

高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃影响因素研究*

周亮 讲师 戴广龙 教授 秦汝祥 副教授
(安徽理工大学 能源与安全学院,安徽 淮南 232001)

学科分类与代码: 6203070(安全系统工程)

中图分类号: X936

文献标志码: A

基金项目: 国家自然科学基金资助(51574009 51774014); 安徽省教育厅自然科学基金资助(KJ2016A829)。

【摘 要】 为预防高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃事故,根据此类煤层采空区遗煤自燃的特性,共选取 19 个影响因素,采用基于直觉模糊集的集成决策实验室分析与解释结构模型(DEMATEL&ISM)法对这些因素进行结构化处理,以此分析各因素对此类煤层采空区遗煤自燃的影响。结果表明:高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃的影响因素分为 3 个层次;工作面长度、通风方式、煤的吸氧速率、临界温度、残余瓦斯含量、煤层厚度、倾角与地质构造为根源因素;邻近层瓦斯情况、工作面开采方法、通风风量、推进速度为中间因素;防灭火措施、安全监测、采空区遗煤厚度、瓦斯抽采措施、工作面通风阻力、推进速度、围岩温度、煤层埋藏深度与顶板岩性为表层因素。

【关键词】 直觉模糊集; 决策实验室分析(DEMATEL)法; 解释结构模型(ISM)法;
高瓦斯煤层; 遗煤自燃

Research on factors influencing spontaneous combustion of coal in goaf in gassy coal seam having propensity to spontaneous combustion

ZHOU Liang DAI Guanglong QIN Ruxiang

(School of mining and safety engineer, Anhui University of Science and
Technology, Huainan Anhui 232001, China)

Abstract: In order to prevent the spotaneous combustion accident of coal in goaf in gassy and high spontaneous combustion propensity coal seam, 19 influencing factors were identified according to the characteristics of goaf spontaneous combustion in this kind of coal seam. The factors were treated by using the integrated DEMATEL and ISM method based on intuitionistic fuzzy sets. A multi-level hierarchical structure model was built for the factors and the respective influences of the factors were examined. The results show that the factors influencing goaf spontaneous combustion in gassy and high spontaneous combustion propensity coal seam can be divided into three levels: the root factors are the ventilation mode, the length of working surface, the oxygen absorption rate, the critical temperature, the residual gas content, the thickness of coal seam, the dip angle and geological structure of coal seam. Intermediate factors are the gas condition in adjacent layer, the mining method of working surface. The air quantity of ventilation and advancing speed of working surface. The surface factors are the fire prevention measures, the safety monitoring, the goaf residual coal thickness, the gas extraction measures, the ventilation resistance of working surface, the advancing speed, the surrounding rock temperature, the depth of coal seam and the roof lithology, and that more attention should be paid to improving the root factors.

* 文章编号: 1003-3033(2018)02-0122-06; DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.02.021
收稿日期: 2017-10-21; 修稿日期: 2017-12-27

Keywords: intuitionistic fuzzy sets; decision making trial and evaluation(DEMATEL); interpretive structural model(ISM); high gassy coal seam; coal spontaneous combustion

0 引言

我国铜川、义马、阳泉、淮南、淮北、鹤岗等主要矿区的多对矿井的主采煤层,属于高瓦斯易自燃煤层。周福宝^[1]调研了我国 229 对矿井,发现其中 74 对矿井的主采煤层为高瓦斯易自燃煤层。高瓦斯易自燃煤层发生过多起采空区遗煤自燃事故,造成极大损失,如 2004 年铜川陈家山矿 415 工作面采空区发生遗煤自燃事故,造成 166 人死亡;2008 年义马千秋煤矿 21201 工作面出现自燃明火,工作面停产 34 天^[1];2010 年淮南潘一矿 2131(3) 工作面采空区遗煤自燃,封闭火区 62 天,2012 年淮北杨柳矿 10414 采空区遗煤自燃,封闭火区 33 天^[2]。为预防高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃事故,有必要研究影响此类煤层采空区遗煤自燃的因素。

近年来,已有许多学者致力于采空区遗煤自燃影响因素研究工作。如李同锁等^[3]建立了基于集对分析理论的采空区遗煤自燃分析模型;王明重等^[4]建构了基于不确定信息的采空区遗煤自燃分析模型。然而这些分析只针对普通煤层。目前,对高瓦斯易自燃煤层的采空区遗煤自燃影响因素,尚缺乏系统分析。

一些文献指出,在高瓦斯易自燃煤层采空区内,瓦斯对遗煤自燃有较大影响^[5-8]。因此,笔者将在充分考虑瓦斯影响作用的情况下,提取出高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃的影响因素,并采用基于模糊直觉数的集成决策实验室分析法(Decision Making Trial and Evaluation, DEMATEL) 和解释结构模型法(Interpretive Structural Model, ISM) 分析其相互关系,构建影响因素的多级递阶结构模型,为高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃事故预防提供新对策。

1 模糊 DEMATEL&ISM 方法

1.1 DEMATEL&ISM 方法概述

DEMATEL&ISM 法可以研究影响因素之间的相互作用及相互影响程度,构建多次递阶结构模型,因此,被广泛应用于各个领域^[9-11]。使用 DEMATEL & ISM 方法构建多层递阶结构模型的步骤如图 1 所示^[11]。

1.2 模糊 DEMATEL&ISM 方法

在 DEMATEL&ISM 法中,直接影响矩阵由专家打分获得。高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃影响因素之间的关系较为复杂,专家打分时会出现很大的不确定性,可以采用模糊数学来表征这种不确定性。在这方面,许多专家已经做出尝试,如模糊 DEMATEL 方法^[12],基于区间犹豫模糊偏好的 DEMATEL 方法^[13]等。笔者在综合比较上述方法后,采用了基于直觉模糊数的 DEMATEL&ISM 法进行分析,简称为模糊 DEMATEL&ISM 法。

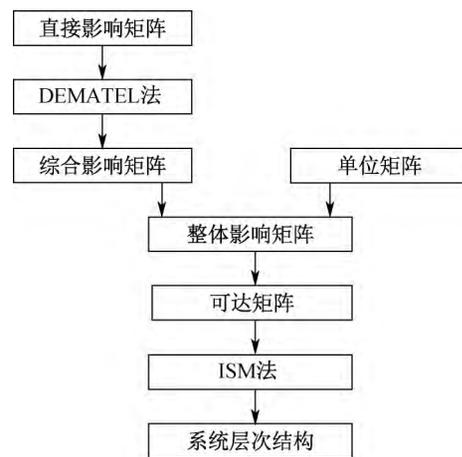


图 1 DEMATEL&ISM 计算步骤

Fig.1 DEMATEL&ISM calculation step chart

具体分析步骤如下。

步骤 1: 构建因素集 $S = \{X_i | i = 1, 2, \dots, n\}$, 邀请专家对各影响因素之间的相互关系进行两两比较,以直觉模糊数代替原有的估计值,构建专家判断的直觉模糊偏好矩阵。根据偏好判断 $X_i, X_j (i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j)$ 之间的影响。专家的判断结果记为 $r_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})$ 。由直觉模糊集的定义, μ_{ij} 为 X_i 对 X_j 构成影响的程度, ν_{ij} 为 X_i 对 X_j 不构成影响的程度。记 $\pi_{ij} = 1 - \mu_{ij} - \nu_{ij}$, π_{ij} 为犹豫度,即 X_i 对 X_j 的不确定影响程度。

令 $\mu_{ii} = 0, \nu_{ii} = 1$, 可得直觉模糊数矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} (\mu_{11}, \nu_{11}) & \cdots & (\mu_{1n}, \nu_{1n}) \\ (\mu_{21}, \nu_{21}) & \cdots & (\mu_{2n}, \nu_{2n}) \\ \vdots & & \vdots \\ (\mu_{n1}, \nu_{n1}) & \cdots & (\mu_{nn}, \nu_{nn}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

步骤 2: 规范化集成直觉模糊偏好判断矩阵。

引入风险偏好系数 $\beta (\beta \in [0, 1])$,将直觉模糊数矩阵转化为直接影响矩阵 $D (D = [d_{ij}]_{n \times n})$ 。

$$D = \{d_{ij} | d_{ij} = 0.5(1 + \mu_{ij} - \nu_{ij}) + (2\beta - 1)\pi_{ij}\} \tag{2}$$

步骤 3: 得出综合影响矩阵。通过式 (3) 规范化直接影响矩阵 $G (G = [g_{ij}]_{n \times n})$,通过式 (4) 计算综合影响矩阵 $Y (Y = [y_{ij}]_{n \times n})$ 。

$$G = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n d_{ij}} D \tag{3}$$

$$Y = G + G^2 + \dots + G^n \tag{4}$$

步骤 4: 分析绘制原因结果图。通过式 (5) ,计算各事件因素的影响度 f_i 、被影响度 e_i 、中心度 M_i 和原因度 N_i 。以中心度为横坐标 ,原因度为纵坐标绘制原因结果图。

$$f_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad e_i = \sum_{j=1}^n y_{ji} \tag{5}$$

$$M_i = f_i + e_i \quad N_i = f_i - e_i$$

步骤 5: 计算可达矩阵。通过式 (6) ,计算整体影响矩阵 $H (H = [h_{ij}]_{n \times n})$,引入阈值 λ ,通过式 (7) 采用截值法确定可达矩阵 $K (K = [k_{ij}]_{n \times n})$ 。

$$H = E + Y \tag{6}$$

式中 E 为单位矩阵。

$$k_{ij} = 1 \text{ if } h_{ij} \geq \lambda; \tag{7}$$
$$k_{ij} = 0 \text{ if } h_{ij} < \lambda$$

步骤 6: 绘制因素递阶层次结构图。通过式 (8) ,对可达矩阵的因素次第划除 ,并根据因素被划除的顺序 ,绘制层次结构图。

$$R(X_i) = R(X_i) \cap S(X_i) \tag{8}$$

式中: $R(X_i)$ 为可达集 ,即 X_i 可到达元素汇集成的集合; $S(X_i)$ 为先行集 ,即能到达 X_i 的元素汇集成的集合。

2 影响因素分析

2.1 高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃影响因素

采空区遗煤自燃需要满足以下 3 个条件:

- ①煤有自燃倾向性 ,且以破碎状态存在;
 - ②有连续供氧条件;
 - ③有积聚氧化热的环境。
- 高瓦斯易自燃采空区内富含瓦斯 ,必须充分考虑到瓦斯对遗煤自燃的影响。此外 ,采空区安全形势也会制约采空区遗煤自燃。因此 ,本文从采空区瓦斯状况、采空区遗煤状况、采空区漏风条件、采空区蓄热条件、采空区安全形势 5 个方面提取采空区遗

煤自燃影响因素。

采空区瓦斯分布及运移特征 ,影响了采空区“自燃三带”及自燃危险性。采空区瓦斯来源于采空区遗煤的瓦斯涌出和邻近层的瓦斯涌出 ,采空区瓦斯抽采措施改变了采空区瓦斯流场。因此 ,采空区瓦斯状况由采空区残余瓦斯含量、邻近层瓦斯情况与采空区瓦斯抽采措施等 3 个因素决定。

工作面开采方法关系到遗煤在采空区内的分布和采空区遗煤的破碎程度;煤的吸氧速率和煤的临界温度是遗煤的自燃倾向性的表征;遗煤的厚度决定了采空区遗煤能否发生自燃。因此 ,采空区遗煤状况由采空区遗煤破碎程度、工作面开采方法、煤的吸氧速率和煤的临界温度等 4 个因素决定。

顶板越坚硬采空区越不易充填 ,漏风越大;煤层厚度和倾角越大 ,采空区越不易密闭 ,漏风越大;工作面不同的通风方式会导致采空区不同的漏风流场 ,工作面的风量越大、阻力越大 ,采空区的漏风量也就越大。因此 ,采空区漏风条件由顶板岩性、煤层厚度和倾角、工作面通风方式、风量、阻力这 5 个因素决定。

工作面推进速度直接影响到采空区遗煤自燃区域的暴露在氧气中的时间 ,工作面长度关系到遗煤自燃的区域大小;围岩温度决定了煤自燃的初始温度;煤层埋藏越深 ,煤体温度越高 ,煤体本身水分越少 ,越易自燃;煤层的地质构造会影响开采速度 ,从而延长采空区遗煤自燃区域的暴露时间。因此 ,采空区热量积聚情况由工作面推进速度、工作面长度、围岩温度、煤层埋藏深度、煤层地质构造这 5 个因素决定。

合理的采空区安全监测方法能够监测到煤自燃的早期征兆 ,避免采空区遗煤温度进一步升高;采空区防灭火措施能够有效减少煤自燃危险性。因此 ,采空区安全形势由安全监测与防灭火措施等 2 个因素决定。

根据以上分析 ,结合煤矿行业专家和学术专家的调查及访谈意见 ,共提取 19 个高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃影响因素 ,具体见表 1。

2.2 模糊 DEMATEL&ISM 分析

此次研究邀请了一位正在开采高瓦斯易自燃煤层的煤矿企业高工 ,一位长期从事防火方面研究的学者 ,一位煤矿企业防灭火工作负责人 ,通过对他们的访谈 ,采用直觉模糊数 ,对 19 个因素间的相互影响进行评判 ,得出直觉模糊判断矩阵 R (表 2) 。

表 1 高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃影响因素表

Tab.1 Factors influencing spontaneous combustion of coal in goaf in gassy and high spontaneous combustion propensity coal seam

采空区瓦斯特征	采空区遗煤条件	采空区漏风条件	采空区蓄热条件	采空区安全状态
残余瓦斯含量 X_1	煤的吸氧速率 X_4	顶板岩性 X_8	工作面推进速度 X_{13}	安全监测 X_{18}
瓦斯抽采措施 X_2	煤的临界温度 X_5	煤层厚度和倾角 X_9	工作面长度 X_{14}	防火措施 X_{19}
邻近层瓦斯情况 X_3	采空区遗煤厚度 X_6	工作面通风方式 X_{10}	围岩温度 X_{15}	—
—	工作面开采方法 X_7	工作面通风风量 X_{11}	煤层埋藏深度 X_{16}	—
—	—	工作面通风阻力 X_{12}	煤层地质构造 X_{17}	—

表 2 直觉模糊判断矩阵 R

Tab.2 Intuitionistic fuzzy judgment matrix

因素	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}
X_1	0, 1	0.9, 0	0.7, 0.2	0.2, 0.7	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.8, 0.1	0.5, 0.5	0, 1	0.4, 0.6	0, 1	0.2, 0.7	0, 1	0, 1	0.9, 0.1	0.9, 0.1
X_2	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.2, 0.6	0.1, 0.9	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0.1	0.9, 0.1
X_3	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.8, 0.1	0.5, 0.5	0.1, 0.9	0.2, 0.8	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0.1	0.9, 0.1
X_4	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.8, 0.1	0.4, 0.4	0.5, 0.3	0, 1	0, 1	0.6, 0.3	0.4, 0.5	0, 1	0.6, 0.3	0.5, 0.4	0, 1	0, 1	0, 1	0.6, 0.2	0.9, 0.1
X_5	0, 1	0, 1	0, 1	0.8, 0.1	0, 1	0.4, 0.4	0.5, 0.3	0, 1	0, 1	0.6, 0.3	0.4, 0.5	0, 1	0.6, 0.3	0.5, 0.4	0, 1	0, 1	0, 1	0.6, 0.2	0.9, 0.1
X_6	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.5, 0.4	0.9, 0.1
X_7	0.3, 0.6	0.3, 0.6	0.7, 0.2	0, 1	0, 1	1, 0	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0.1	0.9, 0.1	0.9, 0.1	0, 1	0, 1	0, 1	0.3, 0.6	0.4, 0.5
X_8	0.2, 0.7	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.4, 0.5	0.2, 0.7	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.5, 0.3	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.4, 0.5
X_9	0.7, 0.2	0.4, 0.5	0.5, 0.4	0, 1	0, 1	0.9, 0	0.7, 0.2	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0	0.7, 0.2	0.6, 0.2	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.3, 0.6
X_{10}	0.1, 0.9	0.8, 0.1	0.1, 0.8	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0	0.9, 0	0.1, 0.8	0.6, 0.3	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0	0.9, 0
X_{11}	0.4, 0.5	0.5, 0.4	0.5, 0.4	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.3, 0.6	0, 1	0.9, 0	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.7, 0.2	0.8, 0.1
X_{12}	0, 1	0.5, 0.4	0.3, 0.6	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.2, 0.7	0.3, 0.6	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.2, 0.7	0.8, 0.1
X_{13}	0.5, 0.4	0.3, 0.6	0.5, 0.4	0, 1	0, 1	0.9, 0	0, 1	0, 1	0, 1	0.4, 0.5	0.4, 0.5	0.4, 0.5	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0
X_{14}	0.4, 0.5	0.3, 0.6	0.4, 0.5	0, 1	0, 1	0.7, 0.2	0, 1	0, 1	0, 1	0.6, 0.3	0.5, 0.4	0.8, 0.1	0.9, 0	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.7, 0.2	0.8, 0.1
X_{15}	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.8, 0.1
X_{16}	0.5, 0.3	0, 1	0, 1	0.5, 0.4	0.5, 0.4	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0	0, 1	0, 1	0, 1	0.6, 0.2
X_{17}	0.8, 0.1	0.6, 0.2	0.7, 0.2	0, 1	0, 1	0.7, 0.3	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0	0.9, 0	0, 1	0, 1	0, 1	0.6, 0.2	0.6, 0.2
X_{18}	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0
X_{19}	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0, 1	0.9, 0	0, 1

引入风险偏好参数。根据专家意见,分析以风险中性为准,即选取 $\beta=0.5$ 。通过步骤4,得出直接影响矩阵,而后用DEMATEL法计算,结果见表3。

表3 DEMATEL 计算结果

Tab.3 Summary of DEMATEL calculations

因素	影响度	被影响度	中心度	原因度
X_1	1.506 582	0.964 889	2.471 471	0.541 693
X_2	0.463 064	1.473 517	1.936 581	-1.010 45
X_3	0.888 532	1.282 71	2.171 242	-0.394 18
X_4	1.817 182	0.319 161	2.136 343	1.498 021
X_5	1.817 183	0.253 223	2.070 406	1.563 96
X_6	0.256 64	1.273 488	1.530 128	-1.016 85
X_7	1.655 422	0.385 364	2.040 786	1.2700 58
X_8	0.562 267	0	0.562 267	0.562 267
X_9	1.863 424	0	1.863 424	1.863 424
X_{10}	1.479 077	1.475 627	2.954 704	0.003 45
X_{11}	1.098 302	1.338 386	2.436 688	-0.240 08
X_{12}	0.621 944	1.463 353	2.085 297	-0.841 41
X_{13}	1.215 55	1.327 091	2.542 641	-0.111 54
X_{14}	1.750 034	0.897 084	2.647 118	0.852 949
X_{15}	0.150 44	0.218 371	0.368 811	-0.067 93
X_{16}	0.986 892	0	0.986 892	0.986 892
X_{17}	1.788 418	0	1.788 418	1.788 418
X_{18}	0.168 137	3.256 286	3.424 423	-3.088 15
X_{19}	0.168 137	4.328 677	4.496 814	-4.160 54

依据表3数据,标绘出高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃影响因素的因果图(图2)。

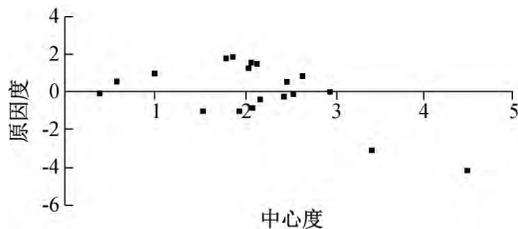


图2 影响因素原因结果

Fig.2 reason and result figure of influence factors

根据经验选取合适的 λ 值,通过步骤5,计算出可达矩阵。根据步骤6,得出高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃影响因素分级表(表4)。

表4 影响因素阶梯表

Tab.4 staircase of influence factors

阶梯	影响因素集	说明
第1级	$X_2, X_6, X_8, X_{12}, X_{15}, X_{16}, X_{18}, X_{19}$	表层因素
第2级	X_3, X_7, X_{11}, X_{13}	中层因素
第3级	$X_1, X_4, X_5, X_9, X_{10}, X_{14}, X_{17}$	根源因素

根据表4,绘制影响因素递阶层次结构图(图3)。

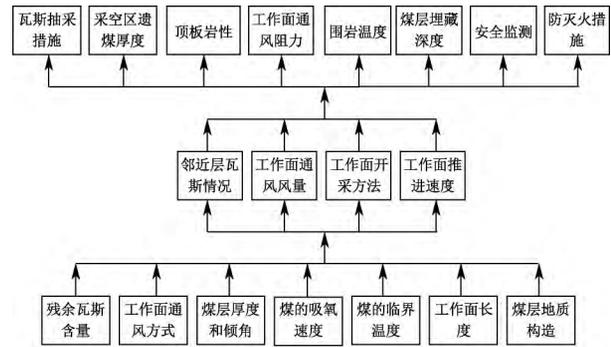


图3 影响因素层次结构

Fig.3 Hierarchical structure diagram of influence factors

2.3 结果分析

1) 原因因素按原因度从高到低排序,依次为 X_9 (煤层厚度和倾角)、 X_{17} (煤层地质构造)、 X_5 (煤的临界温度)、 X_4 (煤的吸氧速率)、 X_7 (工作面开采方法)、 X_{16} (煤层埋藏深度)、 X_{14} (工作面长度)、 X_8 (顶板岩性)、 X_1 (残余瓦斯含量)、 X_{10} (工作面通风方式),原因因素的原因度越高,对其他因素的影响越大。

2) 结果因素按原因度绝对值从高到底排序,依次为 X_{19} (防灭火措施)、 X_{18} (安全监测)、 X_6 (采空区遗煤厚度)、 X_2 (瓦斯抽采措施)、 X_{12} (工作面通风阻力)、 X_3 (邻近层瓦斯情况)、 X_{11} (工作面通风风量)、 X_{13} (工作面推进速度)、 X_{15} (围岩温度)结果因素的原因度绝对值越大,受其他因素的影响越大。

3) 通过图3可以发现,影响因素呈三级递阶分布,其中 X_1 (残余瓦斯含量)、 X_4 (煤的吸氧速率)、 X_5 (煤的临界温度)、 X_9 (煤层厚度和倾角)、 X_{10} (工作面通风方式)、 X_{14} (工作面长度)、 X_{17} (煤层地质构造)是造成高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃的根源因素; X_3 (邻近层瓦斯情况)、 X_7 (工作面开采方法)、 X_{11} (工作面通风风量)、 X_{13} (工作面推进速度)是高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃的中间因素,影响着其他因素,又受其他因素影响; X_{19} (防灭火措施)、 X_{18} (安全监测)、 X_6 (采空区遗煤厚度)、 X_2 (瓦斯抽采措施)、 X_{12} (工作面通风阻力)、 X_{15} (工作面推进速度)、 X_{16} (煤层埋藏深度)、 X_8 (顶板岩性)是高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃的表层原因,对采空区遗煤自燃有直接影响。

3 结论

1) 根据高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃影响因素系统中各因素是否影响其他因素,将影响因

素分为原因因素和结果因素。

2) 构建了高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃影响因素的递阶模型,找出影响高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃的表层因素,中层因素及根源因素。残余瓦斯含量、工作面通风方式等因素从根源上影

响了高瓦斯易自燃煤层采空区遗煤自燃。从这些根源因素着手,可有效防止此类煤层采空区遗煤自燃。

3) 目前只是定性分析影响此类煤层采空区遗煤自燃的各个因素,下一步研究工作应是评价此类煤层采空区遗煤的自燃危险性。

参 考 文 献

- [1] 周福宝.瓦斯与煤自燃共存研究(I):致灾机理[J].煤炭学报,2012,37(5):843-849.
ZHOU Fubao. Study on the coexistence of gas and coal spontaneous combustion (I): disaster mechanism [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 843-849.
- [2] 曹楠.高瓦斯综采工作面煤层自燃封闭火区治理技术研究[D].西安:西安科技大学,2012.
CAO Nan. Management of technology research on working face of the self-ignition in high-gas coal seam [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [3] 李同锁,何启林.集对分析在煤炭自然发火危险性评价上的应用[J].中国安全生产科学技术,2013,9(8):54-58.
LI Tongsuo, HE Qilin. Application of set pair analysis in the risk evaluation of coal spontaneous combustion [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(8): 54-58.
- [4] 王明重,刘泽功,张箫剑,等.基于AHP和扩展集对理论的采空区遗煤自燃危险性评价研究[J].中国安全生产科学技术,2014,10(8):182-188.
WANG Mingzhong, LIU Zegong, ZHANG Xiaojian, et al. Research on risk assessment of spontaneous combustion of goaf coal based on analytic hierarchy process and extended set pair theory [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 10(8): 182-188.
- [5] 杨胜强,秦毅,孙家伟,等.高瓦斯易自燃煤层瓦斯与自燃复合致灾机理研究[J].煤炭学报,2014,39(6):1094-1101.
YANG Shengqiang, QIN Yi, SUN Jiawei, et al. Research on coupling hazard mechanism of mine gas and coal fire for a gassy and high spontaneous combustion propensity coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1094-1101.
- [6] 李宗翔,贾化成,毕强,等.放顶煤采空区瓦斯源强度与自燃的关联性[J].煤炭学报,2012,37(增1):120-125.
LI Zongxiang, JIA Huacheng, BI Qiang, et al. Study on relevance between gas source strength and spontaneous combustion in goaf of top coal caving [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 120-125.
- [7] 褚廷湘,余明高,杨胜强,等.瓦斯抽采对U+II型近距离煤层自燃的耦合关系[J].煤炭学报,2010,35(12):2082-2087.
CHU Tingxiang, YU Minggao, YANG Shengqiang, et al. Coupling between gas drainage and spontaneous combustion about close distance coal seams in U+II type workface [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2082-2087.
- [8] 宋万新,杨胜强,蒋春林,等.含瓦斯风流条件下煤自燃产物CO生成规律的实验研究[J].煤炭学报,2012,37(8):1320-1325.
SONG Wanxin, YANG Shengqiang, JIANG Chunlin, et al. Experimental research on the formation of CO during coal spontaneous combustion under the condition of methane-contained airflow [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1320-1325.
- [9] 侯江明,周德群.基于DEMATEL和ISM的分布式能源系统影响因素研究[J].国际非线性科学,2011,12(1):36-41.
HOU Jiaming, ZHOU Dequn. Study on influence factors of distributed energy system based on DEMATEL and ISM [J]. International Journal of Nonlinear Science, 2011, 12(1): 36-41.
- [10] 汪送.复杂系统安全事故致因网络建模分析[J].中国安全科学学报,2013,23(2):109-116.
WANG Song. Modelling analysis of complex system accident causation network [J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(2): 109-116.
- [11] 申霞,夏月,杨校毅,等.集成DEMATEL/ISM的煤矿工人违章行为[J].中国安全科学学报,2015,25(9):145-151.
SHEN Xia, XIA Yue, YANG Xiaoyi, et al. DEMATEL and ISM-based study on factors influencing miners' violation behavior [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(9): 145-151.
- [12] 闵桂龙,端木京顺,高建国,等.基于模糊DEMATEL的航空维修安全管理体系研究[J].中国安全科学学报,2015,25(11):145-149.
MIN Guilong, DUANMU Jingshun, GAO Jianguo, et al. Research on safety management system for aviation maintenance based on fuzzy DEMATEL [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(11): 145-149.
- [13] 谢晖,段万春,孙永河.基于直觉模糊偏好信息的群组DEMATEL决策方法[J].计算机工程与应用,2014,50(11):33-38.
XIE Hui, DUAN Wanchun, SUN Yonghe. Group DEMATEL decision approach based on intuitionistic fuzzy preference [J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(11): 33-38.



作者简介:周亮(1980—)男,江西玉山人,博士,讲师,主要从事煤矿安全、消防安全、安全人机工程等方面的研究。E-mail:28928188@qq.com。