

Research and application of energy saving and emission reduction technology in urea plant

Xiang Gao Xinguang Shi

Hainan Ocean Oil Fudao Co., Ltd., Dongfang, Hainan, 572600, China

Abstract

As a critical component of the fertilizer industry, urea plants face high energy consumption and concentrated emissions during operation, necessitating systematic research and promotion of energy-saving and emission reduction technologies. This paper focuses on the key energy-consuming stages and pollutant emission characteristics in urea production, reviews existing energy-saving measures and emission reduction strategies, and analyzes their practical application in plant operations. By systematically studying core technologies such as waste heat recovery from synthesis towers, optimization of condensation systems, and exhaust gas purification and emission control, the paper explores an integrated solution for energy conservation and emission reduction. Additionally, it discusses a long-term mechanism for energy conservation and emission reduction supported by policy guidance, management mechanisms, and standard systems, providing a theoretical foundation and practical reference for promoting the efficient and clean operation of urea plants. The study indicates that the coordinated advancement of energy-saving technologies and emission reduction measures is crucial for the green and low-carbon transformation of the urea industry.

Keywords

urea plant; energy saving technology; emission reduction measures; process optimization; clean production

尿素装置节能减排技术研究与应用

高翔 石新光

海洋石油富岛有限公司, 中国·海南东方 572600

摘要

尿素装置作为化肥工业的重要单元,其运行过程能耗高、排放集中,亟需开展系统性节能减排技术研究与应用。本文聚焦尿素生产过程中的关键能耗环节与污染物排放特征,梳理现有节能措施和减排路径,分析其在装置运行中的实际应用效果。通过对合成塔余热回收、冷凝系统优化、尾气净化与排放控制等核心技术的系统研究,探索节能减排一体化集成方案。同时,探讨在政策引导、管理机制与标准体系支撑下的节能减排长效机制,为推动尿素装置高效清洁运行提供理论基础与实践参考。研究表明,节能技术与减排手段协同推进是实现尿素行业绿色低碳转型的关键方向。

关键词

尿素装置; 节能技术; 减排措施; 工艺优化; 清洁生产

1 引言

随着“双碳”战略的深入推进,化工行业面临着前所未有的节能减排压力,作为高耗能、高排放的典型代表,尿素装置运行效率的提升与污染控制成为研究热点。传统尿素生产过程中,能源消耗主要集中于合成、冷凝、压缩等环节,而氨逃逸、尾气排放及废水污染问题亦不容忽视。尽管部分企业已引入节能设备与环保工艺,但由于系统集成度不高、管理机制不健全,整体节能减排效果仍有限。本文旨在系统分析尿素装置当前能耗结构与排放现状,挖掘可行的节能与减排技术路径,并结合运行数据与工程经验,提出具有实际

指导意义的综合解决方案,以期为行业绿色转型提供支撑。

2 尿素装置能耗现状与排放问题分析

2.1 尿素生产流程中的主要能耗环节

尿素装置的能耗主要集中在合成反应和物料循环过程中。氨和二氧化碳在高压高温下合成尿素需要大量热能支持,同时反应后混合物需多次冷凝分离回收未反应原料,冷凝系统和氨泵、循环泵的运行持续消耗电力。原料气体加压、换热及中间产品输送同样构成显著能耗来源。在部分装置中,反应效率较低、热量损失严重、设备能效水平偏低,使单位产尿素能耗居高不下。部分老旧装置未配备有效的能量回收系统,导致热能利用率偏低,综合能源利用效率不足,形成行业普遍存在的能耗压力。

【作者简介】高翔(1985-),男,中国湖北广水人,本科,工程师,从事尿素装置安全生产研究。

2.2 装置运行过程中的污染物排放特征

尿素装置在运行中会产生多种形式的污染排放，尾气中含有未反应氨、二氧化碳和微量氮氧化物等成分，具有挥发性、腐蚀性和温室效应。液体废水中主要含有氨氮、尿素残留及油类杂质，对水体污染影响显著。排水系统如未设置回收或处理单元，易造成氮污染超标。颗粒物排放则多来源于物料转运与包装环节，粉尘无组织排放对厂区环境构成压力。同时，系统泄露和阀门密封性不足易引发微量氨气逸散，增加周边空气中碱性气体浓度，对操作环境与周边生态带来一定程度危害。

2.3 当前节能减排工作的瓶颈与难点

当前尿素装置节能减排推进受限于装置系统复杂性与工艺集成水平不足。部分装置设计阶段未充分考虑热能利用结构，导致现有流程热耦合程度差，难以实现高效余热回收。在减排方面，尾气治理设备运行不稳定，吸收塔吸附能力有限，处理效率不均，制约了污染物去除效果。此外，企业对节能改造投资回报周期顾虑较多，部分装置运行年限较长、设施老化严重，缺乏统一标准与专业运维队伍，提升改造难度较大。监测数据获取不及时、管理决策缺少数据支撑也是当前节能减排工作亟待解决的问题。

3 尿素装置节能技术与工程优化

3.1 合成热能回收与余热利用技术

合成反应过程中释放的大量热能可通过换热系统实现高效回收与循环利用，提高整体能效。采用高效换热器对反应热进行回收，将热量用于预热进料、驱动蒸发系统或供暖系统，有效降低外部热源依赖。部分先进装置已配置热集成系统，实现反应区、冷凝区与分离区之间的能量再分配，减少热量损失。余热锅炉可作为辅助单元，回收冷凝过程中释放的中低温热源，转换为蒸汽供其他单元使用，提升能源使用梯级化水平。合理设计热回收路径与参数匹配，是优化热能利用的关键。

3.2 冷凝系统节能改造与压缩能耗控制

冷凝系统作为尿素工艺中循环物料分离的核心环节，其节能改造潜力较大。通过更换高效冷凝器、优化冷却水循环流程，可显著降低冷凝热损失和冷却负荷。在压缩系统方面，引入变频驱动压缩机、提升压缩机效率和密封性，有助于减少不必要的气体压缩功耗。系统管道布局与节流阀调控方式也对能耗产生直接影响，减少压力损失和不合理流动路径是节能改造的重要方向。在确保工艺稳定性的基础上，实现压缩负载调节与冷凝负荷动态匹配，是提高系统运行能效的核心策略。

3.3 先进自控系统对能效提升的辅助作用

自控系统在尿素装置节能运行中发挥着关键作用，实时数据采集、动态参数调控与能效反馈构成节能运行的基础保障。通过布设传感器网络与工艺模型分析平台，可实时监

测压力、温度、流量等核心参数，并根据变化趋势自动调整工艺参数，避免系统过载或浪费。现代控制系统支持多变量联动控制，实现反应、分离、回收过程的协同优化。能耗分析模块可评估各子系统运行效率，为运维人员提供调整依据。自动化程度提升不仅提高了能效水平，也降低了运行波动，增强了系统稳定性与能源利用精度。

4 尿素装置减排技术路径与污染控制

4.1 尾气吸收与净化装置技术路线优化

尿素装置尾气中含有氨气和微量二氧化碳，对大气环境影响明显，需通过高效吸收与净化设备进行处理。常用吸收技术包括冷凝吸收、喷淋塔吸收及碱液洗涤系统，通过选择性吸附和化学反应去除有害成分。部分装置采用多级串联吸收系统，提高尾气净化效率并延长处理寿命。塔内填料、气液比控制及喷淋均匀性对吸收效率影响显著，需根据实际工况合理配置。对于低浓度持续排放，应配套微负压收集系统，防止逸散进入作业区。尾气净化装置技术路径应根据气体组分、流量及目标排放标准综合确定。

4.2 氮氧化物减排与过程控制协同机制

氮氧化物排放主要来源于高温反应或燃烧过程中的副反应，控制其排放需从源头控制反应条件并加强过程调控。在装置设计阶段应优化反应温度和反应器结构，降低氮氧化物生成速率。运行中可通过调节氨气配比、反应时间和压力参数，实现低氮操作。引入脱硝设备或还原剂注入系统是后端治理的常用手段，通过选择性催化还原反应将NO_x还原为氮气和水。过程控制系统通过实时监控氮氧化物浓度和运行指标，动态调节反应参数，形成前后端协同治理机制，确保减排效果的稳定性和持续性。

4.3 装置排水与固废治理技术集成方案

尿素装置运行中产生的废水多为含氨氮、油类和微量尿素的工艺排水，需通过物化与生化联合处理工艺进行有效净化。设置中和池、气浮池、膜分离装置等可实现对不同污染物的分阶段处理。固废方面主要为过滤残渣、检修废料与包装废弃物，应分类收集与无害化处置。鼓励将废水中氨氮回收再利用，构建循环用水系统以减少新鲜水消耗。技术集成重点在于处理装置与生产系统的协同布置，实现污染物回收与处置资源化。综合治理方案应兼顾处理效率、运行成本与安全性，实现清洁生产与环境友好并重的目标。

5 节能减排技术在尿素装置中的集成应用

5.1 整体系统节能方案的设计与实施

在节能减排技术不断推进的背景下，高效尿素合成工艺技术的集成应用已成为提升尿素装置运行效率的关键途径。中国化学所属中国五环研发的该项技术，连续入选国家工业和信息化部节能降碳技术装备推荐目录，展现出显著的节能降耗优势。该技术每吨尿素2.5MPa蒸汽消耗低于600千克，较行业平均水平降低30%以上，达到世界领先

水平，为尿素装置的整体系统节能方案提供了强有力的技术支撑。在具体设计中，该技术体现出能耗低、操作弹性高、设备投资少、建设周期短等突出特点，能够在保持生产稳定性的同时，有效降低企业运行成本和装置综合能耗。经权威机构鉴定，该技术可使每吨尿素的生产成本降低 60 元，年节省成本约 6000 万元，并可减少碳排放近 10 万吨，为传统尿素装置的系统升级提供了明确路径。在实际应用层面，该工艺已成功应用于华鲁恒升等 18 个大型项目，成为我国化肥工业节能降碳的示范成果。在国际推广方面，中国五环承接的赞比亚年产 30 万吨尿素 EPC 项目，填补了当地现代化化肥生产的技术空白，为装置节能方案的国际化输出积累了宝贵经验。通过将高效合成技术深度融入系统节能设计，不仅推动了国产化尿素技术装备自主化，也为构建绿色高效的化肥产业体系提供了有力支撑，图 1 为该系统节能减排技术在尿素装置流程。

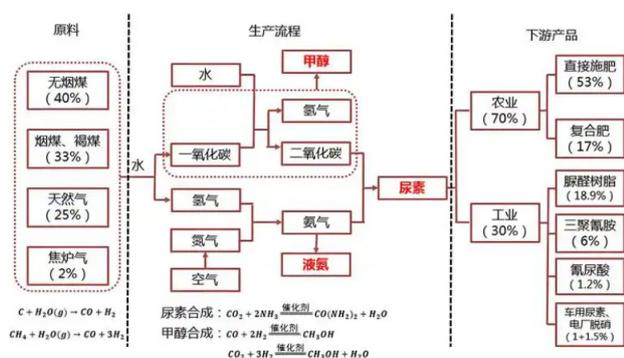


图 1 节能减排技术在尿素装置流程

5.2 装置运行能效评估与节能潜力挖掘

尿素装置运行期间能效评估需要建立以关键能耗指标为核心的动态监测机制，通过热平衡计算、质量流动分析与装置负荷实测数据对比，识别系统中存在的能量浪费点与冗余配置。以单位产品能耗、热量回收率与装置运行系数为评估指标，结合每日能耗分布图与操作记录，分析不同工况下的能源利用效率变化趋势。能源管理平台应设置数据采集模块，对反应压力、进出塔温度、冷凝负载及电机功率等参数进行连续采样，构建多维能效评估模型。对于高耗环节如循环压缩、氨泵运行与冷凝冷却系统，应通过引入变频控制、系统旁路调节与工艺时间窗口再配置等方式，降低单位产量能耗。在系统评估基础上，可对部分设备运行工况实施动态模拟，通过对比不同操作模式下的能耗响应，判断节能空间与改造优先级。能效评估过程中也应考虑设备老化、热损耗

增长与工艺波动等长期因素，构建包含静态结构、动态运行与环境耦合的能耗评价体系，确保评估结果的精准性与指导性，为节能技术持续优化提供决策支撑。

5.3 减排技术耦合下的运行可靠性分析

在节能与减排技术集成应用过程中，装置运行的稳定性与可靠性成为衡量技术成熟度与可推广性的关键标准。减排措施如尾气吸收系统、废水回用设备与氨气回收装置需与核心工艺参数高度耦合，任何吸收效率下降或处理负荷超限都可能引发系统波动、反应失衡甚至安全隐患。因此，在技术配置时应对系统进行负荷平衡分析与极限工况模拟，确保污染控制装置在不同工况下均能稳定运行。可靠性分析需结合设备故障数据、维护记录与运行工况，构建基于寿命周期的评估模型，识别减排系统运行中的薄弱环节。针对多级处理工艺，应合理配置冗余系统与故障切换机制，在部分设备故障时保障系统连续运行。自动控制系统的联动精度亦是保障稳定性的核心，应实现对污染物浓度、液位、流量等指标的实时监控与多级联控，避免控制延迟导致排放超标。在运行维护阶段，必须制定详尽的点检计划与预警机制，提升故障响应速度与修复效率。减排设备的长期运行可靠性还依赖于操作规范化与人员培训制度的落实，通过制度保障与技术冗余，构建可持续、高可靠性的绿色运行体系。

6 结语

尿素装置节能减排技术的系统研究与集成应用，是推动化工行业绿色低碳发展的重要实践方向。通过优化能量结构、提升工艺效率与完善污染治理路径，不仅实现了资源的高效利用，也为环境保护提供了坚实支撑。在装置运行过程中，将节能技术与减排措施协同推进，有助于构建稳定、安全、高效的生产体系。未来，应持续深化技术集成与智能化管控水平，推动节能减排由局部改进向系统优化转变，助力尿素产业实现清洁化、集约化与可持续化发展。

参考文献

- [1] 曾利刚,张亚妮,苏坤,王利丹,赵志诚,康树林,姜在军.尿素装置的污染源治理与管控措施[J].化工安全与环境,2025,38(06):43-47.
- [2] 杨哲林,金萍,杜宇明,张恒浩.尿素装置节能降耗技术改造总结[J].氮肥技术,2014,35(06):18-20.
- [3] 沈华民,刘国胜,王世平,李洪涛.用自主创新的节能减排技术改造传统水溶液全循环法尿素装置[J].化工设计通讯,2013,39(04):48-52.
- [4] 庄肃霞.尿素装置高位能回收技术[J].氮肥技术,2012,33(05):10-13.