

# 煤矿瓦斯爆炸事故演化危险性评价的 AHP - GT 模型及应用

施式亮<sup>1,2</sup> 李润求<sup>1,2</sup>

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学 资源与安全工程学院 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 分析了传统瓦斯危险性评价方法与模型存在的问题,通过对煤矿瓦斯爆炸“人-机-环境-管理”复杂非线性系统分析,建立生产人员素质因素、生产装备因素、环境条件因素、安全管理因素等 4 个大类和 27 个小类的危险性评价指标体系。在层次分析法和灰色聚类法等研究基础上,构建了煤矿瓦斯爆炸事故演化危险性评价的非线性多层次灰色评价模型(AHP-GT),确定了评价模型中评价灰类的等级数、灰数及白化权函数。根据评价灰类及白化权函数的非线性,修订了评价目标综合评价等级标准。给出了评价实例,评价结果符合实际。

**关键词:** 煤矿; 瓦斯爆炸; 事故演化; 危险性评价; 层次分析法; 灰色聚类; 非线性  
中图分类号: TD712.7 文献标志码: A

## Research and application of AHP-GT model of gas explosion accident evolution risk assessment in coal mine

SHI Shi-liang<sup>1,2</sup>, LI Run-qiu<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy & Safety Engineering Hunan University of Science & Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Resource & Safety Engineering, Central Southern University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The problems of traditional risk assessment model of gas explosion were analyzed. Based on Human-Machine-Environment-Management complex non-linear system, the risk assessment index system about four major categories and 27 sub-categories include the quality of factors of production personnel and the production equipment factors and the environmental conditions factors and the safety management factors was established. The non-linear multilevel gray evaluation model (AHP-GT) of risk assessment of gas explosion accident evolution in coal mine was established based on AHP and gray clustering method. The risk assessment grade and the gray type and whitening weight function were classified and defined. The evaluation of objective comprehensive evaluation rating criteria was amended according to the nonlinear of whitening weight function. The risk assessment example was given and the results conform to reality.

**Key words:** coal mine; gas explosion; accident evolution; risk assessment; analytic hierarchy process (AHP); gray theory (GT); nonlinear

煤矿事故中尤以瓦斯爆炸事故所造成的人员和经济损失最大。加强煤矿瓦斯爆炸事故演化危险性评价是预防与控制瓦斯爆炸事故的重要手段。2003 年国家煤矿安全监察局印发了《煤矿安全评价导则》,其目的是贯彻“安全第一,预防为主”的方针,提

高煤矿的本质安全程度和安全管理水平,预防和控制事故的发生。

传统煤矿瓦斯爆炸危险性评价方法主要有安全检查表、瓦斯灾害指标评分法、作业区域瓦斯爆炸危险评价法和隧道安全评价法等<sup>[1-2]</sup>。随着现代应用

数学、计算机科学、人工神经网络、非线性科学、复杂性科学等的发展和应 用,安全评价理论与技术也得到了极大发展<sup>[3-4]</sup>,文献[5]基于危险源理论构建了采煤工作面瓦斯爆炸危险源风险预警指标体系,应用模糊数学理论进行模糊综合评价,文献[6]采用层次分析法和模糊数学结合对采掘工作面瓦斯爆炸危险性进行了评价,文献[7]应用模糊数学、层次分析法和灰色关联度法构建矿井瓦斯安全评价的数学模型,均取得了较好效果。

煤矿井下生产系统,是在地表以下一定深度的生产活动,在空间上是立体分布,同时又随着时间动态发展,其运行过程及状态有其独特的特性,是多因素、多变量、多层次的“人-机-环境-管理”复杂系统,因素间相互作用、相互影响,具有非线性特性<sup>[8-11]</sup>,是典型的灰色系统<sup>[1]</sup>,瓦斯爆炸事故演化危险性评价指标体系是涉及煤矿安全各方面相互联系、相互制约的因素构成的一个有机整体。

传统评价方法有的过于简单,有的因子取值不合理,同时缺乏从“人-机-环境-管理”复杂系统来分析和构建评价指标体系。非线性多层次灰色分析评价法<sup>[12-15]</sup>是将传统层次分析法和灰色系统理论相结合的一种综合分析方法,通过将评价专家的分散信息处理成一个描述不同灰类的权向量,在该基础上再对其单值化处理,便可得到待评目标的综合评价值。

### 1 非线性多层次灰色评价模型

煤矿瓦斯爆炸事故演化危险性评价的非线性多层次灰色评价模型基本结构如图 1 所示。

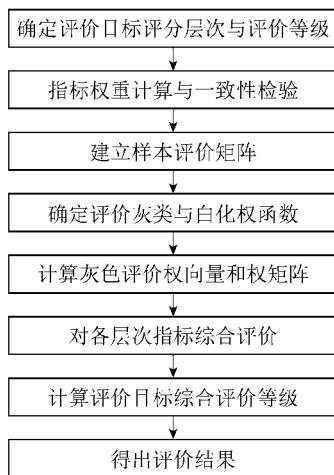


图 1 非线性多层次灰色评价模型基本结构

Fig. 1 The model of AHP-GT

(1) 确定评价目标的层次结构与评分等级标准  
分析煤矿瓦斯爆炸事故演化危险性评价目标所

包含的因素及其相互关系,按照不同的属性自上而下分解成目标层、领域层和指标层。将评价指标中定性指标转换为定量指标,并将指标归一化,各层次划分为“安全”、“较安全”、“一般安全”、“较不安全”、“不安全”5 个等级,对应分值分别为 5、4、3、2、1。

#### (2) 评价指标权重计算与一致性检验

在煤矿瓦斯爆炸事故演化危险性评价指标体系层次结构中,采用 1~9 位标度法对于从属于上一层的每个因素的同一层诸因素  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  进行两两比较,构成判断矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  ( $i$  为领域层指标数; $j$  为指标层指标数; $n$  为同一领域层或指标层指标数)。求  $R$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$ ,分别获得各层次的权重集,领域层权重集  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i\}$ ,且满足  $A_i \geq 0, \sum_{i=1}^i A_i = 1$ ; 指标层权重集  $A_i = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ik_i}\}$  ( $k_i$  为第  $i$  个领域层的指标数),且满足  $A_{ij} \geq 0, \sum_{j=1}^{k_i} A_{ij} = 1$ ,根据式(1)、(2)计算一致性指标  $C_1$  和随机一致性比率  $C_R$ ,当  $C_R < 0.10$  时认为判断矩阵具有满意的一致性,否则需要调整判断矩阵。

$$C_1 = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

$$C_R = C_1 / R_1 \quad (2)$$

式中,  $R_1$  为平均随机一致性指标。

#### (3) 建立评价样本矩阵

组织评价专家根据各指标的实测值和专业经验对  $m$  个待评煤矿按评价指标  $U_{ij}$  评分等级进行打分,记为  $d_{ijp}^{(m)}$ ,并填写评价专家评分表,通过数据归一化处理,建立评价样本矩阵  $D^{(m)}$ :

$$D^{(m)} = \begin{pmatrix} d_{111}^{(m)} & d_{112}^{(m)} & \dots & d_{11p}^{(m)} \\ d_{121}^{(m)} & d_{122}^{(m)} & \dots & d_{12p}^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{ij1}^{(m)} & d_{ij2}^{(m)} & \dots & d_{ijp}^{(m)} \end{pmatrix}$$

式中  $p$  为评价专家数。

#### (4) 确定评价灰类

确定评价灰类就是要确定评价灰类的等级数、灰类的灰数及灰类的白化权函数。白化权函数的阈值可以从评价样本以外,按照某种准则或经验,用类比的方法获得,这样得到的阈值称为客观阈值。也可以从评价样本矩阵  $D^{(m)}$  中寻找最大、最小和中等值,作为上限、下限和中等的阈值,这种阈值称为相对阈值。评价灰类及白化权函数见表 1。

#### (5) 计算灰色评价权向量和权矩阵

计算第  $m$  个煤矿的领域层指标  $U_i$  所属指标层指标  $U_{ij}$  对于各评价灰类的灰色评价权矩阵  $Q_i^{(m)}$ :

$$Q_i^{(m)} = \begin{pmatrix} q_{i1}^{(m)} \\ q_{i2}^{(m)} \\ \vdots \\ q_{ij}^{(m)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_{i11}^{(m)} & q_{i12}^{(m)} & q_{i13}^{(m)} & q_{i14}^{(m)} & q_{i15}^{(m)} \\ q_{i21}^{(m)} & q_{i22}^{(m)} & q_{i23}^{(m)} & q_{i24}^{(m)} & q_{i25}^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{ij1}^{(m)} & q_{ij2}^{(m)} & q_{ij3}^{(m)} & q_{ij4}^{(m)} & q_{ij5}^{(m)} \end{pmatrix}$$

式中,  $q_{ije}^{(m)} = \frac{X_{ije}^{(m)}}{X_{ij}^{(m)}}$ , 灰色评价系数  $X_{ij}^{(m)} = \sum_{e=1}^5 X_{ije}^{(m)}$ ,

$X_{ije}^{(m)} = \sum_{n=1}^p f_e(d_{ijn}^{(m)})$  为第  $n$  个专家对第  $m$  个煤矿评价指标  $U_{ij}$  的评分。

表 1 评价灰类划分与白化权函数

Table 1 The gray types and whitening weight function

类别 (分值)	灰数 范围	白化权函数 $f$ 表达式
安全 (5)	$[0, 5]$	$f_5(d_{ijn}^{(m)}) = \begin{cases} d_{ijn}^{(m)} / 5 & (d_{ijn}^{(m)} \in [0, 5]) \\ 0 & (d_{ijn}^{(m)} \notin [0, 5]) \end{cases}$
较安全 (4)	$[0, 4, 5]$	$f_4(d_{ijn}^{(m)}) = \begin{cases} d_{ijn}^{(m)} / 4 & (d_{ijn}^{(m)} \in [0, 4]) \\ (8 - d_{ijn}^{(m)}) / 4 & (d_{ijn}^{(m)} \in [4, 5]) \\ 0 & (d_{ijn}^{(m)} \notin [0, 5]) \end{cases}$
一般安全 (3)	$[0, 3, 5]$	$f_3(d_{ijn}^{(m)}) = \begin{cases} d_{ijn}^{(m)} / 3 & (d_{ijn}^{(m)} \in [0, 3]) \\ (6 - d_{ijn}^{(m)}) / 3 & (d_{ijn}^{(m)} \in [3, 5]) \\ 0 & (d_{ijn}^{(m)} \notin [0, 5]) \end{cases}$
较不安全 (2)	$[0, 2, 4]$	$f_2(d_{ijn}^{(m)}) = \begin{cases} d_{ijn}^{(m)} / 2 & (d_{ijn}^{(m)} \in [0, 2]) \\ (4 - d_{ijn}^{(m)}) / 2 & (d_{ijn}^{(m)} \in [2, 4]) \\ 0 & (d_{ijn}^{(m)} \notin [0, 4]) \end{cases}$
不安全 (1)	$[0, 1, 2]$	$f_1(d_{ijn}^{(m)}) = \begin{cases} 1 & (d_{ijn}^{(m)} \in [0, 1]) \\ (2 - d_{ijn}^{(m)}) / 1 & (d_{ijn}^{(m)} \in [1, 2]) \\ 0 & (d_{ijn}^{(m)} \notin [0, 2]) \end{cases}$

(6) 综合评价

对于第  $m$  个待评煤矿的  $U_{ij}$  做综合评价, 结果为

$$B_i^{(m)} = A_i \cdot Q_i^{(m)} = (b_{i1}^{(m)} \ b_{i2}^{(m)} \ b_{i3}^{(m)} \ b_{i4}^{(m)} \ b_{i5}^{(m)})$$

由  $U_{ij}$  的综合评价结果  $B_i^{(m)}$  得到第  $m$  个待评煤矿的  $U_i$  对各类评价灰类的灰色评价权系数矩阵为

$$Q^{(m)} = \begin{pmatrix} B_1^{(m)} \\ B_2^{(m)} \\ B_3^{(m)} \\ \vdots \\ B_i^{(m)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11}^{(m)} & b_{12}^{(m)} & b_{13}^{(m)} & b_{14}^{(m)} & b_{15}^{(m)} \\ b_{21}^{(m)} & b_{22}^{(m)} & b_{23}^{(m)} & b_{24}^{(m)} & b_{25}^{(m)} \\ b_{31}^{(m)} & b_{32}^{(m)} & b_{33}^{(m)} & b_{34}^{(m)} & b_{35}^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{i1}^{(m)} & b_{i2}^{(m)} & b_{i3}^{(m)} & b_{i4}^{(m)} & b_{i5}^{(m)} \end{pmatrix}$$

(7) 计算综合评价值并排序

将各评价灰类等级按“灰水平”(阈值)赋值, 各评价灰类等级值化向量  $C = (1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5)$ , 则第  $m$  个待评煤矿的综合评价值为

$$R^{(m)} = B^{(m)} \cdot C^T$$

综合评价值  $R^{(m)}$  求出后, 可以根据  $R^{(m)}$  大小给出  $m$  个待评煤矿瓦斯爆炸事故演化危险性排序。

2 危险性评价指标体系及权重集

2.1 危险性评价指标体系

煤矿生产系统是一个动态的、随机的、模糊的、复杂的大系统, 要科学合理地对瓦斯爆炸危险进行评价, 必须要确定能够确切地反映生产系统实际状况的参数指标, 建立一个科学合理的评价指标体系。评价指标太多, 可能过分增加评价指标结构的复杂程度和评价的难度, 而掩盖了主要的关键因素; 评价指标过少, 评价过程虽简单易行, 但难以全面反映评价对象的客观状况。因此, 指标体系应能全面反映被评价对象的综合情况, 从中抓住主要因素, 既能反映直接效果, 又要反映间接效果, 以保证综合评价的全面性和可信度; 定量指标与定性指标结合使用, 既可使评价具有客观性, 便于数学模型处理, 又可弥补单纯定量评价的不足及数据本身存在的某些缺陷; 指标体系应达到技术可行、安全可靠和经济合理的目标。

为了研究煤矿瓦斯爆炸事故的危害, 寻找系统的薄弱环节以及系统安全性的技术途径, 在对瓦斯爆炸的“人 - 机 - 环境 - 管理”系统进行分析的基础上, 提出煤矿瓦斯爆炸事故演化危险性评价指标总体结构。在评价指标总体结构下, 对生产人员素质因素、生产装备因素、生产环境条件因素和安全管理因素进一步细化, 建立二级指标体系, 对所有指标进行定量和定性描述, 以适应评价模型所需的信息和数据处理要求。根据层次分析法将评价指标体系划分为目标层、领域层和指标层, 如图 2 所示。

评价指标体系既有定量化指标, 也有定性化指标, 而且指标之间的意义与单位均不一样, 因此采用分段区间法<sup>[1]</sup>进行归一化处理。

2.2 权重集

对各层次指标建立两两比较矩阵, 通过 Matlab 编程分别求出各矩阵的最大特征值和该特征值对应的归一化向量, 并做一致性检验, 分别获得各层次的权重集, 结果见表 2, 随机一致性比率  $C_R$  均  $< 0.1$ 。

3 评价实例

3.1 综合评价值计算

选取南方某矿业集团下属煤矿, 由 5 名专家对煤矿基本数据实测和评分, 获得煤矿 1 和煤矿 2 的原始数据。根据定性和定量指标进行数据处理方法分别得到评价样本数据, 建立样本矩阵  $D^{(1)}$ 、 $D^{(2)}$ 。

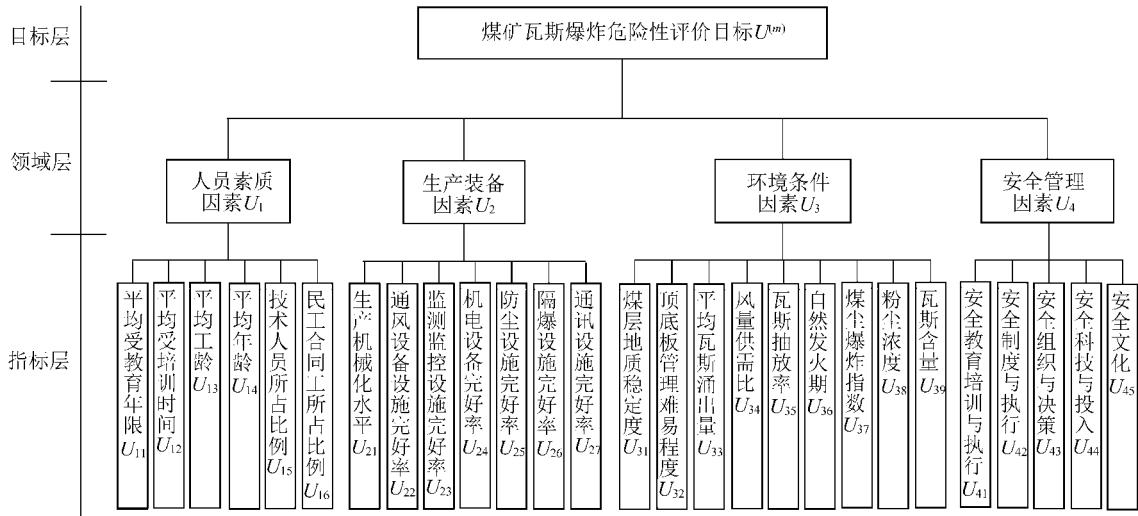


图 2 危险性评价指标体系层次结构模型

Fig. 2 The structure of the risk evaluation index system

表 2 权重集与一致性检验结果

Table 2 The weight sets and results of consistency test

权重集	$\lambda_{max}$	$i, j$	$R_1$	$C_1$	$C_R$
$A = (0.3107, 0.1464, 0.1036, 0.4393)$	4.1213	4	0.89	0.0404	0.0454
$A_1 = (0.2594, 0.0879, 0.0520, 0.0290, 0.3954, 0.1762)$	6.6006	6	1.26	0.1201	0.0953
$A_2 = (0.0909, 0.3278, 0.2563, 0.1835, 0.0427, 0.0272, 0.0716)$	7.6560	7	1.36	0.1093	0.0804
$A_3 = (0.0232, 0.0232, 0.1305, 0.2846, 0.2239, 0.0222, 0.0222, 0.0222, 0.2481)$	9.7252	9	1.46	0.0907	0.0621
$A_4 = (0.1895, 0.1249, 0.0896, 0.5230, 0.0730)$	5.1987	5	1.12	0.0497	0.0444

$$D^{(1)} = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 4 & 4 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 4 & 2 & 4 & 5 & 4 & 4 & 2 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 3 & 4 & 4 & 3 & 4 & 4 & 4 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 5 & 3 & 4 & 5 & 4 & 4 & 4 & 3 & 5 & 4 & 4 & 4 & 5 & 4 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 4 & 4 & 5 & 4 & 4 & 4 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 5 & 4 & 5 & 4 & 4 & 4 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \end{bmatrix}^T$$

$$D^{(2)} = \begin{bmatrix} 4 & 3 & 3 & 3 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 3 & 4 & 3 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 3 & 5 & 5 & 5 & 5 & 4 \\ 4 & 3 & 3 & 3 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 3 & 4 & 4 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 3 & 5 & 5 & 5 & 5 & 4 \\ 4 & 3 & 3 & 3 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 3 & 4 & 4 & 5 & 4 & 3 & 3 & 3 & 3 & 5 & 5 & 5 & 5 & 4 \\ 4 & 3 & 3 & 3 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 3 & 4 & 4 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 3 & 5 & 5 & 5 & 5 & 4 \\ 4 & 3 & 3 & 3 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 5 & 3 & 4 & 4 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 3 & 5 & 5 & 5 & 5 & 4 \end{bmatrix}^T$$

按照瓦斯爆炸危险评价模型与步骤分别对煤矿 1 和 2 进行瓦斯爆炸事故演化危险性评价结果计算, 利用 Matlab 编程计算得出综合评价值为 4.077 9 和 4.159 9。

3.2 综合评价等级修订

根据煤矿瓦斯爆炸危险评价指标打分的基本标准和评价灰类划分以及白化权函数的非线性特性, 分别取样本数据均为 1、2、3、4、5, 按照评价模型通过 Matlab 编程计算, 修订评价目标综合评价等级标准, 修订后的评价等级结果见表 3。

煤矿 1 的综合评价值为 4.077 9, 与表 3 中数值

比较, 非常接近 4.05 (较安全), 因此, 煤矿 1 的综合评价结果为“较安全”。煤矿 2 的综合评价值为 4.159 9, 与表 3 中数值比较, 介于 4.05 (较安全) 和 4.32 (安全) 之间, 接近 4.05 (较安全), 因此, 煤矿 2 的综合评价结果为“较安全”。

表 3 评价目标综合评价等级标准  
Table 3 The grand of comprehensive evaluation

等级	不安全	较不安全	一般安全	较安全	安全
$R$	2.19	3.12	3.51	4.05	4.32

由于南方煤矿本身地质条件较差, 生产装备等受到多

种地质因素影响使煤矿生产安全性具有先天不足,但是,煤矿均采取了各种措施加强安全管理和提高生产人员素质等方面以保障生产的安全。特别是煤矿 2,在安全管理方面进行加强管理、提高技术人员比例等措施,因而综合评价价值比煤矿 1 较高。评价结果和煤矿的实际情况基本一致。

#### 4 结 论

煤矿瓦斯爆炸事故演化危险性评价是贯彻“安全第一,预防为主”的方针、提高煤矿的本质安全程度和安全管理水平、预防与控制瓦斯爆炸事故的重要手段。通过分析安全检查表法、瓦斯灾害指标评分评价、作业区域瓦斯爆炸危险评价和隧道安全评价法等传统瓦斯危险性评价方法与模型存在的问题以及对煤矿瓦斯爆炸“人-机-环境-管理”复杂非线性系统分析,建立了生产人员素质因素、生产装备因素、环境条件因素、安全管理因素等 4 个大类和 27 个小类的危险性评价指标体系,应用层次分析法与灰色系统理论结合,构建非线性多层次灰色综合评价模型(AHP-GT),通过 Matlab 编程计算评价实例,评价结果符合实际情况,表明非线性多层次灰色综合评价模型与评价指标体系的可靠与实用。

#### 参考文献:

- [1] 施式亮,王海桥. 矿井安全非线性动力学评价[M]. 北京:煤炭工业出版社,2001.  
Shi Shiliang, Wang Haiqiao. Study on nonlinear dynamic safety assessment of coal mine [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001.
- [2] 张秉义,刘素兰. 煤矿安全系统工程[M]. 北京:煤炭工业出版社,1995.  
Zhang Bingyi, Liu Sulan. Safety system engineering in coal mine [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1995.
- [3] 李润求,施式亮,彭新. 矿井通风系统安全评价方法及发展趋势[J]. 中国安全科学学报,2008,18(1):112-118.  
Li Runqiu, Shi Shiliang, Peng Xin. Summarization of safety assessment methods for mine ventilation system [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(1): 112-118.
- [4] 施式亮,王鹏飞,李润求. 工业安全评价方法与矿井安全评价技术综述[J]. 湘潭矿业学院学报,2002,17(4):5-8.  
Shi Shiliang, Wang Pengfei, Li Runqiu. Summarization of assessment methods of industrial safety and technology of safety assessment for coal mines [J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2002, 17(4): 5-8.
- [5] 曹树刚,王艳平,刘延保,等. 基于危险源理论的煤矿瓦斯爆炸风险评价模型[J]. 煤炭学报,2006,31(4):470-474.  
Cao Shugang, Wang Yanping, Liu Yanbao, et al. Risk assessment model of gas explosion in coal mine based on the hazard theory [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4): 470-474.
- [6] 屈娟,田水承,从奎,等. 基于 AHP 的煤矿瓦斯爆炸事故危险性分析与评价[J]. 矿业安全与环保,2008,35(4):77-79.  
Qu Juan, Tian Shuicheng, Cong Changkui, et al. Analysis and evaluation of coal mine gas explosion accident evolution based on AHP [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35(4): 77-79.
- [7] 刘海涛. Gray-FAHP 集成法在矿井瓦斯安全评价中的应用[J]. 黑龙江科技学院学报,2009,19(3):173-176.  
Liu Haitao. Application of Gray-FAHP integration method to mine gas safety evaluation [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2009, 19(3): 173-176.
- [8] 施式亮,梁小玲. 瓦斯爆炸事故的混沌特性及其控制方法初探[J]. 中国安全科学学报,2003,13(9):54-58.  
Shi Shiliang, Liang Xiaoling. Preliminary probe into chaotic characteristics and their control measures for gas explosion [J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(9): 54-58.
- [9] 李润求,施式亮,彭新. 煤矿瓦斯爆炸事故演化的突变模型[J]. 中国安全科学学报,2008,18(3):22-27.  
Li Runqiu, Shi Shiliang, Peng Xin. Catastrophe model of accident evolution of gas explosion in coal mines [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(3): 22-27.
- [10] 施式亮,何利文. 矿井安全非线性动力学评价及过程可视化[J]. 煤炭学报,2005,30(6):746-750.  
Shi Shiliang, He Liwen. Study on nonlinear dynamic safety assessment and its process visualization of coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 746-750.
- [11] 何利文,施式亮,宋译,等. 回采工作面瓦斯涌出的复杂性及其度量[J]. 煤炭学报,2008,33(5):547-550.  
He Liwen, Shi Shiliang, Song Yi, et al. Complexity and measurement of complex degree of gas gush in heading faces of coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5): 547-550.
- [12] 王起全,金哲龙. 大型活动拥挤踩踏事故灰色层次分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(社会科学版),2008,10(5):500-503.  
Wang Qiquan, Jin Zhelong. Analysis of GAHP in crowded stampede accidents of large-scale activities [J]. Journal of Liaoning Technical University (Social Science Edition), 2008, 10(5): 500-503.
- [13] 孙燕,姚林,孙峥. 城市生态安全多层次灰色综合评价[J]. 中国安全科学学报,2008,18(2):143-149.  
Sun Yan, Yao Lin, Sun Zheng. Multi-layer grey comprehensive evaluation on urban eco-security [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(2): 143-149.
- [14] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报,2008,18(5):148-153.  
Guo Jinyu, Zhang Zhongbin, Sun Qingyun. Study and applications of analytic hierarchy process [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 148-153.
- [15] 魏效玲. 基于系统层次灰关联分析理论的刮板链可靠性评价[J]. 煤炭学报,2007,32(12):1320-1323.  
Wei Xiaoling. Appraisal on flight chain reliability based on system level gray correlation analysis [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1320-1323.