

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.12.012

基于模糊理论的煤气化企业安全评价指标体系建立及应用

张 兰^{1,2}, 许 江², 王克全³

(1.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030;2.重庆科技学院,重庆 401331;
3.中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400039)

摘要:煤气化工艺生产中涉及的危险有害介质可能导致安全事故,造成人身伤害和财产损失。为更好的辨识、评估煤气化企业存在的安全生产风险及其危险程度,论文采取模糊综合评价理论,选取典型的煤气化工艺——某煤气化企业煤制甲醇生产过程为研究对象,构建合理的安全风险评价指标体系,并对某煤气化企业进行模糊综合安全评价。

关键词:煤气化;煤制甲醇;安全评价;评价指标;模糊综合评价

中图分类号: TQ086

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)11-099-12

Build and application of safety evaluation indexes system for coal gasification enterprise based on fuzzy theory

ZHANG Lan^{1,2}, XU Jiang¹, WANG Kequan³

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, P. R. China; 3. China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, P. R. China)

Abstract: In the process of coal gasification, there are many kinds of raw materials and products that are inflammable, explosive, poisonous and harmful, which can cause casualties and property losses. In order to evaluate comprehensively the risk level of safety production in coal gasification enterprises, we used the fuzzy comprehensive evaluation theory and selected the coal-to-methanol process, which is a typical coal gasification process, in a coal gasification enterprise in Chongqing as the study object to construct a reasonable indexes system of safety risk evaluation, and carried out fuzzy comprehensive safety evaluation of the enterprise.

Keywords: coal gasification; coal-to-methanol; safety evaluation; evaluation index; fuzzy comprehensive evaluation

收稿日期: 2019-07-23

基金项目: 中煤科工集团重庆研究院青年创新基金资助项目(2013QNJJ13)。

Supported by Youth Innovation Foundation of China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute(2013QNJJ13).

作者简介: 张兰(1979—),女,博士,高级工程师,主要从事工业安全技术和安全评价的教学、研究工作,(E-mail) 122308752@qq.com。

煤化工是指原料煤通过化学反应得到气、液、固三种物质形态燃料物质的过程,其工艺技术分为现代和传统两种类型^[1]。目前多数煤气化企业采用的C1炭化技术就是所谓的现代煤化工工艺技术之一^[2]。

煤气化企业的生产工艺复杂,生产过程涉及的设施设备和装备工艺条件要求苛刻^[3]。同时,生产过程中涉及 H_2 、 CH_4 、 CO 、 H_2S 等危险介质,一旦发生泄漏,可能会造成中毒、火灾、爆炸等安全事故,甚至可能还造成环境污染。如2014年5月20日,某煤化工集团股份有限公司煤气化厂造气车间因更换蒸汽缓冲罐发生煤气中毒,致2人死亡、1人轻微中毒的事故,对该企业员工的安全感造成巨大冲击。

煤气化企业生产运行过程中大量有毒有害和易燃易爆物质存在,这些有毒有害和易燃易爆物质存在的潜在风险可造成重大的安全事故和巨大的经济损失。虽然这些年中国有关部门出台了相关法律、规章和安全技术标准等用以规范煤化工企业的安全生产行为^[4],但煤气化企业安全评价尚处于起步阶段,许多企业部分地方政府在项目建设之初并未考虑安全影响问题,这些因素均导致煤气化企业安全风险隐患的不断加剧。

为促进煤气化企业的安全生产,更好地预防、减少、控制和消除企业存在的安全隐患,笔者选取模糊综合评价理论^[5],通过模糊综合安全评价的方式^[6],以煤制甲醇的生产工艺作为典型的煤气化生产技术为评价对象,结合构建的煤气化企业安全风险综合评价的指标体系^[7],对某煤气化企业进行模糊综合安全评价,客观、科学地判定企业的安全风险程度。

1 煤制甲醇工艺

某煤气化企业主要采用成熟的煤制甲醇生产工艺得到甲醇,企业设计生产规模为产品甲醇 1.5×10^5 t/a、醋酸 1.0×10^5 t/a,副产品为硫8500 t/a。

煤制甲醇工艺,原料煤经破碎、筛分、气化后得到的粗煤气($CO+H_2$)在变换装置进入耐硫变换炉,将 CO 气转化为 CO_2 和 H_2 , CO_2 和 H_2 在低温环境条件下再经一系列洗、压缩、合成、精馏甲醇等工序,最后制得甲醇。

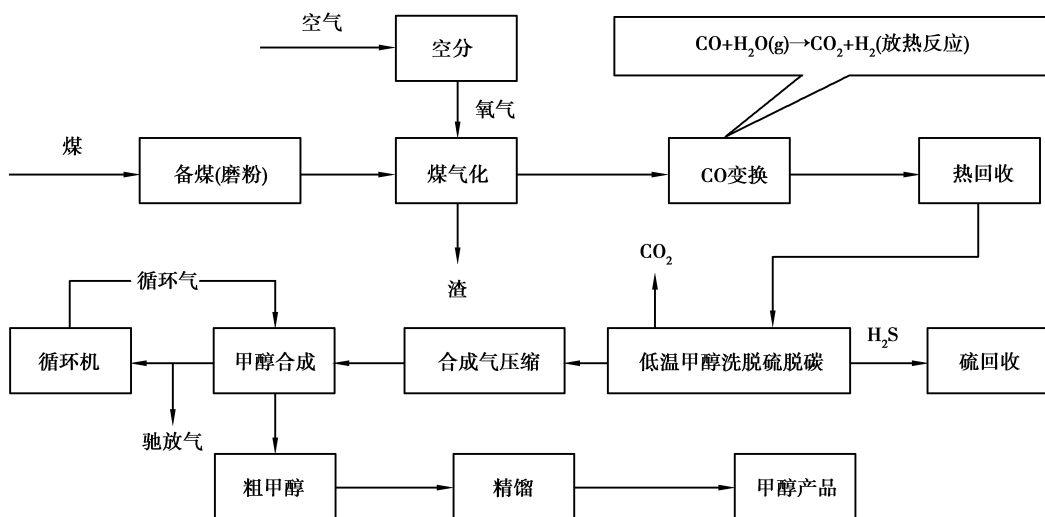


图1 所示为煤制甲醇工艺的流程简图

Fig.1 Process flow chart of coal-to-methanol

2 主要风险分析

煤制甲醇生产工序中的主要危险物质为甲醇。根据《危险化学品目录》(2015版),甲醇是一种无色、透明、易燃、易挥发的有毒液体。甲醇经呼吸道、胃肠道和皮肤吸收可致人中毒。甲醇对人体的健康危害主要是对中枢神经系统有麻醉作用;对视神经和视网膜有特殊选择作用,可引起人体病变,甚至可致代谢性酸中毒^[8-9]。

同时,甲醇也是一种易燃液体,其火灾危险性类别为甲类。甲醇与空气能形成爆炸性混合物,如果企业在生产、储运过程中因作业人员的误操作或者生产装置、设备、设施发生故障导致甲醇发生泄漏到空气中形成爆炸性混合物,一旦遇到明火,高热、氧化剂则可能发生燃烧爆炸。

煤制甲醇工艺涉及像循环气压缩机之类的较多运作设备和甲醇分离器、中间槽等高大设备,如果这些设备的安全防护设施不全、破损、失效,操作规程与实际不符等,还可能存在机械伤害、噪声伤害、高处坠落、物体打击等风险。

3 安全风险评价指标体系

3.1 安全评价指标选取的理论基础

海恩法则揭示,每一次严重的事故背后,必然有 29 次轻微事故和 300 起未遂的先兆以及 1 000 起事故隐患。任何安全事故不是单一因素造成的,而是由“人、机、物、法、环”等多种风险因素被某一偶然事件触发后造成的综合结果。

利用事故致因理论的基础,分析煤气化企业安全事故造成的风险因素、经过以及造成后果和损失的严重性,这涉及到人、环、物、管等多个因素,具体就是对作业人员、生产、储运过程涉及到的各类装置、设施设备、作业环境、安全管理等进行全方面的分析^[10]。目前国际上具有代表性的事故致因理论有几十种,煤气化企业安全评价指标的理论支撑论文则选取来源于事故致因理论中现代事故因果连锁论,即用现代事故因果连锁论的观点和方法来描述煤气化企业发生安全事故的直接原因、间接原因和基本原因。

3.2 指标选取原则

对如何消除、控制系统中的危险源,预防安全事故的发生,国内外的安全工作者进行了不懈努力,虽然取得了不错的研究成果,但煤气化企业的生产经营活动是一个复杂过程,涉及严格的工艺条件且危险、有害因素多。故笔者在安全风险评价指标选取时参照目前我国现行对危化企业开展安全评价工作要求的基本原则,以确保选取的评价指标具有科学性、代表性。

3.3 评价指标体系构建

影响煤气化企业安全因素主要包括复杂的生产工艺和大型生产设备、有毒有害介质环境、人员的违章作业行为、管理制度不完善或缺失等。为了全面科学的选取对煤气化企业安全生产本质、重要的影响因子,并充分考虑安全事故的发生关系社会稳定的特性,职业健康工作关系广大从业人员的身心健康,结合指标的特异性、敏感性、独立性、代表性,从“人、机、物、法、环”各个影响环节,结合影响煤气化企业安全生产的因素调查、分析,选取了企业固有安全风险指数、设备安全风险指数、环境安全风险指数、管理安全风险指数、人员安全风险指数^[11]、事故及职业健康指数等作为煤气化企业安全风险模糊综合评价的 6 个 1 级评价指标。选取生产能力利用指数、生产能力利用指数、隐患整改率等 35 个要素构成煤气化企业安全风险模糊综合评价的 2 级评价指标。该评价指标体系如表 1 所示。

表 1 安全风险评价指标体系

Table 1 The indexes set of safety risk evaluation

指标代码	一级指标含义	指标代码	二级指标含义
C ₁	固有安全风险指数	C ₁₁	产能利用率指数
		C ₁₂	介质安全指数
		C ₁₃	生产工艺指数
		C ₁₄	设计缺陷指数
		C ₁₅	安全管理机构指数

续表 1

指标代码	一级指标含义	指标代码	二级指标含义
C ₂	设备安全风险指数	C ₂₁	设备完好度指数
		C ₂₂	设备安全运行指数
		C ₂₃	设备维保合规率指数
		C ₂₄	设备更新改造率指数
		C ₂₅	技术安全措施指数
C ₃	环境安全风险指数	C ₃₁	作业环境温度指数
		C ₃₂	作业环境风速指数
		C ₃₃	作业环境噪声指数
		C ₃₄	周边单位相互影响危害指数
		C ₃₅	作业环境照明指数
		C ₃₆	作业场所合规指数
C ₄	管理安全风险指数	C ₄₁	安全管理制度指数
		C ₄₂	技术人员按规配备指数
		C ₄₃	安全人员按规配备指数
		C ₄₄	应急救援建设指数
		C ₄₅	安全检查完成率指数
		C ₄₆	隐患整改完成率指数
		C ₄₇	安全投入提取指数
		C ₄₈	安全信息上传下达有效指数
C ₅	人员安全风险指数	C ₅₁	人员学历指数
		C ₅₂	人员技术素质指数
		C ₅₃	作业人员资质指数
		C ₅₄	作业人员培训指数
		C ₅₅	职员体检合格率指数
		C ₅₆	作业人员三违指数
C ₆	事故及职业健康指数	C ₆₁	死亡事故指数
		C ₆₂	伤残事故指数
		C ₆₃	事故经济损失率指数
		C ₆₄	员工职业病率指数
		C ₆₅	职业健康管理指数

4 模糊综合评价理论

模糊综合评价方法主要分为以下几个步骤:第一步确认评价指标并建立评价因素集;第二步建立综合评价的评判集;第三步构造模糊综合评价矩阵;第四步确定指标体系的权重向量;第五步是根据模糊综合评价矩阵和权重向量计算评价结果向量。为了达到更合理的综合评价结果,模糊综合评价一般采用两层及两层以上的评价模型。

4.1 确认评价指标建立评价因素集

分析需要评价的对象,将影响到评价对象安全风险的 m 个因素构成一个集合,通常用 U 表示,即:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}, \quad (1)$$

式中:元素 $u_i (i=1, 2, \dots, m)$ 代表影响评价对象安全风险的第 i 个因素,所有 m 个因素对评价对象的安全风险影响通常具有不同的模糊性。

4.2 建立综合评价的评判集

综合评价的评判集是基于模糊数学理论对评价对象处于各级安全风险级别的可能性数值所组成的集合^[12],用 L 表示。 L 实际上是对被评价对象安全程度变化区间的一个划分。一般被评价对象的安全综合状况可用“差”、“较差”、“中等”、“较好”、“好”5 个等级来评判,即:

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}, \quad (2)$$

式中元素 $l_i (i=1, 2, \dots, n)$ 代表第 i 级评价结果的可能性。

4.3 建立模糊安全评价矩阵

模糊安全评价矩阵实际上是由各个评价因素的评价结果组合而成。第 i 个评价因素的评价结果由 R_i 表示:

$$R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\}, \quad (3)$$

R_i 根据第 i 个评价因素的评判集 L 获得, r_{ij} 表示第 i 个元评价因素属于第 j 个评价等级的隶属度。

于是可以由所有评价因素的评价集组成模糊综合评价矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: r_{ij} 反映评价因素与评价等级之间用隶属度表示的模糊关系; m 为被评价对象的评价因素总数; n 为评价对象评判集的总数。

4.4 确定评价因素权重向量

在安全综合评价时,各个评价因素对评价对象的安全风险影响程度各不相同,为了准确进行安全综合评价,需确认各个评价因素 $u_i (i=1, 2, \dots, m)$ 的权重系数 $w_i (i=1, 2, \dots, m)$,各个评价因素的权重集合的模糊集用 W 表示,即:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}, \quad (5)$$

式中, $w_i (0 \leq w_i \leq 1)$ 表示 u_i 对评价对象安全风险影响的程度,用来度量评价因素 u_i 在综合评价结果中对评价对象影响程度,一般称为权重。各个权重满足: $w_1 + w_2 + \dots + w_m = 1$ 。

4.5 计算评价结果向量

基于模糊数学理论,一般采用模糊合成算子求得评价结果向量 B ,公式如下:

$$B = W \cdot R, \quad (6)$$

式中,“ \cdot ”代表合成算子, W 的行和 R 的列依次进行相乘计算。

为了更准确地达到综合评价结果的预期效果,避免每项评价因素取得的权重分配的值太小,一般采用多层评价模型进行模糊综合评价。这里采用两层评价模型,各层评价算法详细描述如下。

4.5.1 第一层模糊评价

第一层模糊评价完成安全评价指标体系的 2 级评价指标的评价,某单因素 u_i 下各个 2 级指标权重集为 W_i ,求得 u_i 的第一层综合评价结果 B_i :

$$B_i = W_i \cdot R_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}\}. \quad (7)$$

4.5.2 第二层模糊评价

第二层模糊评价以第一层评价结果为基础,将各个一级单因素综合评价结果构成安全评价矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_i \end{bmatrix}. \quad (8)$$

各一级单因素模糊权重 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$,由式(6)可以求解得第二层综合评价模型公式:

$$A = W \cdot R = (a_1, a_2, \dots, a_n). \quad (9)$$

4.6 评价结果

根据模糊理论的最大隶属原则, a_i 最大值的方案即为所选的最优方案,从而得出评价结果。

5 安全风险模糊综合评价结果及分析

5.1 基于德尔菲法的函询结果分析

5.1.1 专家选取及基本情况

根据德尔菲法专家选择的基本原则^[13],从重庆市政府专家库选取 15 名经验丰富的专家,这些专家工作单位包含政务部门、科研院校、化工企业等,覆盖工艺、电气、自动化控制、安全管理、应急管理等专业领域。本次函询征集的专家包含老、中、青三个年龄段;在学历上,除 1 位专家大专学历,其余专家都具有本科以上学历;在职称上,专家绝大部分具有副高以上的职称;有 10 位专家经历过安全事故或者参与安全事故处理。因此,这些专家对安全事故发生的原因及相应的安全处置措施比较熟悉。

5.5.2 指标权重函询表的设计

从煤气化企业安全生产主要影响因素的“人、机、物、法、环”等方面,设计了表 1“煤气化企业安全风险评价指标体系”涵盖的安全评价指标权重打分专家函询表。本次对某煤气化企业安全风险模糊综合评价,发出专家函询表 15 份,反馈回收率达 100%。

5.5.3 指标权重统计分析结果

按德尔菲法理论,各个评价因素的权重系数计算公式为

$$Q_i = \frac{B_i}{\sum_{j=1}^m B_j}, \quad (10)$$

式中: Q_i 为第 i 个评价因素的权重系数^[7]; B_i 为第 i 个评价因素的得分均数; m 为同一层指标总数。其中 B_i 通过公式(11)求得:

$$B_i = \frac{\sum_{j=1}^n C_j d_j}{n}, \quad (11)$$

式中: C_j 为第 j 个专家的权威系数; d_j 为第 j 个专家对第 i 个评价因素给出的分数; n 为参与评价的专家总人数。其中专家的权威系数 C_j 主要由第 j 个专家自身的专业造诣、对评价指标判断的依据以及对每个评价指标的熟悉程度综合计算得到^[13]。

通过 15 位专家在对某煤气化企业安全风险评价指标的权重打分数据计算,得到各评价指标对评价对象安全风险影响程度的权重如表 2。

表 2 基于德尔菲法的指标权重

Table 2 The weight of indexes based on Delphi Method

一级指标	权重	二级指标	权重
C ₁	0.153 5	C ₁₁	0.296 9
		C ₁₂	0.206 5
		C ₁₃	0.290 0
		C ₁₄	0.126 7
		C ₁₅	0.079 8
C ₂	0.210 6	C ₂₁	0.285 9
		C ₂₂	0.222 8
		C ₂₃	0.251 8
		C ₂₄	0.092 1
		C ₂₅	0.147 4

续表 2

一级指标	权重	二级指标	权重
C ₃	0.150 1	C ₃₁	0.161 9
		C ₃₂	0.162 9
		C ₃₃	0.184 4
		C ₃₄	0.146 1
		C ₃₅	0.181 8
		C ₃₆	0.162 9
C ₄	0.212 3	C ₄₁	0.253 8
		C ₄₂	0.146 7
		C ₄₃	0.119 2
		C ₄₄	0.142 4
		C ₄₅	0.140 7
		C ₄₆	0.094 0
		C ₄₇	0.063 0
		C ₄₈	0.040 3
C ₅	0.152 7	C ₅₁	0.156 1
		C ₅₂	0.181 7
		C ₅₃	0.161 8
		C ₅₄	0.232 3
		C ₅₅	0.159 6
		C ₅₆	0.108 4
C ₆	0.120 7	C ₆₁	0.204 1
		C ₆₂	0.176 1
		C ₆₃	0.200 6
		C ₆₄	0.156 1
		C ₆₅	0.263 1

5.2 模糊评价评判集及隶属函数

依据对煤气化企业安全评价的原理、专家意见和数据资料的分析 and 反复研究后,将煤气化企业的各个评价因素的安全状况等级量化为好、较好、中等、较差、差^[14],对应的等级及得分区间见表 3。

表 3 安全等级得分区间表

Table 3 The score rang of safety level

级别	含义	得分区间
第 1 等级	好	[90,100]
第 2 等级	较好	[75,89]
第 3 等级	中等	[60,74]
第 4 等级	较差	[45,59]
第 5 等级	差	[0,44]

然后分别取各个得分区间的中间值作为分级标准点,依次分别是 95、82、67、52、22。结合式(2),各项指标的模糊综合安全评价评判集的分级标准点 V_i 定为 $V_1=22, V_2=52, V_3=67, V_4=82, V_5=95$ 。

常用隶属函数包括正态分布、梯形分布、岭形分布和抛物线分布等函数,在实际的模糊现象描述中,不同的评判对象适合选取不同的隶属函数。根据文献研究和相关经验,本文中的评价对象适合采用梯形分布作为隶属函数,根据得多高低采用偏小型、中间型和偏大型梯形分布作为隶属函数^[15],确定各等级隶属函数公式见式(12)~(16)。

$$\mu_{\text{差}}(x) = \begin{cases} 1, & x < V_1 \\ \frac{V_1 - x}{V_2 - V_1}, & V_1 \leq x \leq V_2, \\ 0, & x > V_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{\text{较差}}(x) = \begin{cases} 0, & x < V_1 \\ \frac{x - V_1}{V_2 - V_1}, & V_1 \leq x < V_2 \\ \frac{V_3 - x}{V_3 - V_2}, & V_2 \leq x \leq V_3 \\ 0, & x > V_3 \end{cases}, \quad (13)$$

$$\mu_{\text{中等}}(x) = \begin{cases} 0, & x < V_2 \\ \frac{x - V_2}{V_3 - V_2}, & V_2 \leq x < V_3 \\ \frac{V_4 - x}{V_4 - V_3}, & V_3 \leq x \leq V_4 \\ 0, & x > V_4 \end{cases}, \quad (14)$$

$$\mu_{\text{较好}}(x) = \begin{cases} 0, & x < V_3 \\ \frac{x - V_3}{V_4 - V_3}, & V_3 \leq x < V_4 \\ \frac{V_5 - x}{V_5 - V_4}, & V_4 \leq x \leq V_5 \\ 0, & x > V_5 \end{cases}, \quad (15)$$

$$\mu_{\text{好}}(x) = \begin{cases} 0, & x < V_4 \\ \frac{x - V_4}{V_5 - V_4}, & V_4 \leq x < V_5 \\ 1, & x > V_5 \end{cases} \quad (16)$$

以上各式中, x 为各评价指标的实际得分。

5.3 安全风险模糊综合评价结果

5.3.1 评价指标评分结果

基于专家组的经验,采用会审形式对煤气化企业安全风险因素做充分分析和评估,按照各个安全风险指标的特性,采用相应的分段常量函数得到各安全评价指标的原始得分公式^[16]。

例如产能利用率指数 C_{11} 采用区间赋值法分段常量函数,其量化评分公式见式(17):

$$C_{11}(x) = \begin{cases} 80, & 90\% \leq x \leq 100\%; \\ 90, & 80\% \leq x < 90\%; \\ 65, & 70\% \leq x < 80\%; \\ 45, & 60\% \leq x < 70\%; \\ 20, & x > 100\% \text{ 或 } x < 60\%。 \end{cases} \quad (17)$$

式中, x 为生产能力利用率。某煤气化企业产能利用率为87%,所以 C_{11} 指数得分为90分,根据隶属函数式(12)~(16)得到 C_{11} 的安全风险向量 B_{11} 为 $B_{11} = (0.000\ 0, 0.000\ 0, 0.000\ 0, 0.384\ 6, 0.615\ 4)$ 。

介质安全指数 C_{12} 采用按频次赋值法分段常量函数,其量化评分公式为

$$C_{12}(x) = \begin{cases} 90, x = 0; \\ 80, x = 1; \\ 65, x = 2; \\ 45, x = 3; \\ 20, x \geq 4. \end{cases} \quad (18)$$

式中 x 为由介质安全引发的火灾爆炸或中毒事故次数。某煤气化企业过去 3 年内发生介质事故 1 次,所以 C_{12} 得分为 80 分,根据隶属函数得到 C_{12} 的安全风险向量 B_{12} 为 $B_{12} = (0.000\ 0, 0.000\ 0, 0.133\ 3, 0.866\ 7, 0.000\ 0)$ 。

生产工艺指数 C_{13} 则采用分类赋值法分段常量函数,其量化评分公式为

$$C_{13}(x) = \begin{cases} 90, x = \text{先进工艺}; \\ 80, x = \text{成熟工艺}; \\ 60, x = \text{首次选用的工艺}. \end{cases} \quad (19)$$

式中 x 企业为工艺成熟性。某煤气化企业采用成熟工艺,所以 C_{13} 得分为 80 分,根据隶属函数得到 C_{13} 的安全风险向量 B_{13} 为 $B_{13} = (0.000\ 0, 0.000\ 0, 0.133\ 3, 0.866\ 7, 0.000\ 0)$ 。

同理得到 $B_{14}, B_{15}, B_{21}, \dots, B_{65}$ 。于是根据二级指标隶属度构建安全等级矩阵 R ,如表 4 所示。

表 4 二级指标隶属度汇总表

Table 4 The membership degree of second-level indexes

指标	安全等级 R				
	差	较差	中等	较好	好
C_{11}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.384 6	0.615 4
C_{12}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{13}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{14}	0.000 0	0.000 0	0.800 0	0.200 0	0.000 0
C_{15}	0.000 0	0.466 7	0.533 3	0.000 0	0.000 0
C_{21}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{22}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{23}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.769 2	0.230 8
C_{24}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{25}	0.000 0	0.000 0	0.800 0	0.200 0	0.000 0
C_{31}	0.000 0	0.000 0	0.800 0	0.200 0	0.000 0
C_{32}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{33}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{34}	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
C_{35}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.384 6	0.615 4
C_{36}	0.000 0	0.000 0	0.800 0	0.200 0	0.000 0
C_{41}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.384 6	0.615 4
C_{42}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.384 6	0.615 4
C_{43}	0.000 0	0.000 0	0.800 0	0.200 0	0.000 0
C_{44}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.384 6	0.615 4
C_{45}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{46}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{47}	0.066 7	0.933 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0
C_{48}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.384 6	0.615 4

续表 4

指标	安全等级 R				
	差	较差	中等	较好	好
C_{51}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{52}	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0	0.000 0
C_{53}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.384 6	0.615 4
C_{54}	0.000 0	0.000 0	0.800 0	0.200 0	0.000 0
C_{55}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{56}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{61}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.384 6	0.615 4
C_{62}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{63}	0.000 0	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0
C_{64}	0.000 0	0.133 3	0.866 7	0.000 0	0.000 0
C_{65}	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.384 6	0.615 4

5.3.2 第一层模糊综合安全评价结果

根据表 2 的评价指标权重和表 4 的隶属度,构建固有安全风险指数 C_1 权重向量 W_1 及模糊综合评价矩阵 R_1 分别为:

$$W_1 = (0.296\ 9, 0.206\ 5, 0.290\ 0, 0.126\ 7, 0.079\ 8),$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.384\ 6 & 0.615\ 4 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.133\ 3 & 0.866\ 7 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.133\ 3 & 0.866\ 7 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.800\ 0 & 0.2000\ 0 & 0.000\ 0 \\ 0.000\ 0 & 0.466\ 7 & 0.533\ 3 & 0.000\ 0 & 0.000\ 0 \end{bmatrix}.$$

按照式(7)可得到该企业固有安全风险指数 C_1 的评价向量 B_1 :

$$B_1 = (0.000\ 0, 0.037\ 2, 0.210\ 2, 0.569\ 9, 0.182\ 7).$$

同理可以计算出 B_2 到 B_6 :

$$B_2 = (0.000\ 0, 0.000\ 0, 0.198\ 0, 0.743\ 9, 0.058\ 1),$$

$$B_3 = (0.146\ 1, 0.0000\ 0, 0.306\ 1, 0.435\ 9, 0.111\ 9),$$

$$B_4 = (0.004\ 2, 0.058\ 8, 0.126\ 6, 0.451\ 5, 0.358\ 9),$$

$$B_5 = (0.000\ 0, 0.024\ 2, 0.399\ 9, 0.476\ 3, 0.099\ 6),$$

$$B_6 = (0.000\ 0, 0.020\ 8, 0.185\ 5, 0.506\ 1, 0.287\ 5).$$

5.3.3 第二层模糊综合安全评价结果

根据表 2 得一级指标权重向量 W 为

$$W = (0.153\ 5, 0.210\ 6, 0.150\ 1, 0.212\ 3, 0.152\ 7, 0.120\ 7).$$

根据第一层模糊安全评价向量 B_1, B_2, \dots, B_6 , 组成的 1 级评价指标模糊关系矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.000\ 0 & 0.037\ 2 & 0.210\ 2 & 0.569\ 9 & 0.182\ 7 \\ 0.000\ 0 & 0.000\ 0 & 0.198\ 0 & 0.743\ 9 & 0.058\ 1 \\ 0.146\ 1 & 0.000\ 0 & 0.306\ 1 & 0.435\ 9 & 0.111\ 9 \\ 0.004\ 2 & 0.058\ 8 & 0.126\ 6 & 0.451\ 5 & 0.358\ 9 \\ 0.000\ 0 & 0.024\ 2 & 0.399\ 9 & 0.476\ 3 & 0.099\ 6 \\ 0.000\ 0 & 0.020\ 8 & 0.185\ 5 & 0.506\ 1 & 0.287\ 5 \end{bmatrix}.$$

然后按照式(9),根据 W 和 R 可以得到第二层模糊综合评价结果向量 A :

$$\mathbf{A} = (0.022\ 8, 0.024\ 4, 0.230\ 3, 0.539\ 3, 0.183\ 2)。$$

5.3.4 模糊综合评价结论

根据本文的评判标准 $L = (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5) = (\text{差}, \text{较差}, \text{中等}, \text{较好}, \text{好})$, 评价结果隶属于 l_1 级别的程度为 0.022 8, 隶属于 l_2 级别的程度为 0.024 4, 隶属于 l_3 级别的程度为 0.230 3, 隶属于 l_4 级别的程度为 0.539 3, 隶属于 l_5 级别的程度为 0.183 2。隶属 l_4 级别程度最大, 隶属于 l_3 级别程度次之, 故得出某煤气化企业安全风险状况为“较好偏中等”。

为进一步验证某煤气化企业安全风险模糊综合评价状况为是“较好偏中等”的判定结果, 使用以下公式计算出安全风险综合评价结果的加权平均值:

$$f = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}^T, \quad (20)$$

式中, \mathbf{A} 为二级模糊综合评价结果向量, \mathbf{S}^T 为各项指标的分级标准点, 即: $\mathbf{S} = (22, 52, 67, 82, 95)$ 。

$$f = 22 \times 0.022\ 8 + 52 \times 0.024\ 4 + 67 \times 0.230\ 3 + 82 \times 0.539\ 3 + 95 \times 0.183\ 2 = 78.83。$$

计算得出 f 的值为 78.83, 在得分区间在 $[75, 89]$ 之间, 按照表 3, 该企业的安全状况等级位于“较好”等级, 与模糊综合评价结论相符, 且与企业的实际安全状况基本一致。

5.3.5 模糊安全评价结果分析

根据以上的模糊综合评价结果, 某煤气化企业的安全状况分析如下:

1) 固有安全风险指数 C_1 : 安全状况“较好偏中等”, 该企业产能利用合理, 生成工艺成熟, 建议进一步完善安全管理机构建设;

2) 设备安全风险 C_2 , 安全状况“较好偏中等”, 该企业选用设备技术先进, 按照相关规章制度较好地完成了设备设施维护保养工作, 并设置了安全防护设施, 如在有毒有害气体场所设置了智能监测报警仪, 电气设施达到防爆和本安要求。技术装备和和技术措施基本有效, 部分系统仍存在升级改造的空间;

3) 环境安全风险指数 C_3 , 安全状况“较好偏中等”, 该企业除部分生产环境存在高温作业, 其他作业环境条件正常, 企业周边 1 000 m 范围内无居民区, 但存在危险化学品生产储存企业, 建议加强和相关企业的联合应急演练;

4) 管理安全风险指数 C_4 , 安全状况“较好偏好”, 该企业具备完善的、责任明确的安全生产责任制, 管理制度健全并建立和完善了操作规程, 安全工程技术及管理人员配备齐全, 应急响应机制完善, 安全检查落实率和隐患整改率均超过 90%;

5) 人员安全风险指数 C_5 , 安全状况“较好偏中等”, 从业人员中高中及以上学历占比 85%, 本科学历及以上学历占比 20%, 大部分工作人员具有超过三年工作经验, 要求持证岗位的人员均持证上岗, 员工培训率基本满足要求;

6) 事故及职业健康指数 C_6 , 安全状况“较好偏好”, 该企业未发生死亡事故, 伤残事故低于国家要求水平, 极个别一线员工由于长期接触有毒有害气体和粉尘等物质检查出尘肺病, 企业职业危害申报和应急管理满足国家和地方相关规范要求。

6 结 论

煤气化企业安全风险安全因素复杂, 安全风险涉及企业多部门、多环节、多工种。笔者运用模糊综合评价理论, 结合德尔菲专家函询法, 以某煤气化企业安全风险状况为研究对象, 选取固有安全风险指数 C_1 、设备安全风险 C_2 、环境安全风险指数 C_3 、管理安全风险指数 C_4 、人员安全风险指数 C_5 和事故及职业健康指数 C_6 作为一级评价指标, 构建了一套安全评价指标体系, 为煤气化企业乃至煤化工企业的安全风险综合评价提供参考意义。

煤气化企业安全评价指标体系从“人、机、物、法、环”各个影响环节, 科学、全面、系统地对企业各生产装置、设备、设施、储存条件、生产环境、管理制度、作业人员以及职业健康等方面进行综合评价, 辨识安全风险因素、企业危险因素及其影响程度, 协助企业合理地选择安全技术装备和技术措施, 促使煤气化企业制定合理的安全投入和分配计划, 确保安全生产的前提下实现企业效益的最大化。

参考文献:

- [1] 刘丽秀. 煤化工技术的发展与新型煤化工技术[J]. 煤炭技术, 2014, 33(2): 196-198.
LIU Lixiu. Development of coal chemical industry technology and new types of coal chemical industry technology[J]. Coal Technology, 2014, 33(2): 196-198.(in Chinese)
- [2] 高聚忠. 煤气化技术的应用与发展[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(1): 65-71.
GAO Juzhong. Application and development of coal gasification technologies[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(1): 65-71.(in Chinese)
- [3] 张莹, 何华, 茹建国, 等. 基于风险矩阵分析的新疆吉木萨尔地区某煤化工企业模糊综合风险评价[J]. 职业与健康, 2017, 33(7): 876-879.
ZHANG Ying, HE Hua, RU Jianguo, et al. Risk assessment by fuzzy mathematics of a coal chemical enterprise in Jimsar of Xin Jiang: based on risk matrix analysis method[J]. Occupation and Health, 2017, 33(7): 876-879.(in Chinese)
- [4] 李青月, 李博洋. 浅谈新时期化工企业安全生产管理[J]. 云南化工, 2017, 44(11): 108-110.
LI Qingyue, LI Boyang. Introduction to chemical enterprise safety production management and innovation in the new period[J]. Yunnan Chemical Technology, 2017, 44(11): 108-110.(in Chinese)
- [5] 王玥, 陈飞, 徐水珠. 医学科研项目验收评价指标体系的理论基础研究[J]. 江苏科技信息, 2015(23): 65-68.
WANG Yue, CHEN Fei, XU Shuizhu. Theoretical basis of research on evaluation index system of medical scientific research acceptance[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2015(23): 65-68.(in Chinese)
- [6] Hu J Q, Zhang L B, Liang W. An adaptive online safety assessment method for mechanical system with pre-warning function[J]. Safety Science, 2012, 50(3): 385-399.
- [7] 刘胜, 刘娜, 杨育, 等. 危险源安全评价的离散 Hopfield 神经网络[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(4): 26-32.
LIU Sheng, LIU Na, YANG Yu, et al. Safety evaluation of hazards based on discrete Hopfield neural network[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(4): 26-32.(in Chinese)
- [8] Stoneburner G, Goguen A, Feringa A. Risk management guide for information technology systems[R]. National Institute of Standards and Technology, 2002. DOI:10.6028/nist.sp.800-30.
- [9] 刘志哲. 联锁在煤化工工艺中的应用与评价[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(11): 9.
LIU Zhizhe. Application and evaluation of interlocking in coal chemical process [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43(11): 9.(in Chinese)
- [10] Fan Y X, Guo Y K. Causal factor analysis of Chinese coal mining accident based on HFACS frame[J]. Disaster Advanced, 2014, 7(4): 19-26.
- [11] 宋陈澄, 陈培友. 煤矿员工不安全行为的影响因素分析及对策研究[J]. 煤炭经济研究, 2017, 37(9): 65-70.
SONG Chencheng, CHEN Peiyu. Study on analysis and countermeasure to the factors affected to unsafe behavior of the coal miner[J]. Coal Economic Research, 2017, 37(9): 65-70.(in Chinese)
- [12] Amendola A, Linnerooth-Bayer J, Okada N, et al. Towards integrated disaster risk management: case studies and trends from Asia[J]. Natural Hazards, 2008, 44(2): 163-168.
- [13] 戚作秋, 王宏, 王翘秀. Delphi 法职业危害风险评估模型及案例研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(2): 402-407.
QI Zuoqiu, WANG Hong, WANG Qiaoxiu. Model for occupational hazard risk assessment and a case study based on the Delphi method[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(2): 402-407.(in Chinese)
- [14] Swartjes F A, Versluijs K W, Otte P F. A tiered approach for the human health risk assessment for consumption of vegetables from with cadmium-contaminated land in urban areas[J]. Environmental Research, 2013, 126: 223-231.
- [15] Yang Y, Zhou Z C, Bai Y Y, et al. Risk assessment of heavy metal pollution in sediments of the Fenghe River by the fuzzy synthetic evaluation model and multivariate statistical methods[J]. Pedosphere, 2016, 26(3): 326-334.
- [16] Holm H, Afridi K K. An expert-based investigation of the Common Vulnerability Scoring System[J]. Computers & Security, 2015, 53: 18-30.