

某加氢站 HAZOP 风险评估及安全管理研究

文 / 毛思捷 浙江数智交院科技股份有限公司, 智能交通研究所

汪宗御 浙江清华长三角研究院, 智慧能源研究中心

吴 畏 浙江数智交院科技股份有限公司, 智能交通研究所

张继锋 浙江清华长三角研究院, 智慧能源研究中心

摘要: 为全面提升加氢站安全运行水平, 本文基于危险与可操作性分析法 (HAZOP法), 结合某加氢站的实际情况构建高压氢气泄漏模型, 综合分析了案例加氢站的风险度量参数, 并提出了相应的安全管理方案。案例项目的成功经验显示, 危险与可操作性分析法的应用可以为燃料电池汽车加氢站安全与风险管理提供必要支持, 对于提升整个单位安全管理水平有重要意义。

关键词: 加氢站; 危险与可操作性分析法; 风险评估; 安全管理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.02.120

前言

在全球范围内可持续发展的大环境下, 氢作为一种清洁、高热值的能源展现出广阔的市场前景, 而与其他化石能源相比, 氢气高可燃性范围和低点火能量给加氢站运营带来更大的潜在事故风险。若不能有效处理, 则可能引发严重的安全生产问题^[1]。自2018年我国大部分省市已出台了完整的氢燃料电池汽车的补贴政策, 而上述政策也极大加快了新能源汽车行业发展, 使社会对氢能的需求量显著提升。截止到2024年, 我国已累计建成加氢站474座, 数量全球第一。因此, 为更好地满足各地区对氢能的需求, 需要一种适合加氢站的风险评估方法与安全管理方案, 这也是本文研究的主要目的。

一、案例概况

某加氢站的总建筑面积约为500m², 主要包括营业厅、调度室、站长室等区域。按照站内功能区的划分, 案例加氢站主要包括拖车充装区、加氢区、储气区、压缩区等几个区域, 该加氢站的日加氢能力约为500kg, 能满足该区域氢燃料电池车辆的日常加注需求。

二、燃料电池汽车加氢站安全技术方案研究

(一) 研究方案选择及步骤

为更精准评价案例加氢站的安全管理情况, 本文综合比较了几种较为常见的安全管理技术, 包括故障树分析技术、保护层分析技术以及危险与可操作性分析法 (HAZOP), 其中故障树分析技术虽然可以大范围评估影响加氢站安全生产的风险因素, 但在操作过程中运算步骤烦琐、数据处理量大, 风险敏感性较差; 保护层分析技术的运算结果过度依赖计算场景, 这一特征会导致安全故障分析结果缺乏适应性, 难以有效引导其他加氢站的安全管理工作^[2]。而相比之下, HAZOP法则可采用分类、量化以及分级等方法有效判断项目中的安全隐患以及其他可操作性问题, 不仅可以简化操作, 也能确保分析结果的全面性, 因此成为石化行业中较为常见的管理技术, 本文将以此方法为核心展开进一步研究。

HAZOP分析的主要过程包括分析界定、组建分析小组、分析准备、分析会议、分析报告及HAZOP审查6个关键步骤^[3]。具体流程如图1所示。

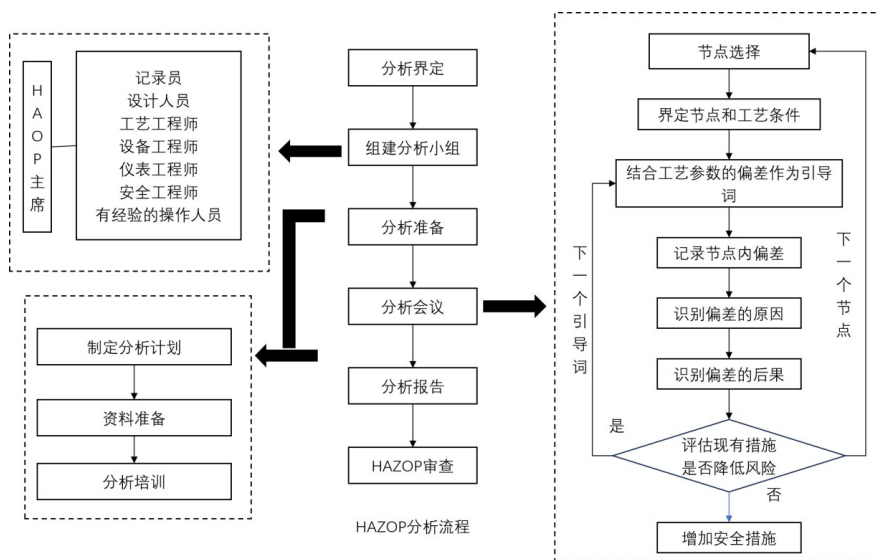


图1 HAZOP分析流程图

(二) 加氢站建模

1. 氢气泄漏量计算模型

相关学者研究认为，加氢站安全事件的发生与氢气泄漏存在密切关系，因此为更好地分析案例加氢站的安全情况，需要结合氢气泄漏过程建模识别安全因素。建模的关键内容包括：

(1) 加氢罐内气体的状态可以用公式 (1) 描述：

$$R_{n_2} T_1 = \left(P_1 + \frac{a}{v_1^2} \right) (v_1 - b) \quad (1)$$

式中， R_{n_2} 表示罐内的氢气气体常数； T_1 表示罐内温度参数，K； P_1 则表示罐内压力值，Pa； a 与 b 则分别表示两个范德瓦耳系数，其取值与分子大小及分子间作用力有关； v_1 则表示储罐内气体的比体积， m^3/kg 。

(2) 泄漏位置的气体质量流量关系到单位时间内的氢气泄漏量，如公式 (2) 所示：

$$q_m = \frac{A_3 u_3}{v_3} \quad (2)$$

式中， q_m 表示单位时间内的出口气体质量流率， kg/h ； A_3 则表示出口截面积，与氢气罐的泄漏孔径大小有关， m^2 。

通过公式 (1) 和 (2) 可精准判定不同时间内罐内氢气压力以及泄漏出口处的气流状态参数随时间变化的关系，而根据不同泄漏孔径下泄漏出口流速随时间变化情况下可以发现，泄漏孔径越小、相同罐内气体状态下的氢气随时间的衰减率越高，所持续的时间越长，证实该模型能真实体现加氢站内的储罐运行状态变化^[4]。

2. 安全事件评估模型

为更全面地评估燃料电池汽车加氢站的安全系数，以驱动因素 S 为变量展开分析，其计算关系如公式 (3) 所示。

$$P(C_i) = P(T)P(S_1)P(S_2) \cdots P(S_n) \quad (3)$$

在公式 (3) 中， $P(C_i)$ 则表示驱动因素 S 作用下所引起事故后果； $P(S_1)$ 、 $P(S_2) \cdots P(S_n)$ 则分别表示造成 C_i 时驱动因素 S 的状态值； $P(T)$ 则表示该事件概率。

(三) 研究节点划分

参照中国石化《HES风险矩阵标准》，HAZOP分析中节点划分有两种方案：方案1，按照管线或者设备种类划分，并且为确保划分结果的数据精度，可考虑将每一根管线或者每一台设备作为节点展开评估，此时HAZOP分析可以获得较为详细的数据。但该方法中需要同步的数据量较多，可能会影响HAZOP分析报告的可读性。方案2，按照加氢站的工艺功能展开划分，即主动识别工艺节点中的潜在危险源，并能根据各类安全事件的有害因素、危险性等共同划分为一个节点展开研究。本文将采用方案2，以危险源类别为划分节点展开分析，并选择发生危险事件概率较高的单元节点为研究对象。

(四) HAZOP 分析内容

基于案例加氢站的实际情况，构建HAZOP分析记录，该记录的关键内容如表1所示。

表 1 案例加氢站 HAZOP 分析记录表

安全事件类型	常见偏差	原因识别	风险性评估结果
管道压力异常	无压力	1、装置破裂造成气体泄漏 2、管线破裂造成泄漏 3、压缩机损坏	B
	低压力	1、装置泄漏 2、连接或焊接位置的密封性不足 3、压缩机故障	B
流量异常	流量偏大	1、压缩机超速运转 2、氢气缓冲罐超压	C
	流量小	1、氢气流量不足 2、装置密封性下降 3、过滤器堵塞	B
气压异常	低压力	1、氮气管道泄漏 2、阀门开度不达标 3、管线堵塞 4、仪表数据误差	A
	压力高	1、阀门开度过大 2、减压阀故障 3、仪表数据错误	A

注：在表1的相关指标中，风险性评估结果严格按照公式 (3) 的方法展开判定。其中，当 $P(C_i) > 0.8$ 时，提示风险发生率较高、危害较大，评估等级为A；当 $P(C_i) = 0.5 \sim 0.8$ 时，提示风险发生率一般、危害一般，评估等级为B；当 $P(C_i) < 0.5$ 时，提示风险发生率较低、危害较低，评估等级为C。

由表1可知，案例加氢站的HAZOP分析的结果表明，气压异常是加氢站安全管理中必须重点关注的问题，在日常运维管理中无论是低压力还是压力升高均应引起相关人员的重视。除此之外，管道压力、流量异常问题也可能引发加氢站的安全管理水平，不容忽视。

三、安全管理技术

基于上述HAZOP分析，本文认为案例加氢站在未来安全管理中应重点关注以下几方面工作。

(一) 作业人员管理

根据案例加氢站日常运维现状来看，作业人员的不安全行为、对安全事件的认知不到位是造成安全事件的主要原因，根据表1的相关资料可知，工作人员对装置破裂造成气体泄漏识别不到位会引发安全事件。因此为保证提升项目安全管理水平，需要对加氢站作业人员开展安全教育培训，了解各类事故的应急处理措施，使工作人员能掌握装置破裂、连接或焊接位置密封性不足的表现并尽快向技术部门反馈。

同时，尽可能保证工作人员能主动接受专业技能培训并考核合格，其中特种设备安全管理人员应取得特种设备安全管理人员资格，充装和检查人员分别取得移动式压力容器充装作业人员资格。而在岗位配置上，也要尽可能优化有较高风险的岗位配置方案。例如表1中提出的加氢站气压异常的高风险问题，要求每班次的作业人员不少于2人，装置压力的检查频次控制在6h/次左右，确保工作人员能对潜在安全隐患做出快速响应。

规范加氢站操作人员的日常操作细节，装置破裂造成气体泄漏是造成管道低压力的主要原因，而针对此类危险工况，要求作业人员应合理穿戴阻燃防静电工作服、工作鞋等设备展开作业，确保可消除静电，以降低加氢站爆炸风险^[5]。

最后从安全管理的角度来看，管线堵塞、仪表数据错误是造成气压异常问题的主要原因，而为保证加氢站安全管理，则需要通过人员培训的方法，详细说明加氢站生产业务流程、设备操作规程及作业指导书内容、生产经营过程中的安全环保风险内容，并通过现场演示以及多媒体教学等措施详细阐述各类仪表数据错误的表现以及原因，使工作人员能有效识别并处置仪表数据错误问题。

(二) 优化设备管理方案

根据表1所记录的相关资料可知，设备异常状态是造成安全事件的主要原因，如压缩机损坏、装置密封性下降、氢气缓冲罐超压等，因此为保证加氢站安全运营，需要积极完善设备管理方案，整个管理工作的重点内容包括：

1. 重视特种设备检验检测。即严格按照国家相关规定定期检测加氢站特种设备的工作状态，结合案例加氢站的实际情况，本文认为风险性评估结果为A的项目应每季度检测一次，风险性评估结果为B的项目应每半年检测一次；风险性评估结果为C的应每年检测一次。并且为保证设备检测质量，应确保每个特种设备检验报告真实且完整，并严格执行责任负责制，要求相关负责人员签字。

2. 做好加氢站特种设备维护保养。以表1中所统计的常见阀门等质量问题可能会造成气压异常等问题，需要相关人员能制定完整的阀门保养方案，其主要技术措施包括：①观察阀门的外观状态，了解阀门上是否有明显的物理损伤，包括裂缝、变形或者损坏等。②做好阀门清洁管理，要求工作人员能定期清理阀门的油渍、灰尘，在日常养护中可用抹布擦拭干净；若发现装置上有难以清除干净的油污，可添加少量清洗剂清洁。③阀门操作检查，即定期操作阀门，了解阀门的开启与关闭是否畅通，其中整个阀门操作过程应缓慢进行，使操作者能正确评估阀门装置的受力情况，一旦发现任何卡涩等问题都需高度警惕阀门故障。④重视阀门泄漏检测，即定期用超声波泄漏检测仪、氢气泄漏检测仪等设备评估阀门的状态，根据案例加氢站的实际情况，认为阀门的检测频率控制在1周/次左右即可。

(三) 其他配套安全管理措施

根据上文统计结果，为切实提升设备的安全运维管理水平，工作人员还需重点关注以下几方面内容：

(1) 在站内各个位置布设紧急切断或者机组停机系统，尤其是系统加氢站中的加氢机、压缩机等必须配置额外紧急停机装置，保障工作人员在识别紧急事件后可第一时间暂停设备的运行。(2) 本次HAZOP分析统计结果显示，管道泄漏等是造成安全事件的重要因素，因此为增强工作人员对上述安全事件的快速应急能力，应确保在压缩机配置超压、低压以及泄漏报警装置。除此之外，为有效预防泄漏问题发生，还需要结合管线的参数情况制定加固措施，其中25MPa的管线采用进口卡套式

接口管，50MPa及100MPa的工艺管线采用进口锥面螺纹管接口^[6]。(3) 针对可能出现泄漏的生产系统与工艺模块上加装气体监测装置，该装置直接与控制器联动，使系统在识别气体泄漏等问题后均能第一时间发布预警信息。(4) 为解决因为仪表数据错误等引发的安全事件问题，要求在安全改造中能将，的监控仪表以及控制系统设置UPS不间断电源作为事故应急电源，确保能通过计算机系统实时校正仪表的运行参数，提升数据精度。(5) 为避免其他原因造成的装置损坏问题，案例加氢站在安全管理中可设置独立门卫检查装置，配合视频监控系统等硬件设备提升系统安全等级，避免无关人员进入。

(四) 效果评价

案例加氢站自2023年2月实施上述应对措施以来，至今未发生过一起安全事故，表明上述安全技术管理措施具有可行性；而根据HAZOP分析法的后期评估显示，上述措施的落实显著改进了各类安全事件类型的风险评估结果，其风险评估分级均下降至C级，提示各类安全风险问题得到有效缓解。

结束语

实现加氢站的安全管理具有极高的经济效益与社会效益，根据本文的研究内容共得出以下结论：(1) 采用HAZOP分析可以精准分析案例燃料电池汽车加氢站的安全状态，并详细评估各个项目的安全状态，确定了当前工作中加氢站安全管理的主要风险因素，为制定针对性安全管理措施奠定基础。(2) 本文基于HAZOP分析法的调研结果所制定的各类应对措施具有可行性，根据案例加氢站的反馈结果显示，自上述安全技术实施以来，加氢站未见任何安全事故，提示上述措施具有技术可行性，对类似加氢站安全管理工作有良好的借鉴价值，值得推广。

参考文献

[1] 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(05): 91-100.

[2] 唐洪亮. 加油加氢合建站运营安全管理要点及措施[J]. 石化技术, 2024, 31(08): 308-310.

[3] 王一昊, 张毅, 凌晓东, 等. HAZOP方法在氢气压压缩机风险分析中的应用[J]. 辽宁化工, 2023, 52(5): 669-671.

[4] 李涛. 加氢站火灾风险评估与防控措施[J]. 化工管理, 2024, (24): 124-127.

[5] 朱涵月. 加氢站安全风险点分析与预防措施[J]. 石油库与加油站, 2024, 33(04): 34-38+55.

[6] 马秋菊, 贺雅, 夏欣, 等. 加氢站定量风险评估与对策建议[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(04): 696-705.

作者简介: 毛思捷(1994.11)女, 汉族, 浙江丽水人, 硕士学历, 工程师, 从事智能交通研究。

基金项目: 浙江省尖兵领雁计划——智慧高速“交通-通信-能源”三网融合关键技术与集成示范(2023C01246), 浙江清华长三角研究院A类青年基金项目——高效质子交换膜电解水制氢系统开发(项目编号: 无)。