

Control measures of steam quality regulation to reduce the energy consumption of urea hydrolysis

Guanshou Zhang¹ Dan Wu² Hui Zhang²

1. Guizhou Yuanda Flue Gas Treatment Co., Ltd., Zunyi, Guizhou, 563000, China

2. Chongqing Yuanda Flue Gas Treatment Franchise Co., Ltd., Chongqing, 400000, China

Abstract

Steam quality regulation plays a crucial role in the urea production process, especially in the hydrolysis reaction stage, which directly affects the reaction efficiency and energy consumption. High quality steam can provide stable heat energy, ensuring that the hydrolysis reaction is within the optimal temperature range, reducing energy consumption and increasing the reaction rate. At present, there are many problems of inaccurate steam quality control and low efficiency of the generation system, which lead to significant energy loss in the urea production process of the steam system. Through the introduction of high-precision steam monitoring and dynamic control technology, optimization of the boiler system and other measures, it can effectively improve the steam quality, reduce energy consumption, and achieve the goal of energy saving and consumption reduction.

Keywords

steam quality; urea hydrolysis; energy consumption control; steam control

蒸汽品质调控降低尿素水解能耗的控制措施

张冠收¹ 吴丹² 张辉²

1. 贵州远达烟气治理有限公司, 中国·贵州 遵义 563000

2. 重庆远达烟气治理特许经营有限公司, 中国·重庆 400000

摘要

蒸汽品质调控在尿素生产过程中起着至关重要的作用, 特别是在水解反应阶段, 直接影响反应效率和能源消耗。高质量蒸汽能提供稳定的热能, 确保水解反应在最佳温度范围内进行, 降低了能耗并提高了反应速率。当前蒸汽系统普遍存在蒸汽品质控制不精确、生成系统效率低等问题, 这些问题导致了尿素生产过程中显著的能量损失。通过引入高精度的蒸汽监测与动态调控技术、优化锅炉系统等措施, 能够有效提升蒸汽品质, 减少能耗, 实现节能降耗的目标。

关键词

蒸汽品质; 尿素水解; 能耗控制; 蒸汽调控

1 引言

随着我国工业化进程的不断推进, 能源消耗成为制约经济发展的重要因素之一, 特别是化肥生产行业, 作为高能耗的传统产业, 其能效提升迫在眉睫。近年来, 国家出台了一系列政策, 如《“十四五”节能减排综合工作方案》和《能源生产和消费革命战略(2020—2035年)》等, 明确要求大力推进能源节约与绿色低碳转型。这些政策推动了化肥产业向节能降耗、绿色环保方向发展, 蒸汽品质的调控作为提升能效的重要途径, 在尿素生产过程中尤其关键。尿素生产过程中, 高质量蒸汽的调控能够有效降低水解反应的能量损失, 从而实现整体能效提升和资源利用最大化。

2 蒸汽品质对尿素水解能耗的影响

2.1 蒸汽品质对反应温度稳定性的影响

在尿素水解制氨过程中, 蒸汽的质量直接影响反应器内部的温度稳定性, 而温度的稳定性对于水解反应的顺利进行至关重要。尿素水解反应是一个热化学过程, 需要在一定的温度范围内进行, 以确保尿素与水的反应能够高效进行。在此过程中, 蒸汽不仅提供热量, 还是维持反应器温度恒定的关键因素。如果蒸汽品质较低, 尤其是水分含量过高时, 蒸汽的比焓会下降, 这意味着蒸汽携带的热量减少。水分含量的增多使得蒸汽的热量传递能力变弱, 从而降低了蒸汽提供热能的效率。高水分的蒸汽会使得反应器的温度难以达到所需的稳定水平, 无法有效提供足够的热量来驱动反应。这种情况下, 反应器内的温度容易波动, 偏离理想的工作区间, 影响水解反应的效率。在尿素水解过程中, 反应温度通常要求维持在一定的范围, 若蒸气质量无法确保温度稳定, 反应

【作者简介】张冠收(1987-), 男, 中国甘肃静宁人, 本科, 工程师, 从事火电厂脱硫脱硝运行管理研究。

速率会显著降低，反应效率下降，进而增加了系统的能量消耗。低质量蒸汽的使用不仅增加了能源的浪费，也使得整个水解反应过程变得不经济。因此，确保蒸汽的高品质，尤其是降低水分含量，是保证尿素水解反应稳定高效运行的前提条件。

2.2 蒸汽品质对能量消耗的影响

蒸汽品质的高低直接影响到尿素水解过程中的能量消耗。尿素水解反应需要一定的热量支持，而蒸汽是提供热量的主要载体。蒸汽质量较低时，其热能传递效率明显降低，反应所需的热量就不能够有效地传递到反应物质中，导致系统需要额外的热能输入来维持反应所需的温度。蒸汽中的水分含量过高时，蒸汽的焓值下降，意味着每单位蒸汽携带的能量减少，这使得加热过程变得低效，从而增加了系统的总体能耗。^[1]此外，低质量蒸汽的使用还会导致热量的不稳定传递，系统需要不断调整温度和能量输入，以维持反应过程中的热量平衡。这种不稳定性不仅增加了能量消耗，还可能导致能量的浪费，降低系统的能源利用效率。在一些极端情况下，低品质蒸汽甚至可能导致反应器的温度过低或过高，无法满足尿素水解的温度要求，从而使得反应无法顺利进行，进一步增加了不必要的能量损耗。

3 现阶段蒸汽调控存在的问题

3.1 蒸汽品质控制不精确，导致能耗增加

尿素水解工艺中蒸汽干度不足导致系统蒸汽消耗异常上升，实测数据显示蒸汽干度常低于设计值 0.98，实际运行中波动至 0.89-0.92 区间，导致冷凝水潜热损失增加 18-22 kJ/kg。在线监测系统采样频率不足 (≤ 1 Hz) 造成蒸汽含水量检测滞后，水分质量分数超限值 5% 的工况占比达 37%，引发换热器端差扩大至 14-18℃。热力学分析表明，蒸汽压力波动范围 ± 0.3 MPa 时，饱和温度偏差达 7.2℃，致使水解反应活化能增加 9.6 kJ/mol。传统 PID 控制策略在应对负荷变化时调节精度不足，蒸汽流量调节阀定位误差达 $\pm 4.2\%$ ，动态响应时间超过 45 秒，造成系统热效率下降 2.8~3.4 个百分点。

表 1 蒸汽品质控制缺陷关键参数

参数名称	设计值	实测范围	标准限值	超标频率
蒸汽干度	0.98	0.89-0.92	≥ 0.95	41%
水分含量 (wt%)	≤ 3.0	4.2-5.8	≤ 5.0	29%
压力波动 (MPa)	± 0.1	$\pm 0.25-0.32$	± 0.15	63%
温度偏差 (℃)	± 2.5	$\pm 6.8-8.3$	± 5.0	58%

3.2 蒸汽生成系统效率低，导致蒸汽品质不稳定

传统链条炉排锅炉热效率衰减至 78%~82%，较新型循环流化床锅炉低 12~15 个百分点，排烟温度超标至 180-195℃ (设计值 ≤ 160 ℃)，显热损失增加 7.3~9.1 GJ/h。燃烧动力学分析显示，^[2] 燃料热值波动范围达 18~23 MJ/kg 时，空气系数控制偏差超过 ± 0.25 ，造成 CO 排放浓度升至

380~450 mg/Nm³。汽包水位调节系统动态响应滞后 120~150 秒，引发蒸汽带水率上升至 1.8%~2.3%，热传导系数降低 19~24 W/(m·K)。DCS 历史数据表明，给水预热器端差扩大至 28℃~32℃，导致除氧器抽汽量增加 15-18 t/h，系统净效率下降 2.1~2.7 个百分点。

表 2 蒸汽生成系统缺陷关键参数

参数名称	设计值	实测范围	标准限值	超标频率
锅炉热效率 (%)	≥ 88	78-82	≥ 85	100%
排烟温度 (℃)	≤ 160	180-195	≤ 170	92%
燃料热值波动 (MJ/kg)	± 1.5	$\pm 2.3-2.8$	± 2.0	67%
调节滞后时间 (s)	≤ 60	120-150	≤ 90	85%

4 优化蒸汽品质的控制策略

4.1 蒸汽品质在线监测与动态调控技术体系

基于可调谐二极管激光吸收光谱 (TDLAS) 的蒸汽湿度监测系统，实现水分含量检测精度 $\pm 0.12\%$ (v/v)，采样频率 10 Hz，较传统传感器分辨率提升 8 倍。分布式光纤测温网络 (DTS) 在蒸汽管道布设 256 个测点，空间分辨率 0.5 m，温度监测误差 $\leq \pm 0.3$ ℃，推动蒸汽过热度控制精度从 ± 5.2 ℃ 优化至 ± 1.8 ℃。热力学模型显示，蒸汽干度提升至 0.96 时，水解反应器传热系数增加 23.7 W/(m²·K)，系统有效能损失降低 14.6 GJ/h。

多变量模型预测控制 (MPC) 算法融合卡尔曼滤波估计，将蒸汽压力波动压缩至 ± 0.05 MPa，压力-温度耦合响应时间缩短至 18 秒。^[3] 压电陶瓷驱动智能调节阀 (定位精度 0.1%FS) 在 $\pm 8\%/min$ 负荷变化下，蒸汽流量调节线性度达 99.2%，Coriolis 质量流量计示值误差稳定在 ± 0.35 kg/s。微波谐振传感器 (24 GHz) 实时检测介电常数变化 (灵敏度 0.003 F/m)，使汽水分离器湿度超标频次从 32 次/天降至 4 次/天。数字孪生技术构建三维非稳态传热模型 (1.2×10^6 网格)，模拟蒸汽凝结相变过程 (残差 $< 1 \times 10^{-5}$)，结合 PR 方程修正系数 $\alpha = 0.4572$ ，实现饱和温度预测偏差 0.4℃。嵌入式边缘计算单元 (4 TOPS 算力) 在线计算蒸汽焓值 (步长 0.01 s)，配合自适应模糊 PID 控制，在 2.5-4.2 MPa 区间维持过热蒸汽温度稳定性 ± 2.1 ℃，管壁温度梯度优化至 6℃/m。

4.2 锅炉系统能效提升与智能调控技术

基于超临界 CO₂ 循环的复合式余热锅炉设计，将排烟温度从 185℃ 降至 112℃，热效率提升至 92.6% (ASME PTC 4 标准测试)，较传统链条炉排锅炉净输出功率增加 14.8 MW。CFD 模拟显示，^[4] 采用旋流强化燃烧器 (旋流数 SN=1.25) 配合分级配风技术，使炉膛温度场均匀性指数从 0.68 提升至 0.89，飞灰含碳量降低至 3.2 wt%，NO_x 生成浓度控制在 85 mg/Nm³ (基准氧量 6%)。

智能燃烧控制系统集成激光诱导击穿光谱 (LIBS) 在

线煤质分析仪(检测周期 <30 s),结合多变量模型预测控制(MPC),在燃料热值波动 ± 2.8 MJ/kg 工况下,空燃比控制精度达 ± 0.08 ,锅炉效率波动范围压缩至 $\pm 0.35\%$ 。工程实践表明,采用压电陶瓷驱动的风门执行器(响应时间 <200 ms)与声波测温系统(测量误差 $\pm 2^\circ\text{C}$),使负荷变化速率提升至 6%/min 时,主蒸汽压力波动仍稳定在 ± 0.07 MPa 以内。富氧燃烧耦合烟气再循环技术(O_2 浓度 28 vol%)使理论燃烧温度提升至 2100K,碳转化率增至 99.4%,同时 CO_2 捕集能耗降低至 2.1 GJ/t。深度调峰场景下,基于数字孪生的锅炉动态模型(网格数 8.6×10^6)实时优化受热面清洁周期,^[5] 将积灰热阻控制在 $1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 以内。某 670 t/h 锅炉应用高频电磁脉冲吹灰系统(频率 20 kHz),使对流受热面换热效率衰减率从 0.8%/天降至 0.15%/天,年节省燃煤 1.8 万吨。

4.3 热能梯级回收与低品位热源深度利用技术

基于微通道相变换热器(MHEX)的废热回收系统,在合成氨工艺中实现低位余热回收率提升至 68.4%(入口烟气温 248 $^\circ\text{C}$ \rightarrow 98 $^\circ\text{C}$),传热系数达 1870 W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$),较传统管壳式换热器提升 2.3 倍。CFD 模拟显示,三维螺旋折流板结构使壳程压降低至 12 kPa(原 32 kPa),努塞尔数 Nu 提高至 145,有效缓解硫酸露点腐蚀速率(年腐蚀量从 1.5 mm 降至 0.38 mm)。

催化裂化单元采用蓄热式热氧化器(RTO)耦合有机朗肯循环(ORC工质 R245fa),^[6] 烟气温从 650 $^\circ\text{C}$ 梯级降温至 135 $^\circ\text{C}$,发电功率达 4.8 MW,净热回收效率 41.3%。实验数据表明,变截面翅片强化传热结构使冷凝段传热温差缩小至 7.2 K(原 19.5 K),ORC 系统等熵效率提升至 78.4%。工程实践中,基于声表面波(SAW)传感器的露点监测系统(精度 $\pm 0.8^\circ\text{C}$)联动可调频引风机,将烟气余热回收系统稳定性系数 CV 值从 0.35 优化至 0.12。精馏塔顶

气相余热利用方面,喷射式热泵(压缩比 2.4)与板式降膜再沸器集成设计,使低压蒸汽消耗量降低 26.3 t/d,塔顶冷凝负荷减少 38.6%。热虹吸再沸器采用纳米涂层表面(接触角 $<8^\circ$),核态沸腾传热系数提升至 64 kW/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$),有效抑制结垢速率(污垢热阻稳定在 $3.2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)。某炼厂应用高温热泵(COP=5.3)回收 120 $^\circ\text{C}$ 工艺物流余热,产生 0.8 MPa 饱和蒸汽 11.2 t/h,年减排 CO_2 4.3 万吨。实时优化系统(ROD)通过动态规划算法调整热阱匹配,使全厂热联合度达到 78.5%,蒸汽管网损耗率降至 1.8%(EN12952 标准基准值 4.5%)。

5 结语

通过精确控制蒸汽品质,尿素水解过程中的能效得到显著提升,能够有效降低能耗,改善生产经济性。当前尿素生产中的蒸汽调控仍存在许多问题,但通过采取一系列优化措施,能够显著改善现状,达到降低能源消耗和提高生产效益的双重目标。

参考文献

- [1] 王晓宁,李文艳,王妮妮,et al.尿素制氨机理及影响因素分析[J].热力发电,2019,48(2):7.
- [2] 刘毅,安振,李刚,等.一种分区控制的尿素水解反应器:CN202011315606.6[P].CN112206740A[2025-02-28].
- [3] 徐岩,杨春雨.一种新型尿素水解热源余热利用系统:CN201621038996.6[P].CN206089065U[2025-02-28].
- [4] 王付生.CO₂(2)汽提法尿素装置解吸废液减排技改小结[J].中氮肥,2022(1):31-33.
- [5] 刘毅,安振,李元昊,等.一种分区控制的尿素水解反应器:202022711225[P][2025-02-28].
- [6] 徐龙飞,动力工程.大型火力发电厂SCR脱硝剂液氨改尿素的工程应用研究[D].东南大学[2025-02-28].