

制氢厂与加氢站建设及生产运行安全风险论证与管控

王 正

国华(宁夏)新能源有限公司 宁夏 银川 750002

摘 要: 氢能作为清洁高效能源,其产业化落地的核心瓶颈之一是制氢厂、加氢站建设及生产运行的安全管控。本文聚焦制氢厂(涵盖主流制氢工艺)、加氢站两大核心场景,围绕建设到生产运行全流程,界定各场景核心环节边界及安全基础,系统识别建设阶段(模型审查、设备监造)与生产运行阶段(工艺管控、设备运维)的具体安全风险,引入HAZOP分析方法强化风险精准识别,构建针对性的风险评估框架,提出覆盖全流程的安全管控策略。研究可为制氢厂、加氢站建设及生产运行安全风险管控提供实操参考,破解安全瓶颈,推动氢能核心场景安全、有序实现规模化、商业化发展。

关键词: 制氢厂;加氢站;建设与生产运行;安全风险论证;HAZOP分析;管控策略

引言:当前氢能产业快速发展,我国作为全球最大氢气生产国,制氢厂产能持续扩张,加氢站布局加速推进,但氢能易燃易爆、易泄漏、氢脆腐蚀等特性,导致制氢厂、加氢站从建设到生产运行全流程安全风险突出,制约产业规模化推进。安全是氢能产业化的前提,现有研究多侧重单一环节风险管控,缺乏对制氢厂、加氢站建设与生产运行全流程的系统性论证,尤其对建设阶段模型审查、设备监造及生产阶段HAZOP分析等关键环节关注不足。基于此,本文聚焦制氢厂、加氢站两大核心场景,围绕建设到生产运行全流程,开展安全风险论证,引入HAZOP分析优化风险识别,提出针对性管控策略,为保障两大核心场景安全稳定运行提供理论与实践支撑。

1 制氢厂与加氢站核心场景界定及安全基础

1.1 核心场景边界划分

本文核心研究范围聚焦两大场景,覆盖建设到生产运行全流程:(1)制氢厂:以化石燃料制氢、电解水制氢为核心工艺,涵盖建设阶段(设计、模型审查、设备监造、施工)与生产运行阶段(工艺运行、设备运维、气体检测),是氢能供应的核心源头;(2)加氢站:作为氢气储存、加注的核心枢纽,涵盖建设阶段(设计、设备监造、施工)与生产运行阶段(储氢、加氢操作、设备维护),是连接制氢厂与下游应用的关键节点。两大场景相互关联、风险传导,其安全管控直接决定氢能产业核心环节的安全水平。

1.2 核心安全特征与基础要求

制氢厂、加氢站安全核心凸显四大特性:氢气爆炸极限4%~75%,泄漏后易形成爆炸性混合物;氢分子极小,易穿透密封材料引发微泄漏;长期接触金属易导致氢脆,降低设备强度;制氢厂工艺多处于高压高温工况,加氢站

储氢、加注多涉及高压(30~100MPa)工况,安全管控难度高。基础要求需严格遵循GB/T29729-2022、GB50156-2021等标准,构建本质安全设计、智能监测预警、应急处置联动体系,明确设备防爆等级、防火间距、泄漏报警阈值($\leq 1\%LEL$)等关键指标,重点落实建设阶段模型审查、设备监造要求,以及生产运行阶段工艺合规、设备完好性管控要求。

1.3 全流程安全风险管控核心逻辑

防控核心逻辑遵循“建设管控-运行管控-应急兜底”的闭环思路:建设阶段聚焦源头防控,通过严格的模型审查、设备监造、施工管控,消除设计缺陷、设备隐患;运行阶段聚焦过程管控,引入HAZOP分析等方法精准识别工艺、设备风险,部署高精度监测系统,实现风险实时预警与处置;应急阶段聚焦兜底保障,建立分级响应机制,配备专用应急物资,提升突发事件处置能力。其中,模型审查、设备监造是建设阶段风险防控的核心,HAZOP分析是生产运行阶段风险精准识别的关键手段,三者协同构成全流程安全风险管控的核心支撑^[1]。

2 制氢厂与加氢站建设及生产运行安全风险识别

2.1 制氢厂建设及生产运行安全风险识别

制氢厂风险贯穿建设到生产运行全流程,重点聚焦模型审查、设备监造、工艺运行、设备运维四大环节,具体识别如下:(1)建设阶段风险:模型审查不到位,未充分论证工艺流程合理性、设备布局安全性,易导致设计缺陷,埋下泄漏、燃爆隐患;设备监造缺失,制氢核心设备(电解槽、反应器、管道、阀门)材质不达标、制造工艺缺陷,易引发设备腐蚀、密封失效,为生产运行埋下安全隐患;施工过程中未严格遵循设计规范,管道焊接质量不达标、设备安装偏差,易导致投用后氢气泄漏。

(2) 生产运行阶段工艺风险：化石能源制氢中，气化炉、重整反应器温度、压力管控不当，易引发反应失控，伴随有毒气体（一氧化碳、硫化氢）泄漏及氢气燃爆；电解水制氢中，电解槽电极板腐蚀、密封件老化，易导致强碱电解液泄漏，电源系统故障易造成氢气压力波动，引发管道超压泄漏；工艺参数违规调整，未按规程开展启停操作，易加剧风险发生概率。(3) 生产运行阶段设备风险：制氢设备长期处于高压高温工况，管道焊缝开裂、阀门密封失效、设备老化等问题突出，易引发氢气泄漏；检测设备失灵，无法及时监测氢气浓度、压力等关键参数，易导致风险扩大；设备运维不到位，未建立全生命周期台账，设备“带病运行”，显著提升故障发生率^[2]。

2.2 加氢站建设及生产运行安全风险识别

加氢站风险聚焦建设阶段设备监造、设计施工，以及生产运行阶段储氢、加注操作，具体识别如下：(1) 建设阶段风险：模型审查未充分考虑储氢、加注环节的风险传导，设备布局不合理，防火间距不足，易导致泄漏后风险扩散；设备监造不严，储氢瓶、加氢机、压缩机等核心设备材质缺陷、制造不合格，易引发储氢瓶破损、加氢机泄漏；施工过程中管道铺设、设备安装不规范，接口密封不严，投用后易出现氢气渗漏。(2) 生产运行阶段储氢风险：高压储氢瓶疲劳老化、材质缺陷，易导致瓶体破损、接口泄漏；充装压力超标，易引发储氢瓶爆炸；储氢管道腐蚀、阀门故障，会造成氢气快速泄漏，形成可燃爆云；储氢区域通风不良，氢气泄漏后易积聚，遇明火、静电引发燃爆。(3) 生产运行阶段加注与设备风险：加氢操作不规范，严控加氢压力、流速不到位，易引发氢气泄漏；加氢机、压缩机等设备运维不当，密封失效、故障频发，易导致加注过程中氢气泄漏；操作人员违规操作，未按要求穿戴防护用品、未及时排查隐患，会加剧风险发生概率。

2.3 HAZOP分析在风险识别中的应用

HAZOP（危险与可操作性分析）是制氢厂、加氢站生产运行阶段风险精准识别的核心方法，通过以“引导词+工艺参数”的组合方式，系统分析制氢工艺、加氢流程中各环节的偏离情况，识别潜在风险及诱因。例如，制氢厂中，针对“反应器温度偏离”，通过HAZOP分析可识别出温度过高导致的炉体腐蚀、氢气泄漏等风险，明确诱因包括温控系统故障、工艺参数调整不当等；加氢站中，针对“加氢压力偏离”，可识别出压力过高导致的储氢瓶破损、氢气泄漏等风险，明确诱因包括充装系统故障、操作违规等。通过HAZOP分析，可弥补传统风险识别的局限性，实现对隐蔽性、潜在性风险的精准排查，

为后续管控策略制定提供精准依据^[3]。

3 制氢厂与加氢站安全风险评估框架构建

结合制氢厂、加氢站建设及生产运行特点，遵循科学、全面、可操作原则，构建以HAZOP分析为核心的风险评估框架，实现风险精准分级与管控，具体内容如下：(1) 明确评估原则与指标体系：核心遵循科学性、针对性、可操作性、动态性四大原则，聚焦建设阶段（模型审查、设备监造、施工质量）与生产运行阶段（工艺管控、设备运维、操作规范、HAZOP分析落实情况），构建涵盖设计、设备、工艺、管理四大维度的评估指标体系。设计维度涵盖模型审查合规性、布局合理性；设备维度包括设备监造合格率、设备老化程度、密封性能；工艺维度涵盖工艺参数稳定性、HAZOP分析落实情况；管理维度涉及操作规程、人员资质、应急管理，各指标明确权重分配，确保评估针对性。(2) 优化评估方法应用：采用“定性+定量”结合的方式，定性评估选用安全检查表法、风险矩阵法，结合HAZOP分析结果，快速排查各环节显性及隐性风险，划分初步风险等级；定量评估采用故障树分析，针对制氢反应器爆炸、加氢站氢气泄漏等核心风险，量化风险发生概率及损失程度，实现风险评估的精准性。其中，HAZOP分析贯穿评估全过程，作为风险识别与量化的核心支撑。(3) 明确风险等级划分与判定标准：结合氢能安全规范，将风险划分为重大、较大、一般、低风险四级，明确各等级判定阈值，结合指标量化结果、HAZOP分析结论，对制氢厂、加氢站各环节风险进行分级，重点标注建设阶段模型审查、设备监造及生产阶段工艺管控中的高风险点，为后续差异化防控策略制定提供明确依据^[4]。

4 制氢厂与加氢站建设及生产运行安全管控策略

4.1 建设阶段核心管控策略

聚焦建设阶段源头防控，重点强化模型审查、设备监造，补齐设计、设备环节隐患，具体措施如下：(1) 严格落实模型审查：制氢厂、加氢站设计阶段，组织专业团队开展模型审查，重点论证工艺流程合理性、设备布局安全性、防火间距合规性，结合氢能安全特性，排查设计缺陷，针对制氢反应器布局、加氢站储氢区与加注区隔离等关键环节，优化设计方案；建立模型审查台账，明确审查意见、整改措施及整改责任人，确保审查意见落地落实，从源头消除设计层面安全隐患。(2) 强化设备监造管理：建立全流程设备监造体系，明确监造范围、监造标准及责任人员，对制氢槽、反应器、储氢瓶、加氢机等核心设备，从原材料采购、生产制造到出厂检验，实行全过程监造；重点检测设备材质、焊接质量、密封性

能, 严禁不合格设备出厂、进场。(3) 规范施工管控: 严格按照设计方案及安全规范开展施工, 加强管道焊接、设备安装等关键环节的质量管控, 定期开展施工质量检测, 及时整改施工隐患; 施工过程中严禁违规操作, 做好施工人员安全培训, 落实安全防护措施, 确保施工过程安全, 避免因施工不当埋下安全隐患。

4.2 生产运行阶段核心管控策略

针对生产运行阶段风险特点, 结合HAZOP分析结果, 聚焦工艺管控、设备运维, 落实精准防控, 具体措施如下: (1) 制氢厂生产运行管控: 优化制氢工艺参数, 严格控制气化炉、重整反应器、电解槽的温度、压力, 规范工艺操作流程, 严禁违规调整参数; 定期开展HAZOP分析, 针对识别出的风险点, 制定专项管控措施, 定期复盘优化; 加强设备运维, 建立设备全生命周期台账, 定期开展设备排查、检修, 重点检测管道、阀门、密封件的腐蚀、老化情况, 及时更换不合格设备; 在关键设备周边安装泄漏检测、超压报警装置, 实现实时监测与预警; 加强操作人员培训, 提升工艺操作、风险识别及应急处置能力。(2) 加氢站生产运行管控: 严格规范储氢、加注操作, 高压储氢按额定压力充装, 严禁超压充装, 定期对储氢瓶进行耐压、疲劳检测, 报废不合格储氢瓶; 加氢操作中严控压力、流速, 全程监测氢气浓度, 发现泄漏立即停止作业并启动处置措施; 加强加氢机、压缩机等设备的维护, 定期检测密封性能、运行状态, 及时排查故障; 优化储氢区域通风设施, 防止氢气积聚^[5]。

4.3 人员与应急管控策略

(1) 人员管控: 建立健全安全管理制度, 明确操作人员岗位职责, 严禁无资质人员上岗; 定期开展安全培训, 重点培训氢能特性、操作规程、HAZOP分析方法、风险识别及应急处置技能, 提升操作人员安全意识和实操能力; 实行操作全过程管控, 操作人员上岗前必须穿戴好

个人防护用品, 严格执行巡检制度, 做好巡检记录, 发现隐患立即上报、及时处置。(2) 应急管控: 针对制氢厂反应器爆炸、氢气泄漏, 加氢站储氢瓶破损、加注泄漏等突发情况, 制定专项应急预案, 明确处置流程、责任分工及物资保障; 配备专用消防设施、泄漏处置设备、个人防护用品等应急物资, 定期开展应急演练, 提升应急处置能力; 建立隐患台账制度, 对排查出的隐患实行闭环管理, 确保隐患及时整改到位, 防止风险扩大。

结束语: 制氢厂与加氢站是氢能产业核心, 其建设与运行安全管控是产业规模化发展的关键。本文围绕两大场景全流程, 系统识别模型审查、设备监造、工艺运行、设备运维等安全风险, 运用HAZOP分析实现精准识别, 构建风险评估框架, 提出覆盖建设、运行、应急的全流程管控策略, 形成“源头防控—过程管控—应急兜底”的闭环体系。后续可结合技术迭代, 拓展HAZOP应用, 深化智能监测与各环节融合, 持续提升安全管控能力, 保障核心环节稳定运行, 助力氢能产业高质量发展。

参考文献:

- [1]姜海,刘柯沁,熊力,等.氢能产业发展现状及未来趋势分析[J].新能源科技,2025,6(5):9-17.
- [2]罗魁,郭剑波,高飞,李涛永,郭秀梅,刘铠诚,张博,孙旭东.新兴能源基础设施安全风险分析与防控体系[J].电网技术,2024,48(2):457-468.
- [3]周永浩,王宇辰,张新琪,喻萍,刘欢,于安峰,徐伟.氢能安全挑战及AI赋能安全技术发展[J].化学工业与工程,2025,42(6):2-17.
- [4]安金彪,王文权,辛传奇.“双碳”驱动的地质储氢技术:潜力、瓶颈与创新[J].油气储运,2025,44(11):1208-1220.
- [5]杨宗华.氢能产业发展在保障国家能源安全中的定位与推进策略[J].团结,2025(5):21-24.