



严俊杰,西安交通大学教授、博导。享受政府特殊津贴专家、长江学者特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者、国家万人计划领军人才。现任中国动力工程学会常务理事和学术工作委员会主任委员、中国工程热物理学会理事、中国电力教育协会电力高等教育委员会能源动力工程学科教学委员会主任委员、中国电力行业电站汽轮机标准化技术委员会副主任委员等。长期从事热力系统、汽液两相流相关的科研和教学工作。主持国家自然科学基金重点基金、国家自然科学基金杰出青年基金、国家 973 课题等国家和省部级项目 20 余项。发表 SCI 论文 200 余篇,2020 年和 2021 年连续入选 Elsevier 中国高被引学者榜单;授权发明专利 70 余项,其中美国专利 8 项;合作出版学术专著 5 部、教材 2 本;主持制定国家新标准 1 部,参与制定行业和企业标准 5 部。曾获国家科技进步二等奖 2 项,省部级科学技术一等奖 6 项、陕西省教学成果特等奖和一等奖共 2 项。



高伟,刘明,赵永亮,等.采用烟气旁路的燃煤机组脱硝系统变负荷过程的经济性分析[J].能源环境保护,2023,37(1):13-20.

GAO Wei, LIU Ming, ZHAO Yongliang, et al. Economic analysis of denitration system in a coal-fired power plant with flue gas bypass during load cycling processes[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(1): 13-20.

采用烟气旁路的燃煤机组脱硝系统变负荷过程 的经济性分析

高 伟,刘 明,赵永亮,严俊杰*

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要:设置省煤器烟气旁路系统是提高燃煤机组脱硝系统入口烟气温度、实现全工况脱硝的有效途径。为分析燃煤机组频繁变负荷过程的脱硝经济性,本研究建立了某 660 MW 超超临界燃煤发电机组动态模型及 SCR 脱硝系统动态模型,研究了燃煤机组在 50%~100%THA 升负荷过程的尿素成本、 NO_x 排放环境成本和燃煤成本。结果表明:在变负荷过程中开启省煤器烟气旁路挡板时,燃煤成本的变化最大,总成本有一定的增加;在 50%~75%THA 升负荷过程中,烟气旁路挡板开度分别为 5%和 10%时,燃煤成本分别增加了 600 元和 1 200 元,尿素成本分别减少了 442.48 元和 554.89 元,而 NO_x 排放环境成本变化较小,仅为 62.22 元和 63.19 元;在 75%~100%THA 升负荷过程中,燃煤成本分别增加了 1 800 元和 2 300 元,而尿素成本和 NO_x 排放环境成本的变化量较小,因此不建议开启烟气旁路挡板。

关键词:SCR 脱硝;烟气旁路;经济性分析;燃煤电站

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2023)0013-08

Economic analysis of denitration system in a coal-fired power plant with flue gas bypass during load cycling processes

GAO Wei, LIU Ming, ZHAO Yongliang, YAN Junjie*

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Setting up an economizer flue gas bypass system is an effective approach to increase the inlet flue gas temperature of the denitration system in a coal-fired power plant and maintain high De- NO_x efficiency under all working conditions. In order to analyze the economy of the denitration system in a coal-fired power plant during frequent load cycling processes, the dynamic models of a 660 MW ultra-supercritical coal-fired power plant and the SCR system are developed. Then, the cost of urea, the environmental cost of NO_x emission and the cost of coal are obtained and compared under different flue gas

bypass baffle opening during the loading up processes from 50%THA to 100%THA. The results show that the change value of coal cost is the largest, and the total cost has a certain increase when the economizer flue gas bypass baffle is opened during the load cycling processes. When the flue gas bypass baffle opening is 5% and 10%, the cost of coal increases by ¥600 and ¥1 200 respectively during the loading up processes from 50% to 75%THA. Meanwhile, the cost of urea decreased by ¥442.48 and ¥554.89 respectively, while the environmental cost of NO_x emission changed less, only ¥62.22 and ¥63.19. Moreover, the cost of coal increased by ¥1 800 and ¥2 300 respectively during the loading up processes from 75% to 100%THA, and the amounts of change in urea cost and NO_x emission environmental cost were little. Therefore, it is not recommended for coal-fired power plant to open the flue gas baffle during the loading up processes from 75% to 100%THA.

Keywords: SCR denitrification; Flue gas bypass; Economic analysis; Coal-fired power plant

0 引 言

近年来,我国风能和太阳能装机容量快速增加,燃煤电站需要承担更多的调峰调频任务^[1]。因此燃煤电站将长期处于低负荷运行状态,这必然会影响机组脱硝系统的安全高效运行^[2]。SCR (Selective Catalytic Reduction) 烟气脱硝技术具有技术成熟、脱硝效率高等优点,是当前燃煤电站广泛采用的烟气脱硝技术^[3],该脱硝技术的最佳活性温度窗口在 300~400 °C 范围内^[4]。当燃煤机组处于低负荷运行状态时,SCR 脱硝系统入口烟气温度较低,势必会造成脱硝效率的降低^[5]。因此,国内外研究工作者提出了多种脱硝宽负荷运行方案,以提高燃煤机组在低负荷时的脱硝效率。

崇培安^[6]等将部分省煤器出口温度相对较高的热水置换到省煤器入口,以提高低负荷下 SCR 脱硝系统的安全运行。李涛^[7]等研究了 0 号高加的布置方式及控制策略对锅炉给水温度、机组热耗、脱硝系统投入率等方面的影响,可为燃煤机组 0 号高加的投运提供一定的指导。张国柱^[8]等采用蒸汽喷射器在低负荷时提高给水温度。王艳红^[9]研究了提高给水温度对 SCR 进口烟气温度、锅炉热效率和发电煤耗的影响,结果表明给水温度每升高 10 °C,发电标准煤耗率平均降低 0.42 g/(kW·h)。李道林^[10]等分析了省煤器烟气旁路、省煤器给水旁路和省煤器分级等脱硝宽负荷运行方案,结果表明采用几种脱硝宽负荷方案改造后,可明显提高燃煤机组的脱硝效率,减少氨逃逸率。徐民^[11]对比了省煤器分级、省煤器流量置换、烟气旁路等技术改造方案,结果表明烟气旁路的技术改造方案具有较好的可行性。

SCR 脱硝宽负荷运行方案的经济性分析获得

了大量研究工作者的关注。王准^[12]以某火电厂 600 MW 超临界燃煤锅炉已运行的 SCR 脱硝系统项目为基础,研究了污染物脱除成本和单位发电量脱硝运行成本。吕旭光^[13]建立了联合脱硝运行成本模型和脱硝经济性优化模型,采用粒子群优化算法对联合脱硝运行成本进行优化,结果表明锅炉燃烧系统和 SCR 系统联合脱硝运行成本有所降低。景杰^[14]研究了 SCR 脱硝液氨改尿素制氨的技术经济性分析,结果表明尿素催化水解系统总成本是液氨储供系统的 1.65 倍。范军辉^[15]研究了低负荷下省煤器表面污染对 SCR 脱硝经济性的影响。胡以怀^[16]比较了电控推迟喷油、废气再循环和 SCR 三种柴油 NO_x 排放控制技术,从实船安装费用和运行成本比较,结果表明 SCR 脱硝技术是值得推荐的。

烟气旁路具有 SCR 烟气温度调节幅度大且易于改造的优点,被许多燃煤电站采用。然而燃煤机组变负荷过程中,在不同烟气旁路挡板开度时,对 SCR 脱硝系统的经济性研究尚有不足。本文采用 GSE 仿真软件建立了 660 MW 超超临界燃煤机组动态模型和 SCR 动态反应模型,比较了在不同的烟气旁路挡板开度下,燃煤机组在 50%~100% THA (Turbine Heat Acceptance) 升负荷过程中 SCR 脱硝系统的运行成本、 NO_x 排放环境成本及燃煤机组煤耗成本。可为燃煤机组在变负荷过程中采用烟气旁路调节 SCR 入口烟气时提供一定的指导。

1 模型与验证

1.1 660 MW 超超临界燃煤发电机组模型

本文基于质量、动量和能量守恒方程,采用 GSE 软件建立了燃煤机组的动态机理模型。三大守恒方程描述如下:

(1) 质量守恒方程

$$A \frac{\partial(\alpha \cdot \rho)_f}{\partial t} + \frac{\partial F_f}{\partial z} = \sum \frac{\partial S_f}{\partial z} + \frac{\partial \Gamma_f}{\partial z} \quad (1)$$

(2) 能量守恒方程

$$A \frac{\partial(\alpha \cdot \rho \cdot h)_f}{\partial t} = - \frac{\partial(h \cdot F)_f}{\partial z} + A \cdot (\Gamma \cdot h_{sat} + Q - W)_f + \sum \delta \cdot S_f \cdot h_{src} \quad (2)$$

(3) 动量守恒方程

$$\frac{\partial F_f}{\partial t} = - \frac{\alpha_f \cdot A}{K_u} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial Z} + f_{f-w} + f_{f-f} + K_u \cdot \rho_f \cdot \vec{g} - \delta \cdot P_{pump} \right) + \sum \delta \cdot S_f \cdot \vec{v}_{src} \quad (3)$$

式中: F_f 为液体的流量, kg/s; α_f 为流动份额; A 为通流面积, m^2 ; K_u 为单位换算系数, $(MPa \cdot m \cdot s^2)/kg$; P 为压力, MPa; f_{f-w} 为液体与壁面的流

动摩擦系数, MPa/s; f_{f-f} 为流体与流体的流动摩擦系数, MPa/s; ρ_f 为流体的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; δ 为单位长度的流体源, m^{-1} ; P_{pump} 为泵的压力, MPa; S_f 为工质流动源项, kg/s ; \vec{v}_{src} 为源流体的速度, m/s 。

660 MW 超超临界燃煤发电机组模型示意图如图 1 所示。额定工况下, 机组主蒸汽流量为 524.186 kg/s, 汽轮机主、再热蒸汽入口压力分别为 25.79 MPa 和 5.42 MPa, 汽轮机主、再热蒸汽温度分别为 600 °C 和 620 °C。汽轮机排汽采用空冷岛进行冷却, 排汽背压为 10.5 kPa, 汽轮机系统包含 4 级高压加热器, 4 级低压加热器和 1 级外置式蒸汽冷却器。机组脱硝系统采用 SCR 脱硝, 布置在省煤器与空气预热器之间。

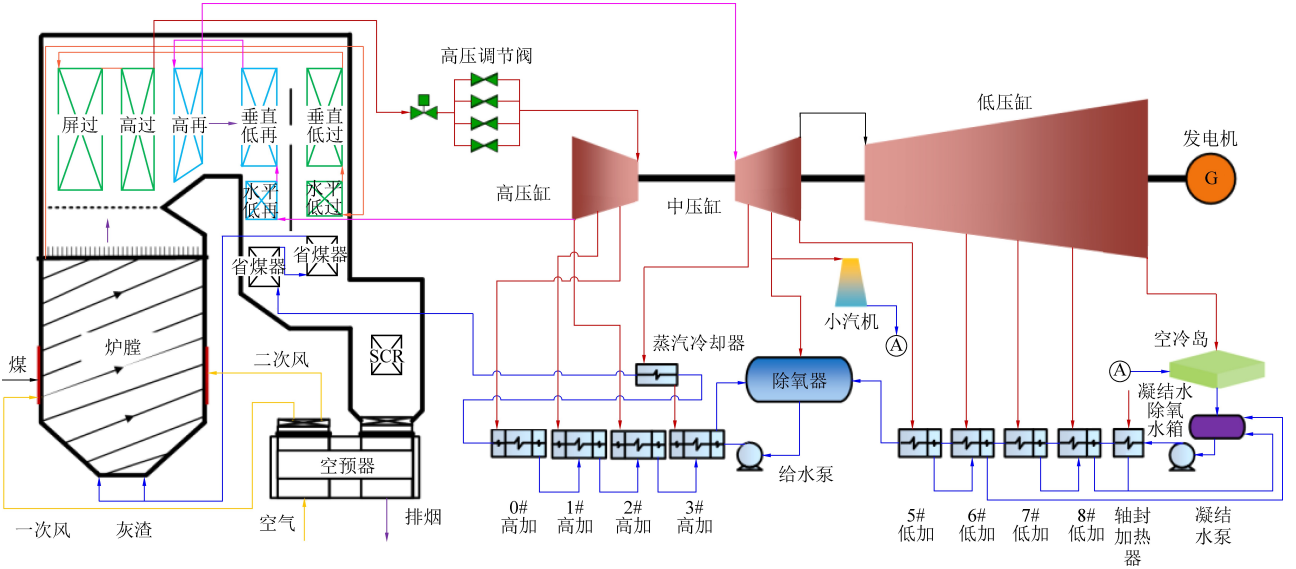


图 1 660 MW 超超临界燃煤发电机组模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model of 660 MW ultra-supercritical coal-fired power plant

机组设置烟气旁路, 以调节 SCR 入口烟气温度, 如图 2 所示。烟气抽气口选择在水平低温过热器和垂直低温过热器之间。控制烟气旁路挡板的开度, 可使得部分高温烟气直接进入 SCR 脱硝系统入口烟气管道, 从而达到提高 SCR 入口烟气温度的目的。选择 100% THA、75% THA 和 50% THA 三个稳态工况验证模型的精确性, 见表 1。结果表明: 在各稳态设计工况下, 采用本文模型计算的机组主要热力参数与设计值的相对误差均在 2% 之内, 说明本文建立的模型满足要求。

1.2 SCR 动态模型

SCR 脱硝系统通过 NH_3 与烟气混合, 在催化

的作用下发生氧化还原反应, 本文依据文献^[17]建立了 SCR 反应动态模型, 其主要的反应方程如式 (4)~(10)。

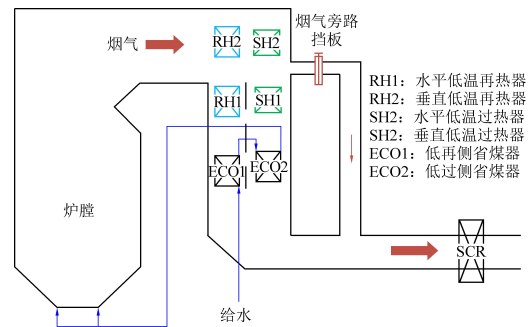


图 2 烟气旁路系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flue gas bypass system

表 1 各稳态工况主要参数误差

Table 1 Relative error of main parameters in each steady state

主要参数	100%THA			75%THA			50%THA		
	设计值	模拟值	相对误差/%	设计值	模拟值	相对误差/%	设计值	模拟值	相对误差/%
功率/MW	660.00	660.03	0	495.03	495.03	0	330.01	330.04	0.01
主蒸汽流量/(kg·s ⁻¹)	524.85	523.44	0.27	393.05	390.99	0.53	255.74	251.90	1.50
主蒸汽温度/℃	600.0	600.1	0.017	600.0	600.0	0	600.0	600.0	0
主蒸汽压力/MPa	25.82	25.88	0.25	19.50	19.50	0	12.96	12.97	0.06
再热蒸汽温度/℃	620.00	620.30	0.05	620.00	620.00	0	620.00	620.10	0.02
再热蒸汽压力/MPa	5.42	5.47	0.82	4.01	4.01	0	2.72	2.69	1.11
中间点温度/℃	447.00	447.80	0.18	425.00	425.60	0.14	383.00	383.30	0.09
给水压力/MPa	30.84	30.96	0.40	23.25	23.25	0	15.40	15.31	0.58
给水温度/℃	304.00	300.00	1.32	301.00	298.30	0.90	275.00	275.00	0

$$\frac{\partial \theta_{\text{NH}_3}}{\partial t} = r_a - r_d - r_{\text{NO}} - r_{\text{ox}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{\text{NH}_3}}{\partial t} = -u \frac{\partial C_{\text{NH}_3}}{\partial z} - \Omega_{\text{NH}_3} (r_a - r_d) \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_{\text{NO}}}{\partial t} = -u \frac{\partial C_{\text{NO}}}{\partial z} - \Omega_{\text{NH}_3} r_{\text{NO}} \quad (6)$$

$$r_a = k_a^0 e^{-E_a/(RT)} \cdot C_{\text{NH}_3} (1 - \theta_{\text{NH}_3}) \quad (7)$$

$$r_d = k_d^0 e^{-E_d/(RT)} \cdot \theta_{\text{NH}_3} \quad (8)$$

$$r_{\text{ox}} = k_{\text{ox}}^0 e^{E_{\text{ox}}/(RT)} \cdot \theta_{\text{NH}_3} \quad (9)$$

$$r_{\text{NO}} = k_{\text{NO}}^0 e^{-E_{\text{NO}}/(RT)} \cdot C_{\text{NO}} \cdot \theta_{\text{NH}_3} \quad (10)$$

式中: t 为时间, s; θ_{NH_3} 为 NH_3 在 SCR 催化剂表面的覆盖率; r_a 为 NH_3 在 SCR 催化剂表面的吸附速率, s^{-1} ; r_d 为 NH_3 在 SCR 催化剂表面的解附速率, s^{-1} ; r_{NO} 为催化剂表面已吸附 NH_3 与 NO 反应速率, s^{-1} ; r_{ox} 为催化剂表面已吸附 NH_3 自身的氧化反应速率, s^{-1} ; C_{NH_3} 为催化剂 SCR 通道内部 NH_3 浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; u 为 SCR 内部烟气流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; z 为 SCR 催化剂内部轴向坐标, m; Ω_{NH_3} 为 SCR 催化剂表面 NH_3 吸附量, $\text{mol}_{\text{NH}_3} \cdot \text{m}^{-3}$; C_{NO} 为催化剂 SCR 通道内部 NO 浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; k_a^0 为 NH_3 在 SCR 催化剂表面的吸附反应的指前因子, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; E_a 为 NH_3 在 SCR 催化剂表面的吸附反应的活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为理想气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为 SCR 催化剂的通道温度, K; k_d^0 为 NH_3 在 SCR 催化剂表面的解附反应的指前因子, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; E_d 为 NH_3 在 SCR 催化剂表面的解附反应的活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; k_{ox}^0 为催化剂表面已吸附 NH_3 自身的氧化反应的指前因子, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; E_{ox} 为催化剂表面已

吸附 NH_3 自身的氧化反应的活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$; k_{NO}^0 为 SCR 选择还原反应的指前因子, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; E_{NO} 为 SCR 选择还原反应的活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

1.3 经济性分析模型

在 SCR 脱硝系统中, 利用尿素作为还原剂时, 运行环境较好, 可以避免在储存和管路泄漏时造成危害。文献^[18]提到尿素单价成本为 0.22 美元/kg。本文建立了 SCR 脱硝系统运行过程中尿素消耗的成本计算模型, 其计算公式如下:

$$m_{\text{Urea}} = \frac{m_{\text{NH}_3}}{\text{Urea}} \frac{MW_{\text{Urea}}}{MW_{\text{NH}_3}} \frac{100}{2} \quad (11)$$

$$C_{\text{Urea}} = \int_{t_1}^{t_2} m_{\text{Urea}} \cdot P_{\text{Urea}} dt \quad (12)$$

式中: t_1 为变负荷过程的开始计算时间, s; t_2 为变负荷过程的结束计算时间, s; m_{Urea} 为尿素的质量流量, kg/s; MW_{Urea} 为尿素的质量流量, g/mol; MW_{NH_3} 为 NH_3 的摩尔质量, g/mol; m_{NH_3} 为 NH_3 的质量流量, kg/s; Urea 为溶液中尿素的质量百分比, 取 40%; P_{Urea} 为尿素的单价, 元/kg; C_{Urea} 为尿素的消耗成本, 元。

目前已有学者对中国煤电行业的环境外部成本进行了相关研究。文献^[19]提到 NO_x 的环境成本为 11.70 元/kg。因此在变负荷过程中 NO_x 的累计环境成本为:

$$C_{\text{NO}} = \int_{t_1}^{t_2} m_{\text{NO}} \cdot P_{\text{NO}} dt \quad (13)$$

式(13)中: t_1 为变负荷过程的开始计算时间, s; t_2 为变负荷过程的结束计算时间, s; C_{NO} 为在变负荷过程中 NO 的累计外部环境成本, 元; m_{NO} 为变负荷过程中氮氧化物排放的质量流量, kg/s;

P_{NO} 为 NO_x 的外部环境成本,元/kg。

根据 2019—2021 年的平均煤价,选取的煤价为 0.03 元/MJ^[20]。计算了变负荷过程中燃煤消耗的累计成本。

$$C_{\text{coal}} = \int_{t_1}^{t_2} (b_s/3\,600 \cdot P_e \cdot P_{\text{coal}}) dt \quad (14)$$

式(14)中: t_1 为变负荷过程的开始计算时间,s; t_2 为变负荷过程的结束计算时间,s; b_s 为燃煤机组的标准煤耗率,g/(kW·h); P_e 为燃煤机组的功率,MW; P_{coal} 为标准煤的单价,元/kg; C_{coal} 为变负荷过程中燃煤机组的煤炭消耗累计成本,元。

2 结果与讨论

本节研究了燃煤机组在 50%~100%THA 升

负荷过程中,烟气旁路挡板开度分别为 0、5%和 10%的情况下,机组的尿素成本、 NO_x 排放成本和燃煤成本。图 3(a)和(b)分别为 50%~75%THA 和 75%~100%THA 升负荷过程中,燃煤机组的负荷变化值与设定值。其中变负速率为 1.0%Pe0/min,计算时间选取为 6 000 s。

2.1 尿素成本

图 4(a)为燃煤机组在 50%~75%THA 升负荷过程中,烟气旁路挡板分别为 0、5%和 10%的情况下燃煤机组的尿素消耗成本。显然,随着烟气挡板的开度增大, NH_3 入口浓度得到一定的降低。在 75%~100%THA 升负荷过程中,尿素消耗成本比较如图 4(b)。此时,随着烟气挡板开度的增大, NH_3 入口浓度的变化幅度较小。

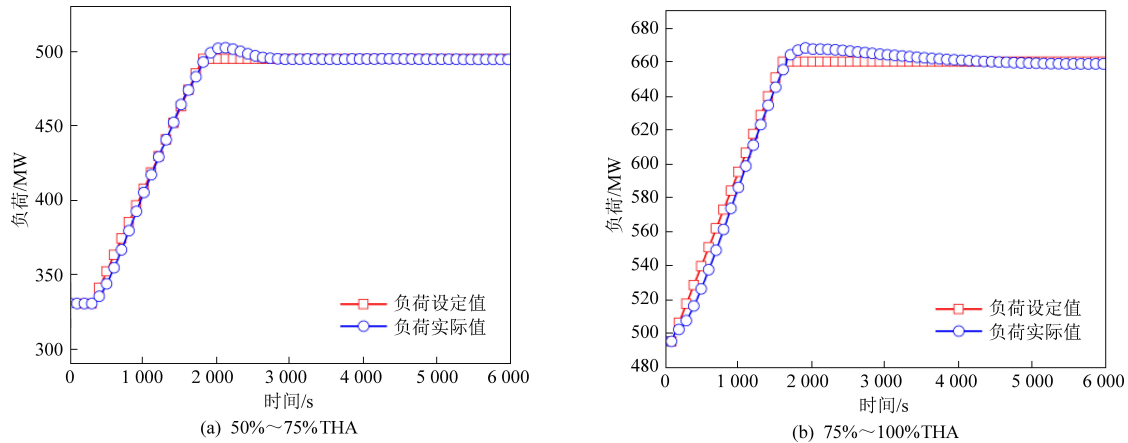


图 3 升负荷过程中燃煤机组的负荷变化

Fig. 3 The change of power of coal-fired power plant during loading up processes

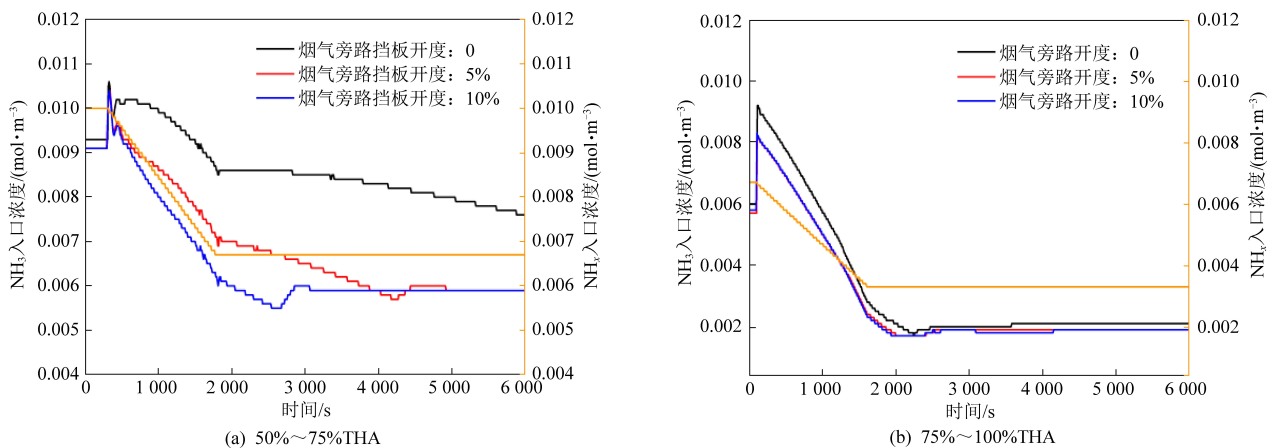


图 4 升负荷过程中 NH_3 入口浓度和 NO_x 入口浓度

Fig. 4 NH_3 inlet concentrations and NO_x inlet concentrations during loading up processes

图 5 为燃煤机组在 50%~100%THA 升负荷过程时的尿素成本。在 50%~75%THA 升负荷过程中,当烟气旁路挡板开度增大时,SCR 入口烟气

温度提高,因此提高了 SCR 脱硝系统的脱硝效率,从而降低了尿素的消耗。烟气旁路挡板关闭时,尿素消耗成本为 2 202.64 元,而当烟气旁路挡板

开度为 5% 和 10% 时, 尿素成本分别减少了 442.48 元和 554.89 元。在 75% ~ 100% THA 升负荷过程中, 当烟气旁路挡板开度为 5% 和 10% 时, 尿素成本分别减少了 95.92 元和 104.91 元。显然, 在 75% ~ 100% THA 升负荷过程中开启烟气挡板对于尿素成本的降低效果不明显。

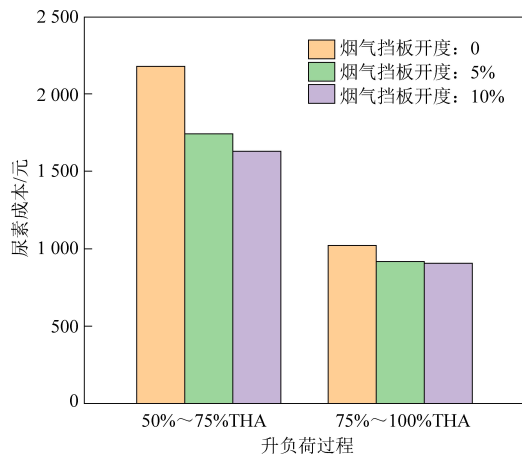


图 5 升负荷过程中尿素成本

Fig. 5 Urea cost during loading up processes

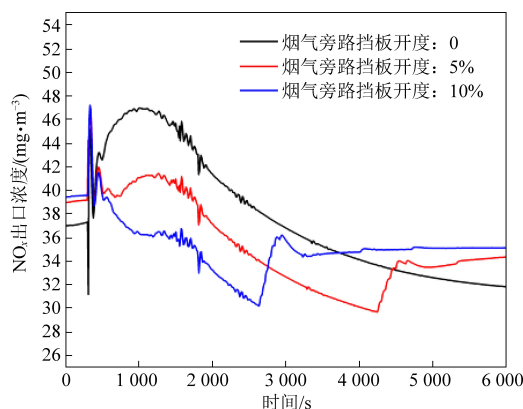
2.2 NO_x 排放环境成本

图 6(a) 和 (b) 分别为机组在 50% ~ 75% THA 和 75% ~ 100% THA 升负荷过程中 NO_x 出口浓度的变化趋势。

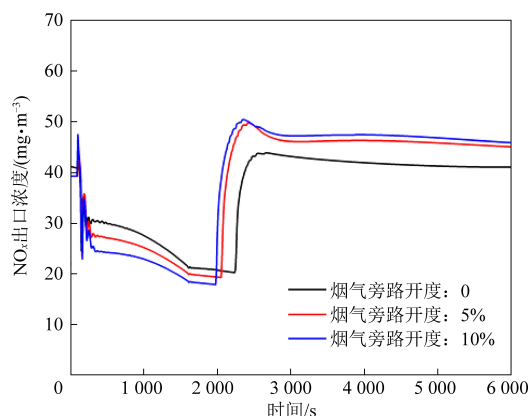
在升负荷过程中, 燃煤机组在烟气旁路挡板分别为 0、5% 和 10% 时的 NO_x 排放环境成本如图 7 所示。在 50% ~ 75% THA 升负荷过程中, 烟气旁路挡板关闭时, NO_x 排放环境成本为 990.07 元。当烟气旁路挡板开度为 5% 和 10% 时, NO_x 排放环境成本分别减少了 62.22 元和 63.19 元。而在 75% ~ 100% THA 升负荷过程中, NO_x 排放环境成本分别增加了 111.34 元和 127.11 元。可以发现, 燃煤机组在 50% ~ 100% THA 升负荷过程中, 开启烟气旁路挡板对 NO_x 排放环境成本的影响较小。

2.3 燃煤成本

表 2 展示了燃煤机组在 50% ~ 100% THA 升负荷过程中, 烟气旁路挡板分别为 0、5% 和 10% 时的燃煤成本。在 50% ~ 75% THA 升负荷过程中, 烟气旁路挡板开度分别为 0、5%、10% 时, 燃煤成本分别为 26.48 万元、26.56 万元和 26.60 万元; 在 75% ~ 100% THA 升负荷过程中, 燃煤成本分别为 35.01 万元、35.19 万元和 35.24 万元。显然, 当燃煤机组在变负荷过程中采用烟气旁路调节 SCR 入口温度时, 燃煤机组的燃煤成本有一定的提高。



(a) 50%~75%THA



(b) 75%~100%THA

图 6 升负荷过程中 NO_x 出口浓度

Fig. 6 NO_x outlet concentrations during loading up processes

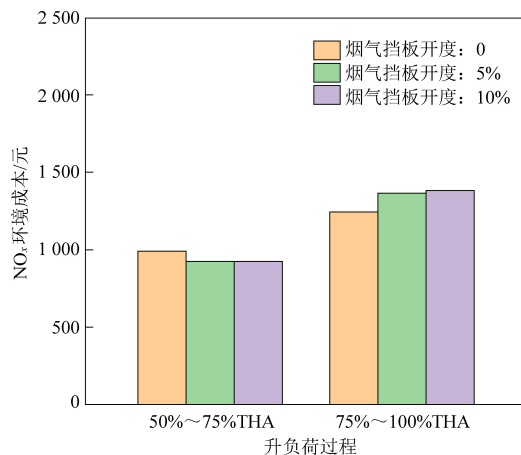


图 7 升负荷过程中 NO_x 排放环境成本

Fig. 7 Environmental cost of NO_x emissions during loading up processes

表 2 燃煤成本

变负荷过程	烟气挡板开度: 0	烟气挡板开度: 5%	烟气挡板开度: 10%
50%~75%THA	26.48	26.56	26.60
75%~100%THA	35.01	35.19	35.24

3 结 论

当前,许多燃煤电站设置有烟气旁路系统以调节 SCR 入口烟气温度。本文建立了 660 MW 超超临界燃煤发电机组动态模型及 SCR 反应动态模型,模拟了在 50%~100%THA 的升负荷过程中,采用烟气旁路系统调节 SCR 入口烟气温度时,燃煤机组 SCR 脱硝系统的经济性,包括在变负荷过程中燃煤机组 SCR 脱硝系统的尿素成本、 NO_x 排放环境成本及燃煤成本。主要结论如下:

(1) 燃煤机组在变负荷过程中采用烟气旁路调节 SCR 入口烟气温度时,燃煤成本变化量最大。在 50%~75%THA 升负荷过程中,烟气挡板开度为 5%和 10%时,燃煤成本分别增加了 600 元和 1 200 元。而在 75%~100%THA 升负荷过程中燃煤成本分别增加了 1 800 元和 2 300 元。

(2) 燃煤机组在变负荷过程中采用烟气旁路调节时,总的成本有一定的提高。在 50%~75%THA 升负荷过程中,烟气旁路挡板开度为 5%和 10%时总成本分别增加了 95.29 元和 591.92 元,而在 75%~100%THA 升负荷过程中总成本分别增加了 1 815.42 和 2 322.20 元。

(3) 当燃煤机组在 75%~100%THA 升负荷过程中开启烟气挡板时,燃煤成本增加较大,而尿素成本和 NO_x 排放环境成本的变化量较小,因此不建议开启烟气挡板开度。

(4) 当燃煤机组在 50%~75%THA 升负荷过程中时,开启烟气挡板虽然也会造成燃煤成本的增加,但是尿素成本得到较大的降低。因此,在 50%~75%THA 升负荷过程中开启烟气挡板是可以选择的,且存在最佳烟气挡板开度,使得在变负荷过程中 NO_x 出口浓度在合理范围之内,同时总成本最小。

参考文献 (References):

- [1] Yin J, Liu M, Zhao Y, et al. Dynamic performance and control strategy modification for coal-fired power unit under coal quality variation[J]. Energy, 2021, 223: 120077.
- [2] Chen W, Zhang G, Li B, et al. Simulation study on 660 MW coal-fired power plant coupled with a steam ejector to ensure NO_x reduction ability[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 550-561.
- [3] 刘晓萌, 刘沛奇, 张冉, 等. 基于线性控制的 SCR 脱硝分区喷氨工业性试验[J]. 能源环境保护, 2020, 34(5): 41-46. LIU Xiaomeng, LIU Peiqi, ZHANG Ran, et al. Industrial test of SCR denitration subarea ammonia injection based on linear control[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(5): 41-46.
- [4] 蒋进, 夏勇军, 胡筋, 等. 低温 NH_3 -SCR 催化剂及脱硝机理研究进展[J]. 能源环境保护, 2021, 35(5): 7-15. JIANG Jin, XIA Yongjun, HU Jia, et al. Research progress of low-temperature NH_3 -SCR catalysts and denitration mechanism[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(5): 7-15.
- [5] Chen W, Li B, Zhang S, et al. Simulation investigation on the design and operation strategy of a 660 MW coal-fired power plant coupled with a steam ejector to ensure NO_x reduction ability[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124: 1103-1111.
- [6] 崇培安, 丁士发, 李剑宁. 给水置换式省煤器系统在电站锅炉中的应用[J]. 动力工程学报, 2018, 38(8): 645-649+688. CHONG Pei'an, DING Shifa, LI Jianning. Application of an economizer system with feedwater redistribution in a utility boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(8): 645-649+688.
- [7] 李涛, 陈坤, 辛志波, 等. 超超临界 1 000 MW 机组零号高压加热器宽负荷回热技术[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 111-117. LI Tao, CHEN Kun, XIN Zhibo, et al. Wide-load regenerative technology of No.0 high-pressure heater in an ultra supercritical 1 000 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 111-117.
- [8] 张国柱, 李冰心, 李亚维, 等. 采用给水加热实现 660 MW 超临界机组宽负荷脱硝的理论研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(1): 50-54. ZHANG Guozhu, LI Bingxin, LI Yawei, et al. Theoretical study on wide load denitration of a 660 MW supercritical unit by retrofitting the feedwater heating system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(1): 50-54.
- [9] 王艳红. 宽负荷脱硝下给水温度对超临界机组性能影响及评价[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019: 69-75. WANG Yanhong. Influence and evaluation of feed water temperature on performance of supercritical unit under wide load denitration[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2019: 69-75.
- [10] 李道林, 章平衡, 吴斌, 等. 电厂宽负荷选择性催化还原脱硝技术改造[J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(5): 435-440. LI Daolin, ZHANG Pingheng, WU Bin, et al. SCR denitration technology under wide loads[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37(5): 435-440.
- [11] 徐民. 超超临界锅炉宽负荷脱硝改造方案对比分析[J]. 发电设备, 2022, 36(6): 433-436. XU Min. Comparison and analysis on wide-load denitration retrofit schemes for an ultra-supercritical boiler[J]. Power Equipment, 2022, 36(6): 433-436.
- [12] 王准, 陈东东. 超低排放燃煤机组脱硝技术运行经济性分析[J]. 中国环保产业, 2019(7): 32-35. WANG Zhun, CHEN Dongdong. Economical analysis on deni-

- tration technology operation for extra-low emission coal-fired units [J]. China Environmental Protection Industry, 2019 (7): 32-35.
- [13] 吕旭光. 火电厂 SCR 脱硝系统经济性优化控制与模拟 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021: 26-32.
LV Xuguang. Economic optimization control and simulation of SCR denitrification system of power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2021: 26-32.
- [14] 景杰, 丁开瑞. SCR 脱硝液氨改尿素制氨技术经济性研究 [J]. 节能与环保, 2022(5): 62-63.
JING Jie, DING Kairui. Technical and economic study on ammonia production from liquid ammonia to urea in SCR denitration [J]. Energy Saving and Environmental Protection, 2022(5): 62-63.
- [15] 范军辉, 宁华兵, 韦斌, 等. 省煤器表面污染对 SCR 脱硝经济性的影响 [J]. 发电设备, 2018, 32(6): 414-418.
FAN Junhui, NING Huabing, WEI Bin, et al. Effects of economizer surface contamination on economy of the SCR denitrification unit [J]. Power Equipment, 2018, 32(6): 414-418.
- [16] 胡以怀, 郑金鑫, 许聆琳, 等. 船用柴油机 NO_x 排放控制技术的经济性对比分析 [J]. 船舶物资与市场, 2022, 30(1): 81-84.
HU Yihuai, ZHENG Jinxin, XU Lilin, et al. Economic comparison and analysis of NO_x emission control technology for marine diesel engines [J]. Ship Materials and Market, 2022, 30(1): 81-84.
- [17] 谢新华. 在役 SCR 催化剂失活机理及运行管理优化研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 64-73.
XIE Xinhua. Study on the deactivation mechanism and optimization in operation management over SCR catalysts [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015: 64-73.
- [18] Zhang G W, Yan H Y, Li T H, et al. Relation analysis on emission control and economic cost of SCR system for marine diesels [J]. Science of the Total Environment, 2021, 788: 147856.
- [19] Zhao X, Chen H, Liu S, et al. Economic & environmental effects of priority dispatch of renewable energy considering fluctuating power output of coal-fired units [J]. Renewable Energy, 2020, 157: 695-707.
- [20] Su Z, Yang L. A novel and efficient cogeneration system of waste heat recovery integrated carbon capture and dehumidification for coal-fired power plants [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 255: 115358.