



SCR 脱硝灵活性改造流场诊断及优化^{*}

叶兴联^{1,2} 张楚城^{2,3} 苏寅彪² 李立锋² 张浩¹ 安希忠¹

(1.东北大学 冶金学院,沈阳 110819;2.福建龙净环保股份有限公司实验研究中心,福建 龙岩 364000;

3 浙江大学 工程师学院,杭州 310000)

摘要:燃煤电站长期处于低负荷运行时,会导致脱硝入口温度达不到催化剂允许的最低喷氨温度,从而无法正常脱硝。因此,需要对脱硝装置进行灵活性改造来提高脱硝入口烟温,其中,采用增加省煤器旁路烟道是常见的技术路线。以某 660 MW 燃煤机组脱硝灵活性改造工程为研究对象,采用数值模拟方法对优化前脱硝设备的流场进行诊断,从流场的角度分析了脱硝效率低、催化剂堵塞磨损、空预器堵塞磨损、氨逃逸严重等问题的原因,并提出了优化设计方案。数值对比结果表明,优化后脱硝催化剂和空预器入口流场均匀性得到了明显的改善;温度偏差缩小,最低温度得到了明显的提升;物理试验结果验证了优化设计方案的可靠性;优化改造经实际投运后,效率稳定。流场诊断及优化可为燃煤电厂灵活性脱硝改造的流场设计提供参考。

关键词:灵活性改造;流场;数值模拟;优化;催化剂;磨损

DIAGNOSTIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF FLEXIBLE RECONSTRUCTION OF SCR REACTOR FLOW FIELD DENITRATION

Ye Xinglian^{1,2} Zhang Chucheng^{2,3} Su Yinbiao² Li Lifeng² Zhang Hao¹ An Xizhong¹

(1. Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Fujian Longking Co., Ltd, Longyan 364000, China;

3. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: When the coal power plant is operating at a low load for a long time, the inlet temperature of the SCR reactor cannot reach the minimum reaction temperature allowed by the catalyst. Thus the denitration cannot be properly conducted. In this case, the denitration device needs to be modified to improve the temperature of the SCR catalyst inlet, where the addition of the economizer bypass is a normally applied technical route. Taking a 660MW coal-fired unit denitration flexibility reconstruction project as a research object, the flow field of the original SCR reactor by numerical simulation was diagnosed. The reasons of low denitration efficiency, catalyst blockage or attrition, air preheater clogging or attrition, as well as large amount of ammonia escape were analyzed, and corresponding optimized design scheme was proposed. The results showed that after optimization, the flow field uniformity of the catalyst inlet and the air preheater inlet was improved obviously. The temperature deviation of the catalyst inlet was reduced, and the minimum temperature was largely improved. The physical results verified the reliability of the optimized design scheme. In this paper, the diagnostic analysis and optimization of flow field could be used as references for the design of the flexible SCR reactor of coal-fired power plants.

Keywords: flexible reconstruction; flow field; numerical simulation; optimization; catalyst; attrition

0 引言

选择性催化还原(SCR)脱硝技术是燃煤电厂最有效和工业应用上最广泛的脱硝技术^[1],我国大部分电厂都安装了选择性催化还原 SCR 脱硝设备。根

据 HJ 562—2010《火电厂烟气脱硝工程技术规范—选择性催化还原法》要求^[2],火电厂 SCR 脱硝系统应在锅炉最低稳燃负荷和锅炉最大连续蒸发量(BMCR)之间的任何工况连续安全运行。煤粉锅炉设计的最低稳燃负荷一般在 30%~40% BMCR,但当机组运行在 50% BMCR 以下时,经常会出现 SCR 反应器进口烟温低于催化剂最低投运温度的情况,有些

^{*} 国家重点研究计划(2016YFC0203703);龙岩市基础研究与青年人才计划(2017LY82)。



电厂在 50%BMCR 负荷以上时也会出现烟温偏低情况,导致脱硝系统效率下降,甚至退出运行,降低了脱硝系统的投运率^[3]。

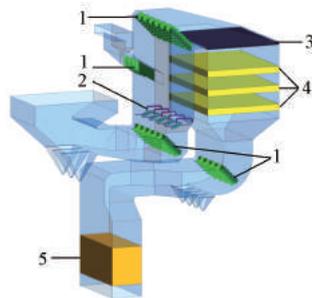
2015年6月,国家环保部对福建若干长期处于低负荷运行工况而无法正常运转投运脱硝系统的发电厂的复函中明确指出,火电机组要进行低负荷工况下投运脱硝改造,实现低负荷运行排放不超标。同时,随着环保电价政策的实施,低负荷停运脱硝系统的电厂不但面临拿不到脱硝电价的风险,而且存在 NO_x 排放日均值超标后缴纳巨额罚款的问题。如何在低负荷下保持脱硝系统的稳定运行,是许多电厂目前面临的问题^[4]。

目前提高 SCR 反应器入口烟气温度的技术方法主要包括高温烟气旁路加热、省煤器分段布置、旁路部分省煤器给水和提高给水温度等^[2,5]。其中,烟气旁路改造技术具有烟温调节范围广、运行控制方法简单的优点,在电厂逐渐得到应用。其主要原理是在烟气侧设置旁路,在低负荷时部分高温烟气通过旁路,通过调节旁路烟气挡板的开度来控制旁路烟气与主路烟气的混合比例,进而达到调节反应器入口烟温的目的。但是,在烟气旁路改造后的实际运行中,经常出现脱硝入口烟温偏差很大,旁路烟道布置方式和烟气混合换热方面仍有改进空间^[6]。SCR 脱硝系统内烟气流场的均匀分布是实现超低排放改造,达到机组安全高效运行的关键^[7-8]。而目前关于脱硝装置内部流场的研究大多关注导流板^[9-12]、喷氨混合^[13-17]、催化剂^[18-23]、预除尘^[24-26]及系统优化^[27-34]等方面,鲜有考虑烟气旁路投运的情况。对此,本文将结合某 660 MW 机组烟气脱硝超低排放改造工程,运用数值模拟技术,从流场诊断分析角度入手,提出烟气旁路烟道改造方案,并对优化前后的流场进行了对比分析,以为燃煤电厂灵活性脱硝改造的流场设计提供参考。

1 工程概况

某燃煤电厂 660 MW 机组 SCR 烟气脱硝系统如图 1 所示,该系统采用高尘型工艺,反应器布置在省煤器与空气预热器之间,锅炉设两台 SCR 脱硝反应器,沿锅炉中心线对称布置。

该电厂长期处于低负荷运行阶段(380 MW 及以下),脱硝入口温度达不到催化剂允许的最低喷氨温度导致脱硝无法投入运行,故对脱硝装置进行了提高脱硝入口烟温的改造,采用增加省煤器旁路烟道和受热面的改造方案。改造工程实施完成后投入运行,出



1—导流板;2—喷氨混合装置;3—整流格栅;
4—催化剂层;5—空预器。

图 1 改造前 SCR 脱硝反应器 CFD 模型图

现以下问题:1)脱硝出口 NO_x 含量偏差大,同时喷氨无法调平;2)沿烟道宽度方向烟气温度偏差大;3)催化剂磨损损坏严重;4)空预器堵塞速度快,并且局部换热元件磨损严重。

2 数学模型

本文基于 CFD (computational fluid dynamics) 软件构建 1:1 比例脱硝反应器流场计算模型,并开展数值模拟研究。CFD 模拟区域包括从省煤器出口水平烟道至空预器出口之间的流动空间,以及旁路烟道系统。其中,催化剂采用“2+1”模式布置,催化剂截面尺寸 12 m×15.6 m,省煤器出口截面尺寸 13.948 m×9.799 m,旁路烟道入口截面尺寸 1.3 m×8.52 m,喷氨区域截面尺寸 3.8 m×15.6 m,空预器入口截面尺寸为 4.915 m×12.88 m。计算参数的设置参照该电厂脱硝反应器入口的实际烟气工况条件,表 1 和表 2 分别给出了满负荷工况运行时和烟气旁路投运时某一工况(299 MW)的脱硝入口烟气参数。

表 1 满负荷工况运行时,脱硝入口烟气参数

项目	单位	实际燃用煤种	
烟气成分(标准状态,干基,实际 O ₂)	CO ₂	Vol%	17.62
	O ₂	Vol%	3.62
	N ₂	Vol%	79.91
	SO ₂	Vol%	0.24
	H ₂ O(标态,湿烟气)	Vol%	5.51
烟气参数(标准状态,干基,实际 O ₂)	烟气流速	Nm ³ /h	2 159 000
	烟气温度	℃	341
	烟气压力	Pa	-950
SCR 入口烟气中污染物成分(标准状态,干基,6% O ₂)	烟尘浓度	g/Nm ³	51.5
	NO _x (以 NO ₂ 计)	mg/Nm ³	500

脱硝烟气流动遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒方程,本文采用标准 k-ε 双方程湍流模型、SIMPLE 算法耦合压力-速度、组分输运模型模拟氨氮混合过程。假设烟气流动处于稳态,入口边界采用速度入口边界,速度值由工况烟气流量计算得到;出口边界采



表2 烟气旁路投运时,脱硝入口烟气参数

项目	单位	实际燃用煤种
机组负荷	MW	299
旁路烟气与主烟气	混合烟气流量	m ³ /h 2 355 228
混合后的参数	混合烟气温度	℃ 332
	混合烟气压力	Pa -423
	省煤器旁路	省煤器旁路烟气流量
烟气参数	烟气温度	℃ 409
烟气挡板开度	省煤器旁路关闭挡板	% 100
	省煤器出口主烟道调节挡板	% 40

用压力出口边界;催化剂层和空预器采用多孔介质模型,按实际运行阻力设置阻力系数;导流板、整流格栅、混合器等壁面均采用绝热固壁边界。

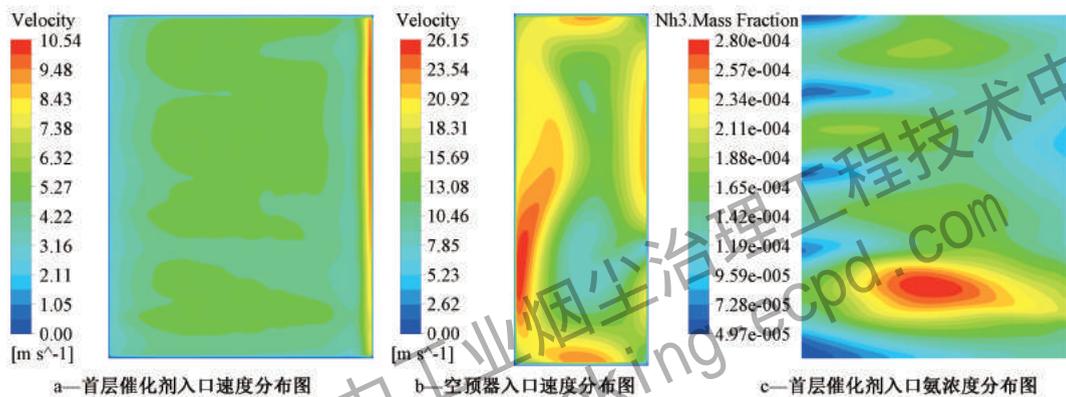


图2 改造前满负荷工况运行时模拟结果

由图2a可知,首层催化剂入口烟气流速分布不均匀,朝向锅炉一侧的近壁面区域存在低流速区,而远离锅炉一侧的近壁面区域流速很高,断面最大速度高达10.5 m/s,这是导致在刚投入运行很短的时间内就出现催化剂磨损损坏严重问题的主要原因。统计得到断面的速度分布相对标准偏差为18.8%,不能满足SCR脱硝反应器设计中首层催化剂入口烟气流速分布相对标准偏差<15%的技术要求^[35-36]。造成首层催化剂入口速度均匀性差的主要原因是顶部斜坡烟道未加装烟气导流装置,使得气流偏向远离锅炉一侧。

由图2b可知,由于在空预器入口的转弯和变径没有设计导流板,导致烟气流速分布不均匀,统计得到断面的速度分布相对标准偏差为25.9%,最大速度高达26 m/s,这是导致局部换热元件磨损严重的主要原因。

首层催化剂入口烟气氨浓度分布如图2c所示,数值模拟结果表明该区域氨浓度分布很不均匀,统计得到氨浓度分布相对标准偏差为25.9%,远超过相关的技术要求^[35-36]。这是导致脱硝出口处NO_x含量

3 优化前流场诊断分析

图1给出了优化前SCR脱硝反应器CFD模型。共布置3层催化剂,喷氨混合装置由5根喷氨管和5个圆盘混合器组成,氨气由喷氨管喷到圆盘上,烟道内转弯和变径区域设置了导流措施对流场进行调整,在催化剂上游设置了整流格栅。

3.1 满负荷工况运行时的流场

在前述模型及计算参数设定条件下开展了CFD模拟研究,得到改造前满负荷工况运行时脱硝反应器内的流场分布情况,如图2所示。

偏差较大的主要原因。同时,氨浓度分布不均匀将直接造成氨逃逸率大,在空预器内产生大量易黏附的液态硫酸氢铵,从而导致空预器堵塞速度加快。

3.2 烟气旁路投运时的流场

图3给出了改造前烟气旁路投运时脱硝反应器内的流场分布情况。由图3a可知,首层催化剂入口烟气流速分布不均匀,统计得到断面的速度分布相对标准偏差为26.2%,依旧不能满足<15%的技术要求。由图3b可知,旁路烟气流动紊乱无序,这会直接导致首层催化剂入口的氨浓度分布和温度分布不均匀,分别如图3c和图3d所示。统计得到首层催化剂入口氨浓度分布相对标准偏差为23.6%,氨浓度分布较差;首层催化剂入口温度偏差为-45.4~+35.0℃,最大温差为80.4℃,同时催化剂入口断面最低烟温只有286℃,这将加大催化剂低温失活的隐患。

4 优化后流场分析

4.1 优化方案

根据优化前流场诊断分析结果,以及超低排放要求,提出以下4个方面优化方案:1)催化剂的改造。将顶部烟道抬高3.5 m,增设1层催化剂,共布置

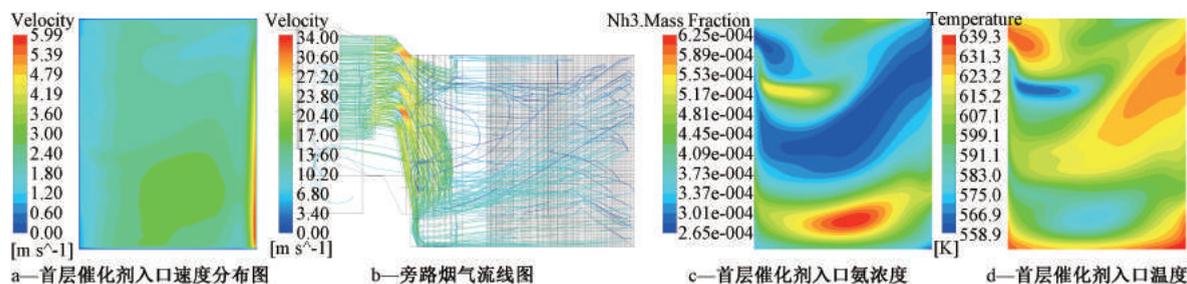
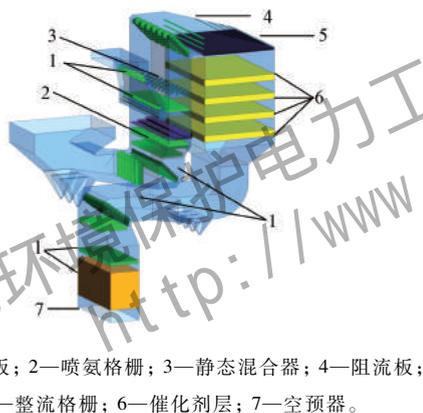


图3 改造前烟气旁路投运时模拟结果

4层催化剂。2)烟气旁路烟道的改造。针对原有旁路烟道结构的不合理设计,将旁路烟道改造为13个600 mm×1600 mm的小通道接入主烟道。3)喷氨装置的优化改造。将喷氨装置改造为“3×7”排列的喷氨格栅,每支喷氨支管设置12个小喷嘴,共252个小喷嘴。4)导流装置的优化改造。在喷氨格栅前变径烟道设置导流板、在顶部斜坡设置导流板和阻流板、在喷氨格栅后设置圆盘混合器、在空预器前设置导流板。优化后SCR脱硝反应器CFD模型如图4所示。



1—导流板; 2—喷氨格栅; 3—静态混合器; 4—阻流板;
5—整流格栅; 6—催化剂层; 7—空预器。

图4 优化后SCR脱硝反应器CFD模型

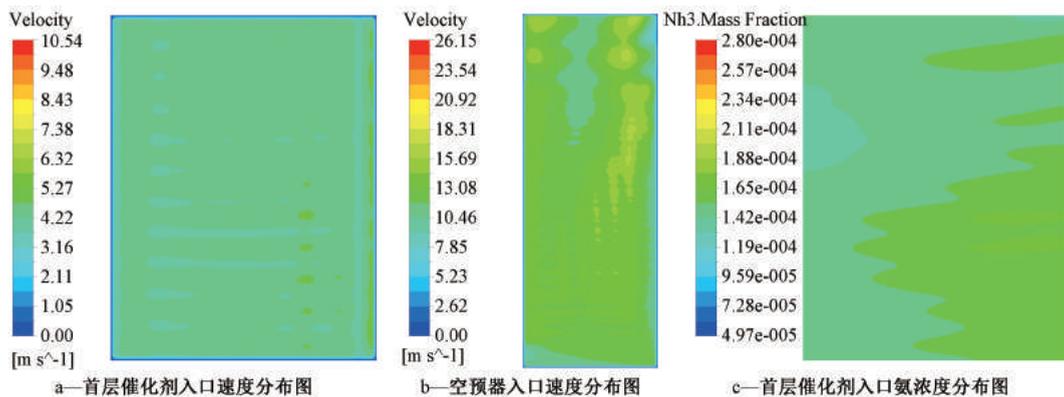


图5 优化后满负荷工况运行时模拟结果

4.2 优化后满负荷工况运行时的流场

4.2.1 数值模拟

图5给出了优化后满负荷工况运行时脱硝反应器内的流场分布数值模拟结果。由图5a可见,在顶部斜坡烟道加装导流板和阻流板后,首层催化剂入口断面无明显高/低速区,断面速度分布相对标准偏差由18.8%下降至5.2%,烟气流速分布均匀性大大改善,这有利于减轻催化剂的磨损。图5b表明,在空预器入口前加装导流板后,空预器入口断面最大速度由26 m/s下降至16 m/s,断面的速度分布相对标准偏差为由25.9%下降至9.8%,有利于减轻空预器换热元件的磨损,提高换热效果。对喷氨混合装置以及导流装置进行整改后,首层催化剂入口烟气氨浓度分布相对标准偏差由25.9%降至4.1%,这能够促进脱硝反应顺利进行,提高脱硝效率,减小氨逃逸率,同时也有利于减轻空预器的堵塞。

4.2.2 物模试验验证

为确保优化方案的可靠性,本文按优化后SCR脱硝反应器设计、搭建了1:12缩小比例的物理模型(图6)。实验采用常温空气模拟替代烟气,采用甲烷

作为氨气的示踪气体。实验过程中,采用日本加野A531智能风速仪测量各测试断面的速度大小,采用

日本新宇宙XP3160高灵敏度气体探测器测量CH₄浓度值。



图6 SCR脱硝装置物理模型试验

物模试验结果如表3所示。可以看出,首层催化剂入口速度分布、空预器入口速度分布和首层催化剂入口 CH_4 浓度分布均匀性良好,很好地验证了流场数值模拟优化方案的有效性。

表3 优化后满负荷工况运行时物理模拟试验结果

项目	物模试验	数值模拟
首层催化剂入口速度分布相对标准偏差	7.5%	5.2%
空预器入口速度分布相对标准偏差	11.4%	9.8%
首层催化剂入口 $\text{CH}_4(\text{NH}_3)$ 浓度分布相对标准偏差	4.5%	4.1%

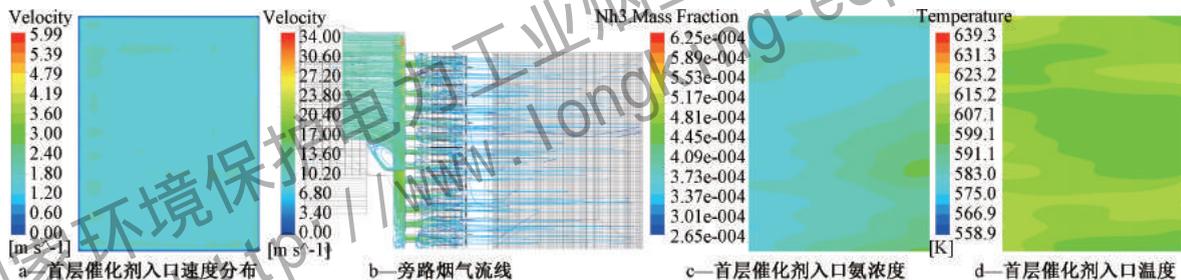


图7 优化后烟气旁路投运时模拟结果

塞等问题,达到了全负荷脱硝和超低排放改造目的。

6 结论

本文以某660 MW燃煤机组脱硝灵活性改造工程为研究对象,采用数值模拟方法对优化前脱硝设备的流场进行了诊断,从流场的角度分析了脱硝效率低、催化剂堵塞磨损、空预器堵塞磨损、氨逃逸严重等问题原因,并提出了优化设计方案,结论如下:

1)通过对优化前设备流场进行诊断发现存在催化剂入口速度和浓度分布均匀性较差、温度偏差大、部分区域在反应温度窗口以下和空预器入口速度分布不均匀等问题,是导致脱硝效率低、催化剂和空预器磨损与堵塞等现象的主要原因。

2)导流板、喷氨格栅、混合器及整流格栅的合理设计对于改善脱硝系统的速度分布和浓度分布均匀性具有积极的意义。

4.3 优化后旁路投运时的流场

图7给出了优化后烟气旁路投运时脱硝反应器内的流场分布情况。由图7a可知,首层催化剂入口烟气流速分布均匀,断面速度分布相对标准偏差由26.2%下降至4.7%;由图7b可知,对旁路烟道进行改造后,旁路烟气有序、稳定流动,这有利于氨浓度分布和温度分布均匀。图7c表明,首层催化剂入口氨浓度分布相对标准偏差由23.6%下降至4.9%,满足技术要求;图7d的结果显示,首层催化剂入口温度分布偏差为 $-7.4\sim+7.7\text{ }^\circ\text{C}$,最大温差由 $80.4\text{ }^\circ\text{C}$ 下降至 $15.1\text{ }^\circ\text{C}$,同时催化剂入口断面最低烟温由 $286\text{ }^\circ\text{C}$ 上升至 $325\text{ }^\circ\text{C}$,这一方面有利于提高脱硝效率,另一方面也消除了催化剂低温失活的隐患。

5 改造后现场运行情况

SCR脱硝装置的优化改造完成后投入运行,运行结果显示 NO_x 排放浓度稳定在 $20\sim 40\text{ mg/m}^3$,氨逃逸量稳定在 $1.5\sim 2.5\times 10^{-6}$,脱硝效率为92%~96%,无明显催化剂磨损、空预器换热元件磨损和空预器堵

3)旁路烟道的合理引入和混合器的合理布置对于低负荷条件下温度场能否达到理想状态起到了关键的作用。

4)物理模型试验表明数值模拟技术能够较准确地得到SCR脱硝装置内部的流场分布状态,为脱硝工程设计、改造提供参照。

5)烟气旁路投运时,脱硝反应器内部的温度场分布与旁路烟道设计密切相关,合理的旁路烟道设计使得催化剂入口温度分布均匀,且能够保证速度场、浓度场仍然满足技术要求,能够消除或减轻因旁路烟气投运而造成的催化剂积灰、磨损及失活等问题。

6)经实际运行表明,通过流场优化改造,喷氨无法调平、温度偏差大、催化剂磨损、空预器堵塞以及换热元件磨损等问题都得以解决,达到了脱硝装置全负荷工况高效、稳定运行的改造目的。



7)关于流场的诊断分析和优化对燃煤电厂灵活性脱硝改造的流场设计具有参考。

参考文献

- [1] 黄庆华, 宋丽云, 何洪. 一种 SCR 脱硝装置喷氨混合系统的结构优化设计[J]. 环境工程, 2016, 34(5): 59-64.
- [2] HJ 562—2010 火电厂烟气脱硝工程技术规范: 选择性催化还原法[S].
- [3] 谢尉扬. 提高 SCR 反应器入口烟气温度的技术方法[J]. 中国电力, 2015, 48(4): 36-39.
- [4] 何凯, 耿得标, 陶丽, 等. 超临界火电机组全负荷脱硝技术改造的探讨[C]. 2016 清洁高效燃煤发电技术交流研讨会论文集. 合肥: 中国节能协会热电产业联盟, 2016, 386-393.
- [5] 杨青山, 廖永进. 降低 SCR 脱硝装置最低投运负荷的策略研究[J]. 中国电力, 2014, 47(9): 153-155.
- [6] 王敦敦, 刘峰, 陈珣, 等. 电站锅炉 SCR 脱硝旁路烟道改造数值模拟及应用[J]. 湖南电力, 2016, 36(5): 51-53.
- [7] 西安热工研究院. 火电厂 SCR 烟气脱硝技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [8] Wang S J, Zhu P, Zhang G. Numerical simulation research of flow field in ammonia-based wet flue gas desulfurization tower [J]. Journal of the Energy Institute, 2015, 88(3): 284-291.
- [9] 李岩, 密腾阁, 王舫. SCR 法烟气脱硝系统导/混流结构优化数值模拟[J]. 中国环保产业, 2017(11): 58-64.
- [10] 李德波, 徐齐胜, 廖永进, 等. SCR 脱硝系统导流板优化数值模拟[J]. 广东电力, 2014, 27(7): 1-5.
- [11] 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, 35(6): 481-488.
- [12] 陆华伟, 周强强, 阚晓旭, 等. 导流板影响 SCR 脱硝烟道气动性能数值研究[J]. 节能技术, 2018(1): 7-11.
- [13] 李壮扬, 苏乐春, 宋子健, 等. 660 MW 燃煤机组 SCR 流场模拟优化与喷氨优化运行[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(4): 47-52.
- [14] 孙虹, 华伟, 黄治军, 等. 基于 CFD 建模的 1000 MW 电站锅炉 SCR 脱硝系统喷氨策略优化[J]. 动力工程学报, 2016(10): 810-815.
- [15] 林静仁, 刘国富, 沈德魁, 等. 基于 CFD 模拟方法的 SCR 系统喷氨优化研究[J]. 环境科学与技术, 2016(增刊2): 313-316.
- [16] 赵大周, 李允超, 郑文广, 等. 氨氮比分布不均对 SCR 脱硝反应影响的模拟研究[J]. 电站系统工程, 2017, 33(3): 14-16.
- [17] 刘国富, 沈德魁, 肖睿. 基于流场诊断的燃煤电站 SCR 系统喷氨优化及试验验证[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 98-106.
- [18] 何文深, 陈建军, 郑佐东. SCR 蜂窝式脱硝催化剂抗磨损性能研究[J]. 电力科技与环保, 2011, 27(5): 10-12.
- [19] 沈伯雄, 赵宁, 刘亭. 烟气脱硝选择性催化还原催化剂反应模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(8): 31-37.
- [20] Tanno K, Kurose R, Michioka T, et al. Direct numerical simulation of flow and surface reaction in de-NO_x, catalyst [J]. Advanced Powder Technology, 2013, 24(5): 879-885.
- [21] 雷嗣远, 孔凡海, 王乐乐, 等. 燃煤电厂 SCR 脱硝催化剂磨损诊断及对策研究[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 158-163.
- [22] 安敬学, 王磊, 秦洪, 等. 电站锅炉脱硝系统催化剂磨损数值模拟[J]. 锅炉技术, 2016(2): 32-38.
- [23] 徐秀林, 吴卫红, 柳东海, 等. SCR 蜂窝状脱硝催化剂磨损数值模拟研究[J]. 应用化工, 2015(6): 986-990.
- [24] 金理鹏, 谢新华, 黄飞, 等. SCR 脱硝装置大颗粒灰拦截技术试验研究[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 156-161.
- [25] 陈鸿伟, 罗敏, 李岩, 等. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝系统拦截滤网磨损与流动阻力实验研究[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 70-76.
- [26] 汪洋, 胡永锋. 燃煤电站选择性催化还原脱硝系统预防大颗粒灰堵塞的方法[J]. 华电技术, 2013, 35(2): 66-72.
- [27] 杜云贵, 余宇, 吴其荣, 等. 烟气脱硝系统流场模拟与实验研究[J]. 环境工程, 2009(增刊1): 255-257.
- [28] Ye X L, Yang D. Application of the flow simulation for the optimization analysis of SCR DeNO_x system of coal power plant [C]. XU Qunjie. Progress in Environmental Science and Engineering Part 2. China: Trans Tech Publications, 2013: 1533-1539.
- [29] 吴学智, 鞠付栋, 聂会建, 等. 基于 CFD 的 SCR 脱硝装置内构件的优化设计研究[J]. 环境工程, 2014, 32(S1): 415-418, 577.
- [30] Xu Y, Zhang Y, Liu F, et al. CFD analysis on the catalyst layer breakage failure of an SCR-DeNO_x system for a 350MW coal-fired power plant [J]. Computers & Chemical Engineering, 2014, 69: 119-127.
- [31] Ye X L. Research and application of multi-dimension numerical simulation optimization for SCR DeNO_x flow fields [A]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 113 (Part III) [C]. IOP Publishing, 2018.
- [32] 程智海, 翟永强, 于江. 600 MW 燃煤机组多变截面 SCR 脱硝系统流场及喷氨优化[J]. 环境工程, 2017, 35(10): 95-99.
- [33] 杨丁, 郭俊, 叶兴联, 等. 深度脱硝流场优化工程案例分析报告[C]. 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷). 厦门: 中国环境科学学会, 2017.
- [34] 孟文字, 魏绍青, 王菁, 等. 330 MW 燃煤发电机组 SCR 脱硝系统催化剂磨损原因分析[J]. 锅炉技术, 2018(1): 10-16.
- [35] JB/T 12131—2015 燃煤烟气净化 SCR 脱硝流场模拟试验技术规范[S].
- [36] DL/T 1418—2015 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝流场模拟技术规范[S].

第一作者: 叶兴联(1984-), 男, 博士, 主要研究方向为烟气污染防治技术. yexinglian1228@163.com

通信作者: 张楚城。