

化工容器密闭式机械清洗工艺优化与安全控制研究

王家欢

天津滨海概念人力信息科技有限公司，天津 300450

DOI:10.61369/ETQM.2026060032

摘 要： 本文围绕化工容器密闭式机械清洗工艺优化与安全控制展开研究，确立高效、优质、节能、耐用、适配的工艺优化目标，构建多维度指标体系，通过正交试验法优化核心工艺参数，改进清洗设备核心部件结构，并针对不同规格、材质、污染物类型及特殊工况开展适配优化，提升清洗性能与适配能力。同时，结合清洗作业风险特点，确立安全控制体系构建原则，构建风险识别－过程防控－监测预警－应急处置全流程安全控制框架，明确清洗前风险识别与评估方法、清洗过程防控措施，设计安全监测与预警系统，构建完善的应急处置体系，实现清洗作业全流程安全管控。研究成果可为化工容器密闭式机械清洗工艺的工程应用提供技术支撑，有效提升清洗效率与安全性，降低生产成本，保障工业生产稳定运行。

关 键 词： 化工容器；密闭式机械清洗；工艺优化；安全控制

Research on Process Optimization and Safety Control of Closed Mechanical Cleaning for Chemical Vessels

Wang Jiahuan

Tianjin Binhai Concept Human Resources Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300450

Abstract： This paper focuses on the research of process optimization and safety control for closed mechanical cleaning of chemical vessels. It establishes optimization objectives for the process that are efficient, high-quality, energy-saving, durable, and adaptable, constructs a multi-dimensional indicator system, and optimizes core process parameters through orthogonal testing. The structure of core components in cleaning equipment is improved, and adaptability optimization is carried out for different specifications, materials, types of pollutants, and special operating conditions to enhance cleaning performance and adaptability. Meanwhile, based on the risk characteristics of cleaning operations, principles for establishing a safety control system are established, and a comprehensive safety control framework covering risk identification, process prevention and control, monitoring and early warning, and emergency response is constructed. Methods for risk identification and assessment before cleaning, prevention and control measures during the cleaning process are clarified, a safety monitoring and early warning system is designed, and a comprehensive emergency response system is established to achieve full-process safety control for cleaning operations. The research findings provide technical support for the engineering application of closed mechanical cleaning processes for chemical vessels, effectively improving cleaning efficiency and safety, reducing production costs, and ensuring the stable operation of industrial production.

Keywords： chemical vessels; closed mechanical cleaning; process optimization; safety control

引言

当前，化工容器清洗方式主要分为人工清洗、化学清洗与机械清洗三大类。其中，人工清洗效率低下、劳动强度大，且作业环境恶劣，易引发人员安全事故；化学清洗虽能快速去除污染物，但化学介质易腐蚀设备内壁、污染环境，同时存在介质残留等问题，不符合绿色环保与设备长效使用的需求。基于此，本文聚焦化工容器密闭式机械清洗工艺优化与安全控制两大核心，开展系统性研究。通过构建科学的工艺优化目标与指标体系，优化核心工艺参数、改进设备结构、完善多场景适配方案，提升清洗效率、质量与经济性；同时，构建全流程安全控制体系，明确风险识别、过程防控、监测预警与应急处置措施，实现清洗作业的安全可控。

一、化工容器密闭式机械清洗工艺优化研究

（一）工艺优化目标与指标体系构建

随着清洗技术的发展，更为安全高效的机械清洗技术应运而生，并成为一种必不可少的技术手段在石油、化工、制药、造纸、酿造、乳制品、食品和饮料等工业领域发挥着越来越重要的作用^[1]。结合化工容器密闭式机械清洗实际需求，确立高效、优质、节能、耐用、适配的工艺优化目标^[2]。清洗周期较现有工艺缩短15%以上；容器内壁污染物残留量低于行业标准且无盲区；能源消耗降低10%以上、清洗介质利用率提升20%以上；设备故障率降低25%以上、维护成本降低20%以上；适配不同规格、材质、污染物类型容器及高温、高压、腐蚀性等特殊工况。围绕该目标，构建多维度指标体系，分为核心指标与辅助指标^[3]。核心指标包括清洗效率（清洗周期、单位时间清洗面积）、清洗质量（污染物残留量、清洗均匀度）、节能性（能源消耗、介质利用率）、设备耐用性（设备故障率、维护成本）；辅助指标包括工艺适配性、操作便捷性、环保性。该体系为工艺优化方案的设计、实施及评价提供科学依据，保障优化后工艺满足实际生产需求。

（二）核心工艺参数优化

核心工艺参数是影响密闭式机械清洗效果、效率及设备损耗的关键，本文结合化工容器规格、污染物类型及材质，采用正交试验法优化核心工艺参数并确定最优组合^[4]。其中清洗压力按污染物类型（软质残渣15–25MPa、硬质结垢25–40MPa、腐蚀产物20–30MPa）调整，同时结合容器材质抗压强度适配；喷射角度采用30°、60°、90°多角度组合喷头消除清洗盲区，喷头转速根据容器直径和清洗压力控制在100–300r/min以保障清洗均匀性；清洗介质流量控制在50–150L/min，易溶解污染物介质温度控制在40–60℃，耐高温材质温度控制在20–40℃；清洗时间结合上述参数试验确定最优值，平衡清洗效率、质量与能源消耗。

（三）清洗设备结构优化

针对清洗设备结构缺陷，结合工艺参数优化，对核心部件进行结构改进以提升性能和耐用性^[5]。喷头改为多角度可拆卸式，优化出口流线型结构并选用高强度耐腐蚀材质；刷洗装置设计可调节硬度刷丝，采用行星齿轮传动优化旋转结构并增设缓冲机构；密封采用机械与橡胶双重密封，选用耐高压耐腐蚀材料并定期检查更换；整体优化支撑（可调节支架）、减震机构及智能化操控系统，提升适配性、稳定性和操作便捷性。

（四）不同场景下工艺适配优化

针对化工容器规格、材质、内壁污染物类型及工况条件的多样性，结合工艺参数和设备结构优化结果，开展多场景工艺适配优化，确保满足各类容器清洗需求。规格适配方面，容积<10m³小型容器采用小型化密闭式清洗设备，优化压力、流量以缩短周期、提升便捷性；容积>100m³大型储罐采用多喷头协同模式，优化布置扩大覆盖范围、提升效率；异形容器调整喷头角度和转速，采用柔性装置消除清洗盲区^[6]。材质适配方面，碳钢容器控

制清洗压力和温度防腐蚀；不锈钢容器选用柔软刷丝及合适介质防划伤；玻璃钢容器降低压力、采用低转速防变形损坏。污染物适配方面，软质残渣采用低压高温大流量参数配合中性介质；硬质结垢采用高压高速参数配合酸性介质；腐蚀产物采用中压中转速参数配合除锈介质。特殊工况适配方面，高温高压容器先降温降压，选用耐高温高压设备及介质；腐蚀性介质容器选用耐腐蚀设备及介质，加强密封；易燃易爆介质容器先惰性气体置换，采用防爆设备，保障安全。

二、化工容器密闭式机械清洗安全控制体系构建

（一）安全控制体系构建原则与框架

结合化工容器密闭式机械清洗的风险特点，确立安全第一、预防为主、综合治理、全程管控的安全控制体系构建原则^[7]。其中，安全第一将人员、设备及环境安全置于首位，所有防控措施围绕安全目标展开；预防为主强化清洗前风险识别与评估，提前防控隐患；综合治理结合技术、管理、人员防控等方式，构建全方位防控体系；全程管控覆盖清洗前、中、后全流程，保障各环节安全。围绕该原则，构建风险识别–过程防控–监测预警–应急处置全流程安全控制体系框架，包含四个核心衔接、协同作用的模块^[8]。清洗前安全风险识别与评估模块，识别潜在风险、评定等级并制定防控预案；清洗过程安全防控模块，落实防控措施、规范操作流程；安全监测与预警模块，实时监测关键安全参数并及时预警；应急处置模块，应对突发安全事故、降低损失，共同构成完整安全控制体系。

（二）清洗前安全风险识别与评估

清洗前的安全风险识别与评估是安全控制体系的基础，通过文献研究、现场调研、专家访谈等方式，全面识别化工容器密闭式机械清洗前的安全风险^[9]。主要分为三类，容器本身风险，含残留易燃易爆及有毒介质、本体腐蚀破损、压力温度未达标等，易引发泄漏、燃烧爆炸或中毒；清洗设备风险，如设备故障、密封失效、电路问题、部件破损，可能导致泄漏、火灾、触电及碎片伤人；清洗介质风险，介质本身具有腐蚀性、毒性、易燃易爆性，或混合后发生反应，危及人员安全。在此基础上采用风险矩阵法，按发生可能性与后果严重程度，将风险划分为重大、较大、一般、低风险四级，并制定差异化防控措施。重大风险立即停工整改，较大风险实施专项防控，一般及低风险采取常规管控，同时建立风险台账，实现风险动态管理。

（三）清洗过程安全防控措施

清洗过程的安全防控是防范安全事故的关键，需围绕容器、设备、介质、人员四大核心要素，落实全方位防控措施^[10]。容器防控上，实时监测压力、温度，严格控制在安全范围，严禁超压超温作业，定期检查密封情况，发现泄漏立即停机堵漏。设备防控方面，清洗前全面检查设备，确认无故障、密封良好；清洗中监测运行状态，重点检查喷头、密封件等核心部件，异常时立即停机检修，操作人员需按规范工艺参数操作，严禁违规调整关键参数。介质防控需合理储存输送，明确其特性及使用要求，杜绝

不同介质混合存放输送，操作人员接触腐蚀性、有毒介质时必须做好个人防护。人员防控上，现场设置警示标识，严禁无关人员进入；操作人员需经培训考核合格上岗，作业时实行专人监护，定期开展安全培训和应急演练，提升安全意识与应急处置能力。

（四）安全监测与预警系统设计

清洗过程的安全防控是防范安全事故的关键，需围绕容器、设备、介质、人员四大核心要素，落实全方位防控措施。容器防控上，实时监测压力、温度，严格控制在安全范围，严禁超压超温作业，定期检查密封情况，发现泄漏立即停机堵漏。设备防控方面，清洗前全面检查设备，确认无故障、密封良好；清洗中监测运行状态，重点检查喷头、密封件等核心部件，异常时立即停机检修，操作人员需按规范操作工艺参数，严禁违规调整关键参数。

介质防控需合理储存输送，明确其特性及使用要求，杜绝不同介质混合存放输送，操作人员接触腐蚀性、有毒介质时，必须做好个人防护。人员防控上，现场设置警示标识，严禁无关人员进入；操作人员需经培训考核合格后方可上岗，作业时实行专人监护，定期开展安全培训和应急演练，全面提升人员安全意识与应急处置能力，筑牢清洗作业安全防线。

（五）应急处置体系构建

围绕清洗过程中可能发生的各类突发安全事故，构建预防－响应－处置－复盘的全流程应急处置体系，确保事故发生后能够快速、有效处置，降低人员伤亡和财产损失。制定针对性的应急处置预案，结合清洗过程中可能出现的介质泄漏、设备故障、

火灾、人员中毒受伤等突发情况，明确各类型事故的处置流程、责任分工、处置措施及注意事项，确保预案具有可操作性。同时定期组织应急演练，检验预案的实用性，及时完善优化。配备充足的应急救援设备和物资，包括堵漏工具、灭火器、应急照明、急救药品、防毒面具、防护服装等，定期检查设备和物资的完好性，及时补充更换，确保事故发生时能够正常使用。建立应急救援团队，明确团队成员的职责分工，开展专业的应急救援培训，提升团队的应急处置能力，能够快速响应、科学处置突发事故。建立事故复盘机制，事故处置结束后，组织相关人员对事故原因、处置过程进行全面复盘，分析存在的问题，优化应急处置预案和防控措施，防范同类事故再次发生，同时建立应急信息上报机制，及时上报事故情况，争取外部救援支持。

三、结束语

本文围绕化工容器密闭式机械清洗工艺优化与安全控制开展系统性研究，针对当前工艺适配性不足、效率偏低、安全管控不完善等痛点，通过理论分析、参数优化与体系构建，形成了一套兼具高效性、经济性与安全性的清洗工艺及安全控制方案。未来研究可聚焦极端工况下的工艺适配优化，结合智能化技术提升工艺参数调控的精准度与安全监测的智能化水平；同时可开展工业现场试验验证，进一步完善工艺优化方案与安全控制体系，推动研究成果的工程化转化与推广应用，为化工行业清洁化、安全化、高效化发展提供更有力的支撑。

参考文献

[1] 石熠, 陈家庆, 汤水清, 等. 机械清洗用旋转喷头的结构对比分析研究 [J]. 石油机械, 2016, 44(1): 97-102. DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2016.01.022.

[2] 杨彪, 柳忠彬, 严培轩, 等. 容器表面油污污染物水射流驱除特性研究 [J]. 四川轻化工大学学报 (自然科学版), 2025, 38(3): 29-36. DOI: 10.11863/j.suse.2025.03.04.

[3] 张宇. 浅析原油储罐清洗作业的安全现状及管控方法 [J]. 清洗世界, 2019, 35(3): 60-61, 66. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8909.2019.03.029.

[4] 张海涛, 赵靖. 清洗技术在锅炉及压力容器和化工设备中的应用 [J]. 化工管理, 2015(33): 144. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2015.33.123.

[5] 郝雷生, 时烨华. 大型六氟化铀容器清洗方法分析 [C]// 中国核学会核化工分会 2014 学术交流会论文集. 2014: 252-255.

[6] 阳相. 容器内壁射流清洗的评价与优化 [D]. 天津: 天津科技大学, 2012.

[7] 高君. 容器清洗厂房内环评及工艺控制改进 [C]// 中国核学会 2009 年学术年会论文集. 2009: 2303-2306.

[8] 吕洋, 李金友. 苯加氢催化剂容器内壁清洗技术研究与应用 [J]. 河南化工, 2015, 32(3): 42-43. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3467.2015.03.012.

[9] 杨秀英, 宋红攀, 夏国正, 等. 核化工设备 / 搅拌混合器结构优化改进及系统设计 [J]. 粘接, 2023, 50(9): 175-178. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5922.2023.09.045.

[10] 元智伟, 张守林. 有机热载体炉的清洗 [J]. 品牌与标准化, 2009, (16): 39.