

大型燃煤电厂SCR脱硝系统流场优化 数值模拟技术研究

● 李德波 广东电科院能源技术有限责任公司 广州 510060 ldbyx@126.com

摘要：

某电厂1号锅炉SCR脱硝系统出口NO_x浓度分布严重不均匀，氨逃逸高导致空气预热器硫酸氢氨沉积和堵塞，影响机组安全稳定运行。开展了流场优化技术改造，在流场优化改造前后分别进行了脱硝系统入口流场测量，同时开展了改造后脱硝系统进出口NO_x浓度和氨逃逸量测量，为准确评估流场优化改造技术效果提供了重要的依据。研究结果表明：流场优化改造后脱硝入口流场均匀性得到显著提高；经过5轮优化高负荷下（CDAFB磨），A反应器出口NO_x分布CV降低到了19.34%，B反应器降低到32.25%。

关键词：超(超)临界，燃烧调整，变氧量，变燃尽风

引言

目前大型燃煤电厂脱硝系统采用选择性催化还原法（SCR）。通过现场大量的工程应用实践发现，SCR法脱硝系统存在脱硝系统出口NO_x浓度分布不均匀，氨逃逸量高等技术问题，造成空气预热器硫酸氢氨沉积，导致空气预热器堵塞被迫停机，严重影响机组安全稳定运行。因此开展SCR脱硝系统现场流场优化和喷氨格栅调整、CEMS在线测量仪表完善等综合技术手段是保障脱硝系统安全、稳定运行的关键技术。

国内一些研究者开展了相关的研究工作。陈磊等^[1]开展了燃煤电厂SCR脱硝系统运行存在关键技术问题研究与技术展望。研究者针对40台燃煤电厂SCR脱硝系统运行情况进行了现场调研，提出建议：定期开展喷氨格栅调整试验，降低反应器出口NO_x浓度不均匀性；开展给予计算流体力学SCR系统流场优化数值模拟，解决流场不均匀的问题；加强SCR脱硝系统热工控制算法研究，提高变负荷过程的控制能力，避免反应器出口NO_x浓度过低。李德波等^[2]开展了四角切圆锅炉变CCOFA与SOFA配比下燃烧特性数值模拟，通过改变CCOFA与SOFA风配风比例，从而降低炉膛出口NO_x浓度，减轻SCR脱硝系统脱除的压力。陈前明等^[3]开展了墙式分离燃尽风对660MW切

圆燃烧锅炉烟温偏差影响的数值模拟研究，通过数值模拟分析了切圆燃烧锅炉烟温偏差的原因，找出了解决烟温偏差的具体技术措施。廖永进等^[4]进行了SCR脱硝系统催化剂性能预测方法研究，研究者根据现场实际脱硝系统运行数据，结合实验室催化剂活性测量，提出了SCR脱硝系统催化剂性能预测，相比传统的仅仅依靠实验室催化剂预测数据，预测结果更加反映现场实际情况。李德波等^[5]进行了SCR脱硝系统喷氨格栅调整试验关键问题探究，研究者通过现场实际SCR脱硝系统喷氨格栅调整试验，提出了现场喷氨格栅调整试验方法。国内研究者^[6-14]对脱硝系统现场优化技术进行了大量研究工作，取得了较好的工程应用效果。李德波等^[6]开展了600MW电站锅炉SCR脱硝系统全负荷投运改造方案研究，研究者通过省煤器分级技术改造，提高了SCR脱硝系统低负荷下进口烟气温度，从而使得脱硝系统满足投运要求，提高SCR脱硝系统投运率，具有较好的环保价值。郭义杰等^[13]开展了100MW燃煤锅炉硫酸氢铵堵塞空气预热器原因分析及应对措施，提出了现场优化运行的方式。王乐乐等^[15]进行了SCR脱硝催化剂低负荷运行评估技术研究。研究者通过分析影响MOT的因素，提出了MOT的可变性以及根据SCR脱硝系统实际运行烟气参数科学评估MOT的重要性。于玉真等^[16]开

展了SCR脱硝系统流道均流装置数值模拟与优化技术研究。研究者采用ANSYS FLUENT软件对流动情况进行了数值模拟, 研究表明: 多孔板开孔率对AIG上游速度均匀性影响最大, 整流格栅间距对第1层催化剂入口速度均匀性影响最大。在优化方案下, AIG上游相对标准偏差值为3.94%, 第1层催化剂入口相对标准偏差值为4.33%。国内研究者在燃煤电厂超低排放技术路线等方面开展了相关的研究工作。

本文针对某电厂1号锅炉SCR脱硝系统出口NO_x浓度分布严重不均匀, 氨逃逸高导致空气预热器硫酸氢氨沉积和堵塞, 影响机组安全稳定运行。针对脱硝入口流场分布不均匀, 开展了脱硝入口流场优化技术改造, 主要目的是提高脱硝系统入口流场均匀性, 从而保证反应器出口NO_x浓度分布均匀性。在流场优化改造前后分别进行了脱硝系统入口流场测量, 同时开展了改造后脱硝系统进出口NO_x浓度和氨逃逸量测量, 为准确评估流场优化改造技术效果提供了重要的依据。

1. 锅炉及脱硝系统设备介绍

某电厂1、2、3号机组为3×210MW锅炉, 采用四角切圆燃烧方式。锅炉详细信息见表1。

表1 锅炉参数表

序号	项 目	单位	最大工况
1	锅炉蒸发量	t/h	670
2	经济蒸发量	t/h	610
3	再热蒸汽出口流量	t/h	573
4	锅炉排烟温度		150
5	锅炉计算效率(低位热值计)	%	90.19
6	空气预热器型式		二分仓回转式

表2 计算边界条件

参数	N ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	NO _x	NH ₃	温度	流速 (m/s)
烟气入口	70.5%	22.5%	3.8%	3.1%	1%	0	633K	16
喷氨入口	73%	0	0	20%	0	7%	300K	15

为了简化计算, 需要对几何模型进行分块划分, SCR脱硝系统总共被划分成14个区域。网格种类繁多, 主要有结构化网格和非结构化网格。对于形状规则的烟道、催化剂层等区域采用前者, 而喷氨格栅和整流板等复杂区域采用后者。并且为了提高计算的准确性, 在喷氨格栅、导流板和整流格栅处进行局部网格加密。划分过程中对网格逐步细化得

作为燃煤锅炉中最重要的环保系统之一, SCR烟气脱硝过程是非常复杂的, 不仅涉及到脱硝烟道、喷氨结构及导流板的优化设计。还包括烟气与氨在烟道内和催化剂层内的流动、传热、多组分运输及化学反应(气相反应和表面反应), 以及燃煤产生的飞灰在烟道内的分布和对烟道及导流板的磨损。

2. 数学模型介绍

2.1 假设简化

本文将利用Gambit建模搭建SCR脱硝系统, 然后利用Fluent完成模拟, 使用k-epsilon湍流模型(简称k-模型)对:a、烟气及飞灰在SCR烟道内的流动进行模拟计算;b、由喷氨格栅喷出的氨在烟道内以及催化剂反应器内的流动进行模拟计算。

由于烟道尺寸, 模拟条件的因素, 在进行模型搭建之前先对实际的SCR反应过程做出以下近似的假设:

在实际的SCR脱硝系统中, 进出口的温度变化较小, 因此在计算时假设整个系统为绝热系统;

在反应器的上游部分(即SCR反应系统倒U型上升阶段), 烟气中各个组分不发生化学反应;

流动为定常流动, 且系统内流体物性参数均为常数;

烟气中各个组分及氨均为理想气体, 且在模拟过程中不考虑SCR烟道内的漏风;

将三层催化剂均设置为多孔介质区域, 以考虑催化剂层的阻力及多孔特性。

2.2 模型介绍

本文利用GAMBIT建立三维几何模型, 依据SCR脱硝反应系统的实际尺寸来绘制。根据电厂实际运行情况设置边界条件如表4-2所示:

到近似无关解, 最终计算网格数为290多万。

2.3 评价标准

评判脱硝效率高低的的关键取决于首层催化剂入口截面速度以及氨气浓度分布的均匀性。工程项目常用相对标准偏差C_v来评价某截面参数的均匀性, C_v的计算公式如下所示:

$$Cv = S/\bar{v} \times 100\% \quad (1)$$

$$S = (\sum(v_i - \bar{v})^2 / (n-1))^{1/2} \quad (2)$$

相对标准偏差Cv值越小代表速度及浓度分布越均匀，有益于脱硝反应的进行。SCR反应器速度场、氨气浓度场及压力场的设计标准如下表3所示。

表2 烟气定量析标准

定量指标	要求
AIG下游截面流速偏差	< 15%
首层催化剂入口截面烟气流速偏差	< 15%

3. 流场优化结果分析与讨论

3.1 未优化流场模拟

该厂采用选择性催化还原法（SCR）脱硝装置，烟气由省煤器出口进入脱硝系统，经下方水平烟道、涡流混合器、上转弯处导流板、三角区域、整流格栅到达SCR脱硝塔。其中原始导流板布置形式如图4-1所示（x正方向即前墙向后墙方向）。

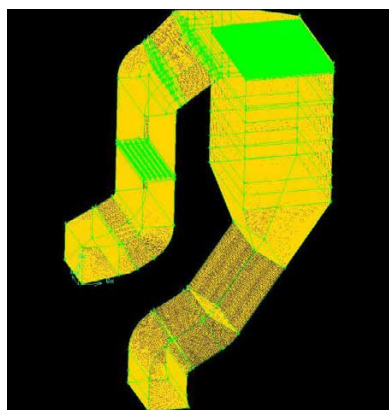


图1 优化前烟道示意图

其中喷氨格栅布置如图2所示，在烟道内深度方向共布置喷氨孔244个，孔径为0.05m。脱硝反应器有三层催化基层（其中第三层为备用层），为了使流入催化剂层的烟气更加均匀，在首层催化剂上层设有整流板。

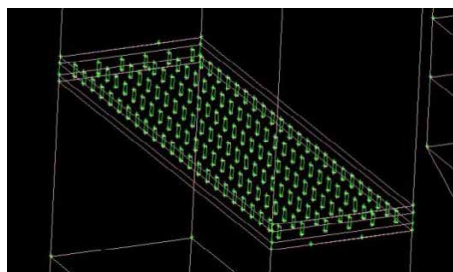
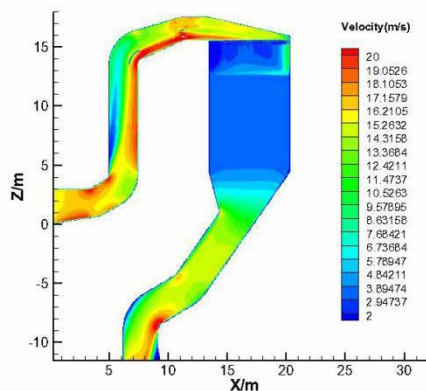


图2 喷氨格栅布置示意图

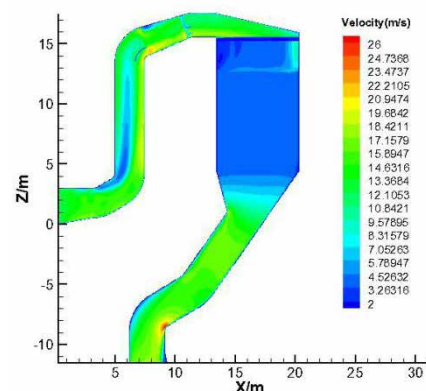
对SCR反应器进行流场模拟研究，采用湍流流动，催化剂层结构采用多孔介质模型，烟气主流方向黏性阻力和惯性阻力设置较大，另外两个方向设置较小，孔隙率设置为0.9，同时做出以下不影响

计算精度的简化：烟气为单相气体，连续介质，脱硝入口界面烟气流速及组分分布均匀。模型网格划分采用分区划分网格法，为了兼顾计算量和网格的合理性，总网格数约为290万。

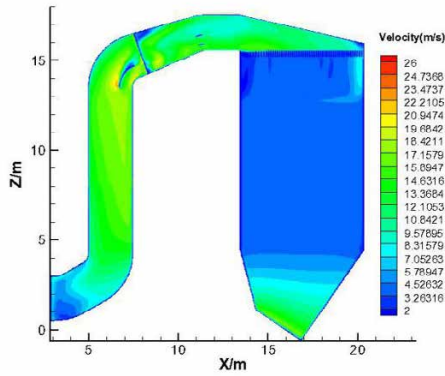
如图3所示为烟道内不同宽度方向上的烟气流速变化云图（y方向即锅炉宽度方向）。从速度云图可以看出：来流烟气通过下水平烟道进入SCR反应器后，在反应器右侧均形成了一个低速区。由图3可知：烟气由水平烟道进入SCR反应器后，由于水平烟道末端直角转弯的阻挡作用，烟气在自身惯性作用下绝大部分从反应器左侧通过，而在右侧烟气流量很小，相应压力也较小，导致左侧的烟气中一部分回流到右侧低压区同时产生一个涡流，使得反应器右侧出现一个低速区。



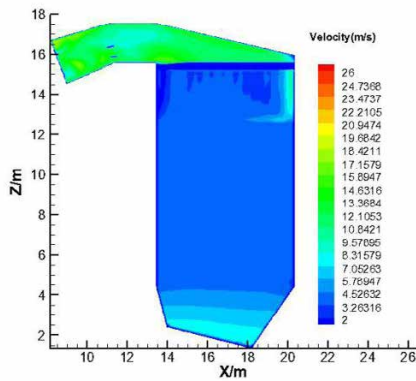
(a) y=2.5m



(b) y=5m



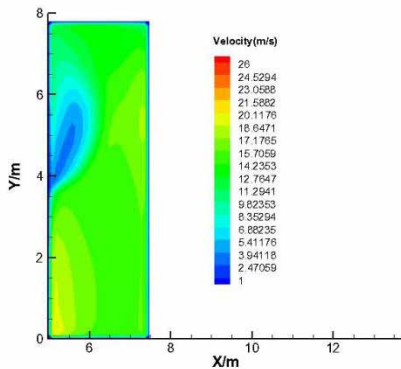
(c)y=7.5m



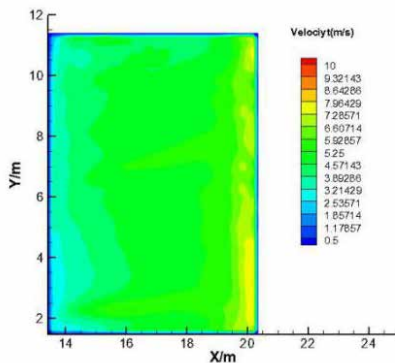
(d)y=9m

图3 优化前烟道流场分布

如图4所示为烟道内喷氨格栅前及首层催化剂入口处的烟气流速变化云图。



AIG下游速度云图



首层催化剂前速度云图

图4 优化前截面流场分布

计算分析优化前烟道各截面速度分布可知：加装导流板后喷氨前截面速度偏差为23.3%；首层催化剂入口截面烟气速度偏差为18.6%，高于常规定量分析标准偏差（15%），烟气速度分布均匀性差。

3.2 优化后流场模拟

烟道内导流板的布置方式将会直接影响流场的分布状况，进而影响SCR首层催化剂入口烟气速度。布置较多的导流板在SCR烟道内，烟气流速会降低，烟气与催化剂的接触及反应时间增长，有利于气体的扩散、吸附和产物气体的扩散，从而提高脱硝效率；但是导流板偏多时，烟气与催化剂接触时间过长，发生NOx氧化反应，反而降低脱硝效率，且导流板数目增加时压损增加，使引风机的能耗增加。因此，根据现场运行经验及流体理论知识，分别在喷氨前烟道内弯道处设置不同数量的导流板，使得流场优化效果最大化，优化后导流板布置如图5所示。

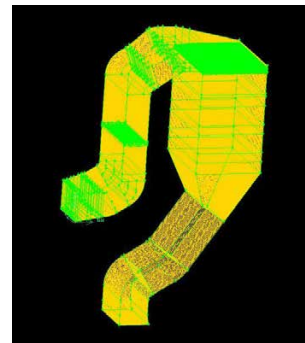
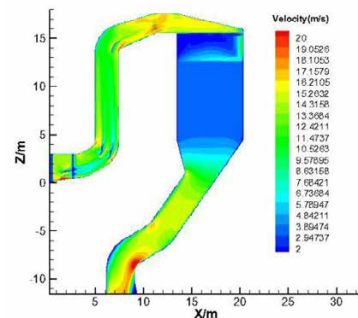
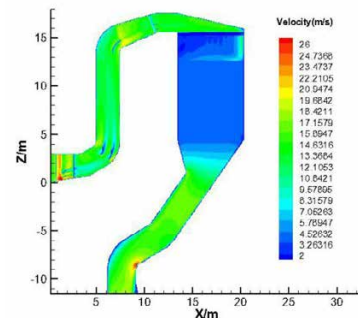


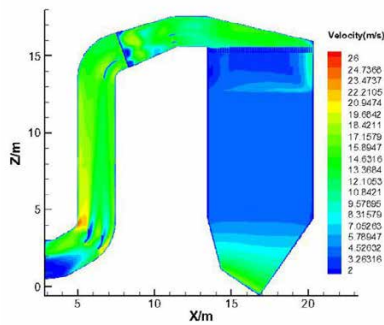
图5 优化后烟道示意图



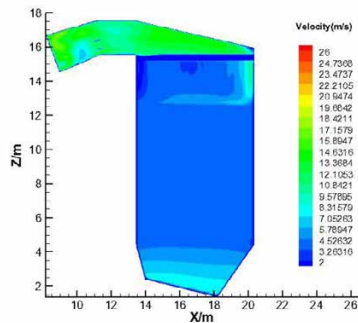
(a)y=2.5m



(b)y=5m



(c)y=7m

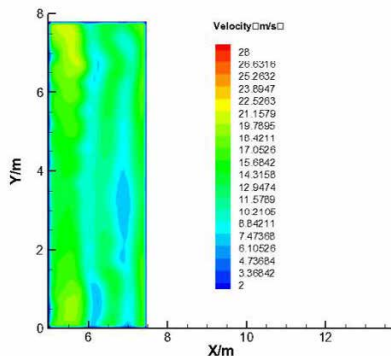


(d)y=9m

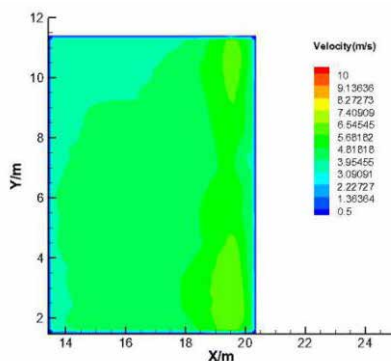
图6 优化后烟道流场分布

如图6所示为烟道内不同宽度方向上的烟气流速变化云图（y方向即锅炉宽度方向）。

如图7所示为烟道内喷氨格栅前的烟气流速变化云图。



AIG下游速度云图

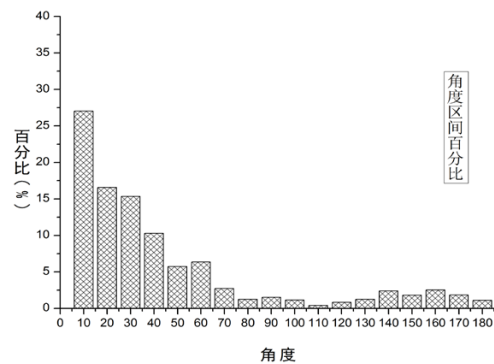


首层催化剂前速度云图

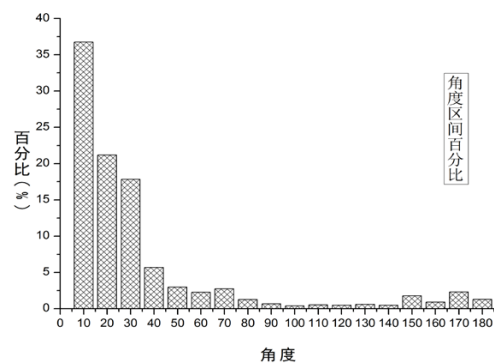
图7 优化前后喷氨格栅前流场分布

由喷氨格栅前的烟气流速变化云图可知，通过布置导流板可以：1、减少烟道内前墙壁面上的速度边界层的影响，布置导流板后速度边界层的影响区域减小，只在尖角处存在较小的回流区域；2、布置导流板后整个截面速度偏差减小，流速更加均匀。分析优化前后喷氨前截面入口速度分布可知：加装导流板后喷氨前截面速度偏差由23.3%降至12.7%，烟气速度分布更加均匀。对比优化前后首层催化剂入口流场分布图可以看出：加装导流板引导弧形板后烟气的流动方向，减小烟气回流作用，使得烟气进入上层催化剂层时更加均匀。同时，首层催化剂入口截面烟气速度偏差由18.6%降至9.7%，优化后烟气均匀性更佳。对比优化前后首层催化剂入口流场分布图可以看出：加装导流板引导弧形板后烟气的流动方向，减小烟气回流作用，使得烟气进入上层催化剂层时更加均匀。

计算得出优化前后催化剂上方烟气入射角度分布如图8所示。



优化前入射角度分布



优化后入射角度分布

图8 优化前后入射角度分布

优化前催化剂上方速度入射角分布范围很广从0°到180°都存在，其中在10°范围内的入射烟气由优化前的27.03%升至36.73%，且烟气偏角处于90°以下的比例由86.7%升至91.3%，烟气整体回流降低。

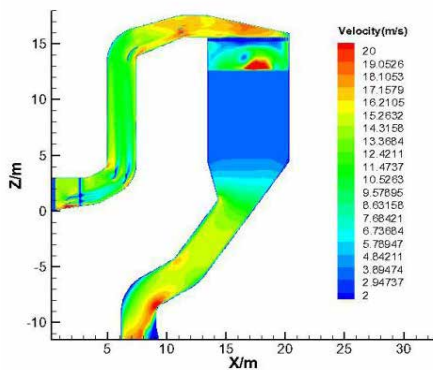
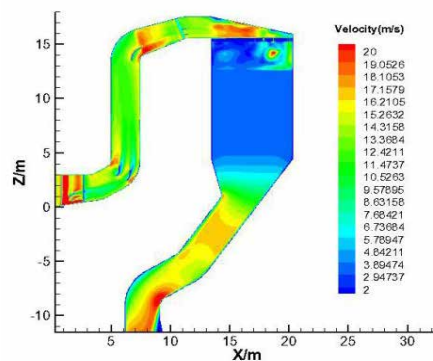
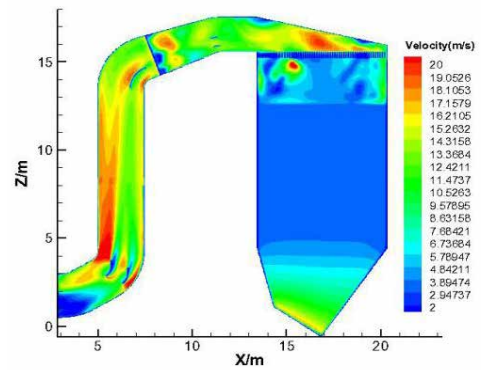
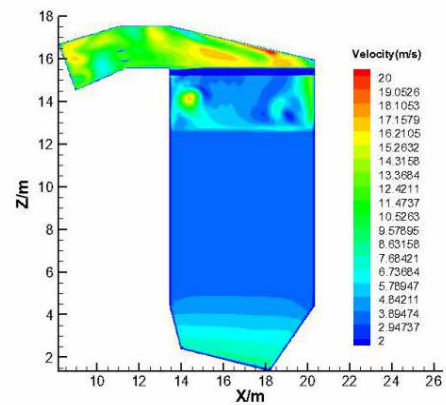
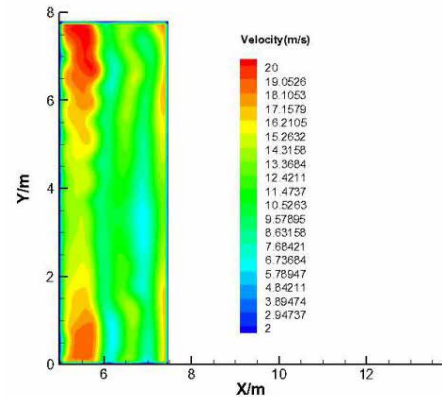
由此可以确定，弯道中加装导流板可以起到以下作用：1、在喷氨格栅前合理的布置导流板可以保

证喷氨格栅前截面烟气流速均匀性，避免了烟气速度偏差过大引起的喷氨不合理；2、合理的布置导流板可以改善弯道内的速度场，减小由于弯道处涡流和回流导致的磨损严重；3、合理的布置导流板可以保证进入首层催化剂的烟气流场均匀性，避免由于流场因素导致的脱硝效率偏低。由图4-3及图4-4对比可知，在喷氨前烟道内加装导流板可以很好的减少首个弯道带来的扰流，尤其是减小了倒U型烟道上升阶段烟气界面上的速度偏差，同时可以改善流场流经弯道时的分离现象，减小流体流经弯道时产生的二次流所带来的阻力，使得烟气在喷氨区与烟气更好地混合。

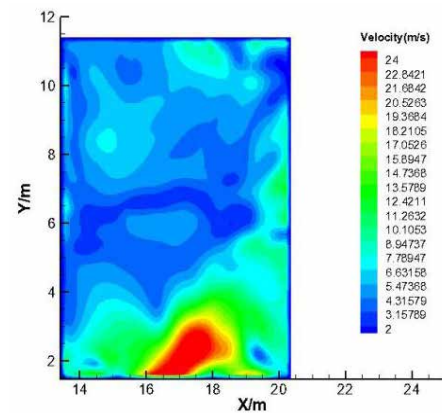
3.3 优化后流场飞灰磨损

煤燃烧过程中产生的飞灰颗粒的存在会对SCR系统流场产生一定影响，而流场的变化对飞灰颗粒运动和飞灰沉积也会产生影响。大量的飞灰颗粒在烟道内的运动撞击，会在催化剂表面产生沉积及搭桥现象，造成催化剂的磨损与堵塞等。加入离散相进行数值模拟，能得到飞灰颗粒在SCR烟道内的运动轨迹与浓度分布，预测SCR反应器内部的飞灰特性，有助于SCR脱硝系统的优化设计和运行。

如图9所示为引入离散相后 $Y=2.5\text{m}$ 、 $Y=5\text{m}$ 、 $Y=7\text{m}$ 、 $Y=9\text{m}$ 几个截面、喷氨格栅前截面以及首层催化剂入口截面上的速度云图。

(a) $y=2.5\text{m}$ (b) $y=5\text{m}$ (c) $y=7\text{m}$ (d) $y=9\text{m}$ 

AIG下游速度云图



首层催化剂前速度云图

图9 引入飞灰后的流场分布

结合未加入离散相之前烟道内流场分布云图可知:引入飞灰离散相之后烟道内(尤其是弯道处及导流板布置区域)出现大量的回流区,而回流区的存在又会引起飞灰对烟道的磨损增加。同时,引入飞灰离散相后,首层催化剂入口处速度均匀性下降,说明飞灰的存在对烟道内烟气流速分布有很大的影响。

如图10所示为SCR脱硝烟道内各个截面内飞灰浓度分布,首层催化剂上方飞灰浓度分布见图4-10中(e),(f)所示,图4-10(f)中x轴代表SCR脱硝塔催化剂层的横向间距(前墙与后墙间距),Y代表脱硝塔的纵向间距,各点代表当前位置飞灰浓度。由此可见,原模型中飞灰颗粒在流经SCR脱硝塔时,其主要分布于偏右侧烟道,此区域烟气流速较低,对飞灰携带作用相对较弱,同时,这里飞灰浓度很大,故在催化剂表层产生大量积灰。但是按总体烟道飞灰分布可看出优化后的烟道内飞灰分布合理,只有在弯道处、前后墙贴壁处以及阔口区域存在部分的飞灰沉积区,在实际运行中只要在以上部位设置吹灰装置即可减轻飞灰沉积及磨损问题。

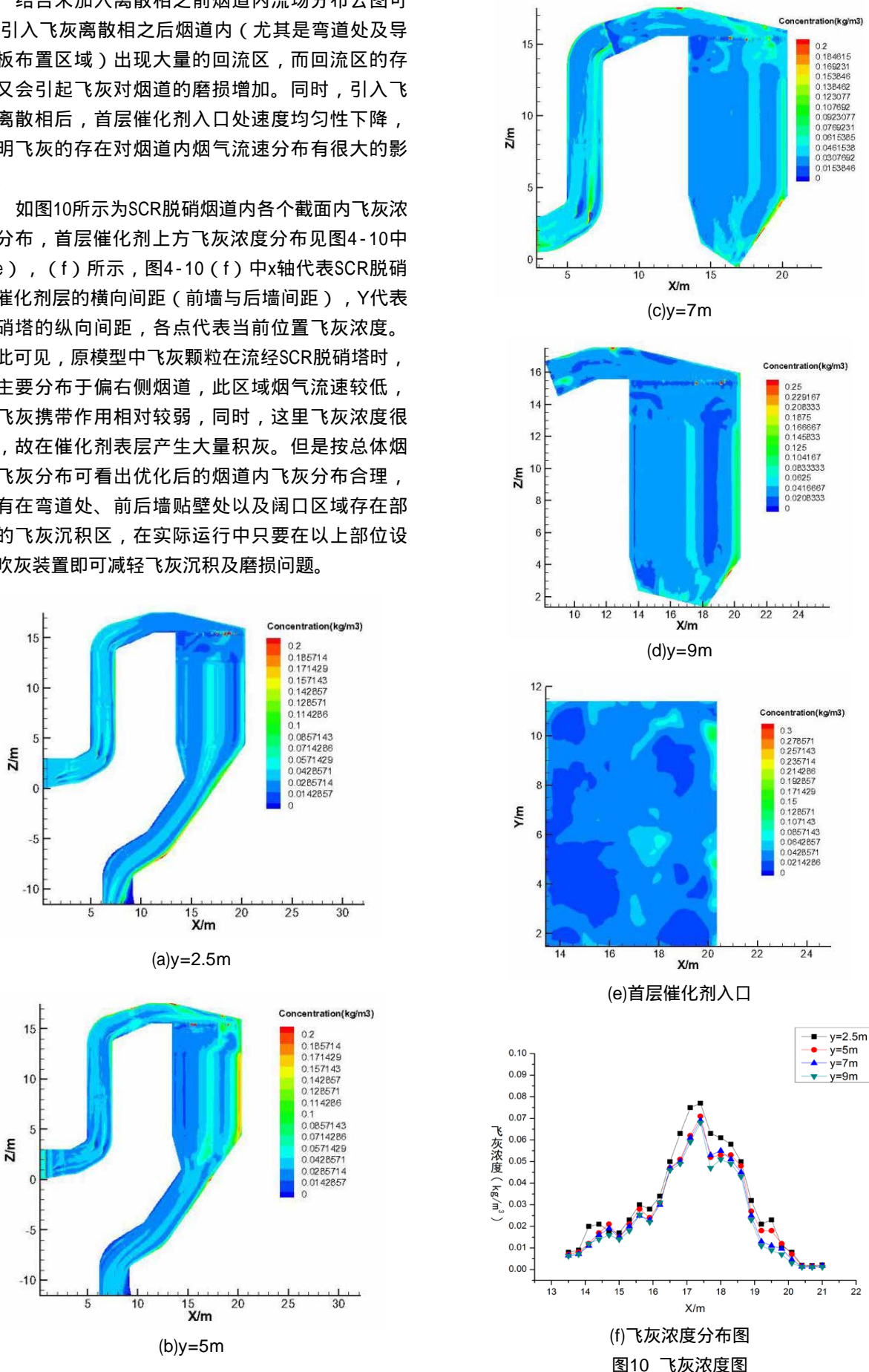


图10 飞灰浓度图

5. 结论

本文开展了脱硝入口流场优化技术改造，主要目的是提高脱硝系统入口流场均匀性，从而保证反应器出口NO_x浓度分布均匀性。在流场优化改造前后分别进行了脱硝系统入口流场测量，同时开展了改造后脱硝系统进出口NO_x浓度和氨逃逸量测量。主要结论如下：

(1) 流场优化改造前A、B侧的相对标准偏差分别为34%和31%，说明流场分布很不均匀；

(2) 流场优化改造后脱硝系统入口流场分布均

匀性得到很大程度的改善，尤其是在三个不同负荷下，反应器入口流速均匀性都比较好，这个充分说明流场均匀性改造是成功的；

(3) 经过5轮优化高负荷下(CDAFB磨)，A反应器出口NO_x分布CV降低到了19.34%，B反应器降低到32.25%。

本文系统研究成果，为我国同类型脱硝系统流场优化技术改造提供了重要的参考，具有十分重要的理论价值和工程应用效果。

参考文献：

- [1] 陈磊,李德波,周杰联等. 燃煤电厂SCR脱硝系统运行存在关键技术问题研究与技术展望[J]. 浙江电力, 2018, 37(10): 87 - 90.
- [2] 李德波, 李方勇, 许凯, 等. 四角切圆锅炉变CCOFA与SOFA配比下燃烧特性数值模拟[J]. 广东电力, 2016, 29(1): 1-7, 16.
- [3] 陈前明, 方庆艳, 张成, 等. 墙式分离燃尽风对660MW切圆燃烧锅炉烟温偏差影响的数值模拟研究[J]. 广东电力, 2016, 29(7): 16-23.
- [4] 廖永进, 冯晓鸣, 蒋婷, 等. SCR脱硝系统催化剂性能预测方法及实践[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 8-10, 32.
- [5] 李德波, 廖永进, 曾庭华, 等. SCR脱硝系统喷氨格栅调整试验关键问题探究[J]. 广东电力, 2016, 29(7): 11-15.
- [6] 李德波, 曾庭华, 廖永进, 等. 600MW电站锅炉SCR脱硝系统全负荷投运改造方案研究与工程实践[J]. 广东电力, 2016, 29(6): 12-17.
- [7] 杨群发, 张桂平, 侯剑雄, 等. 600MW机组超净排放技术工程实践及系统优化[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 1-6+26.
- [8] 方朝君, 卢承政, 白晓龙. SCR脱硝系统超低排放运行优化技术研究[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 143 - 148.
- [9] 李超. 加装SCR脱硝装置对空预器冷端腐蚀的影响解析[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 47-51.
- [10] 苗永旗, 刘海秋, 周凯等. 某330MW机组烟气脱硝系统超低排放性能诊断与分析[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 124 - 129.
- [11] 黄飞, 周健, 谢新华等. 百万机组塔式炉脱硝供氨系统优化设计应用研究[J]. 热能动力工程, 2018, 33(7): 99 - 113.
- [12] 董锐锋, 吴文龙, 王锋涛等. 燃煤电厂超低排放改造后烟道氯化铵结晶原因分析及对策[J]. 热力发电, 2018, 47(3): 128 - 134.
- [13] 郭义杰. 100MW 燃煤锅炉硫酸氢铵堵塞空气预热器原因分析及应对措施[J]. 广东电力, 2016, 29(9): 1-6+51.
- [14] 李二欣, 王特, 韦飞. 燃煤电厂SCR脱硝系统尿素热解制氨技术节能改造[J]. 广东电力, 2018, 31(3): 27 - 31.
- [15] 王乐乐, 何川, 王凯等. SCR脱硝催化剂低负荷运行评估技术研究与应用[J]. 热力发电, 2018, 47(10): 24 - 30.
- [16] 于玉真, 李伟亮, 王绍龙等. SCR脱硝系统流道均流装置数值模拟与优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7304 - 7313.
- [17] 雷鉴琦. 降低燃煤机组SCR脱硝系统催化剂磨损的流场优化[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 152-156.
- [18] 田原润, 马剑宇. 1000MW机组烟气脱硝系统烟道流场优化[J]. 热力发电, 2018, 47(6): 50 - 56.
- [19] 陈鸿伟, 赵宝宁, 张千等. 烟气飞灰对SCR脱硝催化剂的磨损性能试验研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(4): 286 - 290.
- [20] 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.
- [21] 庄柯, 姚杰, 吴碧君等. 脱硝反应器内烟气与飞灰分布差异的数值模拟[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 137 - 142.
- [22] 王为术, 上官闪闪, 姚明宇等. 300MW燃煤锅炉SCR脱硝系统导流装置的设计优化[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1634 - 1640.
- [23] 王为术, 上官闪闪, 路统等. 600MW燃煤锅炉SCR系统烟道导流板设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(4): 37 - 40.