浅析燃煤电厂超低排放改造策略

刘 娇

（中国石油抚顺石化公司质量安全环保处）

摘 要 抚顺石化热电厂为自备燃煤电厂，新厂区 3 台锅炉均为高温高压煤粉炉。目前 SO_2、NO_X烟尘的排放都无法满足《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020 年)》的要求，通过对热电厂新厂区 3 台 460 t/h 燃煤锅烟气进行超低排放改造，每年 NO_X排放量可削减 1 372 t，SO_2的排放量削减 594.6 t，烟尘的排放量削减 228 t。排放烟气中 NO_X＜50 mg/Nm^3，SO_2＜35 mg/Nm^3，烟尘＜10 mg/Nm^3，达到上述国家要求。

关键词 锅炉；超低排放；SO_2；NO_X；烟尘；电厂

DOI：10.3969/j.issn.1005-3158.2019.02.011 **文章编号**：1005-3158(2019)02-0042-04

0 引 言

2014 年，我国先后有多家燃煤电厂宣称实现了烟气中 SO_2、NO_X(以 NO_2计)、烟尘的“近零排放”“超清洁排放”及比天然气发电排放还要清洁的“超低排放”[1]。此后，部分省级政府、国家有关部门通过“文件”要求新建燃煤机组和老机组达到“超低排放”要求。

1 实施超低排放的原因

1.1 国家法律法规的要求

2014 年 5 月，发改委、环保部和国家能源局联合下发的《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020 年)》提出具体目标；2015 年 12 月 2 日，国务院总理李克强主持召开的国务院常务会议，提出东部和中部地区燃煤机组超低排放改造时间提前：由原来的 2020 年提前至 2017 年和 2018 年底。本工程按照上述烟气排放要求，在 3 台 460 t/h 锅炉(10#、11#、12#)已建烟气处理设施基础上进行超低排放改造，要求改造后 NO_X排放浓度＜50 mg/Nm^3，SO_2排放浓度＜35 mg/Nm^3，烟尘排放浓度＜10 mg/Nm^3。

1.2 热电厂锅炉现状分析

抚顺石化公司热电厂为抚顺石化公司自备燃煤电厂，现有 3 台高温高压煤粉炉，配置水平低氮燃烧器，单台额定出力 460 t/h，锅炉形式为单汽包、集中下降管、高温高压、燃用煤粉的单炉膛锅炉，四角切圆燃烧方式、平衡通风，固态排渣的自然循环汽包炉。通过母管与汽轮发电机组相连。采用石灰石—石膏湿法脱硫、选择性催化还原(SCR)脱硝工艺、布袋除尘技术，烟气排放指标满足 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》中新建锅炉要求，烟气中污染物排放浓度控制在 SO_2＜100 mg/Nm^3，NO_X＜100 mg/Nm^3，烟尘＜30 mg/Nm^3；烟气中汞及其化合物浓度均＜0.04 μg/m^3，满足 GB 13223—2011《火电厂大气污染排放标准》中汞及其化合物＜0.03 mg/m^{3}的要求，故本次改造不涉及脱汞。

2 实施超低排放改造的内容

3 台锅炉烟气脱硫脱硝除尘超低排放改造项目，主要包括：改造低氮燃烧器，优化现有 SCR 反应器流场分布及内件，配合低氮燃烧改造并增加喷氨量；利旧改造现有布袋除尘器，改造现有脱硫塔除雾区新增高效除尘装置；在现有脱硫塔内新增持液盘；更换更高全压的引风机[2](本次改造电机利旧)。

2.1 低氮燃烧器改造

1)布置两层高位分离燃尽风系统，燃尽风供风风道由主二次风风道引出，燃尽风喷口能够垂直和水平方向双向摆动，有效控制汽温及其偏差；

2)合理布置主燃区二次风喷口，并对二次风喷口的面积进行优化设计；

3)采用延迟混合型一次风以及周界风喷口设计，确保 NO_X大幅度减排；

4)采用先进的水平浓淡风煤粉燃烧技术，并采用喷口强化燃烧措施，有效降低 NO_X排放，强化劣质煤的燃烧稳定性，保证高效燃烧，并拓宽燃料适应性。

2.2 SCR 反应器改造

现运行 SCR 反应器中装有三层催化剂，上层为板式，中层为蜂窝式，下层为蜂窝板式，其中下层催化剂运行已超 24 000 h。委托催化剂厂家计算后，现有

刘娇，1996 年毕业于辽宁石油化工大学工业分析专业，现在中国石油抚顺石化公司质量安全环保处从事环保工作。通信地址：辽宁省抚顺市新抚区凤翔路 45 号，113006。E-mail：liujiao@petrochina.com.cn。

催化剂用量实现超低排放会严重影响催化剂寿命，且有氨逃逸增加的风险，因此，此次超低排放改造中更换已经运行超过 24 000 h 的催化剂。

1）SCR 反应器

SCR 反应器的设计需充分考虑与周围设备布置的协调性。反应器设计成烟气竖直向下流动，反应器入口设气流均布装置，反应器入口及出口段设导流板，对于反应器内部易于磨损的部位设计必要的防磨措施。反应器内部各类加强板、支架设计成不易积灰的型式，同时考虑热膨胀的补偿措施。反应器设置足够大小和数量的人孔门。反应器配有可拆卸的催化剂测试元件。反应器设计还考虑内部催化剂维修及更换所必须的起吊装置。SCR 反应器能承受运行温度 420 ℃不少于 5 h 的考验，而不产生任何损坏。

顶层催化剂的迎灰表面直接受到烟气与飞灰颗粒的冲刷，为减少顶层催化剂的磨损，除加强催化剂本身的结构强度外，还需要改善烟气的流场分布，使烟气（飞灰）垂直均匀进入催化剂通道（速度偏差小于±15%，角度偏差小于±10%），且飞灰颗粒集中在截面中央。

现运行 SCR 反应器中装有三层催化剂，上层为板式，中层为蜂窝式，下层为蜂窝板式，其中下层催化剂运行已超 24 000 h。2013 年 5 月安装两层日立造船制造板式催化剂，运行达标困难，故与 2015 年 11 月在脱硝备用层安装北京迪诺斯平板式催化剂，安装后运行良好，3 台锅炉均达标排放。2016 年 8 月，由于最初安装的日立造船催化剂到使用寿命，进行正常更换，将 3 台锅炉 SCR 脱硝反应器的中层催化剂更换为江苏德创蜂窝式催化剂。委托催化剂厂家计算后，现有催化剂用量实现超低排放会严重影响催化剂寿命，且有氨逃逸增加的风险，因此，此次超低排放改造中需要对 10#、11#、12#锅炉的 SCR 脱硝反应器更换已经运行超过 24 000 h 的催化剂。催化剂增加量为 72.26 m^3/台。

2）CFD（计算流体力学）数值模拟

根据热电厂现有资料以及 10#、11#、12#锅炉运行的现场情况，在 SCR 烟气脱硝技术的实施过程中，为了最大限度满足设计要求，保证系统达到设计指标，需要采用 CFD 数值模拟方法对整个 SCR 系统的流场进行计算分析，以保证进入反应器前的 NO_X 和氨气达到良好的湍流混合，确保速度分布、烟气分布以及还原剂浓度分布合理，系统压力损失最小[3]。

通过对新厂 10#、11#、12#锅炉现有 SCR 脱硝装置进行 CFD 数值模拟，模拟范围从进口烟道的喷氨格栅至反应器出口导流板烟道系统，其中包括氨喷射装置、脱硝反应器、反应器进、出口烟风道等。反应器的尺寸、导流板设置、喷氨格栅详细布置、催化剂的安装位置和高度等均严格按照现有的实际值进行模拟。SCR 反应系统全模型速度分布情况见图 1。SCR 反应器首层催化剂上游 1 m 处烟气速度分布情况见图 2。

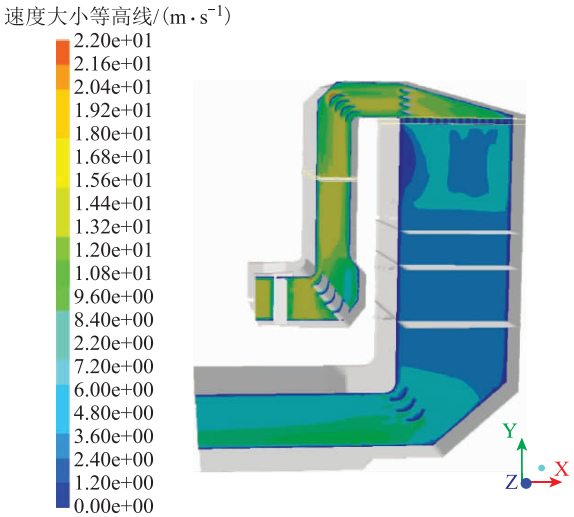


图 1　SCR 反应系统全模型速度分布云图

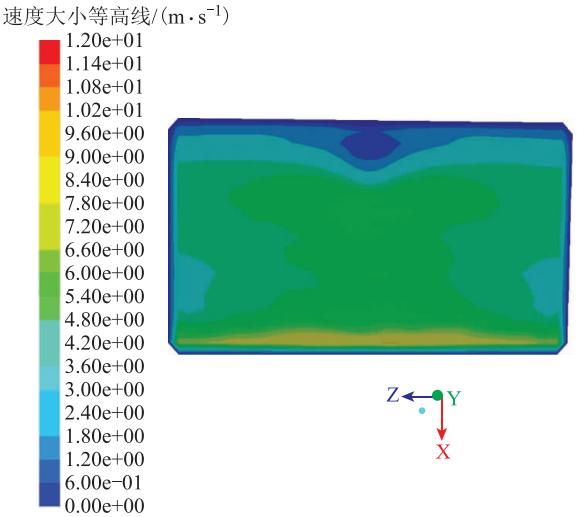


图 2　SCR 反应器首层催化剂上游 1 m 处烟气速度分布云图

由图 1 可看出，烟气在 SCR 反应器的流向是不均匀的，入口中心位置存在流速洼区，后续的整流格栅未充分发挥作用。

从图 2 SCR 首层催化剂上游 1 m 处烟气速度分布云图可以看出，烟气流速分布均匀度不高，速度分布的绝对偏差已经超过超低排放的要求（Cv<10%）。若在此条件下长期运行，不仅对催化剂带来冲刷磨损，降低催化剂的使用寿命，还会造成氨气的反应不充分，氨逃逸增加，带来烟道及后续设备堵塞等一系列问题。

通过对 3 台锅炉现有 SCR 脱硝装置进行 CFD

数值模拟看出[4]，烟气在 SCR 反应器的流向是不均匀的，入口中心位置存在流速洼区，后续的整流格栅未充分发挥作用。从新厂 SCR 反应器首层催化剂上游 1 m 处烟气速度分布云图看出，现有 SCR 反应器中导流板、整流格栅、反应器倒角等内件不适宜超低排放的要求，烟气分布均匀度偏低，直接影响 SCR 高效脱硝的效果，为保证进入反应器前的 NO_X 和氨气达到良好的湍流混合，确保速度分布、烟气分布以及还原剂浓度分布合理，系统压力损失最小，需对 SCR 反应器部分导流板、整流格栅、出口烟道等进行改造，配合低氮燃烧以及增加喷氨量，实现超低排放的要求。

2.3 布袋除尘器校核

新厂 3 台锅炉除尘在 2011 年改造为布袋除尘器，一炉一布袋，布袋除尘器设有安全旁路，旁路开关阀为零泄漏设计。在正常生产中能满足出口烟尘小于35 mg/Nm³ 的要求。但布袋破损或者系统漏烟气时很容易造成出口烟尘含量不达标，因此根据现场实际生产，布袋除尘器出口烟尘含量大都在 35 mg/Nm³ 以下，但偶尔会有超过 35 mg/Nm³ 达到 45 mg/Nm³ 的情况，虽然通过脱硫塔捕集一部分后可以达标排放，但此次超低排放改造需要脱硫塔入口烟尘含量低于 35 mg/Nm³ 以下，因此需要对新厂的 3 台布袋除尘器进行检查和维护。

2.4 脱硫改造

新厂 3 台锅炉尾气脱硫系统按照 SO_2 浓度从 2 757 mg/Nm³ 脱除至 60 mg/Nm³ 设计，目前大都采用抚顺煤和阜新煤，其收到基硫含量约在 0.89 左右，计算锅炉烟气中 SO_2 浓度在 1 600～1 956 mg/Nm³。经过核算，在低浓度时 SO_2 浓度低于 1 600 mg/Nm³ 开启三层喷淋层，即可达到 SO_2 出口浓度低于 35 mg/Nm³ 以下；当 SO_2 浓度接近上限时，开启 4 层喷淋层才可达到出口浓度低于 35 mg/Nm³ 以下。考虑到此次改造还涉及到烟尘的超低排放，需要脱硫塔对烟气中的烟尘增加脱除效果，因此新厂 3 台脱硫改造需要新增持液盘，既可以提高脱硫塔除尘效率，还可以在处理高含硫量(1 956 mg/Nm³)烟气时有备用喷淋循环泵供检修用[5]。

3 实施超低排放改造后效果

3.1 改造后监测数据

3 台锅炉实施超低排放改造后，对不同工况下锅炉排放的烟气中 SO_2、NO_X、烟尘进行监测[1]，监测结果见表 1。

表 1 3 台锅炉改造后 SO_2、NO_X 监测数据

工况	烟尘入口浓度/(mg·m⁻³)	烟尘出口浓度/(mg·m⁻³)	烟尘去除率/%	SO_2 入口浓度/(mg·m⁻³)	SO_2 出口浓度/(mg·m⁻³)	SO_2 去除率/%	NO_X 入口浓度/(mg·m⁻³)	NO_X 出口浓度/(mg·m⁻³)	NO_X 去除率/%
锅炉负荷 91.3%	25 381	3.39	99.99	1 678	8	99.52	370	10	97.30
	21 018	3.94	99.98	1 620	3	99.81	381	16	95.80
	23 665	4.55	99.98	1 655	3	99.82	324	20	93.83
	25 534	4.08	99.98	1 595	3	99.81	311	22	92.93
	22 596	4.76	99.98	1 581	3	99.81	352	21	94.03
锅炉负荷 77.2%	23 677	4.69	99.98	1 207	9	99.25	318	29	90.88
	24 659	4.00	99.98	1 346	3	99.78	339	17	94.99
	23 227	4.25	99.98	1 300	3	99.77	314	19	93.95
	21 090	3.96	99.98	1 250	3	99.76	307	17	94.46
	19 897	3.79	99.98	1 351	3	99.78	316	21	93.35
锅炉负荷 54.3%	22 321	4.08	99.98	1 344	7	99.48	348	10	97.13
	25 689	4.62	99.98	1 342	5	99.63	351	20	94.30
	24 765	3.92	99.98	1 708	4	99.77	391	18	95.40
	20 869	4.91	99.98	1 725	4	99.77	453	14	96.91
	23 645	4.09	99.98	1 414	3	99.79	431	20	95.36
指标		10			35			50	

改造时设计处入口 SO_2 转换 SO_3 的转换率不高于 1%，经检测：改造后 SO_3 生成浓度不高于 18 mg/m³；SCR 氨逃逸均不高于 1.52 mg/m³；NO_X 平均去除率为 94.71%，SO_2 平均去除率为 99.70%，烟尘平均去除率为 99.98%。

3.2 改造后排放绩效

3.2.1 单台炉 SO_2、NO_X 及烟尘减排情况

超低改造后 SO_2、NO_X 及烟尘减排情况见表 2。

表 2　超低改造后单台炉 SO_2、NO_X 及烟尘减排情况

锅炉	项目	超低改造前减排量	超低改造后减排量
排放速率	SO_2/(t·h^{-1})	0.966	0.999
	NO_X/(t·h^{-1})	0.157	0.233
	烟尘/(t·h^{-1})	27.71	27.72
排放量	SO_2/(t·a^{-1})	5 795.2	5 993.4
	NO_X/(t·a^{-1})	945.5	1 403
	烟尘/(t·a^{-1})	166 260	166 336
指标	SO_2/(mg·Nm^{-3})	100	35
	NO_X/(mg·Nm^{-3})	100	50
	烟尘/(mg·Nm^{-3})	30	10

注：原烟气中 SO_2 按照 2 000 mg/Nm³，NO_X 按照 510 mg/Nm³，年运行时间按 6 500 h 计算。

由表 2 可以看出，增设脱硫脱硝装置后，单台炉每年 SO_2 减排量达 198.2 t，NO_X 减排量达 457.5 t，烟尘减排量达 76 t，3 台炉全年 SO_2、NO_X 烟尘减排量分别为 594.6，1 372，228 t。排放指标满足环境保护部、国家发展和改革委员会、国家能源局环发[2015]164 号关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知要求。

3.2.2 每度电污染物排放量

3 台锅炉 2018 年污染物排放量见表 3。

10# ～ 12# 炉对应机组 2018 年总发电量 146 071.3 万 kW·h，折算后，NO_X、SO_2 及烟尘排放量分别为 1.41×10^{-4}，0.29×10^{-4}，0.24×10^{-4} kg/(kW·h)[6]。

表 3　3 台锅炉 2018 年污染物排放量　　t

锅炉	NO_X	SO_2	烟尘
10#	76.148	8.771	11.554
11#	65.02	19.605	10.429
12#	65.067	14.346	12.857
合计	206.235	42.722	34.84

4　结束语

综上，此次改造完全满足“超低排放”的要求。不仅降低了 SO_2、NO_X 排放量，提高了去除率，实现了热电厂低碳环保，还节省了排污费，创造了经济效益件。烟气实施“超低排放”后，能有效改善该地区环境质量，对地区经济和社会人居环境和谐发展具有积极意义，环境效益和社会效益突出。

参 考 文 献

[1] 黄治军，王卫群，祁建民，等.燃煤电站超低排放研究进展[J].能源研究与利用，2017(2)：43-46.
[2] 胡永锋.燃煤电厂烟气 NO_X 超低排放改造方案对比分析[J].石油石化节能与减排，2016(6)：32-37.
[3] 郭智慧.超低排放改造中的 CEMS 分析及实现[J].科技创新与应用，2016(16)：171.
[4] 邵旻.超低排放对烟气排放连续监测系统设计的影响[J].华电技术，2016，38(5)：64-67.
[5] 丁战.浅谈火力发电厂脱硫超低排放 SO_2 气体测量方法[J].中小企业管理与科技，2017(27)：153-154.
[6] 卢晗，郑鑫，李薇，等.燃煤电厂脱硫技术及超低排放改造费效分析[J].环境工程，2018(1)：97-102.

（收稿日期　2018-12-30）
（编辑　王 蕊）

空气污染（Air Pollution）

2019 年世界环境日将由中国主办，主场活动设在杭州。