

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

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 process 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.

收稿日期:2022-01-05

基金项目:国家自然科学基金(52022079)

第一作者:高 伟(1994—),男,山西吕梁人,博士研究生,从事燃煤机组灵活清洁协同机理与优化研究。E-mail: gaowei_1026@163.com

通讯作者:严俊杰(1967—),男,湖北松滋人,教授,主要研究方向为热力系统节能与控制优化。E-mail: yanjj@mail.xjtu.edu.cn

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,这必然会影晌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 ℃ 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 ℃,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,m²; K_u 为单位换算系数,(MPa·m·s²)/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/m³; g 为重力加速度,m/s²; 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 ℃ 和 620 ℃。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。

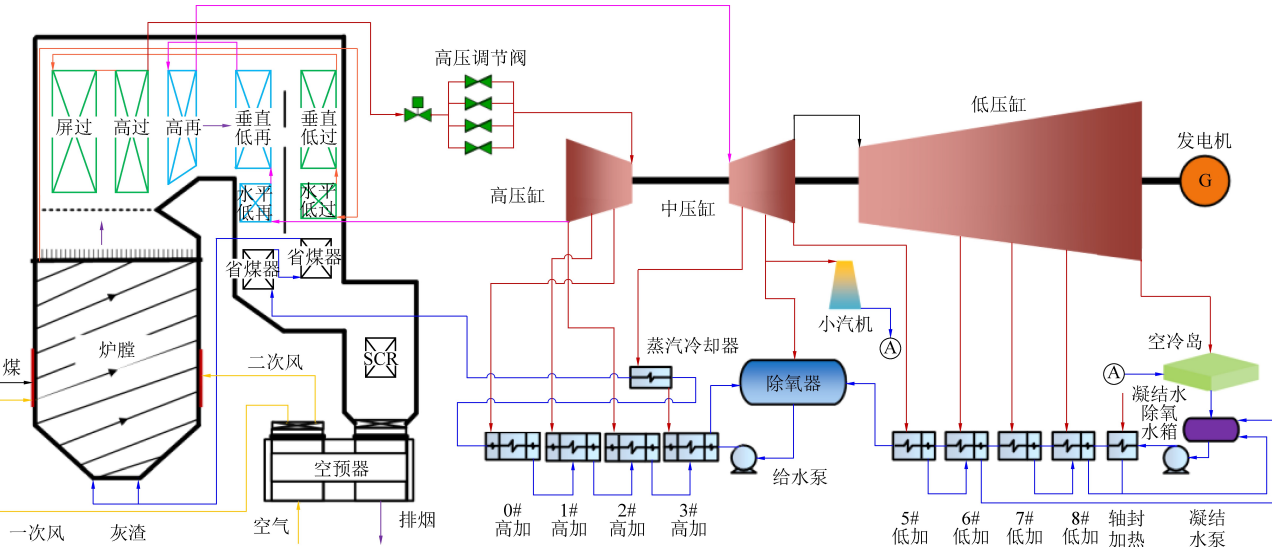


图 1 660 MW 超超临界燃煤发电机组模型示意图

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,如表 1 所示。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,说明本文建立模型满足要求。

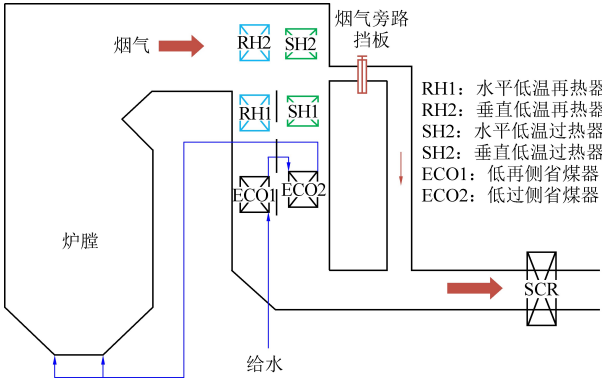


图 2 烟气旁路系统示意图

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

1.2 SCR 动态模型

SCR 脱硝系统通过 NH_3 与烟气混合,在催化剂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下:

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

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

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

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

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

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

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

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 在 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]提到尿素的单价成本为 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。

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

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); Pe 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

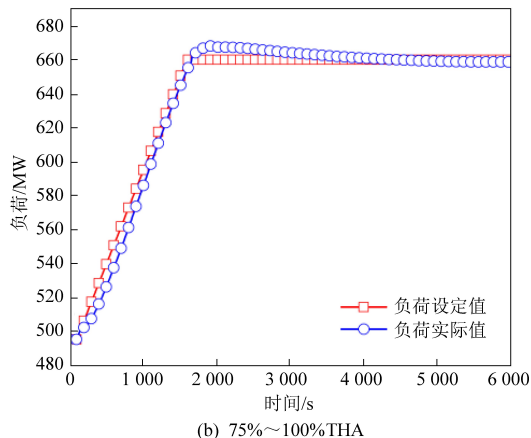
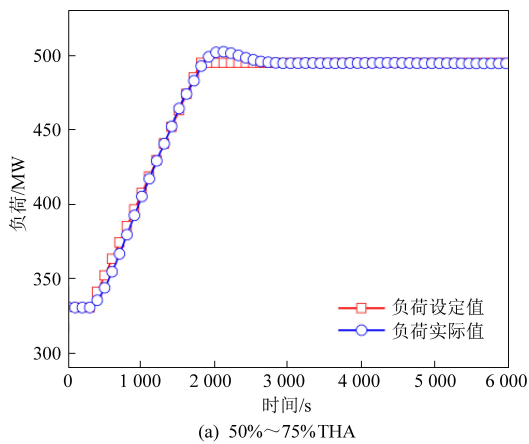


图 3 升负荷过程中燃煤机组的负荷变化

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

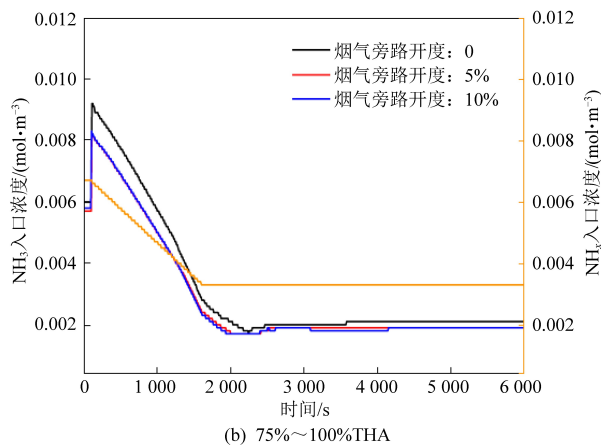
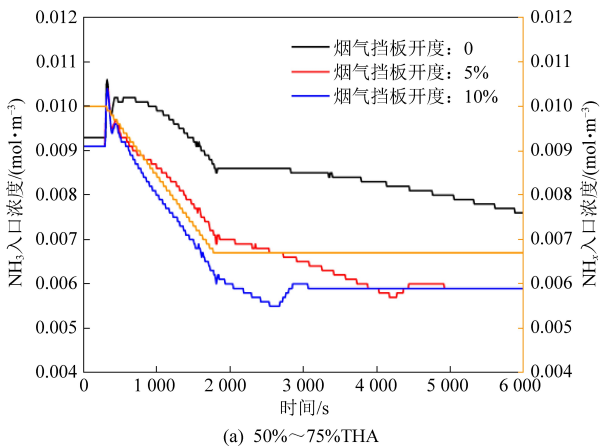


图 4 升负荷过程中 NH_3 入口浓度和 NO_x 入口浓度

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

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 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。

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

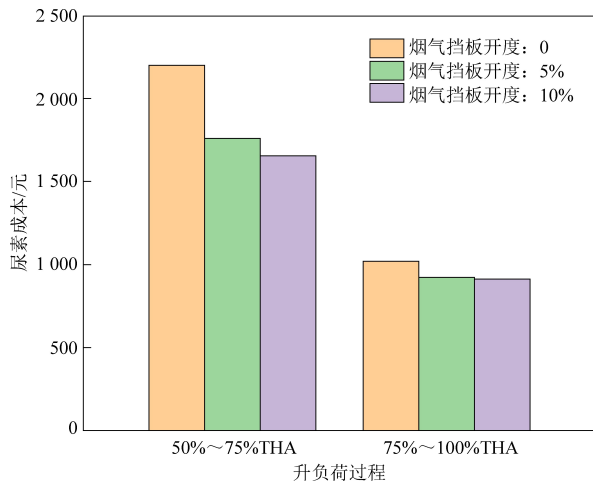


图 5 升负荷过程中尿素成本

Fig. 5 Urea cost during loading up processes

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。

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。而在 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。

表 2 燃煤成本

Table 2 Cost of coal combustion 万元			
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

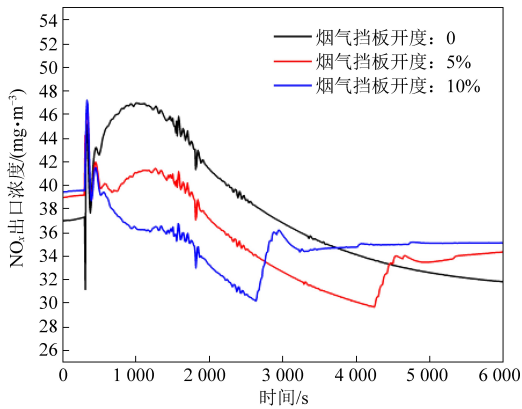
当前,许多燃煤电站设置有烟气旁路系统以调节 SCR 入口烟气温度。本文建立了 660 MW 超超临界燃煤发电机组动态模型及 SCR 反应动态模型,模拟了在 50%~100%THA 的升负荷过程中,采用烟气旁路系统调节 SCR 入口烟气温度时,燃煤机组 SCR 脱硝系统的经济性,包括在变负荷过程中燃煤机组 SCR 脱硝系统的尿素成本、 NO_x 排放环境成本及燃煤成本。主要结论如下:

(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。

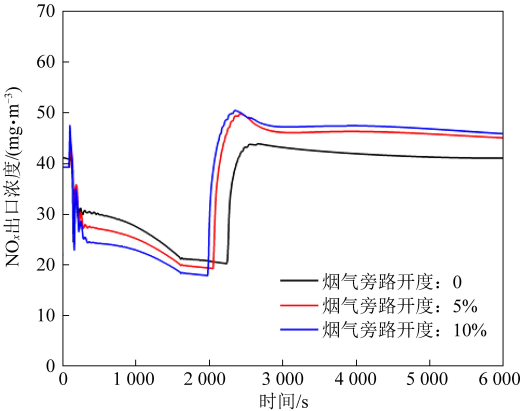
(2)燃煤机组在变负荷过程中采用烟气旁路调节时,总的成本有一定的提高。在 50%~75%THA 升负荷过程中,烟气旁路挡板开度为 5%和 10%时总成本分别增加了 95.29 元和 591.92 元。而在 75%~100%THA 升负荷过程中总成本分别增加了 1 815.42 和 2 322.20 元。

(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,



(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

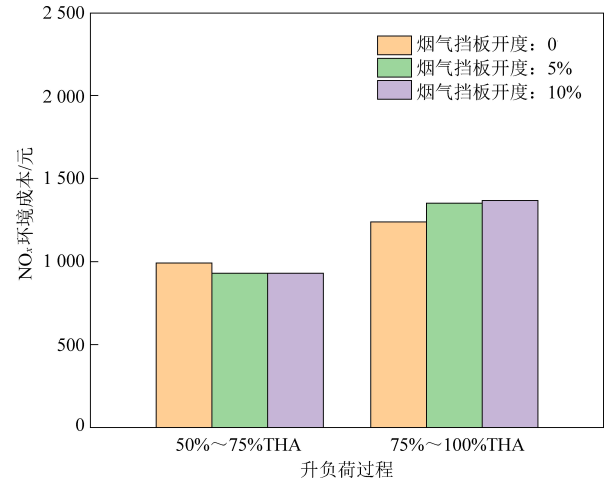


图 7 升负荷过程中 NO_x 排放环境成本

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

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

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 asteam 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, 胡箭, 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.
- [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 denitration 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.
- [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.
- [18] Zhang GW, Yan HY, Li TH, 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.