资料，笔者对研究区域内

的 105 个钻孔数据进行分析 and 整理，并经计算得到各孔的指标观测值，具体见表 2。

表 2 指标观测值
Table 2 Observed values of index

指标 孔号	底部含水层单位 涌水量/(L·(m·s) ⁻¹)	采高/ m	覆岩 厚度/m	底部黏土层 层厚/m	导水断裂带 高度/m	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₃	<i>t</i> ₄
1	0.14	2.03	17.11	0.71	17.04	0.14	12.01	0.35	11.96
2	0.14	2.03	25.63	2.16	17.04	0.14	17.99	1.06	11.96
3	0.14	2.03	31.31	9.11	17.04	0.14	21.98	4.49	11.96
4	0.14	2.03	28.47	3.13	17.04	0.14	19.98	1.54	11.96
5	0.14	2.03	28.86	7.02	17.04	0.14	20.26	3.47	11.96
6	0.14	2.03	18.51	3.60	17.04	0.14	12.99	1.77	11.96
7	0.14	2.03	32.87	8.05	17.04	0.14	23.07	3.97	11.96

注：研究区域内钻孔数量较多，表中仅列出部分钻孔数据，其他数据见原始统计资料。

3.2 单指标未确知测度、权重及多指标综合测度

根据表 2 的统计结果，现以 1 号钻孔为例对单指标未确知测度及权重的计算进行说明，其他各钻孔均可通过此方法计算得出。由公式(4)得到钻孔 1 的单指标未确知测度评价矩阵 u_{ijk} 如下：

$$u_{ijk} = \begin{bmatrix} 0.653 & 0.347 & & \\ & & 0.935 & 0.065 \\ & & 0.250 & 0.750 \\ 0.554 & 0.446 & & \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据单指标未确知测度评价矩阵 u_{ijk} ，由公式计算得钻孔 1 的单指标权重向量 $\omega=\{\omega_1, \omega_2, \omega_3,$

$\omega_4\}=\{0.224, 0.318, 0.244, 0.214\}$ 。根据钻孔 1 的 ω, u_{ijk} ，计算可得评价对象多指标综合测度评判向量 $u_i=\{u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, u_{i4}, u_{i5}\}=\{0, 0.265, 0.173, 0.358, 0.204\}$ 。取置信度 $\delta=0.7$ ，由置信度识别准则和式(12)计算得 $s=\min\{k: \sum_{l=1}^k u_{il} \geq \delta, 1 \leq k \leq p\}=4$ ，即 1 号钻孔处煤层的开采安全性为 4 级，不是可安全开采煤层，开采前须做好相应的安全预防措施。各钻孔的单指标权重向量、多指标综合测度评判向量、评价结果及可拓评判方法评价结果见表 3 所列。

表 3 单指标权重向量、多指标综合测度评判向量、评价结果

Table 3 Weight vector of single index, evaluation vector of comprehensive measure of multi index and results of evaluation

孔号	向量			可拓 评判方法
	ω	u	<i>s</i>	
1	{0.224, 0.318, 0.244, 0.214}	{0, 0.265, 0.173, 0.358, 0.204}	4	4 级
2	{0.255, 0.244, 0.258, 0.244}	{0, 0.302, 0.416, 0.282, 0}	3	3 级
3	{0.199, 0.289, 0.322, 0.190}	{0.319, 0.238, 0.428, 0.015, 0}	3	3 级
4	{0.226, 0.244, 0.315, 0.215}	{0, 0.266, 0.649, 0.084, 0}	3	3 级
5	{0.244, 0.272, 0.251, 0.233}	{0.077, 0.463, 0.400, 0.061}	3	3 级
6	{0.213, 0.312, 0.272, 0.203}	{0, 0.285, 0.418, 0.297, 0}	3	3 级
7	{0.226, 0.334, 0.224, 0.216}	{0.145, 0.362, 0.493, 0, 0}	3	3 级

3.3 结果分析

对研究区域内的 105 个钻孔全部进行安全等级评价，根据所得结果，将研究区域进行安全等级划分绘出等安全等级线图，从而确定研究区域内可安全开采以及存在不安全性的区域。具体如图 2 所示。 $s \leq 3$ 的区域被认为是可安全开采区域，由图可看出 1, 2 工作面均处于安全开采区域，3, 4 工作面有

部分区域位于开采安全性较差的区域。

在实际开采过程中，1, 2 两工作面回采过程中，顶板正常垮落，仅工作面顶板有少量淋水，水量小于 6 m³/h，可认定是顶板砂岩水。3 工作面回采过程中，回采至 32 m 左右顶板初次来压，无明显周期来压，顶板比较破碎；回采至 45 m 左右时，顶板和巷道淋水从小于 15 m³/h 到 90 m³/h，并持续 2

d. 在涌水量突增阶段, 将 2 个第四系底部含水层水压观测孔布置在大巷内, 观测水压从 0.85 MPa 降为 0.81~0.82 MPa, 随回采工作面继续推进, 工作面涌水量有所下降, 后期涌水量监测值稳定在 10 m³/h 附近, 水压恢复到 0.85 MPa 左右。可见在研究区域内, 回采工作面导水裂隙已贯通第四系底部含水层, 因而, 将会给回采工作带来较多困难及不安全因素。在所研究区域内, 根据已进行回采工作的 1, 2, 3 工作面的状况, 不难看出所建模型在研究区域内, 对薄基岩厚松散含水层下采煤的安全性评价较为准确, 与实际情况吻合较好。建议 4 工作面在回采前, 做好相应的预防措施。

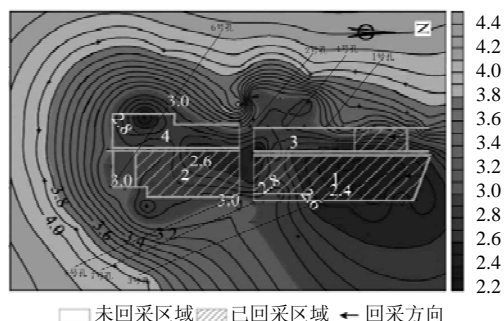


图2 可安全开采区域划定

Fig.2 Prediction of safety mining area

笔者将所建模型计算所得的每个钻孔的评价结果与王文学等人提出的可拓评判方法所得结果进行比较,如表3所列。5个矿山共计373个钻孔中,评价结果一致的个数达到了361个,完全不同的4个,近似的8个,一致率达到了96.78%。比较结果也说明未确知测度理论在薄基岩厚松散含水层下采煤的安全性评价中同可拓评判方法一样可行。另外,在其他4个矿山的应用情况也表明,模型所得结果,与开采实际情况吻合度较高。

4 结 论

经过对薄基岩厚松散含水层下采煤问题的系统研究和分析,发现厚松散层底部含水层单位涌水量、厚松散层底部黏土层厚度、覆岩厚度、导水断裂带高度和采高 5 个因素为影响薄基岩厚松散含水层下采煤综合安全性的关键因素。

对关键因素进一步处理,初步找出了关键因素影响薄基岩厚松散含水层下采煤安全性的联结点。将5个关键因素变为4个评价因子,并将各评价因子划分成5个等级;进而量化薄基岩厚松散含水层下采煤的综合安全性,使之能被定量评价。

采用分段插值的思想,构造了与实际情况吻合度较高的单指标测度函数,建立并提出了一种新的评价基岩厚松散含水层下采煤综合安全性的模型——未确知测度模型。在评价过程中,引入信息熵确定各评价指标权重,充分利用了数据本身所提供的信息,解决了不同类型安全隐患下,评价指标权重变化,难以进行综合评定的问题。

通过工程实践,证明所研究煤层赋存条件下,未确知测度模型是可行的、有效的。通过与已有方法的比较,发现未确知测度理论完全可以起到已有方法的功能和效果,为薄基岩厚松散含水层下煤层安全开采区域划定和预测提供了一种新的途径。

影响因素多少、指标分级标准等在大多数情况下极大地影响评价结果,进而影响安全区域的划定和预测。目前在影响薄基岩厚松散含水层下采煤安全性的因素、薄基岩厚松散含水层下采煤综合安全性分级和评价指标分级等问题上,尚无统一标准,仍有待进一步研究。其中,若研究区域内地质构造较发育,还应考虑地质构造对评价结果的影响。

参考文献:

- [1] 杨伟峰, 薄基岩采动破断及其诱发水砂混合流运移特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [2] 李振华, 丁鑫品, 程志恒. 薄基岩煤层覆岩裂隙演化的分形特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 576-580.
LI Zhenhua, DING Xinpin, CHENG Zhiheng. Research on fractal characteristics of overlying strata crack evolution in coal seam with thin bedrock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 576-580.
- [3] 隋旺华, 梁艳坤, 张改玲, 等. 采掘中突水溃砂机理研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(11): 5-9. SUI Wanghua, LIANG Yankun, ZHANG Gailing, et al. Study status and outlook of risk evaluation on water inrush and sand inrush mechanism of excavation and mining[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(11): 5-9.
- [4] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 松散承压含水层下采煤突水机理与防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(3): 333-339.
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. Mechanism and prevention during coal mining under unconsolidated confined aquifer[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(3): 333-339.
- [5] 黄万朋, 夏方迁, 赵春景, 等. 松散冲积层下提高煤层群开采上限研究[J]. 煤炭工程, 2012(5): 82-84. HUANG Wanpeng, XIA Fangqian, ZHAO Chunjing, et al.

- et al. Study on upper limit increased of seam group mining under incompact alluvium[J]. Coal Engineering, 2012(5): 82-84.
- [6] 王怀玉, 牟允军, 曾现营. 安全煤岩柱性能研究及综合评价[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(增刊 1): 86-89. WANG Huaiyu, MU Yunjun, ZENG Xianying. Study and safety evaluation on coal and rock pillar capability[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(Sup 1): 86-89.
- [7] 郭惟嘉, 陈绍杰, 李法柱. 厚松散层薄基岩条带法开采采留尺度研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 747-751. GUO Weijia, CHEN Shaojie, LI Fazhu. Study on strip mining size under thick alluvium and thin bedrock[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6): 747-751.
- [8] 代长青, 宣以琼, 杨本水. 含水松散层下风氧化带内煤层安全开采技术[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(7): 22-26. DAI Changqing, XUAN Yiqiong, YANG Benshui. Safety mining technology for coal seam in air oxidized zone under water bearing soft strata[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(7): 22-26.
- [9] 陈玉岭, 高荣久, 周锦华, 等. 在地表大型水体及巨厚含水松散层下综放采煤[J]. 矿山测量, 2006(1): 79-81. CHEN Yuling, GAO Rongjiu, ZHOU Jinhua, et al. Fully-mechanized coal mining with caving of roof coal under the large surface water body and ultra-thick water-bearing ravelly ground[J]. Mine Surveying, 2006(1): 79-81.
- [10] 王文学, 隋旺华, 赵庆杰, 等. 可拓评判方法在厚松散层薄基岩下煤层安全开采分类中的应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1783-1789. WANG Wenxue, SUI Wanghua, ZHAO Qingjie, et al. Application of extenics classification method to coal mining safety evaluation under thick unconsolidated formations and thin bedrocks[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1783-1789.
- [11] 唐海, 万文, 刘金海. 基于未确知测度理论的地下洞室岩体质量评价[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1181-1185. TANG Hai, WAN Wen, LIU Jinhai. Evaluation of underground cavern rock quality based on uncertainty measure theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1181-1185.
- [12] 史秀志, 周健, 董蕾, 等. 未确知测度模型在岩爆烈度分级预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 2720-2726. SHI Xiuzhi, ZHOU Jian, DONG Lei, et al. Application of unascertained measurement model to prediction of classification of rockburst intensity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1): 2720-2726.
- [13] 王兴明, 董陇军, 付玉华. 基于未确知均值分类理论的岩爆发生和分级预测方法[J]. 科技导报, 2009, 27(18): 78-81. WANG Xingming, DONG Longjun, FU Yuhua. Prediction of possibility and the level of rockburst based on uncertain average graded analysis method[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(18): 78-81.
- [14] 董陇军, 王飞跃. 基于未确知测度的边坡地震稳定性综合评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(4): 74-78. DONG Longjun, WANG Feiyue. Comprehensive evaluation on seismic stability of slopes based on unascertained measurement[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(4): 74-78.
- [15] 曾佳龙, 黄锐, 关燕鹤, 等. 熵权-未确知测度理论在尾矿库安全标准化中的应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014(2): 160-166. ZENG Jialong, HUANG Rui, GUAN Yanhe, et al. Research on application of entropy-unascertained measure theory in tailing pond safety standardization[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014(2): 160-166.
- [16] 许延春, 李振华, 贾安立, 等. 深厚松散层薄基岩条件下覆岩破坏高度实测分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(7): 21-23. XU Yanchun, LI Zhenhua, JIA Anli, et al. Site measurement and analysis on failure height of overburden strata under thick loose alluvium and thin bedrock[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(7): 21-23.