

# 工业级双氧水精制工段工艺设计及安全控制方案研究

岳爱鹏

河北英科石化工程有限公司天津分公司 天津 300400

**摘要:** 工业级双氧水作为重要的基础化工原料,在造纸、纺织、消毒、电子级清洗及环境治理等行业中应用广泛,产品纯度和稳定性成为衡量其工业化应用水平的重要指标。随着现代化工生产对高纯度双氧水需求不断提升,传统生产工艺难以满足更高精度、连续化与本质安全化要求,尤其在精制工段中,杂质含量控制、设备材料相容性、温度与压力波动等问题直接影响产品质量与生产安全。因此,构建科学合理的精制工段工艺流程,并设计完善的安全控制体系,对于提升双氧水生产的稳定性、降低设备运行风险、实现绿色化与智能化发展具有重要意义。本文在系统梳理双氧水物化性质及其精制关键影响因素的基础上,结合现代化工生产需求,对精制工段的核心工艺设计原则、关键设备选型要求以及影响工艺稳定性的运行条件进行分析,并构建针对性的安全风险识别框架与防控策略体系。研究表明,通过优化工艺流程、加强设备选型、明确运行参数、构建多级安全联锁系统、完善状态监测机制与强化人员培训,可显著提升精制工段的运行可靠性与本质安全水平。本文的研究对于传统双氧水生产线改造、新建精制工段规划及企业安全生产管理具有重要的理论价值与实践指导意义。

**关键词:** 双氧水;精制工段;工艺设计;安全控制;化工生产

## 引言

双氧水( $H_2O_2$ )作为高效氧化剂,因其分解产物仅为水和氧气,具有环保性好、氧化能力强、应用覆盖面广等优点,已成为现代化工生产的重要原料之一。随着电子级材料、医药制造、精细化工等行业的发展,对双氧水的纯度、稳定性及杂质含量要求不断提高,使得精制工段的工艺设计与安全控制策略愈发关键。此外,双氧水具有热不稳定性,其分解受金属离子、温度、光照等因素影响明显,若工艺及设备设计不当,容易引发系统过热、压力异常甚至造成装置事故,对生产安全构成潜在威胁。在传统生产体系中,双氧水精制环节往往存在工艺链条冗长、去杂效果不稳定、设备材料选型不合理、自动化水平不足等问题,导致产品质量波动、安全风险难以有效控制。面对工业化生产规模扩大、产品质量要求提升及本质安全化生产理念的推进,有必要对现有精制工段进行重新审视,从工艺流程设计、设备选型、安全联锁配置、检测手段完善等多个维度开展系统研究,以形成技术可行、运行稳定、安全可控的精制工段体系。基于此,本文围绕双氧水精制工段的设计与安全管理,重点从物化性质分析、工艺流程构建、设备选型标准、

安全风险识别以及防控体系设计等方面进行深入探讨,为工程实践中的工艺优化与安全管理提供理论依据与参考模式。

## 一、工业级双氧水的物化性质与精制必要性分析

### (一) 双氧水化学性质对精制过程的影响扩大

双氧水具有强氧化性,其化学结构决定了其易分解、易受到外界刺激影响的特性。在工业生产环境中,双氧水极易受热、光照、催化剂(金属离子)影响而发生剧烈分解,而分解反应会生成水和氧气,在密闭且绝热的空间内,会进一步导致温度与压力上升,加剧系统不稳定性。因此,双氧水精制过程中需要采用严格的温控系统、避免金属材料接触、减少机械摩擦、保持工艺密闭性等措施,使其在受控环境下完成精制。双氧水的易分解性还要求设备结构避免尖锐内壁、焊接不均等因素,以防形成局部分解中心。

### (二) 粗品双氧水杂质种类复杂导致精制必要性增强

双氧水生产路线中常见的蒽醌自氧化法会产生多种副产杂质,包括未反应的蒽醌衍生物、有机副产物、金属离子、稳定剂残留、微量无机盐等。这些杂质不仅影响色度、纯度,还会降低双氧水的储存稳定性和安全性。其中金属离子对分解具有强催化作用,会显著提升系统风险;有机杂质可能在精制过程中产生分解焦化物,影

**作者简介:** 岳爱鹏(1996.08-),男,汉,江苏泰州,硕士研究生,助理工程师,研究方向:化工、工程技术。

响色度并增加过滤负担。因此，精制工段在双氧水生产体系中具有不可替代的功能，是实现工业级双氧水安全性和纯度达标的关键技术环节。

### （三）精制工段对下游应用性能的决定性作用

双氧水广泛用于漂白、消毒、电子清洗等领域，不同应用对杂质含量、稳定度、色度等指标要求不同。例如电子行业对双氧水中的金属离子含量有极高的要求，高级精制工段必须能够将金属离子降低至微量水平；造纸行业对色度要求严格，需有效去除有机杂质以防止有机杂质分解生成焦化物影响色度。精制工段工艺的设计水平直接决定双氧水能否满足不同领域的应用需要，因此构建具有良好去杂能力与稳定性控制能力的精制流程显得尤为关键。

## 二、双氧水精制工段的工艺流程与关键设备设计

### （一）精制流程构建的工程原则与逻辑体系

精制工段的设计应遵循安全性优先、连续性稳定、操作简便、能耗合理、设备选材合理等基本原则。整体流程一般包括预处理去杂、过滤澄清、离子交换、真空精馏、浓度调整与成品稳定化几个环节。工艺流程需形成逻辑连续、段间衔接合理、物料转移效率高的结构，同时需保证反应条件可控、物料质量可追溯。此外，流程设计要结合原料品质、目标产品用途、装置生产规模等因素，形成既满足工业化需求又具备经济性的生产路径。

### （二）关键设备的材料兼容性、参数设计及可靠性要求

双氧水对设备材料要求极高，工艺设备需主要采用铝材、钛材、聚四氟乙烯（PTFE）、聚丙烯（PP）等耐腐蚀材料。过滤设备需具有高精度、低压损、可长期运行的特点；离子交换柱则需保证树脂耐双氧水性能且流道设计合理；精馏塔需具备耐腐蚀性、传热传质效率高、结构稳定性强、密封性良好的特点；储罐需配备氮封以隔绝空气与杂质。在设备设计中还必须考虑流体动力特性、换热效率、机械稳定性等因素，使设备能够在较宽操作负荷内保持安全运行。

### （三）工艺参数控制系统的构建与影响机制分析

精制工段对温度、压力、流量、pH等参数极为敏感，发生小幅波动就可能引起双氧水自分解风险，因此工艺监测与控制系统必须具备高灵敏度、高精度与高稳定性。例如离子交换阶段需控制进料pH、液体线速度与树脂床层压降；精馏过程需严格控制塔顶和塔底温度差、全塔压降等因素，避免出现热斑；稳定剂添加需基于精确计

量系统控制，使其满足安全性与产品指标需求。工艺参数控制不仅影响精制效率，也直接影响生产安全性。

## 三、双氧水精制工段的安全风险识别与分析

### （一）分解反应风险的诱因及扩散机理

双氧水分解可通过热诱导、催化诱导和机械诱导等多种方式触发。温度升高、金属污染、机械摩擦、压力波动等因素都会加速分解反应，并可能产生局部热点引发链式反应。此外，分解产生的氧气会进一步增加系统压力，导致设备受力不均或产生振动，从而威胁设备结构安全。理解分解风险的扩散机理有助于构建多层防护措施，避免事故扩大。

### （二）设备材料腐蚀及泄漏风险分析

若设备选材不合理，如采用普通碳钢、未处理的不锈钢等，双氧水会与金属表面发生缓慢但持续的腐蚀反应，导致设备壁厚降低、焊缝腐蚀、阀门密封损坏等问题，最终形成泄漏隐患。泄漏不仅引起产品损耗，还可能在泄漏过程中产生局部分解、导致设备受损或人员接触危险。因此，材料腐蚀是双氧水精制工段的重要安全风险之一，需在设计阶段充分预防，选择耐腐蚀的材质并设计合理的腐蚀裕度是最主要的手段。

### （三）人员操作失误与管理缺陷导致的系统安全风险

双氧水精制操作复杂，对操作人员专业知识、流程理解、应急能力等方面要求高。若人员未严格按照流程执行操作，如过量添加稳定剂、错误调节流量、忽视温度、压力报警等，均可能导致系统波动或设备损坏。管理体系缺失、培训不足、应急预案不完善则进一步放大这些风险。因此，人员与管理因素在精制工段安全风险中占重要地位。

## 四、双氧水精制工段的安全控制方案设计

### （一）构建系统化工艺安全管理体系与制度框架

科学的安全管理体系应包括工艺操作规程、设备维护规程、巡检制度、风险评估制度、安全会议制度及应急管理制度等内容。通过制定并严格执行制度，可提升操作一致性、降低系统性风险并使生产过程处于规范化管理状态。此外，管理体系需形成闭环模式，即通过持续监督、问题反馈和制度修订提高安全管理的有效性。

### （二）完善安全联锁系统构建多层防护屏障

安全联锁系统包括温度联锁、压力联锁、液位联锁、电导率联锁、紧急停车联锁等，应与PLC与DCS系统结合，实现多点监控与联动控制。在关键部位配置快速切断阀、压力泄放阀、防爆膜等装置，确保工艺异常时系统能自动响应。多层联锁设计可显著减少人为影响，提

高系统本质安全水平。

### （三）引入智能监测技术实现状态趋势预测与预警

现代化精制工段可应用智能传感器、大数据分析、机器学习算法等，实现对温度、压力、pH、电导率、杂质含量等关键参数的实时采集与趋势预测。通过分析监测数据，可提前识别潜在风险，提高预测性维护能力。此外，智能监控平台可实现远程监控与多点报警，为管理人员提供决策辅助支持。

### （四）构建分层次人员培训体系完善操作能力结构

人员能力是精制工段安全管理中的关键变量，需要构建基础知识培训、岗位技能培训、安全专项培训与应急演练培训等分层体系。通过理论教育、实操训练、模拟演练等方式，提高操作人员对双氧水特性的理解，加强应急处理与故障排查能力，使其能够在复杂工况下保持正确判断能力，提高整体安全系数。

### （五）建立应急响应体系提升事故处置速度与效率

应急响应体系应包括事故预警机制、应急处置流程、事故指挥体系、应急物资储备、事故复盘评估等环节。针对双氧水泄漏、分解加速、设备故障等事故场景制定详细应急方案，并定期组织演练，提高人员协同能力。应急体系的完善可降低事故后果，提高安全保障能力。

## 五、精制工段工艺优化方向与未来技术发展趋势

### （一）绿色化与节能化成为工艺优化的重要方向

未来精制工段应重点发展绿色化生产技术，通过优化能量利用效率、减少废水排放、提升设备生命周期利用率等方式实现清洁生产。例如采用节能型换热器、低压精馏技术、高效吸附材料等均可提升工艺绿色化水平。

### （二）数字化与智能化技术将推动工艺升级

数字孪生技术与自动化控制系统的深度应用，为双氧水生产工艺带来了全新的管理模式。通过构建与实际装置高度一致的数字模型，工艺运行状态能够以可视化方式呈现，关键参数变化更加直观清晰。结合模型预测功能，可对工艺波动进行提前研判，为运行调整提供科学依据。AI智能判别技术在数据分析基础上实现对异常工况的识别与响应，使工艺调节更具针对性与灵活性。工艺系统在智能算法支持下具备自适应调整能力，有助于提升运行稳定性并降低安全风险。智能工艺平台将生产数据、控制策略与决策支持融为一体，使管理由经验依赖转向数据驱动。随着相关技术不断成熟，智能化平

台将在提升生产效率、保障安全运行及增强企业核心竞争力方面发挥更加关键的作用。

### （三）高效稳定剂与新型去杂技术为发展重点

针对金属离子与有机杂质难以彻底去除的技术瓶颈，双氧水精制过程亟需在材料选择与分离机理上实现突破。通过研发选择性更高、稳定性更强的吸附剂，可在复杂体系中精准捕获痕量金属离子，降低副反应风险。高性能离子交换树脂在容量、再生效率与耐氧化性能方面的提升，有助于增强连续运行条件下的精制效果。新型膜分离技术在分子尺度上的筛分能力，为有机杂质的高效去除提供了新的技术路径。材料与工艺参数的协同优化，使精制过程在效率、能耗与安全性方面获得综合提升。随着新材料与新技术的持续应用，双氧水精制能力将不断增强，能够满足更高纯度等级与更严苛应用场景的需求，为相关产业的高端化发展提供可靠支撑。

## 结论

双氧水精制工段是生产体系中最具安全敏感性且与产品质量高度关联的核心环节。本文从双氧水物化性质、精制必要性、工艺流程设计、安全风险识别到安全控制体系构建等方面进行了系统研究，指出科学的设备选型、严格的工艺控制、稳定的安全联锁系统及高素质人员管理是确保精制工段安全运行与产品质量稳定的基础。未来在绿色化、智能化工艺推动下，精制工段应充分利用智能监控、数字建模、状态预测等先进技术，不断提升其自动化水平与安全运行能力，为化工行业可持续发展提供更高标准的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 刘国强, 张海涛. 双氧水生产工艺与设备优化研究[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(8): 122-128.
- [2] 王金亮, 赵雪. 双氧水精制工艺关键技术分析[J]. 化工生产与技术, 2021, 28(5): 77-82.
- [3] 李东辉, 陈伟. 双氧水分解机理及其影响因素研究[J]. 精细化工, 2019, 36(4): 45-50.
- [4] 周凯, 孙丽. 化工装置安全联锁系统设计与应用研究[J]. 化工安全与环境, 2021, 30(2): 98-104.
- [5] 胡志强, 杨敏. 工业化工设备腐蚀控制技术研究[J]. 材料保护, 2020, 53(7): 112-118.