

李文, 叶义成, 王其虎, 等. 矿井坠罐事件高风险因素风险辨识评估模型[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 64–70. [LI Wen, YE Yicheng, WANG Qihu, et al. Risk identification and assessment model for high risk factors of accidents of cage crashing in mine [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 64–70. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.013.]

## 矿井坠罐事件高风险因素风险辨识评估模型<sup>\*</sup>

李文<sup>1</sup>, 叶义成<sup>1,2</sup>, 王其虎<sup>1</sup>, 王先华<sup>3</sup>, 胡南燕<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430081; 2. 湖北省工业安全工程研究中心, 湖北武汉 430081; 3. 中钢集团武汉安全环保研究院, 湖北武汉 430081)

**摘要:**为明确坠罐事故中的致灾物、承灾体和受灾面, 研究将高风险设备、工艺、场所、物品、作业作为坠罐事件风险点的重点防控对象, 建立了坠罐事件风险清单。以风险固有属性与风险状态为依据, 构建了基于设备(Machine)、工艺(Method)、人员(Man)、作业(Media)、环境(Environment)影响的风险“4M+E”严重性函数和基于技术(Engineering)、教育(Education)、法制(Enforcement)、安全文化(Culture)要素的风险“3E+C”可能性函数, 并提出了风险修正指标。基于博弈理论思想克服传统求权重值的主观、客观性, 最终构建出坠罐事件高风险评估数学模型。最后, 以罐笼提升系统为例对其进行评估, 结果证明评估模型有助于风险管理者查找矿井提升系统存在的薄弱环节, 是矿井提升系统灾害风险辨识与评估的有效手段。

**关键词:** 风险辨识; 灾害决策; 风险评估; 博弈论; 事故致因理论

**中图分类号:** C931; X45; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)01-0064-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.01.013

矿井提升系统是连接地面与井下的重要通道, 提升系统在技术层面上具有脆弱性、隐蔽性、复杂性等特点, 若技术管理不到位, 将导致一定规模的人员伤亡或经济损失<sup>[1]</sup>。矿井罐笼提升系统主要由提升机卷筒、井架和天轮、钢丝绳、罐笼及其附属设施、安全保护装置等矿用提升设备组成<sup>[2]</sup>。矿井罐笼承员数跟井筒直径大小有关联, 一般井筒直径越大, 罐笼的设计容量也越大, 反之亦然, 故因罐笼提升系统失效一次引发死伤数十人、数百人的事故并不常见, 但造成3人及以下死亡的小事件却非常多。灾害发生的主要原因包括钢丝绳断裂、过卷、连接装置失灵、操作不当等。与发达国家相比, 因技术原因产生的灾害发生的起数和严重程度, 我国依然维持在一个很高的水平<sup>[3]</sup>。随着市场对矿产资源需求量的增加, 开采深度不断扩张, 对罐笼提升系统的安全技术要求也逐步加强。可见, 密切关注罐笼提升系统风险大小, 查找系统薄弱环节, 应对技术灾害突出提升系统重点防控部位很有必要。

当前, 将风险发生的可能性及其后果来衡量风险大小已得到普遍认可, 但划分评估对象的界

限仍不是很清晰。其中, 杨涛等<sup>[4]</sup>基于人-机-环-管角度分析致灾物发生的可能性, 从承载体的损失和社会影响程度分析灾害发生的后果, 并结合模糊数学理论最终构建出重特重大事故风险评价模型, 得出风险等级, 而黄宇欣<sup>[5]</sup>继杨涛研究基础上, 引入风险敏感性概念, 从可能性、严重性、敏感性三个角度结合层次分析法建立事故隐患三维风险评价模型; 徐东超等<sup>[6]</sup>则从固有风险频率、事故严重度提出风险评价指标, 并给出相应的指标权重, 将监控与监测措施作为修正系数, 设计出风险评价分级数学模型。可看出多数评价方法也离不开求权重, 而LI等<sup>[7]</sup>在求取权重过程中遇到的计算误差问题给予了分析, 可知并没有一种精确地求解方法来计算权重值。在实际应用中, 不管是主观赋值法, 还是客观赋值法求取权重的方法各有利弊, 并没有统一的固定求解方式, 为避免权重的偏向性误差有必要求取最优权重。基于此, 为突出重点防控部位, 将矿井坠罐事件作为辨识对象, 引入事故致因理论, 找出系统薄弱环节, 构造出风险评估模型。另外, 风险具有动态性, 新时代风险防控与信息传递是否可靠,

\* 收稿日期: 2019-07-10

修回日期: 2019-09-20

基金项目: 国家安全生产重大事故防治关键技术科技项目(hubei-0002-2017AQ)

第一作者简介: 李文(1990-), 女, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事风险辨识评估、灾害应急管理研究。

E-mail: coco316318@163.com

是否影响风险大小,有必要对其探讨,进而为矿山提升系统灾害风险分析提供一套可靠的辨识评估方法。

## 1 矿井坠罐事件高风险因素辨识

先兆辨识方法论认为,如若及时对事故先兆进行防控,就可避免灾害事故<sup>[8]</sup>。同理,做好风险防控的前提就需识别、查找风险源,明确辨识重点防控对象。为超前辨识罐笼提升系统的风险源,引用徐克<sup>[9]</sup>提出的高风险设备、高风险工艺、高风险场所、高风险物品、高风险作业概念,突出重点防控部位突出重点防控部位,导入事故成因理论,将坠罐涉及的高风险设备、工艺、场所、物品、作业作为遏制风险的重点防控对象。文献<sup>[9]</sup>提出的高风险主要针对事故中的致灾物,围绕承灾体、受灾面防护制定控制措施。对罐笼提升系统来讲,致灾物主要来源于升降机操作失误、钢丝绳断裂及安全防护装置失效等,承灾体主要体现在承罐人员及周围相关人员、罐笼及其附属设施等。由此,根据以下辨识特征列出坠罐高风险因素辨识清单(表1)。

(1)高风险设备-载人罐笼。辨识主要以罐笼本质安全化水平来表征。本质安全可理解为固有安全<sup>[10]</sup>,该方法强调即使在误操作或设备故障时也能保证人身和设备的安全,能有效降低事故发生率或事故严重度。

(2)高风险工艺-罐笼提升系统。从系统安全理论层面来看,为保证罐笼提升系统的正常运行,前提就要保证钢丝绳、防坠器、卷筒等设施动作的完好性,才能为安全防护工作提供有利保障。故辨识主要以罐笼提升系统完好性水平来表征。

(3)高风险场所-罐笼及其周边。事故预防强调以人为本,应当重视危险区域及人员密集作业

区人员的工作环境,避免因管理不到位对受灾区域的从业人员健康和生命安全造成威胁。故辨识主要以承罐人员暴露在罐内及其周围的人数来表征。

(4)高风险物品-能量。从能量意外释放理论角度分析,罐笼在坠罐过程中会释放出人们不期望的能量,并转移于人体、设施。故辨识可由罐笼井筒的高度来表征。

(5)高风险作业-作业种类。因工种、操作的特殊性、岗位危险性等,在整个系统中处于重要的地位,其行为的不安全状态易诱发事故。故辨识主要以作业种类数来表征。

## 2 坠罐事件风险评估模型

### 2.1 坠罐事件高风险评估流程

与一般性风险评估一样,风险评估技术的主要步骤包括风险识别、风险分析、风险评价三个层面<sup>[11,12]</sup>。首先,坠罐事件高风险要素风险识别需要基于历史基础资料、典型事故案例等统计分析,按照风险清单进行识别。其次,从高风险清单角度出发对风险发生的可能性以及可能造成的后果给予定性、定量估计和衡量。此外,随着物联网、大数据、人工智能等技术的到来,风险辨识方法也需要结合当下社会发展需要使其在企业各环节中持续更新并完善,为使风险辨识评估更加科学合理,宜当引入相应修正指标,其中高风险管控指标、高风险监测特征指标对风险具有抑制作用,理应抵消部分风险,反之,事故隐患动态指标(风险点失控的次数)、特殊时期指标(气象条件、节假日特殊时期等)、物联网可靠性指标(物联网传输是否及时可靠)会间接促使风险程度增高,影响风险的大小变化,故将其作为风险增长修正指标。最后,由评定结果,制定出切实可行地控制对策。

表1 坠罐事件高风险清单一览表

| 重大风险点  | 高风险要素 | 子要素    | 表征指标      | 指标特征因子         |
|--------|-------|--------|-----------|----------------|
| 矿井坠罐事件 | 高风险设备 | 载人罐笼   | 设备本质安全化水平 | 危险隔离(替代)       |
|        |       |        |           | 故障安全           |
|        |       |        |           | 故障风险           |
|        | 高风险工艺 | 罐笼提升系统 | 工艺设施完好性   | 钢丝绳寿命周期        |
|        |       |        |           | 工艺设施的维保状况      |
|        | 高风险场所 | 罐笼及其周边 | 人员因素      | 提升系统的完好性       |
|        | 高风险物品 | 能量     | 井深        | 人员暴露在危险环境中风险程度 |
|        | 高风险作业 | 特种设备操作 | 种类数量      | 井筒深度等级         |
|        |       | 危险作业   |           | 罐笼升降操作         |
|        |       | 特种作业   |           | 维修作业           |
|        |       |        |           | 竖井/盲竖井提升作业     |

## 2.2 高风险评估计算模型

早期,因对风险的概念并没有形成共识,在风险管理中遇到很多困难。现今通用的风险表述为“不确定性对目标的影响”,2006年这一概念由吕多加等中国代表团在澳大利亚悉尼召开的国际标准组织(ISO)风险管理标准的工作小组会议上首次提出<sup>[13]</sup>。2009年《风险管理—原则与指南》由ISO发布后,国内外也通常将风险以事件后果和发生可能性的组合来表达<sup>[14]</sup>,自此,开启了标准化风险管理的新起点。

风险在一定条件下可转化为隐患、甚至直接转化为事故。目前,针对风险防控的研究还有待完善,主要是针对事故的预防与控制较多,其中著名的“3E”对策早期来源于一句简单的安全标语,后来在此基础上,我国学者陆续将应急(Emergency)、安全评价(Evaluation)也作为预防事故的一个主要角度,所以至今延伸为“4E”对策<sup>[15]</sup>、“5E”对策理论<sup>[16]</sup>,还有学者将安全文化(Culture)融合在以上理论中<sup>[8]</sup>。防控对策理论从侧面凸显了风险出现的机会,由于应急出现在风险之后,而评价处于事态运行之中,故从风险状态角度将“3E+C”理论作为构建坠罐事件风险发生可能性函数的依据。

人们常说的“4M1E”法来源ISO质量管理体系,即人(Manpower)、机(Machine)、料(Material)、法(Method)、环(Environment)被视为现场管理的五大要素。日本学者西岛茂一对连锁反应理论进行深层次分析后提出安全事故发生的“4M”理论分别为人为致因(Man)、设备致因(Machine)、管理致因(Management)、作业致因(Media)。以现场管理要素及事故连锁反应理论为基础有效地揭示了灾害高风险管理理念,不同之处在于表1中五个要素的高风险清单是从事件本身固有属性去分析。从坠罐事件高风险辨识清单可知,设备因素主要考虑本质安全化水平,工艺主要指提升系统附属部件动作的灵敏性,相当于方法、手段,而人员承罐下井在矿山竖井环境中作业本身就构成了风险。故将设备影响、工艺影响、人员影响、环境影响、作业影响作为风险严重性函数的依据,从其固有属性角度构建出风险严重性“4M+E”函数。

另外,风险的不确定性特征同样揭示了对风险处理后可能会产生新的风险,还会修正已有的风险,所以风险是动态的,并非一成不变。受安全控制论原理<sup>[17]</sup>的启发,一些指标存在不安全状态,在某种程度上虽影响风险结果,但不会影响到危险源全局,为此,将风险管控指标、高风险监测特征指标作为风险抵消因子修正指标,将事

故隐患动态指标、特殊时期指标、高风险物联网指标作为风险增长因子修正指标。最终由事故发生的可能性函数与严重度函数、抵消因子措施修正系数、风险因子增大修正系数,构造灾害风险评估模型为:

$$R = \sum_{i=1}^n w_i P_i \times \sum_{i=1}^n w_i L_i \times (M_1 + M_2) \times K_1 \times K_2 \times K_3 \quad (1)$$

式中:  $R$  为风险,该风险是“五高”风险发生的可能性和严重性两个自变量的复合函数,  $n$  为评估指标个数,  $w_i$  为指标权重,  $P$  为可能性函数,且  $P = f(“3E + C”) = f(\text{技术因素, 教育因素, 法制因素, 安全文化因素})$ ,  $L$  为严重性函数,且  $L = f(“4M + E”) = f(\text{设备影响, 工艺影响, 人员影响, 环境影响, 作业影响})$ ,  $M_1$  为高风险管控指标修正系数,  $M_2$  为高风险监测特征指标修正系数,  $K_1$  为体现工艺风险的事故隐患动态指标修正系数,  $K_1 = 1 + p$ , 其中  $p$  为风险点涉及指标的分值;  $K_2$  为特殊时期指标修正系数,  $K_2 = 1 + q$ , 其中  $q$  为风险点在特殊时期指标的分值;  $K_3$  为物联网可靠性指标修正系数,且  $K_3 = 1 + v$ , 其中  $v$  为风险点涉及高风险物联网可靠性指标的分值。

## 2.3 风险指标权重

目前,权值的求取方法较多,其中AHP法、熵权法为最常见主观、客观赋权法<sup>[18-20]</sup>。诸多学者在运用中虽加以改进,但仍不能确定哪种方法求取的权重结果最佳。面对出现多个合理决策方案,如何寻求最大化共同利益,博弈论均衡思想给出了解决方案<sup>[21]</sup>。针对主观、客观赋权法求得的权值均有其合理性,又存在不足,为提高矿井罐笼提升系统赋权的合理性,借鉴博弈论中的纳什均衡思想,能在两者的权重之间寻找一致或妥协,进而为罐笼提升系统赋权提供最优权重。

基于此,研究将AHP法求取的权重  $w_1$  和熵权法求得的权重  $w_2$ ,构造出由这2个权重组成的向量集  $w = \{w_1, w_2\}$ 。将此向量集的所有线性组合表示:

$$w' = \sum_{i=1}^2 \lambda_i w_i^T \quad (2)$$

式中:  $\lambda_i > 0$  为此向量集线性组合系数,  $i = 1, 2$ 。为了找到一组适当的  $\lambda_i$  使  $w_i$  与  $w$  之间的离差最小,特引入博弈论思想<sup>[22]</sup>,即:

$$\min \sum_{i=1}^2 \lambda_i w_i^R - w_j, j = 1, 2 \quad (3)$$

运用矩阵微分求导原则求取合适的线性组合系数  $\lambda_i$ ,对式(3)求一阶偏导数后为:

$$\sum_{i=1}^2 \lambda_i w_j w_i^T = w_j w_j^T \quad (4)$$

求得 $(\lambda_1, \lambda_2)$ , 将其归一化处理可得:

$$\lambda'_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^2 \lambda_i \quad (5)$$

故最终所求各风险指标的综合权重为:

$$w = \sum_{i=1}^2 \lambda'_i w_i^T \quad (6)$$

### 3 罐笼坠罐事件高风险因素评估指标体系

目前, 基于风险概念对风险评估指标体系的研究并不多, 而关于矿井提升系统的研究更少。杨涛<sup>[4]</sup>、黄宇欣<sup>[5]</sup>、徐东超<sup>[6]</sup>等学者在选择指标体系中评估对象并不是很清晰, 风险指标的筛选过程中单一层面考虑了事故隐患致因因素而忽略了风险固有属性特征, 或考虑了固有频率指标而并未形成系统的函数指标体系。为突出重点防控对象, 第1节中明确提出将高风险设备、工艺、场所、物品、作业作为提升系统重点防控对象, 在表1风险清单的基础上将风险固有属性结合“4M + E”影响因素将坠罐事件提升系统按照设备、工艺、人员、环境、作业五类风险属性给出了如表2所示

严重性指标体系。在风险管理术语中风险发生的可能性也称风险出现的机会或发生的概率<sup>[14]</sup>, 结合防控对象从“3E + C”因素将坠罐事件提升系统按照技术、教育、法制、安全文化四类风险状态梳理出如表3所示的风险发生可能性指标。

采用专家打分法权衡评估标准分值<sup>[23]</sup>, 为了使判断数据更具可信度, 邀请10位教育背景、工龄、实践经验等评估能力相当的专家对坠罐事件高风险指标分别进行打分, 引入AHP法、熵权法分别对专家打分结果求取权重, 随后运用博弈论为罐笼提升系统赋权提供最优权重, 结果见下表。

随着新时代新技术不断涌现, 对风险的修正很有必要。WU<sup>[24]</sup>基于新时代发展需要将“信息流”的事故模型纳入事故致因中, 并提出事故致因因素除人-机-环-管外, 还应考虑资源和信息因素。风险辨识过程中不应忽略资源合理利用所控制的危害及信息传递失误所带来的危害, 若日常风险管理中监测、控制措施等资源合理支配对风险起到抑制作用, 理应消除部分风险, 故给出了如表4所示的修正判定标准; 在特殊阶段、信息系统的传递会引起风险波动, 并给出了如表5所示的风险增长修正指标判定标准。

表2 坠罐事件高风险严重性指标因素及标准

| 评估对象    | 风险要素  | 评估指标        | 表征指标描述                  | 分值 | $w_1$ | $w_2$ | $w$   |
|---------|-------|-------------|-------------------------|----|-------|-------|-------|
| 后果严重性指标 | 高风险设备 | 载人罐笼本质化安全水平 | 罐笼出现卡槽、彻底失重或安全门损坏       | 7  | 0.046 | 0.158 | 0.152 |
|         |       |             | 罐笼常出现短暂性失重, 无安全门        | 5  |       |       |       |
|         |       |             | 载人罐笼连锁装置设计不合理           | 3  |       |       |       |
|         |       |             | 载人罐笼联锁装置齐全完好            | 1  |       |       |       |
|         | 高风险工艺 | 工艺设施完好性     | 钢丝绳不在寿命范围内              | 7  | 0.145 | 0.025 | 0.031 |
|         |       |             | 在寿命周期内                  | 1  |       |       |       |
|         |       |             | 工艺设施未按照规范定期养护           | 5  |       |       |       |
|         |       |             | 工艺设施按照规范定期养护            | 1  |       |       |       |
|         |       |             | 超速、过卷、防坠等辅助设施只要有一件检测不过关 | 7  | 0.144 | 0.117 | 0.119 |
|         |       |             | 超速、过卷、防坠等辅助设施基本完好       | 1  |       |       |       |
|         | 高风险场所 | 罐体内作业人员     | $\geq 30$ 人             | 7  | 0.208 | 0.038 | 0.047 |
|         |       |             | $[10, 30)$ 人            | 5  |       |       |       |
|         |       |             | $[3, 10)$ 人             | 3  |       |       |       |
|         |       |             | $< 3$ 人                 | 1  |       |       |       |
|         | 高风险物品 | 井筒深度        | $\geq 800$ m            | 7  | 0.050 | 0.173 | 0.167 |
|         |       |             | $[300, 800)$ m          | 5  |       |       |       |
|         |       |             | $[10, 300)$ m           | 3  |       |       |       |
|         |       |             | $< 10$ m                | 1  |       |       |       |
|         | 高风险作业 | 作业种类        | 罐笼升降操作                  | 3  | 0.172 | 0.138 | 0.140 |
|         |       |             | 维修作业                    | 3  |       |       |       |
|         |       |             | 竖井提升作业                  | 5  |       |       |       |

注: 运用AHP法基于高风险要素相对于评估对象求得的权重值 $w_1$ , 同理, 运用熵权法求得的权重值 $w_2$ , 而博弈论思想求得的权重值 $w$ 。

表 3 坠罐事件高风险可能性指标因素及标准

| 评估对象  | 风险要素                | 评估指标               | 表征指标描述                           | 分值                        | $w_1$ | $w_2$ | $w$   |                                |       |       |       |       |
|-------|---------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 可能性指标 | 高风险设备               | 风险技术防控难易程度         | 难以控制                             | 5                         | 0.025 | 0.062 | 0.027 |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 容易控制                             | 1                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     | 技术成熟度              | 在实施技术上观察到技术故障                    | 7                         | 0.023 | 0.090 | 0.027 |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 在安全应用上不能拥有得到证实和公认的成熟技术,并且发生过事故   | 5                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 在安全应用上不能拥有得到证实和公认的成熟技术,但几乎未发生过事故 | 3                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 在安全方面应用得到证实和公认的成熟技术              | 1                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 高风险工艺                            | 工艺技术安全程度                  |       |       |       | 辅助设施存在重大缺陷或装备带病运行              | 7     | 0.120 | 0.173 | 0.123 |
|       |                     | 辅助设施老化,或超负荷运行      |                                  |                           | 5     |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     | 辅助设施的缺陷不影响安全       |                                  |                           | 3     |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     | 辅助设施无设计、安装等缺陷,安全运行 |                                  |                           | 1     |       |       |                                |       |       |       |       |
|       | 高风险场所               | 技术匹配程度             | 辅助设施不匹配                          | 5                         | 0.050 | 0.259 | 0.062 |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 辅助设施完好匹配                         | 1                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     | 技术灵敏程度             | 辅助设施制动不灵敏                        | 7                         | 0.288 | 0.127 | 0.278 |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 辅助设施制动灵敏可靠                       | 1                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     | 安全文化因素             | 承罐人员行为粗鲁,在罐内随意跳动等                | 5                         | 0.169 | 0.024 | 0.16  |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 承罐人员行为举止文明                       | 1                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 同期作业班组人员频繁出现在罐笼内,罐内暴露超过5次        | 5                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 同期作业班组人员加班出现在罐笼内,罐内暴露3~4次        | 3                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     | 高风险物品              | 安全法制因素                           | 同期作业班组人员正常出现在罐笼内,罐内暴露1~2次 | 1     | 0.085 | 0.041 | 0.082                          |       |       |       |       |
|       |                     |                    |                                  | 井筒的筒口高度不符合设计规范            | 5     |       |       |                                | 0.036 | 0.173 | 0.044 |       |
|       | 井筒的筒口高度符合设计规范       |                    |                                  | 1                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       | 井筒罐道变形严重,易受地表水倒灌威胁等 |                    |                                  | 7                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       | 安全法制因素              |                    | 井筒布局符合法规要求,周边有影响井筒升降的活动,如爆破等     | 3                         | 0.055 | 0.019 | 0.052 |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 井筒布局符合法规要求,周边无干扰活动               | 1                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     |                    | 高风险作业                            | 安全教育因素                    |       |       |       | 生产副经理、维修工或信号工、新职工等专职人员未经培训直接上岗 | 7     | 0.042 | 0.024 | 0.041 |
|       |                     |                    |                                  |                           |       |       |       | 专职人员培训合格,但未取得相关证书              | 3     |       |       |       |
|       | 专职人员培训合格且取得相关证书     |                    |                                  |                           | 1     |       |       |                                |       |       |       |       |
|       | 安全文化因素              |                    |                                  | 职工与专职人员安全理念淡薄             | 7     | 0.108 | 0.008 | 0.102                          |       |       |       |       |
|       |                     | 职工与专职人员安全理念一般      |                                  | 5                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |
|       |                     | 经常进行安全相关培训,安全理念强   |                                  | 1                         |       |       |       |                                |       |       |       |       |

表 4 坠罐事件风险抵消因子修正评估表

| 评估对象    | 评估内容描述                       | 分值  |
|---------|------------------------------|-----|
| 监测措施 M1 | 无完善的监测监控措施或被监测到的概率小于10%      | 0.5 |
|         | 高于50%的事故风险可能被监测到             | 0.3 |
|         | 风险范围内基本都能被监测到                | 0.1 |
| 控制措施 M2 | 未落实防控措施,且安全标准化水平较低或不合格       | 0.5 |
|         | 有减轻后果的应急措施,包括警报系统;安全标准化等级为二级 | 0.3 |
|         | 有行之有效的控制措施;安全标准化等级为一级        | 0.1 |

表 5 坠罐事件风险增大修正指标评估表

| 评估对象     | 评估内容描述  | 分值  |
|----------|---|-----|
| 事故隐患动态指标 | 罐笼提升设备故障运行超过 1 天、一周内出现 3 次及以上故障或人员操作违章次数超过 3 次及以上 | 0.5 |
|          | 罐笼提升设备故障次数低于 3 次或人员操作违章次数低于 3 次                   | 0.3 |
|          | 罐笼提升设备基本未出现过故障                                    | 0.1 |
| 特殊时期指标   | 汛期对井筒影响较大或节假日安全检查不过关                              | 0.5 |
|          | 汛期对井筒影响较小或节假日安全检查发现小问题并及时整改                       | 0.3 |
|          | 汛期对井筒无影响或节假日安全检查未发现问题                             | 0.1 |
| 物联网可靠性指标 | 物联网预警信息传输迟钝或连接不可靠                                 | 0.5 |
|          | 物联网预警信息传输速度一般，基本正常                                | 0.3 |
|          | 物联网预警信息传输及时可靠                                     | 0.1 |

表 6 坠罐事件风险等级分级判定表

| R 值          | 风险等级     |
|--------------|----------|
| $R > 18$     | 一级(极其危险) |
| $9 < R < 18$ | 二级(高度危险) |
| $3 < R < 9$  | 三级(显著危险) |
| $R \leq 3$   | 四级(一般危险) |

表 7 实例应用分析表

| 序号   | 安全出口名称 | 不同时期 |      |      |      |         |
|------|--------|------|------|------|------|---------|
|      |        | 罐笼状态 | 新建时期 | 安全月时 | 修罐前期 | 钢丝绳更换前期 |
| 1#矿井 | 罐笼竖井   | 风险等级 | 四级   | 三级   | 二级   | 一级      |
| 2#矿井 | 罐笼竖井   | 风险等级 | 四级   | 四级   | 三级   | 二级      |

在风险评定中，将风险分析的结果与风险判定准则进行比较，判定其是否可接受，以便及时采取防控对策。结合 ALARP 原则，专家将坠罐提升系统风险等级划分如表 6 所示的判定表。

4 模型应用

建立高风险因素灾害风险辨识评估模型对预防矿井提升系统潜在的技术灾害具有重要的意义。该模型适用于安全检查、施工作业之前，即适用于修罐、修井、提升作业等高风险预控前，由相关专业人员根据相应标准事先计算出风险等级，找出薄弱环节，达到实现风险防控的目的。下面选取湖北省内 2 个矿不同时期竖井罐笼提升系统风险排查情况为样本进行模拟，依照步骤：第一步，参照表 1 整理坠罐事件风险辨识清单，依照表 2 ~ 5 查找风险严重性与发生风险可能性及修正指标，找到对应指标的权重与标准分值；第二步，将各对应权重与分值带入式(1)计算出坠罐风险值大小，由表 6 判定出 2 个矿不同时期风险值汇总结果见表 7。

最后，据调研资料显示，在不同时期风险排查时遇到的情况与该风险模拟结果相吻合，各阶段在整顿前期确实存在坠罐危险，也表明发生坠罐事故是早有先兆的。因此，该模型有助于查找提升系统存在的薄弱环节，有助于矿山企业针对不同风险等级展开不同的安全技术整改对策。

5 结论

(1)围绕致灾物、承灾体和受灾面从高风险设备、高风险工艺、高风险物品、高风险场所、高风险作业引发风险的根源梳理出了坠罐高风险因素风险清单，以风险固有属性预测为基础，旨在为相关应急决策部门进行减灾防灾提供理论依据。

(2)基于事故致因理论与灾害风险防控对策理论，以风险固有属性分析为基础构建了“4M + E”严重性函数，由风险发生可能出现的状态构建了“3E + C”可能性函数，并综合考虑以风险抵消因子、风险增长因子作为修正系数；同时采用主、客观博弈论计算组合权重，最终建立了高风险因素风险评估模型。

(3)以不同时期矿井罐笼提升系统状态为例，应用构建的灾害风险评估模型对各个阶段内潜在的风险状态给予评估，结果表明该灾害风险评估模型评估结果能很好地拟合实际风险状态。研究不但对矿井提升系统在技术整改方面有一定的指导作用，对化工、冶金等行业灾害风险预测也具有借鉴意义。

参考文献：

[1] YU H Y, Khan F, Veitch B. A flexible hierarchical bayesian modeling technique for risk analysis of major accidents [J]. Risk

- Analysis, 2017, 37(9): 1668–1682.
- [2] 曹国华, 朱真才, 彭维红, 等. 缠绕提升矿车进出罐笼过程钢丝绳耦合振动行为[J]. 煤炭学报, 2009(5): 702–706.
- [3] WANG B, WU C, HUANG L, et al. Prevention and control of major accidents (MAs) and particularly serious accidents (PSAs) in the industrial domain in China: Current status, recent efforts and future prospects [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 117(7): 1–11.
- [4] 杨涛, 许亚平. 重特大事故风险评价模型的研究[J]. 中国矿业, 2013(7): 18–21.
- [5] 黄宇欣. 基于风险的事故隐患分级模型研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [6] 徐东超, 罗云, 卢成, 等. 石油井下作业井喷风险预警分级模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(3): 156–160.
- [7] LI W J, LIANG W, ZHANG L B, et al. Performance assessment system of health, safety and environment based on experts' weights and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35(8): 95–103.
- [8] 王秉. 事故防控的方法论[J]. 现代职业安全, 2017(7): 37–37.
- [9] 徐克, 陈先锋. 基于重特大事故预防的“五高”风险管控体系[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2017, 39(6): 649–653.
- [10] 陈宝智, 吴敏. 事故致因理论与安全理念[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(1): 42–46.
- [11] GB/T 27921–2011 风险管理–风险评估技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [12] 韩健楠, 李永红, 刘海南, 等. 基于综合防治体系抗灾能力的泥石流沟风险评价[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 230–234.
- [13] 高晓红, 汤万金, 吕加多. 加强我国风险管理标准化工作抢占国际风险管理标准化制高点–参加第二届 ISO/TMB 风险管理工作组会议的收获和体会[J]. 标准科学, 2006(6): 24–25.
- [14] GB/T 23694–2013 风险管理–术语[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [15] 刘琦. 道路交通安全管理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [16] 周德红, 赵云胜, 庞奇志, 等. 煤矿生产事故 5E 控制对策[J]. 矿山机械, 2009, 37(2): 44–47.
- [17] 王先华. 安全控制论原理和应用[J]. 兵工安全技术, 1999(4): 28–31.
- [18] Jenifer M A, Jha M K. Comparison of analytic hierarchy process, catastrophe and entropy techniques for evaluating groundwater prospect of hard–rock aquifer systems[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 605–624.
- [19] 周德红, 李文, 冯豪, 等. 地震应急管理行为模式及其绩效评估[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 172–176.
- [20] 李亚兰, 门玉明. 基于改进层次分析法的地下建筑火灾安全评价研究[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 43–47.
- [21] LAI C G, CHEN X H, CHEN X Y, et al. A fuzzy comprehensive evaluation model for flood risk based on the combination weight of game theory[J]. Natural Hazards, 2015, 77(2): 1243–1259.
- [22] 郑云水, 康毅军, 牛行通. 基于博弈论与可拓学的非正常接发列车人因风险评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(1): 179–184.
- [23] 杨悦, 杨丹, 陈孝国, 等. 基于梯形 Vague 集熵权法的煤矿应急救援能力评价研究[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 158–162.
- [24] WU C, HUANG L. A new accident causation model based on information flow and its application in Tianjin Port fire and explosion accident [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 182: 73–85.

## Risk Identification and Assessment Model for High Risk Factors of Accidents of Cage Crashing in Mine

LI Wen<sup>1</sup>, YE Yicheng<sup>1,2</sup>, WANG Qihu<sup>1</sup>, WANG Xianhua<sup>3</sup> and HU Nanyan<sup>1</sup>

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Industrial Safety Engineering Technology Research Center of Hubei Province, Wuhan 430081, China; 3. Sinosteel Wuhan safety and Environmental Protection Research Institute Co., Ltd. Wuhan 430081, China)

**Abstract:** To clarify the disaster-causing objects, hazard-bearing bodies and disaster-affected areas in the accident of cage crashing. In this research, high-risk machine, method, man, media and material are taken as the key objects to prevent and control the cage crashing, and a list of the risk of the cage crashing is established. Based on the inherent risk attributes and risk status, a risk “4M + E” severity function is constructed based on the influence of machine, method, man, media and environment and risk “3E + C” possibility function based on the influence of engineering, educational, enforcement and culture. Subsequently, risk correction indicators are proposed. Use game theory to avoid the subjectivity and objectivity of traditional weighting, finally a mathematical model for high-risk assessment of cage crashing is established. Finally, the cage hoisting system is evaluated as an example, the result show that the evaluation model is helpful for risk managers to find the weak links in the mine hoisting system, and it is an effective means for disaster risk identification and evaluation of the mine hoisting system.

**Key words:** risk identification; disaster decision; risk assessment; game theory; accident causation theory