

基于层次分析法的泡沫除尘效率研究

周慧,代张音*,范芮雯

(贵州大学 矿业学院,贵州 贵阳 550025)

摘要:为了探究影响泡沫除尘效率的各因素的重要性,确定影响泡沫除尘效率的主控因素,将泡沫结构、发泡剂、泡沫生成效率、发泡工艺作为准则层,将准则层对应的影响因素作为指标层,构造影响泡沫除尘效率的判断矩阵,根据构造的判断矩阵对准则层因素及指标层因素的权重分别进行计算、排序并分析。研究表明:泡沫除尘剂除尘效率的主控因素是泡沫结构;泡沫结构的主控因素是表面活性剂吸附密度;发泡剂的主控因素是组分;发泡工艺的主控因素是发泡装置。研究结果对改进泡沫除尘技术、降低泡沫除尘经济成本具有重要意义。

关键词:层次分析法;主控因素;准则层;泡沫除尘;除尘效率

中图分类号:X964 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)03-0051-05

On the Efficiency of Foam Dust Removal Based on Analytic Hierarchy Process

ZHOU Hui, DAI Zhangyin, FAN Ruiwen

(College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to explore the importance of various factors affecting the efficiency of foam dust removal, and determine the main control factors affecting the efficiency of foam dust removal, in this paper, the foam structure, foaming agent, foam generation efficiency and foaming process are taken as the criterion layer, and the influencing factors corresponding to each factor in the criterion layer are taken as the index layer. The judgment matrix that affects the dust removal efficiency of foam is constructed. According to the constructed judgment matrix, the weights of the criterion layer factors and the index layer factors are calculated, sorted and analyzed. Results show that the main control factor of dust removal efficiency of foam dust remover is the foam structure, the main control factor of foam structure is the adsorption density of surfactant, the main controlling factor of foaming agent is component, and the main control factor of foaming process is foaming device. The research results are of great significance for improving foam dust removal technology and reducing the economic cost of foam dust removal.

Keywords: analytic hierarchy process(AHP); main controlling factor; criteria layer; foam dust remover; dust removal efficiency

现如今,煤尘防治问题已经是人类共同面临的问题,大量煤尘不仅危及工人的身体健康,对环境也造成污染,甚至引发爆炸事故,对安全也是一个巨大的威胁。随着煤层开采技术越来越先进,矿下工人的健康问题也亟待解决,尤其是针对小粒径的呼吸性粉尘。

目前已有的除尘技术主要有传统的水介质除尘技术、化学除尘技术及物理除尘技术。其中,泡沫除尘

技术由于其除尘率高,且用水量比其他湿式除尘少^[1],被广泛应用于煤矿除尘.日本学者在1982年研究了机采工作面泡沫喷射器不同安装方式对泡沫除尘效率的影响^[2];焦向东、王和堂^[3]研究设计了钻孔泡沫除尘与煤层注水等结合的综采面立体式防降尘技术方案;蒋仲安、陈举师等^[4-6]对泡沫除尘的机理、除尘剂配方以及泡沫发生器的性能进行了研究;徐盼盼^[7]通过对泡沫除尘机理的研究,优选出泡沫剂水溶液的配方和泡沫配比.为了改善泡沫的除尘效果,通常会在泡沫中加入润湿剂来降低泡沫的表面张力.孟庆国^[8]等研制出一种起泡率高且润湿性好的泡沫除尘复配方案.对于发泡装置方面,Wang Qingguo等^[9]将泡沫与细水雾一体化进行除尘,并根据掘进工作粉尘产生的特点提出了一种新型平扇泡沫喷嘴;王德明等^[10-11]对泡沫除尘的发泡装置进行了一系列研究来提高泡沫的利用率;赵雷涛^[12]设计了一套自动旋转泡沫除尘装置.目前已有的泡沫除尘技术的经济成本较高,为了实现较高的除尘效率必须加大发泡剂的用量.因此,研究泡沫除尘效率的影响因素,优化泡沫除尘技术,降低经济成本,对于推进泡沫除尘技术广泛应用到矿井中具有重大意义.

层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)是20世纪70年代美国运筹学家Saaty提出的一种层次权重决策分析方法,是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,然后进行定性和定量分析的决策方法^[13].层次分析法被广泛应用于煤矿除尘方面的研究,张松宁^[14]利用层次分析法建立了煤矿防尘综合评价指标体系;庞成^[15]利用层次分析法和模糊综合评价法对煤矿防尘工作进行了安全评价;赵清亚等^[16]结合模糊综合评价及层次分析法对综采、机掘工作面的除尘效果进行综合评价.目前有人利用层次分析法对润湿剂的抑尘效果及影响因素进行分析^[17],而未有学者利用层次分析法对泡沫除尘效率进行研究.由于泡沫结构、发泡剂、泡沫生成速率及发泡工艺对除尘效率都会产生影响,利用层次分析法计算影响因素的权重,可以直观地得到准则层及指标层各个因素的重要程度,从而确定影响除尘效率的主要因素及次要因素,掌握提高泡沫除尘效率的方法,为进一步优化泡沫除尘技术提供理论依据.

本文采用层次分析法对影响泡沫除尘效率的准则层及对应的指标层构造判断矩阵,并进行一致性检验.根据构造的判断矩阵计算准则层因素对泡沫除尘效率的权重以及指标层对准则层的权重,对权重值进行排序,并对所得结果进行分析.

1 构建评价指标体系

1.1 泡沫除尘机理

将泡沫剂和水按一定比例混合,通过发泡装置产生大量高倍数泡沫喷洒到尘源或空气中,形成无空隙的泡沫,然后捕集粉尘,泡沫粒子群大大增加了雾液与粉尘的接触面积和附着力^[18],从而使粉尘得到湿润和抑制,气泡液膜中的水分被粉尘吸收后逐渐变薄直至破裂,小粒径粉尘则聚集成大颗粒随破裂的液滴沉降.然而,由于煤尘大多具有疏水性,所以需要在泡沫剂中加入润湿剂以降低表面张力,改善泡沫对煤尘的润湿性能.

表面活性剂的吸附密度、接触角决定了泡沫结构,目前已有研究表明,泡沫结构是泡沫除尘效率的关键^[19],决定泡沫吸附粉尘的能力.发泡剂的组分、配比及润湿剂的添加对泡沫除尘剂的除尘效率也具有重大影响,在配置发泡剂的时候还必须要考虑经济因素,因为目前泡沫除尘剂的成本是一大难题.泡沫的数量取决于泡沫的生成速率,当泡沫的生成速率大于破裂速率时,泡沫的宏观体积才能增大,才能达到有效的除尘效果.发泡装置及安装方式对泡沫的产生和利用也会产生影响.

1.2 评价指标体系

层次分析法是将某一问题的各因素之间关系进行条理化并进行层次划分,通过各层因素的比较矩阵,利用数学方法对每一层因素的重要性进行分析,然后确定每一个因素对目标的重要性.层次分析法的步骤:(1)建立评价指标体系;(2)构造判断矩阵并赋值;(3)层次单排序及一致性检验;(4)指标权重及总排序.

影响泡沫除尘效率的准则层因素主要包括泡沫结构、发泡剂、泡沫生成速率、发泡工艺.泡沫结构的指标层因素包括表面活性剂吸附密度、接触角、表面张力;发泡剂的指标层因素包括配比、成本、润湿剂和组

分;发泡工艺的指标层因素包括发泡装置、安装方式、阻力.将泡沫除尘剂除尘效率的各层影响因素建立层次分析模型,如图 1 所示.

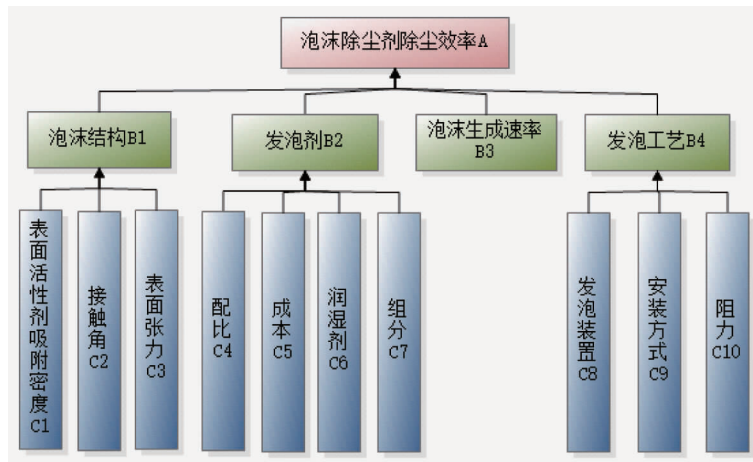


图 1 泡沫除尘剂除尘效率影响因素评价指标体系

2 泡沫除尘效率分析

2.1 构造判断矩阵并计算权重

为获得判断矩阵,邀请除尘方面专家对各影响因素的重要性按照九分度法进行赋值,重要性标度及含义如表 1 所示.赋值方法为矩阵中 a_{ij} 表示元素 a_i 的重要性与元素 a_j 的重要性之比,元素 a_j 的重要性与元素 a_i 的重要性之比为 $1/a_{ij}$.

表 1 重要性标度及含义

| 重要性标度 | 含义 |
|---------|------------------|
| 1 | 两者相比,两个元素具有同等重要性 |
| 3 | 两者相比,前者比后者稍重要 |
| 5 | 两者相比,前者比后者明显重要 |
| 7 | 两者相比,前者比后者强烈重要 |
| 9 | 两者相比,前者比后者极端重要 |
| 2,4,6,8 | 上述两两相邻判断的中间值 |

根据专家打分构造判断矩阵,由判断矩阵计算被比较元素对于该元素的相对权重,常用几何平均法(根法)和规范列平均法(和法)计算矩阵权重.几何平均法具有受极值影响较小这一优点,所以在此采用几何平均法,其算法为求 n 个元素的判断值连乘积的 n 次方根,得到各元素的几何平均值,再用各元素的几何平均值除 n 个几何平均值的和,得到权重值.判断矩阵及各指标权重值如表 2~表 5 所示.

表 2 准则层各因素间的比较判断矩阵及权重

| A | B1 | B2 | B3 | B4 | 权重 w |
|----|-----|-----|-----|-----|---------|
| B1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 0.428 6 |
| B2 | 1/2 | 1 | 3/2 | 1 | 0.214 3 |
| B3 | 1/3 | 2/3 | 1 | 2/3 | 0.142 8 |
| B4 | 1/2 | 1 | 3/2 | 1 | 0.214 3 |

表 3 泡沫结构下的各因素间的比较判断矩阵及权重

| B ₁ | C1 | C2 | C3 | 权重 w |
|----------------|-----|-----|-----|---------|
| C1 | 1 | 3 | 4 | 0.631 6 |
| C2 | 1/3 | 1 | 4/3 | 0.210 5 |
| C3 | 1/4 | 3/4 | 1 | 0.157 9 |

表 4 发泡剂下的各因素间的比较判断矩阵及权重

| B ₂ | C4 | C5 | C6 | C7 | 权重 <i>w</i> |
|----------------|-----|----|-----|-----|-------------|
| C4 | 1 | 4 | 2 | 1/2 | 0.266 7 |
| C5 | 1/4 | 1 | 1/2 | 1/8 | 0.066 7 |
| C6 | 1/2 | 2 | 1 | 1/4 | 0.133 3 |
| C7 | 2 | 8 | 4 | 1 | 0.533 3 |

表 5 发泡工艺下的各因素间的比较判断矩阵及权重

| B ₃ | C8 | C9 | C10 | 权重 <i>w</i> |
|----------------|-----|-----|-----|-------------|
| C8 | 1 | 2 | 3 | 0.545 4 |
| C9 | 1/2 | 1 | 3/2 | 0.272 7 |
| C10 | 1/3 | 2/3 | 1 | 0.181 8 |

2.2 一致性检验

一致性检验是检验构造矩阵和一致性矩阵的差异程度是否处于可接受的范围之内,将一致性指标 CI 与平均随机一致性指标 RI 进行比较,两者的比值为判断矩阵的随机一致性比例,记为 CR,当 CR<0.10 时,判断矩阵具有满意的一致性.在此以准则层 B 对目标层 A 的判断矩阵为例进行一致性检验.

首先,计算准则层对目标层的判断矩阵与其权重向量的乘积.

$$AW = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 \\ 1/2 & 1 & 3/2 & 1 \\ 1/3 & 2/3 & 1 & 2/3 \\ 1/2 & 1 & 3/2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.428 6 \\ 0.214 3 \\ 0.142 8 \\ 0.214 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.714 2 \\ 0.857 1 \\ 0.571 4 \\ 0.857 1 \end{pmatrix}.$$

式中:*A* 为准则层对目标层的判断矩阵;*W* 为判断矩阵 *A* 的权重向量.

然后,计算判断矩阵的最大特征值 λ_{max},其计算公式为

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nw_i}. \tag{1}$$

式中:(*AW*)_{*i*} 为向量 *AW* 的第 *i* 个分量;*w_i* 为权重向量 *W* 的第 *i* 个分量.

经计算准则层最大特征值 λ_{max} = 4.000 0.

最后,计算一致性比例 CR,其计算公式为

$$CR = \frac{CI}{RI}. \tag{2}$$

式中:CI 为一致性指标,且 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ (*n* 为矩阵阶数);RI 为平均随机一致性指标.

Saaty 提出的一致性指标 RI 值如表 6 所示.由于矩阵 *A* 为 4 阶,所以 RI 取 0.90.经计算,CI = 0.根据式(2)得 CR = 0<0.10,因此该矩阵通过一致性检验.

表 6 一致性指标 RI 值(1~7 阶)

| <i>n</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|---|---|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 |

同理,计算指标层的 3 个判断矩阵的一致性比例均小于 0.10,所以构造的判断矩阵均通过一致性检验.

2.3 指标权重及总排序

指标层元素权重计算方法是将指标层元素在判断矩阵中的权重乘以对应准则层元素的权重.通过计算得到指标层各因素的权重,分别对其进行单排序和总排序,结果如表 7 所示.

根据表 7 可知:影响泡沫除尘效率的准则层因素中,泡沫结构权重最大,发泡剂和发泡工艺的权重相同,生成速率权重最小;而影响泡沫结构的指标层因素中表面活性剂吸附密度的权重最大,同时,根据总排

序可知,表面活性剂吸附密度也是影响泡沫除尘效率最重要的指标层因素,因此,提升泡沫除尘效率应首先增大表面活性剂吸附密度;影响发泡剂性能最重要的因素是发泡剂组分;影响发泡工艺最重要的因素则是发泡装置。

表7 准则层与指标层各元素权重及排序

| 准则层 | 权重 | 排序 | 指标层 | 权重 | 单排序 | 总排序 |
|-----------|---------|----|--------------|---------|-----|-----|
| 泡沫结构 B1 | 0.428 6 | 1 | 表面活性剂吸附密度 C1 | 0.270 7 | 1 | 1 |
| | | | 表面张力 C2 | 0.090 2 | 2 | 4 |
| | | | 接触角 C3 | 0.067 7 | 3 | 5 |
| 发泡剂 B2 | 0.214 3 | 2 | 配比 C4 | 0.057 2 | 2 | 7 |
| | | | 成本 C5 | 0.014 3 | 4 | 10 |
| | | | 润湿剂 C6 | 0.028 6 | 3 | 9 |
| | | | 组分 C7 | 0.114 3 | 1 | 3 |
| 泡沫生成速率 B3 | 0.142 8 | 4 | | | | |
| 发泡工艺 B4 | 0.214 3 | 3 | 发泡装置 C8 | 0.116 9 | 1 | 2 |
| | | | 安装方式 C9 | 0.058 4 | 2 | 6 |
| | | | 阻力 C10 | 0.039 0 | 3 | 8 |

本文所选评价指标主要参考现有泡沫除尘相关研究成果,然而,目前对影响泡沫除尘效率的宏观研究较少,主要集中于某一方面的研究,因此本文所选的评价指标可能尚不全面,下一步应更加系统全面地分析影响泡沫除尘效率的因素。

3 结论

- 1) 建立泡沫除尘剂除尘效率影响因素评价指标体系,构造的判断矩阵均通过了一致性检验。
- 2) 准则层中泡沫结构是影响泡沫除尘效率的主控因素,发泡剂和发泡工艺的权重相同,泡沫生成速率权重最小;指标层中表面活性剂的吸附密度是影响泡沫除尘效率的主控因素。
- 3) 影响泡沫结构、发泡剂性能、发泡工艺的主控因素分别是表面活性剂吸附密度、组分、发泡装置。

参考文献:

- [1] 杨胜强.粉尘防治理论及技术[M].江苏:中国矿业大学出版社,2007:121-124.
- [2] 山尾信一郎,梅津富,刘建荣.机采工作面的泡沫除尘[J].煤矿安全,1984(4):50-53.
- [3] 焦向东,王和堂.高突煤层综采工作面立体化防降尘技术研究[J].煤炭工程,2018,50(10):109-112.
- [4] 蒋仲安,李怀宇.泡沫除尘技术的研究与应用[J].中国安全科学学报,1997(3):56-60.
- [5] 蒋仲安,李怀宇,杜翠凤.泡沫除尘机理与泡沫药剂配方的要求[J].中国矿业,1995(6):61-64.
- [6] 陈举师,蒋仲安,姜兰.露天矿潜孔钻机泡沫除尘发泡剂配方的实验研究[J].煤炭学报,2015,40(s2):407-412.
- [7] 徐盼盼.巷道掘进除尘泡沫配比及试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- [8] 孟庆国,周茵,兰文龙,等.环境友好型泡沫除尘剂协同试验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(4):105-110.
- [9] WANG Q G, WANG D M, HAN F W, et al. Study and application on foam-water mist integrated dust control technology in fully mechanized excavation face[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020,133:41-50.
- [10] 陆新晓,王德明,朱朝炳,等.压风射流添加发泡剂装置性能实验研究及应用[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):214-219.
- [11] 朱小龙,王德明,韩方伟.平扇形泡沫喷嘴的覆盖效率研究[J].煤矿安全,2015,46(5):32-35.
- [12] 赵雷涛.煤矿掘进机自动旋转泡沫除尘装置的设计[J].机电工程技术,2020,49(6):92-93.
- [13] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [14] 张松宁.煤矿防尘综合评价指标体系研究[J].能源与节能,2020(11):29-30.
- [15] 庞成.煤矿防尘安全评价体系研究[J].矿业安全与环保,2011,38(3):76-78.
- [16] 赵清亚,蒋仲安,王佩,等.采掘工作面除尘措施评价指标体系及应用研究[J].中国矿业,2013,22(10):100-104.
- [17] 姚建,吴爱祥,胡燕康,等.层次分析法在润湿剂抑尘评价中的应用[J].现代矿业,2014,30(6):87-89.
- [18] 奚志林,王德明,陆伟,等.泡沫除尘机理研究[J].煤矿安全,2006(3):1-4.
- [19] 徐超航.基于表面活性剂-高分子稳定剂协同效应的矿用经济高效抑尘发泡剂研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.