

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.06.011

# 基于突变级数法的煤矿外因火灾危险等级评价\*

贾进章<sup>①②</sup> 董铭鑫<sup>①②</sup> 胡竞文<sup>③</sup>

①辽宁工程技术大学安全科学与工程学院(辽宁阜新,123000)

②矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室(辽宁阜新,123000)

③中共呼伦贝尔市委统战部(内蒙古呼伦贝尔,021000)

[摘 要] 为了给煤矿外因火灾危险等级评价提供一种更加合理的方法,采用将突变理论与模糊数学相结合的突变级数法,从明火致因、电火致因、其他原因等 3 个方面分析了煤矿外因火灾的影响因素,建立了煤矿外因火灾危险评价指标体系,并运用突变级数法对煤矿外因火灾危险等级进行评价。以沈阳焦煤集团林盛煤矿为例,基于突变级数法,求得该煤矿外因火灾危险等级评价的总突变隶属矩阵,依据总突变隶属函数值越大越优的原则,得到该煤矿外因火灾危险等级为二级,即较安全。依据评价结果,提出了提高该煤矿外因火灾安全性的相关对策。

[关键词] 危险等级评价;煤矿外因火灾;突变级数法;评分

[分类号] TD75+2.3

## Risk Grade Evaluation of External Fire in Coal Mine Based on Catastrophe Progression Method

JIA Jinzhang<sup>①②</sup>, DONG Mingxin<sup>①②</sup>, HU Jingwen<sup>③</sup>

① College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

② Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education (Liaoning Fuxin, 123000)

③ The United Front Department of the CPC Hulun Buir Municipal Party Committee (Inner Mongolia Hulun Buir, 021000)

[ABSTRACT] In order to provide a more reasonable method to evaluate the risk rank of external fire in coal mine, an evaluation method named catastrophe progression method, which combines catastrophe theory and fuzzy math method, was applied. Potential causes include coal mine external fires, open fires, electric fires and other reasons, were identified. Hazard evaluation index system of coal mine external fire was populated, and the catastrophe progression method was applied to evaluate the risk ranks. Linsheng Coal Mine of Shenyang Coking Coal Group was taken as an example, and catastrophe progression was used to determine the total mutation membership matrix of the fire risk grade assessment of the coal mine. According to the principle that bigger total mutations subordinate function values tend to be better rated, the fire danger grade is assessed as grade two, which means relatively safe. Accordingly countermeasures to improve the external causes of fire risk in coal mines were put forward.

[KEYWORDS] risk grade evaluation; external fire of coal mine; catastrophe progression method; scoring

### 引言

煤矿火灾危险性高,事故后果严重,而且易造成一系列次生灾害。一般将矿井中由外来热源引发可燃物质燃烧造成的火灾称为煤矿外因火灾。煤矿外因火灾具有突发性和随机性强、传播速度快的特点,

最快速度可达 50~100 m/h<sup>[1]</sup>。煤矿外因火灾会造成大量的人员伤亡、严重的财产损失以及恶劣的社会影响。据统计,9 成以上的煤矿重大火灾事故是由外因火灾所引起,而且外因火灾事故致死的人数占火灾总死亡人数的 65%<sup>[2]</sup>。

目前,国外方面,美国对火灾的研究较为深入,美国国家标准技术委员会(NIST)对性能化防火和

\* 收稿日期:2017-12-04  
基金项目:国家自然科学基金;矿井瓦斯爆炸冲击波与通风动力耦合传播机理研究(51374121)  
作者简介:贾进章(1974-),男,博士,教授,研究方向为矿井通风与灾害防治及安全评价。E-mail:jiajinzhang@163.com  
通信作者:董铭鑫(1991-),男,硕士研究生,研究方向为矿井瓦斯爆炸、建筑火灾安全及安全评价。E-mail:1148404056@qq.com

超高建筑火灾评价进行过专题研究<sup>[3]</sup>;此外,火灾评价模型的开发方面,众所周知的有 BFSEM 模型<sup>[4]</sup>和 FRECAM 模型<sup>[5]</sup>等。国内方面,主要是利用层次分析法、模糊综合评价法以及神经网络评价法等对煤矿火灾危险性进行评价。王旭等<sup>[6]</sup>在分析了煤矿事故特点后,将模糊综合评价法运用到了煤矿安全评价中;邓军等<sup>[7]</sup>深入研究了层次分析法,并将其应用到煤矿安全生产能力指标体系以及火灾危险性评价工作中;冯海明等<sup>[8]</sup>将神经网络应用到煤炭自燃预测工作中,并且在 Matlab 上得到了实现。上述方法虽然能够对煤矿火灾危险性作出合理的评价,但是其计算过程复杂,有些指标的权重的计算工作量大,而且人为主观因素影响大。通过查阅文献,虽然突变级数法作为比较成熟的评价方法被广泛应用于工程评价、经济学和社会学等领域,但未见将突变理论应用于煤矿外因火灾安全评价方面的研究。

煤矿外因火灾具有独特的突变性,火灾是否发生以及发生的时间都很难测算,即使计算出了火灾发生概率,也难以确定它是否会造成煤矿事故风险。将突变级数法<sup>[9]</sup>引入到煤矿外因火灾危险等级评价中,更好地凸显了突变级数法处理突变事件的优势。该方法省去对各指标采取权重的工作,只需考虑各指标对煤矿外因火灾影响的相对重要性<sup>[10]</sup>,不仅保证了评价结果的真实性、客观性,而且减轻了工作量。

# 1 基于突变级数法的煤矿外因火灾危险等级评价

## 1.1 突变级数法的基本原理

法国数学家 Rene Thom 于 20 世纪 70 年代提出了较为典型的突变理论。后来,Zeeman 等在此基础上进行了改进。控制变量的个数  $r$  主要决定突变类型;当  $r \leq 4$  时,只有折叠突变、尖点突变、燕尾突变、蝴蝶突变、椭圆突变、双曲突变以及抛物型突变 7 种

基本的突变模型和与之相对应的势函数形式<sup>[11-12]</sup>。表 1 中是 4 种较为常见的突变系统。其中, $x$  是  $f(x)$  的状态变量; $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  是函数的控制变量。

表 1 中具有高度概括性和普遍性的突变模型是由 Rene Thom 经过严谨的计算推导得出的,尽管其证明过程非常困难,但对其证明成果的运用则相对比较容易。现以尖点突变模型( $r=2$ )为例进行相关的计算推导。求取尖点突变模型的势函数 $f(x) = x^4 + ax^2 + bx$ 中状态变量  $x$  的一阶和二阶导数;首先,通过  $f'(x) = 0$  计算得到平衡曲面  $M: 4x^3 + 2ax + b = 0$ ;其次,通过  $f''(x) = 0$  计算得到奇点集  $S: 12x^2 + 2a = 0$ ;最后,通过消去  $x$  计算得到分歧方程  $B: 8a^3 + 27b^2 = 0$ 。奇点集  $S$  在控制变量  $a$ 、 $b$  上的投影构成了分歧集  $B$ 。系统突变发生的条件是:控制变量  $a$ 、 $b$  的取值,使方程  $8a^3 + 27b^2 = 0$  成立。

表 1 突变级数法常用的 4 种突变类型<sup>[13-16]</sup>

| Tab. 1 Four kinds of mutation types commonly used in the catastrophe progression method |      |      |                                       |  |
|---|------|------|---------------------------------------|--|
| 突变模型  | 状态变量 | 控制变量 | 势函数                                   | 分歧方程   |
| 折叠突变  | 1    | 1    | $f(x) = x^3 + ax$                     | $a = 0$  |
| 尖点突变  | 1    | 2    | $f(x) = x^4 + ax^2 + bx$              | $a = -6x^2,$<br>$b = 8x^3$                         |
| 燕尾突变  | 1    | 3    | $f(x) = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$       | $a = -6x^2,$<br>$b = 8x^3, c = -3x^4$              |
| 蝴蝶突变  | 1    | 4    | $f(x) = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + d$ | $a = -10x^2, b = 20x^3,$<br>$c = -15x^4, d = 4x^5$ |

图 1 是突变级数法常见的 4 种突变模型。

利用奇点方程推导得到归一化公式,从而将控制变量和状态变量的取值控制在 0~1 之间,满足传统的模糊隶属函数取值规律,进而求出系统总突变隶属函数值。

与表 1 中各突变模型相对应的归一化公式(又称突变级数)如式(1)~式(4)所示<sup>[10]</sup>:

折叠突变:

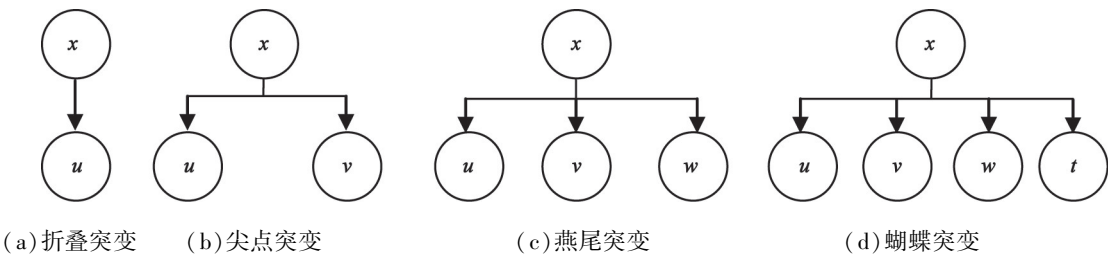


图 1 突变级数法常见的 4 种突变模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the four mutation models commonly used in catastrophe progression method

$$X_a = a^{\frac{1}{2}}; \tag{1}$$

尖点突变:

$$X_a = a^{\frac{1}{2}}, X_b = b^{\frac{1}{3}}; \tag{2}$$

燕尾突变:

$$X_a = a^{\frac{1}{2}}, X_b = b^{\frac{1}{3}}, X_c = c^{\frac{1}{4}}; \tag{3}$$

蝴蝶突变:

$$X_a = a^{\frac{1}{2}}, X_b = b^{\frac{1}{3}}, X_c = c^{\frac{1}{4}}, X_d = d^{\frac{1}{5}}. \tag{4}$$

1.2 突变级数法的一般评价步骤

- 突变级数法主要步骤包括<sup>[17]</sup>:
- 1) 确定评价的总指标,对评价目标进行多层次矛盾分解;
  - 2) 把突变理论与模糊数学相结合,通过计算处理得到突变模糊隶属函数;
  - 3) 运用归一化公式进行综合量化运算,最后归一为一个参数(即求出总的隶属函数),根据所得结果对评价目标进行排序分析。

1.3 煤矿外因火灾危险等级评价

1.3.1 煤矿外因火灾的危险源分析

燃烧的发生与发展需要具备 3 个基本要素,即可燃物、引火源和氧化物(氧气)。分析矿井火灾发生的实际情况和燃烧的三要素,消除可燃物和氧气这两个条件的难度高、工程量大;因此,防止矿井外因火灾发生的最直接、有效方法是杜绝引火源。

外因火灾是由外来热源引起的。通过分析、查阅相关资料,参考《煤矿安全规程》(2016 修订),可知造成煤矿外因火灾事故的火源主要包括:

- 1) 井下明火,如吸烟、安全灯使用不规范、电焊和气焊焊接起火、电弧火花等。

- 2) 电器设备起火,如井下各种机电设备由于长期连续运转,在检修工作不到位的情况下容易出现接触不良、漏电、短路、接地故障、电器故障火花、电器照明故障、电线老化、脱皮等故障,造成设备过流或摩擦过热,引发设备燃烧,引燃设备周围的可燃物,设备一旦发生燃烧,极易造成火势的蔓延。
- 3) 其他原因起火,如常见的有违规放炮、运输系统起火、瓦斯和煤尘爆炸、物体摩擦起火等<sup>[18]</sup>。

1.3.2 建立评价指标体系

煤矿火灾作为一个独特的系统工程,自身的危险性特点以及动态特性决定了煤矿火灾发生的原因多种多样<sup>[10]</sup>。

根据科学性原则、系统性原则、可操作性原则、相对独立性原则、规范性原则、代表性原则,对引发煤矿外因火灾的一般因素进行了分析,如明火致因中的吸烟、电焊、火焊等;电火致因中的短路、电线老化等;其他原因中的机械摩擦等。并结合煤矿外因火灾发生的特殊条件,如矿井外因火灾主要发生在采空区、遗留的煤柱、破裂的煤壁、煤巷的高冒处以及浮煤堆积的地点,它的发生和发展相对较慢、火源潜伏期长、火源相对比较隐蔽等特点,而且井下火灾一般是在空气极其有限的情况下发生的,特别是采空区火灾和煤柱内火灾;即使发生在风流畅通的地点,其空间和供氧条件也是有限的。在文献[19]的基础上,主要针对引火源这一火灾发生的必要条件,建立煤矿外因火灾的安全评价指标体系。指标体系共有 15 个指标,构成 4 个突变系统。其中 3 个二级指标构成燕尾型突变系统,12 个三级指标构成 3 个蝴蝶突变系统<sup>[10,18]</sup>,见图 2。

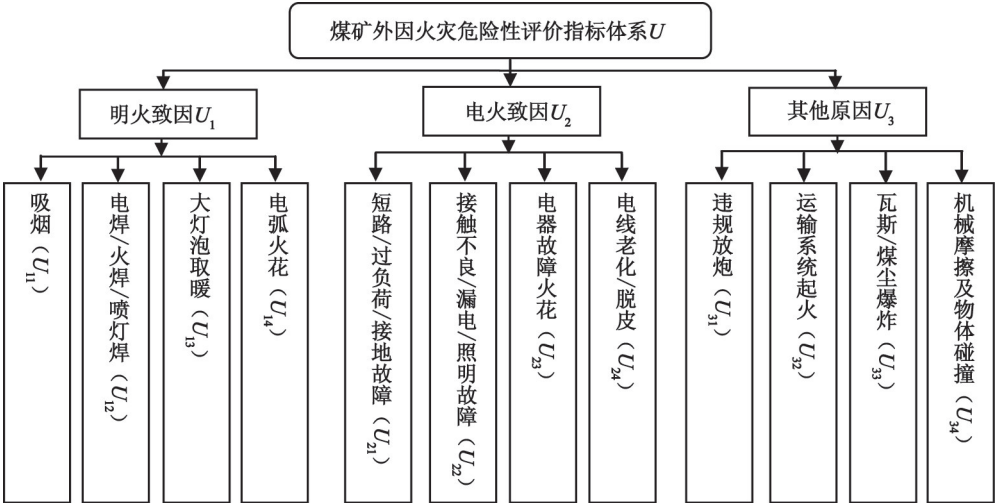


图 2 煤矿外因火灾危险等级评价指标体系

Fig. 2 Index system for external fire risk grade assessment of coal mine

1.3.3 评价集的建立<sup>[10]</sup>

将评价集划分为  $V = \{\text{安全 } V_1 \text{ 较安全 } V_2 \text{ 一般安全 } V_3 \text{ 不安全 } V_4\}$ 。将其赋予相应的分值后,  $V = \{90 \ 80 \ 70 \ 60\}$ 。显然, 分数越高表示越安全。

1.3.4 隶属度及隶属函数的确定

确定因素集中各因素隶属于评价集  $V$  的程度, 借鉴文献[15]的研究成果。确定隶属函数如式(5)~式(8):

$$f_1(u) = \begin{cases} 1, & (90 \leq u < 100); \\ \frac{u-80}{90-80}, & (80 \leq u < 90); \\ 0, & (u < 80)。 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_2(u) = \begin{cases} \frac{100-u}{100-90}, & (90 \leq u < 100); \\ 1, & (80 \leq u < 90); \\ \frac{u-70}{80-70}, & (70 \leq u < 80); \\ 0, & (u < 70)。 \end{cases} \quad (6)$$

$$f_3(u) = \begin{cases} 0, & (90 \leq u < 100); \\ \frac{90-u}{90-80}, & (80 \leq u < 90); \\ 1, & (70 \leq u < 80); \\ \frac{u-60}{70-60}, & (u < 70)。 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_4(u) = \begin{cases} 0, & (80 \leq u < 100); \\ \frac{80-u}{80-70}, & (70 \leq u < 80); \\ 1, & (u < 70)。 \end{cases} \quad (8)$$

1.3.5 高级评价<sup>[10]</sup>

邀请相关领域的专家, 对煤矿外因火灾的评价指标进行评分, 通过隶属函数, 得到评价体系指标层初始模糊隶属函数值矩阵  $R_{U_1}$ 、 $R_{U_2}$ 、 $R_{U_3}$ 。以明火致因  $U_1$  为例, 将  $U_1$  下的三级指标  $U_{11}$ 、 $U_{12}$ 、 $U_{13}$ 、 $U_{14}$  的评测值代入隶属函数  $f_1(u)$   $f_2(u)$   $f_3(u)$   $f_4(u)$ , 可通过计算得到  $R_{U_1}$ 。同理, 将  $U_2$ 、 $U_3$  依次代入隶属函数, 计算可得  $R_{U_2}$ 、 $R_{U_3}$ 。

以  $U_1$  为例进行计算。

初始模糊隶属函数值矩阵

$$R_{U_1} = \begin{bmatrix} f_1(U_{11}) & f_2(U_{11}) & f_3(U_{11}) & f_4(U_{11}) \\ f_1(U_{12}) & f_2(U_{12}) & f_3(U_{12}) & f_4(U_{12}) \\ f_1(U_{13}) & f_2(U_{13}) & f_3(U_{13}) & f_4(U_{13}) \\ f_1(U_{14}) & f_2(U_{14}) & f_3(U_{14}) & f_4(U_{14}) \end{bmatrix}。 \quad (9)$$

用蝴蝶型的归一化公式对所有三级指标进行计算, 得到指标层的突变级数矩阵  $R'_{U_1}$ 、 $R'_{U_2}$ 、 $R'_{U_3}$ 。

指标层突变级数值矩阵见式(10)。

$$R'_{U_1} = \begin{bmatrix} \sqrt{f_1(U_{11})} & \sqrt{f_2(U_{11})} & \sqrt{f_3(U_{11})} & \sqrt{f_4(U_{11})} \\ \sqrt[3]{f_1(U_{12})} & \sqrt[3]{f_2(U_{12})} & \sqrt[3]{f_3(U_{12})} & \sqrt[3]{f_4(U_{12})} \\ \sqrt[4]{f_1(U_{13})} & \sqrt[4]{f_2(U_{13})} & \sqrt[4]{f_3(U_{13})} & \sqrt[4]{f_4(U_{13})} \\ \sqrt[5]{f_1(U_{14})} & \sqrt[5]{f_2(U_{14})} & \sqrt[5]{f_3(U_{14})} & \sqrt[5]{f_4(U_{14})} \end{bmatrix}。 \quad (10)$$

将突变级数的平均值作为状态变量  $x$  的值进行递归计算, 可得到二级指标  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  对应评语中“安全”的隶属函数值分别为  $r_{U_1}^{(f_1)}$ 、 $r_{U_2}^{(f_1)}$ 、 $r_{U_3}^{(f_1)}$ , 如式(11)~式(13)所示。

$$r_{U_1}^{(f_1)} = \frac{\sqrt{f_1(U_{11})} + \sqrt[3]{f_1(U_{12})} + \sqrt[4]{f_1(U_{13})} + \sqrt[5]{f_1(U_{14})}}{4}; \quad (11)$$

$$r_{U_2}^{(f_1)} = \frac{\sqrt{f_1(U_{21})} + \sqrt[3]{f_1(U_{22})} + \sqrt[4]{f_1(U_{23})} + \sqrt[5]{f_1(U_{24})}}{4}; \quad (12)$$

$$r_{U_3}^{(f_1)} = \frac{\sqrt{f_1(U_{31})} + \sqrt[3]{f_1(U_{32})} + \sqrt[4]{f_1(U_{33})}}{3}。 \quad (13)$$

将  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  隶属于其他评语的函数值进行排列, 可得二级指标(准则层)的模糊隶属函数值矩阵

$$R_U = \begin{bmatrix} r_{U_1}^{(f_1)} & r_{U_1}^{(f_2)} & r_{U_1}^{(f_3)} & r_{U_1}^{(f_4)} \\ r_{U_2}^{(f_1)} & r_{U_2}^{(f_2)} & r_{U_2}^{(f_3)} & r_{U_2}^{(f_4)} \\ r_{U_3}^{(f_1)} & r_{U_3}^{(f_2)} & r_{U_3}^{(f_3)} & r_{U_3}^{(f_4)} \end{bmatrix}。 \quad (14)$$

根据燕尾型突变模型归一化公式对  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  进行处理, 可得准则层突变级数值矩阵

$$R'_U = \begin{bmatrix} \sqrt{r_{U_1}^{(f_1)}} & \sqrt{r_{U_1}^{(f_2)}} & \sqrt{r_{U_1}^{(f_3)}} & \sqrt{r_{U_1}^{(f_4)}} \\ \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_1)}} & \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_2)}} & \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_3)}} & \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_4)}} \\ \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_1)}} & \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_2)}} & \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_3)}} & \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_4)}} \end{bmatrix}。 \quad (15)$$

将  $R'_U$  的第一列的平均值作为隶属于评价集中“安全”的总突变隶属函数值, 可得

$$r_1 = \frac{\sqrt{r_{U_1}^{(f_1)}} + \sqrt[3]{r_{U_2}^{(f_1)}} + \sqrt[4]{r_{U_3}^{(f_1)}}}{3}。 \quad (16)$$

同理, 可得隶属于评价集中其他评语的总突变隶属函数值  $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 。总突变隶属函数值矩阵  $R = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4]$ 。依据总突变隶属函数值越大越优原则, 得出评价结论。

2 应用实例

以沈阳焦煤集团林盛煤矿为例, 用基于突变级数法的煤矿外因火灾危险性模型对其进行分析。根



据该煤矿的实际情况,邀请辽宁工程技术大学矿井火灾安全领域、东北大学矿井火灾安全领域以及中国矿业大学煤矿安全领域的 10 位专家对可能引起外因火灾的各项指标打分。

为使专家打出的评价分数尽可能准确反映评价对象的重要程度,特意邀请的专家中,5 位长期从事现场工作,5 位长期从事科研工作,取评分结果的算术平均值作为评测数据<sup>[18]</sup>,结果见表 2。

表 2 煤矿外因火灾评测参数

Tab. 2 Evaluation parameters for external  
five of coal mine

| 目标层               | 二级指标层               | 三级指标层                        | 评测数据 |
|-------------------|---------------------|------------------------------|------|
| 煤矿外因火灾危险性评价指标体系 U | 明火致因 U <sub>1</sub> | 吸烟 U <sub>11</sub>           | 75   |
|                   |                     | 电焊、火焊、喷灯焊 U <sub>12</sub>    | 77   |
|                   |                     | 大灯泡取暖 U <sub>13</sub>        | 80   |
|                   |                     | 电弧火花 U <sub>14</sub>         | 68   |
|                   | 电火致因 U <sub>2</sub> | 短路、过负荷、接地故障 U <sub>21</sub>  | 90   |
|                   |                     | 接触不良、漏电、照明故障 U <sub>22</sub> | 88   |
|                   |                     | 电器故障火花 U <sub>23</sub>       | 95   |
|                   |                     | 电线老化、脱皮 U <sub>24</sub>      | 78   |
|                   | 其他原因 U <sub>3</sub> | 违规放炮 U <sub>31</sub>         | 71   |
|                   |                     | 运输系统起火 U <sub>32</sub>       | 61   |
|                   |                     | 瓦斯、煤尘爆炸 U <sub>33</sub>      | 85   |
|                   |                     | 机械摩擦及物体碰撞 U <sub>34</sub>    | 87   |

将表 2 中各个三级指标的评测分值代入隶属函数,利用相应模型的归一公式进行计算,得到:

1) 指标层隶属函数值矩阵。

$$R_{U_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0.7 & 1 & 0.3 \\ 0 & 1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R_{U_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.8 & 1 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 1 & 0.2 \end{bmatrix};$$

$$R_{U_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 1 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 1 & 0.5 & 0 \\ 0.7 & 1 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}。$$

2) 指标层突变级数值矩阵。

$$R'_{U_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0.707 & 1 & 0.707 \\ 0 & 0.888 & 1 & 0.669 \\ 0 & 1 & 0.562 & 0 \\ 0 & 0 & 0.956 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R'_{U_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0.316 & 0 & 0 \\ 0.928 & 1 & 0.585 & 0 \\ 1 & 0.841 & 0 & 0 \\ 0 & 0.956 & 1 & 0.725 \end{bmatrix};$$

$$R'_{U_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0.316 & 1 & 0.949 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.841 & 1 & 0.841 & 0 \\ 0.443 & 0.579 & 0.657 & 0.237 \end{bmatrix}。$$

3) 准则层隶属函数值矩阵。

$$R_U = \begin{bmatrix} 0 & 0.649 & 0.880 & 0.594 \\ 0.732 & 0.778 & 0.396 & 0.181 \\ 0.443 & 0.579 & 0.657 & 0.237 \end{bmatrix}。$$

4) 准则层突变级数值矩阵。

$$R'_U = \begin{bmatrix} 0 & 0.806 & 0.938 & 0.771 \\ 0.901 & 0.920 & 0.735 & 0.566 \\ 0.816 & 0.872 & 0.900 & 0.698 \end{bmatrix}。$$

由此,得到该煤矿外因火灾危险性评价的总突变隶属矩阵  $R = [0.572 \ 0.866 \ 0.858 \ 0.678]$ 。依据总突变隶属函数值越大越优的原则,总突变隶属函数值隶属于评语集中第二级的值最大,可知该煤矿外因火灾危险等级为二级,即较安全。表明该矿火灾危险等级相对较好,可接受。但隶属于第三级的总突变隶属函数值为 0.858,火灾危险等级有升高的风险。

为了进一步降低煤矿外因火灾危险等级,同时保障煤矿的安全生产和正常运营,根据评价的结果及专家打分的数据提出相关对策:定期进行安全检查,针对电弧火花、违规放炮、运输系统起火及物体碰撞的安全性相对较差的情况,需要加强安全管理工作,加强对职工的培训,严格按照操作规程施工作业;针对电焊、火焊、喷灯焊违规使用情况以及电器设备的老化和脱皮情况,需要定期更换受损、老化的设备;此外,还要尽量避免瓦斯、煤尘爆炸的发生。

3 结论

1) 从明火致因、电火致因、其他原因 3 个方面出发,并根据实地调查分析以及相关国家法规和行业标准,建立了煤矿外因火灾危险性评价指标体系,指标体系共有 15 个指标,构成 4 个突变系统,其中 3 个二级指标构成燕尾型突变系统,12 个三级指标构成 3 个蝴蝶突变系统。

2) 运用突变级数法对各级指标进行评测,能较好地反映煤矿外因火灾事故过程中的突变特性。利用基于突变级数法建立的煤矿外因火灾危险性评价

体系,以沈阳焦煤集团林盛煤矿为例进行了计算分析,得到该煤矿外因火灾危险等级为较安全,并根据评价结果,提出了提高煤矿外因火灾安全水平的技术对策。

### 参 考 文 献

- [1] 环境保护部环境应急与事故调查中心. 环境风险及化学品检查技术报告[R]. 北京:环境保护部,2012.
- [2] 刘铁民,张兴凯,刘功智. 安全评价方法应用指南[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [3] DUNJÓ J, FTHENAKIS V, VÍLCHEZ J A, et al. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1/2/3): 19-32.
- [4] CHUVIECO E, AGUADO I, YEBRA M, et al. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(1): 46-58.
- [5] WESSLING S, KUENZER C, KESSELS W, et al. Numerical modelling for analyzing thermal surface anomalies induced by underground coal fires[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 74(3/4): 175-184.
- [6] 王旭,霍德利. 模糊综合评价法在煤矿安全评价中的应用[J]. *中国矿业*, 2008, 17(5): 75-78.  
WANG X, HUO D L. Application of fuzzy comprehensive evaluation in coal safety assessment[J]. *China Mining Magazine*, 2008, 17(5): 75-78.
- [7] 邓军,杨一帆,翟小伟. 基于层次分析法的矿井煤自燃危险性模糊评价[J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(4): 120-125.  
DENG J, YANG Y F, ZHAI X W. Fuzzy evaluation on risk of coal spontaneous combustion based on AHP[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10(4): 120-125.
- [8] 冯海明,金龙哲,张春芝. 基于神经网络的煤炭自燃预测及在 MATLAB 上的实现[J]. *中国煤炭*, 2008, 34(5): 82-84.
- [9] 蒋军成. 突变理论及其在安全工程中的应用[J]. *南京化工大学学报*, 1999, 21(1): 24-28.  
JIANG J C. Catastrophe theory and its application in safety engineering[J]. *Journal of Nanjing University of Chemical Technology*, 1999, 21(1): 24-28.
- [10] 张旺,冯涛,武剑,等. 基于突变级数法的煤矿瓦斯爆炸危险性评价[J]. *矿业工程研究*, 2016, 31(1): 41-45.  
ZHANG W, FENG T, WU J, et al. Gas explosion risk assessment in coal mines based on catastrophe progression method[J]. *Mineral Engineering Research*, 2016, 31(1): 41-45.
- [11] 田冷,申智强,刘柳,等. 多层叠合致密砂岩气藏产量劈分方法研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2016, 39(3): 41-44.  
TIAN L, SHEN Z Q, LIU L, et al. Production split method for multilayer-superimposed tight sandstone gas reservoirs[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2016, 39(3): 41-44.
- [12] LIU M H. The research on catastrophe theory's application in the reform of sports curriculum[C]//2010 Second International Workshop on Education Technology and Computer Science. Wuhan, 2010: 790-793.
- [13] 邹义怀,江成玉,李春辉. 基于突变理论的煤与瓦斯突出危险性预测的研究[J]. *中国煤炭*, 2011, 37(10): 105-108.  
ZOU Y H, JIANG C Y, LI C H. Research on risk prediction of coal and gas outburst based on catastrophe theory[J]. *China Coal*, 2011, 37(10): 105-108.
- [14] 丁元春,翁发禄,唐敏康. 基于突变理论的高层建筑火灾安全综合评价[J]. *建筑科学*, 2012, 28(1): 22-25.  
DING Y C, WENG F L, TANG M K. The research on catastrophe theory's application in the fire risk assessment of high-rise building[J]. *Building Science*, 2012, 28(1): 22-25.
- [15] 张俊朋,杨晓雯. 煤矿井外因火灾风险的灰类-FAHP 评价[J]. *安全与环境工程*, 2017, 24(4): 89-93.  
ZHANG J P, YANG X W. Risk evaluation of exogenous mine fire based on grey clustering-FAHP[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, 24(4): 89-93.
- [16] 徐阿猛,齐黎明. 基于突变理论的马家沟矿煤与瓦斯突出过程研究[J]. *煤炭工程*, 2011(12): 71-73.  
XU A M, QI L M. Study on coal and gas outburst process of Majiagou Mine base on catastrophe theory[J]. *Coal Engineering*, 2011(12): 71-73.
- [17] 袁文瑞. 基于产业集群的工业园区竞争力研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.  
YUAN W R. Research on the competitiveness of industrial park based on industrial clusters[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [18] 贾进章,董晓雷. 基于模糊综合评价-集值统计法的煤矿外因火灾危险性分析[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(2): 11-14.  
JIA J Z, DONG X L. Fuzzy evaluation and statistically oriented method in analyzing the external causes of the coal mine fire[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(2): 11-14.
- [19] 闫明仁,张人伟,段汉文,等. 煤矿外因火灾危险性的模糊综合评价[J]. *煤矿安全*, 2009(6): 90-92.