

电解水制氢的安全设施设计探究

周碧海

三一集团有限公司 湖南 长沙 410000

摘要: 本文聚焦电解水制氢工艺安全,概述了其制氢流程、风险因素。从设备安全防护出发,阐述了电解槽、气体储存输送及电气设备安全设计要点;介绍了监测预警设施,涵盖氢气泄漏、压力温度及火灾报警系统;还设计了应急处理设施,包括应急疏散、消防与急救设施,以构建电解水制氢全方位安全保障体系。

关键词: 电解水制氢;安全设施设计;风险防控;氢气泄漏;应急处理

引言:电解水制氢作为绿氢生产的核心技术,在能源转型中占据关键地位。然而,其工艺涉及高温高压、易燃易爆气体及复杂电气系统,安全风险多维耦合。本文从设备防护、监测预警、应急处理三方面构建系统性安全体系,通过材料选型、智能监测、消防联动及应急响应机制,为规模化制氢提供全流程安全管控方案,助力氢能产业高质量发展。

1 电解水制氢工艺及风险概述

电解水制氢作为清洁能源领域的核心技术,通过直流电驱动水分子分解,实现氢气与氧气的高效分离。其工艺体系由四大核心环节构成:电解槽作为核心反应单元,利用电极材料的催化特性加速水分子分解;气液分离装置通过重力沉降或离心分离技术,快速脱除气体中携带的电解液;干燥系统采用吸附或冷凝工艺,将氢气含水量降至露点温度以下;高压储存设备则通过压缩技术将氢气存储于特制容器,满足后续运输与应用需求。该工艺凭借产物纯度可达99.99%以上的优势,成为规模化绿氢生产的首选技术。(1)制氢全流程存在显著安全风险。从物质特性分析,氢气的爆炸极限范围覆盖4.0%-75.6%的体积浓度,仅需0.02mJ的能量即可引发燃烧,其扩散速率是天然气的3.8倍,极易在泄漏后迅速与空气混合形成可燃混合气。据国际氢能协会统计,氢气爆炸产生的冲击波超0.1MPa时,可导致建筑物结构损坏,其火焰传播速度高达2800m/s,远超传统碳氢燃料,事故破坏力极强。(2)设备运行层面同样暗藏隐患。电解槽长期在60-80℃高温与1-3MPa高压环境下工作,碱性电解质(如氢氧化钾溶液)或酸性质子交换膜对设备材料的耐腐蚀性能提出严苛要求。电极涂层剥落、隔膜破损等故障会导致氢气与氧气直接混合,形成爆炸性气体。电气系统中,尽管单槽工作电压为1.8-2.2V,但串联运行的电解槽组总电压可达数百伏,一旦绝缘层老化、接地系统失效,操作人员面临严重的触电风险。在氢气储存环

节,20-70MPa的高压储罐若安全阀失效或管道发生疲劳裂纹,将导致高压氢气高速喷射泄漏,进一步加剧事故风险。(3)环境因素对系统安全的影响亦不容忽视。高温环境会加速设备材料的机械性能衰退,缩短密封件使用寿命;潮湿环境则可能降低电气设备的绝缘性能,增加漏电风险。这些风险因素相互耦合,构成复杂的安全隐患网络,亟需通过系统性的安全设施设计和智能化监控手段,实现风险的精准识别与有效防控^[1]。

2 设备安全防护设施设计

2.1 电解槽安全设计

电解槽作为电解水制氢的核心反应装置,其安全设计需兼顾材料性能、压力控制与温度管理。在材料选型方面,钛合金凭借优异的耐腐蚀性能,可有效抵御碱性电解质(如氢氧化钾溶液)的长期侵蚀,同时具备高强度与耐高温特性,能承受60-80℃工作温度及1-3MPa压力,保障设备结构稳定性;聚四氟乙烯则以其卓越的化学惰性和绝缘性,常被用于电解槽内衬及密封部件,防止电解液渗漏与电气短路。此外,新型复合陶瓷材料因兼具高催化活性与热稳定性,逐渐成为电极材料的优选方案。压力释放装置是电解槽安全的关键防线。依据《固定式压力容器安全技术监察规程》,需配备符合标准的安全阀或爆破片,当内部压力超过工作压力1.1-1.3倍时,装置自动开启释放压力,避免设备因超压破裂。温度监测系统采用高精度热电阻传感器,实时采集电解槽内部温度数据,并与中央控制系统联动。一旦温度异常升高,冷却系统即刻启动,通过循环冷却水或散热片快速降温,防止电极材料性能衰退、隔膜变形等风险,确保电解反应安全稳定进行。

2.2 气体储存与输送设备安全设计

氢气储存与输送设备的安全性直接关系制氢系统的整体风险防控。依据GB 50177-2018《氢气站设计规范》,氢气储罐需选用经严格检测的压力容器,其设计

压力至少为最高工作压力的1.5倍,确保极端工况下的安全运行。储罐采用双层壁结构,夹层填充高效绝热材料,并在外部喷涂防火涂层,该涂层不仅具备阻燃功能,还可抵御紫外线与风雨侵蚀。密封装置采用金属缠绕垫片与O型密封圈组合结构,经氦质谱检漏测试,确保泄漏率低于 $1 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,防止氢气微量泄漏积聚。氢气输送管道系统需采用无缝钢管,壁厚根据压力等级精确计算,确保承压能力。管道连接优先采用焊接工艺,减少泄漏点;若使用法兰连接,则配备高强度螺栓与密封垫片,并进行100%气密性检测。防静电接地装置沿管道每隔30-50米设置一处,通过专用接地线与接地网可靠连接,及时导除静电,避免因静电火花引发氢气燃烧爆炸。同时,在管道关键节点安装压力与流量监测装置,实时监控输送状态,异常时自动触发紧急切断阀,保障输送安全。

2.3 电气设备安全设计

电解水制氢系统中的电气设备安全防护是防范氢气爆炸的核心环节。依据GB 3836系列防爆标准,所有电气设备均需选用防爆型产品,如隔爆型、本质安全型设备,其外壳可承受内部爆炸压力,并阻止火焰传播至外部危险环境。电气线路铺设遵循《爆炸危险环境电力装置设计规范》,采用阻燃电缆穿管敷设,管材选用镀锌钢管,防止机械损伤与火灾蔓延;电缆接头处使用防爆接线盒,确保密封性。漏电保护与过载保护装置构成电气安全的双重屏障。漏电保护装置采用高灵敏度剩余电流动作断路器,当线路漏电电流超过30mA时,0.1秒内迅速切断电源,防止人员触电。过载保护装置通过热继电器或电子保护器实时监测电流,超过额定值时自动切断电路,避免设备因过载发热导致绝缘老化、短路起火。此外,电气系统配备防雷击装置,在变压器、配电柜等关键部位安装浪涌保护器,防护雷电过电压对设备的损害,确保电气设备在复杂环境下安全稳定运行^[2]。

3 监测预警安全设施设计

3.1 氢气泄漏监测系统

氢气泄漏监测系统是电解水制氢安全防护的前沿防线,需实现对氢气浓度的精准、动态监测。在制氢车间与氢气储存区域,需部署高灵敏度的检测设备。催化燃烧式检测仪通过催化氢气氧化反应产生热量变化,能精确捕捉低浓度氢气;红外吸收式检测仪利用氢气对特定波长红外光的吸收特性,具备抗干扰能力强、稳定性高的优势。依据《氢气使用安全技术规程》,所有检测仪必须具备声光报警功能,当氢气浓度达到爆炸下限(4.0%)的25%(即1.0%)时,立即触发高频蜂鸣与闪

烁灯光报警,并通过Modbus、Profibus等通信协议将信号实时传输至中央控制室。在设备布局上,遵循“重点区域加密、全面覆盖”原则。电解槽接口、储罐阀门、管道法兰等易泄漏点,按5-8米间距设置检测仪;开阔区域则以10-15米为间隔布置,形成立体式监测网络。相邻检测仪信号相互校验,有效降低误报率,确保泄漏信息的准确性与及时性。系统还支持历史数据存储与趋势分析,便于安全管理人员预判潜在风险,提前采取防控措施。

3.2 压力与温度监测系统

压力与温度监测系统贯穿电解水制氢全流程,是保障设备稳定运行的关键。在电解槽、气体储罐及输送管道等核心设备上,均需安装高精度传感器。压力传感器采用压阻式或电容式原理,可实时监测0-70MPa范围内的压力变化,测量精度达 $\pm 0.5\% \text{FS}$,当压力波动超过正常工作值的 $\pm 10\%$ 时,立即发出声光预警,并联动电动调节阀、安全阀等执行机构。压力过高时,安全阀自动开启泄压;压力不足时,增压泵自动启动维持系统稳定。温度监测选用铂电阻或热电偶传感器,前者适用于-200℃-650℃宽温域测量,后者可应对更高温度环境。一旦设备或管道温度超过设定阈值(如电解槽超过85℃),系统自动启动冷却风扇、循环水冷装置等降温设备,同时将异常数据上传至中央控制系统,便于运维人员远程监控与故障诊断。通过对压力与温度数据的持续监测与分析,可有效预防设备因参数异常引发的安全事故。

3.3 火灾报警系统

火灾报警系统是制氢场所抵御火情的核心设施,需通过多类型探测器协同实现火灾早期预警。在制氢车间和氢气储存区域,需组合部署烟雾探测器与火焰探测器。离子式烟雾探测器对早期阴燃产生的微小颗粒极为敏感,能在火灾萌芽阶段发出警报;光电式烟雾探测器则对大颗粒烟雾检测效率更高。火焰探测器采用红外、紫外或复合探测技术,可在3-5秒内识别火焰特征光谱,有效区分真实火情与干扰源。火灾报警系统具备智能联动功能,当任意探测器触发报警后,立即启动消防喷淋系统与气体灭火装置。水喷雾系统通过雾化喷头降低温度、稀释可燃气体;七氟丙烷等气体灭火系统迅速抑制燃烧链式反应。同时,触发车间内声光报警器与应急广播,引导人员疏散,并将火灾位置、火势等级等信息同步传输至消防控制室与应急指挥中心。系统还支持与视频监控联动,自动调取报警区域画面,为应急处置提供直观依据,提升火灾响应效率。

4 应急处理安全设施设计

4.1 应急疏散设施

应急疏散设施是保障人员在电解水制氢事故中生命安全的关键防线,需遵循系统化、标准化设计原则。依据《建筑设计防火规范》(GB 50016),制氢车间和储存区域应至少设置两个独立的安全出口,疏散通道宽度不得小于1.1米,且通道内严禁堆放任何杂物,确保疏散路径畅通无阻。通道地面需设置蓄光型疏散指示标志,间距不超过20米,指示标志应具备自发光功能,即使在断电状态下仍能清晰引导逃生方向;顶部安装应急照明灯具,其照度在疏散路径地面最低水平照度不低于1.0lx,转角处不低于5.0lx,保障人员在浓烟等恶劣环境下仍能辨别逃生路线。同时,企业需制定详细的应急疏散预案,明确各岗位人员职责、疏散集合点位置及疏散流程。预案应根据制氢工艺特点,模拟氢气泄漏、火灾爆炸等不同类型事故场景进行针对性设计。定期组织全员参与疏散演练,每季度至少开展一次,演练内容涵盖警报响应、人员引导、伤员救助等环节,通过模拟真实场景,提升人员应急反应速度和协同配合能力。

4.2 消防设施

消防设施的科学配置是控制电解水制氢事故蔓延的核心手段,需结合氢气易燃易爆特性及制氢场所环境特点进行设计。根据《氢气站设计规范》(GB 50177),制氢车间和储存区域应设置自动喷水灭火系统,采用开放式喷头或水喷雾喷头,利用水雾的冷却、稀释作用抑制氢气燃烧。同时,配备七氟丙烷、IG541等气体灭火系统,在火灾初期阶段通过降低氧气浓度、抑制链式反应实现高效灭火。对于局部火灾隐患点,如电解槽周边、电气控制柜等,需布置干粉灭火器,其灭火级别不低于3A/89B,确保能够迅速扑灭初期火源。消防栓系统应沿疏散通道和设备区域均匀布置,间距不超过30米,且保证每个防火分区至少有两个消防栓可供使用。所有消防设施需建立定期检查维护制度,每月对灭火器压力、消防栓阀

门密封性等进行检查,每半年对消防喷淋系统、气体灭火系统进行联动测试,确保设备处于随时可用状态^[3]。

4.3 急救设施

急救设施的完善配置是降低电解水制氢事故人员伤亡的重要保障,需满足及时性、专业性和全面性要求。在制氢车间和储存区域的出入口、操作岗位附近等人员密集位置,应设置标准化急救箱,箱内配备止血带、无菌纱布、消毒药水、绷带、烧伤膏等基础急救药品和器材,同时根据制氢工艺可能产生的危害,增加防化手套、洗眼器等特殊防护用品。急救箱需张贴醒目标识,并确保箱体牢固安装、易于取用。企业应指定专人负责急救设施的管理,定期检查药品有效期和器材完整性,及时补充消耗品和更换过期药品。同时,组织全体工作人员参加急救知识培训,培训内容涵盖心肺复苏(CPR)、创伤止血、烧伤处理等基础急救技能,确保员工在事故发生的第一时间能够进行自救互救。

结束语

电解水制氢安全设施设计是涵盖设备防护、监测预警与应急处理的多维度系统工程。通过核心设备安全强化、全流程风险动态感知及多层级应急响应体系构建,可有效阻断事故链演化路径。未来需持续推进智能化监测、本质安全工艺与应急管理数字化转型,为绿氢产业规模化发展筑牢安全根基。

参考文献

- [1]杨虹宇,李晓鹏,郑健,等.电解水制氢的基本操作及设备优劣对比[J].氯碱工业,2022,58(12):10-13.
- [2]吉旭,周步祥,贺革,等.大规模可再生能源电解水制氢合成氨关键技术与应用研究进展[J].工程科学与技术,2022,54(05):1-11.
- [3]丛琳,王楠,李志远,等.电解水制氢储能技术现状与展望[J].电器与能效管理技术,2021,(07):1-7+28.