

陈孝国, 杜红, 高尔新, 等. 煤层自燃危险性的模糊-可拓理论判别模型[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 29-33. [Chen Xiaoguo, Du Hong, Gao Erxin, et al. The Discriminative Model to the Spontaneous Risk of Coal Seam Based on Fuzzy Extension Theory [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 29-33.]

煤层自燃危险性的模糊——可拓理论判别模型^{*}

陈孝国^{1,2}, 杜红², 高尔新¹, 孙显龙¹

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 黑龙江科技大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要: 首先确定了影响煤层自燃的因素指标, 并对它隶属于不同自燃等级的取值进行了无量纲化处理, 采用模糊层次分析法确定了各个因素权重, 利用可拓学理论建立了煤层自燃危险性判别模型。其次, 以山东新汶矿业孙村煤矿十三层煤为例, 采用模型方法对其自燃危险性进行了评价, 所得结果与煤科院的自燃鉴定结论一致。上述研究不仅丰富了煤层自燃危险性评价方法, 而且也预防此类灾害起到了一定的参考和借鉴作用。

关键词: 可拓学; 模糊层次分析法; 煤层自燃; 危险性

中图分类号: TD75; X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)03-0029-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.03.006

我国的煤层自燃现象十分严重, 国有煤矿中60%以上的矿井存在煤层自燃发火危险, 煤层自燃每年都导致大量煤炭资源的浪费, 引起严重的环境污染问题, 并造成大量材料损失和人员伤亡, 由矿井煤层自燃造成的直接和间接经济损失近百亿元^[1]。所以, 研究煤层自燃危险性及其发火期对此类灾害的预防意义重大, 科研工作者先后采用了多种方法来判别煤层自燃危险性及其估测煤的自燃发火期, 宋志等提出人工神经网络预测模型^[2], 但由于前提需要大量学习样本进行训练网络, 故没有进行实际应用。余明高等^[3-4]在原苏联学者卡连金提出的计算煤层最短发火期模型^[5]的基础上, 综合考虑了氧化放热反应对模型精度的影响。谢振华等利用模糊综合评价法预测了煤层自燃危险性级别, 但没有进行实际应用检验^[6]。邓军等建立了G(0, 5)灰色预测模型^[7], 张辛亥等利用多层人工神经网络模型计算出了煤的自燃发火期^[8], Sallu H B等建立了模糊逻辑和人工神经网络综合预测煤的自燃倾向性模型^[9], 邓军等利用回归分析的方法预测了煤自燃发火期^[10]。目前, 借助于可拓理论来研究煤的自燃危险性的文献比较少, 虽然谭波等用物元理论研究了煤自燃危险性, 但是选用的评价指标较少, 同时处理数据时也没有进行无量纲化处理^[11]。基于此, 本文首先分析整理了影响煤自燃的因素指标, 同时将它隶属于不

同自燃等级的区间数据进行了无量纲化处理, 之后利用模糊层次分析法确定了各因素指标权重, 借助于可拓理论建立了煤层自燃危险性判别数学模型, 最后将山东新汶矿业孙村煤矿十三层煤进行了模型求解。

1 煤层自燃危险性判别模型

1.1 影响煤层自燃的因素

煤层自燃的发生和发展是一个极其复杂的动态变化过程, 它的主要影响因素包括煤氧化放热性能、供氧条件以及蓄放热环境等三大类^[6]。而煤氧化放热性能的大小与煤的分子活性结构、煤与氧接触面积、煤的温度、氧化浓度等因素有关。供氧条件主要包括扩散供氧和漏风供氧, 而漏风供氧是引起自燃的主要因素, 在巷道高冒区、地质构造带、巷道变形等裂隙发育之处都存在漏风供氧条件。引起煤体漏风的主要原因有: 因巷道煤体内氧化升温而形成的热风压; 因巷道与相邻采空区相通, 由通风系统形成的巷道风流压差; 由于巷道风阻、起伏、变形等局部阻力而引起的风流动压差, 蓄放热环境主要考虑煤体自身和周围的散热条件, 在巷道中, 松散煤体氧化产生的

^{*} 收稿日期: 2014-01-02 修回日期: 2014-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51105135); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12531577); 黑龙江科技大学青年才俊资助项目(2012)

作者简介: 陈孝国(1978-), 男, 黑龙江克东人, 博士研究生, 主要从事模糊决策、煤矿安全方面研究。E-mail: kjdxcxg@sohu.com

热量主要由煤体自身传导散热、漏风流散热和巷道风流对流散热三种方式带走。

设煤层自燃评价因素集

$$V = \{V_1, V_2, V_3\}, \quad (1)$$

$$V_1 = \{\nu_{11}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{14}\}, \quad (2)$$

$$V_2 = \{\nu_{21}, \nu_{22}, \nu_{23}, \nu_{24}, \nu_{25}, \nu_{26}, \nu_{27}\}, \quad (3)$$

$$V_3 = \{\nu_{31}, \nu_{32}, \nu_{33}, \nu_{34}\}, \quad (4)$$

式中: V_1 为煤氧化放热性能; V_2 为供氧条件; V_3 为蓄散热环境; ν_{11} 为煤的吸氧量; ν_{12} 为 CO 单位温升率; ν_{13} 为煤体粒度; ν_{14} 为煤的硬度; ν_{21} 为巷道布置; ν_{22} 为开采速度; ν_{23} 为巷道风速; ν_{24} 为漏风风速; ν_{25} 为漏风压差; ν_{26} 为煤体空隙率; ν_{27} 为遗煤厚度; ν_{31} 为煤层厚度; ν_{32} 为区域围岩温度; ν_{33} 为顶板岩性; ν_{34} 为巷道风流温度。

设煤层自燃评价等级集

$$U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}, \quad (5)$$

式中: U_1 为易自燃; U_2 为自燃; U_3 为可能自燃; U_4 为不易自燃。

谢振华等给出了煤层自燃评价因素集相对于等级集的确定标准^[6](表 1), 本文将这些数据按原国红等的无量纲处理方法^[12], 即

(1) 效益型(指标值越大煤层越不易自燃):

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & (x \geq x_{\max}); \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & (x_{\min} \leq x \leq x_{\max}); \\ 0, & (x \leq x_{\min}). \end{cases} \quad (6)$$

(2) 成本型(指标值越小煤层越不易自燃):

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & (x \leq x_{\min}); \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, & (x_{\min} \leq x \leq x_{\max}); \\ 0, & (x \geq x_{\max}). \end{cases} \quad (7)$$

进行数据处理, 得到了各因素相对于煤层自燃等级的区间隶属度(表 1)。表中数据可以看作可拓理论中的经典域, 节域均为 0 ~ 1。

1.2 模糊层次分析法

为确定各影响因素的权重, 首先要构建模糊一致矩阵^[13], 所谓模糊一致矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 是指满足:

$$(1) 0 \leq a_{ij} \leq 1 (i, j = 1, 2, \dots, n);$$

$$(2) a_{ij} + a_{ji} = 1 (i, j = 1, 2, \dots, n);$$

$$(3) \forall i, j, a_{ij} = w_i - w_j + 0.5。$$

如果 A 为模糊一致矩阵, 则权重 W 可用式 $w_i =$

$$\frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} + 1 - \frac{n}{2} \right) \text{ 来计算。需要注意的是, 当 } \sum_{j=1}^n a_{ij} \leq \frac{n}{2} - 1 \text{ 时, 需要进行修改, 直至满足 } w_i \geq 0。$$

以煤的吸氧量、CO 单位温升率、煤体粒度、煤的硬度为例, 首先确定判断矩阵(表 2)。

表 1 各因素相对于自燃等级的区间隶属度

指标	隶属度			
	易自燃	自燃	可能自燃	不易自燃
ν_{11}	0 ~ 0.20	0.20 ~ 0.60	0.60 ~ 0.80	0.80 ~ 1
ν_{12}	0 ~ 0.17	0.17 ~ 0.67	0.67 ~ 0.83	0.83 ~ 1
ν_{13}	0 ~ 0.07	0.07 ~ 0.33	0.33 ~ 0.67	0.67 ~ 1
ν_{14}	0 ~ 0.25	0.25 ~ 0.50	0.50 ~ 0.75	0.75 ~ 1
ν_{21}	0 ~ 0.25	0.25 ~ 0.50	0.50 ~ 0.75	0.75 ~ 1
ν_{22}	0 ~ 0.22	0.22 ~ 0.53	0.53 ~ 0.76	0.76 ~ 1
ν_{23}	0 ~ 0.17	0.17 ~ 0.67	0.67 ~ 0.83	0.83 ~ 1
ν_{24}	0 ~ 0.25	0.25 ~ 0.50	0.50 ~ 0.75	0.75 ~ 1
ν_{25}	0 ~ 0.30	0.30 ~ 0.50	0.50 ~ 0.70	0.70 ~ 1
ν_{26}	0 ~ 0.47	0.47 ~ 0.71	0.71 ~ 0.82	0.82 ~ 1
ν_{27}	0 ~ 0.10	0.10 ~ 0.30	0.30 ~ 0.55	0.55 ~ 1
ν_{31}	0 ~ 0.16	0.16 ~ 0.57	0.57 ~ 0.86	0.86 ~ 1
ν_{32}	0 ~ 0.14	0.14 ~ 0.43	0.43 ~ 0.71	0.71 ~ 1
ν_{33}	0 ~ 0.25	0.25 ~ 0.50	0.50 ~ 0.75	0.75 ~ 1
ν_{34}	0 ~ 0.26	0.26 ~ 0.38	0.38 ~ 0.50	0.50 ~ 1

表 2 判断矩阵

A	煤的吸氧量	CO 单位温升率	煤体粒度	煤的硬度
煤的吸氧量 / (ml · g ⁻¹)	0.5	0.4	0.7	0.7
CO 单位温升率 / (10 ⁻⁶ · °C ⁻¹)	0.6	0.5	0.8	0.8
煤体粒度 / cm	0.3	0.2	0.5	0.5
煤的硬度 / %	0.3	0.2	0.5	0.5

近而求解权重向量

$$w_A = (0.2875, 0.3375, 0.1875, 0.1875)。 \quad (8)$$

同理可以计算其它影响因素关于煤自燃的权重, 详细情况见表 3。

表 3 影响因素权重汇总表

一级指标	二级指标	一级权重	二级权重
氧化放热性能	煤的吸氧量	0.2021	0.2875
	CO 单位温升率		0.3375
	煤体粒度		0.1875
	煤的硬度		0.1875
供氧条件	巷道布置	0.5878	0.1875
	开采速度		0.1143
	巷道风速		0.1552
	漏风风速		0.1445
	漏风压差		0.1435
	煤体空隙率		0.1327
	遗煤厚度		0.1232
蓄散热环境	煤层厚度	0.2101	0.2121
	区域围岩温度		0.3121
	顶板岩性		0.2635
	巷道风流温度		0.2123

1.3 可拓物元理论

可拓评价是定性与定量相结合的方法, 通过物元可拓性进行定性描述, 利用关联函数进行量化计算, 一般计算步骤如下^[14]。

(1) 建立可拓物元 $Q = (U, V, A)$ 。式中 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\}$ 为物, 是煤层自燃危险性等级集, $V = \{V_1, V_2, V_3\}$ 为影响煤层自燃的因素集, A 为 U 关

于 V 的评价集。

(2) 经典域及节域。煤层自燃危险性等级的经典域 Q_{ji} 表示如下:

$$Q_{ji} = (U_j, V_i, A_j) = \left(\begin{matrix} U_j & V_{i1} & \langle a_{ji1} & , & b_{ji1} \rangle \\ & V_{i2} & \langle a_{ji2} & , & b_{ji2} \rangle \\ & \dots & \dots & & \dots \\ & V_{il} & \langle a_{jil} & , & b_{jil} \rangle \end{matrix} \right) \quad (9)$$

式中: U_j 是第 j 级危险性等级, $j = 1, 2, 3, 4$; v_{ik} 为 U_j 的影响因子, $k = 1, 2, \dots, l$, $i = 1, 2, 3$; A_j 为 U_j 关于影响因子的取值范围。

节域 Q_{ui} 表示为:

$$Q_{ui} = (U, V, A_u) = \left(\begin{matrix} U & v_{i1} & \langle a_{ui1} & , & b_{ui1} \rangle \\ & v_{i2} & \langle a_{ui2} & , & b_{ui2} \rangle \\ & \dots & \dots & & \dots \\ & v_{il} & \langle a_{uil} & , & b_{uil} \rangle \end{matrix} \right) \quad (10)$$

式中: U 为全部危险性等级; A_u 为 v_{ik} 的取值范围。

(3) 关联度计算。设 m_{ik} 为待评对象关于 v_{ik} 的值, $A_{jk} = \langle a_{jik}, b_{jik} \rangle$, $A_u = \langle a_{uik}, b_{uik} \rangle$, 则待评对象对于经典域及节域的距为:

$$\rho(m_{ik}, A_{jk}) = \left| m_{ik} - \frac{a_{jik} + b_{jik}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{jik} - a_{jik}), \quad (11)$$

$$\rho(m_{ik}, A_u) = \left| m_{ik} - \frac{a_{uik} + b_{uik}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{uik} - a_{uik}). \quad (12)$$

采用关联函数

$$k_1(m_{ik}) = \begin{cases} \frac{\rho(m_{ik}, A_{jk})}{\rho(m_{ik}, A_u) - \rho(m_{ik}, A_{jk})}, & \rho(m_{ik}, A_u) \neq \rho(m_{ik}, A_{jk}); \\ -\frac{\rho(m_{ik}, A_{jk})}{b_{jik} - a_{jik}}, & \rho(m_{ik}, A_u) = \rho(m_{ik}, A_{jk}). \end{cases} \quad (13)$$

进行关联度计算。

(4) 可拓评价。

$$K(N_i) = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ik}) \cdot \begin{pmatrix} k_1(m_{i1}) & k_2(m_{i1}) & k_3(m_{i1}) & k_4(m_{i1}) \\ k_1(m_{i2}) & k_2(m_{i2}) & k_3(m_{i2}) & k_4(m_{i2}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_1(m_{ik}) & k_2(m_{ik}) & k_3(m_{ik}) & k_4(m_{ik}) \end{pmatrix}, i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

$$K(N) = w_1 \cdot K(N_1) + w_2 \cdot K(N_2) + w_3 \cdot K(N_3) = (K_1(N), K_2(N), K_3(N), K_4(N)). \quad (15)$$

式中: $K(N_i)$ 为第一层因素的关联度矩阵, $K(N)$ 为第二层因素的关联度矩阵。

按照 $k_{\max}(N) = \max_{j=1,2,3,4} k_j(N)$ 确定待评对象的等级。

令

$$\bar{k}_j(N) = \frac{k_j(N) - \min_j k_j(N)}{\max_j k_j(N) - \min_j k_j(N)}, \quad (16)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^4 j \cdot \bar{k}_j(N)}{\sum_{j=1}^4 \bar{k}_j(N)}, \quad (17)$$

式中: j^* 是级别变量特征值, 表示级别的偏向程度。

2 山东新汶矿业孙村煤矿煤层自燃分析

2.1 矿区背景资料^[15]

以 2005 年山东新汶矿业孙村煤矿十三层煤 31317 工作面为例, 地面标高为 +186.89 m, 煤层稳定, 结构简单, 可采指数为 1, 煤层变异系数为 6.5%。煤层厚度 1.94 ~ 2.72 m, 平均煤厚 2.23 m。煤的物理性质: 黑色、粉末黑褐色, 容重为 1.36, 硬度小, 断口呈阶梯状, 性脆且易碎, 导电性弱, 煤的分子活性较强。因巷道与相邻采空区相通, 由通风系统形成的巷道风流压差使得漏风供氧条件存在。巷道中煤体氧化产生的热量由煤体自身传导散热、漏风流散热和巷道风流对流散热等方式带走。工作面瓦斯等级为低级, 煤尘爆炸指数为 36.14%, 原始地温为 40 ~ 41 °C, 地压为 2 518.65 ~ 2 863.60 T/m²。通过对层煤 31317 工作面实测和实验分析, 得到待评煤层危险性可拓物元 $Q = (R, V, A)$ 如下:

$$Q_1 = [R, V, A] = \begin{bmatrix} R_1 & v_{11} & 0.23 \\ & v_{12} & 0.77 \\ & v_{13} & 0.45 \\ & v_{14} & 0.34 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$Q_2 = [R, V, A] = \begin{bmatrix} R_2 & v_{21} & 0.26 \\ & v_{22} & 0.58 \\ & v_{23} & 0.47 \\ & v_{24} & 0.86 \\ & v_{25} & 0.27 \\ & v_{26} & 0.78 \\ & v_{27} & 0.49 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$Q_3 = [R, V, A] = \begin{bmatrix} R_3 & v_{31} & 0.21 \\ & v_{32} & 0.65 \\ & v_{33} & 0.37 \\ & v_{34} & 0.89 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

2.2 危险性计算

2.2.1 建立经典域及节域

以煤氧化放热性能为例, 经典域和节域的计算如下。

经典域:

$$Q_{11} = \begin{bmatrix} U_1 & v_{11} & \langle 0, 0.20 \rangle \\ & v_{12} & \langle 0, 0.17 \rangle \\ & v_{13} & \langle 0, 0.07 \rangle \\ & v_{14} & \langle 0, 0.25 \rangle \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$Q_{21} = \begin{bmatrix} U_2 & v_{11} & \langle 0.20, 0.60 \rangle \\ & v_{12} & \langle 0.17, 0.67 \rangle \\ & v_{13} & \langle 0.07, 0.33 \rangle \\ & v_{14} & \langle 0.25, 0.50 \rangle \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$Q_{31} = \begin{bmatrix} U_3 & v_{11} & \langle 0.60, 0.80 \rangle \\ & v_{12} & \langle 0.67, 0.83 \rangle \\ & v_{13} & \langle 0.33, 0.67 \rangle \\ & v_{14} & \langle 0.50, 0.75 \rangle \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$Q_{41} = \begin{bmatrix} U_4 & v_{11} & \langle 0.80, 1 \rangle \\ & v_{12} & \langle 0.83, 1 \rangle \\ & v_{13} & \langle 0.67, 1 \rangle \\ & v_{14} & \langle 0.75, 1 \rangle \end{bmatrix} \circ \quad (24)$$

节域:

$$Q_{u1} = \begin{bmatrix} U_1 & v_{11} & \langle 0, 1 \rangle \\ & v_{12} & \langle 0, 1 \rangle \\ & v_{13} & \langle 0, 1 \rangle \\ & v_{14} & \langle 0, 1 \rangle \end{bmatrix} \circ \quad (25)$$

供氧条件、蓄散热环境的经典域和节域计算过程类似。

2.2.2 关联度的计算

煤的吸氧量 m_{11} 关于危险性等级为易自燃的关联度计算过程如下:

$$\rho(m_{11}, A_{11}) = \left| m_{11} - \frac{a_{111} + b_{111}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{111} - a_{111}) = \left| 0.23 - \frac{0+0.2}{2} \right| - \frac{1}{2}(0.2 - 0) = 0.03, \quad (26)$$

$$\rho(m_{11}, A_u) = \left| m_{11} - \frac{a_{u11} + b_{u11}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{u11} - a_{u11}) = \left| 0.23 - \frac{0+1}{2} \right| - \frac{1}{2}(1 - 0) = -0.23, \quad (27)$$

$$k_1(m_{11}) = \frac{\rho(m_{11}, A_u)}{\rho(m_{11}, A_{11}) - \rho(m_{11}, A_u)} = \frac{0.03}{-0.23 - 0.03} = -0.1154. \quad (28)$$

将所有因素关联度计算汇总后,结果见表4。

2.2.3 可拓评价

计算煤氧化放热性能关于各危险性等级的关联度如下:

$$k(N_1) = [0.2875, 0.3375, 0.1875, 0.1875] \cdot \begin{bmatrix} -0.1154 & 0.1500 & -0.6167 & -0.7125 \\ -0.7229 & -0.3030 & 0.3529 & -0.2069 \\ -0.4578 & -0.2105 & 0.3636 & -0.3284 \\ -0.2093 & 0.3600 & -0.3200 & -0.5467 \end{bmatrix} = [-0.4022, -0.0311, -0.0500, -0.4386], \quad (29)$$

同理可求,

$$k(N_2) = [-0.3841, -0.1203, -0.1936, 0.1839], \quad (30)$$

$$k(N_3) = [-0.4711, -0.1023, -0.3035, -0.2928]. \quad (31)$$

综上,可以计算煤层自燃危险性等级的关联度为:

$$k(N) = [0.2021, 0.5878, 0.2101] \cdot \begin{bmatrix} -0.4022 & -0.0311 & -0.0500 & -0.4386 \\ -0.3841 & -0.1203 & -0.1936 & 0.1839 \\ -0.4711 & -0.1023 & -0.3035 & -0.2928 \end{bmatrix} = [-0.4060, -0.0985, -0.1877, -0.0421]. \quad (32)$$

表4 各因素关于不同危险性等级的关联度汇总

因素 指标	关联度			
	易自燃	自燃	可能自燃	不易自燃
v_{11}	-0.1154	0.1500	-0.6167	-0.7125
v_{12}	-0.7229	-0.3030	0.3529	-0.2069
v_{13}	-0.4578	-0.2105	0.3636	-0.3284
v_{14}	-0.2093	0.3600	-0.3200	-0.5467
v_{21}	-0.0370	0.0400	-0.4800	-0.6533
v_{22}	-0.4615	-0.1064	0.1351	-0.3000
v_{23}	-0.6000	0.4444	-0.4082	-0.4337
v_{24}	-0.8133	-0.7200	-0.4400	3.6667
v_{25}	0.1250	-0.1000	-0.4600	-0.6143
v_{26}	-0.5849	-0.2414	0.2222	-0.1538
v_{27}	-0.4432	-0.2794	0.1395	-0.1091
v_{31}	-0.1923	0.3125	-0.6316	-0.7558
v_{32}	-0.5930	-0.3860	0.2069	-0.1463
v_{33}	-0.2449	0.4800	-0.2600	-0.5067
v_{34}	-0.8514	-0.8226	-0.7800	0.2200

根据 $\max_{j=1,2,3,4} k_j(N) = k_4(N) = -0.0421$, 所以孙村煤矿十三层煤 31317 工作面煤的危险性等级为不易自燃。

求得煤层危险性级别变量特征值为: $j^* = 3.0634$ 。

3 结果分析

煤炭科学研究总院重庆分院对孙村煤矿十三层煤 31317 工作面煤样进行了工业分析,得到了自燃倾向等级鉴定结果为不易自燃,具体数据见表5。

本文所得到的结果与上述鉴定结论一致,说明利用模糊可拓理论判别模型来预测煤层自燃危险性等级是可行的。模型的优势在于选定了比较全面的影响因素,借助于模糊数学和可拓理论更加切合实际,并且能直观、定量的给出判别过程,不仅丰富了煤层自燃倾向性等级判别方法,同时预测结果还可为煤矿管理层有效预防此类灾害起到一定的参考和借鉴作用。但模型中还存在各个因素权重确定的合理性及模型准确率如何确定等问题,这些都是接下来需要思考和解决的。

表5 工业分析及着火点法煤自燃倾向鉴定结果

项目名称	工业分析/%			着火温度/℃			ΔT	自燃倾向性
	M_{ad}	A_d	V_{daf}	$T_{氧}$	$T_{原}$	$T_{还}$		
山东新汶孙村煤样	0.56	21.31	46.30	355	359	360	5	不易自燃

参考文献:

- [1] 卜荣珍. 煤自燃性预测数学模型研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [2] 宋志, 曹坤, 孙宝铮. 采场自然发火的预测和识别[J]. 黑龙江矿业学院学报, 1996, 9(3): 22-25.
- [3] 余明高, 王清安, 范维澄, 等. 煤层自然发火期预测的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(4): 384-387.
- [4] 余明高, 黄之冲, 岳超平. 煤最短自然发火期解算数学模型[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 516-519.
- [5] 卡连金 И. В. 煤的自燃及其预测[M]//煤层内因火灾防火技术(上册). 煤炭工业部科技情报所, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [6] 谢振华, 金龙哲, 任宝宏. 模糊综合评判法在煤炭自燃预测中的应用[J]. 工业安全与环保, 2002, 28(6): 33-35.
- [7] 邓军, 陈晓坤, 翟小伟, 等. 煤最短自然发火期灰色预测模型研究[J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(4): 406-408.
- [8] 张辛亥, 席光. 用于煤自然发火期预测的神经网络模型和实验技术[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(9): 1 058-1061.
- [9] Sallu H B, Padhee S, Mahapatra S S. Prediction of spontaneous heating susceptibility of Indian coals using fuzzy logic and artificial neural network models[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3): 2271-2282.
- [10] 邓军, 邢震, 马砺. 多元回归分析在煤自燃预测中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(6): 645-648.
- [11] 谭波, 左东方. 基于物元模型的煤自燃危险性分析[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(8): 48-53.
- [12] 原国红, 陈剑平, 马琳. 可拓评判方法在岩体质量分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1539-1543.
- [13] 李永, 胡向红, 乔箭. 改进的模糊层次分析法[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(1): 11-12.
- [14] 蔡文. 可拓学概述[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(1): 76-84.
- [15] 郝震宇. 煤自然发火特性理论模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.

The Discriminative Model to the Spontaneous Risk of Coal Seam Based on Fuzzy Extension Theory

Chen Xiaoguo^{1, 2}, Du Hong², Gao Erxin¹ and Sun Xianlong¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;
2. School of Science, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: The influence factors of the spontaneous combustion of the coal seam are determined, and values of the factors, which belonged to different levels of spontaneous combustion, are normalized. By adopting fuzzy analytical hierarchy process, the weights of every factor are determined and the discriminate model of the danger of the spontaneous of the coal seam is established by the extension theory. Taking the 13# coal seam in Shandong province Xin-Wen Mining Group CO. LTD of Sun-Cun Coal Mine as an example, the dangerous of the spontaneous combustion of the mine is evaluated by model method. The results obtained are accorded with the spontaneous combustion expert conclusion of the Mining Technology School. The researches above not only enrich the evaluation methods of the dangerous of the spontaneous combustion of the coal seam, but also provide references and lessons for the prevention of such disasters.

Key words: extenics; fuzzy analytical hierarchy process; the spontaneous combustion of the coal seam; danger