

# 基于物元分析的危化品储存安全评价模型

任竞舟<sup>1</sup>, 周荣义<sup>1,2</sup>, 钟岸<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 针对目前危化品储存安全评价方法应用情况, 在对其进行分析的基础上提出了基于物元分析的危化品储存安全评价方法. 简要介绍了物元分析法基本理论, 构建了物元模型评价基本步骤. 根据安全事故的“4M”因素, 即人为因素、物质因素、管理因素和环境因素, 提出了包含定性分析与定量分析的评价指标体系, 结合实际构建了危化品储存安全评价模型. 依据国家相关安全标准, 由评价指标的实际数值与专家评分值得到评价量值, 采用层次分析法计算各指标的权重系数, 从而得到综合关联度以评价单个指标的安全水平及其整体安全水平. 最后通过实例分析证明了危化品储存安全物元评价模型的可行性.

**关键词:** 危化品储存安全; 物元模型; “4M”因素

**中图分类号:** TQ086.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-9102(2016)02-0076-05

## Safety evaluation model of dangerous chemicals storage based on matter element analysis

REN Jingzhou<sup>1</sup>, ZHOU Rongyi<sup>1,2</sup>, ZHONG An<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The safety assessment method of dangerous chemicals storage based on matter element analysis is proposed according to its current application. Firstly, this paper briefly introduces the steps to build a matter-element model under the basic content of matter element. Then, by using the “4M” theory, i. e. human factors, material factors, management factors and environment factors, it proposes the evaluation system with qualitative analysis and quantitative analysis, and gets the amount from the actual situation and the evaluation score in terms of national safety standards, resulting in a comprehensive correlation degree to evaluate the safety level of the subject. Finally, it proves the matter-element evaluation model of dangerous chemicals storage to be feasible by example analysis.

**Key words:** storage safe of dangerous chemicals; matter-element model; “4M” theory

危化品的储存管理是化工产业运行过程中的重要环节, 目前国家虽然颁布了一系列有关危化品储存安全标准与条例, 但是由于管理上的缺陷与相关人员安全意识的缺乏, 使得这一环节依然存在着很大风险, 如员工操作不规范、储罐破损未能及时检修、厂房耐火等级与防火间距达不到安全标准, 安全装置配备率低等问题, 导致危化品存储安全事故时有发生, 例如 2013 年 12 月 5 日河南宝丰液氯钢瓶泄露事件, 导致 29 名群众入院; 2013 年 8 月 7 日, 台湾桃园一化工厂因硝酸铵储槽起火爆炸引发火灾, 燃烧面积约

收稿日期: 2015-05-07

基金项目: 教育部高等学校特色专业建设点资助项目(TS11624); 湖南科技大学 2013 年研究生创新基金资助项目

通信作者: 周荣义(1973-), 男, 湖南常德人, 副教授, 研究方向: 工业事故预防与控制、系统安全评价与预测. E-mail: 454263079@qq.com

1 000 m<sup>2</sup>. 可见,在危化品储存过程中的确存在相当多的漏洞,需要借助有效的预防与监管手段将其逐一排除,通过建立科学、系统的危化品储存安全评价体系,能对其管理与运行状况进行综合评定,以消除安全漏洞、降低安全风险.

当前国外已建立了数十种知名的危化品仓储安全评价法<sup>[1]</sup>,如美国道化学公司创建的火灾爆炸指数评价法、英国帝国化学公司的蒙德法,光气及光气化产品企业安全评价法、日本劳动省化工厂安全评价六阶段法和美国格雷哈姆评价法. 国内研究者多采用模糊综合评价法进行危化品安全评价,如沈小燕<sup>[2]</sup>、黄友明<sup>[3]</sup>、雷芳<sup>[4]</sup>等,其次为道化学与蒙德法,如魏新利<sup>[5]</sup>. 模糊综合评价法可以通过数学方法量化模糊的评价指标,但在其指标集较大时,易出现权向量与模糊矩阵不匹配的情况,导致评价出现误差;道化学与蒙德法对化工厂火灾、爆炸以及中毒事故的风险防控有重要的作用,但这2种评价方法缺乏完整的评价指标体系,无法全面排除危化品储存过程中存在的漏洞.

因此,本文尝试将物元分析法应用于危化品储存安全评价中. 基于物元分析法建立的物元模型,其评价指标同时包含定性因素与定量因素,在评价过程中能够有效结合待评对象的实际数值,有利于降低评价过程的模糊性. 本文提出建立基于物元分析法的危化品储存安全评价模型,结合安全事故“4M”因素法确立评价指标,并根据国家相关标准,在指标量值选取上综合了指标的具体数值与评分值,以期实现对危化品储存安全进行全面、系统的评价与防控.

## 1 物元分析及其评价模型构建步骤

### 1.1 物元分析基本概念

物元分析法旨在解决现实生活中的不相容问题,将解决矛盾的过程形式化<sup>[6]</sup>. 应用于评价问题时,物元分析法能够结合定量与定性因素得到评价指标的综合水平,比较合理的得出事物的内部结构以及彼此之间的关系与变化. 目前物元评价模型多应用于城市生态水平评价<sup>[7]</sup>、交通安全评价<sup>[8]</sup>、产品质量评价<sup>[9]</sup>等方面.

### 1.2 物元模型的构建步骤

物元模型的具体构建步骤如图1所示.

1) 建立物元矩阵. 有序三元组

$$R = (M, C, X).$$

式中, $M$ :该待评对象; $C$ :物元模型的评价指标; $X$ :对应评价指标的量值,在评价过程中将待评对象依照依次划分为各级别.

2) 确定域值范围. 不同的评价对象  $M$  针对特征值通常具有不同的量值 ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 存在于区间内, 称为经典域, 在经典域的基础上可以构建节域矩阵, 区间为节域物元的量值范围, 根据各评价级别评分值的划分范围建立该物元模型的经典域与节域物元矩阵.

3) 计算权重系数. 通过层次分析法计算权重系数, 主要步骤为: (1) 确定评价对象  $M$  与评价量值; (2) 构建权重判断矩阵, 以表示相比于的重要性 ( $i, j = 1, 2, \dots, m$ ); (3) 计算矩阵行向量的几何平均值; (4) 对向量进行正规化处理.

4) 计算关联函数. 关联函数即评价指标关于各评价级别的关联度. 关联函数的计算:

$$k(x_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_i, x_{0ij})}{|X_{0ij}|}; & x_i \in \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle \\ \frac{\rho(x_i, x_{0ij})}{\rho(x_i, X_{pi}) - \rho(x_i, X_{0ij})}. & x_i \notin \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle \end{cases}$$

式中,  $X_{0ij} = \langle a_{0ij}, b_{0ij} \rangle$ ;  $x_i$ : 在评价级别  $M_j$  中的经典域;  $\rho(x_i, X_{0ij})$ :  $x_i$  到有限实区间  $X_{0ij}$  的距离. 有:

$$\rho(x_i, X_{0ij}) = |x_i - \frac{1}{2}(a_{0ij} + b_{0ij})| - \frac{1}{2}(b_{0ij} - a_{0ij}).$$

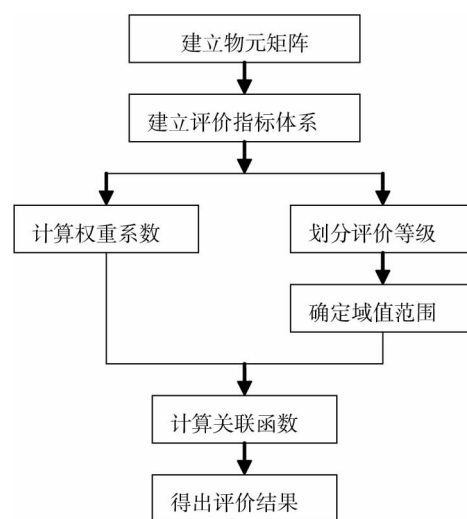


图1 构建物元模型流程

由关联值  $k_j(x_i)$  可以得出第  $i$  项评价指标的安全级别,即取关联值  $k_j(x_i)$  最大的第  $j$  项评价级别为该评价指标的安全级别. 结合单一关联函数与权重系数得出综合关联度:

$$K(M) = \sum_{i=1}^n a_i k_j(x_i), (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, 3, 4). \tag{1}$$

根据可拓集合理论<sup>[10]</sup>,对映射  $k(x_i)$  给出如下定理:当  $k(x_i) > 0$  时,表示  $u \in X$ ,即评价量值符合评价对象的标准值;当  $-1 < k(x_i) < 0$  时,表示  $u \notin X$ ,但在该限制下, $u$  能转变为  $y \in X$ ,即评价量值不符合评价对象的标准值,但是可以在一定条件下向标准值转变;当  $k(x_i) < -1$  时,表示  $u \notin X$ ,而且在该限制下, $u$  不能转变为  $y \in X$ ,即评价量值不符合评价对象的标准值,而且无法向标准值转变.

## 2 危化品储存安全评价物元模型的构建

### 2.1 确立评价指标

本文将危化品储存安全的评价等级划分为 {优秀,良好,一般,较差} 4 个级别,结合事故原因的“4M”因素法<sup>[11]</sup>,从影响危化品储存安全的人为因素、物质因素、环境因素、管理因素入手,对这 4 个方面进行具体分析,确立各子因素为物元模型的评价指标,如图 2 所示.



图 2 危化品储存安全评价指标体系

### 2.2 值域划分

量值的选取采用实际数值与评分值相结合的方法,评分值的引进是由于部分评价指标只能得到定性的评价,无法给出具体数值,而部分评价指标虽然可以进行定量评价,但由于受到某些特定条件的限制,在数值选择中无法给出单一的评价标准<sup>[11]</sup>,例如安全专职人员所占比重是由企业全体员工的数量来决定的,不能只根据其比重得出评价量值,对于这类评价指标,本文采用安全专家对其实际状况给出的评分值,评价值从低到高依次为 1~100 分. 表 1 为评价指标取值标准,根据该标准可以确定经典域与节域. 根据各评价级别的量值范围可以得到该物元模型的经典域与节域矩阵:

$$R_{01} = \left\{ \begin{matrix} M_1, C_1, (84, 98) \\ C_2, (80, 85) \\ \dots, \dots \\ C_{26}, (80, 95) \end{matrix} \right\}; R_{02} = \left\{ \begin{matrix} M_2, C_1, (76, 84) \\ C_2, (70, 80) \\ \dots, \dots \\ C_{26}, (70, 80) \end{matrix} \right\};$$

$$R_{03} = \left\{ \begin{matrix} M_3, C_1, (60, 76) \\ C_2, (60, 70) \\ \dots, \dots \\ C_{26}, (70, 80) \end{matrix} \right\}; R_{04} = \left\{ \begin{matrix} M_4, C_1, (0, 60) \\ C_2, (0, 60) \\ \dots, \dots \\ C_{26}, (0, 60) \end{matrix} \right\}; R_p = \left\{ \begin{matrix} M, C_1, (0, 98) \\ C_2, (0, 85) \\ \dots, \dots \\ C_{26}, (0, 95) \end{matrix} \right\}$$

表 1 危化品储存评价指标取值标准

评价	人为因素						物质因素						
	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	c <sub>5</sub>	c <sub>6</sub>	c <sub>7</sub>	c <sub>8</sub>	c <sub>9</sub>	c <sub>10</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>
优秀	98	85	95	100	100	95	99	98	99	1	0.5	2	95
良好	84	80	90	99	90	86	95	92	97	2	0.7	0.7	90
一般	76	70	85	90	85	75	90	85	90	3	1.0	0.5	82
较差	60	60	70	85	75	60	87	79	85	4	1.5	0.3	70

表 1 (续)

评价	管理因素						环境因素						
	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>	c <sub>16</sub>	c <sub>17</sub>	c <sub>18</sub>	c <sub>19</sub>	c <sub>20</sub>	c <sub>21</sub>	c <sub>22</sub>	c <sub>23</sub>	c <sub>24</sub>	c <sub>25</sub>	c <sub>26</sub>
优秀	95	100	100	95	95	100	98	90	100	1	100	95	95
良好	90	99	95	80	85	95	92	80	95	2	95	80	80
一般	80	95	90	70	76	85	86	70	80	3	83	70	70
较差	70	90	80	60	70	75	76	60	70	4	70	60	60

### 2.3 确定权重系数

利用上述层次分析法求出影响危化品储存安全的人为因素权重系数  $G_1$ , 物质因素权重系数  $G_2$ , 管理因素权重系数  $G_3$ , 环境因素权重系数  $G_4$ :

$$G_1 = 0.227; G_2 = 0.1221; G_3 = 0.5529; G_4 = 0.0444.$$

一致性比率  $CR = 0.098 < 0.1$ , 符合满意值. 同样, 依照上述方法求出各子因素  $C_n$  在其所属因素中的权重系数  $a_n$ , 如下所示. 评价模型的综合权重系数取  $A_i = G_n \cdot a_i \cdot A_1 \sim A_{26}$  分别为 0.3235, 0.0768, 0.0531, 0.0653, 0.1697, 0.3768, 0.1833, 0.1994, 0.3241, 0.0911, 0.0403, 0.0391, 0.1226, 0.3678, 0.0714, 0.1453, 0.1752, 0.1681, 0.0338, 0.0383, 0.4519, 0.0446, 0.1558, 0.0735, 0.1169, 0.1575.

## 3 实例分析

以湖南省衡阳市某危化品运输公司为评价对象, 该运输公司占地面积 6 900 m<sup>2</sup>, 建筑面积约 2 000 m<sup>2</sup>, 运输产品主要为油类、液氯, 其次还有烯烃、苯类等化工品. 该公司对应于物元评价模型中评价指标的量值如下所示, 其中的实际数据值通过对该危化品运输公司进行调查获取, 而评分值则是由 5 位安全专家考查以后给出的综合值.  $C_1 \sim C_{26}$  分别为 79, 67, 80, 98, 73, 74, 96, 92, 95, 3, 0.5, 0.5, 89, 85, 100, 90, 75, 80, 93, 90, 75, 90, 3, 80, 81, 75.

将以上数据代入物元评价模型, 得到各评价指标对应于不同评价等级的单一关联度, 同一指标所属等级中关联度最高的等级则为该指标的安全水平. 根据上述所求权重系数与公式 3 可以求得综合关联度, 从而得出待评对象的整体安全水平. 具体数值如表 2 所示.

根据式(1), 结合关联度与权重系数可以得到评价单位各级别的综合关联度为

$$M_1 = -0.1587; M_2 = 0.1163; M_3 = -0.2397; M_4 = -1.6855.$$

因为  $M_2 > M_1 > M_3 > M_4$ , 可以得出该危化品物流公司的仓储安全等级为良好. 从各评价指标的单一关联度可以看到, 该公司某些方面仍然存在安全问题, 从员工方面看, 如个人安全防护用品的配戴率较低, 员工的受教育水平与工作经验水平普遍不高, 工作过程中操作不规范; 从厂区建设来看, 仓库的防护间距没有达到要求. 此次评价结果与专家组给出的评价意见基本相符, 因此将物元分析法应用于危化品储存安全评价中是可行的.

表2 各评价指标单一关联度

评价 指标	评价等级				安全 现状	评价 指标	评价等级				安全 现状
	优秀	良好	一般	较差			优秀	良好	一般	较差	
$C_1$	-0.208	0.375	-0.636	-0.500	良好	$C_{14}$	-0.133	0.500	-0.133	-0.750	良好
$C_2$	-0.419	-0.143	0.300	-0.280	一般	$C_{15}$	0.000	-1.000	-1.000	-1.000	优秀
$C_3$	-0.400	-0.250	0.333	-0.400	一般	$C_{16}$	-0.333	0.000	0.000	-0.500	良好
$C_4$	-0.333	0.111	-0.800	-0.867	良好	$C_{17}$	-0.200	0.500	-0.200	-0.429	良好
$C_5$	-0.386	-0.307	-0.069	0.027	较差	$C_{18}$	0.500	-0.200	-0.737	-0.800	优秀
$C_6$	-0.364	-0.046	0.067	-0.400	一般	$C_{19}$	-0.222	0.200	-0.533	-0.720	良好
$C_7$	0.250	-0.250	-0.667	-0.750	优秀	$C_{20}$	-0.200	0.333	-0.333	-0.636	良好
$C_8$	0.000	0.000	-0.538	-0.684	良好	$C_{21}$	-0.250	0.500	-0.250	-0.500	良好
$C_9$	-0.333	0.286	-0.556	-0.714	良好	$C_{22}$	-0.333	0.333	-0.500	-0.667	良好
$C_{10}$	-0.667	-0.500	0.000	0.000	一般	$C_{23}$	-0.667	-0.500	0.000	0.000	一般
$C_{11}$	0.000	0.000	-0.286	-0.500	优秀	$C_{24}$	-0.429	-0.130	0.231	-0.333	一般
$C_{12}$	-0.400	-0.400	0.000	0.000	一般	$C_{25}$	0.200	-0.067	-0.440	-0.600	优秀
$C_{13}$	-0.143	0.125	-0.539	-0.760	良好	$C_{26}$	-0.200	0.500	-0.200	-0.429	良好

## 4 结论

1) 危化品在储存过程中存在多方面的安全问题,需要通过各种预防与监管手段加以改善.从“人、物、环、管”4要素着手,建立全面的安全评价模型可以有效排除危化品储存的安全漏洞.

2) 物元评价法不仅能得到评价对象的整体水平,还能得到单个指标的基本状况以及发展趋势.该方法利用数学手段将定性分析与定量分析结合在一起,充分考虑了评价对象的安全状况与实际数据,建立了更为全面的指标体系,降低了评价过程中的模糊性.实例分析表明物元分析法应用于危化品储存安全评价是可行的.

3) 湖南省衡阳市某危化品运输公司的仓储安全水平较好,基本符合国家标准要求,但从单一指标水平来看,该公司依然需要改进:提高技术人员的比重、加强对个人安全操作的监管力度、物料堆叠需严格依照国家标准.

## 参考文献:

- [1] 刘荣海,陈网桦,胡毅亭.安全与危险化学品测评技术[M].北京:化学工业出版社,2004:243.
- [2] 沈小燕,刘浩学.基于模糊综合评价法的危险化学品[J].上海海事大学学报,2008,29(2):66-71.
- [3] 黄友明.基于模糊数学危化品道路运输企业安全评价的应用研究[D].江西理工大学,2008.
- [4] 雷芳.危险化学品安全评价指标体系的研究[D].武汉:中国地质大学,2004.
- [5] 魏新利.对危化品生产与储存场所定量安全评价的比较研究[J].工业安全与环保,2005,31(10):51-53.
- [6] 蔡文.物元模型及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994:8-9.
- [7] 罗文斌,吴次芳,汪友结,等.基于物元分析的城市土地生态水平评价[J].中国土地科学,2008,22(12):31-38.
- [8] 王晓宁,盛洪飞,孟祥海.基于物元分析的交通影响评价模型[J].公路交通科技,2007,24(3):102-106.
- [9] 冯连胜.综合评定产品质量的一种新方法[J].机械强度,1991,13(3):1-5.
- [10] 蔡文.物元分析[M].广州:广东高等教育出版社,1987:51-52.
- [11] Coulter S, Bras B. Reducing environmental impact through systematic product evaluation[J]. The International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing, 1997, 6(2): 1-10.
- [12] Guillermo A, Mendoza, Prabhu R. Development of a methodology for selecting criteria and indicators of sustainable forest management: A case study on participatory assessment[J]. Environmental Management, 2002, 26(6): 659-673.