

基于流场不均匀度对 SCR 效率影响的探究

牛彩伟¹, 刘汉涛¹, 张培华², 贾建东¹

(1. 中北大学 机械与动力工程学院, 山西 太原 030051; 2. 山西平朔煤矸石发电有限责任公司, 山西 朔州 036800)

摘 要: 利用 Fluent 数值模拟软件对某 600 MW 燃煤电站锅炉的 SCR(选择性催化还原法)脱硝系统进行数值模拟, 研究了不同工况下 SCR 管道内部的流场和浓度场变化情况。引入相对标准偏差系数来衡量第一层催化剂入口处烟气浓度、速度以及温度的不均匀度, 并重点分析了不均匀度随工况的变化趋势。研究表明: 低负荷下烟气中的 NO 、 NH_3 浓度的不均匀度以及烟气温度的不均匀度高于其他工况, 在 50THA、75THA、THA、BRL、BMCR 负荷下 NO 浓度、 NH_3 浓度和烟气温度的不均匀度逐渐降低。在 50THA 和 BMCR 负荷下, NO 浓度不均匀度分别为 0.399 131 436%、0.271 308 784%; NH_3 浓度的不均匀度分别为 11.431 272 594%、11.294 855 634%; 烟气温度的不均匀度分别为 0.081 935 553%、0.079 103 890%, NO 和 NH_3 浓度变化趋势的吻合程度会下降。其原因是: 低负荷下流场不均匀度升高导致 SCR 脱硝效率降低, 可以通过有针对性地优化锅炉运行、SCR 脱硝系统的设计等来减缓催化剂的失活速率。

关 键 词: SCR; 相对标准偏差系数; 脱硝效率; 数值模拟

中图分类号: TK223.5

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.10.013

引 言

NO_x (氮氧化物)是煤燃烧过程中释放的主要污染物之一^[1], 随着《火电厂大气污染物控制排放标准》和《大气污染防治法》的颁布实施, 我国对 NO_x 排放的控制将日趋严格^[2], 因此燃煤电厂如何达到排放标准成为刻不容缓的问题^[3], 火电厂控制 NO_x 污染的技术可分为低氮燃烧和烟气脱硝两类技术^[4]。其中低氮燃烧技术脱硝效率仅有 25% ~ 60%; 选择性非催化还原技术的效率大多也在 25% ~ 40% 之间, 极少数超过 50%; 而选择性催化还原技术的效率可达到 90% 以上^[5]。选择性催化还原

方法由于具有技术成熟、脱硝效率高、运行可靠以及二次污染较低等优点, 已经成为国内外燃煤电厂应用最广泛的烟气脱硝技术^[6]。我国在建的电厂机组基本都配套建设了选择性催化还原脱硝系统或预留了 SCR 脱硝系统建设场地^[7]。在已经安装脱硝设备的电厂中, 95% 采用选择性催化还原法, 仅 5% 采用选择性非催化还原法^[8]。

在脱硝管路中都铺有导流板, 以确保进入催化剂层的烟气浓度均匀, 最大限度地提高 SCR 的脱硝效率。目前, 对 SCR 脱硝技术的研究主要集中在脱硝的催化反应机理、反应动力学、催化剂性能改进、脱硝试验和数学模拟以及脱硝装置工程应用等方面^[9-14]。但是, 对于已经铺设导流板的 SCR 设备, 在不同工况下的数值模拟以及不同工况下 SCR 内部流场不均匀度方面的研究较少。因此, 本研究针对某 600 MW 的燃煤电站锅炉的 SCR 设备, 对不同负荷下的内部流场进行数值模拟, 重点研究了第一层催化剂入口处烟气的浓度、速度和温度的不均匀度对脱硝效率产生的影响。

1 理论方法

大型电站锅炉中, 选择性催化还原烟气脱硝过程是十分复杂的, 它涉及到反应器结构的设计, 烟气与还原剂在烟道和反应器里面的湍流流动、传热传质、多组分输运和化学反应等过程^[15]。系统内湍流流动模拟选取标准模型, 烟气与氨气混合的模拟选取多组分输运模型, 催化剂结构模拟选取多孔介质模型。

1.1 通用控制方程

选取烟气为流动介质, 假设流动为不可压缩流

收稿日期: 2015-12-15; 修订日期: 2016-01-13

基金项目: 国家基金委观测尺度下热对流对颗粒两相流动影响的 eDPD 研究(51476150)

作者简介: 牛彩伟(1990-), 女, 河北石家庄人, 在读研究生。

动,整个流动和反应过程遵循质量守恒、动量守恒及能量守恒。为了便于求解,需要对方程进行雷诺平均,得到平均流控制方程:

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

式中: ρ —烟气的密度, kg/m^3 ; u_i — i 方向的速度, m/s ; τ —时间, s ; $\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}'_i$ — i 方向的平均速度和脉动速度, m/s ; $\bar{u}'_j$ — j 方向的脉动速度, m/s ; g_i — i 方向的自由落体加速度分量, m/s^2 ; μ —动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; p —压力, Pa 。

1.2 湍流模型

采用标准 $k-\varepsilon$ 模型模拟气体湍流流动^[8], 标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型的湍流动量(K) 方程和湍流耗散(ε) 方程分别为^[12]:

$$\frac{\partial (\rho K)}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho K u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] - G_K \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_1 \varepsilon \varepsilon}{K} G_K - C_2 \varepsilon \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (4)$$

式中: μ_t —湍流粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; G_K —由层流速度梯度产生的湍流动能, m^2/s^2 ; σ_K 和 σ_ε — k 方程和 ε 方程的湍流普朗特数; $C_1 \varepsilon$ 和 $C_2 \varepsilon$ —常数

1.3 多孔介质模型

催化剂是 SCR 的核心^[13]。如果在数值模拟中如实地构造蜂窝形状的催化剂床, 进行网格划分网格时将达到上千万的网格体, 这受到计算机的制约。将其定义为多孔介质区域, 则能够在满足模拟的基础上减少计算量^[8]。多孔介质模型阻力为:

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu v}{\alpha} + \frac{c_2 \rho v^2}{2} \right) \Delta m \quad (5)$$

式中: Δp —流体通过多孔介质层时的阻力, Pa ; v —多孔介质层中流体速度, m/s ; α —多孔介质渗透率; C_2 —压力跳跃系数; $\rho = 1.293 \text{ kg}/\text{m}^3$; Δm —气流分布板厚度, m 。

1.4 组分输运方程

由于 SCR 系统涉及多种气体成分混合, 需要考虑流动中物质的混合情况, 因此采用物质输运模型模拟多种物质的混合^[14]。守恒方程如式(6)所示:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho Y_i) + \nabla (\rho \bar{v} Y_i) = - \nabla \bar{J}_i \quad (6)$$

式中: Y_i —第 i 种成分的质量分数; $\bar{v}$ —混和气体相对于实验室坐标系的速度, 即牵连速度, m/s ; $\bar{J}_i$ —组分 i 的扩散通量, 由浓度梯度产生。

1.5 相对标准偏差系数

采用相对标准偏差系数来表征同一截面上烟气的浓度、速度和温度的分布特性。相对标准偏差系数越小, 均匀性越好, NO 和 NH_3 浓度变化趋势的吻合程度越好。相对标准偏差系数 C_v 的定义为:

$$C_v = \frac{\sigma}{x} \quad (7)$$

式中: σ —标准偏差, % , $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{(n-1)}}$; x —

平均值, $x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$;

NO— NH_3 浓度差的相对标准偏差系数 $C_v (c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3})$ 的计算公式为:

$$C_v (c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3}) = \frac{\sigma (c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3})}{c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3}} \quad (8)$$

式中: $\sigma (c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3})$ — $c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3}$ 的标准偏差, % , $C_v (c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3})^2}{n-1}}$; $c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3}$ — $c_{\text{NO}} - c_{\text{NH}_3}$ 的平均值, mol/L ; c_{NO} —NO 的浓度, mol/L ; c_{NH_3} — NH_3 的浓度, mol/L ; $\bar{c}_{\text{NO}}$ —NO 的平均浓度, mol/L ; $\bar{c}_{\text{NH}_3}$ — NH_3 的平均浓度, mol/L 。

添加导流板后 SCR 内部流场应当满足如下要求^[15]:

(1) 第一层催化剂前的速度分布的相对标准偏差小于 15%; (2) 第一层催化剂前的 NO 和 NH_3 浓度分布的相对标准偏差小于 5%; (3) 第一层催化剂前的温度分布的相对标准偏差小于 1%。

2 物理模型建立和网格划分

2.1 几何模型

选取 SCR 脱硝系统烟气入口到反应器出口烟道之间的区域作为计算区域, 系统主要由烟道、反应

器和催化剂层构成。已知烟道入口尺寸高 3.5 m, 宽 13.95 m, 反应器本体结构长 11.67 m, 宽 13.95 m, 高 21 m, 竖直烟道距离反应器距离为 4 m。根据已知系统的实际尺寸, 利用三维建模软件 Proe 对 SCR 管道模型进行建模, SCR 脱销系统几何模型如图 1 所示。

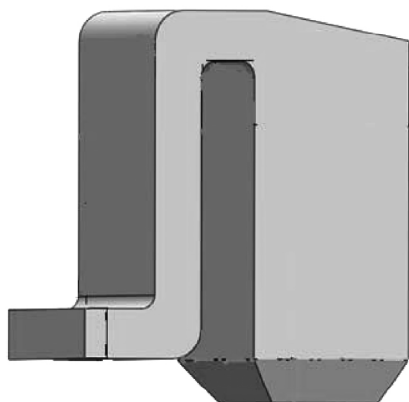


图 1 SCR 脱销系统几何模型

Fig. 1 Geometric model of SCR de-NO_x system

2.2 网格划分与边界条件

利用 Gambit 软件对建立好的 SCR 管道模型进行网格划分, 网格采用四面体非结构化网格, 采用边界层网格加密, 提高壁面和导流板附近的网格质量, 从而获得更好的模拟结果。为在模拟中体现出烟气中的多组分, 启用组分输运模型, 设定烟气各成分的比例具体数值如表 1 所示。SCR 出口设定为自由出流; 喷氨入口都选择速度入口, 具体设置如表 2 所示。烟气入口设定为速度入口, 湍流参数通过湍流强度和水利直径来定义, 具体设置如表 3 所示。本文主要研究速度场和浓度场, 对催化剂的化学反应不做研究, 所以对催化剂层模型选择多孔介质模型, 设定多孔介质的惯性阻力因子为 $80(1/m^2)$, 粘性阻力因子为 $1.34(1/m^2)$, 多孔率为 0.7。此外, 近壁区处理采用标准壁函数法。整体烟道脱硝的网格划分示意图如图 2 所示。

表 1 烟气各组分质量百分比

Tab. 1 Components of flue gas

组分	O ₂	NH ₃	NO	H ₂ O	CO ₂	N ₂
质量百分比/%	2.8	0	0.1	3.4	22.9	70.8

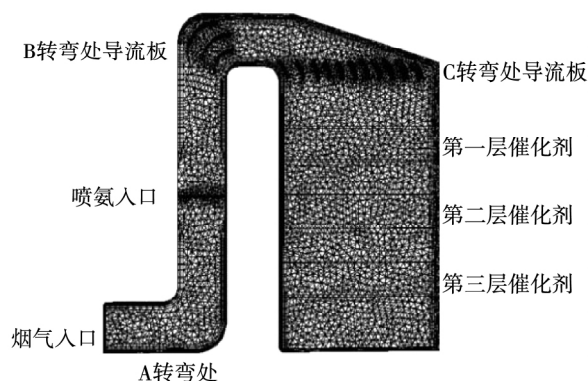


图 2 脱销系统的网格划分

Fig. 2 Mesh of SCR de-NO_x system

表 2 喷氨量

Tab. 2 Spray amount of ammonia

喷氨温度/K	O ₂ /%	NH ₃ /%	N ₂ /%
300	20	8	72

3 不同工况下烟气入口条件

Tab. 3 Inlet conditions of flue gas under different conditions

工况	BMCR	BRL	THA	75% THA	50% THA
入口烟气体积/ $m^3 \cdot s^{-1}$	1 906.2	1 812.5	1 696.9	1 247.6	909.9
烟气速度/ $m \cdot s^{-1}$	15.83	15.05	14.09	10.36	7.56
烟气温度/K	656	649	643	617	594
湍流强度/%	2.57	2.59	2.61	2.71	2.82
水力直径/m	6.58	6.58	6.58	6.58	6.58
喷氨入口速度/ $m \cdot s^{-1}$	14	13.49	12.78	9.89	7.64

3 模拟结果分析

3.1 整体纵截面速度矢量图

模拟工况分别为锅炉最大连续蒸发量工况 (BMCR)、额定工况 (BRL)、汽轮机额定功率工况 (THA)、75% THA 工况和 50% THA 工况 5 种工况。BRL 工况下脱硝系统整体纵截面速度矢量图如图 3 所示。

由图 3 可知, 在拐弯处倒流板作用明显。A 转弯处没有加导流板, 在管道转弯处贴壁现象严重, 有较大的速度损失。与 A 管道结构相似的 B 处由于加设了导流板, 贴壁现象得到了改善, 速度损失较少。在 C 转弯处 11 个导流板的作用下, 进入催化剂

层的烟气速度分布很均匀,有利于充分发挥催化剂的脱硝作用。

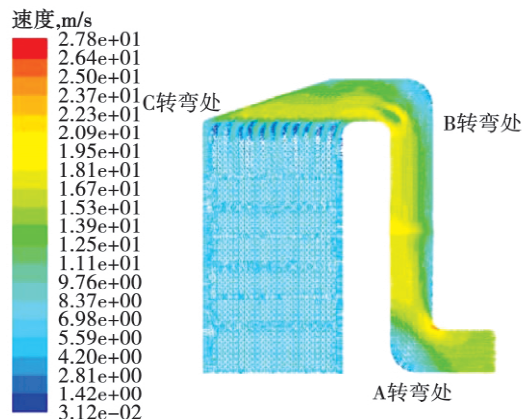


图 3 速度矢量图

Fig. 3 Velocity vector

3.2 速度分布图

BRL 工况下第一层催化剂入口处的速度分布图,如图 4 所示。

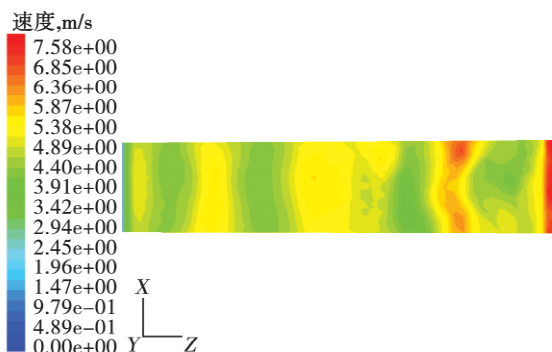


图 4 横截面上速度分布图

Fig. 4 Velocity profile in cross section

由图 4 可知,第一层催化剂入口处的速度分布相对均匀。气体的速度大小集中分布在 $3 \sim 5$ m/s 之间,说明导流板的作用明显,起到了均衡气体速度的作用。

3.3 NH_3 和 NO 浓度分布图

BRL 工况下第一层催化剂入口处的 NH_3 和 NO 摩尔浓度分布图,如图 5 所示。

由图 5 可知,第一层催化剂入口处的 NH_3 和 NO 的浓度分布相对均匀。其中, NH_3 的最大浓度偏差为 9.5×10^{-4} , NO 浓度偏差相对较小,最大偏差为 6.0×10^{-6} 。所以,与 NO 相比,我们更应注意 NH_3

气体浓度的不均匀度对 SCR 脱销效率的影响。

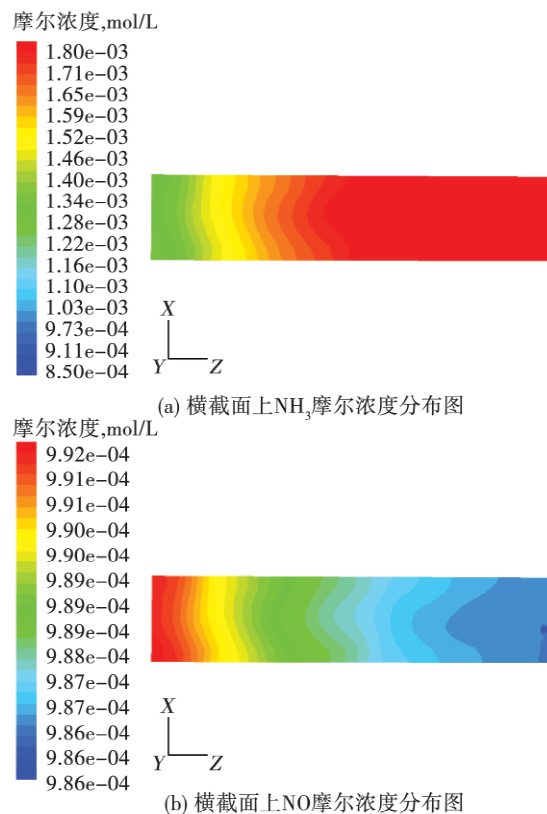


图 5 横截面上 NH_3 和 NO 摩尔浓度分布图

Fig. 5 NH_3 and NO molar concentration distribution in cross section

4 不同负荷下相对标准偏差曲线

4.1 浓度相对标准偏差曲线图

不同工况下第一层催化剂入口处的 NH_3 浓度相对标准偏差系数 $C_v(c_{\text{NH}_3})$ 、 NO 浓度相对标准偏差系数 $C_v(c_{\text{NO}})$ 、 $\text{NO} - \text{NH}_3$ 浓度差相对标准偏差系数 $C_v(c_{\text{NO} - \text{NH}_3})$ 随负荷的变化曲线图,如图 6 ~ 图 8 所示。

由图 6 可知,第一层催化剂入口截面处的 NH_3 浓度相对标准偏差系数随着负荷的升高而降低。说明负荷越高,横截面上各点处的 NH_3 浓度差距越小,反映出该横截面上的 NH_3 浓度分布越均匀,进而使得催化剂利用充分,SCR 的脱销效率升高。

由图 7 可知,第一层催化剂入口截面处的 NO 浓度相对标准偏差系数随着负荷的升高而降低。说明负荷越高,横截面上各点处的 NO 浓度差距越小,反映出该横截面上的 NO 浓度分布越均匀,进而使

得催化剂利用充分,SCR 的脱销效率升高。

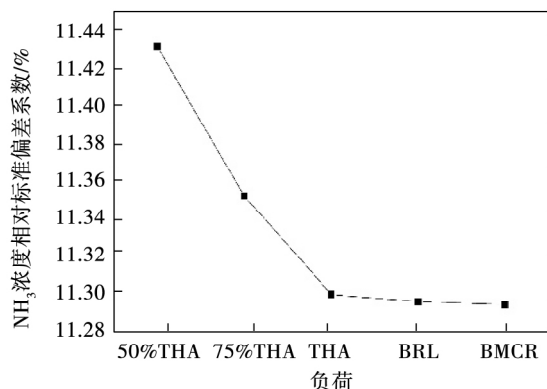


图6 不同工况下 NH₃ 浓度相对标准偏差曲线图

Fig. 6 Relative standard deviation graph of NH₃ concentration under different conditions

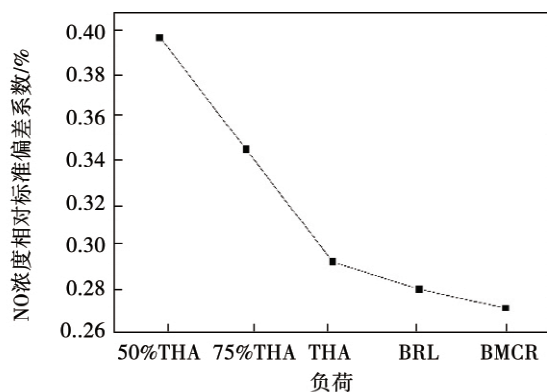


图7 不同工况下 NO 浓度相对标准偏差曲线图

Fig. 7 Relative standard deviation graph of NO concentration under different conditions

若 NO - NH₃ 浓度差高于整个横截面上各点浓度差的平均值,说明反应物 NO 浓度略高, NH₃ 浓度略低,则脱销效果较差;若 NO - NH₃ 浓度差低于整个横截面上各点浓度差的平均值,说明反应物 NO 浓度略低, NH₃ 浓度略高,则 NH₃ 的利用率下降,导致 NH₃ 的浪费,增大了脱销成本。由图 8 可知,第一层催化剂入口截面处的 NO - NH₃ 浓度差的相对标准偏差系数随负荷的升高而降低。表明负荷越高,横截面上各点处的 NO - NH₃ 浓度差的差距越小,反映出该横截面上 NO 和 NH₃ 浓度变化趋势的吻合程度越高,进而使得 NH₃ 的利用率越高,脱销效果越好。

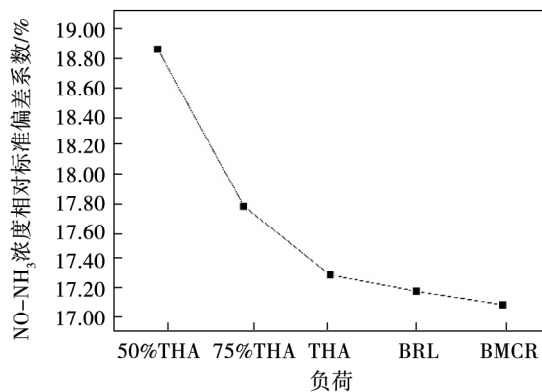


图8 不同工况下 NO - NH₃ 浓度差的相对标准偏差曲线图

Fig. 8 Relative standard deviation graph of NO - NH₃ concentration under different conditions

4.2 烟气速度相对标准偏差曲线图

不同工况下第一层催化剂入口截面处的烟气速度相对标准偏差系数随负荷的变化曲线如图 9 所示。

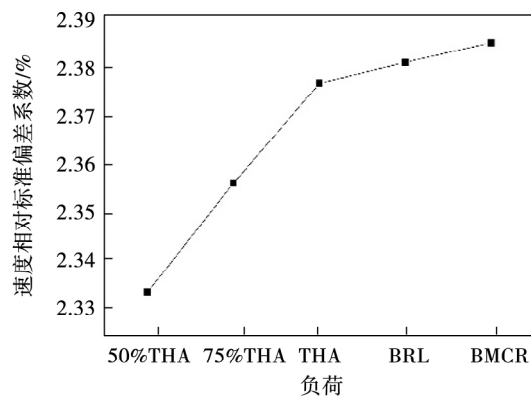


图9 不同工况下烟气速度相对标准偏差曲线图

Fig. 9 Relative standard deviation graph of flue gas velocity under different conditions

由图 9 可知,第一层催化剂入口截面处的速度相对标准偏差系数随着负荷的升高而升高,呈正相关。但是,从 50% THA 负荷到最大满负荷 BMCR,速度的相对标准偏差系数变化量不大,相差 0.05%,与要求中的第一层催化剂入口处速度相对标准偏差小于 15% 相比变化很小,所以这一变化可以忽略不计。

4.3 烟气温度相对标准偏差曲线图

不同工况下第一层催化剂入口截面处的烟气温

度相对标准偏差系数 $C_v(T)$ 随负荷的变化曲线图如图 10 所示。

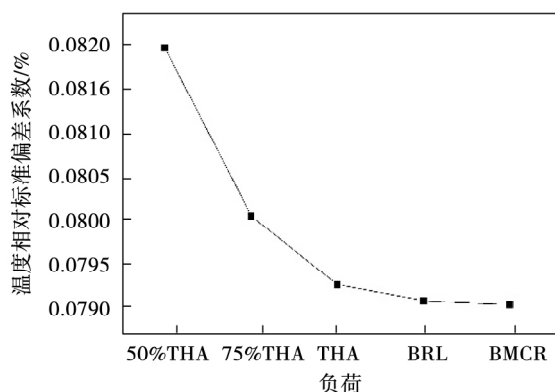


图 10 不同工况下烟气温度相对标准偏差曲线图

Fig. 10 Relative standard deviation graph of flue gas temperature under different conditions

由图 10 可知,第一层催化剂入口截面处的温度相对标准偏差系数随负荷升高而降低。说明低负荷下进入 SCR 催化剂的气体温度不均匀度升高,会导致催化剂各处的反应速度不同,不能够充分发挥催化剂的脱硝作用。

5 结 论

本文通过引入相对标准偏差系数这一数学概念衡量流场的不均匀度,消除物理量本身大小对流场不均度衡量的影响,从而更加科学地描述了 SCR 内部流场的不均度情况。通过研究不同负荷下的流场不均度,发现流场不均度随负荷降低而升高,结论如下:

(1) NO 、 NH_3 浓度相对标准偏差系数随工况不同变化显著,在低负荷下烟气中的 NO 、 NH_3 浓度的不均匀度会升高,导致催化剂利用不充分,SCR 设备脱硝效率降低;

(2) $\text{NO} - \text{NH}_3$ 浓度差的相对标准偏差系数随工况不同变化显著,在低负荷下偏差较大,从而导致 NO 和 NH_3 浓度变化趋势的吻合程度较低, NH_3 利用率较低,脱硝效果较差;

(3) 不同工况下的速度标准偏差系数数值较为接近,且与要求 15% 相比较小,因此速度场受工况变化的影响可以忽略;

(4) 烟气温度相对标准偏差系数随工况不同变

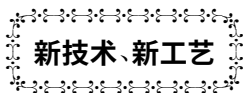
化显著,在低负荷下烟气的温度不均匀度会升高,导致催化剂各处的反应速度不同,SCR 设备的脱硝效率降低。

参考文献:

- [1] DIEZ L I, CORTES C, PALLARES J. Numerical investigation of NO_x emissions from a tangentially fired utility boiler under conventional and overfire air operation [J]. Fuel, 2008, 87 (7) : 1259 - 1269.
- [2] 高 岩, 栾 涛, 程 凯, 等. 选择性催化还原蜂窝状催化剂工业试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 35: 21 - 28.
GAO Yan, LUAN Tao, CHENG Kai, et al. Industrial experiment on selective catalytic reduction honeycomb catalyst [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 35: 21 - 28.
- [3] 章 勤. 燃煤锅炉低 NO_x 燃烧实验及模拟研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
ZHANG Qin. Experimental and simulation investigation of the low NO_x combustion on coal-fired boiler [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [4] 凌忠钱, 曾宪阳, 胡善涛, 等. 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, 01: 50 - 56.
LING Zhong-qian, ZENG Xian-yang, HU Shan-tao, et al. Numerical simulation on optimization of SCR denitrification system for coal-fired boilers [J]. Power Engineering, 2014, 01: 50 - 56.
- [5] 赵 乾. SCR 烟气脱硝系统模拟优化及喷氨量最优控制 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHAO Kun. Simulation optimization and optimal control on spraying ammonia of SCR flue gas denitrification [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [6] 徐 旭, 应 剑, 王新龙. 燃煤电厂选择性催化还原烟气脱硝系统的性能试验 [J]. 动力工程学报, 2010, 06: 439 - 443.
XU Xu, YING Jian, WANG Xin-long. Performance test of a SCR denitrification system for coal fired power plants [J]. Power Engineering, 2010, 06: 439 - 443.
- [7] 惠霖霖, 张 磊, 王祖光, 等. 中国燃煤电厂汞的物质流向与汞排放研究 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(8) : 2241 - 2250.
HUI Lin-li, ZHANG Lei, WANG Zuo-guang, et al. The mercury mass flow and emissions of coal-fired power plants in China [J]. China Environmental Science, 2015, 35(8) : 2241 - 2250.
- [8] FORZATTI P. Present status and perspectives in de NO_x SCR catalysis [J]. Applied Catalysis: A, 2001, 222(1/2) : 221 - 236.
- [9] SCHAUB G, UNRUH D, WANG J, et al. Kinetic analysis of selective catalytic NO_x reduction (SCR) in a catalytic filter [J]. Chemical Engineering and Processing, 2003, 42(5) : 365 - 371.

- [10] WILBURN R T, WRIGHT T L. SCR ammonia slip distribution in coal plant effluents and dependence upon SO₃ [J]. Power Plant Chemistry, 2004, 6(5): 295–304.
- [11] 郭婷婷, 刘汉强, 杨勇平, 等. 基于数值模拟的 1 000 MW 燃煤机组 SCR 脱硝系统设计 [J]. 电站系统工程, 2010, 05: 61–64.
- GUO Ting-ting, LIU Han-qiang, YANG Yong-ping, et al. SCR system design based on numerical simulation of 1 000 MW coal-fired station [J]. Power system Engineering, 2010, 05: 61–64.
- [12] 董建勋, 王松岭, 李永华, 等. 选择性催化还原烟气脱硝过程数学模拟研究 [J]. 热能动力工程, 2007, 05: 569–573 + 582.
- DONG Jian-xun, WANG Song-ling, LI Yong-hua, et al. Mathematical simulation study of a selective catalytic-reduction based flue-gas denitration process [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 05: 569–573 + 582.
- [13] 姜 烨, 高 翔, 吴卫红, 等. 选择性催化还原脱硝催化剂失活研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 14: 18–31 + 13.
- JIANG Ye, GAO Xiang, WU Wei-hong, et al. Review of the deactivation of selective catalytic reduction by NO_x catalysts [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 14: 18–31 + 13.
- [14] 朱天宇, 李德波, 方庆艳, 等. 燃煤锅炉 SCR 烟气脱硝系统流场优化的数值模拟 [J]. 动力工程学报, 2015, 06: 481–488 + 508.
- ZHU Tian-yu, LI De-bo, FANG Qing-yan, et al. Flow field optimization for SCR system of coal-fired power plants [J]. Power Engineering, 2015, 06: 481–488 + 508.
- [15] 刘小波, 陈冬林, 姜昌伟, 等. 燃煤锅炉选择性催化还原脱硝反应器结构的模拟优化 [J]. 动力工程学报, 2010, 05: 384–389.
- LIU Xiao-bo, CHEN Dong-lin, JIANG Chang-wei, et al. Simulation optimization of a SCR denitrification reactor for coal fired boilers [J]. Power Engineering, 2010, 05: 384–389.

(单丽华 编辑)



联合循环 FT4000 的额定性能

据《Gas Turbine World》2014 ~ 2015 年年度手册报道, 美国 PW Power Systems 于 2014 年推出基于 FT4000 航改型工业用燃气轮机组成的 FT400 Swift Pac 60 联合循环装置。这是该公司于 1990 年推出基于 FT8 航改型工业用燃气轮机组成的 FT8 Swift Pac 30 联合循环装置后, 时隔 24 年推出的又一型基于航改型燃气轮机组成的高性能的联合循环装置。

下表给出了联合循环 FT4000 的额定性能及其和 FT8 联合循环的比较:

联合循环装置	SP60 联合循环	SP120 联合循环	FT8 SP30 联合循环	FT8 SP60 联合循环
设计性能	1 台 FT4000	2 台 FT4000	1 台 FT8 - 3	2 台 FT8 - 3
装置毛(总的)输出功率	85 500 kW	172 500 kW	42 100 kW	83 100 kW
装置净输出功率	83 900 kW	169 000 kW	41 050 kW	82 100 kW
净热耗率(LHV)	7 092 kJ/kWh	7 037 kJ/kWh	7 332 kJ/kWh	7 256 kJ/kWh
装置净效率	50.8%	51.2%	49.1%	49.6%
燃气轮机功率	68 100 kW	136 600 kW	30 100 kW	60 500 kW
汽轮机功率	17 400 kW	35 900 kW	12 000 kW	24 600 kW

说明: 对于基于 35.6 mm 汞柱高度冷凝器压力和空气冷却设计的 1 × 1 联合循环装置, 具有湿压缩的 FT4000 燃气轮机与 FT8 联合循环装置比较。

(吉桂明 摘译)

In order to enhance the pre-judgment ability of feasibility of compaction for prevention of spontaneous combustion in coal stockpiles, the simulation model of spontaneous combustion in coal stockpile has been established by using the software of COMSOL Multiphysics 5.0. Numerical simulations for 5 different stack dimensions of coal stockpile were carried out, and the changes of temperature and time of spontaneous combustion after compacting were studied and the applicability of compaction in coal stockpile were analyzed. The minimum impropriety wind-velocity equation of coal stockpile compaction was established with the consideration of porosity. The results show that, there are different minimum impropriety wind velocities for the compaction of coal stockpile. The minimum impropriety wind-velocity from the perspective of changes in temperature is lesser than that from the perspective of changes in time of spontaneous combustion. Set the smaller value as the judgment standard, there is a weak correlation with the stack dimensions and the minimum impropriety wind-velocity, but it is significantly affected by the original porosity. The relationship between the minimum impropriety wind-velocity of compaction and the original porosity of coal stockpile exhibits a power function correlation. **Key words:** spontaneous combustion of coal stockpile, compaction, inapplicable wind velocity, stack dimension, porosity

基于流场不均匀度对 SCR 效率影响的探究 = The effect of Uneven Flow Field on the Efficiency of SCR

刊, 汉] NIU Cai-wei, LIU Han-tao (School of Machinery and Power Engineering, North University of China, Taiyuan, China, Post Code: 030051), ZHANG Pei-hua (Shanxi Pingshuo Gangue-fired Power Generation Co. Ltd. , Huozhou, Post Code: 036800), JIA Jian-dong (School of Machinery and Power Engineering, North University of China, Taiyuan, China, Post Code: 030051) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31 (10) . - 72 ~ 78

The flow field in a selective catalytic reduction selective catalytic reduction (SCR) denitration reactor of a 600 MW coal-fired power plant was numerically simulated. Based on the relative standard deviation, the unevenness of NO and NH₃ concentration, the velocity, flue gas temperature as well as coincide trend of NO and NH₃ concentration at the entrance of the first layer of the catalyst were investigated. The results show that the unevenness of concentration and flue gas temperature are higher than other conditions, the unevenness of NO concentration, NH₃ concentration and flue gas temperature all reduced as the conditions become 50THA、75THA、THA、BRL、BMCR conditions. the unevenness of NO concentration was 0.399 131 436%、0.271 308 784%; the unevenness of NH₃ concentration was 11.431 272 594%、11.294 855 634%; the unevenness of flue gas temperature was 0.081 935 553%、0.079 103 890% under 50THA、BMCR conditions, while the coinciding trend of NO and NH₃ concentration decrease at low load. The above indicate that the increasing unevenness of flow field at low load makes a great difference in reducing SCR denitration efficiency, which causes boiler operation, the design of SCR de NO_x system and so on are optimized to decrease the catalyst deactivation rate. **Key words:** SCR, relative standard deviation, denitration efficiency, numerical simulation

结构化填充床内层流流动特性的研究 = Study of Laminar Flow Characteristics in a Structured Packed Bed 刊, 汉] LI Nan, SHI Jun-rui, LIU Yang (Key Laboratory of Clean Combustion for Electric Generation &