

# 电站锅炉尿素SCR系统不同加热方法对能耗及脱硝率的影响

刘婧雯, 刘博昊, 苟 湘\*

河北工业大学, 天津

Email: \*gouxiang@sina.com

收稿日期: 2021年5月14日; 录用日期: 2021年6月15日; 发布日期: 2021年6月23日

## 摘 要

燃煤锅炉排放的氮氧化物占据我国氮氧化物总排放量的半数以上, 通过烟气净化技术对污染物合理控制有重要意义。本文基于唐山热电厂两台300 MW机组实施不同改造前后的运行数据, 对电站SCR脱硝系统中两种不同尿素热解方式进行分析。比较了电加热系统SCR改造前后能耗变化情况, 分析了电加热法热解喷氨和尿素直喷法系统的能耗与脱硝率差异。试验数据表明, 两种热解方式的脱硝率均随负荷的增大而减小, 电加热法脱硝率稳定性更高。系统能耗均随负荷增大而增大, 负荷300 MW工况下, 电加热法能耗较尿素直喷法高出3.3%; 负荷150 MW工况下高出1.4%。通过比较分析, 以期为燃煤电站运行经济性及尿素热解工艺选择提供参考。

## 关键词

氮氧化物, 污染物控制, 脱硝率, 系统能耗, 尿素热解

# Influence of Different Heating Methods on Energy Consumption and Denitration Rate of Urea SCR System in a Utility Boiler

Jingwen Liu, Bohao Liu, Xiang Gou\*

Hebei University of Technology, Tianjin

Email: \*gouxiang@sina.com

Received: May 14<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 15<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2021

\*通讯作者。

文章引用: 刘婧雯, 刘博昊, 苟湘. 电站锅炉尿素 SCR 系统不同加热方法对能耗及脱硝率的影响[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(3): 617-626. DOI: 10.12677/aep.2021.113069

## Abstract

Nitrogen oxides emitted by coal-fired boilers account for more than half of the total emissions of nitrogen oxides in China. It is of great significance to reasonably control pollutants through flue gas purification technology. Based on the operation data of two 300 MW units in Tangshan Thermal Power Plant before and after the implementation of different transformation, this paper analyzes two different ways of urea pyrolysis in SCR denitration system of the power plant. The changes of energy consumption before and after SCR transformation of electric heating system were compared, and the differences of energy consumption and denitration rate between electric heating pyrolysis ammonia injection system and urea direct injection system were analyzed. The experimental data show that the denitration rates of the two pyrolysis methods are negatively correlated with the load, and the electric heating method is more stable. The energy consumption of electric heating method is 3.3% higher than that of urea direct injection method under 300 MW load; it is 1.4% higher than that under the condition of 150 MW. Through the comparative analysis, it is expected to provide reference for the operation economy of coal-fired power plant and the selection of urea pyrolysis process.

## Keywords

Nitrogen Oxides, Pollutant Control, Denitration Rate, System Energy Consumption, Urea Pyrolysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着国家环保要求的不断提高,各种基于大型电站的低污染技术得到了广泛应用。在锅炉排放的污染物中,NO<sub>x</sub>是威胁自然环境和人类健康的主要气体之一。NO<sub>x</sub>通常包括NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NO等[1],我国NO<sub>x</sub>排放量较大,其中超过半数的NO<sub>x</sub>排放量来自于燃煤锅炉[2]。环保部门出台相关规定中,新建的燃煤发电机组NO<sub>x</sub>排放质量浓度不能超过50 mg/Nm<sup>3</sup> [3]。从控制污染物的环节分类,低NO<sub>x</sub>燃烧技术主要可分为两类:第一类是燃烧控制技术,即抑制燃烧过程中氮氧化物的生成,此类方式通常和提高燃尽率的原则相矛盾,且可能会导致飞灰含炭量的增加。另一类是烟气净化技术,即在烟道处增加脱硝系统,通过非燃烧方法将已经生成的氮氧化物还原为N<sub>2</sub>,此类方式的脱硝率相对较高,综合效益更好,但实际运行中需面临很多技术问题。

凌忠钱等[4]针对某电厂300 MW锅炉的选择性催化还原(SCR)反应系统,采用数值模拟对不同结构下SCR系统的脱硝特性进行了数值模拟,研究了导流板布置对SCR内氨氮物质的量比(简称氨氮比)分布的影响。温卿云[5]详细研究了某330 MW燃煤机组SCR脱硝超低排放改造工程的优化设计方案,得出针对布置空间狭窄的较大机组的SCR脱硝设计应遵循的一些原则。吕澍民等[6]对采用SCR系统的尿素热解炉进行研究并进行数值模拟分析,发现添加整流器和增加烟气引入管长度的改进方案效果最好,有利于氨气浓度分布均匀,提高脱硝效率。杨建国等[7]提出并分析了在SCR反应器内部布置SCR省煤器方案。然而,虽然众多学者针对SCR系统的不同影响因素做了大量的模拟和实验分析,但这类研究中都没有涉及电加热系统及尿素热解SCR脱硝系统的能耗分析及相关脱硝率分析。

## 2. SCR 烟气脱硝尿素热解的工艺原理

选择性催化还原技术(Selective Catalytic Reduction)常用于电站烟气脱硝处理中,其基本原理是在催化剂和氧气存在的条件下,在一定温度范围内,还原剂有选择的将烟气中的  $\text{NO}_x$  还原生成  $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ,该技术与现有燃烧器的匹配较好[8],具有受燃料类型影响小,氮氧化物脱除效率高等优点,是应用于燃煤电站的主流技术之一[9]。

SCR 脱硝工艺使用氨气作为脱硝还原剂,氨气主要由尿素或液氨制备,而尿素还原剂以其安全性优势被广泛采用,主要有尿素热解制氨、水解制氨两种制取方式。相比较而言,尿素热解制氨工艺具有系统简单、响应速度快、运行稳定等优点[10],且喷入烟道的混合物对 SCR 入口烟温影响很小,因此被更多电站采用[11]。目前尿素热解的方法主要有两种,一种是通过电加热器加热一次风中的部分稀释风,在热解炉里将尿素热分解;另一种方法是利用其他高温气体分解,如炉膛内的高温烟气。

尿素溶液蒸发热解过程只有在水蒸发到尿素溶液饱和后才开始进行,其充分分解需要足够的热量,同时还需保证分解后产物不发生可逆反应,因此,一般热解器出口温度需控制在  $350^\circ\text{C}$  以上。尿素热解所需的热量与尿素溶液的耗量有关,包含加热水到饱和温度吸热量、水的汽化潜热、尿素完全热解吸热量三部分[12] [13]。尿素在高温条件( $350^\circ\text{C}\sim 650^\circ\text{C}$ )下,会发生 C-N 键的断裂[14],分解为  $\text{NH}_3$  和  $\text{CO}_2$ ,反应方程式为:



(尿素)                      (异氰酸)



利用还原剂  $\text{NH}_3$  在金属催化剂作用下的还原作用,选择性地与  $\text{NO}_x$  反应生成氮气和  $\text{H}_2\text{O}$ ,从而实现脱硝。尿素热解技术需高温运行,相比于将尿素直接喷入锅炉炉膛的技术效率更高,能耗也相对较高。

郭伟等[15]将电加热法热解制氨 SCR 系统在生产运行中出现的问题进行了梳理,并提出了解决及优化措施。由于电加热法存在诸多弊端,蒋新伟等[16]对 330 MW 燃煤机组尿素热解脱硝系统进行改造,利用高温烟气将一次风加热到尿素热解所需要的热源温度,并对锅炉效率影响进行了评估。邵媛等[10]提出将某电厂电加热制氨工艺改造为尿素直喷工艺的技术路线,结果表明尿素直喷法的投资及运行费用较低,脱硝指标满足要求,可作为尿素热解工艺的升级改造方案。在学者的研究中,并未对两种不同制氨方法在实际生产中的差异进行比较,因此,本文对电加热法制氨与尿素直喷技术在不同负荷下的能耗、脱硝率等参数的变化进行研究。

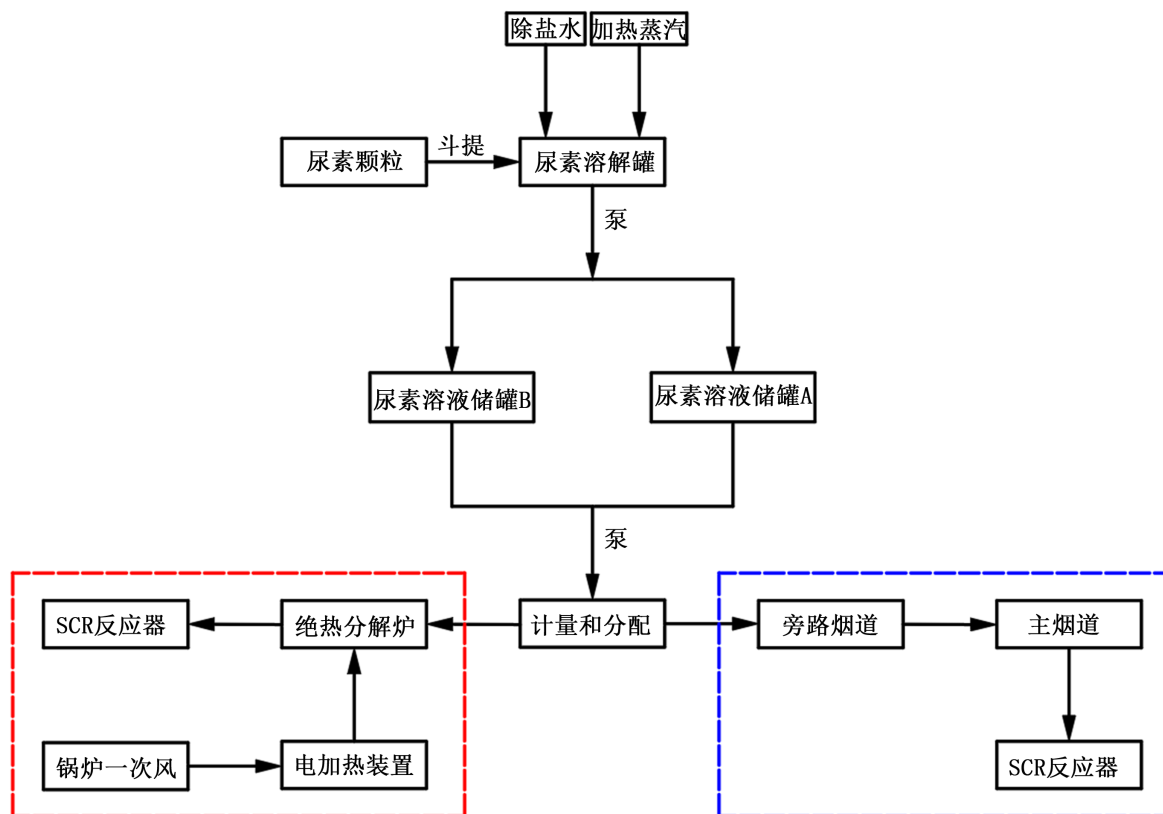
## 3. 脱硝系统概况

河北大唐国际唐山热电厂安装两台亚临界热电联产燃煤机组,两台机组均采用尿素为还原剂的选择性催化还原技术,催化剂参数如表 1 所示。一号锅炉采用热一次风电加热尿素热解技术,设置 2 台 SCR 反应器、1 台热解炉、1 台电加热器和 4 只尿素喷枪,热一次风经电加热器加热到  $500^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$  后进入热解炉,将雾化后的尿素溶液在热解炉内热解成氨气,进入 SCR 反应器中脱硝;二号锅炉采用省煤器旁路烟道尿素直喷热解技术,在省煤器入口烟道 A、B 两侧分别引出一路高温烟气旁路,单侧由 4 支喷枪将尿素溶液喷入烟气旁路,在  $500^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$  的高温烟气条件下,尿素液滴在烟气旁路内分解成氨气,氨气在省煤器出口与主烟道内烟气混合后,进入 SCR 反应器与  $\text{NO}_x$  进行还原反应。在设计煤种、锅炉最大工况(BMCR)、处理 100% 烟气流条件下,两台机组脱硝效率均大于 80%,氨逃逸率小于 3 ppm,SCR 出口  $\text{NO}_x$  浓度控制在  $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  以内。

**Table 1.** Catalyst parameters**表 1.** 催化剂参数

序号	项目	单位	数值
1	安装层数	层	3
2	型式	-	蜂窝式
3	设计运行温度	°C	355
4	最高允许温度	°C	430
5	最低允许温度	°C	300
6	催化剂化学寿命	hr	24,000
7	催化剂机械寿命	hr	80,000
8	几何尺寸	mm	1901 × 952 × 1205

尿素热解法制氨系统包括加料斗、尿素溶解罐、尿素溶液输送泵、尿素溶液储罐、高流量循环泵、计量和分配装置、背压控制阀、热解炉等。袋装尿素颗粒储存于尿素储备间，由加料斗人工添加到溶解罐里，用去离子水将干尿素溶解成 40%~60% 质量浓度的尿素溶液，通过尿素溶液输送泵输送到尿素溶液储罐。尿素溶液经由高流量循环泵、计量与分配装置、雾化喷嘴等进入热解炉内分解[17]。电加热系统中，将抽取的部分一次风经过电加热装置加热后进入热解室，尿素热解生成  $\text{NH}_3$  和  $\text{CO}_2$ ，后经与稀释风机鼓入的稀释空气在氨/空气混合器中混合后，送达氨喷射系统，流程如图 1 中红色部分所示。

**Figure 1.** Schematic diagram of two urea pyrolysis systems**图 1.** 两种尿素热解系统流程示意图

旁路直喷系统由计量分配装置、烟道旁路、喷射装置等组成。计量和分配装置是指每台锅炉的旁路直喷系统设置两套尿素溶液计量分配装置。根据锅炉负荷、燃料、燃烧方式、 $\text{NO}_x$  水平、脱硝效率等参数的变化,自动或手动调节到锅炉 SCR 所需的反应剂流量。旁路直喷部分每台锅炉每侧旁路设置一层喷射器,每侧 4 支,共 8 支喷射器。尿素溶液喷射模式为气液两相流,流程如图 1 中蓝色部分所示。旁路烟道不仅能满足尿素热解,还应能满足 50% 负荷时脱硝反应器入口烟温由  $292^\circ\text{C}$  升至  $305^\circ\text{C}$  的要求,并能适应机组的负荷变化和机组启停次数的要求。

在两种形式的系统中,烟气温度和尿素热解温度对于 SCR 系统的脱硝效率都发挥了重要作用。电加热系统中,尿素热解的热量主要来自于电加热器;尿素直喷系统中,影响清热解的主要因素在于旁路烟道的烟气温度。该电站锅炉进行调峰运行,烟气温度呈现波动,因此需对不同负荷下的脱硝率进行研究。

## 4. 系统能耗分析

### 4.1. 电加热系统改造前后能耗分析

电站 SCR 改造前,脱硝系统采用浓淡燃烧法,从燃烧的过程角度来看属于分级燃烧。即将携带煤粉的一次风气流分成浓淡两股喷入炉膛燃烧,在主燃烧区缺氧燃烧,在燃尽区增加氧量使煤粉燃尽,可减少燃烧过程中热力型  $\text{NO}_x$  的生成量。采用分级燃烧技术,可降低  $\text{NO}_x$  含量 30%~40% [18]。随着火力发电厂排放烟气中  $\text{NO}_x$  含量的标准更加严格,传统浓淡燃烧法的脱硝率无法满足要求。

电站进行 SCR 改造后,脱硝部分主要增加的耗能设备有:电加热器、一次风机、引风机等。电加热器的耗功量转化为稀释风温的提升,因此利用电加热器进出口风温以及该温度下空气的物性参数,由式(3)进行计算。

$$Q = C \times M \times (T_2 - T_1) \quad (3)$$

风机轴功率的计算公式为:

$$\Delta P_e = \frac{P \times v}{1020 \times 3600 \times \eta} \quad (4)$$

对于稀释风机,  $v$  代表的是稀释风机的入口流量,单位为  $\text{m}^3/\text{h}$ ,  $P$  代表的是稀释风机全压,单位为  $\text{Pa}$ ,  $\eta$  为稀释风机效率。

加装 SCR 系统后,烟气管道内的阻力增大,需要引风机增加功率保证烟气顺利通过,利用风机功率计算公式(4),得到引风机功率增加值。

电加热器消耗的能量用于温度升高,使得空预器入口的温度与改造前相比有所提升。由公式(3)进行计算,结果显示改造后空预器换热量有所提升,即电加热器消耗能量部分得到回收利用,表 2、表 3 将二者进行了比较。

由数据可知,增加电加热系统后,虽然以电能转化为热能成本较大,经济性差,但空预器进出口烟温的检测结果表明,其电能消耗并未完全浪费,约 68% 的能量在空预器换热中被空气利用,即稀释风温的提升降低了后续过程的能耗。

**Table 2.** Energy consumption of electric heating system

**表 2.** 电加热系统消耗能量

	耗电量(kW)	引风机功率(kW)	一次风机功率(kW)	能耗量(kW)
SCR 改造后	621.24	2.10	0.77	624.11
SCR 改造前	0	0	0	0
差值	621.24	2.10	0.77	624.11

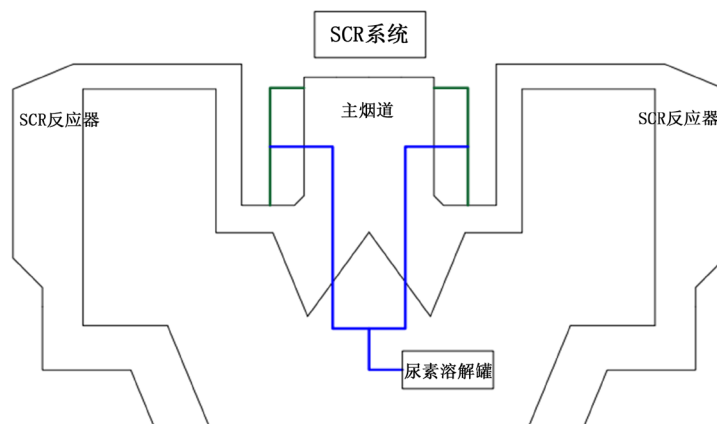
**Table 3.** Air preheater recovery energy  
**表 3.** 空预器回收能量

	空预器入口温度(°C)	空预器出口温度(°C)	换热量(kW)
SCR 改造后	339.00	144.00	98,023.86
SCR 改造前	337.00	143.00	97,600.39
差值	2	1	423.47

## 4.2. 尿素直喷系统能耗分析

在大型电站的工程应用中，通常采用电加热法加热一次风作为热源，为绝热分解炉中尿素溶液的分解提供热量，而由于电加热器功率较高，所带来的运行费用较高；同时，热解炉内的喷枪容易堵塞，可能造成脱硝退出的情况，影响机组安全运行，且对喷枪定期维护工作量较大，因此，该电站的二号锅炉采用尿素直喷制氨的方式进行脱硝。

如图 2，尿素直喷系统与电加热法制氨相比，具有如下优势：1) 取消了电加热器设备，减少尿素热解制氨系统的电耗；2) 减少了用于尿素热解的锅炉一次热风的消耗；3) 热解系统简化，取消原有热解制氨系统的电加热器、热解炉、热风管道系统、AIG 等炉区设备；4) 降低因尿素分解不完全或低温结晶而导致 AIG 结晶堵塞的风险[19]。



**Figure 2.** Schematic diagram of urea direct injection system  
**图 2.** 尿素直喷系统示意图

而使用尿素直喷系统也造成了部分能耗的增加，其原因是：用于热解尿素的部分高温烟气，在进入省煤器之前被引入旁路烟道利用，而这部分烟气未经过省煤器进行热交换，从整个系统来看，部分热量未得到充分回收利用，即存在部分能量损失。实验通过记录旁路烟道的入口烟温，以及改造前无旁路烟道时省煤器的出口烟温，并利用公式(3)进行计算，所得结果如表 4 所示。

**Table 4.** Main energy consumption of urea direct injection system  
**表 4.** 尿素直喷系统主要能耗

负荷	未加旁路时省煤器出口温度(°C)	旁路入口烟温(°C)	旁路出口烟温(°C)	旁路烟气流量 m <sup>3</sup> /h	能耗(kW)
100%	343	580	568.00	4600	603.06
75%	322	526	507.00	4100	552.93
50%	302	483	453.00	3800	538.85

## 5. 负荷对脱硝率影响分析

为探究电站机组负荷对脱硝率的影响,实验通过在运行允许情况下改变负荷,使机组运行负荷在150~300 MW 范围内进行改变,所得结果如图3、图4所示。电加热系统负荷与脱硝率线性回归方程为  $y = -2.57302e^{-4}x + 0.89442$ , 尿素直喷系统负荷与脱硝率线性回归方程为  $y = -0.00101x + 1.04102$ 。

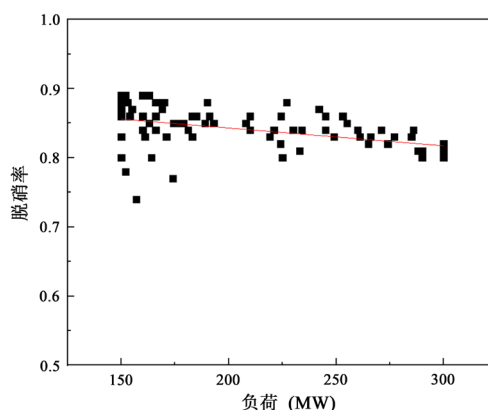


Figure 3. Denitration rate of electric heating system

图3. 电加热系统脱硝率

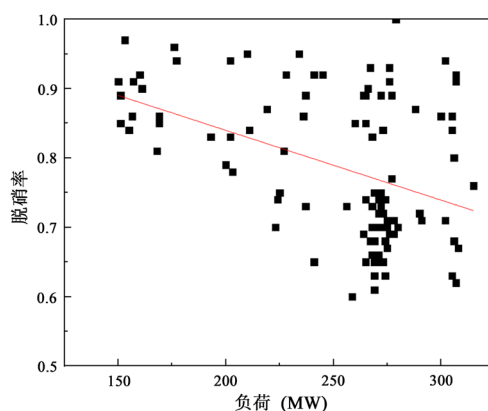


Figure 4. Denitration rate of urea direct injection system

图4. 尿素直喷系统脱硝率

由图3可知,负荷较低时脱硝率波动较大,逐渐提高负荷后,电加热系统的脱硝率趋于稳定,但总体呈缓慢下降趋势。其原因是低负荷工况下,锅炉氧量偏高且波动大,故氮氧化物的生成量也波动较大,脱硝率整体随负荷的升高呈下降趋势。从图3中选择负荷为150 MW、225 MW、300 MW三个点的具体数值列在表5中。

Table 5. Electric heating system

表5. 电加热系统

机组负荷	尿素瞬时流量 (L/H)	烟气流量 (km <sup>3</sup> /h)	SCR 入口 NO <sub>x</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	SCR 出口 NO <sub>x</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	脱硝率
100%	290	1200	220	33	84%
75%	220	960	205	30	85%
50%	195	580	270	36	87%

由图 4 可知, 尿素直喷系统脱硝率变化的波动程度比电加热法更为剧烈, 负荷 - 脱硝率拟合曲线的斜率大于电加热法, 脱硝率的整体稳定性较差, 在负荷较大时波动更为剧烈。从图中选择负荷为 150 MW, 225 MW, 300 MW 三个点的具体数值列在表 6 中。

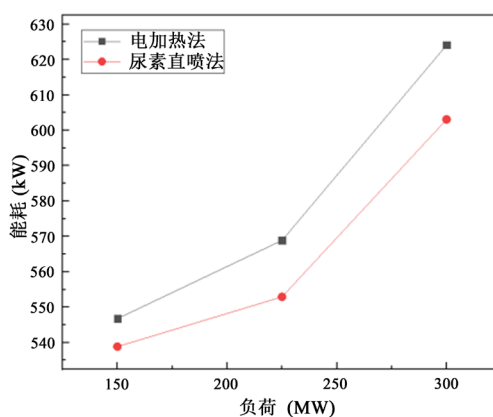
**Table 6.** Urea direct injection system

**表 6.** 尿素直喷系统

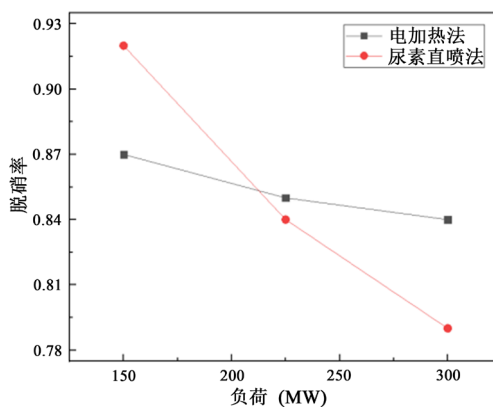
机组负荷	尿素瞬时流量 (L/H)	烟气流量 ( $\text{km}^3/\text{h}$ )	SCR 入口 $\text{NO}_x$ ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	SCR 出口 $\text{NO}_x$ ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	脱硝率
100%	340	1100	195	40	79%
75%	220	950	182	30	84%
50%	165	600	298	25	92%

## 6. 电加热法与尿素直喷法对比分析

实验中, 控制两台机组的运行负荷以及尿素热解量均相同, 对负荷为 150 MW, 225 MW, 300 MW 三个等差值工况下尿素热解脱硝部分的能耗值进行比较, 所得结果如图 5、图 6 所示。



**Figure 5.** The graph of energy consumption changes with load  
**图 5.** 能耗随负荷变化图



**Figure 6.** The graph of denitration rate change with load  
**图 6.** 脱硝率随负荷变化图

由图 5 可知, 随着机组负荷升高, 电加热系统和尿素直喷系统的能耗都呈现上升趋势, 电加热系统



能耗整体高于尿素直喷系统。负荷为 150 MW 时, 电加热系统能耗为 546.76 kW, 尿素直喷系统能耗为 538.85 kW, 能耗差值为 7.91 kW; 负荷为 225 MW 时, 电加热系统能耗为 568.88 kW, 尿素直喷系统能耗为 552.93 kW, 能耗差值为 15.95 kW; 负荷为 300 MW 时, 电加热系统能耗为 624.11 kW, 尿素直喷系统能耗为 603.06 kW, 能耗差值为 21.05 kW, 电加热系统与尿素直喷系统间能耗差值随负荷升高而增大。

由图 6 可知, 随着机组负荷升高, 电加热系统和尿素直喷系统的脱硝率都呈现下降趋势。负荷为 150MW 时, 电加热系统脱硝率为 87%, 尿素直喷系统脱硝率为 92%; 负荷为 225 MW 时, 电加热系统脱硝率为 85%, 尿素直喷系统脱硝率为 84%; 负荷为 300 MW 时, 电加热系统脱硝率为 84%, 尿素直喷系统脱硝率为 79%。

结合能耗与脱硝率变化趋势可知, 在 300 MW 负荷工况下, 电加热法制氨系统的脱硝率更高, 但其能耗更高, 耗电元件更多, 故易发生设备的老化从而影响运行、经济性降低等问题, 同时, 实际运行中会造成生产成本的增加; 在 150 MW 负荷工况下, 尿素直喷法的脱硝率更高, 且无需消耗电能, 但此种方法仍存在部分能量耗散, 负荷变化会对尿素利用率的影响较大, 导致氨逃逸增加, 运行费用增加, 实际运行时还需保证旁路烟道不出现腐蚀等问题[20]。

## 7. 结论

本文基于火力发电厂中 CEMS 监控系统的运行数据进行分析, 对电站 SCR 脱硝系统的两种尿素热解方法进行了比较。

1) 电加热法和尿素直喷两种热解制氨系统, 相比于 SCR 改造前的浓淡燃烧法, 脱硝率得到提高, 但也使总能耗有所增加。

2) 脱硝率方面, 两种热解方法的脱硝率均随负荷的增大而减小, 尿素直喷系统的变化程度更为剧烈, 电加热法的脱硝率稳定性更高, 更适用于负荷均值较高且对于烟气中  $\text{NO}_x$  量要求严格的火力发电厂。

3) 能耗方面, 相比于 SCR 改造前, 电加热法的采用造成了电能消耗增加, 但其中约 68% 的能量在空预器换热中得到重新利用。将两种热解方法在不同负荷段的能耗进行对比可知, 负荷 300 MW 时, 电加热法能耗较尿素直喷法高出 3.3%; 负荷 150 MW 时高出 1.4%。

整体来看, 尿素直喷系统的总体能耗更低, 且节省了物料及维护成本, 运行费用较低, 更具有经济性。火力发电厂在选择尿素热解方式时应根据自身的负荷均值及脱硝率要求进行选择判断, 才能在超低排放改造的同时实现节能降耗。

## 参考文献

- [1] 吕薇, 高文学, 杨维国, 吴维峰, 李瑞扬. 煤粉锅炉  $\text{NO}_x$  数值模拟[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2020, 25(4): 63-68.
- [2] 石岩. SNCR 与空气分级联合脱硝数值模拟及添加剂对 SNCR 的影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [3] 张超, 阳杰, 王帅, 王光圣. 58 MW 高效煤粉工业锅炉低氮燃烧改造及优化[J]. 区域供热, 2020(6): 89-98.
- [4] 凌忠钱, 曾宪阳, 胡善涛, 周昊, 岑可法. 电站锅炉 SCR 烟气脱硝系统优化数值模拟[J]. 动力工程学报, 2014, 34(1): 50-56.
- [5] 温卿云. 330 MW 燃煤机组 SCR 脱硝超低排放工程改造优化设计探讨[J]. 环保科技, 2020, 26(5): 39-43.
- [6] 吕澍民, 卢玫, 唐昭帆, 史丹君. SCR 尿素热解炉优化的数值模拟[J]. 能源工程, 2020(2): 71-74+79.
- [7] 杨建国, 樊立安, 赵虹, 牟文彪, 李晓晖, 余海铭, 李敏. 提高催化剂反应效率的烟温协调优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(14): 2244-2250.
- [8] 和圣杰, 徐钢, 郑清清, 薛小军, 韩宇. 燃煤电站尿素热解 SCR 脱硝优化系统[J]. 锅炉技术, 2018, 49(4): 6-11+75.
- [9] 段传和, 谷小兵. 燃煤电站 SCR 烟气脱硝还原剂尿素热解热源的选择[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(4): 34-36.

- 
- [10] 喻小伟, 李宇春, 蒋娅, 庞飞飞, 陈进生, 商雪松. 尿素热解研究及其在脱硝中的应用[J]. 热力发电, 2012, 41(1): 1-5.
- [11] 叶茂, 杨志忠, 晏顺娟, 潘绍成, 黄敏, 王春. SCR 烟气脱硝尿素热解用炉内气气换热器技术研究[J]. 东方电气评论, 2015, 29(2): 76-82.
- [12] Tokmakov Igor, V., Alavi, S. and Thompson, D.L. (2006) Urea and Urea Nitrate Decomposition Pathways: A Quantum Chemistry Study. *The Journal of Physical Chemistry A*, **110**, 2759-2770. <https://doi.org/10.1021/jp0564647>
- [13] Su, J.C., Xue, F.M., Li, P.P. and Zhang, Y.L. (2021) Prevention and Countermeasures of Urea Crystallization in SCR Urea Pyrolysis System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **631**, Article ID: 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/631/1/012012>
- [14] 邵媛. 尿素直喷法 SCR 脱硝系统在火电机组的应用[J]. 山东工业技术, 2017, 21(36): 191.
- [15] 郭伟, 崔宁. 尿素热解制氨 SCR 脱硝技术在电厂的应用与优化[J]. 锅炉技术, 2012, 43(3): 77-80.
- [16] 蒋新伟, 李文华, 杨一理, 程纪东. SCR 烟气脱硝尿素热解炉内加热技术节能研究[J]. 节能与环保, 2020(7): 88-89.
- [17] Sohn, J., Hwang, I.S. and Hwang, J. (2021) Improvement of Ammonia Mixing in an Industrial Scale Selective Catalytic Reduction De-NO<sub>x</sub> System of a Coal-Fired Power Plant: A Numerical Analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, **147**, 334-345. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.043>
- [18] 罗焯兵. 浓淡燃烧技术在直流燃烧锅炉中的应用[J]. 科技创新与应用, 2015(6): 12-13.
- [19] 邹红果. 尿素热解炉内直喷系统在超低排放改造中的应用[J]. 环保科技, 2017, 23(3): 44-46.
- [20] 左松伟. 大型火电机组 SCR 脱硝系统能耗特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2012.