2015年 11月

煤炭洁净燃烧

300 MW 亚临界机组 SCR 脱硝系统数值模拟

王为术,上官闪闪,张 斌,雷 佳 (华北水利水电大学热能工程研究中心,河南郑州 450011)

摘 要:烟气选择性催化还原(SCR)系统的流场影响氨氮混合及反应物停留时间进而影响脱硝效率。 基于 fluent 6.3 软件,对某 300 MW 亚临界机组的 SCR 系统的流场及氨氮混合情况进行了数值模拟。 结果表明:在该 SCR 脱硝系统中,因烟道布置中存在截面变化的大小头及急转弯头,反应器前烟道流 场出现严重不均。氨喷射(AIG)下游速度标准偏差达 20.9%,速度角度标准偏差为 23.5%;反应器 入口速度偏差达 17.3%,存在大面积速度低于4 m/s 的区域,会堵塞催化剂,影响脱硝反应。流速不 均导致氨氮混合较差,AIG 区域下游氨氮物质的量比偏差高达 47.2%,反应器入口近 50% 区域氨氮 摩尔比低于 0.8,严重偏离脱硝反应系数比 1,脱硝效率仅 66.48%。该系统整体压降较高,运行经济 性较差。

关键词:SCR;流场;氨氮混合;脱硝效率;数值模拟

中图分类号:TQ534.9 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2015)06-0076-04

Numerical simulation of SCR denitrification system for a 300 MW subcritical unit

WANG Weishu, SHANGGUAN Shanshan, ZHANG Bin, LEI Jia

(Institute of Thermal Energy Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: The mixing efficiency of NH_3 and NO_x , residence time of reactants were effected by flow field in SCR (Selective Catalytic Reduction) system, that meant the denitrification efficiency decreased. Based on the fluent 6.3 software, the flow field and the mixture of NH_3 and NO_x in SCR system for a 300 MW subcritical unit were simulated. Influenced by the existence of variable cross-sections transition pipe and sharp elbows in flue, the flow field in front of reactor appeared severe unequal velocity. The deviation of velocity and velocity angle of AIG lower reached up to 20.9% and 23.5% respectively. The velocity deviation of reactor inlet was 17.3%, and there happened large area with velocity lower than 4 m/s, which could block the catalyst and effect the proceeding of denitrification reaction. The heterogeneous velocity distribution resulted in the poor mixture of NH_3 and NO_x . The deviation of molar ratio of NH_3 to NO of AIG lower was up to 47.2%. In almost 50% area of reactor inlet, the molar ratio of NH_3 to NO was lower than 0.8, which seriously deviated from the denitrification stoichiometric coefficient 1, so the denitrification efficiency was only 66.48%. The pressure drop of the system was high, and operation economy was relatively bad.

Key words: SCR; flow field; mixture of NH₃ and NO₄; denitrification efficiency; numerical simulation

0 引 言

随着人们对环境的关注,燃煤电站污染物排放 也提出新标准,其中 NO_x 排放要求低于 50 mg/m³。 燃煤电站 NO_x 排放控制主要通过燃烧调整和烟气 脱硝来实现^[1]。其中燃烧调整是根据 NO_x 生成机 理,采用低氮燃烧器、调整炉膛配风、调整煤粉浓度 等措施减少 NO_x 的生成^[2-4]。但是仅以燃烧中脱氮 无法达到排放新标准,烟气脱硝成为降低 NO_x 的重 要环节。选择性催化还原技术(SCR)以其经济高效

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51276210)

作者简介: エカボ(1972—), 男, 重庆人, 教授, 研究生导师, 从事多相流传热及污染物控制技术研究工作。E-mail: wangweishu@ ncwu. edu. cn 引用格式: 王为术, 上官闪闪, 张 斌, 等. 300 MW 亚临界机组 SCR 脱硝系统数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(6): 76-79, 84.

WANG Weishu, SHANGGUAN Shanshan, ZHANG Bin, *et al.* Numerical simulation of SCR denitrification system for a 300 MW subcritical unit [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(6):76-79,84.

收稿日期:2015-04-23;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.06.019

成为烟气脱硝的主要选择。Sayre 等^[5]、毛庚仁等^[6] 对 SCR 系统的模拟结果能在一定程度上反映实际 工况,采用数值模拟技术研究 SCR 系统有效可行。 雷达等^[7]对 SCR 系统的喷氨格栅(AIG)、导流板和 混合器对烟气流场和还原剂浓度场的影响进行了模 拟研究,说明通过流场的改善达到浓度场的均化可 行;Thanh 等^[8]采用阿累尼乌斯动力学模型,基于相 关化学反应的试验参数,对 NO。生成的进行深入模 拟研究。董建勋等^[9]、郭婷婷等^[10]经模拟研究速度 场和还原剂的分布对 SCR 脱硝性能的影响,得到脱 硝效率随着氨氮摩尔比的偏差的增大而降低的结 论。毛剑宏等[11-12]模拟并试验研究了加装合理导 流装置对系统流场、浓度场的改善作用,并得出不同 导流板对流场的影响。因此,笔者应用 Fluent 6.3 软件,对某 300 MW 亚临界机组的 SCR 系统的流 场、氨氮混合及其脱硝化学反应进行模拟分析,为电 站 SCR 系统的工程改造提供参考。

1 研究对象

1.1 系统介绍

研究对象为某 300 MW 亚临界燃煤机组脱硝改 造新增的 SCR 脱硝系统,该机组有 2 台 SCR 反应 器,采用高尘区布置,布置在锅炉省煤器烟道和空预 器之间,取省煤器出口至空预器入口前烟道系统为 模拟对象,因 2 台 SCR 反应器呈对称结构,选取一 台进行研究。模拟工况选取 100% 工况,入口烟气 流量为 526899 m³/h,温度为 366.3 ℃。

1.2 几何模型

几何模型与实际系统按照 1:1 建立,对 SCR 系统的模拟研究主要是流场和脱硝反应,而实际系 统内部比较复杂,根据研究目的对模型进行了合理 简化^[13-14]:假设烟气的各个组分和喷入的氨均为理 想气体;由于反应系统的进出口温度变化不大,所以 近似把系统假定为绝热系统;假定化学反应发生在 喷氨装置之后区域;对于稳流装置和催化剂层,简化 为有一定阻力的均流格栅;忽略可能发生的副反应; 假设流动为定常流动;主要研究该系统的流场和其 中的反应,忽略烟气中飞灰颗粒的影响。

模型主要由烟道系统、喷氨装置和反应器系统 组成,采用 Gambit 2.4.6 软件建立完整模型并划分 网格。系统整体采用结构化网格,在喷氨区域因其 流动混合复杂,采用非结构化网格并进行局部加密 处理以防止伪扩散,在计算中采用逐步细化网格得 到近似网格无关解,最终网格总数为200万。具体 网格如图1所示。





1.3 数学模型与边界条件

SCR 系统中烟气的连续性方程、动量守恒方程、 能量守恒方程、组分守恒方程、k 方程及 c 方程均可 用通用方程表示^[15]

$$\frac{\partial(\rho u \varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w \varphi)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + S_{\varphi} + S_{\rho\varphi} \quad (1)$$

式中, φ 是因变量; $u \ v \ w$ 分别是 $x \ y \ z$ 方向的速度; Γ_{φ} 是扩散系数; S_{φ} 是由气相引起的源项; $S_{p\varphi}$ 是由颗 粒引起的源项。

$$\Delta p = \left(\frac{\mu v}{\alpha} + \frac{C\rho v^2}{2}\right) \Delta m \tag{2}$$

其中, ρ =1.239 kg/m³; μ 是烟气黏滞系数; α 为多孔 介质渗透率;C 为惰性阻力系数; Δm 为气流分布板 密度。

模拟中系统的烟气入口及喷氨口均采用速度入 口,速度采用截面平均速度,出口为出流边界。控制 方程的离散采用控制容积法;烟气的湍流采用标准 κ-ε 双方程模型,在近壁面区域采用标准壁面函数 法模拟;应用离散相模型和组分输运模型模拟烟气 组分的混合和化学反应过程;计算中为防止壁面非 线性发散,采用降松弛迭代的变松弛系数法进行迭 代;对流差分格式采用精度较高的二阶迎风格式;压 力速度的耦合采用 SIMPLIC 算法。

2 结果分析

2.1 SCR 系统流场分布

图 2 为系统流场情况。图 2a 显示,由于反应器 前烟道的截面剧烈变化,烟气因运动惯性在烟道截 面变化方向上无法充分流动发展,导致在大小头位 置出现低速或高速区域。图中第一个大小头截面同 时沿高度、宽度方向偏转变化,导致截面速度在2个 方向上不均而产生低速区,直接造成进入竖直烟道的 速度两侧不均;第二个大小头沿宽度方向大角度偏转,加剧 AIG 区域沿宽度方向的流速不均,出现大范围的低速漩涡区,而另一侧的高速区会对烟道壁面造成一定程度的冲刷磨损,且影响下游流场分布。



图2 系统流场分布

图 2b 是系统中心纵截面流速情况,由图可得, 第一大小头处高度方向上截面速度差达 20 m/s;在 2 个 90°的急转弯头处因离心作用出现速度不均,导 致 AIG 区域在深度方向的流速左低右高,如图 2c 所 示:AIG 下游截面最小速度低至 2 m/s,而高速区域 速度达 24 m/s,速度标准偏差达到 20.9%,速度角 度标准偏差为 23.5%,直接影响氨与烟气的混合效 果;不均匀烟气经反应器前扩口段的流动发展,进入 反应器流场仍然较差,入口截面速度见图 2d,截面 流速明显不均,左侧大面积区域低于 4 m/s,速度标 准偏差为 17.3%,且部分位置速度低至 1 m/s,反应 物将会停留时间过长而堵塞催化剂,降低脱硝效率; 在右侧高速区速度大于6 m/s的位置会出现反应不 完全,增大氨的逃逸率。

2.2 氨氮混合情况

图 3 为系统氨氮混合情况,其中氨氮的混合以 氨氮摩尔比(mole-NH₃/mole-NO)作为评价标准。 因一般锅炉烟气中的 NO_x 有 95% 以 NO 形式存在, 所以在模拟中做出简化,在 SCR 系统的脱硝反应只 考虑主要反应 $4NH_3+4NO+O_2 \rightarrow 4N_2+6H_2O^{[15]}$,即 将氨氮摩尔比控制在 1 左右利于反应进行。

图 3a 为系统中心纵切面的氨氮摩尔比分布,氨



图 3 系统氨氮摩尔比分布

3

喷入竖直烟道后随烟气流动并与烟气中的 NO 混 合,因流速不均各个位置氨氮混合程度出现明显差 异。AIG 下游氨氮摩尔比见图 3b,在沿深度方向呈 现出与流速分布完全相反的分布趋势,截面右侧因 流速较高、氨停留时间过短导致氨氮摩尔比低至 0.5,而左侧低速区出现最高值 2.5,氨氮摩尔比低 差高达 47.2%,混合较差;图 3c 中为反应器入口氨 氮混合情况,有近 50% 的区域氨氮摩尔比低于 0.8, 氨氮摩尔比偏差为 18.2%,偏离最佳摩尔比,催化 剂利用率低,脱硝反应不完全,脱硝效率仅 66.48%,不符合装置效率高于 80% 的要求。

2.3 压降情况

系统各个截面的压力如下:	2
烟道入口压力	198.62
反应器入口压力	-328.81
第一层催化剂入口压力	-340.48
第一层催化剂出口压力	-519.30
第二层催化剂入口压力	-529.81
第二层催化剂出口压力	-708.23
反应器出口压力	-707.79
烟道出口压力	-955.05
注 匡力的位为 D。	

注: 压力单位为 Pa。

反应系统入口到出口的压降为 1153.67 Pa,大 于 900 Pa,而反应器区域的压降为 378.98 Pa,第一 层催化剂的压降为 178.82 Pa,第二层催化剂压降为 178.42 Pa,两层催化剂的压降均小于 300 Pa,而烟 道内压降达 796.43Pa,这是因为烟道的截面剧烈变 化和弯头偏转而出现的回流、二次流等造成的压降 较大,导致系统整体压降较高,增加了风机的能耗, 从而降低系统运行经济性。

论

1)该 SCR 系统在截面剧烈变化的大小头及急转弯头处出现流速严重不均,导致反应器前烟道流场较差,需通过在大小头及弯头位置加装导流装置改善流场;

2)系统流速不均影响氨氮混合,AIG下游及反应器区域的氨氮摩尔比偏离反应系数比1,脱硝反应不完全,脱硝效率低仅66.84%;

3)系统整体压降达1153.67 Pa,且压降集中在 烟道区域,运行经济性较差。

参考文献:

- [1] 杨 飏. 氮氧化物减排技术与烟气脱硝工程[M]. 北京:冶金 工业出版社,2007:25-58.
- [2] 陆 智.420 t/h 锅炉 SOFA 低 NO_x 燃烧技术改造研究[D]. 杭 州:浙江大学,2008:14-16.
- [3] 王为术,刘 军,王保文,等.600 MW 超临界 W 火焰锅炉无烟 煤燃烧 NO_x 释放规律研究[J].煤炭学报,2011,36(6):993-998.
- [4] 高小涛,黄 磊,张恩先,等.1000 MW 机组锅炉氮氧化物排放 影响的试验研究[J]. 热能与动力工程,2010,25(2):221-225.
- [5] Sayre A N, Milobowski M G. Validation of numerical models of flow through SCR units [C]//EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium, USA: [S. n], 1999:37-42.
- [6] 毛庚仁,张成建,赵 健,等. SCR 脱硝系统流场数值模拟与冷态试验研究[J]. 能源与环境,2012,6(4):49-52.
- [7] 雷 达,金宝升.燃煤电站 SCR 内烟气流场及还原剂浓度场模 拟与优化[J].煤炭学报,2009,34(3):394-399.

(下转第84页)

表 5 各方案运行费用比较(一台炉) 万元

项目	空气燃 烧基准	富氧燃 烧干循 环新建	富氧燃 烧湿循 环新建	富氧燃 烧干循 环兼容	富氧燃 烧湿循 环兼容
锅炉设备年运行费用	17620	17338	17247	17358	17266
脱硝系统年运行费用	455	364	364	455	455
锅炉主要辅机 设备年运行费用	534.6	979. 8	961.2	985.5	940. 8
脱硫系统年运行费用	516.5	511.5	408.2	511.5	679.4
年运行费用总计	19126. 1	19193. 3	18980.4	19310	19341.2
年运行费用差值	基准	67.2	-145.7	183. 9	215.1
按20年折现	基准	659.8	-1430.5	1805.5	2111.9

在年运行费用方面,富氧燃烧锅炉效率较高,耗 煤量较小,锅炉设备运行费用较常规空气燃烧方案 低260万~373万元/a,但由于富氧燃烧方案的烟 风系统阻力较大,锅炉辅机的运行费用较常规空气 燃烧高约450万元。空分系统采用电驱动时运行费 用主要是电耗,影响机组供电煤耗,在机组技术指标 上体现。因此,富氧湿循环新建方案年运行费用最 低,富氧湿循环兼容方案最高。

综合考虑技术指标、初投资和运行费用,富氧湿 循环新建方案最优,富氧湿循环兼容方案虽然降低 了供电煤耗,但投资和运行费用高,经济性差。

4 结 论

1)根据富氧燃烧碳捕集技术特点,结合煤质特性,获得了200 MW 富氧燃烧锅炉本体,脱硫脱硝及烟气系统典型设计方案;

2)通过投资、运行费用及技术指标比较,获得 了综合指标最佳的富氧燃烧技术方案;

3) 富氧燃烧碳捕集技术为燃煤电厂控制 CO₂ 提供了技术方案,但由于空分能耗较高,总体经济性 下降,研究开发适用于富氧燃烧的低能耗空分技术 将有利于富氧燃烧技术的发展和工业化应用。

参考文献:

- [1] 方君实.转变煤炭工业发展方式 推进煤炭工业科学发展[N].中国能源报,2010-10-11(16).
- [2] 徐敏杰,胡兆光,谭显东,等.中国中长期能源和电力需求及碳 排放情景分析[J].中国电力,2012,45(4):101-107.
- [3] 俞建洪.锅炉与 CO₂ 减排[J].工业锅炉,2004,83(1):10-14.
- [4] 王海亮,王运军,魏继平,等.富氧气氛下煤粉燃烧产生污染物 排放研究进展[J].锅炉技术,2014,45(2):41-43.
- [5] Kimura N, Omata K, Kiga T, et al. The characteristics of pulverized

coal combustion in O₂/CO₂ mixture for CO₂ recovery[J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36(6/9):805-808.

- [6] Okazaki K, Ando T. NO_x reduction mechanism in coal combustion with recycled CO_2 [J]. Energy, 1997, 22(2/3):207-215.
- [7] 郑楚光,赵永椿,郭 欣.中国富氧燃烧技术研发进展[J].中 国电机工程学报,2014,34(23):3856-3864.
- [8] 薛宪阔,刘彦丰. O₂/CO₂ 燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2008,14(1):57-61.
- [9] 游 卓,王智化,周志军,等.1000 MW 燃煤锅炉富氧燃烧改造及 NO_x 排放的数值模拟[J].浙江大学学报(工学版),2014, 48(11):2080-2086.
- [10] 骆仲泱,毛玉如,吴学成,等. 0₂/CO₂ 气氛下煤燃烧特性试验 研究与分析[J]. 热力发电,2004,33(6):14-18.
- [11] Tan Y, Croiset E, Douglas M A, et al. Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas[J]. Fuel, 2006,85(4):507-512.
- [12] Liu F, Guo H, Smallwood G J. The chemical effect of CO₂ replacement of N₂ in airon the burning velocity of CH₄ and H₂ premixed flames[J]. Combust Flame, 2003, 133(4):495-497.
- 13] 阎维平,米翠丽. 富氧煤粉燃烧锅炉概念设计研究[J]. 热力 发电,2011,40(2):1-7.
- 14] Guo Junjun, Liu Zhaohui, Wang Peng, et al. Numerical investigation on oxy-combustion characteristicsof a 200 MWe tangentially fired boiler[J]. Fuel, 2015, 140;660-668.

上接第 79 页)

- [8] Thanh D B Nguyen, Young-II Lin, Won-Hyeon, et al. Experiment and CFD simulation of hybrid SNCR-SCR using urea solution in a pilot- scale reactor [J]. Computers and Chemical Engineering, 2010,34(10):1580-1589.
- [9] 董建勋,李辰飞,王松岭,等.还原剂分布均匀对 SCR 脱硝性能 影响的模拟研究[J].电站系统工程,2007,23(1):20-22.
- [10] 郭婷婷,刘汉强,杨勇平,等,基于数值模拟的1000 MW 燃煤 机组 SCR 脱硝系统设计[J]. 电站系统工程,2010,26(5): 61-64.
- [11] 毛剑宏,宋 浩,吴卫红,等.电站锅炉 SCR 脱硝系统导流板 的设计与优化[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(6): 1124-1129.
- [12] 毛剑宏,蒋新伟,钟 毅,等. 变截面倾斜烟道导流板对 AIG
 入口流场的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2011,45(8):
 1453-1457.
- [13] Cheng Junfeng, Zeng Hancai, Xiong Weili, *et al.* Research and test for reducing NO_x emission of a 300MW lean coal-fired boiler
 [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5):157–160.
- [14] Chen Lingshan, Zhang Weijiang. Simulation modeling and experiment to reduction of NO_x emission by using SCR control system
 [J]. Electric Information and Control Engineering, 2011, 13 (10):734-737.
- [15] Patankar, Suhas V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. Taylor and Francis Group, 1980:14-16.

84