文章编号:1674-2869(2024)03-0325-05

液氢槽车氢泄漏风险分析

张浩天[1],杨 红[*1,2],薛家铖[1],李 翔[3,4],张首华[1],李超元[1]
1. 武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430074;
2. 化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室(武汉工程大学),湖北 武汉 430074;
3. 中国特种设备检测研究院,北京 100029;
4. 氢能储运装备安全国家市场监管重点实验室,北京 100029

摘 要:运用风险管理系统工程原理,采用故障树分析法,对液氢槽车运行过程中的氢泄漏风险进行分析评估。分析了液氢槽车氢泄漏事故机理,明确基本事件32项和中间事件17项,建立了故障树模型。基于故障树的结构分析,求解最小割集,确定了各基本事件的结构重要度。基于专家经验判断的模糊方法预测基本事件概率,采用最小割集计算法近似计算氢泄漏顶事件的发生概率,并计算事件概率重要度,实现故障树的半定量分析,构建基于故障树的液氢槽车氢泄漏风险评价体系。基于事件的结构重要度和概率计算,确定了外力损坏罐体、外热损坏罐体、制止阀卡死、安全阀故障、外力损坏制止阀、泄压失效6项重要风险,并从运营单位日常定检、罐车防护装置设置、液氢储罐失效监测等方面提出了针对性的防范措施以降低液氢槽车氢泄漏风险。

关键词:液氢槽车;氢泄漏;风险评估;故障树分析;防范措施
中图分类号:TK91 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202311001

Risk analysis of hydrogen leakage in liquid hydrogen tankers

ZHANG Haotian[1], *YANG Hong*[*1,2], *XUE Jiacheng*[1], *LI Xiang*[3,4], *ZHANG Shouhua*[1], *LI Chaoyuan*[1]
1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Provincial Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety (Wuhan Institute of Technology), Wuhan 430074, China;
3. China Special Equipment Testing and Research Institute, Beijing 100029, China;
4. State Key Laboratory of Market Supervision for Hydrogen Energy Storage and Transportation Equipment Safety, Beijing 100029, China

Abstract: The risk of hydrogen leakage during the operation of liquid hydrogen tankers was analyzed and assessed by using the principles of risk management system engineering and the fault tree analysis method. The mechanisms behind the hydrogen leakage accidents in the liquid hydrogen tankers were analyzed, outlining 32 basic events and 17 intermediate events, establishing a fault tree model. Based on the structural analysis of fault trees, the minimum cut set was solved to determine the structural importance of each basic event. A fuzzy method based on expert experience judgment was used to predict the probability of basic events. The minimum cut set calculation method was used to approximate the probability of hydrogen leakage top event, and the importance of event probability was calculated. Semi-quantitative analysis of fault trees was achieved, and a hydrogen leakage risk assessment system for liquid hydrogen tankers based on fault trees

收稿日期:2023-11-01
基金项目:河北省重点研发计划项目(22314401D);化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室开放课题(2023KA03)
作者简介:张浩天,硕士研究生。Email:297020752@qq.com
***通信作者**:杨 红,博士,教授。Email:2373655378@qq.com
引文格式:张浩天,杨红,薛家铖,等. 液氢槽车氢泄漏风险分析[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(3):325-329.

was constructed. Based on the structural importance and probability calculations of events, 6 significant risks were identified: external force damage to the tank body, external heat damage to the tank body, jamming of the shut-off valves, safety valves failure, external force damage to the shut-off valves, and pressure relief failure. Targeted preventive measures were proposed, including daily routine inspection, installation of tanker protective devices, and monitoring of liquid hydrogen tank failure, to reduce the risk of hydrogen leakage in liquid hydrogen tankers.

Keywords: liquid hydrogen tanker; hydrogen leakage; risk assessment; fault tree analysis; preventive measures

氢能是公认的清洁能源,其能量密度高、零污染、储量丰富,被誉为“终极能源”。当前,氢能应用的推广遇到诸多挑战,尤其是氢能的规模化、高效益制取及远程运输等技术。相较于其他储供氢模式,低温液态储供氢模式具有储氢比重高、运输成本低、汽化纯度高、储运压力低和使用安全性高等优势。液氢槽车是液氢公路运输的主要形式,其运输存储容量高,使用灵活性强,尤其适用于中等距离运输。液氢槽车的移动特性,导致氢泄漏的风险增大,液氢一旦泄漏,会迅速蒸发形成可燃氢气云,氢气云遇到静电火花或者火星均有可能发生爆燃。液氢泄漏及其可能引起的安全问题是液氢大规模应用必须解决的关键问题之一[1]。

风险评估可识别导致风险的主要因素,为有效的风险应对提供基于证据的信息和分析,是风险管理的核心内容[2]。风险管理技术推广以来,在各行各业得到了应用[3-4]。国际上已实现液氢风险定量分析评估,建立了较全面的技术规范和标准体系,而国内前期的应用主要集中在航天航空领域,在民用领域的研究相对滞后,亟需开展相关研究,并建立和逐步完善民用液氢标准体系。

故障树分析(fault tree analysis,FTA)是风险可能性分析的一种有效手段,可对故障的潜在原因及途径进行定性分析,也可以在掌握事件概率的相关数据之后,定量计算重大事件的发生概率[5]。缺乏历史的事故数据,是液氢槽车风险评估的一大难点,而液化天然气(liquefied natural gas,LNG)槽罐车和液氢槽车有类似的使用环境,因此可借鉴LNG槽罐车的历史事故数据。综上所述,本文围绕液氢槽车的氢泄漏风险,借鉴LNG槽车的使用经验,采用FTA方法,识别风险事件,建立氢泄漏故障树,通过定性和半定量分析,识别重点风险,并提出氢泄漏事故风险防范措施,为液氢槽车的安全可靠运行提供技术支撑。

1 液氢槽车风险评估流程

风险评估是由风险识别、风险分析和风险评价构成的一个完整过程,液氢槽车氢泄漏风险评估流程见图1。

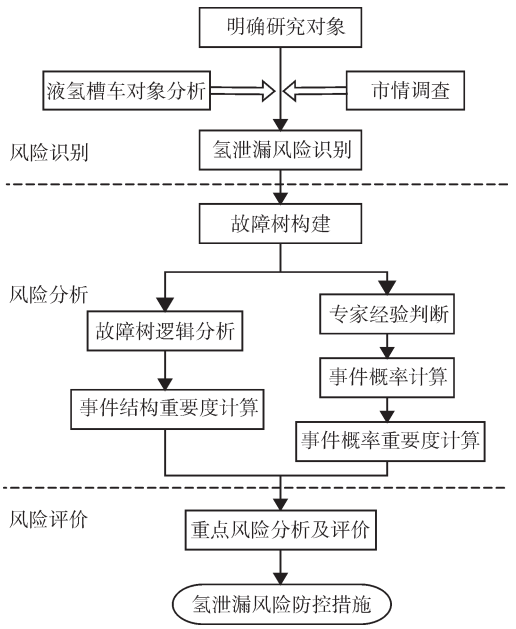

图1 液氢槽车风险评估流程图

Fig. 1 Risk assessment process diagram for liquid hydrogen tanker

在明确液氢槽车系统为研究对象,确定“液氢槽车氢泄漏”顶事件后,基于液氢槽车对象的系统分析和相关市情调查,完成风险识别,并建立故障树。基于故障树的风险分析包括定性分析和定量分析,定性分析基于故障树的逻辑分析,对其结构进行简化,求出最小割集和最小径集,确定各基本事件的结构重要度;定量分析基于各基本事件的发生概率,计算顶事件的发生概率和事件概率重要度。事件发生概率可基于事故数据库直接选用,但我国尚未建立统一完善的液氢槽车氢泄漏事故数据库,本文仅依赖专家经验的模糊判断来预测基本事件概率,是一种半定量分析方法。基于结构重要度和概率重要度分析确定重点风险,以此制定风险防范措施。

2 氢泄漏风险识别及故障树建立

液氢槽车氢泄漏事故的风险分为管理缺陷导

致的泄漏和设备本身故障导致的泄漏[6]两类。以液氢槽车氢泄漏为顶事件（符号T），通过故障树原理对事故后续原因进行分析，明确中间事件17项（符号M）、基本事件32项（符号X），建立故障树基本事件分析表（表1），并据此建立故障树（图2）。

3　氢泄漏风险分析

3.1　结构重要度分析

故障树定性分析的主要内容是求解故障树的最小割集，并计算基本事件的结构重要度[7]。最小割集是指引起顶事件发生所必须的最低限度的割集。据此分析统计液氢槽车氢泄漏故障树最小割集29项，见表2。

基本事件的结构重要度由其位于故障树结构中的位置决定，位置差异会影响其对顶事件的作用。通常按式（1）计算第i个基本事件的结构重要度I：

$$I(i)=\frac{1}{k}\sum_{j=1}^{m}\frac{1}{R_j} \tag{1}$$

式（1）中：k为故障树包含的最小割集的数目；m为包含第i个基本事件的最小割集的数目；R_j为包含第i个基本事件的第j个最小割集中基本事件的数目。

根据式（1）计算得到的液氢槽车氢泄漏基本

表1　液氢槽车氢泄漏故障树事件表

Tab. 1　Fault tree event table for liquid hydrogen tanker hydrogen leak

符号	事件	符号	事件	符号	事件	符号	事件
T	液氢槽车氢泄漏	M13	罐体内压增加	X9	外热损坏罐体	X22	安全阀故障
M1	管理缺陷	M14	液相阀破裂	X10	设计制造缺陷	X23	泄压失效
M2	设备故障	M15	外界温度影响	X11	法兰密封失效	X24	压力表失效
M3	罐体泄漏	M16	罐体超载	X12	泵故障	X25	交通事故作用于气相阀
M4	管路系统故障	M17	非常规泄漏	X13	管件破损	X26	过流阀未关闭
M5	制止阀泄漏	X1	制度不健全	X14	制止阀密封失效	X27	交通事故作用于液相阀
M6	强度降低	X2	资源保障不足	X15	制止阀卡死	X28	温度计失效
M7	阀门失效	X3	应急响应计划缺乏	X16	罐体腐蚀	X29	保温层失效
M8	制止阀损坏	X4	安全教育不够	X17	罐体材料氢脆	X30	长时间靠近高温热源
M9	罐体压力过高	X5	安全监督不力	X18	环境灾害	X31	液位计失效
M10	气相阀破裂	X6	操作规程不规范	X19	人为破坏	X32	违规装载
M11	液相阀破裂且过液管未关闭	X7	驾驶员培训管理不足	X20	压力增加		
M12	安全附件失效	X8	外力损坏罐体	X21	外力损坏制止阀		

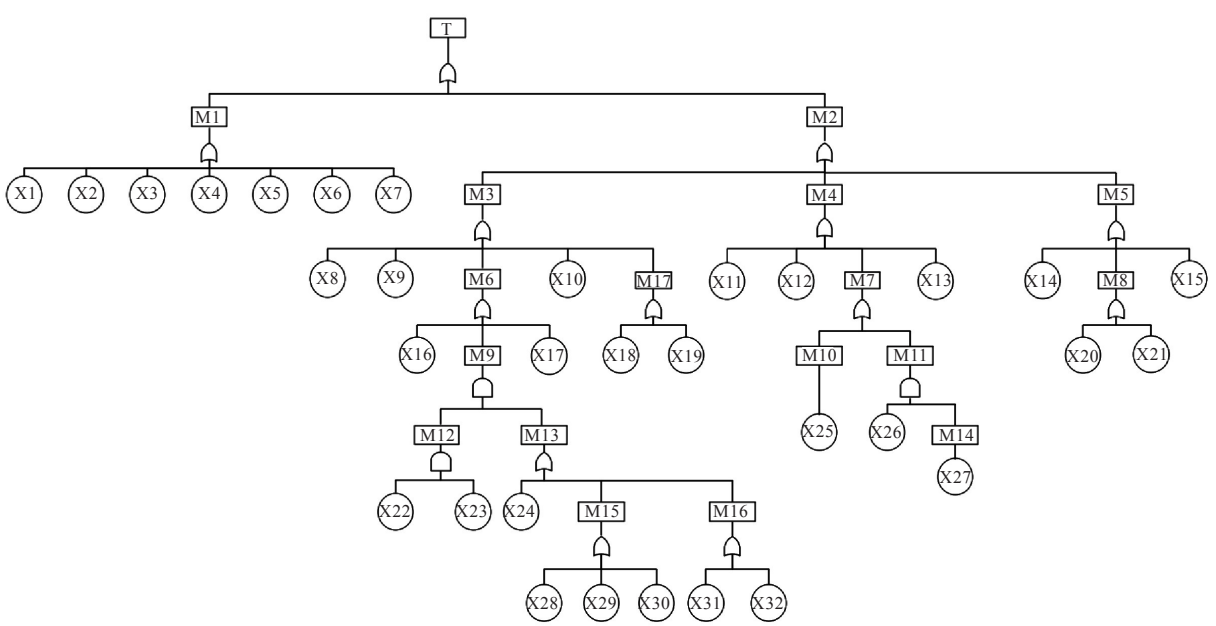

图2　液氢槽车氢泄漏故障树

Fig. 2　Fault tree for hydrogen leak in liquid hydrogen tanker

表2 液氢槽车氢泄漏最小割集统计表

Tab. 2 Minimum cut set statistics table for hydrogen leak in liquid hydrogen tanker

序号	最小割集	序号	最小割集	序号	最小割集
1	X1	11	X11	21	X21
2	X2	12	X12	22	X22,X23,X24
3	X3	13	X13	23	X22,X23,X28
4	X4	14	X14	24	X22,X23,X29
5	X5	15	X15	25	X22,X23,X30
6	X6	16	X16	26	X22,X23,X31
7	X7	17	X17	27	X22,X23,X32
8	X8	18	X18	28	X25
9	X9	19	X19	29	X26,X27
10	X10	20	X20		

事件结构重要度见表3。根据表3可排列出各基本事件的结构重要度顺序,其中,安全阀故障(X22)和泄压失效(X23)两事件的结构重要度最大(0.069),司机和运营单位应该特别注意。

表3 液氢槽车氢泄漏基本事件结构重要度

Tab. 3 Importance of basic event structure for hydrogen leak in liquid hydrogen tanker

基本事件	I	基本事件	I	基本事件	I
X1	0.034	X12	0.034	X23	0.069
X2	0.034	X13	0.034	X24	0.011
X3	0.034	X14	0.034	X25	0.034
X4	0.034	X15	0.034	X26	0.017
X5	0.034	X16	0.034	X27	0.017
X6	0.034	X17	0.034	X28	0.011
X7	0.034	X18	0.034	X29	0.011
X8	0.034	X19	0.034	X30	0.011
X9	0.034	X20	0.034	X31	0.011
X10	0.034	X21	0.034	X32	0.011
X11	0.034	X22	0.069		

3.2 事件概率计算

定量分析有助于客观地量化风险,并提供基于数据和统计分析的决策支持。故障树定量分析基于各基本事件的发生概率,计算顶事件的发生概率和事件概率重要度。

(1)基本事件概率获取

本文依赖专家经验的模糊判断来预测基本事件概率,借鉴LNG槽罐车的使用经验,针对武汉地区相关从业人员开展液氢槽车氢泄漏风险基本事件概率预测的专家问卷调查。根据专家知识水平、工作经验等确定专家公信度。专家判断的自然语言包括很小、较小、中等、较大、很大5种程度,采用模糊数学的方法,实现专家自然语言的模糊化,最终利用模糊可能性值求出模糊失效概率[8]。根据调查结果计算得到故障树所有基本事件的预测概率,见表4。具体的调查及计算过程,笔者另撰文介绍。

表4 液氢槽车氢泄漏基本事件发生概率统计表

Tab. 4 Probability statistics table of basic event occurrence for hydrogen leak in liquid hydrogen tanker

基本事件	概率值	基本事件	概率值	基本事件	概率值
X1	8.068×10^{-4}	X12	8.380×10^{-4}	X23	4.056×10^{-4}
X2	7.955×10^{-4}	X13	3.297×10^{-4}	X24	4.790×10^{-4}
X3	8.629×10^{-4}	X14	5.505×10^{-4}	X25	2.253×10^{-4}
X4	9.289×10^{-4}	X15	1.289×10^{-3}	X26	5.914×10^{-4}
X5	7.732×10^{-4}	X16	4.342×10^{-4}	X27	8.380×10^{-4}
X6	9.745×10^{-4}	X17	3.340×10^{-4}	X28	4.237×10^{-4}
X7	3.434×10^{-4}	X18	6.427×10^{-4}	X29	1.006×10^{-3}
X8	1.444×10^{-3}	X19	3.587×10^{-4}	X30	5.910×10^{-4}
X9	1.224×10^{-3}	X20	3.081×10^{-4}	X31	9.001×10^{-4}
X10	1.800×10^{-4}	X21	1.422×10^{-3}	X32	2.654×10^{-4}
X11	4.239×10^{-4}	X22	2.300×10^{-3}		

(2)顶事件概率计算

故障树顶事件的概率计算方法有多种,本文采用最小割集计算法[9]。设故障树中的第j个最小割集为K_j,首先求取最小割集发生概率,再根据首项近似法,近似计算顶事件发生概率[10]。计算公式为:

$$P\left(K_j\right)=\prod_{X_i\in K_j}P_i \tag{2}$$

$$P(\mathrm{T})=\sum_{j=1}^{n}P\left(K_j\right) \tag{3}$$

式(2-3)中:P_i为基本事件X_i的发生概率;$P(\mathrm{T})$为顶事件发生的概率;$P(K_j)$为最小割集发生的概率;n为故障树中包含最小割集的数目。

据此计算出"液氢槽车氢泄漏"顶事件的发生概率为1.549×10^{-2},数值小于0.05,属于小概率事件。

(3)基本事件概率重要度计算

概率重要度表示基本事件发生概率的变化对顶事件发生概率的变化的影响程度[11]。概率重要度I_{g}的数学定义为:

$$I_{\mathrm{g}}(i)_j=P_j/P_i \tag{4}$$

$$I_{\mathrm{g}}(i)=\sum_{j=1}^{k}I_{\mathrm{g}}(i)_j \tag{5}$$

式(4-5)中:$I_{\mathrm{g}}(i)_j$为第j个最小割集中第i个基本事件的概率重要度;P_j为第j个最小割集的发生概

率；$I_g(i)$为故障树中第i个基本事件的概率重要度。

据此计算的液氢槽车氢泄漏基本事件概率重要度见表5。其中有22项基本事件的概率重要度为1，表示这些事件发生时，顶事件一定发生，需重点关注。

表5　液氢槽车氢泄漏基本事件概率重要度

Tab. 5　Probability importance of basic events for hydrogen leak in liquid hydrogen tanker

基本事件	I_g	基本事件	I_g	基本事件	I_g
X1	1.000	X12	1.000	X23	8.4300×10^{-6}
X2	1.000	X13	1.000	X24	9.3288×10^{-7}
X3	1.000	X14	1.000	X25	1.000
X4	1.000	X15	1.000	X26	8.3800×10^{-4}
X5	1.000	X16	1.000	X27	5.9140×10^{-4}
X6	1.000	X17	1.000	X28	9.3288×10^{-7}
X7	1.000	X18	1.000	X29	9.3288×10^{-7}
X8	1.000	X19	1.000	X30	9.3288×10^{-7}
X9	1.000	X20	1.000	X31	9.3288×10^{-7}
X10	1.000	X21	1.000	X32	9.3288×10^{-7}
X11	1.000	X22	1.49×10^{-6}		

4　风险评价及防范

风险评价的内容较多，最基本的评价是将风险分为需应对和无需应对两类，再对需应对的风险进行分级，对重点因素进行分析，提出防范措施[12]。液氢槽车氢泄漏的发生概率虽然较低，但后果严重，必须应对。

基于前文的概率计算，重点关注概率重要度大（重要度值为1）且发生概率绝对值较大的基本事件，得到4项重点风险因素：外力损坏罐体（X8）、外热损坏罐体（X9）、制止阀卡死（X15）、外力损坏制止阀（X21）。基于结构重要度分析，安全阀故障（X22）和泄压失效（X23）两事件为重点风险。

针对6项重点风险，制定防范措施。从日常定期的检查和维护上入手，加强有针对性的监督检查，降低制止阀卡死发生的概率；增加槽车安全附件定期检查的次数，避免安全阀故障和泄压失效，降低危害影响范围；运输罐车设置防护装置，其强度和性能须保证罐体及其连接附件（管路、阀门、仪表等）发生意外碰撞时起到保护作用；采取有效措施加强液氢储罐失效监测，尤其是绝热层损坏及真空度丧失等导致隔热效果降低的情况，防止外热损坏罐体，确保液氢环境的有效保持。

5　结　论

液氢槽车氢泄漏事故后果严重，有效的风险评估和应对具有重要意义。引发氢泄漏事故的可能原因众多，既有管理缺陷导致的，也有设备本身故障原因，氢泄漏故障树直观描述了原因因素与顶事件的逻辑关系，是类似复杂系统风险分析的有效手段。基于故障树结构重要度分析和事件概率计算，确定了6项重点风险，并从运营单位日常定检、罐车防护装置设置、液氢储罐失效监测等方面提出了针对性的防范措施，对降低氢泄漏事故风险有一定指导意义。

参考文献

[1] 耿银良，应强，李建立，等.液氢泄漏扩散及安全预防研究进展[J].真空与低温，2023，29(2)：153-162.

[2] 邱菀华.现代项目风险管理方法与实践[M].北京：中国电力出版社，2016.

[3] 李军锋.航天产品铁路运输行车安全风险管理方法研究[D].兰州：兰州交通大学，2020.

[4] 林萍翡.福建石化公司环境风险管理研究[D].衡阳：南华大学，2021.

[5] 全国风险管理标准化技术委员会.风险管理 风险评估技术：GB/T 27921—2023[S].北京：中国标准出版社，2023.

[6] 韩锦明.LNG槽车公路运输事故应急处置方法和策略[J].城市燃气，2021(增刊)：125-129.

[7] 孙红梅，牟明明，高磊.故障树分析法的定性和定量分析研究[J].电子产品可靠性与环境试验，2023，41(3)：22-26.

[8] 雷柏茂，李江燕，梁佩博，等.基于模糊综合评判和层次分析法的中子管故障风险评估[J].原子能科学技术，2019，53(11)：2247-2256.

[9] 姚泳，李娜.化工容器腐蚀评价分析[J].广州化工，2022，50(5)：134-137.

[10] 赵自豪.Mathematica在事故树分析和计算中的应用研究[J].内蒙古科技大学学报，2020，39(1)：99-102.

[11] 范力.定量风险分析在氢气长管拖车风险评价中的应用[J].上海煤气，2023(4)：5-8.

[12] 曾宣慰.集输管道风险评估技术研究与应用[J].化工管理，2018(21)：153.

本文编辑：霍淑利