

绿色氨醇一体化项目全流程危险有害因素辨识及风险应对研究

李梦凡

云南茂赛建筑劳务分包有限公司呼伦贝尔分公司 内蒙古自治区 呼伦贝尔 021000

【摘要】：绿色氨醇一体化是依托可再生能源发电开展电解水制氢，进而合成氨与甲醇的新型低碳化工生产模式，是工业领域实现深度脱碳的重要技术。相较于传统化石原料制氨醇工艺，该模式在碳排放层面具备显著优势，但全流程横跨新能源发电、电解制氢、化工合成三大领域，涉及多种易燃易爆有毒危险化学品，工艺风险特征显著。基于此，本文从全流程视角出发，对绿色氨醇一体化项目各工艺环节开展系统性危险有害因素辨识，在此基础上提出分层分级的风险应对策略与安全管理体系优化方案，为国内同类绿色化工项目的安全风险管控提供参考。

【关键词】：绿色氨醇一体化；危险有害因素辨识；风险应对；全流程安全管理

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.033

引言

为落实“双碳”战略目标，我国正加快推动可再生能源规模化开发利用，绿电替代、绿氢消纳成为解决高耗能行业深度脱碳难题的重要方向。绿色氨醇一体化项目以可再生能源发电为源头，通过电解水制取绿氢，再以绿氢为原料合成氨与甲醇，既实现了可再生能源的跨领域利用，又从源头替代了传统化石原料，大幅降低了氨醇生产过程的碳排放，近年来国内一批示范项目先后落地投产，产业规模呈现快速扩张态势。

1 绿色氨醇一体化项目全流程危险有害因素辨识

1.1 制氢环节危险有害因素

碱性电解水制氢是当前绿氢生产的主流工艺，其危险源集中于电解槽本体、气液分离系统及氢气纯化单元。电解槽运行温度约 70-90℃，碱液循环系统中氢氧化钾或氢氧化钠溶液具有强腐蚀性，长期运行下密封垫片及电极涂层劣化可能导致电解小室内部短路，引发局部过热甚至烧毁隔膜，造成氢氧互窜，混合气体达到爆炸极限后遇火花即发生爆燃。气液分离器因液位控制失效时，氢气中夹带碱雾进入后续纯化系统，腐蚀管道及吸附塔内壁，还可能引起吸附剂粉化，增加系统压降，诱发高压氢气泄漏。氢气纯化单元中的脱氧器在催化剂作用下会把微量氧气与氢气反应生成水，该过程如果原料气中氧含量超出设计值，反应热积聚可能导致床层温度失控，高温氢气外泄后与空气混合形成爆炸性气云。电解水制氢系统对供电稳定性也十分敏感，可再生能源发电的间歇性导致电解槽频繁启停，电流波动时阴极产氢量与阳极产氧量的比例偏离理论值，氧气中混入氢气的风险显著上升。

1.2 合成氨环节危险有害因素

合成氨工序的危险性较制氢环节显著升级，氢氮混合气经多级压缩后进入合成塔，催化剂床层内发生放热反应。高压氢气与氮气的混合原料气一旦泄漏，高速喷射产生的静电即可引燃气体，形成爆炸。合成塔外壳在高温高压作用下，钢材内部可能产生氢致裂纹，如果未及时检测修复，氢气沿晶界渗入导

致金属脆化，最终引发容器韧性断裂。氨合成反应为强放热过程，换热器结垢时，床层温度急剧攀升，催化剂烧结失活的同时，合成塔内壁材料屈服强度下降，发生超压破裂的概率增大。工艺气中含有一氧化碳微量组分，该气体与氢氮气混合后具有毒性，经呼吸道进入人体后与血红蛋白结合生成碳氧血红蛋白，致使组织缺氧，轻度暴露表现为头痛眩晕，重度暴露可迅速进入昏迷状态。氨合成回路中的惰性气体排放口是另一个危险节点，排放气含氢气、氮气及少量甲烷，如果排放位置距热源过近，气体扩散过程中遇点火源即回火至系统内部，后果极为严重。

1.3 绿醇合成环节危险有害因素

甲醇合成采用铜基催化剂，原料气为氢气、一氧化碳和二氧化碳的混合气，该环节的危险性来自一氧化碳的剧毒特性，合成气泄漏后具有燃爆风险，也会对作业人员造成急性中毒威胁，一氧化碳在空气中的最高容许浓度为 30mg/m³，实际泄漏事故中往往短时间内即超出该限值数倍。甲醇合成塔为管壳式结构，管程装填催化剂，壳程通入沸水移热，如果给水系统故障导致液位下降，反应热就无法及时导出，床层温度飞升可能超过 300℃，铜基催化剂释放大反应热，最终致使反应器超压破裂。粗甲醇中含有二甲醚、高级醇及溶解性气体等副产物，在精馏过程中，精馏塔塔顶冷凝器如果冷却水中断，塔内压力骤增，安全阀起跳后甲醇蒸气排放至大气，遇静电即着火。合成气压缩机如果干气密封失效，高压合成气沿轴端泄漏至厂房内，就会引发群体中毒风险，更可能在压缩机高温机体表面直接着火。

1.4 产品储存及运输环节危险有害因素

液氨储罐采用常压低温或压力储存两种方式，低温储罐需维持-33℃以下，液氨保温层失效或制冷系统故障会导致罐内温度升高，液氨汽化后罐压迅速攀升，安全阀频繁起跳如果超出设计排放能力，罐体机械强度不足以承受内压时即发生脆性破裂，大量液氨闪蒸为有毒蒸气云，沿地面扩散可能波及厂外环

境。甲醇储罐为常压内浮顶结构，浮盘密封圈老化导致甲醇蒸气积聚于罐顶与浮盘之间，如果罐壁腐蚀减薄或呼吸阀堵塞，罐体在温差变化下承受正压或负压交替作用，可能引发罐壁屈曲或撕裂。槽罐车运输过程中，液氨罐车超装或装卸臂脱落造成泄漏，液态氨在环境温度下迅速气化形成白色蒸气云，对沿途居民构成中毒威胁。甲醇运输罐车如果发生追尾事故，罐体破损后甲醇流淌至路面，其燃烧热值较高且火焰呈淡蓝色，白天不易察觉，扑救难度大。根据重大危险源辨识标准，氨储量超过10吨即构成重大危险源，甲醇储量超过500吨亦达到临界量，因此氨醇一体化项目的储存设施往往直接构成一级或二级重大危险源。

2 绿色氨醇一体化项目全流程风险应对策略

2.1 针对制氢环节建立氢能安全防控体系

制氢环节的危险在于氢气极宽的爆炸极限范围，防控体系应围绕泄漏预防、积聚消除和点火源控制三个层面展开。电解槽及氢气管道采用双壁管结构，内管输送氢气、外管充入惰性气体，一旦内管破裂，外管压力变化触发报警，自动切断氢气来源。氢气压缩机厂房顶棚采用轻型泄压材质且不得设吊顶，所有金属构件实施等电位连接。针对可再生能源波动导致的电解槽频繁启停问题，应在制氢系统前端配置足够容量的缓冲储氢罐，小时级波动转化为日级稳定供应，同时开发宽负荷调节型电解槽，减少非计划停机频次。氢气放空管应延伸至厂房最高处且高出屋顶檐口3米以上，管口设置阻火器，确认后可以实施排空。工艺装置区设置固定式氢气浓度检测报警器，信号接入安全仪表系统，当浓度达到第一级报警值时联动启动事故通风风机，达到第二级报警值时切断该区域所有非防爆电气设备电源并自动关闭电解槽输出氢气阀门。

2.2 针对合成氨环节强化氨泄漏风险控制

氨合成回路中所有高压管道及设备法兰连接应采用透镜垫密封结构，加装防喷溅护罩，护罩内侧开孔连接泄漏检测管线，实现带压状态下微小泄漏的在线检出。合成塔、热交换器及分离器等高压容器应按照高于设计压力的标准进行水压试验，且每半年实施一次声发射检测以捕捉早期裂纹扩展信号。针对氨泄漏后的快速扩散，应在液氨储罐及合成装置区下风向设置水幕喷淋系统，喷射角度与风向联动调节，形成有效水雾屏障以吸收气态氨，但要注意喷淋水量的控制避免含氨废水大量漫流造成次生污染。储罐区地坪应设计为防渗结构，构筑围堰，围堰容积不小于单台最大储罐的容量，泄漏液氨在围堰内汽化后由顶部吸风罩收集送入洗涤塔进行处理。氨泄漏探测器采用电化学原理，报警信号除驱动声光报警器外，应联动关闭泄漏源上游手动切断阀。系统检修前要使用氮气分段置换合成回路中的氢氮混合气，置换出口处可燃气体浓度连续三次分析合格后可以交付检修，进入设备内部作业时要佩戴正压式空气呼

吸器。

2.3 针对绿醇生产储运强化火灾爆炸防控

甲醇的火灾危险性属于甲类，其蒸气密度略重于空气且火焰无色透明，火灾初期隐蔽性强。甲醇合成装置区内所有高温管道表面温度超过甲醇自燃点的部位必须包覆隔热保温层，法兰连接处优先采用金属缠绕垫片。精馏系统塔顶回流罐及冷凝器设置氮气保护系统，正常运行时维持罐内微正压，防止检修或停工期间空气吸入形成爆炸性混合物。甲醇储罐内浮顶密封选用浸液式囊形密封结构，减少油气空间的体积。罐区消防系统要配置抗溶性泡沫灭火装置，同时设置固定式水炮冷却相邻储罐。甲醇泄漏流淌火的扑救应避免直接用水冲击以免扩大流淌范围，应使用泡沫覆盖窒息灭火，装卸作业区设置防车辆撞击设施，装卸过程中槽车发动机必须熄火。

2.4 强化全流程人员行为风险管控

绿色氨醇项目涉及制氢与化工生产的融合，企业应当建立复合型培训体系，对操作人员实施跨专业轮岗实训，考核内容包括电解槽启停操作程序、合成氨系统事故应急处置及甲醇精馏参数异常判断等。针对频繁出现的周期性停工检修作业，作业许可管理制度应当覆盖动火、受限空间、盲板抽堵、高处作业及临时用电五大特种作业类型，每一类作业均须编制危险源识别表和控制措施，动火作业前使用气体检测仪连续三次测量动火点周围10米半径范围内的可燃气体浓度，受限空间作业时监护人要持专用记录表逐项确认人员进出时间。全流程所有操作节点均要设置操作复核机制，涉及电解槽负荷调整、合成氨回路压力控制及甲醇精馏温度设定参数变更的操作要由两人以上确认后可以执行。

3 绿色氨醇一体化项目全流程安全管理体系优化

3.1 建立全流程风险监测平台

全流程风险监测平台是安全管理体系优化的技术基础，该平台应当接入可燃气体浓度、有毒气体浓度、压力、温度、液位、振动频率及视频监控等信号源，数据采集频率不低于每秒一次。平台内置的风险特征库应包含氢气泄漏扩散模型、氨气毒性扩散模型及甲醇蒸气爆炸模型，当实测数据出现异常趋势时，系统自动调用相应模型进行模拟，在三维地图上动态显示事故影响范围及疏散路径。制氢单元氢气浓度检测器检测到泄漏时，平台同步调取相邻区域的风向风速数据预测气云漂移方向，将预警信息推送至可能受影响的下游合成氨中控室。风光发电出力预测数据也应接入平台，当预测未来两小时内发电功率降幅超过设计限值时，系统提前向制氢及合成氨调度岗位发送减负荷预通知，避免因供电骤降导致电解槽非计划停机。

3.2 建立基于风险分级的全流程管控机制

风险分级的全流程管控机制要求对项目各单元进行综合定级，依据风险等级配置差异化的管控资源。制氢单元因氢气

爆炸风险突出应定为一级风险区域,合成氨装置因氨中毒后果严重且涉及高温高压同样列入一级,甲醇精馏区因火灾爆炸风险定为二级,储运装卸区域则根据物料种类分别纳入相应等级实施管理。不同风险等级的单元在巡检频次、仪表校验周期、安全阀检测周期及应急预案演练频次方面执行差异化标准,一级区域每日巡检不少于四次,安全仪表系统每季度开展一次全回路测试,二级区域则按照日巡检两次、半年测试一次的频率执行。管控机制应同时覆盖正常运行工况与非正常工况,针对开车、停车、负荷调整及设备切换等特殊操作模式,预先编制风险控制矩阵,每一类操作均对应明确的安全条件清单和应急处置步骤。检修作业的风险按照作业内容分级实施,涉及一级风险区域作业由项目安全总监审批,二级区域同类作业由车间安全主管审批,低风险作业由当班班长确认,分级审批制度配套电子化审批流程。

3.3 建立跨装置风险联动预警机制

制氢单元紧急停车时,合成氨装置要在收到停车信号的3分钟内启动氢气供应中断应急程序,合成回路切换至氮气循环模式以防止催化剂床层因断氢而急剧降温导致结构损坏。反

之,合成氨系统发生氨泄漏事故时,制氢单元应立即降低电解槽运行电流,同时自动关闭通向合成氨界区的氢气切断阀。甲醇合成单元如果因二氧化碳供应中断导致原料气配比失衡,预警信号应同时发送至制氢调度和甲醇储运岗位,避免粗甲醇品质劣化后误送入成品罐区。预警信息的发布采用分级推送策略,一级联锁动作信号直接触发相关装置的紧急停车系统,二级预警信号以声光方式提示对应工段的中控操作员,三级提示信息在平台界面以变色标注方式呈现。

4 结语

综上,绿色氨醇一体化项目作为新型绿氢化工产业的典型应用场景,在推动工业领域减碳的同时,其全流程涉及氢气、氨气、甲醇等多种危险化学品,融合了可再生能源波动带来的工艺参数变动,安全风险显著。文章提出对绿色氨醇一体化项目各环节开展系统性危险有害因素辨识,可以锁定各单元的风险类型,在此基础上围绕各环节风险特征构建针对性防控策略,从技术防控层面完成风险的源头遏制,再通过人员行为管控,可以有效降低各类风险的事故后果。

参考文献:

- [1] 宋如栎,许芬,刘冬冬,等.中能建松原氢能产业园(绿色氢氨醇一体化)项目介绍[J].电力勘测设计,2026,(3):2.
- [2] 王志伟,郭亚森,银姣姣,等.考虑储能电池寿命与新能源消纳的风光储微电网日前优化调度[J].山西电力,2026,(4):50-59.
- [3] 汪波.新能源项目风险管理与企业应对策略的协同机制探讨[J].应用能源技术,2025,(3):109-111.
- [4] 门晶健.全国绿色氢氨醇一体化产业布局与产品开发策略[J].产品可靠性报告,2025,(12):196-198.
- [5] 沙海伟,胡晓雨,韩倩倩.电力设计企业开发氢氨醇油一体化项目的对策探讨[J].电力勘测设计,2024,(10):30-34.