

煤化工灾害识别与应急决策技术研究

王晨羲^{1,2}, 宋波波³, 马腾³, 郝乐³

¹昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明

²陕西未来能源化工有限公司, 陕西 榆林

³西安科技大学安全科学与工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年3月22日; 录用日期: 2024年6月14日; 发布日期: 2024年6月24日

摘要

随着煤化工的发展, 煤化工产业的危险灾害开始向多样化发展, 事故发生也多余其他行业, 且造成的事故发生扩展, 影响周边装置的安全性及衍生次生伤害。基于事故的频发性和事故后果, 依据ARAMIS标准, 判定研究目标液化气分离单元属于重大危险源, 结合典型事故判别易发生事故为蒸汽与爆炸; 以Bow-tie模型和贝叶斯网络为基础, 将Bow-tie模型转化为贝叶斯模型, 组件事故扩展模型进行推演; 以丙烯泄露为实例, 赋予事故原因根节点概率, 得出扩展后果发生的概率, 针对事故风险, 提出了基于蒸气云爆炸模拟情景决策内容与蒸气云爆炸事故通用预防方案, 为煤化工产业预防蒸气云爆炸事故提供理论依据。

关键词

Bow-Tie模型, 贝叶斯网络, 蒸气云爆炸, 事故预防

Research on Disaster Identification and Emergency Decision Technology of Coal Chemical Industry

Chenxi Wang^{1,2}, Bobo Song³, Teng Ma³, Le Hao³

¹School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

²Shaanxi Future Energy Chemical Co., Ltd., Yulin Shaanxi

³School of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 22nd, 2024; accepted: Jun. 14th, 2024; published: Jun. 24th, 2024

Abstract

With the development of coal chemical industry, the dangerous disasters of coal chemical industry began to diversify, and the accidents occurred more than other industries, and the accidents caused by the expansion, affecting the safety of surrounding devices and derived secondary injuries. Based on the frequency and consequences of accidents, according to the ARAMIS standard, it is determined that the liquefied gas separation unit of the research target is a major hazard source, and combined with typical accidents, it is determined that the prone accidents are steam and explosion. Based on Bow-tie model and Bayesian network, the Bow-tie model is transformed into Bayesian model, and the component fault extension model is deduced. Taking propylene leakage as an example, the probability of the root node of the accident cause is given, and the probability of the occurrence of the extended consequences is obtained. In view of the accident risk, the decision content based on the steam cloud explosion simulation scenario and the general prevention scheme of the steam cloud explosion accident are proposed, which provides a theoretical basis for the prevention of the steam cloud explosion accident in the coal chemical industry.

Keywords

Bow-Tie Model, Bayesian Network, Vapor Cloud Explosion, Accident Prevention

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国综合国力的不断增强,健全而独立的工业体系也逐渐形成。化工行业渗透在国家建设的各个方面,其发展对人类经济及现代社会都具有重要意义。我国作为煤炭大国,以煤为主,石油、天然气为辅的产业结构决定了我国能源消耗的特殊性[1]。因此,发展现代化的煤化工产业结构,提高煤炭的产能效率,弥补传统的石油化工产业短板,具有深远的战略意义[2]。

对于目前的新型煤化工企业来说,建立起完备的灾害识别评价与应急决策系统具有十分重要的现实意义。即首先构建一套完善、科学且合理的新型煤化工企业灾害识别体系,优先选择专业的技术方法来对企业风险源进行综合评价,并在评价结果的基础上,基于实际情景进行风险动态演化推演,建立重大灾害风险源的识别和评估新方法,从而达到不断地完善企业灾害应急与决策的目的。

2. 国内外研究现状

2.1. 重大风险源现状识别研究

对于重大风险源的识别与分级研究,起步较早的是欧美国家,并取得了有效的成绩。国外的风险源静态分级方法主要以打分的方式进行,如美国道化学火灾、爆炸指数法,ICI 蒙德火灾、爆炸、毒性指数法,日本劳动省基准局制定的化工企业六阶段评价法。而国内通常用固有危险性作为分级依据能使受控目标集保持稳定。常用的分级方法主要有两种:一种是分级标准不变或分级结果不随参加分级的风险源数目多少而变化,即风险源静态分级方法。包括死亡半径法,易燃、易爆、有毒重大风险源评价法、基

于 BP 神经网络的重大风险源评价法等；另外一种为风险源数目发生变化或分级的标准是可变的或两者皆可变，即风险源动态分级方法，如具有自组织模式聚类功能的动态神经网络方法[3]。

2.2. 化工园区事故演化推演方法研究现状

在化工园区典型事故影响因素方面，国内外学者主要通过改变风险因素，对事故进行分析，从而确定典型事故与影响因素之间的相对关系。国外学者 Jan Stawczyk 等[4]进行了液化气体爆炸的实验研究，分析整个 BLEVE 的过程以及影响爆炸发生和扩展的因素；国内学者侯建盛等[5]对情景在空间以及时间上的关系进行了研究，并提出了基于情景重构的应急方案快速生成程序；刘铁民等[6]对突发事件演变规律展开分析，并且研究了事件演变过程，给出了情景演变的特征及决策者采取的应对方式与方法。

2.3. 国内外技术发展趋势

目前，灾害风险源识别采用欧洲标准，并且在煤化工领域的应用研究较少。灾害演化的研究主要依靠改变单个影响因素，观测对灾害范围、种类的影响；灾害应急决策研究中动态与时序概念较少，大多将灾害应急决策问题当作单一来源的决策过程。目前国内研究主要集中在利用应急管理知识对突发灾害进行应急决策，不能有效结合现有大数据、神经网络、云计算等技术。神经网络技术相比传统人工构建模型方式，在解决非线性问题方面具有较大优势。结合跨学科融合的特点，以应急管理理论为基础，结合新方法、新思路即将成为灾害应急决策体系构建技术的发展趋势。

3. 煤化工装置区危险源辨识与事故研究

3.1. 危险源识别

本项目采用欧盟 ARAMIS 标准，对其整个生产区域进行危险源辨识，该标准将物质的危险特性分为 10 类，且考虑到挥发性的液态物质以及多米诺效应对物质危险特性的影响，表 1 是依据危险物质的物理状态、危险特性以及与其他装置间的相对距离得出的质量阈值，但是需要依据现场实际情况对设备的质量参考阈值 M_a 进行修正。具体质量阈值见下表 1。

Table 1. Quality reference threshold M_a

表 1. 质量参考阈值 M_a

物质特性	固态(kg)	液态(kg)	气态(kg)
强毒性	10,000	1000	100
毒性	100,000	10,000	1000
氧化性	10,000	10,000	10,000
爆炸性 R2	10,000	10,000	/
爆炸性 R3	1000	1000	/
易燃	/	10,000	/
高度易燃	/	10,000	/
极度易燃	/	10,000	1000
对环境有害	100,000	10,000	1000
以上分类不涉及的与 R29, R14/R15, R14 相结合的	10,000	10,000	/

附注：1) R2 和 R3 表示与火源接触时容易爆炸及极其容易爆炸的物质；2) 表中的 R29、R14/R15、R14 分别代表与水接触产生有毒气体、与水反应激烈并产生极度易燃气体、与水反应激烈的物质。

危险源认定标准分为以下三条准则：

- 1) 如果质量阈值 M_a 小于装置中的物质质量 M ，则该装置构成危险性装置；
- 2) 如果是由数台装置连接构成，则要将装置中的物质质量进行加和，如果一台装置发生失效但不会引起其他装置失效的情况例外；
- 3) 管道等装置中的质量小于 M_a ，但如果管道发生泄漏且泄漏的时间超过 10 分钟，则该装置也构成危险性装置。

对于液体物质，需要对其质量阈值 M_a 进行修正，修正后新的质量阈值为 M_b 。

$$M_b = \frac{M_a}{S}$$

式中 $S = S_1 + S_2$ ，并且 $0.1 \leq S \leq 10$ ，若 S 小于 0.1，则 $S = 0.1$ ，如果 S 大于 10， $S = 10$ 。关于 S_1 和 S_2 的表达式如下：

$$S_1 = 10^{\frac{T_p - T_{eb}}{100}}$$

$$S_2 = \frac{T_{eb}}{-50}$$

式中 T_p 为操作温度(°C)； T_{eb} 是在标准大气压下的液体沸点(°C)。当操作温度低于零摄氏度时，如果操作温度大于零时， $S_2 = 0$ 。对于液体物质的质量阈值 M_a 进行修正的条件为：液体挥发会加剧事故后果的严重程度及其发生概率，否则可能引起 M_b 值被放大或造成设备漏选，值得注意的是：如果不是液态物质，则 $S = 1$ ，如果是混合物质，则 T_{eb} 取开始沸腾温度，对于沸腾前已经聚合的物质，则 $S_1 = 1$ ，对于沸腾前已经分解的物质， T_{eb} 取分解时的温度。

液化气分离装置

根据企业提供的资料及现场调查，液化气分离单元内含有生产装置脱丙烷塔、脱乙烷塔、丙烯-1 塔、丙烯-2 塔，主要危险物质有原料气，C3。

原料气储量 3000 kg，C3 储量 5000 kg，依据标准计算：

$$S_{1(\text{原料气})} = 10^{\frac{T_p - T_{eb}}{100}} = 10^{\frac{108 - (-45.4)}{100}} = 33.88, \text{ 取 } 10$$

$$M_b = M_a / S = 10000 / 10 = 1000 \text{ kg}$$

$$M_{\text{原料气}} > M_b = 1000 \text{ kg}$$

$$S_{1(\text{C3})} = 10^{\frac{T_p - T_{eb}}{100}} = 10^{\frac{65 - (-42)}{100}} = 11.7, \text{ 取 } 10$$

$$M_b = M_a / S = 10000 / 10 = 1000 \text{ kg}$$

$$M_{\text{C3}} > M_b = 1000 \text{ kg}$$

依据 ARAMIS 标准，液化气分离单元属于重大危险源。

3.2. 煤化工典型灾害事故研究

根据该项目的生产状况，整个项目界区内主要有缓冲罐、浮阀塔生产设备及机泵空冷器带点设备，可能发生的危化品事故及后果如下：

- 1) 火灾、爆炸事故

该项目生产过程中所使用的辅助气体均为中压及低压蒸汽，主要产生得产品混合 C4、精丙烷、精丙

烯等为易燃、易爆物质。并且在生产加工过程中,各物料在加工过程中处于高温、高压环境中,当环境温度超过其自燃点时,若因生产设备管道、设施、装置的任何缺陷如涉及施工失误、自动控制失效、工艺参数失控、操作失误、安全设施缺少、腐蚀、检修违章动火、作业场所通风设施不完善、防雷防静电设施不完善、电气设备质量差、选型、安装不当或负荷过载、绝缘老化或损坏、管理或操作不当等均易引发火灾、爆炸事故。

2) 中毒和窒息

该项目涉及的有毒物质有硫化氢,硫化氢为极度危害物质。若设备、管道泄漏、通风设施不完善、有毒有害气体浓度自动检测报警仪失效、检修设备未经置换、个人防护不当、违章作业等均可能发生中毒和窒息事故。

此外,进入储罐开展清洗、检修作业时,如未对储罐进行清洗置换并取样分析合格,未采取相应的安全防护措施,未办理设备内作业票证,作业时监护脱岗,有发生人员中毒、窒息的危险。

3) 灼烫

浮阀塔,再沸器,介质管线等都是高温设备,若设备、管道不保温或保温层损坏,人体触及裸露的高温设备、管道,有被烫伤的危险;因操作失误、超温、超压等原因造成高温设备或管道破裂,高温物料喷溅,触及人体,可能烫伤作业人员。

4) 压力容器爆炸事故

该项目中的压力容器和压力管道较多,且部分压力较高,压力容器、压力管道超压而安全阀故障不能及时泄压时,就可能发生压力容器、压力管道爆炸。

该化工装置主要产物是混合 C4,精丙烷和精丙烯,对于混合 C4,精丙烷和精丙烯等极易挥发易燃易爆气体在进行生产过程中,有可能发生泄漏事故。一旦大量的液体介质发生泄漏进入到常压常温环境下,一旦泄漏液体蒸发量较大,大量挥发的蒸气在液池上面会形成蒸气云,在扩散过程中若遇到点火源,就极有可能发生闪火或蒸气云爆炸(VCE),最终判断该化工装置界区容易发生的事故为蒸气云爆炸事故。

4. 生产装置区典型灾害动态推演

化工生产由于建设规模大、装置管道密集,危险源集中化,所以化工生产安全事故时有发生。蒸气云爆炸是化工园区最为典型的事故类型,如何对化工生产进行合理规划,预防和控制潜在的重特大事故,已成为各级政府、建设者与管理者日益关心、关注和需要解决的核心问题。本节先对生产装置事故发生原因进行分析,然后利用 Bow-tie 模型和贝叶斯网络建立化工园区事故扩展模型,通过定性定量相结合的方法分析建立的模型,实现了对事故的扩展后果的预测,实现了对事故的情景推演。

4.1. 化工装置区火灾爆炸事故情景演化分析

4.1.1. 火灾爆炸事故的 Bow-Tie 模型建立

Bow-tie 分析法(也称为“蝴蝶结分析法”)是基于“三角模型”(Tripod Beta Models)以蝴蝶结的方式最初进行风险分析。最早由澳大利亚昆士兰大学提出,主要用于风险评估、风险管理及事故调查分析、风险审计等。

在 Bow-tie 分析模型中,以可能会发生的风险事件为核心,向前分析导致其发生的可能原因(故障树分析),向后分析风险事件发生后可能的次生事故分析(事件树分析),再针对性地设置屏障进行防控。应用在此煤化工企业风险评估中,能更好地评估化工厂中各类危险源可能发生的事故以及可能引起的次生事故,在事故发生前做好预防措施以降低事故发生的可能性,发生事故后及时通过相关补救措施进行控制治理,降低事故的影响程度。其模型图如图 1 所示。

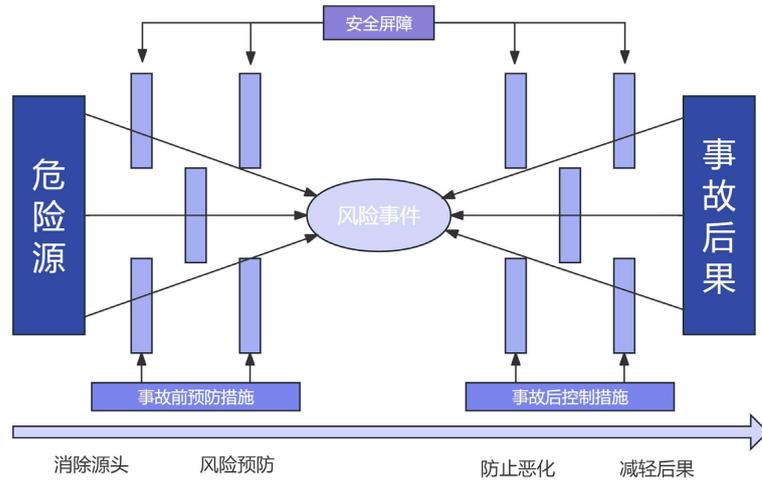


Figure 1. Bow-tie model diagram
图 1. Bow-tie 模型图

4.1.2. 贝叶斯网络预测事故原理

贝叶斯网络(BN) 1988年由 Judea Pearl 提出,为基于概率推理的图形化网络,是目前不确定知识表达和推理领域最有效的理论模型之一。贝叶斯网络由有向无环图(DAG)和条件概率表(CPT)组成。其中 DAG 由变量节点及连接节点的有向边构成。节点代表随机变量(如根事件,事故后果),其中根节点是指没有紧前工作的节点,中间节点是指既有紧前工作又有紧后工作的节点,叶节点是指没有紧后工作的节点。节点间的有向边代表了节点间的互相关系(由父节点指向子节点),条件概率表达关系强度,无父节点的用先验概率进行信息表达。贝叶斯网络图如下图 2 所示。

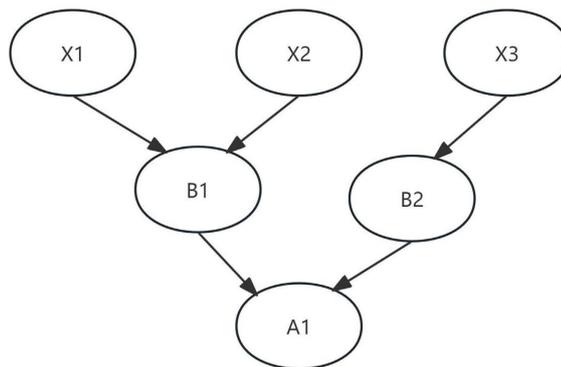


Figure 2. Bayesian network model diagram
图 2. 贝叶斯网络模型图

X_1 、 X_2 、 X_3 称为根节点, B_1 、 B_2 为中间节点, A_1 为叶节点。同时 X_1 、 X_2 为 B_1 的父节点, X_3 为 B_2 的父节点。贝叶斯定理的基本公式为:

$$P(X_i|A) = \frac{P(X_i)P(A|X_i)}{P(A)}$$

其中, X_i 为节点 A 发生的某个前提条件, $P(X_i|A)$ 表示在节点 A 发生的情况下, X_i 发生的概率。对于贝叶斯网络,若节点 $x_j (j=1,2,\dots,m)$ 为节点 y_i 的同级父节点,且 x_j 之间条件独立,则有:

$$P(y_i) = \sum_j^m P(x_j) P(y_i | x_j)$$

借助贝叶斯网络及相关算法,可进行三种推理:一是风险预测。在已知根节点(事件)先验概率和节点间条件概率前提下,预测风险事件及结果事件的发生概率。二是诊断性推理。在风险事件发生的情况下,推断根事件发生概率,用于事故发生后的原因分析与查找。三是重要性分析。计算各根事件对风险事件影响程度,找出关键根事件。

4.2. Bow-Tie 模型到贝叶斯网络的转换

基于该化工事故的复杂性,后果的严重性及贝叶斯网络的层次关联性,将 Bow-tie 模型转换为贝叶斯网络,预测可能发生的事故,既可以分析事故原因,又可以预测事故扩展后果,体现出事故从事故原因到事故发生到事故扩展的整个过程。并综合事故起因的概率及条件概率实现预测后果,在今后的管理中可以进行事故的提前预防以及控制。Bow-tie 模型到贝叶斯网络的转换包括事故树的转化和事件树的转化。转换流程图如图 3 所示:

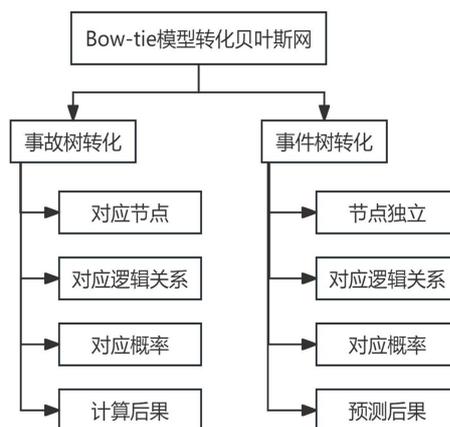


Figure 3. Flowchart of bow-tie model transformation into Bayesian networks

图 3. Bow-tie 模型转化贝叶斯网流程图

若要求顶事件发生的概率,需要先求出事故树的最小径集或最小割集并得到其概率,进而计算出顶事件的概率,计算过程复杂;但在贝叶斯网络模型中,只需要各根节点的先验概率及节点间的条件关系,依据条件概率公式或贝叶斯网络图求得顶事件的发生概率,结合事故扩展影响因素的发生可能性,得出事故扩展后果的发生概率。

通过上述方法,将 Bow-tie 模型转化为贝叶斯模型,组建了煤化工园区内发生的火灾和爆炸两大类事故后果扩展模型,通过该模型实现对化工园区的事故进行事故情景推演,达到预测事故的功能。

4.3. 蒸气云爆炸事故推演

本节以装置区蒸气云爆炸事故为目标情景,具体针对管道或球罐存在的蒸气爆炸事故,管道腐蚀或球罐破裂导致丙烷、丙烯等气体发生泄漏导致的蒸气云爆炸,该类型事故对周围电力设施安全运行及人员安全都会造成严重威胁。运输环境为常温高压环境,事故位置处于生产装置区,通过贝叶斯网络推演事故发生情况。

蒸气云爆炸事故贝叶斯网络扩展

由于装置区内储罐的丙烯极易挥发，如果储罐由于外界原因发生破裂，丙烯泄漏出来后，由于存储压力变化而挥发成气体，与空气充分混合形成预混云，如果被点火源点燃，则会发生蒸气云爆炸。如果没有风的存在，气体爆炸冲击波呈环形向外扩散，而且若混合气体内存在硫化物等次生灾害气体，则影响范围更大。

将被监测传感器、设备老化以及人员干扰等多种情况因素，通过 Bow-tie 模型分析丙烯泄漏后形成蒸气云爆炸事故的发生原因见图 4，分析蒸气云爆炸事故可能导致的事故后果如表 2 所示。将蒸气云爆炸事故 Bow-tie 模型转换为贝叶斯网络模型，赋予事故原因根节点概率，可得出中间事故与扩展后果发生的概率。

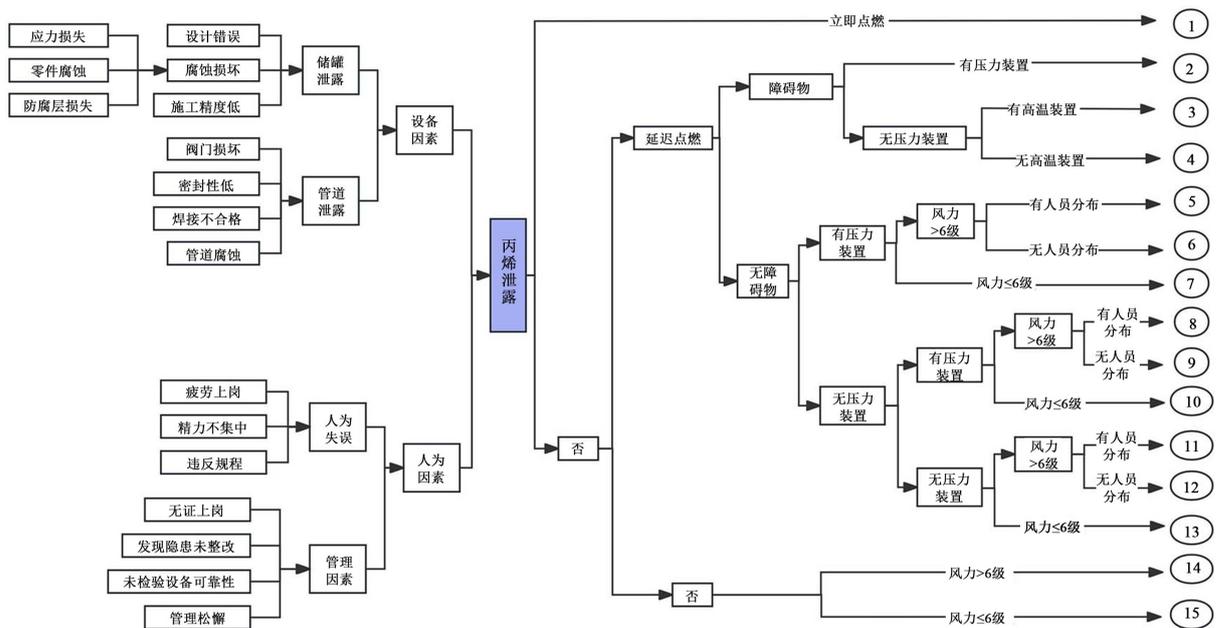


Figure 4. Extended Bow-tie diagram of propylene vapor cloud explosion accident

图 4. 丙烯蒸气云爆炸事故扩展 Bow-tie 图

Table 2. Expansion of consequences of propylene vapor cloud explosion accident

表 2. 丙烯蒸气云爆炸事故后果扩展

序号	后果	序号	后果
1	丙烯立即点燃导致储罐内发生 BLEVE 扩展事故	9	爆炸范围内的易燃有毒储罐可能爆炸，可能引起下风向的人员中毒
2	屏障的存在削弱爆炸威力，可能导致丙烯储罐影响范围内的易燃储罐发生爆炸	10	爆炸范围内的甲醇储罐可能爆炸，气体呈圆形向外扩散引发人员中毒
3	屏障的存在会削弱爆炸威力，爆炸范围内包含具有毒性的甲醇储罐，可能导致甲醇罐破	11	如果风向与防护目标的方向一致，冲击波沿风向对防护目标构成威胁
4	屏障的存在会削弱爆炸威力，储罐影响范围内不包含危险性较高的易燃以及有毒储罐	12	爆炸冲击波沿风向对下风向的储罐以及装置构成威胁
5	爆炸范围内的甲醇储罐可能爆炸，如果风向与重要防护目标的方向一致可能导致防护目标后果扩展	13	丙烯蒸气云爆炸冲击波呈环形向外扩散

续表

6	爆炸范围内的甲醇储罐可能爆炸, 由于风的存在导致冲击波呈月牙形状扩散, 下风向受损严重	14	泄漏气体未被点燃, 气体沿风向向下风向扩散, 存在爆炸隐患
7	爆炸范围内的甲醇储罐可能爆炸, 引发二次爆炸, 造成事故后果的升级	15	泄漏气体未被点燃, 气体呈环形扩散, 存在爆炸隐患
8	爆炸范围内的易燃有毒储罐可能爆炸, 可能引起防护目标内的大量人员中毒		

由蒸气云爆炸贝叶斯模型后果扩展图可以得出, 各扩展后果发生概率依次为 8、7、1、5、3、12……。其中气体泄漏下蒸气燃爆导致后果 8 发生的可能性最大, 发生此类后果的条件是事故源发生储罐或管道泄漏后立即或延迟发生点燃, 造成蒸气云燃爆事故, 推动了有毒有害气体在空气中的扩散, 造成了大量人员中毒, 因此为了减少有毒有害气体对人员的影响, 工厂内需配备必要的防毒面具与应急捕消剂, 及时降低有害气体泄漏源浓度; 扩展后果 7 即引燃甲醇储罐爆炸的可能性次于后果 8, 由于甲醇储罐位于蒸气云爆炸的冲击波影响范围内, 且甲醇高度易燃, 一旦甲醇储罐发生泄漏, 引起的后果比较严重, 造成事故后果等级升级, 因此需要在储罐之间增加安全屏障或禁止与点火源接触; 沸腾液体扩展蒸气爆炸事故即扩展后果 1 发生的可能性同样较高, 发生此类后果的条件是与点火源接触并立即点燃, 泄漏的液体未及时挥发, 形成 BLEVE 事故, 因此为了预防后果 1, 需要防止泄漏液体与点火源接触; 扩展后果 5 即顺风侧存在被防护目标, 则爆炸冲击波会沿风向扩散至防护目标, 引起大量的人员伤亡, 对防护目标的安全构成重要威胁, 预防此类后果时需要掌握当地的主导风向, 在下风向不允许建设脆弱性相对较高的装置; 扩展后果 3 由于安全屏障的存在, 所以发生的概率低于后果 7, 安全屏障的存在会削弱爆炸产生的冲击波威力, 对蒸气云爆炸后果起到削弱的作用, 降低了甲醇罐破裂的概率; 扩展后果 12 与扩展后果 5、3 类似, 都存在由于风向原因, 造成附近储罐的破裂影响, 应避免高危类型储罐建造位置过于接近。

其他的事故扩展后果发生概率较低, 本文未展开分析, 综合已经分析的事故后果可以得出, 丙烯储罐或管道的蒸气云爆炸事故形成的爆炸冲击波具有较强的危害性, 储罐与管道发生破裂以后如果遇到点火源发生立即点燃或延迟点燃, 都会导致爆炸发生, 对于此类事故如果未被点火源点燃, 则后果的严重程度将会急剧降低, 因此需要重点预防与点火源的接触; 其次需要加强安全屏障的建设, 安全屏障可以有效削弱爆炸冲击波强度, 降低后果的严重程度; 再次从本质安全的角度出发, 需要减小外界因素对储罐的干扰, 降低储罐破裂的概率, 防止液体泄漏; 最后, 应增加对管道接口与储罐进出口的日常封存性检查, 减少由于设备老化造成的泄漏风险, 进而达到预防爆炸事故发生的目的。

5. 蒸气云爆炸事故应急决策方案

针对化工装置区存在的蒸气云爆炸事故风险, 本节提出了基于蒸气云爆炸模拟情景决策内容与蒸气云爆炸事故通用预防方案分别如表 3 与表 4 所示。

Table 3. Decision content of steam cloud explosion accident scenario

表 3. 蒸气云爆炸事故情景决策内容

情景概述	油气储罐或管道内发生泄漏导致蒸气云爆炸, 该环境为常温高压环境, 大量液态丙烷、丙烯从泄漏口喷出, 并且还伴随着剧毒性气体, 发生蒸气云爆炸, 火势立体燃烧, 风力 2~3 级, 天气晴朗, 消防设施完好有效, 水量充足, 道路正常, 位于工业园区。
------	---

续表

第一层级 应急决策	应急目标	控制火势蔓延，保护毗邻储罐及装置安全。
	应急协同	向上级汇报请求增援，并要求石化专家到场指导，联合供水、交通、安监、环保等社会力量到场。
	应急保障	调运大功率供水车辆及有毒气体捕消剂到场。
第二层级 应急决策	应急主要方面	防止二次爆炸，尽快堵漏，冷却管道及毗邻装置。
	行动任务分解	险情处置、装置冷却、有毒气体监测、现场警戒。
	应急方法措施	1) 在中控室对装置进行关阀断料操作，并采用混凝土浇筑的方法对储罐与管道进行堵漏；2) 公司消防队 1 辆捕消车和专 2 辆泡沫车、1 辆举高车从装置两侧实施不间断冷却；3) 另 2 辆泡沫车负责对储罐与管道实施吹扫及冷却，防止产生新的泄漏点；4) 其余车辆负责控制地面流淌火蔓延。
第三层级 应急决策	应急力量部署	一对人员负责现场险情处置；一队人员负责现场警戒；剩下的消防力量分别从着火装置的两侧和着火管道一侧负责冷却抑爆。
	危险区域警戒	着火装置 200 m 范围为重危险区，周围罐区 500 m 为中危险区，周围实行分级管制。

Table 4. Vapor cloud explosion accident prevention programme
表 4. 蒸气云爆炸事故预防方案

序号	危害	预防方案
1	丙烯立即点燃导致储罐内发生 BLEVE 扩展事故	在储罐之间增加安全屏障，防止泄漏液体与点火源接触，避免高危储罐之间安装距离过近
2	屏障的存在削弱爆炸威力，可能导致丙烯储罐影响范围内的易燃储罐发生爆炸	避免高危储罐之间安装距离过近，提高管道接口与储罐出入口人工监测频率，减少设备老化对蒸气云爆炸的风险
3	屏障的存在会削弱爆炸威力，爆炸范围内包含具有毒性的甲醇储罐，可能导致甲醇罐破	避免高危储罐之间安装距离过近，提高管道接口与储罐出入口人工监测频率，减少设备老化对蒸气云爆炸风险
4	屏障的存在会削弱爆炸威力，储罐影响范围内不包含危险性较高的易燃以及有毒储罐	提高管道接口与储罐出入口人工监测频率，减少设备老化对蒸气云爆炸的风险
5	爆炸范围内的甲醇储罐可能爆炸，如果风向与重要防护目标的方向一致可能导致防护目标后果扩展	在储罐之间增加安全屏障，防止泄漏液体与点火源接触，避免高危储罐之间安装距离过近；及时掌握当地的主导风向，在下风向不允许建设脆弱性较高的装置
6	爆炸范围内的甲醇储罐可能爆炸，由于风的存在导致冲击波呈月牙形状扩散，下风向受损严重	及时掌握当地的主导风向，在下风向不允许建设脆弱性相对较高的装置
7	爆炸范围内的甲醇储罐可能爆炸，引发二次爆炸，造成事故后果的升级	在储罐之间增加安全屏障，防止泄漏液体与点火源接触，避免高危储罐安装距离过近；提高管道接口与储罐出入口人工监测频率，减少设备老化对蒸气云爆炸风险
8	爆炸范围内的易燃有毒储罐可能爆炸，可能引起防护目标内的大量人员中毒	在储罐之间增加安全屏障，防止泄漏液体与点火源接触，避免高危储罐之间安装距离过近；配备必要的防毒面具与应急捕消剂，及时降低有害气体泄漏源浓度
9	爆炸范围内的易燃有毒储罐可能爆炸，可能引起下风向的人员中毒	在储罐之间增加安全屏障，防止泄漏液体与点火源接触，避免高危储罐之间安装距离过近；及时掌握当地的主导风向，在下风向不允许建设脆弱性相对较高的装置；配备必要的防毒面具与应急捕消剂，及时降低有害气体泄漏源浓度

续表

10	爆炸范围内的甲醇储罐可能爆炸, 气体呈圆形向外扩散引发人员中毒	在储罐之间增加安全屏障, 防止泄漏液体与点火源接触, 避免高危储罐之间安装距离过近; 配备必要的防毒面具与应急捕消剂, 及时降低有害气体泄漏源浓度
11	如果风向与防护目标的方向一致, 冲击波沿风向对防护目标构成威胁	及时掌握当地的主导风向, 在下风向不允许建设脆弱性相对较高的装置
12	爆炸冲击波沿风向对下风向的储罐以及装置构成威胁	及时掌握当地的主导风向, 在下风向不允许建设脆弱性相对较高的装置
13	丙烯蒸气云爆炸冲击波呈环形向外扩散	在储罐之间增加安全屏障, 防止泄漏液体与点火源接触, 避免高危储罐之间安装距离过近
14	泄漏气体未被点燃, 气体沿风向向下风向扩散, 存在爆炸隐患	防止泄漏液体与点火源接触, 避免高危储罐之间安装距离过近
15	泄漏气体未被点燃, 气体呈环形扩散, 存在爆炸隐患	防止泄漏液体与点火源接触, 避免高危储罐之间安装距离过近

6. 结论

1) 基于欧盟 ARAMIS 风险判别标准对该装置进行了危险源的风险识别, 确定了该装置为的重大危险源, 并结合周边情况及典型事故研究, 确定了装置主要可能发生的事故为蒸气云爆炸事故。

2) 将 Bow-tie 模型与贝叶斯网络模型相结合, 将 Bow-tie 模型的直观、定性、高度可视化以及贝叶斯网络的精确推理、定量分析的优点相融合, 利用专家评价方法, 赋予各子模型条件概率与根节点先验概率, 得到了影响因素至重大风险概率之间的发生过程与影响等级, 确定了事故扩展后果的发展概率。

3) 围绕其中主要扩展后果进行了具体案例分析, 最终提出了对应事故的情景决策内容与全扩展后果的事故预防方案, 为煤化工园区灾害事故应急决策提供有益参考。

参考文献

- [1] 史达, 张建波, 杨晨年, 等. 煤气化灰渣脱碳技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 1-10.
- [2] 古文哲, 朱磊, 刘治成, 等. 煤矿固体废弃物流态化浆体充填技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 83-91.
- [3] 杨洋洋, 谢谚. 石化企业环境风险评估及管控研究[J]. 安全、健康和环境, 2020, 20(10): 30-33.
- [4] Stawczyk, J. (2003) Experimental Evaluation of LPG Tank Explosion Hazards. *Journal of Hazardous Materials*, **96**, 189-200.
- [5] 姜卉, 侯建盛. 基于情景推演与网络图技术的应急处置模式研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(24): 21-32.
- [6] 刘铁民. 应急预案重大突发事件情景构建——基于“情景-任务-能力”应急预案编制技术研究之一[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(4): 5-12.