文章编号:1674-2869(2024)01-0097-08

基于SPA的涂料企业重大危险源安全风险评价

冷朝阳[1],董万强*[1,2],胡立嵩[1],王 美[1],王 帅[1],吴悠悠[1]
1. 武汉工程大学资源与安全工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 武汉渠清工程咨询有限公司,湖北 武汉 430074

摘 要:提出了一种针对涂料企业重大危险源安全风险等级的评价模型,从固有危险因子和危险抵消因子两个方面,构建了重大危险源评价指标体系,采用组合赋权判断各级指标权重,通过集对分析法(SPA)建立联系数函数,求出各指标单项联系数和整体联系数,以此为依据判定重大危险源的安全风险等级。结果表明:此模型可有效地解决评价中存在的重大危险源定量困难的难题,评价结果既能对企业安全状况作出分析,又能对企业未来的安全趋势作出合理的预测,可以为重大危险源的安全监管和事故预防工作提供理论支持。

关键词:集对分析;组合赋权;重大危险源;联系数
中图分类号:X937 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202305017

Evaluation of safety risk of major hazardous installations in coating enterprises based on set pair analysis

LENG Chaoyang[1], *DONG Wanqiang*[*1,2], *HU Lisong*[1], *WANG Mei*[1], *WANG Shuai*[1], *WU Youyou*[1]
1. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Quqing Engineering Consulting Co., Ltd, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper proposes an evaluation model for the safety risk levels of major hazard installations in coating enterprises, and constructs an evaluation index system of major hazard installations from aspects of inherent risk factors and risk offsetting factors. The combined weighting was used to judge the weights of index at all levels, and the connection number function was established by set pair analysis to calculate the single connection number and overall connection number of each index. The safety risk level of major hazard installations was determined. The results show that this model can effectively solve the difficult problems of quantitative evaluation of major hazard installations. This model can not only analyze the existing safety situation of coating enterprises, but also make a reasonable prediction for the future safety trend of enterprises, which can provide theoretical support for the safety supervision and accident prevention of major hazard installations.

Keywords: set pair analysis; combined weighting; major hazard installations; connection number

随着中国经济向高质量发展转变,化工安全管理体系在各行业都变得越来越重要。特别是在涂料行业,由于该行业涉及危险品的生产和使用,因此在化工安全管理方面需要特别重视。由于涂料企业的制造原料具有易燃,易爆,有毒等危险化学品的属性,非常容易导致发生重大火灾、爆炸及

收稿日期:2023-05-22
基金项目:武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2022580)
作者简介:冷朝阳,硕士研究生。Email:626620876@qq.com
***通信作者**:董万强,博士研究生,工程师。Email:honestman08@163.com
引文格式:冷朝阳,董万强,胡立嵩,等. 基于SPA的涂料企业重大危险源安全风险评价[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(1):97-104.

泄漏事故，且一旦发生事故，就会给被困人员与救援人员生命安全造成严重威胁，因此提升涂料企业安全风险分级管控水平、安全监管工作准确性与有效性，进而提升涂料企业的整体安全性具有重要的现实意义[1]。相关研究表明对涂料生产企业进行重大危险源安全风险等级评价，确定涂料生产企业重大危险源评价标准、分级标准有利于实现企业风险分级管控水平提升，进而可以实现从源头上预防涂料生产企业火灾事故[2]。

目前，国内统一的重大危险源分级标准有烟花爆竹行业、金属非金属地下矿山行业、煤矿矿井行业等，尚未就涂料行业制定统一的重大危险源分级标准。在对重大危险源分级实践中，静态分级法和动态分级法是常用的重大危险源分级方法，但实际上影响重大危险源安全状况的因素是复杂多源的[3-4]。例如，王晓丽等基于LabVIEW平台开发出的重大危险源动态分级系统[5]；徐尚仲等基于模糊综合评判的方法，对导致事故发生的因素进行量化，利用等级参数评判法得出危险性的大小[6]。通过文献调研可以发现，重大危险源安全风险评价涉及众多因素和数据，其中很多因素都存在不确定性，这就要求在评价过程中充分考虑这些因素，并通过合适的方法来消除不确定性带来的影响，以保证评价结果的可靠性和准确性。为此，本文建立了一个基于集对分析理论的重大危险源安全风险等级评价模型，并基于湖北某涂料企业的安全风险分级管控现状对该评价模型进行了验证，本研究可为涂料企业的安全风险分级管控提供一定的技术和理论支撑。

1 重大危险源评价指标体系的构建

由于涂料生产中发生火灾的因素众多，且各因素之间相互影响，参考《涂料行业企业安全生产风险分级管控体系实施指南》(DB37/T 3219—2018)中的重大危险源辨识方法，以科学性、导向性、针对性和易操作性为原则，为涂料企业建立了重大危险源评价指标体系。该指标体系主要分为固有危险因子和危险抵消因子两个类别，通过对两个类别进行参数计算，从而对重大危险源进行安全风险等级分级[7-8]。重大危险源评价指标如图1所示。

2 组合赋权-集对分析评价模型

2.1 集对分析法的理论基础

集对分析理论是将两个具有一定联系，互相关联的集合A与B构建为一个对子$H(A,B)$，在同一个具体问题背景下，分析集对的同一性、差异性和对立性，并且对此进行数据刻画[9]。该方法可以用来处理不同评价体系中的各种指标不确定性问题[10]。例如，可以根据具体问题对该集对进行分析，得出集对共有N个特性，其中S个特性为两个集合所共有，两个集合在P个特性上相互对立，而在剩余的$F = N-S-P$个特性上两个集合则既不对立，也不同一。这两个集合组成的集对H的联系度公式如下：

$$\mu = A + Bi + Cj \tag{1}$$

式(1)中：集对的联系度用μ表示，用a、b、c表

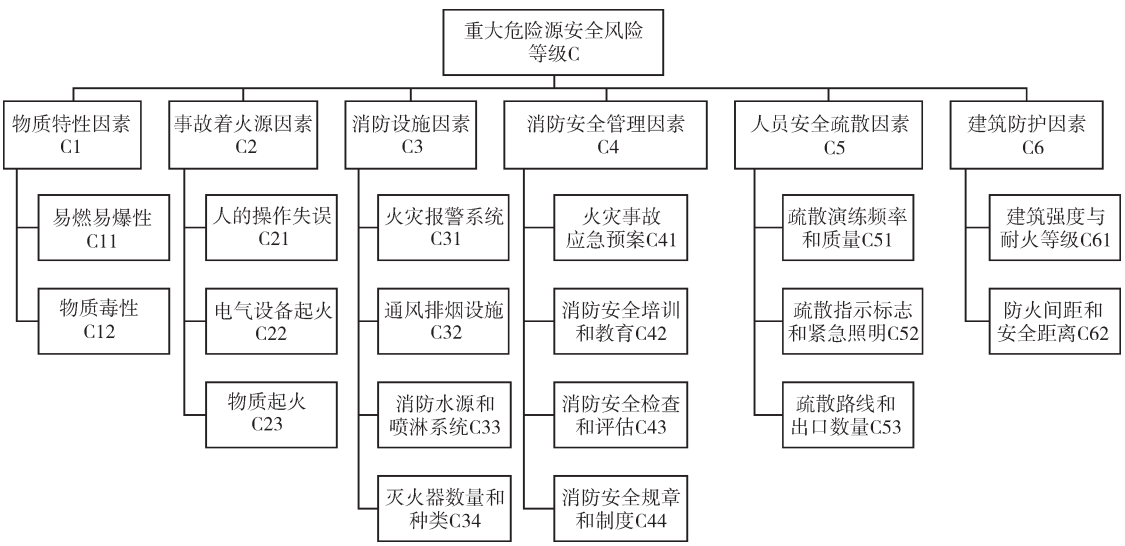

图1 重大危险源评价指标

Fig. 1 Evaluation indexes of major hazard installations

示集对的同一度、差异度、对立度，其中$A=S/G$，$B=F/G$，$C=P/G$；联系度公式中差异度系数用i表示，j为对立度系数。差异度系数的取值区间为[-1，1]，对立度系数在通常情况下的取值为-1。

在实际问题中，通过分析集对分析模型的同一度、差异度、对立度并不能满足有些问题的具体要求，通过查阅文献发现，可以对集对分析理论的同一度、差异度、对立度进行细化，得到集对同一度、偏同差异度、偏反差异度、集对的对立度，由此可得到集对的四元联系数公式[11]。具体表达式如下：

$$\mu = a + bi + cj + dk \tag{2}$$

式(2)中：集对同一度、偏同差异度、偏反差异度、集对对立度分别用a、b、c、d表示，差异度系数用i和j表示，对立度系数用k表示，其中i的取值区间为[0，1]，j的取值区间为[-1，0]，k取值为-1。

对于重大危险源安全风险等级评价的联系数函数可表示为：

$$\mu = \omega_1\mu_1 + \omega_2\mu_2 + \omega_3\mu_3 + \cdots + \omega_n\mu_n \tag{3}$$

其矩阵形式为：

$$\mu = WUE = \left(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n\right)\begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{n1} & U_{n2} & U_{n3} & U_{n4} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ i \\ j \\ k \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(4)中：重大危险源安全风险等级评价中各指标综合权重集合用$W=\{\omega_1,\omega_2,\omega_3,\cdots,\omega_n\}$表示，重大危险源安全风险等级评价中各指标联系数集合用$U=\{U_{r1},U_{r2},U_{r1},\cdots,U_{rm}\}$表示，$U_{rm}$表示第$r$个指标对第$m$个评价等级的标准化数值。

2.2　组合赋权

2.2.1　*层次分析法计算指标权重*　层次分析法(analytic hierarchy process，AHP)是一种评价方法，它通过9级标度法对各指标之间的相互重要性进行比较，并根据专家经验建立判断矩阵，从而进行主观权重计算。为确保评价结果的可信度，需要对计算结果进行一致性检验[12]。层次分析法具体实施步骤如下：

1)构造矩阵判断矩阵$\boldsymbol{A}_{ij}$：

$$\boldsymbol{A}_{ij} = (a_{ij})_{n\times n}\,(i = 1,2,\cdots,n;\ j = 1,2,\cdots,n) \tag{5}$$

2)计算矩阵$\boldsymbol{A}_{ij}$的每行元素的几何平均值，得到矩阵$\boldsymbol{M}$：

$$\boldsymbol{M} = (m_i)_{1\times n},(i = 1,2,\cdots,n) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{Y}_i = \prod_{j=1}^{n} a_{ij},(i = 1,2,\cdots,n) \tag{7}$$

$$m_i = \sqrt[n]{Y_i},(i = 1,2,\cdots,n) \tag{8}$$

3)对矩阵$\boldsymbol{M}$进行归一化处理后，得到相对权重矩阵$\boldsymbol{W}$：

$$\boldsymbol{W} = \left(\omega_i\right)_{1\times n},\left(i = 1,2,\cdots,n\right) \tag{9}$$

$$\omega_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}\left(i = 1,2,\cdots,n\right) \tag{10}$$

式中ω_i为主观权重，为矩阵里的元素。

4)通过判断矩阵$\boldsymbol{A}_{ij}$左乘相对权重矩阵$\boldsymbol{W}$得到列向量$\boldsymbol{AW}$中第i个分量，求出判断矩阵最大特征值$\varphi_{\max}$，并检验其一致性：

$$\varphi_{\max} = \sum_{i=1}^{n}\frac{(AW)_i}{n\omega_i},\left(i = 1,2,\cdots,n\right) \tag{11}$$

$$C_R = C_I / R_I \tag{12}$$

$$C_I = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \tag{13}$$

当$C_R<0.1$时，可以认为其一致性满足要求。否则必须对判断矩阵进行调整，直至其一致性检验符合要求。

2.2.2　*熵权法计算指标权重*　熵权法(entropy weight method，EWM)是一种常见的客观赋权方法，根据实测数据的差异程度和提供的信息量多少来确定评价指标，最终得到各个指标的权重值[13]。熵权法具体实施步骤如下：

(1)构建评价矩阵：通过待评价对象$\boldsymbol{M}_i$对评价指标$\boldsymbol{D}_j$可记作$\boldsymbol{X}_{ij}$，评价矩阵如下：

$$\boldsymbol{X}_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \tag{14}$$

(2)对于不同的评价指标，其量纲和值域范围可能会有很大的差异，所以在进行评价之前，需要分别对危险抵消因子指标和固有危险因子指标进行数据归一化处理，避免因指标量纲、值域范围不同而导致的结果不准确问题

危险抵消因子指标：

$$v_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\left(x_{ij}\right)}{\max\left(x_{ij}\right) - \min\left(x_{ij}\right)}\left(i = 1,2,\cdots,m;j = 1,2,\cdots,n\right) \tag{15}$$

固有危险因子指标：

$$v_{ij} = \frac{\max\left(x_{ij}\right) - x_{ij}}{\max\left(x_{ij}\right) - \min\left(x_{ij}\right)}\left(i = 1,2,\cdots,m;j = 1,2,\cdots,n\right) \tag{16}$$

将评价矩阵$\boldsymbol{X}$进行归一化处理得到归一化矩阵$\boldsymbol{V}$：

$$\boldsymbol{V}=\left(v_{ij}\right)_{m\times n}\left(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n\right) \quad (17)$$

(3)计算各指标的信息熵:

$$E_j=-\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n}p_{ij}\ln p_{ij} \quad (18)$$

$$P_{ij}=v_{ij}/\sum_{i=1}^{n}v_{ij} \quad (19)$$

其中,E_j为第j项指标的信息熵;$i=1,2,\cdots,L;j=1,2,\cdots,K$。如果$P_{ij}=0$,则定义$\lim\limits_{P_{ij}\to 0}\ln\left(P_{ij}\right)=0$确定各项指标的权重。通过求得的信息熵按下式计算各指标的权重,计算评价指标的熵权[14]。计算第j个评价指标的熵权为:

$$\omega_{ij}=\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{n}\left(1-E_j\right)} \quad (20)$$

2.2.3 组合权重的确定 对熵权法和层次分析法计算出的权重进行处理,得到组合权重,公式如下:

$$\omega_{ij}=\frac{a_ib_i}{\sum_{i=1}^{n}a_ib_i} \quad (21)$$

式中,a_i、b_i为第i个属性值的熵权法权重和层次分析法权重。

2.3 评价模型

2.3.1 安全风险等级划分 依据《危险化学品重大危险源监督管理暂行规定》中重大危险源的分级方法[15],基于对危险源性质、危害程度、风险管理措施等因素的综合考量,重大危险源根据其危险程度可分为一级、二级、三级和四级,其中一级为最高级别。本文在此重大危险源分级的基础上,将该评价等级进行细化,并且基于德尔菲问卷调查法、文案调查法以及企业实地调查以确保该评价标准的客观、科学和可靠性。据此本文将涂料企业重大危险源安全风险等级划分为安全(Ⅴ级)、较安全(Ⅳ级)、一般危险(Ⅲ级)、较危险(Ⅱ级)和危险(Ⅰ级)5个等级。重大危险源安全风险等级及联系数见表1。

表1 重大危险源安全风险等级及联系数

Tab. 1 Safety risk level and connection number of major hazard installations

安全风险等级	危险	较危险	一般危险	较安全	安全
联系数	[-1,-0.6)	[-0.6,-0.2)	[-0.2,0.2)	[0.2,0.6)	[0.6,1)

2.3.2 集对势 集对势是一种用来反映集合动态演化趋势的指标,在特定问题下通过比较两个集合的同一度、差异度和对立度大小来进行计算[16]。在四元联系数函数公式$\mu=a+bi+cj+dk$中,不同的集对势值会表达不同的情况:如果$a/d>1$,则表示两个集合存在相同的趋势,但还需要结合b和c来进行讨论,进一步细分为准同势、强同势和弱同势;如果$a/d=1$,则表明两集合中"同一"与"对立"的趋势相当,根据a、b和c的大小还可以得到准均势、强均势、弱均势;而$a/d<1$则表示两集合存在对立的趋势,同样也可以根据b和c的大小比较进一步细分为弱反势、强反势和准反势。因此,集对势不仅可以用来评估集合的动态演化趋势,也是判断集合之间相互作用关系的重要依据之一[17-18]。集对势排序表见表2。

表2 集对势排序表

Tab. 2 Set pair potential sorting table

集对势		态势分级	条件
同势	准同势	1级	$a>d,b=c=0$
		2级	$a>b+c+d,b>c+d$
		3级	$a>b+c+d,b=c+d$
	强同势	4级	$a>b+c+d,b<c+d,d<b+c$
		5级	$a>b+c+d,b<c+d,d=b+c$
		6级	$a>b+c+d,b<c+d,d>b+c$
		7级	$a\leqslant b+c+d,a>c+d,a>b,b>c+d$
		8级	$a\leqslant b+c+d,a>c+d,a>b,b=c+d$
	弱同势	9级	$a\leqslant b+c+d,a>c+d,a>b,b<c+d$
		10级	$a\leqslant b+c+d,a>c+d,a=b,b>c+d$
		11级	$a\leqslant b+c+d,a>c+d,a<b,b>c+d$
均势	准均势	12级	$a=d,b=c=0$
		13级	$a=d,a>b+c,b>c$
	强均势	14级	$a=d,a>b+c,b=c$
		15级	$a=d,a>b+c,b<c$
		16级	$a=d,a=b+c,b>c$
	弱均势	17级	$a=d,a=b+c,b=c$
		18级	$a=d,a=b+c,b<c$
反势		19级	$d<=a+b+c,\ d>a+b,d<c,\ c>a+b$
		20级	$d<=a+b+c,\ d>a+b,d=c,\ c>a+b$
	弱反势	21级	$d<=a+b+c,\ d>a+b,d>c,\ c<a+b$
		22级	$d<=a+b+c,\ d>a+b,d>c,\ c=a+b$
		23级	$d<=a+b+c,\ d>a+b,d>c,\ c>a+b$
		24级	$d>a+b+c,\ c<a+b,a>b+c$
		25级	$d>a+b+c,\ c<a+b,a=b+c$
	强反势	26级	$d>a+b+c,\ c<a+b,a<b+c$
		27级	$d>a+b+c,\ c=a+b$
		28级	$d>a+b+c,\ c>a+b$
	准反势	29级	$d>a+b+c,\ a<d,\ a=b=0$

2.3.2　集对联系数函数的构建　本文将重大危险源评价指标和重大危险源安全风险等级作为两个集合，并通过构成集对$H(C,V)$的方式来评价分析实际项目重大危险源情况。其中，集合C代表重大危险源评价指标集合，集合V代表重大危险源安全风险等级的集合。在集对$H(C,V)$中，联系数是用来描述集合C和集合V之间联系程度的指标。通过计算两个集合的联系数，可以评价分析实际项目重大危险源情况。

对于固有危险型指标，集对$H(C,V)$的联系数函数为：

$$\mu_j=\begin{cases}1+0i_1+0i_2+0j & ,\quad x_j\leqslant e_{j(1)}\\ \dfrac{e_{j(2)}-x_j}{e_{j(2)}-s_1}+\dfrac{x_j-s_1}{e_{j(2)}-s_1}i_1+0i_2+0j & ,\quad e_{j(1)}\leqslant x_j<e_{j(2)}\\ 0+\dfrac{s_3-x_j}{e_{j(3)}-e_{j(2)}}i_1+\dfrac{x_j-e_{j(2)}}{e_{j(3)}-e_{j(2)}}i_2+0j, & e_{j(2)}\leqslant x_j<e_{j(3)}\\ 0+0i_1+\dfrac{e_{j(4)}-x_j}{e_{j(4)}-e_{j(3)}}i_2+\dfrac{x_j-e_{j(3)}}{e_{j(4)}-e_{j(3)}}j, & e_{j(3)}\leqslant x_j<e_{j(4)}\\ 0+0i_1+0i_2+1j & ,\quad x_j>e_{j(4)}\end{cases} \tag{22}$$

对于危险抵消型指标，集对$H(C,V)$的联系数函数为：

$$\mu_j=\begin{cases}1+0i_1+0i_2+0j & ,\quad x_j\geqslant e_{j(1)}\\ \dfrac{x_j-e_{j(2)}}{s_1-e_{j(2)}}+\dfrac{e_{j(1)}-x_j}{e_{j(1)}-e_{j(2)}}i_1+0i_2+0j, & e_{j(2)}\leqslant x_j<e_{j(1)}\\ 0+\dfrac{x_j-e_{j(3)}}{e_{j(2)}-e_{j(3)}}i_1+\dfrac{e_{j(2)}-x_j}{s_2-e_{j(2)}}i_2+0j, & e_{j(3)}\leqslant x_j<e_{j(2)}\\ 0+0i_1+\dfrac{x_j-e_{j(4)}}{e_{j(3)}-e_{j(4)}}i_2+\dfrac{e_{j(3)}-x_j}{e_{j(3)}-e_{j(4)}}j, & e_{j(4)}\leqslant x_j<e_{j(3)}\\ 0+0i_1+0i_2+1j & ,\quad x_j<e_{j(4)}\end{cases} \tag{23}$$

式(22)代表固有危险型指标，从大到小排列即$e_{j(4)}\sim e_{j(1)}$；式(23)代表危险抵消型指标，从大到小排列即$e_{j(1)}\sim e_{j(4)}$；x_j为专家对第j项指标打分值；μ_j代表第j项评价指标的单联系数；$e_{j(k)}$是第j项评价指标安全风险等级的阈值。

2.3.4　安全风险等级的确定　根据式(4)计算出重大危险源安全风险等级评价的总体联系数μ后，采用相似贴近度法计算差异度系数i和i的取值，从而判断出重大危险源的安全风险等级，计算公式为：

$$i=\frac{b}{a+c+d} \tag{24}$$

$$j=\frac{c}{a+b+d} \tag{25}$$

3　实例应用与分析

湖北某涂料有限公司年产高固体分涂料5 000 t、水性涂料3 000 t、合成树脂2 000 t，总占地面积60 385.5 m^2，总建筑面积28 994.1 m^2。本文利用组合赋权集对分析模型对该公司的高固体分涂料生产车间、水性涂料生产车间、工程公用车间、原材料仓库和成品仓库进行重大危险源安全风险等级评价，以下以高固体分涂料生产车间为例。

3.1　综合权重确定

本次研究邀请10名业内技术专家采用专家评分法以得到每个指标间重要程度的主观权重；随后使用层次分析法根据式(5)-(13)来计算最终权重向量，以确定主观权重的相对大小；然后运用熵权法，根据式(14)-(20)来计算各指标客观权重；最终，根据式(20)计算出组合权重。各项指标权重计算结果见表3。

3.2　评价指标分级标准

为了确定重大危险源评价指标的分级阈值，本文充分借鉴了国内外重大危险源安全评价标准，并对该涂料企业安全生产报告和安全检查记录表等进行了系统整理分析，以此为依据制定了科学、合理的评价指标的安全风险等级阈值[15]。各项指标的安全风险等级阈值见表4。

3.3　综合联系数计算

依据集对分析理论计算方法，结合表3中的评价指标权重和表4中的各指标实测值，得到高固体分涂料生产车间的具体二级指标的四元联系数。各项指标的联系数分量见表5。

3.4　结果分析

根据表5中的数据结果，可以得到各个评价指标的联系数分量，根据式(2)，可以计算出准则层易燃易爆性μ_{C11}的联系数表达式为：$\mu_{C11}=0.8+0.2i+0j+0k$，准则层物质毒性μ_{C12}的联系数表达式为：$\mu_{C12}=1+0i+0j+0k$。由表2和式(3)可知，一级指标物质特性的各二级指标的权向量为：$\boldsymbol{W}_I=(\omega_1,\omega_2)=(0.063,0.238)$；因此可以得到物质特性的联系数表达式为：

$$\mu_{C1}=(0.063,0.238)\begin{bmatrix}0.8 & 0.2 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\ i\\ j\\ k\end{bmatrix}=$$

$$0.289+0.012i+0j+0k$$

表 3 各项指标权重计算结果

Tab. 3 Calculation results of each index weight

目标层	准则层	指标层	层次分析法	熵权法	综合权重
重大危险源安全风险等级	物质特性因素	易燃易爆性	0.294	0.015	0.063
		物质毒性	0.098	0.171	0.238
	事故着火源因素	人的操作失误	0.104	0.276	0.410
		电气设备起火	0.047	0.044	0.030
		物质起火	0.012	0.021	0.003
	消防设施因素	火灾报警系统	0.045	0.018	0.011
		通风排烟设施	0.011	0.005	0.001
		消防水源和喷淋系统	0.007	0.019	0.002
		灭火器数量和种类	0.025	0.007	0.002
	消防安全管理因素	火灾事故应急预案	0.053	0.073	0.055
		消防安全培训和教育	0.112	0.001	0.002
		消防安全检查和评估	0.015	0.014	0.003
		消防安全规章和制度	0.022	0.019	0.006
	人员安全疏散因素	疏散演练频率和质量	0.020	0.035	0.010
		疏散指示标志和紧急照明	0.005	0.012	0.007
		疏散路线和出口数量	0.032	0.020	0.009
	建筑防护因素	建筑强度与耐火等级	0.068	0.107	0.104
		防火间距和安全距离	0.022	0.136	0.044

表 4 各项指标的安全风险等级阈值

Tab. 4 Thresholds of safety risk levels of each index

评价指标		评价等级阈值				评价得分
		不安全	不太安全	比较安全	安全	
易燃易爆性	固有危险因子	0.9 ~ 1.0	0.7 ~ 0.9	0.5 ~ 0.7	0.0 ~ 0.5	0.45
物质毒性		90 ~ 100	80 ~ 90	60 ~ 80	0 ~ 60	64
人的操作失误		60 ~ 100	20 ~ 60	5 ~ 20	0 ~ 5	33
电气设备起火		80 ~ 100	50 ~ 80	20 ~ 50	0 ~ 20	16
物质起火		80~100	50~80	20~50	0~20	56
火灾报警系统	危险抵消因子	0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	78
通风排烟设施		0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	64
消防水源和喷淋系统		0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	66
灭火器数量和种类		0 ~ 30	30 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	78
火灾事故应急预案		0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 80	80 ~ 100	67
消防安全培训和教育		0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 80	80 ~ 100	63
消防安全检查和评估		0 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	69
消防安全规章和制度		0 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	65
疏散演练频率和质量		0 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	24
疏散指示标志和紧急照明		0 ~ 25	25 ~5 0	50 ~ 75	75 ~ 100	54
疏散路线和出口数量		0 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	48
建筑强度与耐火等级		0.0 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.7	0.7 ~ 1.0	0.53
防火间距和安全距离		0 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 75	75 ~ 100	18

表5　各项指标的联系数分量

Tab. 5　Connection number component of each index

评价指标	联系数分量			
	a	*b*	*c*	*d*
易燃易爆性	0.80	0.20	0.00	0.00
物质毒性	1.00	0.00	0.00	0.00
人的操作失误	0.56	0.43	0.00	0.00
电气设备起火	0.26	0.73	0.00	0.00
物质起火	0.00	0.80	0.20	0.00
火灾报警系统	0.90	0.10	0.00	0.00
通风排烟设施	0.20	0.80	0.00	0.00
消防水源和喷淋系统	0.30	0.70	0.00	0.00
灭火器数量和种类	0.90	0.10	0.00	0.00
火灾事故应急预案	0.68	0.32	0.00	0.00
消防安全培训和教育	0.52	0.48	0.00	0.00
消防安全检查和评估	0.76	0.24	0.00	0.00
消防安全规章和制度	0.60	0.40	0.00	0.00
疏散演练频率和质量	0.00	0.00	0.96	0.04
疏散指示标志和紧急照明	0.16	0.84	0.00	0.00
疏散路线和出口数量	0.00	0.92	0.08	0.00
建筑强度与耐火等级	0.43	0.57	0.00	0.00
防火间距和安全距离	0.00	0.00	0.90	0.10

同理可计算出其他一级指标联系数分别为：$\mu_{C2}=0.237+0.201i+0.001j+0k$；$\mu_{C3}=0.012+0.003i+0j+0k$；$\mu_{C4}=0.011+0.005i+0j+0k$；$\mu_{C5}=0+0.009i+0.011j+0k$；$\mu_{C6}=0.045+0.059i+0.040j+0.004k$。

由表1可知，目标层重大危险源安全风险等级的各二级指标的权向量为：

$$\boldsymbol{W}=(\omega_1,\omega_2)=(0.301,0.443,0.016,0.066,0.026,0.148)$$

则重大危险源安全风险等级的联系数为：

$$\mu_C=(0.301,0.444,0.017,0.067,0.020,0.148)\begin{bmatrix}0.289 & 0.012 & 0.000 & 0.000\\ 0.237 & 0.201 & 0.001 & 0.000\\ 0.012 & 0.003 & 0.000 & 0.000\\ 0.011 & 0.005 & 0.000 & 0.000\\ 0.000 & 0.009 & 0.011 & 0.000\\ 0.045 & 0.059 & 0.040 & 0.004\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\ i\\ j\\ k\end{bmatrix}$$

$\mu_C=0.200+0.102i+0.007j+0.001k$。

同理，可以依次得出水性涂料生产车间、工程公用车间、原材料仓库、成品仓库的联系数和重大危险源的安全风险等级。涂料企业联系数和安全风险等级见表6。

3.4.1　风险等级分析　在集对四元联系数中，通过计算求得高固体分涂料生产车间差异度系数 i 与 j 的值：$i=0.508$，$j=-0.023$，此时系统联系数 $\mu=0.251$，对比重大危险源安全风险等级表可知

表6　涂料企业联系数和安全风险等级

Tab. 6　Connection number and safety risk levels of coating enterprises

样本编号	评价样本	联系数	安全风险等级
1	高固体分涂料生产车间	$0.200+0.102i+0.007j+0.001k$	较安全
2	水性涂料生产车间	$0.292+0.098i+0.015j+0.000k$	较安全
3	工程公用车间	$0.015+0.111i+0.140j+0.008k$	比较安全
4	原材料仓库	$0.565+0.022i+0.000j+0.000k$	较安全
5	成品仓库	$0.516+0.029i+0.000j+0.000k$	较安全

高固体分涂料生产车间整体处于较安全状态。如果当 $i=0$，$j=-1$ 时，通过计算可以得到高固体分涂料生产车间的总联系数 $\mu=0.192$，表明最不利状态下高固体分涂料生产车间安全状态处于一般危险状态，说明此时高固体分涂料生产车间有向“危险状态”转变的可能。

3.4.2　集对势分析　通过计算得出了高固体分涂料生产车间的整体联系数表达式 $\mu_C=0.200+0.102i+0.007j+0.001k$。由联系数表达公式可知该车间的集对同一度、偏同差异度、偏反差异度、集对对立度分别为 a=0.200，b=0.102，c=0.007，d=0.001。经过分析表2的内容，发现该车间的集对势处于强同势，整体上呈同一的趋势。然而，二级指标中人员安全疏散因素指标处于弱同势，说明在疏散的过程中可能存在较大的风险。通过计算得知，a=0.201，说明该车间的安全状态整体上来说比较安全，但是差异度也占了0.109，这意味着部分指标存在向“危险”转变的可能性，需要加强对车间疏散演练和增加指示标志、紧急照明灯和出口数量。通过对该企业的重大危险源安全风险等级进行综合评价，发现物质毒性、人的操作失误和建筑强度耐火等级这几个指标因素在该企业的重大危险源安全风险等级评价中影响较大，这意味着企业在管理过程中应该更加关注这些指标的管控，以确保对应风险因素能够得到更好的控制和管理，进而降低重大危险源安全风险等级。

4　结　论

（1）本文结合集对分析理论，构建了涂料企业总体联系数公式分析模型，通过计算联系数公式模型中的可变因素得到联系数来判断重大危险源的安全风险等级。

（2）在评价指标体系中将因素分成固有危险

因子和危险抵消因子，将熵权法和层次分析法进行组合赋权，减少了人为主观因素的影响，从而提高了对涂料企业重大危险源安全风险等级评价结果的真实性与可靠性，并基于该方法得到湖北某涂料企业的各个车间与仓库的重大危险源安全风险等级。

（3）通过对二级指标和一级指标整体联系数集对势的分析，可以获得各指标与系统发展趋势，进而通过对有转变为危险状态趋势指标进行针对性整改、防范，可一定程度降低企业重大危险源安全风险等级。

参考文献

[1] 周德红，肖振航，李维东，等.基于云模型的化工园区安全风险评估[J].武汉工程大学报，2022，44(1)：112-118.

[2] 吕康.重大危险源环境风险评价及分级方法研究[D].大连：大连理工大学，2008.

[3] 谭钦文，辛保泉，万露，等.尾矿库重大危险源风险评价指标及分级方法[J].中国安全生产科学技术，2018(7)：99-106.

[4] 刘惠临，麻金继.基于熵权—集对分析模型的重大危险源安全等级评价研究[J].灾害学，2019，34(4)：41-46.

[5] 王晓丽，王文杰，关文玲.基于LabVIEW的码头储罐重大危险源动态分级方法研究[J].天津理工大学学报，2013，29(3)：37-41.

[6] 徐尚仲，朱传杰，高玉成，等.煤矿瓦斯爆炸重大危险源辨识与风险评价[J].煤矿安全，2007(2)：11-14.

[7] 吴悠悠，胡立嵩，王帅，等.基于DEMATEL/ISM的安全工程实验室安全风险研究[J].武汉工程大学学报，2022，44(5)：585-590.

[8] 玉锋，贾沛.危险化学品储罐区重大危险源安全分析[J].广州化工，2011，39(6)：187-190.

[9] 赵克勤.集对分析与熵的研究[J].浙江大学学报，1992，6(2)：65-72.

[10] 杨凯，王寿全，范映冲，等.煤与瓦斯突出危险性的未知权重多属性综合评价模型[J].中国安全生产科学技术，2013，9(10)：33-38.

[11] 袁宝月.基于组合赋权-集对分析法的弃渣场[D].上海：上海应用技术大学，2021.

[12] 袁海平，张羽，熊礼军，等.基于组合权重—集对分析的地压风险预评估[J].矿业安全与环保，2022，49(1)：71-76.

[13] 仝瑞刚，曹庆贵，宋洁，等.基于组合赋权－集对分析的煤矿煤尘爆炸危险性评价研究[J].中国矿业，2020，29(5)：97-102

[14] 刘辉，唐彩萍，祁兵.基于组合赋权云模型的高校实验室综合安全评价[J].实验室研究与探索，2022，41(4)：275-283.

[15] 国家安全生产监督管理总局.危险化学品重大危险源监督管理暂行规定[EB/OL].(2011-07-22)[2021-12-27].http://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/gz11/201112/t20111201_405674.shtml.

[16] 成连华，曹东强，郭慧敏，等.基于过程方法的煤矿粉尘综合防治评价体系构建及应用[J].煤矿安全2021，52(8)：182-187，193.

[17] 顾成喜.一种改进的四元联系度中集对势排序方法[J].数学的实践与认识，2012，42(2)：36-42.

[18] 姜青峰，刘健.基于集对分析联系数模型的矿井火灾安全评价[J].煤矿安全，2022，53(5)：182-187.

本文编辑：张 瑞

☆

（上接第96页）

[16] 李辉勇.稻草秸秆的碱法氧化预处理方法研究[D].长沙：中南大学，2012.

[17] JIANG D M，AN P H，CUI S P，et al. Effect of modification methods of wheat straw fibers on water absorbency and mechanical properties of wheat straw fiber cement-based composites [J]. Advances in Materials Science and Engineering，2020：5031025.

[18] 李家和，王政，祝瑜.水泥基稻草纤维材料性能及结构的研究[J].武汉理工大学学报，2009，31(5)：13-15，23.

[19] CHEN S K，ZHAO Y P，BIE Y J. The prediction analysis of properties of recycled aggregate permeable concrete based on back-propagation neural network [J]. Journal of Cleaner Production，2020，276：124187.

[20] 李超飞，苏有文，陈国平，等.稻草纤维混凝土性能研究[J].混凝土，2013(10)：30-32，37.

[21] 廖昭印，雷劲松，陈梦婷，等.稻草纤维水泥基复合材料力学性能试验研究[J].混凝土与水泥制品，2017(7)：47-50.

[22] 刘胜兵，徐礼华.混杂纤维对高性能混凝土拉压比的影响[J].武汉工程大学学报，2012，34(9)：17-21.

[23] 佟钰，赵立，马鹏毅，等.再生粗集料透水混凝土的力学强度与透水性能研究[J].混凝土，2017，4(9)：61-63，68.

[24] CUI X Z，ZHANG J，HUANG D，et al. Experimental study on the relationship between permeability and strength of pervious concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering，2017，29(11)：04017217.

本文编辑：张 瑞