

引用格式: 何太碧, 王淋, 许苏予, 等. 基于事故树分析的气氢合建站安全风险评价[J]. 世界石油工业, 2024, 31(5): 91-100.

HE T B, WANG L, XU S Y, et al. Risk assessment of natural gas and hydrogen joint construction station based on Fault Tree Analysis[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(5): 91-100.

基于事故树分析的气氢合建站安全风险评价

何太碧¹, 王淋¹, 许苏予¹, 胡鹏飞², 何风成¹

(1. 西华大学汽车与交通学院, 四川 成都 610000; 2. 国能重庆风电开发有限公司, 重庆 400025)

摘要: 加氢站与加油站、天然气加气站、充电站等联合建设的站称为加氢合建站, 加氢合建站具有解决土地占用、降低建站及运营成本、提升市场竞争力等多重优势。气氢合建站由于站内所存储的天然气和氢气具有易燃烧、易泄漏的特性, 在运营过程中面临诸多安全问题。开展气氢合建站火灾爆炸事故的安全风险评价研究具有重要意义。采用鱼骨图分析法, 从站内所用物料、设施设备以及人员因素等方面, 辨识气氢合建站的危险源; 以“气氢合建站火灾爆炸”为顶上事件, 建立事故树模型, 通过计算事故树的最小割集、最小径集和结构重要度, 对导致顶上事件发生的基本事件进行排序, 确定关键基本事件, 提出针对气氢合建站火灾爆炸事故的安全措施, 保障气氢合建站安全长周期运行。研究结果表明: 在原有的常规加气站增设加氢设备后, 风险因素更加多变、复杂; 影响气氢合建站火灾爆炸事故发生的潜在路径较多, 制约事故发生的路径较少, 气氢合建站的火灾爆炸事故风险较高; 气氢合建站应从通风系统、站内保护装置、点火源以及气体泄漏等4个方面制定安全措施, 保障气氢合建站的安全运营。

关键词: 气氢合建站; 鱼骨图; 事故树分析; 危险源辨识; 安全措施; 风险评价

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1006-0030(2024)05-0091-010 **DOI:** 10.20114/j.issn.1006-0030.20240430002

Risk assessment of natural gas and hydrogen joint construction station based on Fault Tree Analysis

HE Taibi¹, WANG Lin¹, XU Suyu¹, HU Pengfei², HE Fengcheng¹

(1. School of Automotive and Transportation, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610000, China;

2. Guoneng Chongqing Wind Power Development Co., Ltd, Chongqi 400025, China)

Abstract: The hydrogen refueling station that is jointly built with petrol station, natural gas filling station, charging station, etc. is called a hydrogen refueling co-located station. The advantages of hydrogen refueling co-located station include solving land occupation, reducing the cost of station construction and operation, and enhancing market competitiveness. Among them, natural gas-hydrogen co-built stations face numerous safety problems during operation due to the flammable and leak-prone characteristics of the natural gas and hydrogen stored in the station, making it important to conduct a safety risk evaluation study of natural gas-hydrogen co-built station fires and explosions. Using the fishbone diagram analysis method, the study identifies the hazard sources of natural gas-hydrogen co-built stations from the perspectives of materials, facilities and equipment, and personnel factors. The study establishes a fault tree model with "natural gas-hydrogen co-built station fire and explosion" as the top event, and through the calculation of the minimum cut set, minimum branch set, and structural importance, the study ranks the basic events that lead to the top event and determines the critical basic events. The study then proposes safety measures for natural gas-hydrogen co-built station fires and explosions to ensure safe and long-term operation of the station. The research findings show that: (1) After adding hydrogen refueling equipment to the existing conventional natural gas filling station, the risk factors become more variable and complex; (2) There are many potential pathways that can lead to natural gas-hydrogen co-built station fires and explosions, while the pathways that limit the occurrence of accidents are relatively few, and the risk of gas-hydrogen co-built station fires and explosions is high. (3) Safety measures should be taken from four aspects, including ventilation system, on-site protection devices, ignition sources, and gas leaks, to ensure the safe operation of a natural gas-hydrogen co-located station.

Keywords: natural gas and hydrogen joint construction station; fish bone map; fault tree analysis; hazard identification; safety measures; risk assessment

收稿日期: 2024-04-30

修回日期: 2024-07-23

基金项目: 中国石油西南油气田分公司天然气经济研究所重点项目“川渝地区氢能市场调研”(RH2300002413)

第一作者: 何太碧(1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事低碳能源及交通载具的教育教学和科学研究工作。

E-mail: vehicle_2016@163.com

通信作者: 王淋(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事氢安全研究工作。E-mail: 2447214922@qq.com

0 引言

2022年3月,国家发改委、国家能源局联合发布的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》指出,氢能是未来中国能源体系的重要组成部分,是支撑能源供给结构变革的关键力量,需充分发挥其清洁、低碳的特点,推动交通、工业等用能终端和高耗能、高排放行业绿色低碳转型^[1-2]。根据统计,交通运输领域碳排放占中国终端碳排放的10%左右,氢能在交通领域的应用被视为减少碳排放的重要途径,对于实现双碳目标起着决定性的作用^[3]。根据中国汽车工业协会公布数据显示,2023年中国燃料电池汽车产销数据分别为5 631辆和5 791辆,同比增加55.3%和72%。氢燃料电池汽车有望成为新能源汽车产业的重要一极,而氢基础设施建设则是有望实现氢燃料电池汽车规模化运营的关键一环。

气氢合建站作为一种新型氢能基础设施,站内所存储的天然气和氢气均具有易燃烧、易泄漏的特性,因而气氢合建站在运营过程中面临诸多安全问题。例如,如果由于天然气设备故障造成气体泄漏,发生火灾甚至爆炸时,火焰的温度和爆炸的冲击波会对储氢罐等氢能设备产生影响,事故所造成的经济损失和遇难人数将远远高于单一加气站或加氢站事故。

本文聚焦于气氢合建站事故风险研究,运用鱼骨图分析法,从物料、设备以及人员等方面,对危险源进行有效辨识,建立以“气氢合建站火灾爆炸”为顶上事件的事故树模型,分析其最小割集、最小径集以及结构重要度。根据分析结果,提出相应的安全防控措施,为气氢合建站的安全管理提供科学依据,以期减少气氢合建站火灾事故的发生。

1 气氢合建站发展现状及趋势

纯加氢站因建设投资成本高,氢能源车辆普及率较低,导致盈利周期长、盈利艰难。加氢站与加油站、天然气加气站、充电站等联合建设的站称为加氢合建站,加氢合建站是优化土地利用、降低建设成本与建设时间等问题的重要氢能基础设施,是氢能产业开发初期合理的过渡方案^[4-5]。截至2023年年底,中国新建加氢站68座,累计建成416座。

从2023年的加氢站建设类型可知,综合能源站已经成为主要建站方式,占比58%,其中油氢合建站占比较多,气氢合建站占比较少,典型的气氢合建站项目见表1。同时,为推动氢能发展,近年来中国多个省、市政府陆续出台一系列政策(见表2),支持各地利用现有的加气站,将其改扩建为气氢合建站。

当前,关于加氢合建站的研究大多聚焦于油氢合建站领域,针对气氢合建站的研究相对较少。康健等^[6]提出,基于复杂网络分析油氢合建站时序性动态风险评估模型,引入时序加权平均算子和时序加权几何平均算子,结合季节维度进行综合评估,为油氢合建站安全管理提供理论支撑;汪侃等^[7]以上海首座油氢合建站为研究对象,利用事故树分析(Fault Tree Analysis, FTA)法和火灾爆炸指数(Fire & Explosion Index, F&EI)法,定性、定量分析其风险,提出管控对策,提升油氢合建站的安全性;Nakayama等^[8]针对油氢合建站进行危险识别(Hazard Identification, HAZID)研究,揭示其独特的混合风险,提出系统性风险管控措施。

气氢合建站作为新兴的氢能基础设施,与油氢合建站相比,其主要优势:①天然气与氢气在制取、运输、应用、基础设施等多方面有互通性和相容性,有利于两者的深度融合和协同发展^[9];②新版国标《汽车加油加气加氢站技术标准》(GB 50156—2021)指出,加气站与加氢站的工艺流程、设施设备等方面高度相似,且现行安全技术规范基本满足其技术要求,设计建设此类合建站在技术规范方面有可行依据^[10-12];③随着天然气制氢技术的日益成熟,以及相关技术标准的持续完善,气氢合建站有望实现站内制氢加氢一体化,直接利用站内天然气制氢,无需使用氢气长管拖车进行氢气运输,可降低运输成本及终端用氢成本。因此,气氢合建站被视为现阶段加氢站商业化发展最迫切、最现实的选择之一。

当加气站改扩建加氢设施后,整个气氢合建站内系统更加复杂,相应的风险因素更加多变。本文采用鱼骨图和事故树分析法,系统地分析气氢合建站的潜在危险因素,得出规避风险的有效方法,为站内建设和管理提供科学、实用的指导与参考。值得注意的是,气氢合建站尚处于起步阶段,当分析气氢合建站时,需综合分析加气站、加氢站的相关文献以及事故报告(见表3)等相关资料。

表1 典型气氢合建站项目
Tab.1 Typical natural gas and hydrogenation joint construction station project

地点	项目名称	加氢规模
江苏省无锡市	华润燃气堰裕路加气加氢站	550 kg/d
山东省潍坊市	华润燃气第一座固定式示范加氢站	1 000 kg/12 h
广东省佛山市	南庄制氢加氢加气一体化站	1 100 kg/d
重庆市	重庆兴燃能源有限公司巴南区南彭加气站增设加氢站	/
	中石化重庆石油分公司渝北空港加气站增设加氢站	/

表2 加氢合建站相关政策
Tab.2 Relevant policies of hydrogenation joint construction station

时间	地区	政策名称
2018年	江苏省	如皋市《扶持氢能产业发展的实施意见》
2018年	广东省	《广东省人民政府关于加快新能源汽车产业创新发展的意见》
2018年	辽宁省	《大连市人民政府办公厅关于加快新能源汽车产业创新发展的指导意见》
2019年	江苏省	《江苏省氢燃料电池汽车产业发展行动计划》
2020年	广东省	《广东省加快氢燃料电池汽车产业发展实施方案》
2020年	四川省	《四川省氢能产业发展规划（2021—2025年）》
2023年	广东省	《广东省加快氢能产业创新发展的意见》
2023年	山东省	《济南市人民政府办公厅关于推进我市汽车加氢站规划建设运营管理工作的实施意见》
2023年	浙江省	《浙江省加氢站发展规划》

表3 国内外加气站、加氢站典型重大事故
Tab.3 Typical major accidents of natural gas refueling stations and hydrogen refueling stations at home and abroad

	时间	地点	事故简述
加气站	2023年12月	中国	辽宁省沈阳市辽中区北五路程达加气站发生一起突发爆炸事故，造成2人死亡，6人受伤
	2022年11月	韩国	韩国大邱一座加气站发生爆炸，造成7人受伤，爆炸原因尚不明确
	2020年08月	俄罗斯	俄罗斯南部城市伏尔加格勒一座加气站发生剧烈爆炸，事故造成13人受伤，事故原因为加气站内储气罐燃烧引发爆炸，并造成火灾
	2020年07月	中国	山东省青岛市兴隆路加气站罩棚起火，事故没有造成人员受伤
加氢站	2024年06月	德国	德国奥格斯堡附近一家加氢站爆炸，引发火灾，事故没有造成人员受伤
	2019年07月	中国	四川省达州市一家加氢站发生爆炸，造成2人死亡、1人受伤、多辆汽车被烧毁
	2019年06月	挪威	挪威奥斯陆郊外的一座合营加氢站发生爆炸，事故共导致2人受伤
	2019年06月	美国	美国加州一家加氢站发生氢气泄漏并引发火灾，并烧毁汽车1辆

2 气氢合建站的工艺流程

本文研究的气氢合建站是指在已建加气站的基础上改扩建加氢设施，能同时满足加气和加氢的需求。气氢合建站按功能划分为气氢加注区、站控系统区、氢能设备区以及天然气设备区等4个区域(见图1)。

2.1 加气工艺流程

根据天然气来源和加气用户的不同，加气站分为CNG加气母站、CNG标准站（CNG常规加气站）和CNG加气子站^[13]。本文研究的气氢合建站主要是

在CNG常规加气站的基础上增设加氢设施设备，加气站的基础设备以及工艺过程不发生改变。

气氢合建站加气工艺流程（见图2）主要涉及天然气来源、天然气调压计量装置、脱硫装置、压缩装置、脱水装置、储气装置、加气装置，以及CNG汽车等8个主要模块。原料天然气直接从城市管网取气，经过过滤、调压计量、脱硫之后进入压缩机，经压缩后的天然气进入脱水装置除去冷凝水后，进入储气区存储，最后经加气机充进CNG汽车的车载气瓶，供其使用。

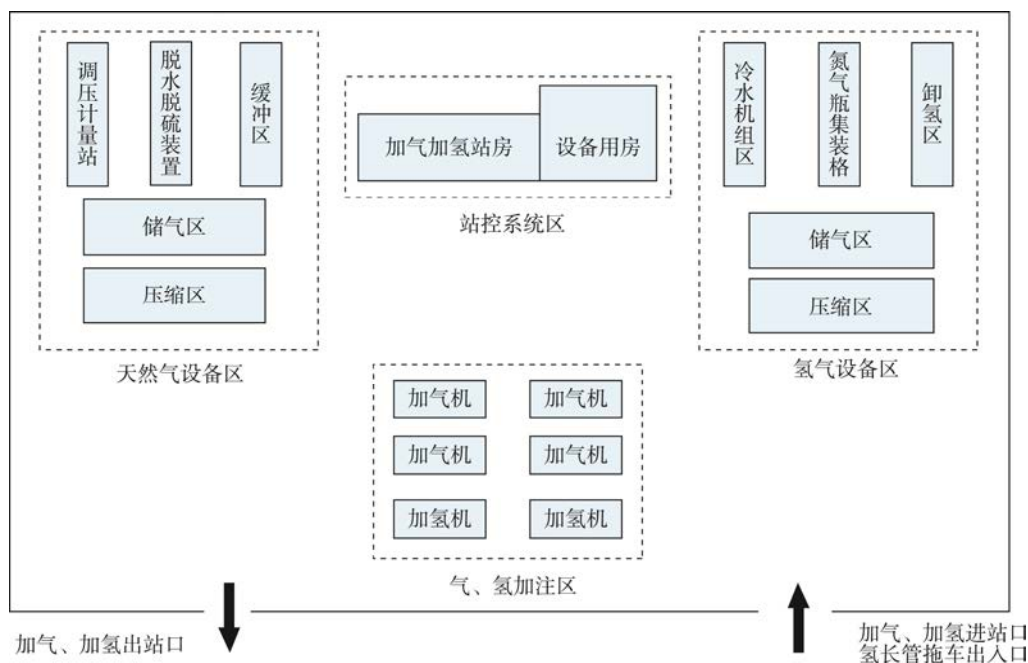


图1 气氢合建站站位布置图

Fig.1 Layout plan of the natural gas and hydrogen joint construction station

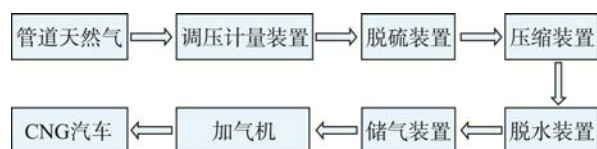


图2 加气工艺流程图

Fig.2 Flow chart of the natural gas filling process

2.2 加氢工艺流程

气氢合建站内氢气既可来源于站内天然气自制，还可来源于站外氢气长管拖车运输。气氢合建站的加氢工艺流程（见图3）主要涉及氢气来源、卸气装置、压缩机装置、储氢装置、加氢机，以及氢燃料汽车等6个主要模块。本文研究的气氢合建站的氢气来源于氢气长管拖车运输，拖车到站后与卸气柱连接，氢气进入压缩机组内被压缩，然后输送到高压、中压和低压储氢罐进行分级储存，通过加氢机为氢燃料电池汽车提供氢气。目前，氢燃料电池汽车大多采用技术标准成熟的35 MPa高压储氢瓶^[14]。

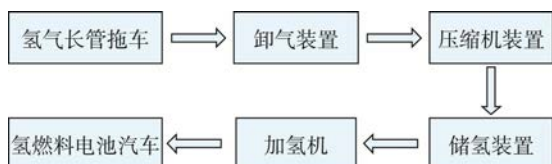


图3 加氢工艺流程图

Fig.3 Flow chart of the hydrogenation process

3 事故分析

气氢合建站在整个工艺流程中涉及的重大事故场景主要是天然气与氢气在压缩、储存以及加注等过程中产生泄漏，由此引发火灾爆炸。基于此，建立气氢合建站安全风险评价流程：① 针对气氢合建站的工艺流程，对站内所用物料、设备以及人员等，运用鱼骨图分析法进行危险源辨识；② 基于上述危险源整理出的事件，根据事件之间的逻辑关系和因果关系，将这些事件细分为基本事件和中间事件，建立事故树模型；③ 根据事故树模型分析结果，为气氢合建站管理提供相应的安全措施（见图4）。

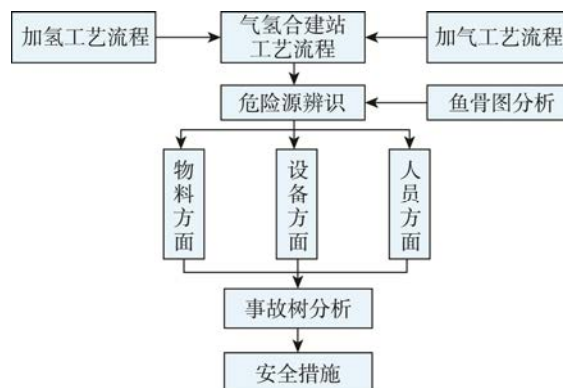


图4 气氢合建站安全风险评价流程图

Fig.4 Flow chart of safety risk assessment of natural gas and hydrogen joint construction station

3.1 危险源辨识

危险源辨识是安全风险预控的基础,《职业健康安全管理体系要求》(GB/T 45001—2020)中定义危险源为“可能导致人身伤害和(或)健康损害的根源、状态或行为,或其组合”。结合“能量意外释放理论”和“奶酪模型理论”,将危险源分为能量或具有能量的物质,以及能量物质的防护措施缺陷^[15-16]。

3.1.1 物料危险性

氢气、天然气属于气氢合建站的能量物质,两者均为易燃气体,均对气氢合建站内的金属材料设备具有腐蚀作用,其中氢气还具有使金属材料脆化的属性。通过对比燃料属性(见表4)可知,氢气、天然气均具有无色无味、扩散系数大等属性,当氢气泄漏至空气中时,极易向上扩散;因天然气由多种成分组成,其主要组成成分为甲烷,当天然气泄漏至空气中时,其中甲烷等一些质量较轻的气体会飘散到空气中,与空气形成混合气团,另一些质量比空气重的气体则容易在地表存留^[17-19]。若2种气体泄漏聚集,且聚集量达到一定浓度时,如遇明火、静电火花、雷击火花和电火花等点火源,极易发生爆炸事故。

表4 燃料属性对比
Tab.4 Fuel properties comparison

基本属性	氢气	甲烷
颜色、气味	无	无
密度/[kg·(m ³) ⁻¹]	0.083 7	0.717
扩散系数(空气中)	0.61	0.16
脆化金属材料	会	不会
最小点燃能/MJ	0.02	0.28
燃烧范围/%	4.1~75	5.3~15
爆炸极限/%	18.3~59	6.3~13.5
燃烧热量/[MJ·(m ³) ⁻¹]	10.77	35.9
层流火焰速度/(cm·s ⁻¹)	312	40
自燃温度/°C	589	540

3.1.2 设备危险性

设备作为气氢合建站内的能量载体,其危险性主要来源于设备自身和外部环境影响。气氢合建站内包含加氢、加气2套装置设备,以及连接整个工艺设备的管道、阀门等装置。其中,加氢设备包括

加氢机、储氢罐、压缩机、卸气柱、长管拖车等,加气设备包括加气机、储气罐(井)、压缩机、计量调压、脱硫脱水装置等。在整个工艺流程中,站内设备长期处于高压状态,在遭遇外部冲击等外部影响因素,或零部件老化、磨损以及密封不良、各连接处不紧密等设备自身因素,易发生气体泄漏等安全事故,同时若站内气体泄漏报警系统、消防系统等防控系统失效的情况下,将进一步加剧事故风险,甚至会引发火灾爆炸等严重事故。

3.1.3 人员危险性

人员危险性主要与自身技能、安全意识,以及站内管理规章制度相关。①在自身技能方面。站内人员对加气加氢设备的技能学习、应急处理等能力极为重要,若工作人员自身技能不足,易在执行复杂程度较高的任务时出错,可能会引发事故;②在安全意识方面。如果操作人员缺乏安全意识或未接受足够的安全培训,容易出现疲劳工作、站内吸烟、违规用火,以及在工作过程中使用工具不准确、穿戴不正确等问题,增大事故发生的可能性;③在管理制度方面。如果站内缺乏完善的管理制度或操作规程,可能导致员工之间任务交接不到位、监管力度不足等问题,增加事故风险。

3.2 鱼骨图分析

鱼骨图分析法又称因果分析法,是一种发现问题“根本原因”的分析方法,具有直观、逻辑性强、因果关系明确等特点^[20]。对气氢合建站内的所用物料、设备以及人员方面的风险性进行深入分析,构建气氢合建站内危险源辨识的分析模型(见图5)。

3.3 事故树分析

3.3.1 事故树建立

事故树分析法将最不愿发生的事件作为顶上事件,其他事件作为中间事件和基本事件,通过逻辑符号连接在一起,形成一个树状结构^[21]。在气氢合建站安全风险评价中,以“气氢合建站火灾爆炸”为顶上事件(标记为T),从“达到爆炸极限的可燃物、足够温度的引火源和足够的氧气含量”爆炸三要素出发^[22],根据对气氢合建站火灾爆炸主要影响因素的分析,对各影响因素进行细化、归类,按照各因素间的逻辑关系梳理造成事故发生的事件,共得到25个中间事件(标记为M)和45个基本事件(标记为X)(见表5)。

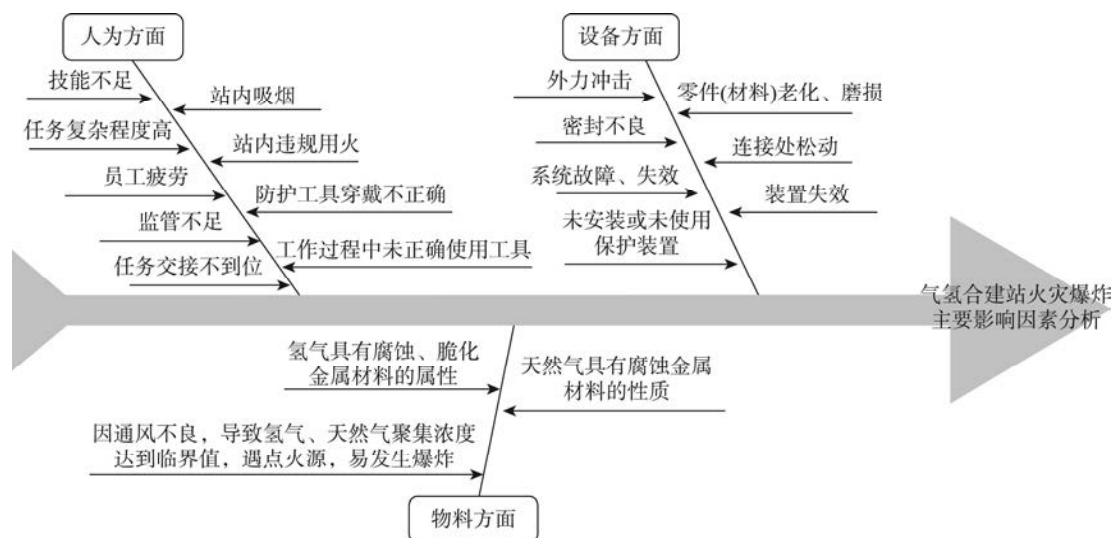


图5 气氢合建站内危险源辨识鱼骨图模型

Fig.5 Fish bone map model of hazard source identification in the natural gas-hydrogen joint construction station

表5 气氢合建站的事件代码及事件描述

Tab.5 Event code and event description of the natural gas-hydrogen joint construction station

事件代码	事件描述	危险源类别	事件代码	事件描述	危险源类别
T	气氢合建站火灾爆炸事故	/	M ₁	达到爆炸浓度	/
M ₂	点火源	/	M ₃	保护装置失效	/
M ₄	泄漏	/	M ₅	明火	/
M ₆	火花	/	M ₇	人为因素	/
M ₈	超压泄漏	/	M ₉	腐蚀泄漏	/
M ₁₀	机械泄漏	/	M ₁₁	静电火花	/
M ₁₂	雷击火花	/	M ₁₃	碰撞火花	/
M ₁₄	电火花	/	M ₁₅	超压	/
M ₁₆	压力控制系统故障	/	M ₁₇	设备泄漏	/
M ₁₈	管道泄漏	/	M ₁₉	阀门/仪器泄漏	/
M ₂₀	人体静电	/	M ₂₁	设施设备静电	/
M ₂₂	超温	/	M ₂₃	压缩气/氢设备泄漏	/
M ₂₄	加气/氢机泄漏	/	M ₂₅	卸气软管接头泄漏	/
X ₁	通风不良	设备	X ₂	火灾报警装置失效	设备
X ₃	气体探测装置失效	设备	X ₄	站内吸烟	人员
X ₅	站内违规用火	人员	X ₆	任务复杂程度高	人员
X ₇	员工疲劳	人员	X ₈	员工自身能力不足	人员
X ₉	监管不足	人员	X ₁₀	任务交接不到位	人员
X ₁₁	氢脆	物料	X ₁₂	氢腐蚀	物料
X ₁₃	腐蚀介质超标	物料	X ₁₄	雷击	物料
X ₁₅	避雷装置失效	设备	X ₁₆	铁质工具	人员
X ₁₇	钉鞋	人员	X ₁₈	接触不良	设备
X ₁₉	电缆接头不正常	设备	X ₂₀	未使用防爆工具	设备
X ₂₁	流量控制阀失效	设备	X ₂₂	泄压阀失效	设备
X ₂₃	超压报警装置失效	设备	X ₂₄	急停系统失效	设备
X ₂₅	储气/氢装置泄漏	设备	X ₂₆	管道受到外部冲击	设备
X ₂₇	管道老化	设备	X ₂₈	阀门密封不良	设备
X ₂₉	法兰垫片失效	设备	X ₃₀	阀门材料老化或损坏	设备
X ₃₁	阀门/仪表连接处松动	设备	X ₃₂	携带电子设备	人员
X ₃₃	无防静电措施	人员	X ₃₄	设备接地故障	设备
X ₃₅	未设置防静电装置	设备	X ₃₆	超温报警装置失效	设备
X ₃₇	冷却水系统失效	设备	X ₃₈	高压密封头泄漏	设备
X ₃₉	高压卸荷阀磨损	设备	X ₄₀	密封件磨损	设备
X ₄₁	计量表泄漏	设备	X ₄₂	仪表接头泄漏	设备
X ₄₃	加气/氢枪泄漏	设备	X ₄₄	软管老化	设备
X ₄₅	防甩脱装置失效	设备			

由表5可知,基本事件中属于人员方面危险性的有11个,占比24.4%;属于物料危险性的有4个,占比8.9%;其余30个基本事件属于设备危险性,占比66.7%。根据所有基本事件和中间事件,构建出

气氢合建站事故树模型(见图6)。

由图6可知,气氢合建站事故树模型中共有26个逻辑门,其中“与”门5个,“或”门21个,“或”门数量远大于“与”门,事故危险程度较高。

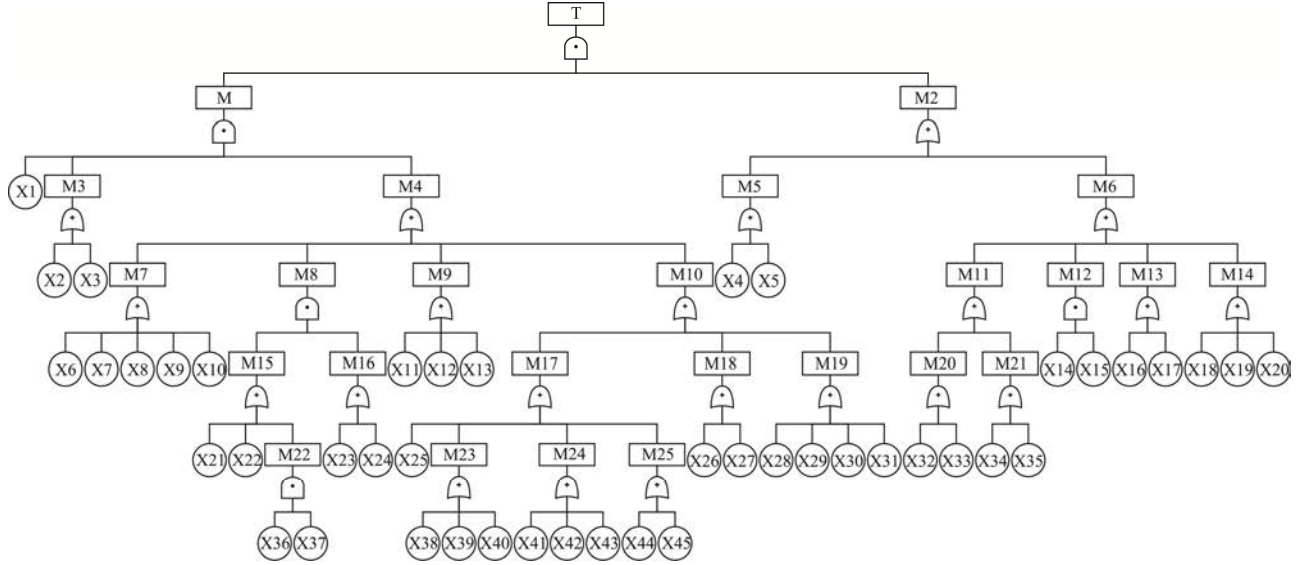


图6 气氢合建站事故树模型

Fig.6 Fault tree model of natural gas and hydrogen joint construction station

3.3.2 最小割集

割集是指事故树中能够导致顶上事件发生的基本事件的集合,最小割集则是指其最小集合,代表系统的危险性,最小割集越多,系统危险性越大^[23]。使用布尔代数运算法则求解事故树的最小割集,其表达式利用常用逻辑运算符乘(·)、加(+),将事故树各个事件连接起来,其中“与”门用“·”号连接,“或”门用“+”号连接。

采用布尔代数运算法则求解气氢合建站事故树最小割集的公式为

$$T=M_1 \cdot M_2=X_1 \cdot M_3 \cdot M_4 \cdot (M_5+M_6)=X_1 \cdot (X_2+X_3) \cdot (M_7+M_8+M_9+M_{10}) \cdot (X_4+X_5+M_{11}+M_{12}+M_{13}+M_{14})=X_1 \cdot (X_2+X_3) \cdot [X_6+X_7+X_8+X_9+X_{10}+(X_{21}+X_{22}+X_{36} \cdot X_{37}) \cdot (X_{23}+X_{24})+X_{11}+X_{12}+X_{13}+X_{25}+X_{38}+X_{39}+X_{40}+X_{41}+X_{42}+X_{43}+X_{44}+X_{45}+X_{26}+X_{27}+X_{28}+X_{29}+X_{30}+X_{31}] \cdot (X_4+X_5+X_{32}+X_{33}+X_{34}+X_{35}+X_{14} \cdot X_{15}+X_{16}+X_{17}+X_{18}+X_{19}+X_{20}) \quad (1)$$

最小割集的个数直接对应导致气氢合建站火灾爆炸事故的潜在路径个数,由式(1)求解可知,气氢合建站火灾爆炸事故的最小割集共有696个(见表6),即有696种潜在路径能导致气氢合建站火灾爆炸事故发生。其中,最小割集中包含7个基本事件的有4个,占比0.57%;最小割集中包含6个

基本事件的有48个,占比6.90%;包含5个基本事件的有138个,占比19.83%;包含4个基本事件的有506个,占比72.70%。

表6 最小割集(仅部分展示)
Tab.6 Minimum cut set (display only)

序号	集合
1	{X ₁ , X ₂ , X ₁₄ , X ₁₅ , X ₂₁ , X ₂₃ }
2	{X ₁ , X ₂ , X ₁₄ , X ₁₅ , X ₂₁ , X ₂₄ }
3	{X ₁ , X ₂ , X ₁₄ , X ₁₅ , X ₂₂ , X ₂₄ }
4	{X ₁ , X ₂ , X ₁₀ , X ₁₄ , X ₁₅ }
5	{X ₁ , X ₂ , X ₁₃ , X ₁₄ , X ₁₅ }
6	{X ₁ , X ₂ , X ₁₆ , X ₂₄ , X ₃₇ }
.....	
694	{X ₁ , X ₃ , X ₉ , X ₃₃ }
695	{X ₁ , X ₃ , X ₉ , X ₃₄ }
696	{X ₁ , X ₃ , X ₉ , X ₃₅ }

3.3.3 最小径集

径集是指防止顶上事件发生的基本事件的集合,最小径集则是指其最小集合,代表系统的安全性^[22]。为确定最小径集,须将事故树中的“与”门替换为“或”门,将“或”门替换为“与”门,并

把全部基本事件的“发生”替换成“不发生”，得到原事故树的成功树^[21, 24]，成功树的最小割集对应事故树的最小径集。

利用布尔代数运算法则求解成功树最小割集的公式为

$$T=M_1+M_2=X_1+M_3+M_4+M_5\cdot M_6=X_1+X_2\cdot X_3+M_7\cdot M_8\cdot M_9\cdot M_{10}+X_4\cdot X_5\cdot M_{11}\cdot M_{12}\cdot M_{13}\cdot M_{14}=X_1+X_2\cdot X_3+X_6\cdot X_7\cdot X_8\cdot X_9\cdot X_{10}\cdot [X_{21}\cdot X_{22}\cdot (X_{36}+X_{37})+X_{23}\cdot X_{24}]\cdot X_{11}\cdot X_{12}\cdot X_{13}\cdot X_{25}\cdot X_{26}\cdot X_{27}\cdot X_{28}\cdot X_{29}\cdot X_{30}\cdot X_{31}\cdot X_{38}\cdot X_{39}\cdot X_{40}\cdot X_{41}\cdot X_{42}\cdot X_{43}\cdot X_{44}\cdot X_{45}+X_4\cdot X_5\cdot X_{32}\cdot X_{33}\cdot X_{34}\cdot X_{35}\cdot (X_{14}+X_{15})\cdot X_{16}\cdot X_{17}\cdot X_{18}\cdot X_{19}\cdot X_{20} \quad (2)$$

由式(2)求解可知，气氢合建站事故树的最小径集有7个，表示共有7种手段制约顶上事件发生，最小径集统计结果见表7。

表7 最小径集
Tab.7 Most trail set

序号	集合
1	$\{X_1\}$
2	$\{X_2, X_3\}$
3	$\{X_4, X_5, X_{14}, X_{16}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{32}, X_{33}, X_{34}, X_{35}\}$
4	$\{X_4, X_5, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{32}, X_{33}, X_{34}, X_{35}\}$
5	$\{X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{21}, X_{22}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}, X_{31}, X_{36}, X_{37}, X_{38}, X_{39}, X_{40}, X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}, X_{45}\}$
6	$\{X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{21}, X_{22}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}, X_{31}, X_{37}, X_{38}, X_{39}, X_{40}, X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}, X_{45}\}$
7	$\{X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}, X_{31}, X_{38}, X_{39}, X_{40}, X_{41}, X_{42}, X_{43}, X_{44}, X_{45}\}$

3.3.4 结构重要度

结构重要度是不考虑各基本事件的发生概率，仅从事故树结构上分析各基本事件的发生对顶上事件发生的影响程度。通过分析事故树的结构重要度系数，使得决策者在制定气氢合建站的安全管理措施方面有主次之分，管理措施更加合理有效^[21, 25]。

结构重要度系数的计算公式为

$$I_i = \sum_{X_j \in C_j} \frac{1}{2^{h_j-1}} \quad (3)$$

式中： I_i 为第*i*个基本事件的结构重要度系数； $X_i \in C_j$ 为包含基本事件 X_i 的每个最小割（径）集； h_j 为基本事件 X_i 所在的最小割（径）集 C_j 中的基本事件个数。

由式(3)计算可知，气氢合建站火灾爆炸事

故树基本事件的结构重要度排序为 $I(X_1)>I(X_3)=I(X_2)>I(X_{35})=I(X_{34})=I(X_{33})=I(X_{32})=I(X_{20})=I(X_{19})=I(X_{18})=I(X_{17})=I(X_{16})=I(X_5)=I(X_4)>I(X_{15})=I(X_{14})>I(X_{45})=I(X_{44})=I(X_{43})=I(X_{42})=I(X_{41})=I(X_{40})=I(X_{39})=I(X_{38})=I(X_{31})=I(X_{30})=I(X_{29})=I(X_{28})=I(X_{27})=I(X_{26})=I(X_{25})=I(X_{13})=I(X_{12})=I(X_{11})=I(X_{10})=I(X_9)=I(X_8)=I(X_7)=I(X_6)>I(X_{24})=I(X_{23})=I(X_{22})=I(X_{21})>I(X_{37})=I(X_{36})$ 。

从上述排序结果可知，对气氢合建站火灾爆炸事故影响程度从大到小的基本事件依次是通风不良、火灾报警装置失效以及气体探测装置失效、站内吸烟等与站内点火源相关的基本事件、储气/氢装置泄漏等与站内气体泄漏相关的基本事件。

4 安全措施

通过对气氢合建站火灾爆炸事故的分析可知，导致事故发生的模式共696种，避免事故发生的模式共7种。根据对最小割集、最小径集以及结构重要度排序结果分析可知，气氢合建站的安全防控措施重点可从通风系统、站内保护装置、点火源以及气体泄漏等4方面制定。

4.1 通风系统

气氢合建站内良好的通风系统可有效避免泄漏气体聚集，保持良好通风效果的具体防控措施：

① 在原有加气站的通风系统上，增设功能强大的通风装置，合理布局通风装置的位置，及时将泄漏的氢气、天然气排出站外，使泄漏气体聚集量少或无法聚集；② 为通风系统增设自动监测和报警功能，一旦检测到泄漏气体浓度超标或通风系统出现问题，立即发出警报，提醒站内工作人员及时采取应对措施。

4.2 站内保护装置

加强站内保护装置的建设与维护，是有效避免站内火灾爆炸事故发生的关键。具体防控措施：

① 选用符合国家安全标准规范的报警器、阻火器等装置，以及具有较强防火性能的材料，同时合理布局各保护装置的位置；② 增设站内保护装置的检测系统，时刻监视保护装置的运行状态，若发现异常，则立刻进行维修；③ 建立严格的设备维护和检查制度，站内工作人员需定期检查站内保护装置，确保装置正常运行。

4.3 点火源

氢气和天然气属于易燃易爆气体，当其泄漏达到

一定浓度后,遇点火源容易引发火灾、甚至爆炸,因而站内点火源控制同样十分重要。站内点火源主要分为明火和火花,其中火花包括静电火花、雷击火花、碰撞火花以及电火花。对于各类点火源可采取的防控措施:①明火。站内设置禁令标志牌,例如严禁在站内吸烟等;在厕所等场所加装烟雾报警装置,一旦发生报警,站内人员即刻处理。②静电火花。工作人员接触设施设备时,必须严格遵守规章制度,穿好工作服,使用消除静电装置;安装防静电接地装置,同时按时检测各设施设备旁的防静电装置,确保其可以正常使用。③雷击火花。定期检查、及时维修站内的避雷装置,以及接地线等设备。④碰撞火花。严禁站内工作人员穿带铁钉的鞋,非必要不使用铁质工具,可使用铜制工具替代。⑤电火花。站内需配置防爆装置,并定期维修检查。

4.4 气体泄漏

气氢合建站内所用物料天然气和氢气在加注、卸气等过程中易发生泄漏,因而控制气体泄漏是避免站内发生火灾爆炸的有效途径之一。具体措施:①定期检查、维修、保养站内的设施设备,及时更换有破损或老化的零部件,确保设施设备正常使用;②站内各设备上合理布置气体浓度探测装置,若气体泄漏浓度超出一定范围,需立刻提醒工作人员进行处理,避免更严重事故发生;③加强站内管理制度的执行,培训站内工作人员,严格遵守设备操作步骤并时常抽查,保证每个员工熟悉操作流程。

5 结论

(1)气氢合建站是重要的氢能基础设施,建设气氢合建站是未来加氢站商业化发展的主要途径之一,可以节约用地成本、人力成本,以及解决单一加氢站面临的资金回笼困难等问题。与单一加氢站相比,加氢合建站的站内风险因素更加多变、复杂。

(2)建立气氢合建站安全风险评价模型,通过鱼骨图分析可能会引发气氢合建站火灾爆炸事故发生的主要因素,细化、整理分析结果,共得到45个基本事件和25个中间事件。

(3)以“气氢合建站火灾爆炸”为顶上事件,建立事故树模型,分析其最小割集、最小径集以及结构重要度,得到696个最小割集,7个最小径集。由此可知,影响气氢合建站火灾爆炸事故发生的潜

在路径较多,制约事故发生的路径较少,表明气氢合建站的火灾爆炸事故风险较高。

(4)气氢合建站应从通风系统、站内保护装置、点火源以及气体泄漏等4个方面制定安全措施,保障气氢合建站的安全运营,以期提高气氢合建站的安全性。

参考文献:

- [1] 张建平,朱力洋,王富平,等.川渝地区天然气与氢能产业融合度提升研究[J].资源开发与市场,2024,40(5): 667-676.
ZHANG J P, ZHU L Y, WANG F P, et al. Study on the integrated development of natural gas and hydrogen energy in Sichuan and Chongqing region[J]. Resource Development & Market, 2024, 40(5): 667-676.
- [2] 何太碧,蒲雨杉,何秋洁,等.天然气与氢能产业协同发展的机遇与挑战:以川渝地区为例[J].天然气技术与经济,2023,17(3): 67-73.
HE T B, PU Y S, HE Q J, et al. Opportunities and challenges for natural-gas and hydrogen industrial co-development: An example from Sichuan-Chongqing region[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2023, 17(3): 67-73.
- [3] 胡凯,袁鹏程,李佑霖.时变路网下‘绿色通勤需求响应型公交’调度优化模型[J/OL].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024(2024-04-10) [2024-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20240409.1007.002.html>.
HU K, YUAN P C, LI J L. Scheduling optimization model for ‘green commuter demand-responsive transit’ under time-varying road networks[J/OL]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2024(2024-04-10) [2024-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20240409.1007.002.html>.
- [4] ZHANG X, PEI W, MEI C X, et al. Transform from gasoline stations to electric-hydrogen hybrid refueling stations: An islanding DC microgrid with electric-hydrogen hybrid energy storage system and its control strategy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107684.
- [5] DU L M, LIAO G R, ZHANG T, et al. Risk assessment of fire and explosion accidents in oil-hydrogen fueling station based on fault tree analysis[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2723(1): 012005.
- [6] 康健,王之兴,王庆梓,等.油氢合建站时序性动态风险评估研究[J].安全与环境学报,2024,24(6): 2094-2103.
KANG J, WANG Z X, WANG Q Z, et al. Research on the temporal dynamic risk assessment of hybrid hydrogen-gasoline fueling stations[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(6): 2094-2103.
- [7] 汪侃,李丹阳,时婷婷.新型油氢合建站事故风险评价及应用[J].安全与环境学报,2021,21(1): 9-18.

- WANG K, LI D Y, SHI T T. Risk assessment approach and its application to the new-type oil-hydrogen station accidents [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(1): 9-18.
- [8] NAKAYAMA J, SAKAMOTO J, KASAI N, et al. Preliminary hazard identification for qualitative risk assessment on a hybrid gasoline-hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system using organic chemical hydride [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(18): 7518-7525.
- [9] 朱兴珊, 沈学思. 从天然气到氢: 中国新型能源体系的演化[J]. *国际石油经济*, 2023, 31(8): 1-15.
ZHU X S, SHEN X S. From natural gas to hydrogen: The evolution of the new energy system in China[J]. *International Petroleum Economics*, 2023, 31(8): 1-15.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 汽车加油加气加氢站技术标准: GB 50156-2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Technical standard of fuelling station: GB 50156-2021[S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [11] 何润民, 赵莉, 黄星, 等. 川渝地区天然气产业与氢工业融合发展路径[J]. *天然气工业*, 2023, 43(9): 162-173.
HE R M, ZHAO L, HUANG X, et al. Path for integrated development of natural gas and hydrogen in the Sichuan-Chongqing region[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(9): 162-173.
- [12] 王意东, 何太碧, 汪霞, 等. 中国天然气汽车产业未来发展建议[J]. *天然气工业*, 2020, 40(7): 106-112.
WANG Y D, HE T B, WANG X, et al. Suggestions on the future development of natural gas vehicle industry in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(7): 106-112.
- [13] 陈建. 北京市CNG汽车推广发展及配套加气设施建设研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
CHEN J. Research on CNG automobile promotion and development and supporting gas filling facilities in Beijing [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [14] 童亮, 袁裕鹏, 李骁, 等. 我国氢动力船舶创新发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(3): 127-139.
TONG L, YUAN Y P, LI X, et al. Innovative developmental of hydrogen-powered ships in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(3): 127-139.
- [15] 樊华伟. 危险源识别及评价工作要点[J]. *化工设计*, 2023, 33(3): 48-50, 2.
FAN H W. Key points of hazard identification and evaluation work[J]. *Chemical Engineering Design*, 2023, 33(3): 48-50, 2.
- [16] 李开元, 邱小秦. 安全风险辨识及评价中存在的问题探讨[J]. *安全*, 2019, 40(2): 29-32.
LI K Y, QIU X Q. Discussion on problem of safety risk identification and assessment[J]. *Safety & Security*, 2019, 40(2): 29-32.
- [17] 郑津洋, 刘自亮, 花争立, 等. 氢安全研究现状及面临的挑战[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(1): 106-115.
ZHENG J Y, LIU Z L, HUA Z L, et al. Research status-in-situ and key challenges in hydrogen safety[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(1): 106-115.
- [18] 黄章俊, 徐通, 何洪浩, 等. 基于人工神经网络的甲烷富氧燃烧机理优化[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(4): 520-527.
HUANG Z J, XU T, HE H H, et al. Mechanism optimization for methane oxygen-enriched combustion based on artificial neural network[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44(4): 520-527.
- [19] 张海玉. XX CNG加气站建设项目风险管理研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
ZHANG H Y. Risk management of construction project of XX CNG filling station[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [20] 杨斯淇. 危险货物运输管理流程优化与系统实现[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
YANG S Q. Hazmat transportation management process optimization and system realization[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [21] 刘望, 杨晓冬, 戴超. 基于危险度评价和事故树分析的加氢站安全风险研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(增刊1): 50-55.
LIU K, YANG X D, DAI C. Study on the safety risk of hydrogen refueling station based on risk assessment and fault tree analysis[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(S1): 50-55.
- [22] 王俊波, 梅欢. 基于事故树理论的煤矿瓦斯爆炸事故原因分析和对策研究[J]. *当代化工研究*, 2022(15): 111-113.
WANG J B, MEI H. Cause analysis and countermeasure research of coal mine gas explosion accident based on accident tree theory[J]. *Modern Chemical Research*, 2022(15): 111-113.
- [23] 木拉里·马扎甫, 王越, 黄超. 复杂事故树最小割集和最小径集求解模式研究[J]. *中国教育技术装备*, 2024(2): 53-55.
MAZHAFU M L L, WANG Y, HUANG C. Study of minimum cut set and minimum path set solving patterns of complex accident tree[J]. *China Educational Technology & Equipment*, 2024(2): 53-55.
- [24] 赵自豪, 李鹏慧. 最小径集求解方法及Mathematica实现 [J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 37(2): 27-32.
ZHAO Z H, LI P H. Solutions to minimum path sets and its implementation in Mathematica[J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 37(2): 27-32.
- [25] 王瑞鹏, 王金安. 西露天矿边坡失稳影响因素分析[J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(1): 64-70.
WANG R P, WANG J A. Analysis on the influence factors of slope instability in west open-pit mine[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(1): 64-70.

(编辑: 鄢爱民 曹梦迪)