

中文引用格式:宫运华,张喆. 油气管道事故应急失效原因及社会网络分析[J]. 中国安全科学学报,2025,35(1):209-215.

英文引用格式:GONG Yunhua, ZHANG Zhe. Failure causes of emergency response in oil and gas pipeline accidents and social network analysis [J]. China Safety Science Journal, 2025,35(1):209-215.

油气管道事故应急失效原因及社会网络分析*

宫运华^{1,2}讲师,张喆¹

(1 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院,北京 102249;

2 中国石油大学(北京)应急管理部油气生产安全与应急技术重点实验室,北京 102249)

中图分类号:X928.02

文献标志码:

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.01.1536

基金项目:中国石油大学(北京)科研基金资助(2462022YXZZ001)。

【摘要】 为避免因应急失效导致油气管道事故后果加重的问题,基于人为因素分析与分类系统(HFACS)模型,分析国内外27起油气管道事故中的应急失效原因。依据扎根理论(GT)统计编码分析结果,得到油气管道事故应急失效原因分类模型;应用社会网络分析(SNA)方法构建油气管道事故应急失效原因关系网络,利用核心-边缘分析、中心性分析和关联方向指数分析识别油气管道事故应急失效原因分类模型中的核心因素及具有高关联性和强媒介作用的因素。研究表明:油气管道事故应急失效原因分类模型包含政府及应急部门因素、运营商组织因素、运营商不安全监督、现场人员不安全行为的前提条件、现场人员的不安全行为5个层次。应急失效原因细分为16个最底层因素,其中,政府及应急部门安全监管不到位、应急救援不力、制度漏洞、管道运营商监督不充分、技术环境、技能失误等9个因素属于核心因素;技能失误、制度漏洞、技术环境、运营商监督不充分为高关联度因素;管道运营商的制度漏洞、程序漏洞、技术环境、监督不充分、资源管理不当和决策失误为强媒介因素。

【关键词】 油气管道事故; 应急失效原因; 社会网络分析(SNA); 分类模型; 人为因素分析与分类系统(HFACS)模型

Failure causes of emergency response in oil and gas pipeline accidents and social network analysis

GONG Yunhua^{1,2}, ZHANG Zhe¹

(1 School of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2 Key Laboratory of Oil and Gas Safety and Emergency Technology Ministry of Emergency

Management, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: To avoid worsening the consequences of oil and gas pipeline accidents due to emergency failures, the causes of emergency failure in 27 accidents at home and abroad were analyzed using the HFACS model. Based on the results of grounded theory (GT) statistical coding analysis, a classification model of failure causes of emergency response in oil and gas pipeline accidents was proposed. SNA was used to develop the relationship network of the causes of emergency failures in oil and gas pipeline accidents. The core-periphery, centrality, and association direction index analyses were used to identify core factors and factors with high association and strong mediating roles in the classification model of the

causes of emergency failures in oil and gas pipeline accidents. The results indicated that the classification model of emergency failure causes in oil and gas pipeline accidents was divided into five levels: government and emergency department factors, operator organizational factors, operator unsafe supervision, preconditions for unsafe behavior of on-site personnel, and unsafe behavior of on-site personnel. The emergency failure causes were further divided into 16 bottom-level factors, among which there were 9 core factors: inadequate safety supervision by government and emergency departments, ineffective emergency rescue, regulations defects, insufficient supervision by pipeline operators, technical environment, and skill errors. Skill errors, regulations or procedure defects, technical environment, and insufficient supervision by operators were highly associated factors. Moreover, pipeline operators' regulation defects, procedure defects, technical environment, insufficient supervision, improper resource management, and decision-making errors were strong mediating factors.

Keywords: oil and gas pipeline accident; emergency response failure causes; social network analysis (SNA); classification model; human factors analysis and classification system (HFACS) model

0 引言

油气管道事故的特征之一是应急措施的有效性对事故后果的影响巨大。分析国内外油气管道事故后发现,多起事故存在应急措施失效的问题。目前,油气管道事故研究主要集中在导致事故发生的腐蚀、材料缺陷、自然灾害、第三方破坏等方面^[1],对事故发生后应急失效原因的研究有限。因此,有必要研究油气管道事故应急失效的原因,以提升油气管道事故的应急措施的有效性,降低事故损失。

袁长峰^[2-3]、张玉龙^[4]等研究了油气储运火灾事故应急过程致因因素及预防对策,构建了油气储运火灾事故应急过程致因因素的分类体系。崔慧^[5]通过统计分析国内外油库区火灾爆炸事故,构建了油库区火灾应急过程事故致因因素分类体系结构。姜文士^[6]研究了导致城燃气管道泄漏事故应急处置失效的直接原因和间接原因。GONG Yunhua等^[7]在分析中石化东黄输油管道爆炸火灾事故原因过程中提出了应将事故预防因素和应急失效因素单独分析的思路,并给出了该事故应急失效原因的分析结果。另有学者研究了应急管理体系建设和应急技术开发等,但没有分析具体的应急失效原因因素。王起全^[8]分析了输油管道泄漏火灾爆炸事故演化及应急疏散,模拟计算并优化了应急疏散路径。郑登峰等^[9]提出一种多地多场景政企联动综合应急演练模式,用于提高管道运输企业应急能力。郭立等^[10]采用“R-E”一体化方法构建了油气管道突发事故应急管理体系框架,为油气管道突发事故场景的应急处置与管理提供支持。由此可见:与油气

管道事故应急失效原因相关的研究局限在油气储运单位内部的应急失效因素,没有系统分析政府监管、应急管理部门和社会公众的有关应急失效因素,尚未建立油气管道事故应急失效原因分类模型。

鉴于此,笔者拟逐一分析 27 起国内外油气管道事故的应急失效原因,依据扎根理论 (Grounded Theory, GT)、参考人为因素分析与分类系统 (Human Factors Analysis and Classification System, HFACS) 模型编码、整合应急失效的原因因素,构建油气管道事故应急失效原因分类模型;利用社会网络分析 (Social Network Analysis, SNA) 法分析油气管道事故应急失效原因因素之间的关系;采用核心-边缘分析、中心性分析和关联方向指数识别油气管道事故应急失效原因中核心因素及具有高关联性和强媒介作用的因素,从而明确油气管道事故应急失效原因分类模型中对事故损失控制较为关键的因素,以期提升油气管道事故应急工作的有效性提供参考依据。

1 事故失效原因分类研究方法

HFACS 模型将事故原因分为不安全行为、不安全行为的前提条件、不安全的监督和组织影响 4 个层次。HFACS 模型在事故原因分类方面存在明显优势^[11]。该模型在建筑^[12]、交通^[13-14]、化工^[15]等行业事故分析中都有成功应用。结合油气管道事故应急管理的特点,依据该模型可实现油气管网事故应急失效原因分类。

GT 是一种运用系统化的程序,归纳引导出存在于资料中的理论的质性研究方法^[16]。基于 GT 的研

究方法一般分为开放式编码、主轴式编码及选择式编码 3 个步骤。3 个编码过程即为应急原因分类模型建立的过程。

为深入解释油气管道事故应急失效原因分类模型,需进一步分析导致应急失效的各原因因素的重要性及各因素间的相关关系。SNA 法已在事故原因因素之间关系的分析中得到成功应用^[17-18],因此,也可推广到对事故应急失效原因因素的分析中。

2 事故应急失效原因分类模型建立

从美国国家运输安全委员会、加拿大运输安全委员会能源局和国内公开发布的事故调查报告中,收集 1994—2019 年的 27 起国内外油气管道事故案例,结果见表 1。遵循 GT 对事故应急失效原因因素编码,见表 2。油气管道事故应急失效原因分类模型如图 1 所示。其中,出现频率较高且内容较丰富的因素,如技能失误包括未及时启动应急响应、未及时正确判断警报原因、未及时注意异常情况、未及时关闭管道、未及时确定失效位置等;技术环境包括泄漏监测有缺陷、泄漏报警程序故障和缺乏相关信息。

表 1 27 起事故案例

Table 1 27 accident cases

年份	国家	事故
1994	加拿大	萨斯喀彻温省 FootHills 公司天然气管道破裂事故
1995	加拿大	曼尼托巴省 TransCanada 公司天然气管道破裂事故
1996	加拿大	曼尼托巴省 TransCanada 公司天然气管道破裂事故
2000	加拿大	不列颠哥伦比亚省 West Coast 公司天然气管道破裂事故
2000	加拿大	魁北克省 Gazoduc TQM 公司天然气泄漏爆炸事故
2001	加拿大	阿尔伯特省 Enbridge 公司原油管道破裂事故
2001	加拿大	安大略省 Enbridge 公司原油管道破裂事故
2002	加拿大	魁北克省 Trans-Northern 公司成品油管道破裂事故
2002	加拿大	曼尼托巴省 TransCanada 天然气管道破裂事故
2004	美国	堪萨斯州 Magellan 公司泄漏事故
2005	加拿大	不列颠哥伦比亚省 Terason 公司原油管道破裂事故
2007	加拿大	不列颠哥伦比亚省 Trans Mountain 公司原油管道破裂事故

续表 1

年份	国家	事故
2007	美国	密西西比州 Dixie 管道公司危险液体管道破裂事故
2008	美国	宾夕法尼亚州 Dominion Peoples 公司天然气管道破裂事故
2009	美国	佛罗里达州 GasTransport 公司天然气管道破裂泄漏事故
2010	美国	密歇根州 Enbridge 公司危险液体管道破裂泄漏事故
2010	美国	萨伊利诺伊州 Enbridge 公司输油管道泄漏事故
2011	加拿大	安大略省 TransCanada 公司天然气管道爆炸起火事故
2011	加拿大	阿尔伯特省 Plains 公司 NPS20 管道泄漏事故
2012	加拿大	不列颠哥伦比亚省 West Coast 公司天然气管道破裂事故
2012	美国	西弗吉尼亚州 Columbia 输气公司天然气管道破裂事故
2013	中国	山东青岛“11·22”中石化东黄输油管道泄漏爆炸事故
2014	中国	辽宁大连“6·30”新大原油管道破坏泄漏事故
2016	美国	内布拉斯加州 Magellan 管道无水氨泄漏事故
2017	加拿大	南达科他州 TransCanada 公司管道破裂事故
2018	美国	得克萨斯州 Atmos 能源公司天然气爆炸事故
2019	美国	加利福尼亚州 Pacific Gas & Electric 公司管道爆炸事故

表 2 基于 GT 的事故应急失效原因因素编码

Table 2 GT-based coding of accident emergency failure cause factors

选择式编码	主轴式编码	开放式编码	频数	占比/%
政府及应急部门因素	安全监管不到位	督促企业落实应急预案不力; 未及时发现现场人员的违章	4	14.81
	相关规定有缺陷	应急法规存在缺陷; 建设规划不合理; 缺乏不同部门间的明确协议	3	11.11
	应急救援不力	未及时通知和疏散群众; 指挥协调应急救援不力; 事故风险研判失误	4	14.81

续表 2

选择式编码	主轴式编码	开放式编码	频数	占比/%
运营商组织因素	不良的组织氛围	对应急救援工作重视不够	4	14.81
	资源管理不当	应急资源配置存在缺陷	5	18.52
	组织程序规章漏洞	程序漏洞 制度漏洞	12 9	44.44 33.33
运营商不安全监督	监督不充分	缺乏应急演练/培训	5	18.52
		缺乏应急指导标准	2	7.41
		公众安全教育不足	6	22.22
		执行监督不足	4	14.81
	沟通不足	6	22.22	
监督违规	未按预案进行风险研判; 未按要求进行事故报告	3	11.11	
运行计划不当	应急响应措施有效性不高; 计划中应急指令不及时	6	22.22	
现场人员不安全行为的前提条件	环境因素	技术环境	14	51.85
		物理环境	4	14.81
人员因素	操作人员知识不足	4	14.81	
现场人员的不安全行为	失误	技能失误	20	74.07
		决策失误	5	18.52
	违规	未实施有效警戒; 抢修前未进行可燃气体检测; 使用不恰当的设备; 到达现场不及时; 违规启动管道输送	5	18.52

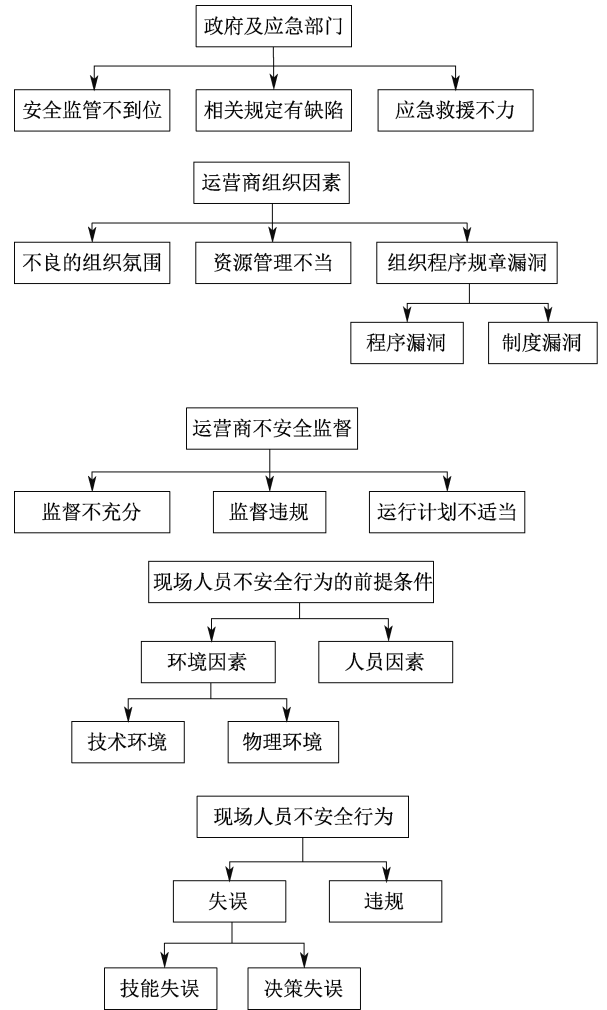


图 1 油气管道事故应急失效原因分类模型

Fig. 1 Classification model of emergency response failure causal factors of oil and gas pipeline accidents

表 3 事故应急失效原因因素及编码

Table 3 Causes and codes of emergency response failure

因素类别及编码	具体因素及编码
政府及应急部门因素 (GE)	安全监管不到位 GE1、相关规定有缺陷 GE2、应急救援不力 GE3
运营商组织因素 (PO)	不良的组织氛围 PO1、资源管理不当 PO2、程序漏洞 PO3、制度漏洞 PO4
运营商不安全监督 (PS)	监督不充分 PS1、监督违规 PS2、运行计划不当 PS3
现场人员不安全行为的前提条件 (HP)	人员因素 HP1、物理环境 HP2、技术环境 HP3
现场人员不安全行为 (HB)	技能失误 HB1、决策失误 HB2、违规 HB3

3 事故应急失效原因 SNA

3.1 应急失效原因因素社会网络构建

依据 SNA 的流程,采用英文字母及数字组合的形式,对 16 个最底层的油气管道事故应急失效原因因素编码。其中,取各层级英文名称的首 2 位字母及阿拉伯数字作为该层级各个因素的编码(表 3)。

根据 27 起油气管道事故案例的具体内容,找出存在直接关系的应急失效原因因素,形成原因网络图。每起事故都可以用一个表达该事故应急失效原

因因素关系的局部关系矩阵表示。对存在直接关系的因素对取 1,反之则取 0。再将收集到的所有油气管道事故报告案例矩阵化,最终建立一个全局关系

矩阵。对关系矩阵作可视化处理,油气管道事故应急失效原因网络如图 2 所示。图中,拥有直接关系的因素对通过连接线连接,线条越粗表示 2 个因素共同出现的频率越高,联系越紧密。可以看出,技术环境 HP3 和技能失误 HB1 是导致应急失效的因素中出现频率高且与其他因素联系紧密的原因因素。

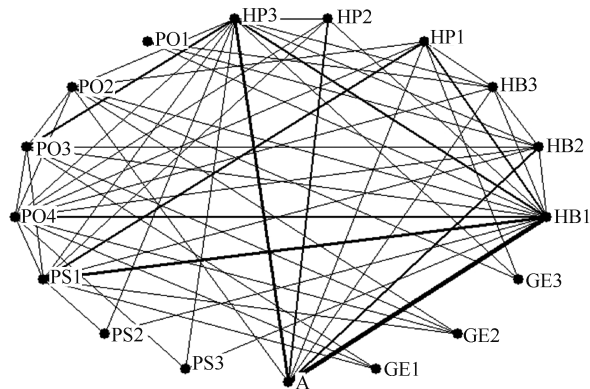


图 2 油气管道事故应急失效原因网络
Fig. 2 Emergency failure causal factors network of oil and gas pipeline accidents

3.2 应急失效原因因素核心—边缘分析

核心因素是指对油气管道事故应急失效网络来说重要性较大,对事故发生起到关键作用的因素。边缘因素则是指与核心因素相对的因素。分析得出 9 个因素属于核心因素,7 个属于边缘因素,见表 4。

表 4 事故应急失效原因核心—边缘因素

Table 4 Core and edge emergency response failure causal factors

位置	应急失效原因因素
核心	GE1、GE2、GE3、PO2、PO3、PO4、PS1、HP3、HB1
边缘	PO1、PS2、PS3、HP1、HP2、HB2、HB3

3.3 应急失效原因因素中心性分析

3.3.1 度数中心性分析

点的度数测量了节点参与活动的情况,是测量中心度的基础。居于中心地位的节点与其他多个节点都有直接关联。与某点相邻的点称为该点的邻点,度数就是一个点的邻点个数,也称关联度。油气管道事故应急失效原因网络各因素的度数中心度降序排列如图 3 所示。

3.3.2 中间中心性分析

在网络中没有直接关系的节点有时需要依靠其他节点联系,中间中心度就是用来表示这种媒介作用强弱的指标。各应急失效原因因素的中间中心度如图 4 所示。可见:PO4、PO3、HP3、PS1、PO2 和

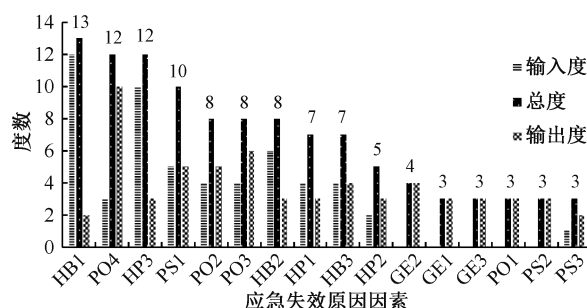


图 3 事故应急失效原因因素度数中心性分析结果
Fig. 3 Degree centrality analysis of accident emergency response failure causal factors

HB2 为强媒介因素。

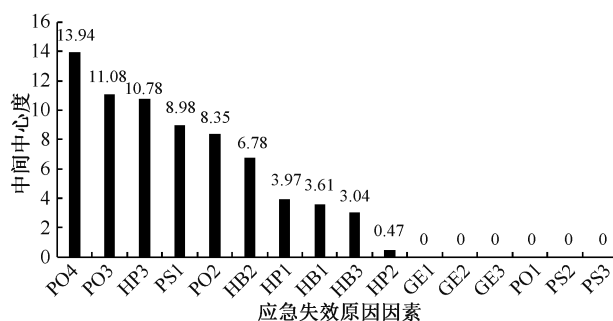


图 4 事故应急失效原因因素网络中间中心性
Fig. 4 Intermediate centrality analysis of accident emergency response failure factors

3.3.3 关联方向指数分析

应用关联方向指数可得出每个因素在有向网络中发挥的功能,指数为正时可认为该因素为结果因素,反之则认为该因素为原因因素。关联方向指数的绝对值大小代表各因素偏向结果或是原因的程度。

事故应急失效原因因素关联方向指数分析结果如图 5 所示。GE1、GE2、GE3 的关联指数都为-1,说明政府及应急部门层级的因素易对其他因素产生影响。此外,PO1 和 PS2 的关联方向指数也为-1,表明这些因素也是其他失效原因因素的致因。

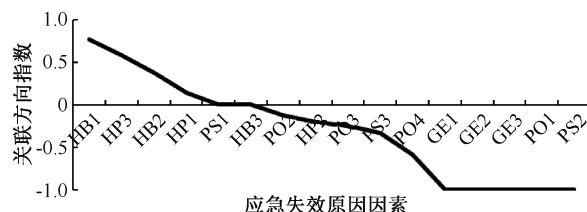


图 5 事故应急失效原因因素关联方向指数分析结果
Fig. 5 Correlation direction index analysis of emergency failure causal factors

4 结 论

1) 基于 HFACS 模型建立的油气管道事故应急失效原因分类模型包含政府及应急部门因素、运营商组织因素、运营商不安全监督、现场人员不安全行为的前提条件、现场人员的不安全行为 5 个层次和 16 个最底层原因因素。

2) 通过 SNA 可知:事故应急失效网络的核心

因素为政府及应急部门安全监管不到位、应急救援不力、制度漏洞、管道运营商监督不充分、技术环境、技能失误等 9 个因素;强媒介因素为管道运营商的制度漏洞、程序漏洞、技术环境等。高关联度因素为技能失误、制度漏洞、技术环境、运营商监督不充分。

3) 油气管道事故应急失效原因分类模型及其 SNA 结果可用于降低应急失效的可能性,从而避免因应急失效导致油气管道事故后果加重的问题。

参 考 文 献

- [1] 狄彦, 帅健, 王晓霖, 等. 油气管道事故原因分析及分类方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(7): 109-115.
DI Yan, SHUAI Jian, WANG Xiaolin, et al. Study on methods for classifying oil&gas pipeline incidents[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(7): 109-115.
- [2] 袁长峰, 张玉龙, 呼义超, 等. 基于模糊动态故障树的油气储运火灾事故应急过程致因因素评价[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(1): 92-100.
YUAN Changfeng, ZHANG Yulong, HU Yichao, et al. Evaluation on causal factors in emergency processes of fire accidents for oil-gas storage and transportation based on fuzzy dynamic fault tree[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(1): 92-100.
- [3] YUAN Changfeng, CUI Hui, MA Siming, et al. Analysis method for causal factors in emergency processes of fire accidents for oil-gas storage and transportation based on ISM and MBN[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 62: DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103964.
- [4] 张玉龙. 油气储运火灾事故应急过程致因因素评估及预防[D]. 大连:大连海事大学, 2021.
ZHANG Yulong. Prevention and evaluation on causal factors in emergency processes of fire accidents for oil/gas storage and transportation[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021.
- [5] 崔慧. 油库区火灾应急过程事故致因因素研究[D]. 大连:大连海事大学, 2019.
CUI Hui. Study on cause factors in emergency process of fire accident for oil depot zone[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2019.
- [6] 姜文士. 城镇燃气管道泄漏事故应急处置失效原因及对策探析[J]. 现代职业安全, 2022(2): 24-26.
- [7] GONG Yunhua, LI Yuntao. STAMP-based causal analysis of China-Donghuang oil transportation pipeline leakage and explosion accident[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 56: 402-413.
- [8] 王起全. 输油管道泄漏火灾爆炸事故演化及应急疏散分析[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(5): 24-29.
WANG Qiquan. Analysis of oil pipeline leak fire and explosion accident evolution and emergency evacuation[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(5): 24-29.
- [9] 郑登锋, 付明福, 龚晓凤, 等. 基于情景构建的多地多场景应急演练[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(6): 171-176.
ZHENG Dengfeng, FU Mingfu, GONG Xiaofeng, et al. Multi-place and multi-scenario emergency exercise based on scenario-building[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(6): 171-176.
- [10] 郭立, 王钟兴, 刘铁. 基于“R-E”一体化构建油气管道突发事故应急管理体系[J]. 化工安全与环境, 2022, 35(34): 2-5, 9.
- [11] CHAUVINA C, LARDJANE S, MORELA G, et al. Human and organizational factors in maritime accidents: analysis of

collisions at sea using HFACS[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2013, 59:26-37.

- [12] 李珏,刘焕. 基于 HFACS 的施工触电事故致因的关联性分析与干预对策[J]. *长沙理工大学学报:自然科学版*, 2019, 16(2): 36-41,48.
- LI Jue, LIU Huan. Association of causes and intervention countermeasures of electric shock accidents based on HFACS[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology:Natural Science*, 2019,16(2): 36-41,48.
- [13] XU Ruihua, LUO Fan, CHEN Gaoming, et al. Application of HFACS and grounded theory for identifying risk factors of air traffic controllers' unsafe acts[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2021, 86: DOI:10.1016/j.ergon.2021.103228.
- [14] KAPTAN M, SARIALIOGLU S, UGURLU O, et al. The evolution of the HFACS method used in analysis of marine accidents: a review [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2021, 86: DOI: 10.1016/j.ergon.2021.103225.
- [15] WANG Jing, FAN Yunxiao, GAO Yuan. Revising HFACS for SMEs in the chemical industry: HFACS-CSMEs[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 65: DOI:10.1016/j.jlp.2020.104138.
- [16] 贾旭东, 衡量. 扎根理论的“丛林”、过往与进路[J]. *科研管理*, 2020, 41(5): 151-163.
- JIA Xudong, HENG Liang. The "jungle", history, and approach road of the grounded theory[J]. *Science Research Management*, 2020, 41(5): 151-163.
- [17] 韩天园, 田顺, 吕凯光, 等. 基于文本挖掘的重特大交通事故成因网络分析[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(9): 150-156.
- HAN Tianyuan, TIAN Shun, LYU Kaiguang, et al. Network analysis on causes for serious traffic accidents based on text mining[J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(9): 150-156.
- [18] 李珏, 王幼芳. 基于文本挖掘的建筑施工高处坠落事故致因网络分析[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(4): 1 284-1 290.
- LI Jue, WANG Youfang. Causation network analysis of the construction falling or collapsing accidents based on the text mining[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(4): 1 284-1 290.



作者简介: 宫运华 (1983—),女,河北邢台人,博士,讲师,主要从事安全管理、行为安全、安全文化、安全领导力等方面的研究。E-mail:yunhua0626@163.com。