

考虑安防措施的撬装氢压缩机系统安全性分析

刘敏¹, 张雪松¹, 王许志², 李文博², 张存满²

(1. 国网浙江省电力有限公司 电力科学研究院, 杭州 310007; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 首先对氢压缩机氢安全事故进行了汇总与分析;进而开展基于故障树的撬装氢压缩机氢燃爆事故危险源识别;然后应用事件树分析,研究考虑系统安防措施的氢安全事故后果与发生概率;最后基于FLACS软件,结合人身与建筑物伤害标准,开展考虑安防措施的射流火焰、闪火与燃爆事故的风险量化评价,并提出了安防措施的优化建议。研究表明:氢泄漏主要是由设计缺陷和操作失误所引发,而氢泄漏检测装置的失效对燃爆事故有较大影响;各类氢安全事故发生概率均小于 3.3×10^{-3} /年,但氢气泄漏后氢射流火灾事故发生概率较高;对于射流火焰事故,最高温度可达 $2\,329.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大热流密度可达 399.0 kW/m^2 ;对于闪火事故,最大损伤半径可达 7.7 m ,最高温度可达 $3\,069.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;对于燃爆事故,其伤害半径最大为 5.5 m ,最大超压为 10 bar 。这些事故均会造成严重的人身伤害与集装箱结构损伤,因此压缩机安全距离应设置为 7.7 m 以上;而提高氢浓度传感器灵敏度、优化氢浓度传感器布局位置、增强排风系统排风量等措施可有效增强系统的安全性。

关键词: 撬装氢压缩机;故障树分析;事件树分析;氢事故后果量化评价

中图分类号: X937

文献标志码: A

Safety Study of a Skid Mounted Hydrogen Compressor Considering Protection Measures

LIU Min¹, ZHANG Xuesong¹, WANG Xuzhi², LI Wenbo², ZHANG Cunman²

(1. Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou, 310007, China; 2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper summarizes and analyzes the hydrogen safety accidents of hydrogen compressors based on the description of skid-mounted compressor systems; then, a fault-tree-based hazard identification of skid-mounted hydrogen compressor systems is carried out for

combustion and explosion accidents caused by hydrogen leakage; after that, an event tree analysis is applied to study the consequences and probability of hydrogen safety accidents considering system protection measures; finally, the consequences of jet flame, flash fire and explosion accidents caused by the hydrogen leakage considering protection measures is carried out based on FLACS software, combined with personal and building injury standards; besides, the optimization suggestions of safety equipment are proposed. The study shows that hydrogen leakage is mainly triggered by design faults and operational errors. Besides, failure of protection measures has a greater impact on fire or explosion events caused by hydrogen leakage; the probabilities of hydrogen safety accidents are all less than 3.3×10^{-3} /year, and jet fire happens the most frequently. In addition, the results of the accidents consequences show that, for the jet fire, the max temperature is 2329.8°C , and the maximum heat flux density is 399.0 kW/m^2 ; for the flash fire accident, the maximum damage radius is 7.7 m , the highest temperature is $3069.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; for the explosion accident, the maximum damage radius is 5.5 m , the maximum overpressure of 10 bar . These accidents will cause serious personal injury and container structure damage. In addition, the safe distance should be larger than 7.7 m . Moreover, the safety of the system can be effectively enhanced by improving the sensitivity of the hydrogen concentration sensor, optimizing the layout position of the hydrogen concentration sensor and enhancing the exhaust air volume of the exhaust system.

Keywords: skid-mounted hydrogen compressor; fault tree analysis; event tree analysis; quantitative of risk consequence of hydrogen accidents

氢能具有来源广、无污染、清洁高效、便于储存

收稿日期: 2023-11-25

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(B311DS221001)

第一作者: 刘敏(1986—),女,高级工程师,工学博士,主要研究方向为氢能技术、检试验及安全生产。E-mail: liumhb@126.com

通信作者: 李文博(1991—),男,博士后,工学博士,主要研究方向为氢事故危险源辨识与后果量化评价。E-mail: liwenbo@tongji.edu.cn

与运输等优点,可以部分替代化石能源,被誉为 21 世纪最有前景的清洁能源^[1-3]。氢电耦合系统具有能源消纳、提高电网灵活性、帮助建设新型电力系统等重要功能,是未来电力系统的重要组成部分^[4-5]。氢电耦合系统一般由电解制氢、氢气压缩、氢气储存和补充、氢气发电等环节组成。所有设备都放置在一个受限空间内,如集装箱^[6-7]。其中,氢气压缩系统是大规模储氢的核心结构,是氢电耦合系统的核心设备。氢气压缩系统的氢气安全性一直受到学术界和工业界的高度关注^[5-7]。

当前对涉氢装备的安全风险评价主要包含快速风险评价与量化风险评价。其中,快速风险评价基于专家经验,通过与风险矩阵比较得出风险评估结果^[8-9],该风险评价方式耗时短效率高,但主观性较强,不适用于对风险的深入量化分析。氢安全风险量化评价包含危险源辨识、失效概率分析、后果量化评价与风险度量。其中,危险源识别方法主要有危险与可操作性分析(HAZOP)^[10]等方法、失效模式与影响分析(FMEA)等^[11-12];概率分析方法主要有事件树分析(ETA)^[13]、故障树分析(FTA)^[14]等;后果量化评价则针对不同的事故后果,采用量化评价模型或商业软件进行分析,如用于爆炸模拟的 Baker 模型^[15],射流火焰模拟采用 Johnson 模型^[16]等,常用的商业软件主要有 FLACS 与 PHAST 软件;风险度量是后果和概率的综合,主要有个人风险与社会风险^[17-18]等。氢安全风险量化评价能够定量分析事故危害,确定事故的安全距离,有助于氢安全相关的法规制定与氢能设施的规模化应用。

前期针对氢安全风险量化评价已有大量研究。Yahao Shen 等对室外停车场氢泄漏行为进行了仿真模拟与安全性分析,并分析了车辆的适宜停放位置与安全距离,然而研究仅模拟了氢泄漏行为,并未对泄漏产生的射流、燃爆等事故进行进一步分析^[19]。Shigeki Kikukawa 等分析了 70 MPa 燃料电池汽车加氢站射流火焰与燃爆的事故后果,结果表明,6 m 的安全距离可以满足 70 MPa 加氢站的安全需求^[20]。Paola Russo 等考虑喷射火灾场景,基于 HyRAM 分析了加氢站的安全性,结果表明 700 bar 加氢站较 350 bar 加氢站的安全距离应增加 1.4 倍左右^[21]。Jin-yuan Qian 等针对加氢站储氢系统意外氢泄漏进行了流体动力学仿真分析,结果发现沿着释放方向,可燃气体云的边缘轮廓由储罐中氢气的总体积决定^[22]。Byoungjik Park 通过试验发现 hyRAM 中的射流火焰仿真较为保守,且人行道、拖车和分配器的风

险均较高,且应扩大安全距离降低加氢站风险^[23]。Ke Sun 等开展了上海市移动加氢站的安全风险分析,结果表明压缩机泄漏的故障率最高,危害影响也最严重^[24]。Xiangmin Pan 等基于 HAZOP 方法辨识氢泄漏故障场景,探索窒息、射流火焰、闪火、气云爆炸等的伤害距离与致死距离,结果表明,喷射火焰决定了最长的致死距离,而闪火导致了最长的伤害距离^[25]。Tomoya Suzuki 对日本某加氢站安全性进行了全面的评估,结果表明,该加氢站的第三方和人员事故均超出标准,此外,在所有的事故中,射流火焰的风险最大,需要加以限制;其在研究中进一步建立了基于多物理系统的动态物理模型,评估了泄漏源的动态工况信息,并以个人风险为指标开展了加氢站安全风险量化评价^[18,26]。Jo Nakayama 等分析了存在蓄意攻击的条件下的加氢站安全性^[27]。

前期对氢安全研究主要针对加氢站及关键装备的氢泄漏场景进行事故后果分析与风险量化评价,这类场景多处于大型的开放/半开放空间,泄漏孔位置则多设置为涉氢装备的中间,缺乏面向小型的受限空间场景下的涉氢装备氢泄漏安全性量化评价方面的研究。

一些学者应用 QRA 法深入分析了安全防护措施对加氢站安全事故的影响。Li Zhiyong 等对上海加氢站与世博加氢站进行了安全风险量化评价,研究表明,压缩机泄漏是造成第三方风险的主要因素,而加装外壳可以有效缓解压缩机第三方风险^[28-29]。Byoungjik Park 等提出城区扩建加氢站有燃爆风险,而主动独立保护层具有降低燃爆风险的作用^[30]。Kiyotaka Tsunemi 等考虑加氢站系统内部的安全屏障,针对开放式分配器周围的外部管道泄漏、蓄能器连接管道泄漏与压缩机泄漏等泄漏场景,考虑射流火焰与燃爆造成的个人风险与社会风险,进行了加氢站的风险量化评价,结果表明屏障可以有效的降低工人、消费者、行人等的风险水平^[31]。Hye-Ri Gye 等对城市加氢站进行了风险量化评价,发现长管拖车与加氢机的泄漏与燃爆会造成比较大的风险,设置安全屏障系统防止氢气持续泄漏可以有效提升加氢站的安全性^[32]。由此可见,前期研究多关注氢安全防护屏障对事故后果的影响,较少考虑安防设施(如氢浓度传感器,排风系统等)对氢泄漏事故的影响,这会导致氢事故后果量化不够准确。

本文以氢电耦合系统中受限空间压缩机系统为对象,通过事故调研分析压缩机氢泄漏事故的逻辑链与危险点,通过故障树分析进行系统危险源识别,

通过事件树分析研究考虑安防措施的氢安全事故发生概率,进而基于FLACS开展射流火焰、闪火与燃爆的三维风险量化评价。本文主要内容如下:第一部分进行氢压缩机橇安全分析流程;第二部分进行系统描述;第三部分进行压缩机系统危险场景分析;第四部分开展基于事件树的氢压缩机事故后果概率分析;第五部分开展基于FLACS的撬装氢压缩机氢安全事故后果三维风险量化评价。

1 考虑氢泄漏分级预警与防护的氢压缩机橇安全性分析流程

本文开展氢电耦合系统中压缩机橇的安全性分析,具体分析过程如图1所示,包括:(1)模型描述。主要对受限空间内的氢压缩机几何尺寸、结构、运行条件以及预警与防护措施进行了具体描述;(2)氢压缩机安全事故分析。通过调研获取压缩机氢安全事故的原因与后果,为事故后果量化评价提供氢泄漏点的位置信息;(3)危险源识别。基于故障树分析,识别出系统的危险事件与发生途径;(4)事故后果与概率;通过事件树分析,获取当前安防措施条件下,系统可能发生的事故后果与发生概率,为事故后果量化评价提供具体工况信息;(5)氢安全事故量化分析,针对(2)中获得的不同危险源与泄漏点位置,结合预警措施中传感器的响应时间,根据不同事故的伤害标准,对不同泄漏点位、不同泄漏时间的闪火、燃爆和射流进行事故后果量化评价,进而基于仿真结果开展安防措施修改与安全性评价,针对较为危险的事故,修改可能的安全防护措施。

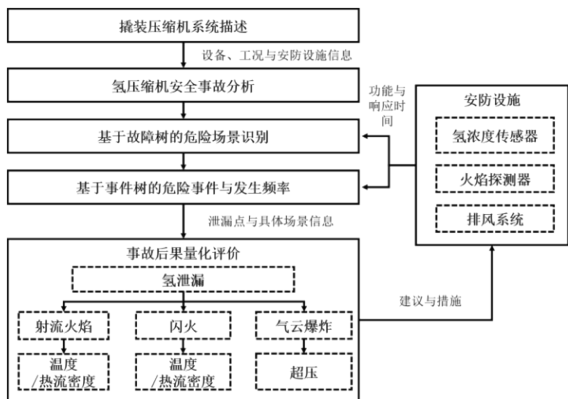


图1 考虑安防预警措施的事故风险后果氢压缩机橇安全性分析流程

Fig.1 Process for analyzing the safety of hydrogen compressor skids considering the consequences of accident risk for security warning measures

2 系统描述

系统模型是开展安全量化评价的基础,本文针对撬装氢压缩机系统进行具体描述。本文采用的氢压缩机是双缸两级膜式氢压缩机,如图2所示。其中:一级排气管位于氢压缩机右侧,排气管直径为10 mm,排气压力为8 MPa;二级排气管位于氢压缩机的上端,将气体排出至高压储氢系统中进行储存,排气管直径为8 mm,排气压力为22 Mpa。压缩机整体氢气排量为20 Nm³/h;压缩机总尺寸约为1.3 m×0.75 m×1.1 m,布置于集装箱中间偏左侧,箱体的尺寸约为2.55 m×1.40 m×2.25 m,且箱体上面设置一个风机,用于在监测到泄漏时强制排风,其质量流量为1.51 kg/s(可见氢压缩机被放置于一个较小的箱体中,显然这增大了压缩机氢泄漏后聚集的风险)。

撬装氢压缩机系统中布置有氢浓度传感器、火焰探测器与排风系统,其中氢浓度传感器、火焰探测器均布置于集装箱上部,如图2所示。其安全预警与防护策略为:当氢浓度为1%时,开启排风系统,并检查是否存在氢泄漏点;当氢浓度达到2%时,切断气源与电源,开启排风系统,并进行安全问题排查;若出现火焰,则切断气源与电源,开启排风系统。

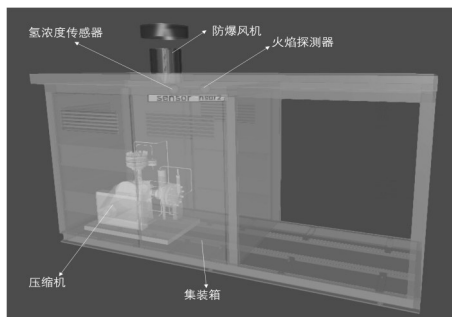


图2 撬装氢压缩机布置

Fig.2 Skid-mounted hydrogen compressor arrangements

3 撬装氢压缩机危险场景分析

3.1 压缩机氢安全事故分析

本文基于美国HIAD氢事故数据库,对近年来压缩机事故类型、事故原因与事故后果进行分析,如表1所示。由表1可知,氢泄漏主要是由设计故障、操作失误引发,其中,氢脆是压缩机泄漏的重要原因,在压缩机设计时需要使用抗氢脆性能好的材料。

表1 压缩机氢安全事故分析

Tab.1 Compressor hydrogen safety accident analysis

事故类型	泄漏位置	具体原因	原因归类
氢泄漏	压力传感器	氢脆导致传感器膜片破裂	设计缺陷—氢脆
	压缩机阀门接头	阀门接头、管线接头故障	操作失误—扭矩不足
	安全阀	止回阀故障导致氢气瓶和压缩机之间的压力上升到最大允许压力,造成安全阀的破裂片破裂,气瓶和相关管道部分的氢气被释放到建筑物顶部	设计缺陷
	高压吸入管道	工艺设备的不断振动使螺栓在高压吸入管道上摩擦出一个孔,导致补充氢的释放	设计缺陷
氢燃爆	缸盖开裂	缸盖处发生氢脆	设计缺陷
	止回阀破裂	内部关键组件(销钉、键等)氢脆造成止回阀轴破裂,迅速释放出大量氢气和碳氢化合物气体,随后起火	设计缺陷—氢脆
	压力开关失效	高压氢燃料站的压缩橇的压力开关上的一个焊接失效释放出的氢气。	设计缺陷

涉氢管路的阀门是事故的多发位置,需要重点关注。压缩机事故的泄漏点位主要出现在压缩机的氢气入口(如止回阀故障、吸入管道螺栓孔等),以及氢气出口气口(缸盖破裂等),其中,氢压缩机出口处排气压力较大,可能造成的事故危害较大,是本文重点分析的场景。缸盖破裂可能导致氢压缩机爆炸,是较为严重的氢安全事故。

3.2 基于故障树的压缩机危险源与危险场景辨识

压缩机作为氢利用系统的最重要的动设备,如

果发生故障将造成设备停机甚至导致氢气泄漏引起火灾爆炸事故,本文所研究的压缩机处于密闭的受限空间内,如果氢气泄漏,可燃氢气云团更容易积聚,在这种情况下若被点燃,可能后果严重的燃爆事故。因此本文采用故障树分析法对撬装压缩机燃爆事故危险源与重要程度进行定性分析。

本文确立了23个可能造成撬装氢压缩机发生泄漏并造成燃爆事故的基本事件,如表2所示,进而编制了如图3所示的故障树。

表2 压缩机燃爆事故FTA事件一览表

Tab.2 List of compressor explosion FTA events

符号	事件描述	符号	事件描述	符号	事件描述
T	压缩机撬燃爆事故	M_1	点火源	M_2	可燃氢气云团积聚
M_3	明火	M_4	电火花	M_5	机械火花
M_6	静电火花	M_7	雷击火花	M_8	氢气泄漏
M_9	通风故障	M_{10}	氢气探测失效	M_{11}	管路泄露
M_{12}	压缩机故障导致泄漏	M_{13}	膜片泄漏	X_1	吸烟
X_2	违章用火	X_3	漏电或短路	X_4	设备防爆失灵
X_5	铁质工具作业	X_6	老化、生锈的阀门启闭产生火花	X_7	人体静电
X_8	设备静电放电	X_9	发生雷击	X_{10}	避雷针失效
X_{11}	操作失误	X_{12}	阀门失效	X_{13}	氢脆
X_{14}	连接失效	X_{15}	外力碰撞	X_{16}	填料密封函失效
X_{17}	缸盖开裂	X_{18}	膜片破裂	X_{19}	传感器故障
X_{20}	通风装置未启动	X_{21}	供风能力不足	X_{22}	无氢气探测报警装置
X_{23}	氢气探测报警器失效				

以撬装压缩机燃爆事故作为一个故障树分析(fault tree analysis, FTA),其涵盖多个基本事件,利用结构重要度来判断事件的位置重要程度。结构重要度是从事故树结构的角度出发,假设各基本事件发生概率相等的条件下,分析基本事件影响顶上事件发生的重要程度,并进行排序结构重要度系数计算,公式如下^[33]:

$$I(i)=\sum_{X_j\in K_j}\frac{1}{2^{n_j}-1}\tag{1}$$

式中: $I(i)$ 为基本事件 X_i 的结构重要度系数; K_j 为包含基本事件 X_i 的每个最小割(径)集(见表3); n_j 为基本事件 X_i 所在的最小割(径)集 K_j 中的基本事件的

个数。

基于最小径集法,可以得到以下基本事件结构重要度排序:

$$I(X_{20})=I(X_{21})=I(X_{22})=I(X_{23})>I(X_{11})=I(X_{12})=I(X_{13})=I(X_{14})=I(X_{15})=I(X_{16})=I(X_{19})>I(X_1)=I(X_1)=I(X_2)=I(X_{31})=I(X_4)=I(X_5)=I(X_6)=I(X_7)=I(X_8)=I(X_{17})=I(X_{18})>I(X_9)=I(X_{10})$$

由此可得对顶事件发生影响最大的基本事件,结论为: X_{20} (通风装置未启动)、 X_{21} (供风能力不足)、 X_{22} (无氢气探测报警装置)、 X_{23} (氢气探测报警器失效)所代表的基本事件不发生,对氢气泄漏引发的火

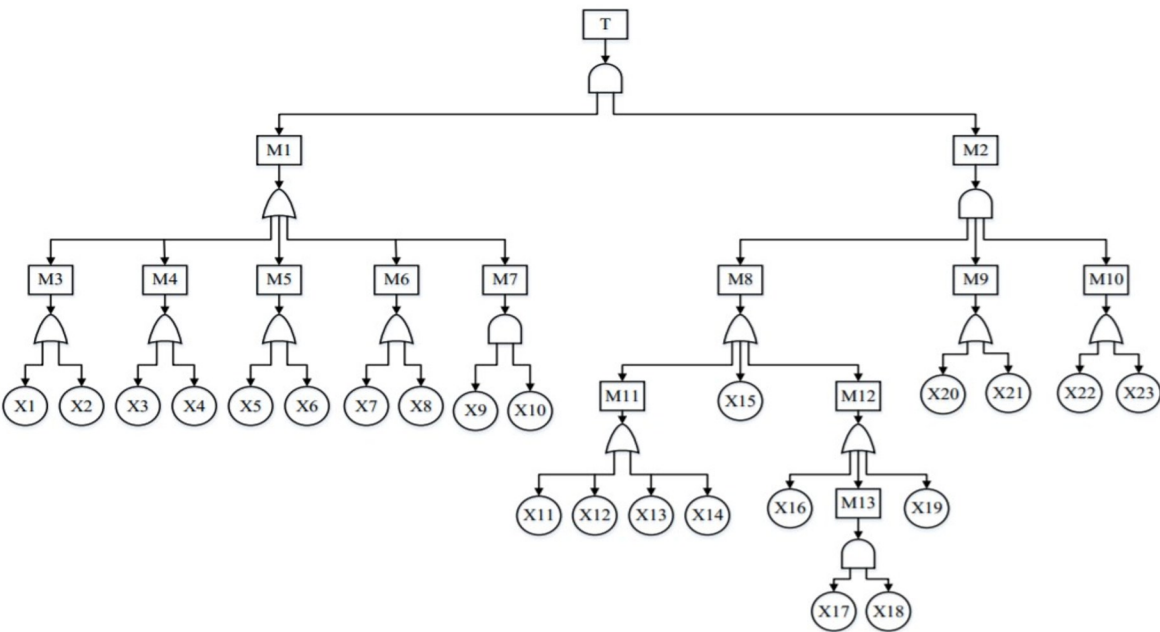


图3 撬装氢压缩机燃爆事故故障树

Fig.3 Skid mounted hydrogen compressor explosion accident fault tree

表3 最小径集

Tab.3 Minimum Trail Set	
符号	最小径集
K_1	$X_1 * X_2 * X_3 * X_4 * X_5 * X_6 * X_7 * X_8 * X_9$
K_2	$X_1 * X_2 * X_3 * X_4 * X_5 * X_6 * X_7 * X_8 * X_{10}$
K_3	$X_{11} * X_{12} * X_{13} * X_{14} * X_{15} * X_{16} * X_{17} * X_{19}$
K_4	$X_{11} * X_{12} * X_{13} * X_{14} * X_{15} * X_{16} * X_{17} * X_{18} * X_{19}$
K_5	$X_{20} * X_{21}$
K_6	$X_{22} * X_{23}$

灾或爆炸事件不发生的影响最大。在布置防控方案时,需要重点考虑这四个基本事件。

4 危险事故与频率分析

根据点火时间的不同,压缩机氢泄漏的事故后果主要可分为射流、闪火、爆炸事故。如氢泄漏后立即点火会发生射流事故,氢泄漏后延迟点火,则氢气云团会发生聚集,进而导致发生闪火或者燃爆。本文建立了考虑安防系统措施的氢事故后果发生频率量化评价模型,如图4所示。

当氢泄漏事故发生后,若发生立即点火,则可能出现射流火焰,若火焰被火焰探测器检测到,则可以及时切断气源,阻止射流火焰的持续,火焰探测器响应时间为2 s,则射流时间设置为2 s,若火焰探测器失效,则射流可以持续较长时间,本文设置为60 s。若氢泄漏后发生延迟点火,则氢气泄漏后可形成氢气云团,进而引发闪火与爆炸。若氢浓度传感器未

失效,且排风与切断起源安防措施有效,则在氢浓度传感器感知到泄漏时,断开气源与电源,打开排风系统,将氢气排放出,由于氢浓度传感器的响应时间为10s,电磁阀切断气源的时间约为1 s,则该工况下氢泄漏时间为11 s;若氢浓度传感器有效而排风系统失效,切断气源后无法进行排风,则氢气会在受限空间中大量聚集,引发更严重的燃爆事故。此外,若氢浓度传感器失效,则由于无法监测到氢浓度信号,进而导致氢气持续泄漏,此时若遇到电火花,会引发严重燃爆事故,本文假设此时氢气泄漏时间为30 s,进而碰到电火花点燃,造成闪火与燃爆事故。若氢泄漏后没有遇到电火花,则不会造成任何危害。

对于不同失效事件的概率确定,其中压缩机的泄漏概率采用李志勇等人的给出的 6.5×10^{-2} /年^[28-29]。对于火焰探测器与氢泄漏传感器的失效概率,Tomoya Suzuki等人基于碳氢化合物气体催化火灾和气体探测器的故障率进行了计算,得到氢泄漏传感器的失效频率为 3.3×10^{-2} /年,火焰探测器失效的频率为 2.9×10^{-2} /年^[18]。通过文献[34]获取了排风系统的失效概率为 7.5×10^{-2} /年。此外,基于HyRAM数据库,氢气立即点火的概率为 5.53×10^{-2} /年,氢气延迟点火的概率为 2.7×10^{-2} /年^[35]。而氢气延迟点火后发生闪火的概率为0.6,发生爆炸的概率为0.4^[36]。由此,可以得到各种事故条件下氢泄漏事故的概率,如图4所示。Xiangmin Pan等的研究认为,发生概率超过 3.5×10^{-5} /年的事故才应该被考

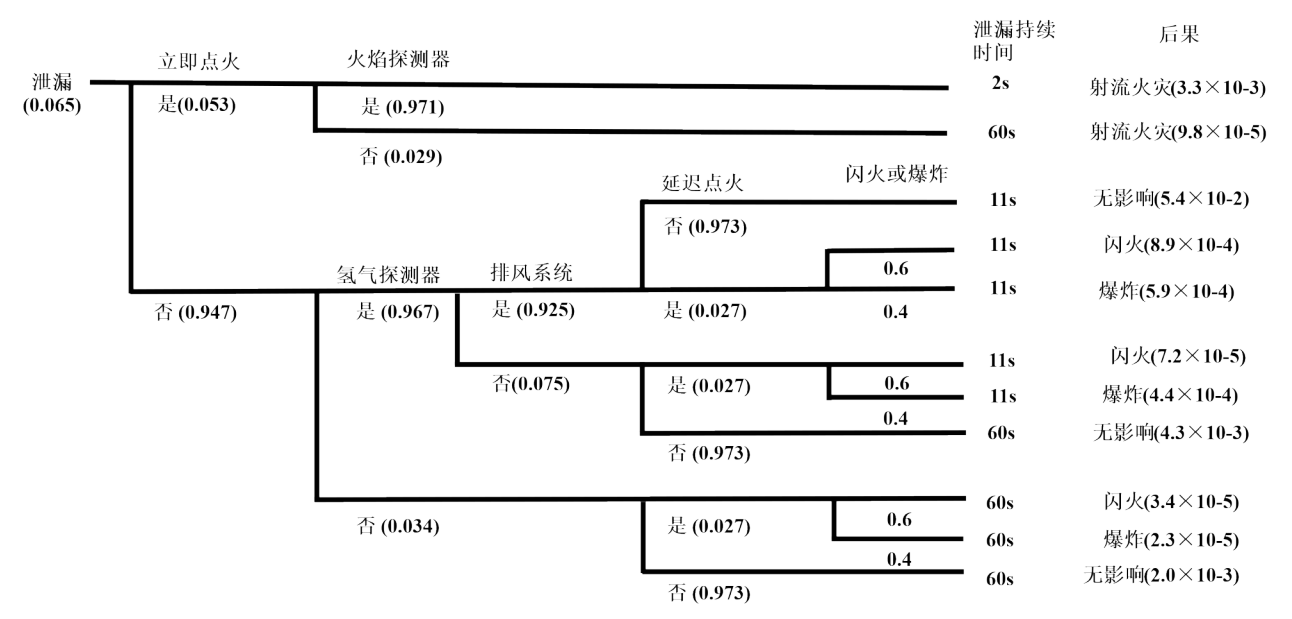


图 4 氢气泄漏事故后果与概率

Fig.4 Consequences and probability of hydrogen leak accidents

虑^[25],故下文主要针对射流火焰以及氢泄漏传感器未失效的工况进行事故后果分析。此外,发生概率较大的事故为射流火焰,发生频率较小的事故为燃爆。

5 氢泄漏事故后果量化评价

压缩机氢泄漏的主要事故后果包含射流、闪火与燃爆,这些事故对人类和建筑物的危害性主要由泄漏点位置、泄漏时间和泄漏量决定。一般而言,氢气在燃爆浓度范围内,当氢气质量越大,则造成的事故危害后果越大。本节建立了在压缩机发生氢泄漏扩散流体动力学模型,在氢泄漏扩散的基础上,重点

分析了泄漏后的射流、闪火与燃爆事故的事故后果。

5.1 受限空间氢压缩机泄漏扩散分析

5.1.1 撬装氢压缩机流体动力学建模

本文基于FLACS商业氢安全分析软件进行压缩机流体动力学建模与事故后果分析。其中,压缩机系统的几何模型如第二节“系统描述”所示。撬装氢压缩机泄漏点、监测点和网格模型如图5所示。由于压缩机排气口处压力较大,氢气泄漏易造成严重事故,故压缩机的泄漏点与泄漏方向设置在氢气一级排气口和二级排气口。此外,为了监测箱体内的温度,压力变化情况,在箱体内设置了6个监测点,分布在箱体天花板以及人员操作区。其网格划分中在泄漏点的位置会进行网格细化。

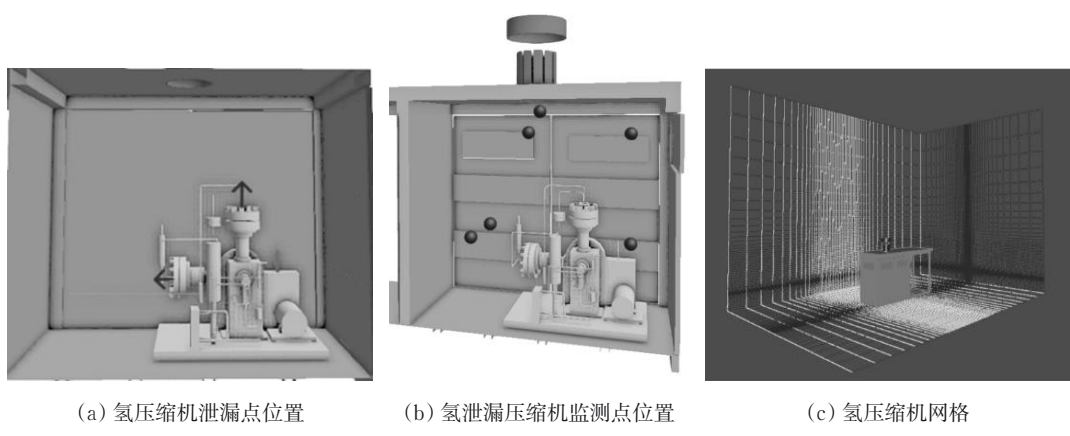


图 5 氢压缩机泄漏点与监测点位置

Fig.5 Hydrogen compressor leak point and monitoring point location

5.1.2 氢泄漏扩散分析

氢泄漏扩散是其燃爆事故后果的基础,本小节进行根据氢泄漏事件树分析结果,制定了考虑系统安防措施的氢泄漏扩散,如表4所示。对于泄漏孔径,欧洲气体工业协会规定了3种不同的泄漏规模,分别为小型泄漏(1%过流面积),中型泄漏(10%过流面积)和大型泄漏(100%过流面积)^[37]。

表4 氢泄漏扩散仿真工况

Fig.4 Hydrogen leak diffusion simulation conditions

工况	泄漏场景	泄漏孔径/m	压力/ MPa	持续 时间/s
A	小型泄漏	0.001 00	8	11
B	一级排气孔	中型泄漏	0.003 16	8
C		爆裂	0.010 00	8
D	小型泄漏	0.000 80	22	11
E	二级排气孔	中型泄漏	0.002 53	22
F		爆裂	0.008 00	22

氢泄漏扩散 11 s 后的状态如图 6 所示。对于一级排气孔泄漏,由于排气孔位于受限空间底部,故氢气主要聚集在底部区域,缓慢上升;对于二级排气孔泄漏,氢气主要聚集于空间顶部偏右侧的位置。此外,在小型泄漏下,空间内氢浓度一般在 4%~18% 之间,在中型泄漏工况下,受限空间内氢浓度一般大于 18%。由 ISO 国际标准可知,闪火一般发生在氢浓度在 4%~18% 之间,而在 18%~58% 以上可能发生闪火也可能发生燃爆^[38]。故闪火可能发生在小型或中型泄漏条件下,而气云爆炸仅发生在中型泄漏的情况下。

5.2 风险可接受标准

目前,世界范围内关于热辐射和超压的伤害限

值并不统一,氢能行业发展至今,全球范围内已经形成了具体的氢事故的安全标准。欧洲工业气体协会(European Industrial Gases Association, EIGA)在 IGC Doc 75/01/E/rev. 标准中规定,可对人和设备造成伤害的热辐射限值分别为 9.5 和 37.5 kW/m²,对人和设备造成伤害的超压限值分别为 7 和 20 kPa^[39]。国际标准化组织仅考虑死亡标准,即热辐射达到 25 kW/m²即可引起死亡。为保守起见,国际标准化组织为射流氢气火焰预留了一倍的安全余量,即假定射流火焰长度的两倍以内都会引起人死亡^[40]。美国防火协会选取的死亡限值跟国际标准化组织相同,认为只有火焰长度内会导致人的死亡。意大利塞维索法令选取的死亡标准是 7 kW/m²。我国标准认为处于火球、池火及喷射火的火场中或热辐射强度不小于 37.5 kW/m²时,人员的死亡概率为 100%。损害限选取的不同,将直接影响后果量化评价的结果^[41]。

由于目前全球范围内没有形成统一的强制性安全法规,一些研究也使用了其他的安全标准。表 5—表 7 为目前研究给出的爆炸超压和热辐射的伤害阈值^[39-40]。本文选取对人产生不可逆伤害的超压阈值 7 kPa 作为轻伤阈值,最大可存活阈值 17 kPa 作为重伤阈值,人的内伤阈值 48.3 kPa 作为死亡阈值。火灾事故对于人与建筑的危害主要表现在热辐射方面,在此选取 37.5 kW/m²作为唯一的伤害阈值。

5.3 氢射流事故后果量化评价

在压缩机排气管道与压缩机缸头连接处出现泄漏并扩散的过程中,若在可燃氢气云范围内发生立即点燃,则有出现氢射流火灾事故的可能性。假定

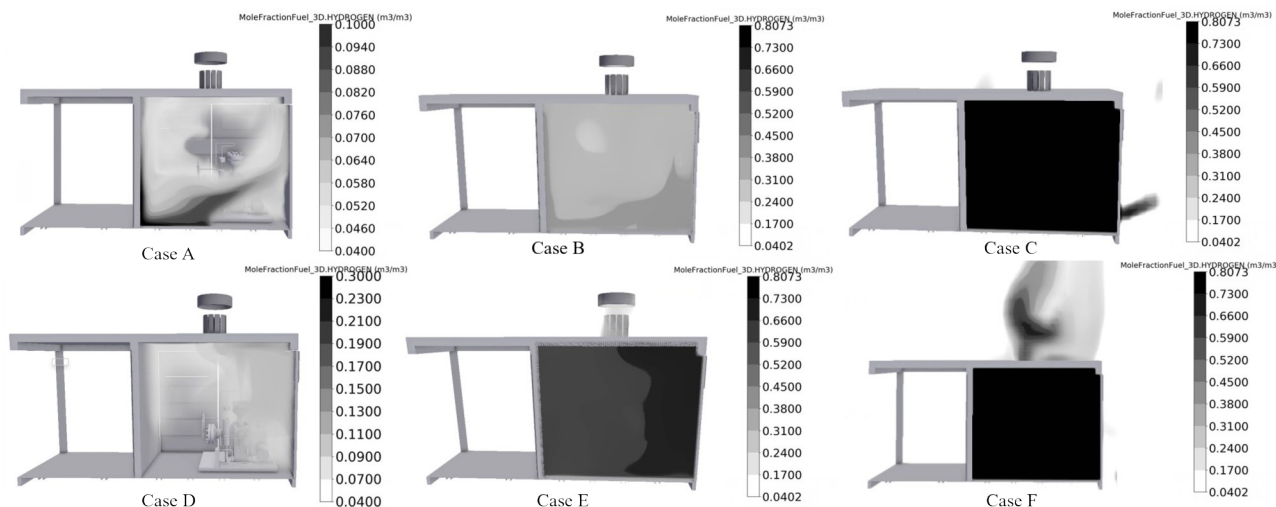


图6 不同工况下氢泄漏 11 s 后浓度特性

Fig.6 Concentration characteristics after 11 s of hydrogen leakage under different working conditions

表5 爆炸超压阈值标准^[39]

Tab.5 Explosive overpressure threshold criteria

爆炸超压标准	超压阈值/kPa
对人产生不可逆损伤阈值	7
最大可存活阈值	17
工业钢框架结构倒塌	20
内伤阈值	48.3
1%致死率阈值	100

表6 高温伤害判断标准^[39]

Tab.6 High temperature injury judgment criteria

高温标准	温度/K
人体感到疼痛阈值	315
人体临界伤害阈值	391
人体严重伤害阈值	453
钢结构部分失效阈值	673
钢结构全部失效阈值	873

表7 热辐射阈值标准^[40]

Tab.7 Thermal radiation threshold standards

热辐射标准	热辐射阈值/(kW/m ²)
暴露 30 min 后玻璃破裂阈值	4.0
暴露 20 s 后二级烧伤阈值	9.5
暴露 10 s 后 1% 致死率阈值; 暴露 30 min 后设备及结构损坏 (包括储罐)	37.5

表8 射流火焰温度与热流密度

Tab.8 Jet flame temperature and heat flow density

泄漏孔径	泄漏时间/s	最高温度/K	最大热流 密度/(kW/m ²)	情景描述	
一级排气孔	小型泄漏	2	373.7	11.8	火焰到达对面的墙壁,不再蔓延。箱体里的人感到疼痛
	中型泄漏	2	1420.6	79.5	火焰受到墙壁阻挡,充满箱体下部。箱内人员被严重烧伤
	爆裂	2	2329.8	399.0	火焰充满整个箱体,并通过通风口和门缝向外蔓延。箱体内外的人被严重烧伤
二级排气孔	小型泄漏	2	652.1	48.6	火焰到达对面的墙壁,不再蔓延。箱体里的人感到疼痛
	中型泄漏	2	1698.6	248.5	火焰受到墙壁阻挡,充满箱体下部。箱内人员被严重烧伤
	爆裂	2	2319.7	333.1	火焰充满整个箱体,并通过通风口和门缝向外蔓延。箱体内外的人被严重烧伤

本文仅通过一级压缩机缸头中型泄漏与二级压缩机缸头中型泄漏说明射流火焰伤害的演化过程,一级压缩机缸头排气管道中型泄漏 0.1 s 立即点燃后的温度与热流密度变化如图 7 所示。以监测到的高温范围代表射流火焰的覆盖范围。中型泄漏时泄漏孔径大,氢气泄漏速率大,氢气泄漏速度大于燃烧速度,射流火焰的规模快速扩大。0.5 s 后基本覆盖箱体下部,且沿墙壁向顶部蔓延,此时箱内、若有工作人员,出逃的难度较大且极易被高温火焰烧伤。在 1.8 s 火焰燃烧到压缩机,其辐射热流达到 37.5 kW/m²,有可能损坏压缩机。在 2 s 后切断气源,火焰从下部开始逐渐消失。二级压缩机缸头排气管道中型泄漏 0.1 s 立即点燃后的温度与热流密度变化如图 8 所示。由于泄漏方向是沿 z 轴向上,且泄漏压

箱体内的火焰探测器检测到火灾至压缩机氢气源被切断的时间为 2 s,则氢射流火灾发生的时间为 2 s。

压缩机氢泄漏工况与事故后果汇总如表 8 所示。其中,泄漏位置主要为一级与二级压缩机排气口(如图 5),泄漏孔径根据表 8 设置为小、中、大三种,泄漏时间则根据火焰探测器的响应时间设定为 2 s。可以看到,一级压缩机排气口发生小型泄漏时,最高温度为 373.7 K,人体会感到疼痛,其他的工况下最高温度均大于 453 ℃,均会造成人体严重伤害。同时,压缩机一级排气口与二级排气口中型与大型泄漏导致的射流火焰,其温度均在 1 400 K,热流密度均在 79 kW/m² 以上,远大于钢结构失效标准,故该工况易导致钢结构融化。由于一级压缩缸头泄漏压力(8 Mpa)小于二级压缩缸头泄漏压力(22 Mpa),所以一级压缩缸头发生射流火灾时的温度以及热流密度小于二级压缩缸头,说明一级压缩缸头发生射流火灾的后果较轻。泄漏孔径越小,危害越小。但当泄漏规模达到爆裂的情况下,由于箱体内的空间有限,所以监测点处的最高温度和热流密度差别不大。

力大,在点燃后火焰在 1 s 内充满箱体顶部以及右侧,由于受顶部箱体反作用,随后向箱体左下扩散,有小部分火焰通过通风孔向外扩散,在 2 s 切断气源后,火焰迅速消散。

5.4 氢闪火事故后果量化评价

闪火是可燃性气体或蒸气泄露到空气中并与之混合后被点燃而发生的一种非爆炸性的燃烧过程。其后果主要是造成大面积的火灾而直接烧毁财产和对人的灼烧伤害,闪火燃烧持续时间较短,物体从闪火中接收的热辐射也十分有限。闪火一般发生在氢浓度在 4%~18% 之间,而在 18%~58% 以上可能发生闪火也可能发生燃爆^[38]。由氢泄漏扩散分析可知,一级压缩机排气孔小型泄漏与中型泄漏工况下,受限空间氢浓度均在 4%~18%,故在该工况下进行

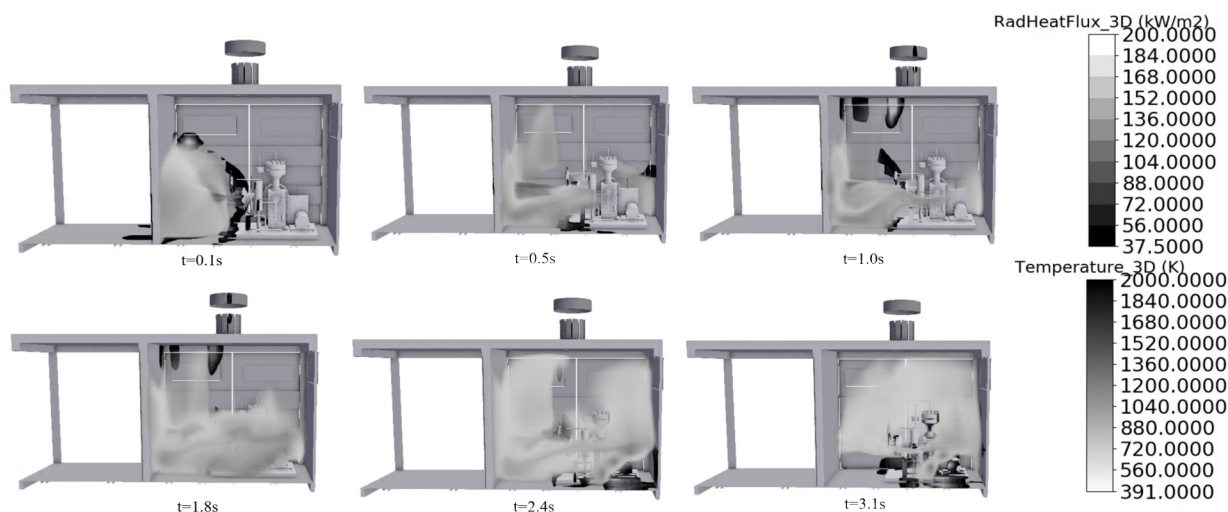


图7 一级压缩机缸头排气管道中型泄露射流火灾变化

Fig.7 Trends in medium-sized leaky jet fires in the discharge line of the primary compressor head

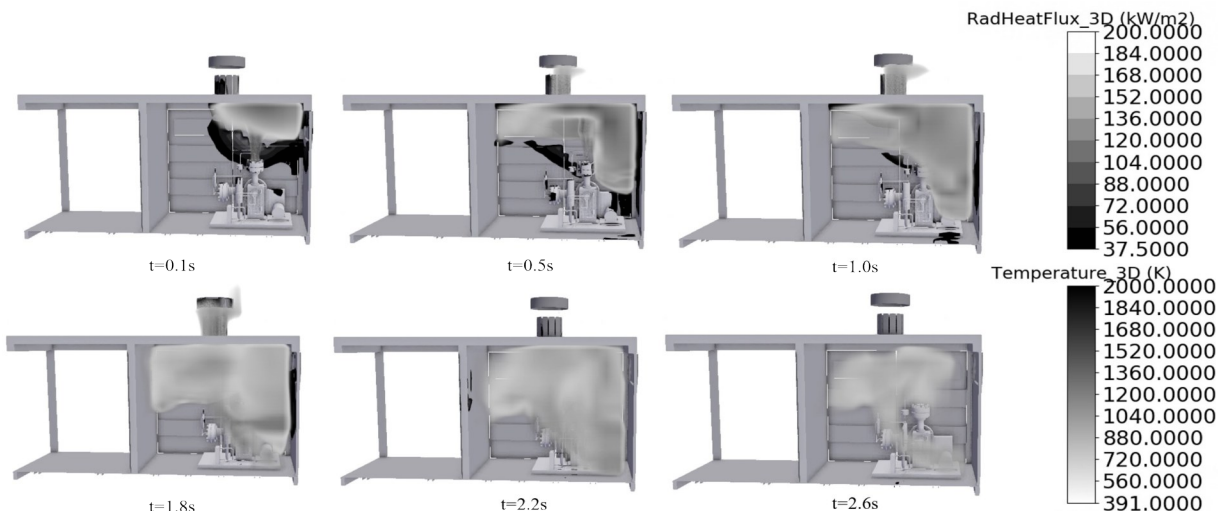


图8 二级压缩机缸头排气管道中型泄露射流火灾变化

Fig.8 Trends in medium-sized leaky jet fires in the discharge line of the secondary compressor head

闪火事故危害的定量分析。并在此基础上,探究了排风系统对闪火事故后果的影响。根据箱体内的布置,撬装式压缩机系统内可能引发点火的事件有防爆控制箱损坏,防爆触摸屏损坏以及防爆照明灯损坏,故有三个可能的点火区域,位置如图9所示。

闪火的危害主要来自燃烧区域内设备和人员直接接触火焰,压缩机系统在泄漏 11 s 后分别在三个点火区域内点燃发生闪火事故的箱体最高温度和伤害半径如表9所示。结合图6中氢泄漏扩散特性可以看出,压缩机一级缸头发生小型泄漏时,由于泄漏压力和孔径较小,泄漏 11 s 后箱体内存积分数较低,点燃后的危害较小,伤害范围限制在箱体内。其余情况下,闪火火焰从箱体的通风孔,箱门缝

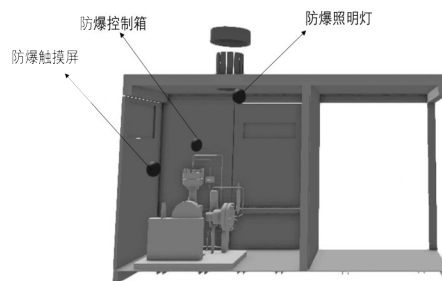


图9 点火区域的位置

Fig.9 Ignition area

隙中扩散出去,对箱体外的人员造成烧伤。其中,压缩机二级排气孔中型泄漏造成的伤害距离最大,为 7.7 m;压缩机一级排气孔泄漏造成的温度最高,可达 3 000 K,足以造成人员伤亡和建筑物损坏。对于

不同的着火点,当着火点位于防爆灯处,事故的危害距离较小;当着火点位于防爆触摸屏时,事故的危害距离较大。

以其,中最危险的场景即二级压缩缸头中型泄漏。以点火区域为触摸屏区域场景为例,分析闪火过程以及危害情况如图 10 所示。通过分析图像发现,可燃氢气云团点燃 0.03 s 后火焰从箱门缝隙以

及通风孔处向箱体外发展。可燃氢气云团点燃 0.04 s 后,火焰完全包围箱体上部,且侧边的伤害距离更大。可燃氢气云团点燃 0.030~0.158 s 之间火焰持续灼烧压缩机,将有可能使压缩机失效引发更大的危害。可燃氢气云团点燃 0.158 s 后火焰范围逐渐减小,但仍有大量火焰,可能损害周围的人员和设备。

表 9 闪火事故的箱体内最高温度和伤害半径

Tab.9 Maximum temperature and radius of injury in the box for flash fire incidents

泄漏位置	点火位置	最高温度/K	伤害半径/m	情景描述
一级排气孔	小型泄漏	768.1	仅在箱体内	火焰只分布在箱体的上部,而且持续时间较长
	防爆灯	850.0	仅在箱体内	
	控制箱	751.1	仅在箱体内	
中型泄漏	触摸屏	3069.5	6.8	火焰在很短的时间内充满整个箱体,并通过缝隙和通风口扩散出去。火焰的持续时间极短。
	防爆灯	3003.3	4.9	
	控制箱	3022.6	6.2	
二级排气孔	小型泄漏	1516.3	3.6	火焰迅速充满整个箱体,并通过通风口向外扩散。火焰持续的时间较长。
	防爆灯	1596.3	3.2	
	控制箱	1511.2	3.6	
中型泄漏	触摸屏	2944.0	7.7	火焰在很短的时间内充满整个箱体,并通过缝隙和通风口扩散出去。火焰的持续时间极短。
	防爆灯	2709.1	7.3	
	控制箱	2618.9	7.2	

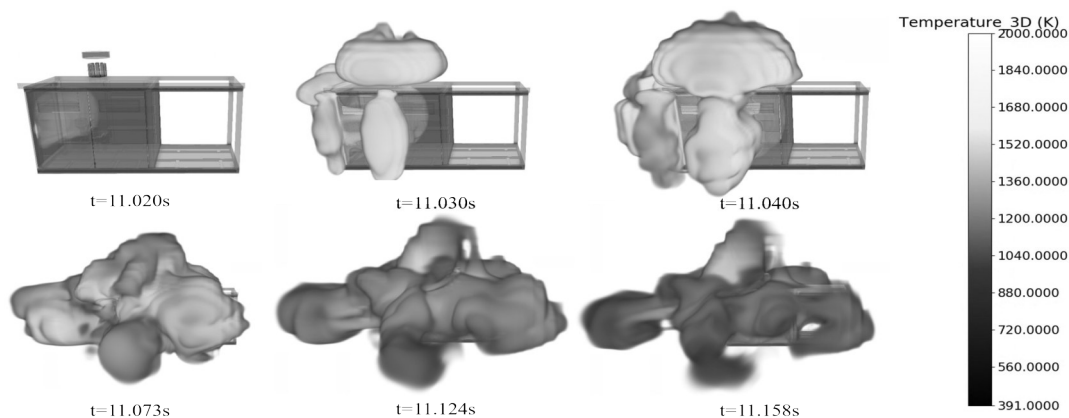


图 10 二级压缩缸头中型泄漏闪火危害

Fig.10 The damage of flash fire under medium-sized leakage of secondary compression cylinder head

由于触摸屏区域内出现电火花的后果最为严重,故以此为场景对排风系统影响的进行研究。其中,箱体顶部设有防爆风机,其质量流量为 1.5 kg/s。根据压缩机系统的安全防控策略,在氢浓度传感器感知到泄漏时,断开气源与电源,打开排风系统,将氢气排放出。表 10 为排风系统打开后,在不同时刻进行点燃后发生闪火事故的箱体内最高温度和伤害半径。可以看出,在压缩机一级与二级缸头小型泄漏情况下,排风系统 4 s 可以将箱体内的可燃气体云团的闪火危害降低到安全的程度;在中型泄漏情况下,排风系统在工作 4 s 后,最危险工况的伤害距

离由 7.7 m 降为 4.2 m,故排风系统可以极大的降低伤害距离。

压缩机二级压缩缸头中型泄漏 11 s 后,切断气源,排风系统启动 4 s 后,在触摸屏区域点火后的火焰分布变化如图 11 所示。可以明显看出,与排风系统未启动相比,火焰的温度更低,蔓延范围更小,只覆盖了箱体外部的上侧,在点燃后的 0.124 s 后火焰范围逐渐减小。可见,排风系统可以大大减轻闪火事故的危害。

5.5 氢燃爆事故后果量化评价

根据文献[38],氢浓度达到的爆炸范围为

表 10 考虑排风系统的闪火事故后果量化分析

Tab.10 Quantitative analysis of the consequences of flash fire accidents considering exhaust systems

泄漏位置		点火时间/s	最高温度/K	伤害半径/m
一级排气孔	小型泄漏	2	378.0	安全
		4	不可点燃	安全
	中型泄漏	4	2066.2	4.0
二级排气孔	小型泄漏	8	877.3	仅在箱体内部
		2	960.0	仅在箱体内部
		4	372.0	安全
	中型泄漏	4	2514.8	4.2
		8	1030.2	仅在箱体内部

18%~54%，结合图 6 中氢泄漏扩散特性，氢燃爆事

故仅发生在中型泄漏情况下。本小节探究了压缩机中型泄漏的下，发生延时点火导致燃爆事故的后果。并在此基础上，探究了排风系统对燃爆事故后果的影响。其中，点火区域如图 9 所示。表 11 为一级二级压缩缸头排气管道中型泄漏 11 s 后，在不同点火位置点燃的监测点处的爆炸最大超压和伤害半径。则可知，撬装压缩机发生燃爆产生的最大超压均大于 1bar，会产生重大的人身伤害并破坏集装箱结构，其中，最危险工况为一级压缩机缸头中型泄漏，点火区域为防爆灯处，其最大超压可达 9.4 bar，伤害距离可达 5.5 m，在此区域内不应放置其他物品。此外，压缩机一级缸头中型泄漏产生的燃爆危害较大，这是由于氢气与空气混合较为充分。

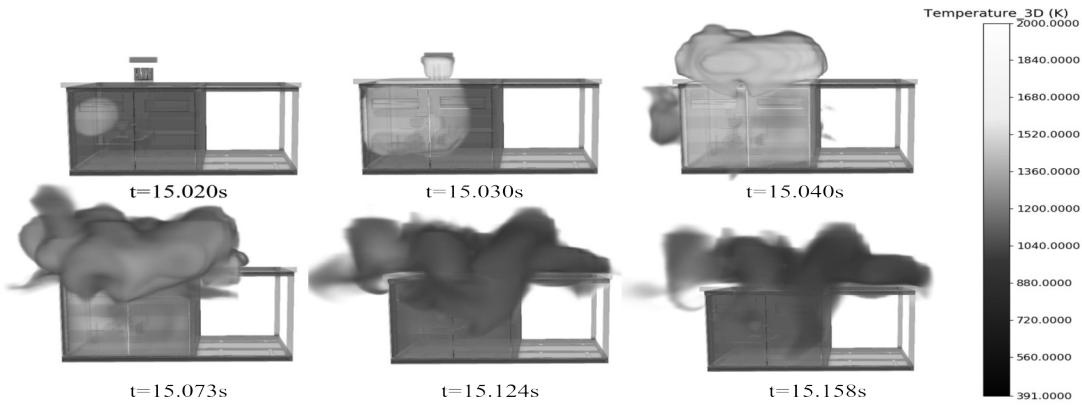


图 11 考虑排风系统的二级压缩缸头中型泄漏闪火危害

Fig.11 The damage of the flash fire under medium-sized leakage of secondary compression cylinder head with exhaust system

表 11 气云爆炸事故量化分析

Tab.11 Quantitative analysis of gas cloud explosion accidents

泄漏区域		点火位置	最大超压/bar	伤害半径/m
一级	中型泄漏	触摸屏	7.4	5.0
		防爆灯	9.4	5.5
		控制箱	5.7	4.8
二级	中型泄漏	触摸屏	1.3	4.1
		防爆灯	1.2	4.6
		控制箱	1.1	4.6

以点火区域为防爆灯区域场景为例分析燃爆事故过程，如图 12 所示。墙壁上的泄压板的打开压力为 0.2 bar，以模拟墙壁的倒塌。如图 12 所示，可燃氢气云团点燃瞬间点火区域周围首先发生压力变化，随着火焰进一步发展，点火区域周围压力随之上升，且向整个箱体传播。在点火后的 0.026 s，箱体内部压力达到 0.2 bar，箱体墙壁损坏，压力向外部传播，此时超压可能会导致箱内人员严重受伤。可燃

氢气团点燃 0.032 s 后，集装箱被压力波完全包围，此时，撬装压缩机的伤害半径为 5.5 m，最大压力为 9.4 bar，会对人和集装箱体造成较大的伤害。同时可知，爆炸的安全距离为 5.5 m，在该安全范围内不应放置操作系统等物品。

根据对不同点火区域的研究发现，防爆灯区域内出现电火花的后果更加严重，故下文对排风系统影响的研究中点火区域为防爆灯区域。表 12 为排风系统打开后，在不同时刻进行点燃后发生气云爆炸事故的箱体内部监测点处的最大超压和伤害半径。可以看到对于压缩机一级缸头与二级缸头排气孔中型泄漏，排风系统的作用能明显降低箱内的超压，排风 8 s 后能消除爆炸超压的危险。但对于爆裂，由于泄漏 11 s 后箱内的氢体积分数超过可燃上限，在排风开启 4 s 后，箱内的氢体积浓度降至可燃范围，此时点燃会造成很大的超压伤害。

压缩机一级压缩缸头中型泄漏 11 s 后，切断气

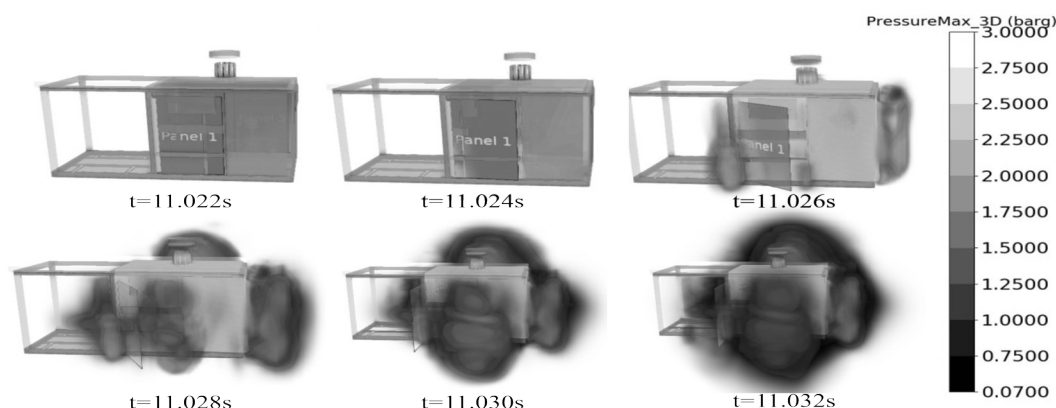


图 12 压缩机燃爆事故

Fig.12 Compressor explosion accident

表 12 考虑排风系统的燃爆事故后果量化分析

Tab.12 Quantitative analysis of the consequences of explosion accidents considering exhaust systems

泄漏区域	点火时间/s	最大超压/bar	伤害半径/m
一级	中型泄露	4	0.9
		8	0.007
	爆裂	4	9.3
		8	0.009
二级	中型泄露	4	7.2
		8	0.008
	爆裂	4	10.0
		8	0.018

源,排风系统运行 4s,点火区域为防爆灯区域的压力变化如图 13 所示。墙壁上的泄压板的打开压力为 0.2 bar,以模拟墙壁的倒塌。通过分析图像发现,由于排风系统运行降低了箱体内可燃氢气质量以及浓度,爆炸超压大幅降低,但仍处于危险范围。可燃氢气云团点燃 0.065 s 后,墙壁损坏,超压向箱体外扩散,但伤害范围缩小,仅限于箱门附近。

5.6 撬装压缩机安防措施建议

根据氢安全事故调研与危险源识别可知,发生氢泄漏的主要危险源为氢泄漏主要是由设计故障、操作失误引发,而管路与阀门是事故的多发位置,故需要重点关注管路与阀门的状态。此外,通风装置未启动、供风能力不足、无氢气探测报警装置、氢气探测报警器失效对氢燃爆影响较大,需要在系统运行时确保安防系统各传感器可以正常工作。

由事件树分析可知,氢气射流火焰是概率较大的事故,而火焰传感器可以有效探测氢射流火焰,故选取响应时间更短的传感器有助于降低射流火焰的危害。同时,由于氢浓度传感器的响应时间为 10 s,氢气在此时间内会快速聚集,故应考虑使用响应时间更短的氢浓度传感器,降低氢气聚集在受限空间的浓度,进而有效的降低氢气发生燃爆的事故危害。

通风可以有效降低系统中的氢浓度,同时降低了闪火与燃爆事故的伤害距离,确保系统中通风系统正常工作,降增强通风系统的通风能力都可以有效降低氢安全事故危害。

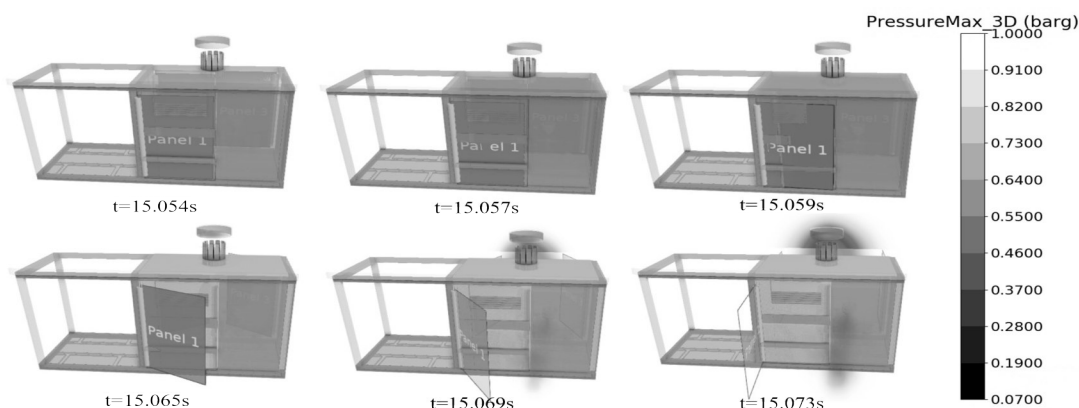


图 13 考虑排风系统的燃爆事故演化

Fig.13 The evolution of combustion and explosion accidents considering exhaust air systems

6 结论

本文针对撬装氢压缩机,通过故障树分析、事件树分析与流体动力学分析,系统的研究了撬装氢压缩机的氢安全事故的重要因素、发生概率与事故后果,为氢压缩机安全使用奠定了基础。首先,本文通过氢压缩机事故调研,分析了氢压缩机事故的具体发生条件与逻辑链;然后通过故障树分析,辨识出撬装氢压缩机安全事故的危险源与结构重要度;进而通过事件树分析法,探索了存在安防系统的条件下,撬装氢压缩机安全事故的事故后果与发生频率;进而通过FLACS事故模拟软件,基于流体动力学分析了氢泄漏扩散特性,开展了考虑安防系统作用的氢射流火焰、闪火与燃爆事故后果三维量化评价。本文得出以下结论:

(1) 发生氢泄漏的主要危险源为氢泄漏主要是由设计故障、操作失误引发,而管路与阀门是事故的多发位置,故需要重点关注管路与阀门的状态。此外,通风装置未启动、供风能力不足、无氢气探测报警装置、氢气探测报警器失效对氢燃爆事故具有重要影响,需要保证设备运行中该安防装置正常工作;

(2) 根据事件树分析的结果可知,安防系统中氢浓度传感器失效造成的闪火与燃爆事故发生概率均低于需要进行安全距离计算的风险标准,故不需要重点分析。此外,射流火焰的发生概率较高,闪火的发生概率次之,气云燃爆的发生概率较低。

(3) 由事故风险量化评价结果可知,射流火焰、闪火与气云爆炸均会造成人身伤亡与财产损失,其中射流火焰,闪火对人的最大伤害距离为7.7 m,气云爆炸对人的最大伤害距离为5.5 m,故撬装压缩机的安全距离设置应大于7.7 m。同时,排风系统可以有效的降低延迟点火导致的闪火与气云爆炸的危害。

本文系统的开展了氢电耦合系统中撬装氢压缩机的安全性,重点分析了安全事故的原因与重要程度,并对射流、闪火与燃爆事故进行了三维风险量化评价,所取得的研究结果与结论可以用于撬装压缩机的安全距离设置与安防系统优化,进一步提升氢电耦合系统的安全性。

参考文献:

- [1] VEZIROGLU T N, SAHIN S. 21st Century's energy: hydrogen energy system [J]. *Energy Convers Manage*, 2008, 49: 1820.
- [2] ABE J O, POPOOLA A P I, AJENIFUJA E, *et al.* Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2019, 44: 15072.
- [3] MORADI R, GROTH K M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis [J]. *Int J Hydrogen Energy*, 2019, 44: 12254.
- [4] LI Zichen, HU Junjie, SUN Jian, *et al.* A sizing method for hybrid energy storage microgrid with hydrogen-electricity system [C]// 2021 International Conference on Power System Technology (PowerCon 2021). CSEE, 2021: 218.
- [5] CHEN J, XIE C, YE H, *et al.* Optimal scheduling strategy of the hydrogen-electric coupled system considering source-load uncertainty [C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2023, 2473(1): 012012.
- [6] ZHAO P, XU W P, LIU A J, *et al.* Assessment the hydrogen-electric coupled energy storage system based on hydrogen-fueled CAES and power-to-gas-to-power device considering multiple time-scale effect and actual operation constraints [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48 (25): 9198.
- [7] YE J, YUAN R X. Stochastic scheduling of integrated electricity-heat-hydrogen systems considering power-to-hydrogen and wind power [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2018, 10(2): 024104.
- [8] Norsk Hydro ASA, DNV. Methodology for rapid risk ranking for hydrogen refueling station concepts [R]. *European Integrated Hydrogen Project Phase 2*, 2002.
- [9] NILSEN S, ANDERSEN H S, HAUGOM G P, *et al.* Risk assessments of hydrogen refueling station concepts based on onsite production [R]. *European Integrated Hydrogen Project Phase 2*, 2003.
- [10] JONES N G L. A schematic design for a HAZOP study on a liquid hydrogen filling station [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1984, 9(1/2): 115.
- [11] CORREA-JULLIAN C, GROTH K M. Data requirements for improving the quantitative risk assessment of liquid hydrogen storage systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(6): 4222.
- [12] KIKUKAWA S, MITSUHASHI H, MIYAKE A. Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(2): 1135.
- [13] BAE S H, LEE J S, WILAILAK S, *et al.* Design-based risk assessment on an ammonia-derived urban hydrogen refueling station [J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46 (9): 12660.
- [14] XING Y X, WU J S, BAI Y P, *et al.* All-process risk modelling of typical accidents in urban hydrogen refueling stations [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 166: 414.
- [15] BAKER W E, KULESZ J J, RICKER R E, *et al.* Workbook for predicting pressure wave and fragment effects of exploding

- propellant tanks and gas storage vessels[R]. 1975.
- [16] JOHNSON A D, BRIGHTWELL H M, CARSLY A J. A model for predicting the thermal-radiation hazards from large-scale horizontally released natural-gas jet fires [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 1994, 72(B3): 157.
 - [17] KWON D, CHOI S K, YU C. Improved safety by crossanalyzing quantitative risk assessment of hydrogen refueling stations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(19): 10788.
 - [18] SUZUKI T, SHIOTA K, IZATO Y, *et al.* Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(11): 8329.
 - [19] SHEN Y H, ZHENG T, LYU H, *et al.* Numerical simulation of hydrogen leakage from fuel cell vehicle in an outdoor parking garage[J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2021, 12(3): 118.
 - [20] KIKUKAWA Shigeki, YAMAGA Fuyume, MITSUHASHI Hirota. Risk assessment of Hydrogen fueling stations for 70 MPa FCVs [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(23): 7129.
 - [21] SUZUKI Tomoya, SHIOTA Kento, IZATO Yu-ichiro, *et al.* Quantitative risk assessment using a Japanese hydrogen refueling station model [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(11): 8329.
 - [22] QIAN Jinyuan, LI Xiaojuan, GAO Zhixin; *et al.* A numerical study of unintended hydrogen release in a hydrogen refueling station[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(38): 20142.
 - [23] PARK B, KIM Y, PAIK S, *et al.* Numerical and experimental analysis of jet release and jet flame length for qualitative risk analysis at hydrogen refueling station [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 155(6): 145.
 - [24] SUN K, PAN X M, LI Z Y, *et al.* Risk analysis on mobile hydrogen refueling stations in Shanghai [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(35): 20411.
 - [25] PAN X M, LI Z Y, ZHANG C M, *et al.* Safety study of a wind-solar hybrid renewable hydrogen refuelling station in China [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(30): 13315.
 - [26] SUZUKI T, KAWATSU K, SHIOTA K, *et al.* Quantitative risk assessment of a hydrogen refueling station by using a dynamic physical model based on multi-physics system-level modeling[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(78): 38923.
 - [27] NAKAYAMA J, KASAI N, SHIBUTANI T, *et al.* Security risk analysis of a hydrogen fueling station with an on-site hydrogen production system involving methylcyclohexane [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(17): 9110.
 - [28] LI Z Y, PAN X M, MA J X. Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen refueling station in Shanghai [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(13): 6822.
 - [29] LI Z Y, PAN X M, MA J X. Quantitative risk assessment on 2010 Expo hydrogen station [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(6): 4079.
 - [30] PARK B, KIM Y, LEE K, *et al.* Risk assessment method combining independent protection layers (IPL) of layer of protection analysis (LOPA) and RISKCURVES software: Case study of hydrogen refueling stations in urban areas [J]. *Energies*, 2021, 14(13): 4043.
 - [31] TSUNEMI K, KIHARA T, KATO E, *et al.* Quantitative risk assessment of the interior of a hydrogen refueling station considering safety barrier systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(41): 23522.
 - [32] GYE H R, SEO S K, BACH Q V, *et al.* Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(2): 1288.
 - [33] HUANG W Q, FAN H B, QIU Y F, *et al.* Causation mechanism analysis for haze pollution related to vehicle emission in Guangzhou, China by employing the fault tree approach[J]. *Chemosphere*, 2016, 151: 9.
 - [34] 张平. 地下管廊燃气泄漏扩散规律及通风系统风险评价方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
 - ZHANG Ping. Research on gas leakage dispersion law and risk evaluation method of ventilation system in underground pipe corridor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
 - [35] GROTH K M, HECHT E S. HyRAM: a methodology and toolkit for quantitative risk assessment of hydrogen systems [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7485.
 - [36] VAN RYZIN J. Guidelines for quantitative risk assessment (Purple Book) CPR 18E[R]. 1980, 22:321.
 - [37] European industrial gases association. Determination of safety distances: IGC Doc 75/07/E [S]. European industrial gases association, 1975.
 - [38] ISO. Basic considerations for the safety of hydrogen systems [S]. Geneva: International Organization for Standardization Publ, 2004.
 - [39] MARANGON A, CARCASSI M, ENGEBO A, *et al.* Safety distances: definition and values [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2192.
 - [40] FU Z, HUANG J, ZANG N. Quantitative analysis for consequence of explosion shock wave [J]. *Fire Sci Technol*, 2009, 28: 390.
 - [41] 国家安全生产监督管理总局. 化工企业定量风险评价导则: AQ/T 3046—2013[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.
 - State Administration of Work Safety. Quantitative risk evaluation guidelines for chemical enterprises: AQ/T 3046—2013[S]. Beijing: Coal Industry Press, 2013.