

# 矿井通风系统危险源辨识、评价与控制

周 刚<sup>1,2</sup>,程卫民<sup>1</sup>,田传强<sup>3</sup>,王 昊<sup>1</sup>,张 磊<sup>1</sup>,文金浩<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,山东 青岛 266590;

2. 澳大利亚联邦科学与工业研究组织 能源研究分院,昆士兰 布里斯班 4069;

3. 枣庄矿业(集团)有限责任公司 通风防尘处,山东 枣庄 277000)

**摘 要:**针对矿井通风系统影响因素多、难以辨识与评价的现状,首先采用故障类型及影响分析方法对矿井通风系统危险源进行辨识,得到由 14 个重要指标构成的危险源指标体系,并结合 Delphi 法确定了各指标的临界值。其次,利用模糊区间与层次分析相结合的方法确定了各指标的常权值,发现矿井是否独立通风、分区通风及风区风路是否角联对通风系统的可靠性影响最大。然后,根据模糊集值统计分析法对通风系统危险源进行了分级,并确定了每一级别的危险度值。再则,通过引入状态变权向量和加法合成法,构建了矿井通风系统动态变权综合评价模型。最后,以欢城煤矿为例,进行了通风系统变权前后的危险源评价,得到该矿通风系统为 I 级危险源,并根据评价结果提出了包括增加通风网络可靠性、提高主要通风机能力、增大矿井有效风量、降低矿井负压在内的控制措施,增风降阻,保障矿井的安全生产。

**关键词:**通风系统;故障类型及影响分析;模糊集值统计分析;动态变权;评价控制

中图分类号:TD724

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)06-0051-07

## Hazard Identification, Evaluation and Control of Mine Ventilation System

Zhou Gang<sup>1,2</sup>, Cheng Weimin<sup>1</sup>, Tian Chuanqiang<sup>3</sup>, Wang Hao<sup>1</sup>, Zhang Lei<sup>1</sup>, Wen Jinhao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Energy Flagship, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Brisbane, Queensland 4069, Australia;

3. Ventilation and Dust Prevention Department, Zaozhuang Mining Group Co. Ltd, Zaozhuang, Shandong 277000, China)

**Abstract:** This study focuses on the critical problems of mine ventilation system in its hazard identification, evaluation and control. Firstly, with failure mode and effect analysis, the hazard sources of mine ventilation system were identified and hazard indexes system consisting of 14 important indexes was achieved, then the threshold of each index was determined by means of Delphi. Secondly, the constant weight values for all indexes were determined through combining fuzzy interval and analytic hierarchy process to locate the three dominant cases that influence the reliability of ventilation system. Thirdly, the hazard sources were classified with the statistical analysis of fuzzy set value, and the risk value of each level was determined. Besides, comprehensive evaluation model of dynamic variable weight was established in light of the state variable weight vectors and additive synthesis. Finally, the test field

收稿日期:2013-11-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51204103);山东煤炭安全高效开采技术与装备协同创新中心项目;中国煤炭工业协会科学技术研究指导性计划项目(MTKJ2013-358);山东省“泰山学者”建设工程专项经费项目;山东省安全生产科技发展计划项目(LAK2012-1);山东科技大学矿业与安全工程学院科研创新团队项目(2012ZHTD06);山东科技大学杰出青年科技人才支持计划项目(2014JQJH106)

作者简介:周 刚(1979—),男,安徽阜南人,副教授,博士(后),主要从事矿井通风、防尘、防灭火等方面的研究。

E-mail:ahsdzhougang@163.com

work was conducted in Huancheng coal mine on its hazard evaluation of ventilation system. The evaluation results show the hazard level was I and the corresponding control measures were suggested for safety insurance.

**Key words:** ventilation system; failure mode and effect analysis; statistical analysis of fuzzy set value; dynamic weight; evaluation and control

矿井通风系统是矿井生产系统的重要组成部分,对保障矿井的安全生产、提高矿井的经济效益意义重大。长期以来,对矿井通风系统的研究主要集中在以下方面:①衰老、通风复杂矿井均衡通风理论与优化方法<sup>[1-2]</sup>;②基于海量数据的矿井通风系统网络解算与通风仿真<sup>[3-4]</sup>;③灾变时期通风系统风流流动理论及其可靠性、稳定性评价<sup>[5-6]</sup>;④通风系统风流流动规律数值分析与模拟试验<sup>[7]</sup>。但很少有学者将危险源辨识、评价的相关理论引入矿井通风系统领域进行研究。为此,本文对矿井通风系统危险源指标体系、评价指标的危险度值、通风系统动态变权综合评价模型、通风系统危险源分级及应用进行了研究。

## 1 运用故障类型及影响分析法辨识矿井通风系统危险源

目前,矿井通风系统危险源常用的辨识方法主要有经验法和系统分析法。其中经验法又可分为对照法和类比法;系统分析法即应用安全系统工程评价中的某些方法进行危险源辨识。常用的系统安全分析方法主要有事件树(event tree analysis, ETA)、事故树(fault tree analysis, FTA)、故障类型及影响分析(failure mode and effects analysis, FMEA)等。

故障类型及影响分析(FMEA)是采用系统分割的方法,根据需要将通风系统分割成子系统或单元,然后逐个分析子系统或单元潜在的各种故障类型(危险源)、产生的原因及其对子系统乃至整个系统的不良影响。采用 FMEA 对矿井通风系统危险源进行辨识的基本步骤为:①明确和熟悉矿井通风系统;②确定分析的层次;③绘制矿井通风系统图和网络图;④分析矿井通风系统故障类型(危险源)及其影响;⑤编制矿井通风系统危险源一览表。

根据 FMEA 分析,构建矿井通风系统危险源指标体系,如表 1 所示。对照《煤矿安全规程》《AQ1056—2008 煤矿通风能力核定标准》《煤矿安全质量标准化基本要求及评分方法(试行)》可知,该表中包括的危险源指标体系内容全面,而且符合相关规程、标准的要求。如在矿井风量保障方面,此指标体系包括主要通风机能力、矿井有效风量、矿井风量供需、矿井外部漏风等 4 个指标,涵盖了上述 3 个规程、标准所规定的内容,实现了部门规章、煤炭行业标准和煤矿安全标准之间的衔接问题。

表 1 矿井通风系统危险源指标体系

Tab. 1 Hazard index system of mine ventilation system

序号	危险源	临界值	序号	危险源	临界值
1	矿井不独立通风系统	0	8	采区反风系统	采区数
2	矿井没有进行分区通风	0	9	采掘面串联通风数	0
3	用风区风流不稳定的角联风路	0	10	矿井外部漏风	15% $Q_{机}$
4	主要通风机能力	1.2 $Q_{需}$	11	矿井最大负压/Pa	3 000
5	通风设施质量不合格或使用维护不当	0	12	矿井巷道失修严重率	0
6	矿井有效风量	85% $Q_{总}$	13	下行通风采面数	0
7	矿井风量供需	100% $Q_{需}$	14	矿井通风系统回风段阻力	35% $H_{总}$

注:表中各危险源指标的临界值通过德尔菲(Delphi)方法确定。 $Q_{需}$ —矿井总需风量; $Q_{总}$ —矿井总进风量; $Q_{机}$ —主通风机排风量; $H_{总}$ —矿井总通风阻力

## 2 矿井通风系统危险源的动态变权综合评价模型

首先,采用模糊区间层次分析法确定各评价指标的常权值,应用模糊集值统计方法,确定矿井通风系统

危险源的危险度值;然后,通过各评价指标危险度值的变化实现评价过程中的变权,从而建立矿井通风系统危险源的动态变权综合评价数学模型。

### 2.1 通风系统危险源评价指标常权值及危险度值

根据专家打分结果,采用模糊区间与层次分析法确定矿井通风系统危险源指标的常权值为:0.161,0.112,0.141,0.051,0.032,0.065,0.101,0.032,0.041,0.043,0.072,0.025,0.044,0.080<sup>[8-9]</sup>。基于煤矿通风方面的相关规程、标准,参考专家意见,应用模糊集值统计方法,确定各危险源评价指标的危险度值如表2所示。

表2 矿井通风系统危险源指标的危险度值

Tab.2 Risk value of each hazard index of mine ventilation system

序号	危险源	分 级	危险度值
1	矿井不独立通风系统	0	0
		$\geq 1$	100
2	矿井没有进行分区通风	0	0
		$\geq 1$	100
3	用风区风流不稳定的角联风路	0	0
		$\geq 1$	100
4	主要通风机能力	$>1.2 Q_{需}$	0
		1.1(含)~1.2 $Q_{需}$	60
		1.0(含)~1.1 $Q_{需}$	80
		$<1.0 Q_{需}$	100
5	通风设施质量不合格或使用维护不当	0	0
		1	60
		2~3	80
		4	90
		$>4$	100
6	矿井有效风量	$\geq 85\% Q_{总}$	0
		80%(含)~85% $Q_{总}$	60
		75%(含)~80% $Q_{总}$	85
		$<75\% Q_{总}$	100
7	矿井风量供需	$\geq 100\% Q_{需}$	0
		95%(含)~100% $Q_{需}$	60
		85%(含)~95% $Q_{需}$	90
		$<85\% Q_{需}$	100
8	采区反风系统	等于采区数	0
		$\geq$ 采区数的85%	40
		采区数的60%(含)~85%	80
		采区数的50%(含)~60%	90
		$<$ 采区数的50%	100
9	采掘面串联通风数	0	0
		1	80
		2	100

续表 2

序号	危险源	分级	危险度值
10	矿井外部漏风	$\leq 15\% Q_{机}$	0
		15%~20% $Q_{机}$ (含)	75
		20%~25% $Q_{机}$ (含)	85
		25%~30% $Q_{机}$ (含)	90
		$> 30\% Q_{机}$	100
11	矿井最大负压/Pa	$\leq 3\ 000$	0
		3 000~3 300(含)	80
		3 300~3 800(含)	90
		$> 3\ 800$ (含)	100
12	矿井巷道失修严重率	0	0
		0~1%(含)	50
		1%~2%(含)	70
		2%~3%(含)	90
		$> 3\%$	100
13	下行通风采面数	0	0
		1	80
		2	100
14	矿井通风系统回风段阻力	$\leq 35\% H_{总}$	0
		35%~40% $H_{总}$ (含)	75
		40%~45% $H_{总}$ (含)	85
		$> 45\% H_{总}$	100

## 2.2 矿井通风系统危险源评价的变权方法

在目前危险性安全评价中,危险源的权值不能随着危险度值的变化而变换,导致评价时实际危险的严重程度不能被有效突出。因此,为了显示危险源的本质属性,将变权引入评价过程,则可有效避免因危险源指标较多而带来的评价结果不准确问题。拟通过改变各评价指标的危险度值来实现矿井通风系统危险源的变权<sup>[10-12]</sup>。

将危险源常权向量  $\mathbf{W}$  和状态变权向量  $\mathbf{S}(z)$  进行归一化 Hardarmard 乘积,即可得到变权向量:

$$\mathbf{W}(z) = \frac{\mathbf{W} \cdot \mathbf{S}(z)}{\sum_{j=1}^m \omega_j s_j(z)} \quad (1)$$

其中: $\mathbf{S}(z)$ —危险源的状态变权向量, $\mathbf{S}(z) = (s_1(z), s_2(z), \dots, s_m(z))$ ;  $\mathbf{W}(z)$ —危险源的变权向量, $\mathbf{W}(z) = (W_1(z), W_2(z), \dots, W_m(z))$ ;  $z$ —危险源的状态值向量, $z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$ ;  $\mathbf{W}$ —危险源的常权向量, $\mathbf{W} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ 。

在矿井通风系统危险源评价中,取 $[0, 100]$ 为危险源的状态值,若评价指标的危险度值为状态值,则危险源的状态变权向量为:

$$S_j(z_1, z_2, \dots, z_m) = \prod_{i=1, i \neq j}^m \frac{1}{z_i} \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (2)$$

可得变权值:

$$W_j(z_1, z_2, \dots, z_m) = \frac{\omega_j S_j(z)}{\sum_{i=1}^m \omega_i S_i(z)} = \frac{\omega_j z_j}{\sum_{i=1}^m \omega_i z_i} \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

若评价指标的安全度值为状态值,则指标的状态变权向量:

$$S_j(z_1, z_2, \dots, z_m) = \prod_{i=1, i \neq j}^m z_i \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

可得变权值:

$$W_j(z_1, z_2, \dots, z_m) = \frac{w_j S_j(z)}{\sum_{i=1}^m w_i S_i(z)} = \frac{w_j / z_j}{\sum_{i=1}^m w_i / z_i} \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

为了保证变权能在矿井通风系统危险源评价中得以可靠应用,约定如下:

①若任一指标的危险度值或安全度值为0时,则此指标的危险度值或安全度值取1,以保证状态变权向量  $S(z)$  的连续性;②为了突出矿井通风系统危险源评价中主因素的影响,只对主因素做变权处理,而不是对所有因素做变权处理;③当主因素指标的危险度值大于规定的最小危险度值(60)或安全度值小于规定的最小安全度值(80)时,在评价体系内做变权处理。

### 2.3 矿井通风系统危险源综合评价值的确定

在确定了矿井通风系统危险源的危险度值和相应变权方法后,采用加法合成来计算危险性综合评价值。加法合成适用于危险源相互独立且相互补偿的情况,该方法突出了危险度值较大且权数较大的危险源,比较接近主因素突出型的评价合成方法。加法合成计算公式为:

$$u = \sum_{k=1}^n w_k u_k. \quad (6)$$

其中:  $u$ —矿井通风系统危险性的评价值;  $w_k$ —第  $k$  个危险源的权值;  $u_k$ —第  $k$  个危险源的危险度值;  $n$ —危险源个数,取 14。

针对矿井通风系统危险源的层次结构,应用式(6)就能对矿井通风系统的危险性进行计算、评价。

## 3 矿井通风系统危险源分级

基于危险源评价结果,根据危险源在触发因素作用下,转化为事故的可能性大小与发生事故后果严重程度等原则进行划分<sup>[13]</sup>:

1) I级危险源:通风系统危险性的评价值大于80。

①不易发生事故,但是一旦有外界触发因素(人员素质较差、通风设施失灵、作业环境变化等)导致发生事故,可造成重大人员伤亡或直接经济损失在20万元以上的通风系统的有关设备、设施或作业场所;②事故发生后造成的后果并不严重,但是发生事故的可能性非常大的危险源。

2) II级危险源:通风系统危险性的评价值介于60与80之间。

较容易发生事故,一旦由于外界因素触发导致事故,可能导致死亡或多人重伤和直接经济损失在10万元以上的通风系统的有关设备、设施和作业场所。

3) III级危险源:通风系统危险性的评价值小于60。

容易发生事故,在外界因素触发下可导致事故,可能导致重伤事故和直接经济损失在5万元以上的通风系统的有关设备、设施及场所。

## 4 应用实例

应用上述技术,对微山湖矿业集团欢城煤矿进行矿井通风系统危险源辨识与评价。并根据评价结果提出针对该矿的矿井通风系统改造方案,有效地解决采掘地点风量不足的问题,在保证矿井安全生产的同时,提高原煤产量,取得显著的经济效益和社会效益。

### 4.1 矿井概况

欢城煤矿设计生产能力45万t/a。该矿为混合式通风方式,抽出式通风方法。矿井负压为3100Pa,等积孔为1.14m<sup>2</sup>,矿井总进风量为3079m<sup>3</sup>/min,总回风量为3269m<sup>3</sup>/min。

按矿井实际风量计算,该矿生产能力应为 35.4 万 t/a,只能安排 2 个回采工作面、6 个掘进迎头和 12 个硐室,满足不了 45 万 t/a 生产能力的要求。若按矿井实际生产能力配风,风量应为 3 918 m<sup>3</sup>/min,与实际风量相差 839 m<sup>3</sup>/min。

#### 4.2 矿井通风系统危险源辨识及评价结果

根据矿井通风系统危险源辨识方法,辨识出该矿井通风系统主要存在 I 级危险源 4 个,II 级危险源 2 个,如表 3 所示。

从表 3 可以看出,该矿通风系统的主要危险源基本上是由于通风网络不稳定、通风距离过长、通风阻力过大、主要通风机性能老化而造成的,已严重限制了井下采掘工作面的实际供风量,影响了矿井的安全、高效生产。该矿通风系统危险源评价计算过程如表 4 所示。根据矿井通风系统的评价数学模型,可得出变权后通风系统危险性的评价值为 89.94,即 I 级危险源,基本符合现场实际;若不变权,其值为 33.47,仅为 III 级危险源,不符合实际情况。说明矿井通风系统危险源评价的变权方法是科学、合理的。

表 3 2011 年度上半年欢城煤矿通风系统主要危险源辨识结果

Tab. 3 Hazard identification results of Huancheng mine's ventilation system in the first half of the year

序号	主要危险源	指标值	临界值	发生原因	对矿井通风系统的影响
1	用风区风流不稳定的角联风路	1	0	风门使用维护不当	对矿井风流的稳定性和灵敏性有较大影响
2	主要通风机能力	1.08Q <sub>需</sub>	1.2Q <sub>需</sub>	主要通风机性能老化	影响矿井风量供需比
3	矿井有效风量	73%Q <sub>总</sub>	>85%Q <sub>总</sub>	矿井通风距离过长	限制煤炭生产存在事故隐患
4	采区反风系统	采区数的 86.7%	等于采区数	矿井通风系统不合理	影响通风系统抗灾能力
5	矿井最大负压/Pa	3 100	<3 000	矿井通风阻力过大	井下用风地点风量不足
6	矿井巷道失修严重率	1.9%	0	巷道失修	对采区通风阻力有较大影响

表 4 2011 年度上半年欢城煤矿通风系统危险源评价

Tab. 4 Hazard evaluation results of Huancheng mine's ventilation system in the first half of the year

序号	主要危险源	危险度值	常权值	变权值	变权前后评价过程	
					变权前	变权后
1	用风区风流不稳定的角联风路	100	0.141	0.421	14.10	42.10
2	主要通风机能力	80	0.051	0.122	4.08	9.76
3	矿井有效风量	100	0.065	0.194	6.50	19.40
4	采区反风系统	40	0.032	0.032	1.28	1.28
5	矿井最大负压	80	0.072	0.172	5.76	13.76
6	矿井巷道失修严重率	70	0.025	0.052	1.75	3.64

#### 4.3 矿井通风系统改造方案及应用效果

以消除通风系统危险源为目的,按照增加通风网络稳定性、提高主要通风机能力、增大矿井有效风量、降低矿井负压的要求,提出了矿井通风系统的改造方案。

##### 4.3.1 矿井通风系统改造方案

①在二号井工业广场内新施工一个深度为 410 m 的风井用于二号井回风,并密闭二号井旧总回;②形成一号井与二号井各自独立的通风系统,避免通风网络角联带来的通风系统不稳定问题,同时可使二号井回风距离缩短 800 m;③对主通风机电机、叶片等附属设施更新、改造,进一步提高主扇能力。

##### 4.3.2 应用效果

实践证明:通风优化方案应用后,提高了通风能力,减少了风压损失,改善了通风状况。经通风系统改造后矿井总进风量达到 5 612 m<sup>3</sup>/min,总回风量为 5 907 m<sup>3</sup>/min,不仅满足了现阶段采掘工作面需风,而且能够保证-400 m 水平延深所需的 4 968 m<sup>3</sup>/min 风量;矿井总通风阻力降低到 1 430 Pa;矿井最大生产能力提高至 64 万 t/a。此外,通风系统改造完成后,防止了重大通防事故的发生,提高了矿井的抗灾能力,而且每年可节约通风电费 175 万元。

## 5 结论

1) 基于系统分割原理,采用故障类型及影响分析(FMEA)方法对矿井通风系统危险源进行了辨识,得到矿井通风系统危险源的14项指标体系,并结合Delphi法确定了每项指标的临界值。

2) 采用模糊区间层次分析法确定各评价指标的常权值;应用模糊集值统计方法,确定矿井通风系统危险源的危险度值;并以危险源常权向量和状态变权向量的Hardarmard乘积作为变权向量以体现危险源危险度值变化对评价结果的影响,结合加法合成法,确定了矿井通风系统危险源综合评价值,最终构建矿井通风系统危险源的动态变权综合评价数学模型。

3) 通过对欢城煤矿通风系统危险源辨识、评价及改造优化的工程应用,实践证明采用FMEA、模糊区间层次分析法、动态变权理论相结合的方法对矿井通风系统危险源进行预控,结果准确、实用性强。

### 参考文献:

- [1]潘竞涛,赵丹,李宗翔,等.大明矿通风系统故障源诊断及风速传感器的布置[J].煤炭学报,2013,38(S1):153-157.  
Pan Jingtao,Zhao Dan,Li Zongxiang,et al. Fault source diagnosis for ventilation system and air velocity transducer placement in Daming Mine[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(S1):153-157.
- [2]姜勇国.矿井通风管理及其信息管理系统[J].煤炭技术,2008,27(5):169-170.  
Jiang Yongguo. Mine ventilation management and information management system[J]. Coal Technology,2008,27(5):169-170.
- [3]程卫民,辛嵩,刘伟韬,等.矿井通风与安全[M].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [4]黄俊歆,王李管,熊书敏,等.矿井通风系统三维联通巷道建模算法及其应用[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(8):3173-3178.  
Huang Junxin,Wang Liguan,Xiong Shumin,et al. Modeling algorithm of mine ventilation 3D-interconnected airway and its application[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2012,43(8):3173-3178.
- [5]Zhou G,Cheng W M,Zuo Q M,et al. Research of fuzzy comprehensive evaluation with dynamic variable weights for ability of reducing and preventing hazard in mining ventilation system[C]//the 2008 International Symposium on Safety Science and Technology. Beijing:Science Press,2008:129-134.
- [6]贾进章.矿井火灾时期通风系统可靠性研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2004:54-56.
- [7]李宗国,程学珍,李乃良,等.基于SQL Server的矿井通风信息实时共享模块的设计[J].山东科技大学学报:自然科学版,2008,27(6):76-79.  
Li Zongguo,Cheng Xuezhen,Li Nailiang,et al. Design of the real time share module for mine ventilation information based on SQL server[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2008,27(6):76-79.
- [8]蒋泽军.模糊数学教程[M].北京:国防工业出版社,2004:115-120.
- [9]Chen S M. Fuzzy system reliability analysis using fuzzy number arithmetic operations[J]. Fuzzy Sets and Systems,1994,64(1):31-38.
- [10]程卫民,辛嵩.安全综合评价中的组合赋权和变权[J].安全与环境学报,2001,6(1):31-34.  
Cheng Weimin,Xin Song. Indices combination and variety weight of comprehensive safety assessment[J]. Journal of Safety and Environment,2001,6(1):31-34.
- [11]Preyssl C. Safety risk assessment and management; the ESA approach[J]. Reliability Engineering & System Safety,1995,49(3):303-309.
- [12]黄友锐.智能优化算法及其应用[M].北京:国防工业出版社,2008:173-176.
- [13]朱德明,尹经梅,王衍生.利用危险源辨识与控制技术对老矿区通风系统进行改造[J].山东煤炭科技,2003(1):1-2.  
Zhu Deming,Yin Jingmei,Wang Yansheng. Applying hazard identification and control technology for reforming the ventilation systems in old mines[J]. Shandong Coal Science and Technology,2003(1):1-2.

(责任编辑:吕海亮)