

基于安全管控的双氧水制备过程关键技术探究

马臣信 李泽坤 梁璐 肖伟健

聊城鲁西双氧水新材料科技有限公司 山东 聊城 252000

【摘要】：双氧水制备过程涉及复杂的多相反应体系与严格的工艺控制条件，生产过程中存在热失控、物料不稳定及设备运行波动等多重安全隐患。基于安全管控视角，对制备过程中的关键技术环节进行系统梳理，结合反应参数调控、设备可靠性提升及在线监测手段，构建全过程安全控制机制。通过对加氢与过氧化环节的精细化管理，强化温度、压力等关键变量的协同调节能力，有效抑制异常波动。实践分析表明，安全管控与工艺技术的深度融合可提升系统运行稳定性，降低事故风险，并促进生产效率与资源利用水平的协调提升。

【关键词】：双氧水制备；安全管控；关键技术；工艺优化；风险控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.056

引言

双氧水作为重要氧化剂，在化工、环保及医药等领域具有广泛应用，其生产过程涉及加氢、氧化及萃取等多个复杂环节，工艺条件敏感且耦合程度高。生产过程中一旦参数失控，极易引发连锁反应，带来安全隐患。近年来，装置规模不断扩大，对稳定性与安全性的要求持续提升，传统经验型管理方式已难以满足实际需求。如何在保证产能的同时实现全过程风险可控，成为行业关注的重点方向。通过对关键技术环节进行系统梳理，并引入安全管控理念，有助于推动工艺运行向精细化与可控化发展。

1 双氧水制备过程中的风险特征识别

1.1 反应体系热失控隐患分析

双氧水制备涉及蒽醌工作液的加氢与自氧化反应，反应过程具有明显放热特性，体系对温度波动极为敏感。在加氢阶段，催化剂活性过高或氢气分压异常易导致反应速率增加，引发局部过热现象，氢化降解物增加。我单位于2022年为委托沈阳院开展了反应风险评估，氢化反应当物料切断后体系持续反应温升为10.8℃（绝热），该温度可供同行参考。

进入氧化阶段后，氧气供给不均或传质效率不足，会造成反应区域不稳定，进一步加剧温度偏移。热量积聚若未能及时通过换热系统释放，将形成热失控趋势，进而影响工作液稳定性甚至引发分解反应。我单位于2022年为委托沈阳院开展了反应风险评估，氧化反应当物料切断后体系持续反应温升为2.5℃（绝热），该温度可供同行参考。

多相反应体系中气液固三相耦合复杂，热量传递路径受限，局部热点更难监测与控制，对安全运行构成潜在威胁。这也是《酸碱交替固定床过氧化氢生产工艺改造项目安全风险防控要点》中为什么要求氢化塔、氧化塔增加测温点的原因之一；让我们可以实时监测系统温度变化，为安全操作提供科学依据。

1.2 设备运行异常诱因分析

双氧水装置运行依赖多类关键设备协同工作，包括加氢反应器、氧化塔、萃取塔及循环泵等，设备状态直接影响系统稳定性^[1]。反应器内部流场分布不均或填料堵塞，会导致物料停留时间异常，诱发反应不完全或副反应增强。

循环泵密封失效或轴承磨损，可能引起工作液泄漏与压力波动，破坏系统平衡。密封失效后，可能造成工作液与双氧水相互串料，引发物料污染、副反应加剧、双氧水分解风险升高，严重时威胁系统安全稳定运行。

1.3 物料特性带来的安全问题

双氧水制备过程中所涉及的工作液体系具有一定的化学活性与不稳定性，蒽醌及其衍生物在特定条件下易发生降解反应，生成杂质并降低体系稳定性。反应过程中生成的双氧水本身具备强氧化性，在高浓度或受污染情况下存在分解风险，释放大热量与气体，易引发压力突变。溶剂挥发性与可燃性特征，使其在密闭或通风不良环境中形成可燃气氛，增加爆炸隐患。不同组分之间的相容性及杂质累积情况，会改变体系物化性质，对反应动力学及安全边界产生影响，增加运行过程的不确定性。

2 关键工艺参数控制机制优化

2.1 加氢反应条件调控策略

加氢阶段作为双氧水制备的核心反应环节，其工艺参数对反应选择性及体系稳定性具有决定性影响。工作液在钨系催化剂作用下完成蒽醌加氢转化，反应速率受氢气分压、温度及液相流速等多因素耦合控制。氢气供给需维持在合理分压范围内，以避免传质受限或反应过度加速带来的副反应增强。催化剂床层温度分布应保持均匀，通过优化换热结构及循环流量，实现热量及时移除，抑制局部热点形成。我单位自2024年10月份开车以来连续运行21个月，运行平稳。氢化塔塔顶压力始终维持在0.345MPa左右。当氢化塔压力上升时通过降低闪蒸槽的真空度，使工作液中水分上升，有利于加氢反应的进行，

塔顶压力下降后再恢复到原有水分值或排出再生液储槽中的水。

2.2 氧化过程稳定性提升路径

氧化阶段涉及蒽氢醌与氧气反应生成双氧水,属于典型气液两相反应体系,传质效率与反应均匀性直接决定产物收率与安全水平。氧气分布方式对反应效果具有显著影响,通过优化气体分布器结构与气泡尺寸控制,可提高气液接触面积并减少局部富氧区形成。氧化塔内液位与停留时间的合理控制,有助于保证反应充分进行并抑制副反应生成^[2]。气相中氧含量的精确调节可降低爆炸极限接近风险,结合在线气体分析仪实现动态调控。开停车初期当氧含量超过9%时,控制风险的核心是控制氧化尾气的温度 $<45^{\circ}\text{C}$,实际上此时温度越低越好。

3 安全管控体系构建路径

3.1 全过程风险分级管理方法

双氧水制备装置运行涉及多环节连续作业,不同工序风险特征差异明显,需构建基于分级理念的动态管理机制。依据反应危险性指数、物料危害特性及工艺复杂程度,对加氢、氧化、萃取及储存等环节进行系统划分,形成分区分级的风险识别框架。通过引入HAZOP分析与LOPA评估方法,对关键节点进行定量评价,明确高风险区域与关键控制点。不同等级风险对应差异化控制措施,高风险环节强化联锁保护与操作限制,中低风险区域侧重过程监控与日常巡检。风险分级结果需与工艺参数、设备状态及运行工况实时关联,实现动态调整机制,使安全管控由静态识别转向全过程跟踪,提高系统应对异常波动的能力。

3.2 在线监测与预警技术应用

双氧水制备过程对参数变化敏感,传统离线检测难以及时反映系统状态,在线监测技术成为安全管控的重要支撑^[3]。通过部署温度、压力、流量及氧含量等多参数传感器,实现关键数据的连续采集与实时传输。结合DCS与SIS系统,对异常信号进行逻辑判断与联锁响应,确保偏差在可控范围内被及时修正。引入软测量技术与数据驱动模型,对难以直接检测的变量进行间接估算,提高过程感知能力。预警机制基于历史数据与运行模型设定阈值区间,当参数接近临界边界时触发报警,辅助操作人员提前干预。数据融合与趋势分析技术的应用,使系统具备对潜在风险的提前识别能力,增强整体运行的可控性与稳定性。

3.3 操作规范标准化设计

双氧水装置运行依赖操作行为的规范执行,标准化体系建设直接影响安全管控效果。针对不同工序制定细化操作规程,涵盖开停车流程、参数调整步骤及异常工况处置路径,确保操作过程具备一致性与可追溯性。关键操作节点设置明确的控制界限与确认机制,减少人为误判带来的偏差风险。结合人工工

程学原理,对控制界面与操作流程进行优化设计,提升操作直观性与响应效率。岗位培训体系需覆盖工艺原理、安全要求及应急处置技能,通过情景模拟强化操作人员风险识别能力。标准化文件与实际运行数据形成闭环修正机制,使操作规范不断贴合装置运行特性,从而降低人为因素对系统稳定性的影响。

4 关键设备运行可靠性提升技术

4.1 反应器结构优化设计

双氧水制备过程中反应器承担核心反应功能,其结构设计直接关系到传质效率与热量分布均匀性。针对气液固多相反应特征,通过优化内构件布置与流道结构,可改善反应介质的流动状态,减少死区与短路现象。催化剂床层采用分级填装方式,有助于降低压降并提升反应接触效率,同时缓解局部过热问题。换热组件的合理配置能够强化热量移除能力,使温度分布趋于稳定。反应器材质需具备良好的耐腐蚀性能与机械强度,以适应工作液体系的长期作用。结构设计过程中引入数值模拟技术,对流场与温度场进行预测分析,可提前识别潜在不均匀区域,从而提升整体运行的安全性与可靠性。

工作液进入反应器后,经由分布器及筛板实现均匀下降。反应器内部催化剂采用分段装填方式,各段之间设有分布盘。公司在催化剂装填过程中利用水平仪进行测量,水平误差控制不得超过 $\pm 10\text{mm}$,触媒层需多点均匀布料,严禁从单点倾倒形成“锥体”。在装填催化剂过程中,需严格做好催化剂层的防护工作,以防止工作液流通时湍流导致催化剂泄漏,进而堵塞分布盘,引发气液分布不均。此外,在催化剂层上部加装惰性氧化铝瓷球进行覆盖,旨在避免催化剂在工作液流动过程中发生翻动,造成局部聚集并产生局部过热。局部过热会加速催化剂烧结与结焦,导致催化剂不可逆失活,同时加剧副反应,影响产品质量,严重时甚至引发飞温等安全隐患,缩短装置运行周期。

4.2 密封与防泄漏技术改进

双氧水生产系统中涉及多种易挥发及具有反应活性的介质,密封性能直接影响装置安全水平。设备连接部位需采用高可靠性的密封结构,如双端面机械密封及金属垫片密封,以提升耐压与耐腐蚀能力。对泵类及管道接口部位进行重点强化,通过优化密封材料选择与结构设计,减少因磨损或老化引起的泄漏风险^[4]。目前,我们的双氧水生产装置系统已在新上项目(8#、9#双氧水装置)关键设备上采用双端面机械密封,设备及管道连接部位使用金属垫片等可靠密封结构,泵类与管道接口已做重点强化处理。装置配套紧急撤料、压力平衡等辅助措施,能够有效控制介质泄漏风险。

4.3 自动化控制系统升级

自动化控制系统在双氧水制备过程中承担参数调节与安全联锁的重要功能,其性能直接影响装置运行的稳定性。通过

升级分布式控制系统,实现多变量参数的集中管理与实时调节,提高控制精度与响应速度。安全仪表系统的独立配置能够在异常工况下迅速执行连锁动作,防止事故扩大。先进控制算法的引入,使复杂工况下的参数调节更加平稳,减少波动对反应过程的影响。数据采集系统的优化可提升信号传输的可靠性,避免因数据延迟或失真导致控制偏差。人机交互界面的改进增强了操作直观性,使运行状态更加清晰可辨,有助于及时发现异常并采取措。

5 安全管控与工艺协同效果评估

5.1 运行稳定性提升表现

在安全管控措施与工艺优化技术协同作用下,双氧水制备装置运行状态呈现出更高的平稳性。关键工艺参数波动幅度明显收敛,温度、压力及流量等指标维持在设定区间内的能力显著增强。反应系统中气液传质效率与热量分布趋于均衡,减少了局部偏差对整体运行的干扰。设备负荷变化对系统的影响得到有效缓冲,运行过程中的非计划波动频率降低。通过连续运行数据对比分析,装置长周期稳定运行能力得到提升,停车检修次数明显减少。参数调节响应时间缩短,使系统在扰动条件下仍能保持较高的运行一致性,体现出工艺与安全管控深度融合后的稳定特征。

5.2 事故风险降低程度分析

安全管控体系与关键技术措施的联动实施,对事故风险形成多层次抑制机制。通过对高风险节点实施强化控制,异常工况发生概率显著下降。连锁保护与预警机制的有效运行,使潜在偏差在发展初期即被识别并处理,避免演化为失控状态。设

备泄漏、温度异常及压力波动等典型风险因素均得到有效控制,危险源暴露程度降低^[5]。风险评估结果显示,高等级风险区域数量减少,风险分布趋于均衡。操作行为的规范化执行降低了人为失误引发事故的可能性,系统整体安全裕度得到提升。多重防护机制的叠加,使事故发生路径被有效切断,运行环境更加可控。

5.3 综合运行效率变化情况

在安全管控与工艺参数优化共同作用下,双氧水装置的运行效率表现出明显改善。反应转化率与产品收率保持在较高水平,副产物生成得到有效抑制,物料利用率提升。能量利用效率得到优化,换热系统运行更加稳定,减少了无效能耗。设备运行状态良好,故障停机时间缩短,使装置开工率持续提高。自动化控制系统的应用增强了参数调节的精确性,减少人为干预带来的不确定性。生产节奏趋于稳定,使整体产能释放更加均衡。运行数据表明,在保证安全边界的前提下,生产效率与资源利用水平实现同步提升。

6 结语

安全管控理念融入双氧水制备全过程后,关键工艺参数控制、设备运行状态及操作行为均呈现出更高的协调性与可控性。风险分级管理、在线监测及自动化控制技术的结合,使潜在隐患能够在早期阶段得到识别与抑制,运行稳定性显著增强。关键设备结构优化与密封技术改进进一步降低了系统不确定性,减少异常波动对生产的影响。安全要素与工艺技术的协同推进,推动装置运行向精细化与稳定化方向发展,为提升生产安全水平与运行质量提供了可靠支撑。

参考文献:

- [1] 雷静,陈子茜,李怡招,曹亚丽.用于电催化氧还原制备双氧水的催化剂的研究进展[J].材料导报,2021,35(9):9140-9149.
- [2] 邵算,李修访,高恩虎,邢祥岩.数字智能化平台在双氧水安全生产中的运用[J].中华纸业,2025,46(1):56-58.
- [3] 吴彬,程佳,李开冉.双氧水生产装置的安全环保优化技术研究[J].流程工业,2025(3):42-45.
- [4] 王宇,高宇龙.智慧化工生产安全管控系统在煤化工企业的应用[J].科技与创新,2026(1):215-217+221.
- [5] 朱红伟,姜杰,孙冰,孙峰,徐伟.双氧水氧化工艺安全研究策略[J].无机盐工业,2021,53(1):77-81.