

[1]李月娥,吴彦丽,郑立星,等.燃煤机组深度调峰脱硝性能提升技术分析[J/OL].洁净煤技术,1-16[2024-11-19].https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.23072402.

燃煤机组深度调峰脱硝性能提升技术分析*

李月娥¹, 吴彦丽¹, 郑立星¹, 闫高程¹, 张勇²

(1.山西大学 电力与建筑学院, 山西 太原 030006; 2.山西京能吕临发电有限公司 山西 吕梁 033200)

摘要: 燃煤机组深度调峰时, 长期处于低负荷运行工况, 导致烟气温度偏离脱硝装置正常工作区间, 出现NO_x超标排放问题。本文对燃煤机组的宽负荷脱硝技术进行了梳理, 从催化剂侧、喷氨侧、燃烧侧、烟气侧以及给水侧对SCR (selective catalytic reduction, SCR) 低负荷下的脱硝改造方案分析, 结果表明高性能宽温脱硝催化剂替代和智能精细化喷氨是实现SCR优化运行的趋势。从烟气循环、喷枪位置以及宽温助燃剂对SNCR (selective non-catalytic reduction, SNCR) 进行改造, 三种改造方案均有利于提高机组低负荷时的脱硝效率。SCR+SNCR联合脱硝改造在循环流化床锅炉应用后能满足机组在30~100%负荷下的脱硝要求, 煤粉炉采用该技术能提高脱硝效率, 降低投资成本。臭氧联合SNCR与SCR脱硝可以进一步提高脱硝效率, 增强脱硝系统对负荷的适应性。

关键词: 燃煤机组; 氮氧化物; 低负荷; SCR; SNCR

中图分类号: TK224

文献标志码: A

Technical analysis of denitrification performance improvement of coal-fired units under deep peak regulation

LI Yuee¹, WU Yanli¹, ZHENG Lixing¹, YAN Gaocheng¹, ZHANG Yong²

(1.School of Electric Power, Civil Engineering and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Jingneng Lvlin Power Generation Co., Ltd. Lvliang 033200, China)

Abstract: When coal-fired units participate in the deep peak regulation, the units are in low-load operating conditions for a long time, resulting in flue gas temperatures deviating from the normal operating range of denitrification device and excessive NO_x emissions. In this paper, the wide load denitrification technologies are sorted out. The selective catalytic reduction (SCR) denitrification transformation schemes are analyzed from the catalyst side, ammonia spraying side, combustion side, flue gas side, and feed water side. The replacement of high-performance wide-temperature denitration catalyst and intelligent fine ammonia injection are the trends to realize the optimal operation of SCR. The selective non-catalytic reduction (SNCR) transformation schemes are analyzed in terms of flue gas circulation, adjustment of spray gun position and addition of wide temperature additive, and the three transformation schemes are conducive to improving the denitrification performance under low load. Combined denitrification technology can improve unit flexibility. Among them, the combined SNCR and SCR denitrification technology of the circulating fluidized bed boiler can meet the denitrification

收稿日期:

审稿人:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51806131); 山西省吕梁市重点研发资助项目(高新领域)(2022GXZYF05)

作者简介: 李月娥(1997-), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向为能源系统评价。E-mail: liyuee18634905107@163.com

通讯作者: 吴彦丽(1989-), 女, 山西临汾人, 副教授, 博士, 研究方向为能源系统耦合集成。E-mail: wuyanli@sux.edu.cn

requirements of the unit under 30~100% load. The combined denitrification technology of the pulverized coal furnace can improve the denitrification efficiency and reduce the investment cost. Ozone combined SNCR and SCR denitrification technology can further improve the denitrification efficiency and improve the adaptability of the denitrification system.

Key words: Coal-fired unit; NO_x; low load; SCR; SNCR

0.引言

燃煤发电是目前我国电力供应中不可或缺的一部分。然而，煤炭燃烧产生的氮氧化物（NO_x）会诱发光化学烟雾、酸雨等问题，对生态系统以及人类健康造成危害^[1]。国家三部委联合发布了《火力发电厂节能减排升级改造行动计划（2014-2020年）》，要求燃煤机组出口 NO_x 排放浓度不能超过 50 mg/m³。通常情况下燃煤机组同时采用低氮燃烧和烟气脱硝技术可以满足 NO_x 排放浓度要求。当燃煤机组进行深度调峰时，锅炉燃烧稳定性变差，点火温度下降，脱硝系统的性能偏离正常运行条件，导致 NO_x 超标^[2]。如何实现低负荷工况下 NO_x 达标排放成为燃煤机组深度调峰时期面临的重要挑战。

Yin 等^[3]探究了 SCR 装置温度和烟气流速优化改造效果，NO_x 排放量能够降低 7.46%。王煜伟等^[4]针对某超超临界机组，比较了省煤器改造、热水再循环、宽温催化剂和 0 号高加等脱硝提效方案，并进行了机组省煤器水旁路和热水再循环的组合改造，实现了 NO_x 超低排放。吴朝刚等^[5]对某循环流化床锅炉采用二次风分级和烟气再循环组合方式进行改造，满足超低排放要求。Cheng 等^[6]分析了 SCR 与 SNCR 技术的优缺点，提出 SCR+SNCR 联合方案可提高脱硝效率和经济性。胡琦^[7]基于 SNCR 技术进行了 SCR+SNCR 联合脱硝改造，实现了机组在各个负荷下 NO_x 达标排放。潘昊^[8]对某煤粉锅炉采用臭氧+SNCR 联合脱硝技术，通过控制臭氧和尿素溶液的投加量，氮氧化物的出口浓度能够

满足国家环保排放标准。虽然目前对煤粉锅炉或循环流化床锅炉全负荷脱硝已有改造案例，然而燃煤机组进行脱硝系统改造后在不同负荷下脱硝性能尚缺乏分析。本文从脱硝技术原理出发，重点探讨 SCR 和 SNCR 脱硝系统进行改造后，机组宽负荷范围内的脱硝效率和氮氧化物排放浓度，以期为燃煤机组全负荷脱硝改造技术路径的选择提供参考。

1.SCR脱硝系统

SCR 脱硝装置大多处于锅炉省煤器与空预器之间。SCR 脱硝利用化学反应，将尾气中的 NO_x 和含有氨基的还原剂在有催化剂的条件下转化为 N₂ 和 H₂O，以此来减少 NO_x 的排放。尿素是一种易储存易运输的化学品，价格相对较低，安全性也相对较高^[9]。尿素作为还原剂应用在煤粉炉中，的工艺流程如图 1 所示。目前，SCR 脱硝反应过程中所需催化剂的适宜工作温度范围为 300~420 °C，同时催化剂活性在 SCR 脱硝系统中也有关键作用^[10]。当燃煤机组处于 50%~60% 负荷时，炉膛内燃烧温度降低导致省煤器出口烟温也随之降低，此时 SCR 脱硝装置的入口烟温可能达不到脱硝要求^[11]。入口烟温降低也会引起还原剂结晶、脱硝催化剂活性降低等一系列问题，影响机组的脱硝效果。为满足 SCR 脱硝系统在低负荷工况下的正常运行，需要对燃煤机组采取一些改造措施。具体改造方式主要从研发新型宽温催化剂，精准喷氨，从燃烧侧、烟气侧和给水侧提高脱硝装置入口烟温这三个方面进行。

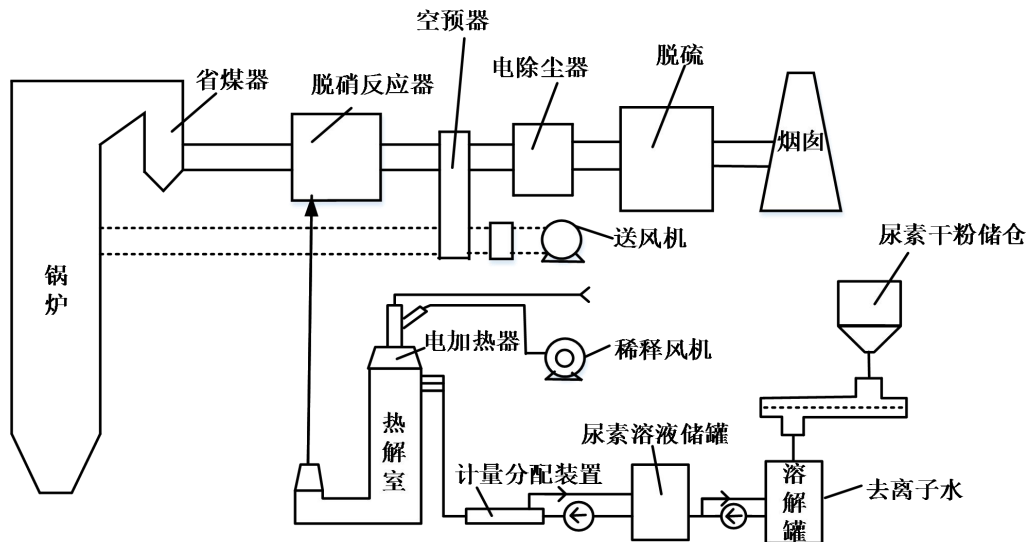


图 1 煤粉锅炉 SCR 脱硝工艺流程图

Fig.1 SCR denitration process flow chart of pulverized coal boiler

1.1 催化剂侧

宽温脱硝催化剂可适应低温烟气，跟烟气侧和给水侧的改造相比，其优点是所需投资少，不影响机组运行安全，最重要的是能够将脱硝系统的温度范围扩宽到 240~420 °C。然而，在有低温烟气环境中使用的宽温催化剂可能会因为水的抑制、硫酸氢铵的沉淀以及复杂烟气中所含的有毒物质而失活，从而导致使用寿命缩短。提高宽温脱硝催化剂在低温下的活性和稳定性是在脱硝系统中的重点研究对象^[12]。

目前，在较宽温度区间内仍然能有比较优秀的脱硝效率，且发展不错的催化剂是钒系催化剂。彭以以等^[13]在 225~373 °C 的模拟烟气环境中，开发了适用于煤电和工业领域复杂烟气成分的新型宽温运行窗口的 V-W-Mo-Ce-Fe/TiO₂ 脱硝催化剂，其在低温烟气催化脱硝时表现出高活性，还具有抗磨损等优势。北京方信立华开发了一种工作温度在 160~400 °C 之间的低温、高活性钒钛 (V₂O₅-WO₃/TiO₂) 催化剂，并应用于钢铁炼焦等领域^[14]。中国科学院化学工程研究所成功研发了 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 宽温催化剂，此催化剂在 200~400 °C 温度范围内不仅

表现出高活性水平，同时展示出耐磨性极佳、抗压强度优秀的特点。更值得一提的是，该催化剂还可实现原位再生，大大增加了使用寿命和经济性。Gong 等^[15]人研究发现 CeO₂-ZrO₂-TiO₂ 复合氧化物催化剂在脱硝效率为 90% 时，其最适宜的温度区间为 220~400 °C。Li 等^[16]通过电热合金对催化剂进行加热来扩宽 V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂的适宜工作温度范围，通过对催化剂表面进行加热后，催化剂可以在 100~400 °C 的烟气温度范围内脱硝效率能提高至 90% 以上。赵俊平等^[17]对某 330 MW 发电厂的改造采用了前两层使用高温催化剂和底层为常规催化剂的组合。所选高温催化剂的温度适用范围为 260~420 °C，改造结果如表 1 所示。改造后，机组在 30%~100% 负荷下，脱硝效率能够不低于 89%，可以满足 NO_x 超低排放的需求。宽温脱硝催化剂的产业应用刚刚开始，未来研发高性能宽温脱硝催化剂、基于大数据开展宽温脱硝催化剂的选型设计、探索宽温脱硝催化剂原位或者离线再生方法、实施脱硝催化剂全寿命管理等将进一步推进宽温脱硝技术的推广应用^[18]。

表 1 机组脱硝催化剂改造效果

Table.1 Unit denitrification catalyst modification effect

项目	设计值	测试值
机组负荷/%	100	90
脱硝装置入口 NO _x 浓度平均值/(mg/m ³)	450	262
脱硝装置出口 NO _x 浓度平均值/(mg/m ³)	≤50	27
NO _x 转化率/%	≥88.9	89.8
氨逃逸浓度/(μL/h)	≤3	1.9

1.2 精准喷氨

为保证 NO_x 可以达标排放,在机组运行过程中普遍存在喷氨过量的问题。智能精细化喷氨技术有助于降低氨逃逸率和喷氨量,是实现 SCR 优化运行的趋势^[19]。刘国富^[20]对 SCR 精准喷氨系统,提出了对于机组所需喷氨量利用大数据预测进行了超前控制,经改造后 SCR 系统耗氨率降低约 10.62%,出口 NO_x 浓度分布偏差最大降低约 83.08%。杨宇^[21]对某 300 MW 亚临界机组进行了喷氨调整,经改造后,脱硝效率在 30%负荷时,提升了约 4%,同时也减少了液氨消耗量和局部氨逃逸量。金理鹏等^[22]采用预置喷氨量控制模型优化喷氨控制逻辑,对某

1000 MW 机组进行试验,研究显示喷氨自动控制的快速性、准确性均得到明显提高。机组稳定工况下,SCR 出口 NO_x 浓度比投运前降低约 5 mg/m³,当机组负荷按照常规变化速率改变时,SCR 出口 NO_x 浓度比投运前降低约 10 mg/m³。彭志福等^[23]提出了一种全时段的喷氨方法,在考虑负荷系数的条件下,计算实际喷氨与所需喷氨的加权方差最小值,得到喷氨调节孔的变化系数来实现对喷氨的调整。调整前后脱硝系统的数据对比见表 2。改造后 50% 负荷下可实现氮氧化物达标排放,并且氨逃逸浓度降低,也可以减少空预器堵塞风险和粉煤灰中氨质量分数,提高粉煤灰的利用率^[24]。

表 2 锅炉脱硝系统喷氨改造前后数据对比

Table.2 Data comparison before and after ammonia injection transformation of boiler denitrification system

项目	负荷/%	调整前	调整后
脱硝出口 NO _x 浓度平均值/(mg/m ³)	100	40.88 / 42.09	35.65 / 41.01
NO _x 浓度相对标准偏差/%		29.09 / 31.96	18.64 / 36.68
氨逃逸浓度平均值/(mg/m ³)		4.56 / 5.02	3.37 / 3.67
喷氨量/(mg/m ³)		228.00 / 219.00	185.00 / 209.00
脱硝出口 NO _x 浓度平均值/(mg/m ³)	75	43.29 / 37.89	37.67 / 34.32
NO _x 浓度相对标准偏差/%		30.44 / 36.46	18.41 / 20.08
氨逃逸浓度平均值/(mg/m ³)		3.37 / 3.66	2.63 / 2.15
喷氨量/(m ³ /h)		170.00 / 162.00	137.00 / 125.00
脱硝出口 NO _x 浓度平均值/(mg/m ³)	50	42.91 / 48.18	36.33 / 40.88
NO _x 浓度相对标准偏差/%		31.36 / 38.80	35.34 / 21.18
氨逃逸浓度平均值/(mg/m ³)		2.27 / 2.23	1.98 / 1.86
喷氨量/(m ³ /h)		102.00 / 130.00	104.00 / 95.00

1.3 燃烧侧

燃烧侧脱硝改造可以从预热系统改造、助燃改造、制粉系统改造、煤种掺烧、精细化稳燃调整等方面来进行^[25]。

其中预热系统改造主要是通过回收烟气余热分别对燃烧室中的烟气以及锅炉给水进行预热,在提高燃烧效率的同时还能够提高脱硝装置的入口烟温^[26]。经过预热燃烧的煤粉粒径会减小,孔容积和比表面积也会增大有利于锅炉稳定燃烧。预热器内的高还原性气氛有利于预热过程中析出的大部分氮氧化物被还原成氮气,从而大大减少了燃烧室中 NO_x 的产生^[27]。

助燃方式也可以减少烟气中氮氧化物中的含量,陈世田等^[28]对三种煤烟气中添加金属氧化物助燃剂后发现,随着金属氧化物的增加,烟气中氮氧

化物的去除效率也有显著提高,通过在煤种中添加氧化铁渣、铬渣、钢渣、脱硫渣等金属氧化物,烟气中 NO_x 的含量能够降低 10%~25%。

机组深度调峰运行时,可以通过提高磨煤机出力加强制粉系统管理。林国辉等^[29]将低氮燃烧改造应用于布置有中间储仓制粉系统的锅炉机组后发现:将排粉风机出口乏气(三次风)通过乏气管送入一次风母管,同时将原一次风作为二次风,采用缩腰式配风方式,不仅可以提高锅炉运行的热效率,同时也能降低 NO_x 排放量。机组通过该技术优化改造,脱硝装置进口 NO_x 浓度可以降低至 268 mg/m³,脱硝装置的喷氨量和氨逃逸均大幅下降。

煤种掺烧方案一般适用于燃用低挥发分煤质,该方案可以通过加强配煤管理、改善入炉煤质(例如掺烧高挥发分煤种)、储备优质煤种等措施提高

锅炉燃烧稳定性和提高 NO_x 转化率。闫碧晨^[30]通过研究循环流化床锅炉煤混烧过程中有关 NO_x 生成与控制的规律研究发现, 将煤种与石灰石掺混可以显著降低氮氧化物的排放浓度, 减排率高达 20%。

精细化调整主要通过调整炉膛内部含氧量、改变磨煤机运行方式、风煤比、燃烧器旋度、空气分级等指标来实现机组的低负荷稳定燃烧。Du 等^[31]采用二次空气流与富燃料煤/空气流平行布置并参与煤粉燃烧的形式, 实现了机组在 33% 额定负荷下的无油稳定燃烧, 且该稳燃技术对煤粉的燃尽和 NO_x 的转化有明显的改善。

1.4 烟气侧

1.4.1 省煤器分级

省煤器分级的原理是将省煤器分为二级, 分别位于 SCR 装置的前后两端, 来自回热系统的给水依

次经过 2 级省煤器和 1 级省煤器后进入锅炉。给水与 1 级省煤器的热交换减少, 所以 SCR 入口烟温因此提高^[32]。邹祥波等^[33]对某 700 MW 燃煤机组分级改造后效果如表 3 所示, 经改造后, SCR 脱硝系统在低负荷状态下可以进行正常运行, 且基本不影响锅炉尾部的热力分配。低负荷段的脱硝效率也有明显的提升, 该厂的综合脱硝效率由 76.7% 提升至 87.4%, 且锅炉效率比改造前提升了 0.02%, 提升至 94.49%。然而, 要对省煤器进行改造, 需要精确计算省煤器第一阶段的换热量, 以便出口烟气温度不超过 SCR 装置的能力。这种改造方式存在 SCR 催化剂高温烧结的风险, 并且投资成本高、改造难度大、工期长^[34]。

表 3 省煤器分级改造效果

Table.3 Effect of economizer grading modification

负荷/%	SCR 入口烟温/℃		锅炉尾部排烟温度/℃		NO _x 排放浓度/(mg/m ³)	
	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后
100	338	381	126.1	118.8	40.2	19.5
75	321.9	363	121.4	114.2	50	25.2
50	287	329	113.3	105.1	165	20
40	276.7	319	104.2	97.6	303	19.2
35	273.6	316	95.5	90.6	241	21.5

1.4.2 省煤器烟气旁路

烟气旁路的工作原理是将锅炉出口至省煤器入口区域的孔板打开, 将省煤器前的高温烟气和省煤器出口的较低温烟气跟 SCR 系统入口前的烟气中混合来提高脱硝前的烟气温度, 通过调整烟气旁通阀的开度抽取温度较高的烟道内的烟气来提高 SCR 入口烟温, 弥补因负荷不足导致烟温过低的问

题^[35]。周晓韡等^[36]对某 1000 MW 机组进行了改造, 前后排气温度的对比见表 4。在 15% 负荷下, 通过调整旁通阀, SCR 装置入口烟温能够提高到 300 ℃ 以上。省煤器的烟气旁路安装简单方便, 可以灵活控制温度, 但在低负荷时机组热效率会有所降低^[37]。

表 4 烟气旁路计算汇总表

Table.4 Summary calculation of flue gas bypass

负荷/%	改前 SCR 入口烟温/℃	改后 SCR 入口烟温/℃	温升/℃	抽取烟气比例/%
30	288	305	17	14
25	273	305	32	24
23	384	305	21	16
15	282	305	23	18

1.4.3 尾部烟气加热

尾部烟气加热的工作原理是在省煤器出口处增加烟气加热装置, 利用其他热源产生的热量对省

煤器尾部烟气加热，提高SCR装置的入口烟温^[38]。田舜尧^[39]对某350 MW超临界机组利用燃烧秸秆提高尾部烟温。机组在50%负荷下，经过烟气补燃处理后，SCR反应器的入口烟温从初始的311.3℃成功提高至320.0℃，达到了SCR系统正常工作所要求的温度范围，排烟温度从104.4℃升高108.2℃，锅炉效率从92.55%降低到92.32%。祝志福等^[40]通过燃烧天然气放出的热量加热省煤器出口烟气，将处于30~40%负荷的燃煤机组脱硝温度提高到283~303℃，可以满足其工作需求。通过天然气对尾部烟道

补燃改造，极大地提高了机组的运行灵活性，但成本过高，且未完全燃烧的甲烷会影响后续的脱硫、除尘效率。

通过对锅炉烟气侧改造发现省煤器分级可以在较大范围内提高热效率，但设备复杂；烟气旁路操作灵活，但会有能量损失；尾部烟道加热技术可以提高燃烧效率，但运行成本较高，具体对比如表5所示。总体来说，省煤器烟气旁路适用负荷范围更广，更值得进一步研究，弥补其不足。

表 5 SCR 脱硝烟气侧改造方案对比

Table.5 Comparison of SCR denitration flue gas side retrofit schemes

宽负荷脱硝技术	省煤器分级	烟气旁路	尾部烟气加热
工作原理	将两级省煤器位于 SCR 装置前后两端	设置旁路，调节挡板开度	省煤器尾部设置加热装置
烟温提升	30℃以上，不可调整	0~30℃	0~30℃
锅炉效率影响	提升 0.02%左右	下降 0.3%~0.5%	下降 0.2%~0.3%
有待改进	不能灵活调节，改造过程复杂，初始投资大	低负荷时会降低烟气效率，引起挡板卡涩	投资成本较高
适用负荷/%	35~100	15~30	30~70
对应烟温/℃	316~381	305	298~341

1.5 给水侧

1.5.1 省煤器给水旁路

给水旁路的原理是在燃煤机组回热系统和省煤器之间的给水管道上添加一个分支，使一部分给水能够绕过省煤器直接与省煤器出口的给水混合，随后进入锅炉。这种设计可以减少给水在省煤器中的热交换过程，从而提高省煤器出口烟气温度^[41]。王克等^[42]对某 630 MW 机组进行省煤器给水旁路改造，改造效果如表 6 所示。省煤器给水旁路系统启

用后，机组负荷在 35% BMCR(Boiler Maximum Continuous Rating, BMCR)以上时，脱硝系统入口烟温能够达到 320℃以上。低负荷时燃煤机组采取省煤器给水旁路，投资成本较低，改造工程量较小，然而，会导致锅炉效率略有降低，并且考虑到省煤器的主要换热热阻位于烟气侧，通过调节水侧来实现烟温的调节范围相对有限。因此，这种技术适用于需要将烟温提升不超过 10℃的机组^[43]。

表 6 省煤器给水旁路改造前后对比

Table.6 Comparison before and after the transformation of the water supply bypass of the economizer

负荷/%	75		50		35	
	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后
SCR 入口烟温/℃	342.2	342.2	312.1	320.6	289.4	320.7
排烟温度/℃	115.6	115.6	104.0	105.8	95.4	104.6
锅炉效率/%	93.93	93.93	94.32	94.24	94.52	94.04

1.5.2 热水再循环

热水再循环的工作原理是在锅炉下降管适当位置安装再循环管，向省煤器入口供应热水，以减少省煤器的吸热，并确保 SCR 入口的烟气温度满足

脱硝要求^[44]。徐嘉叶等^[45]对某 600 MW 亚临界机组利用热水再循环进行脱硝改造，改造前后对比见表 7。热水再循环的应用对于机组快速启动非常有益，它能够显著提升省煤器在低负荷条件下的效率。此

方案投资改造简单，且以 30%负荷为例，锅炉效率仅下降了 0.59%。但同时可能改变汽水特性，导致

省煤器内发生汽蚀；再循环水量随负荷变化需精确调节^[46]。

表 7 机组热水再循环改造效果

Table.7 Effect of hot water recirculation in boiler

负荷/%	50		30	
	改造前	改造后	改造前	改造后
SCR 入口烟温/ °C	296.87	310.82	278.30	309.10
排烟温度/ °C	112.21	117.55	104.65	115.25
锅炉效率/%	92.43	92.14	92.63	92.04

1.5.3 零号高加技术

零号高加技术的工作原理是在回热系统和省煤器之间的给水管道中添加一级“零号高压加热器”。利用这项技术，可以通过汽轮机高压缸辅助阀的接口从汽轮机中抽取蒸汽，并在机组低负荷时将抽取的蒸汽注入给水中。提高进入省煤器的给水温度，减少二者的热交换，提高省煤器的出口烟温^[47]。曹建文等^[48]将零号高加技术投运到 660 MW 超

超临界机组，结果如表 8 所示。经改造后 SCR 入口烟温有明显的提高，在超低负荷 40%THA(turbine heat acceptance, THA)下，脱硝装置的入口烟温也能达到 317 °C 左右，能够满足其正常运行。然而，该技术只适用于带有补汽阀的高压缸汽轮机组，并且在机组高负荷运行时投运零号高压加热器会使节流损失增大，煤耗增加，经济性较差^[49]。

表 8 零号高加技术改造前后烟温对比

Table.8 Comparison of smoke temperature before and after technical transformation of No. Zero high additive

负荷/%	SCR 入口烟温/ °C		锅炉尾部排烟温度/ °C		锅炉效率/%	
	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后
100	340.2	347.5	122.8	125.0	93.4	93.3
75	321.9	336.7	117.08	121.0	93.36	93.2
50	298.8	326.0	106.4	114.0	92.7	92.2
40	289.1	317.0	102.6	110.3	92	91.5

1.5.4 流量置换

省煤器流量置换改造的基本原理是通过引导部分给水直接从省煤器出口集箱进入，减少流经省煤器的给水量。随后，将省煤器出口处的热水引至省煤器进口，提高省煤器进口水温，减少其吸热量，以提高省煤器出口烟温^[50]。李莎等^[51]对某 600 MW 机组利用省煤器流量置换进行脱硝改造，在 35%负荷下的改造数据如表 9 所示。研究显示，在 35~100%

负荷范围内，脱硝系统利用循环泵以恒定的旁路给水流量进行部分热水循环后，可以确保省煤器出口处的烟气温度在任何负荷下都能稳定地达到 310 °C 以上，以满足电厂对脱硝的要求。流量置换对直流锅炉的负荷适应性差，而且很难根据省煤器出口的流量来控制热水循环泵的流量计数，因此相应的工作量会急剧增加，低负荷工况锅炉的效率会下降^[52]。

表 9 改造前后省煤器烟温对比

Table.9 Comparison of economizer flue gas temperature before and after transformation

项目	35%THA 工况	
	改造前	改造后
给水流量/(t/h)	570	570
旁路流量/(t/h)	0	340
循环泵流量/(t/h)	0	445
SCR 入口烟温/°C	282	315

对锅炉给水侧改造发现，给水旁路技术对烟温调节范围较小；热水再循环可以明显改善锅炉热效率，然而需要注意氧溶解问题；零号高加技术在低负荷下投运，烟温提高效果明显但是改造过程复杂，高负荷运行不适用；流量置换技术能够满足锅

炉在全负荷下的脱硝要求，并且不会影响到省煤器其他受热面的安全，对以后机组低负荷脱硝有很好的参考作用。具体对比如下表 10 所示，选择适合的技术应综合考虑实际运行条件、投资成本和能源消耗等因素。

表 10 SCR 脱硝给水侧改造方案对比

Table.10 Comparison of SCR denitrification water supply side transformation schemes

脱硝技术	省煤器给水旁路	热水再循环	零号高加	流量置换
工作原理	省煤器前设置调节阀，减少给水旁路吸热量	在省煤器出口设置回流系统	在回热系统与省煤器之间加零号高加回热器	给水旁路与热水再循环相结合
烟温提升	0~15℃	0~15℃	0~15℃	0~30℃
锅炉效率影响	下降 0.1%~0.5%	下降 0.2%~0.6%	下降 0.3%~0.6%	下降 0.2%~0.5%
有待改进	烟温调节不明显，省煤器冷却受热不均，有安全隐患	锅炉效率下降，省煤器内部会引起汽蚀	不适用于高负荷，锅炉效率下降明显	低负荷下锅炉效率下降
适用负荷/%	35~75	30~50	40~75	35~100
对应烟温/℃	320~342	309~311	317~347	310~315

2.SNCR脱硝系统

选择性非催化还原（SNCR）脱硝技术，是把还原剂喷入炉内温度为 850~1150℃的区域，利用含

有氨基的还原剂选择性的把烟气中的 NO_x 还原为 N₂ 和 H₂O，实现清洁高效的脱硝过程。具体流程如图 2 所示。SNCR 技术一般可以满足锅炉在 50%~100%负荷下 NO_x 超低排放的要求。但是在负荷继续降低的情况下，会导致 NO_x 排放超标^[53]。

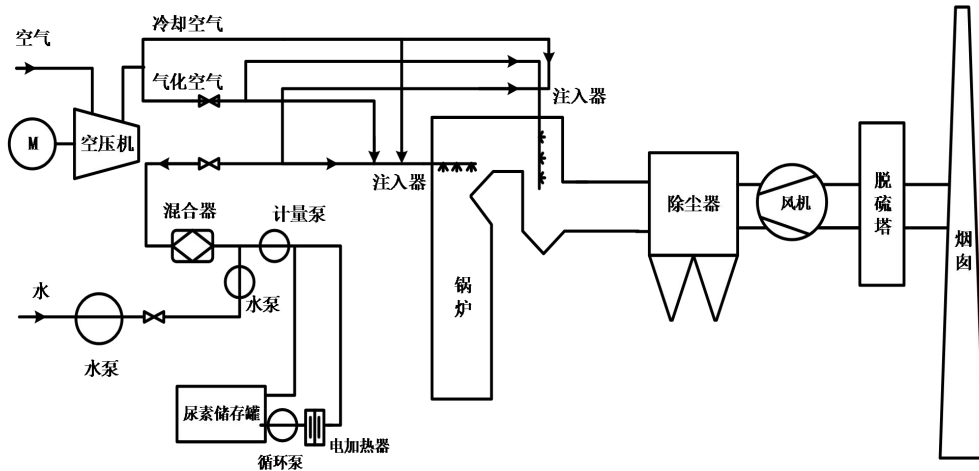


图 2 循环流化床锅炉 SNCR 脱硝工艺流程图

Fig.2 Circulating fluidized bed boiler SNCR denitrification process flow chart

2.1 烟气再循环

在低负荷工况下，烟气再循环技术能够使再循环的烟气与新鲜的燃料和空气在循环流化床锅炉中进行混合燃烧^[54]，此时，燃烧温度会降低，炉膛内氧浓度也会降低导致炉内处于还原状态，不利于氮氧化物的生成。张思海等^[55]将烟气再循环技术应用用于某 330 MW 亚临界循环流化床锅炉机组，研究发现，低负荷情况下，使用烟气再循环技术可以显著减少一次风量，同时再循环的烟气还能够提供热量提高炉膛出口的烟气温度，对 SNCR 脱硝系统尤为有利。在 30%工况下，通过改造后，再循环的

烟气量增加 102 kNm³/h 后，炉内氨的质量流量还有 NO_x 出口浓度分别从 0.21 m³/h 降至 0、从 41.5 mg/Nm³ 降到 39.4 mg/Nm³，这也证明烟气再循环对循环流化床锅炉烟气中 NO_x 的减排有显著作用。

2.2 喷枪调整

对于循环流化床锅炉的 SNCR 烟气脱硝过程而言，需要根据炉内脱硝反应的合理温度范围，锅炉燃烧特性还有机组实际情况来选择合适的喷枪安装位置和数量。刘彬等^[56]对 SNCR 工艺中的喷枪参数进行了研究，对喷枪提出了 10 种布置方案，分别开启水平烟道内侧和外侧，或者两侧都开，并且对

两侧的喷枪数量也进行了调整。研究表明，为了实现低氮排放，喷枪应该根据机组实际情况布置在水平烟道的内侧和外侧。另外，当喷枪流速较高时能够小幅提高脱硝效率但也会加剧氨逃逸，所以较为合适的流速范围为10~20 m/s。为提高SNCR效率，降低还原剂的浪费，辛胜伟等^[57]采用喷枪调整方法

对某300 MW循环流化床锅炉机组脱硝改造，具体措施包括在循环流化床分离器的进口烟道外部和顶部分别安装1支和5支喷枪，同时对尿素溶液的喷射粒度、尿素流量以及喷枪喷嘴做了相应调整，改造后的运行参数如表11所示。在100%、70%和50%负荷下，锅炉出口NO_x排放浓度满足超低排放要求。

表11 SNCR脱硝改造后的参数对比

Table.11 Comparison of parameters after SNCR denitration transformation

锅炉负荷/%	100	70	50
烟气温度/℃	948	845	803
NO _x 原始浓度/(mg/m ³)	128.5	96.8	73.1
尿素溶液 NO _x 浓度/(mg/m ³)	10	10	15
η _{NSR}	1.4	1.4	1.6
出口 NO _x 浓度/ (mg/m ³)	33.1	36.8	45.2
脱硝效率/%	74.2	61.4	38.1

吴小勇等^[58]对某锅炉喷枪系统重新布置，将SNCR喷枪布置于分离器出口中心筒上部烟道处，结果表明，锅炉经喷枪调整后的脱硝效率约为60%，氮氧化物出口浓度不超过50 mg/Nm³。具体

数据对比如表12所示。经上所述，当SNCR技术在低负荷下的脱硝效率受到喷枪位置和数量的影响时，通过合理调整，可以更好地实现氨水或尿素溶液与烟气的混合，提高脱硝效率。

表12 SNCR喷枪调整后运行参数对比

Table. 12 Comparison of operating parameters of SNCR gun after adjustment

锅炉负荷/%	温度/℃	出口 NO _x 浓度/(mg/Nm ³)	脱硝效率/%	氧含量/%	氨逃逸/(mg/Nm ³)
100	950	45	63	4.5	1.5
90	930	44	60	3.8	1
80	925	42	57	3.9	0.9
40	825	40	55	4.2	0.7

2.3 宽温助燃剂

循环流化床脱硝反应的最佳温度区间为850~950℃，此时SNCR的效率最高可达到70%。锅炉处于低负荷时，添加助剂（H₂、H₂O₂、钠盐等）和活性还原剂（铵盐、水合肼、尿素肼、活性氨等）不仅可以减少氨逸出，还可以提高脱硝反应的活性^[59]。将生物油作为添加剂，可以拓宽脱硝反应温度范围，提高NO_x的转化率。在900℃下，5 wt%的生物油能够使SNCR系统适宜的工作温度区间从210.25℃扩大至262.43℃，反应所需的还原温度也从944.04℃降低至881.93℃，机组脱硝效率提高21%^[60]。

3.联合脱硝技术

耦合多种脱硝技术可提高燃煤机组在低负荷下的脱硝效率。SNCR+SCR联合脱硝在炉膛内壁布置喷氨装置，利用SCR和SNCR不同的工作温度区间，分别在两个反应区实现NO_x的去除^[61]。这

种联合脱硝技术可以充分发挥二者的优势，提高脱硝效率，但是设备空间需求大，操作较为复杂。

臭氧脱硝技术适用于60~130℃的低温烟气。主要是利用臭氧的强氧化性将低价态氮氧化物氧化为高价态氮氧化物，然后溶于水生成硝酸盐，最终用洗涤剂中和吸收，以此来脱硝^[62]。臭氧脱硝技术具有改造成本低、NO_x脱除效率高、可同时脱除多种污染物及可灵活调节等优点。SNCR+臭氧脱硝联合技术通过提高臭氧浓度来提高NH₃和NO_x的反应速度，从而提高SNCR脱硝的效率。剩余未完全脱除的氮氧化物则通过后面的臭氧氧化和湿法脱硫中和洗涤吸收来满足氮氧化物的超低排放，同时还需要确保臭氧与氨气之间的适当配比^[63]。臭氧氧化脱硝技术通过扩大SCR反应的温度范围，增强其反应速率。氧化脱硝可以提高SCR的效率和选择性。二者联合脱硝可减少氨逃逸，实现NO_x超低排放，然而该联合技术还需要解决硝酸根盐的问题，并降低操作复杂性。

3.1 SNCR与SCR联合脱硝技术应用

3.1.1 循环流化床锅炉改造

胡刚等^[64]对某 2×350 MW 超临界循环流化床锅炉进行 SNCR+SCR 联合脱硝改造。相关实验结果见表 13, 在 30%~100%负荷范围内, 机组脱硝效

率可达到 75%以上, NO_x 排放浓度均低于 35 mg/Nm³。机组宽负荷运行时, 采用该联合脱硝技术, 可以显示出良好的脱硝效果, 实现 NO_x 超低排放。

表 13 循环流化床联合脱硝改造前后脱硝效率数据对比

Table.13 Comparison of denitrification efficiency data before and after circulating fluidized bed combined denitrification transformation

负荷/%	NO _x 原始排放浓度 /(mg/Nm ³)	改造前 (SNCR)		改造后 (SNCR+SCR)	
		净烟气 NO _x 浓度 /(mg/Nm ³)	脱硝效率/%	净烟气 NO _x 浓度 /(mg/Nm ³)	脱硝效率/%
100	229.5	33.3	85.5	23.5	89.8
50	168.6	37.8	77.6	28.1	83.3
40	172.5	99.1	42.6	36.2	79.0
35	165.3	108.3	34.5	34.6	79.1
30	131.2	113.5	13.5	32.7	75.1

3.1.2 煤粉锅炉改造

周英贵^[65]对 300 MW 煤粉炉进行了 SCR+SNCR 联合脱硝的试验研究, 结果如表 14 所示。通过对比分析发现, 使用该联合脱硝技术可以提高脱硝效率

, 而且在不同负荷下, NO_x 排放浓度均符合国家标准。而且采用 SCR+SNCR 联合脱硝技术的投资费用约为 SCR 技术的三分之一, 能有效降低投资成本^[66]。

表 14 煤粉炉各工况下联合脱硝改造效果

Table.14 The effect of combined denitration transformation under various working conditions of pulverized coal furnace

锅炉负荷 /%	初始 NO ₂ 浓度 /(mg/Nm ³)	SNCR 氨氮比	SNCR 脱硝 效率/%	SCR 入口 NO ₂ 浓度 /(mg/Nm ³)	SCR 氨 氮比	SCR 出口 NO ₂ 浓度 /(mg/Nm ³)	SCR 脱硝 效率/%	SCR/SNCR 联合 脱硝效率/%
100	450	0.77	27	328	1.197	96	81	84.67
80	602	0.77	30	420	1.245	86	77.1	85.71
50	772	0.77	33	515	1.304	69	79	87.56

3.2 臭氧联合脱硝技术应用

宋刚等^[67]对某 300 MW 循环流化床锅炉进行了 SNCR+臭氧联合脱硝技术的试验研究。研究表明, 臭氧氧化脱硝在 0~40% 负荷范围内脱硝率达到 80% 左右, 当负荷继续上升, 炉内温度也会随之上升, 当达到 SNCR 脱硝所需要的温度时, 单凭 SNCR 技术脱硝效率同样也能达到 80%。但负荷继续上升时, 燃烧温度过高, 导致氮氧化物急剧增加, 此时就需要同时采用这两种方式来提高机组脱硝效率。SNCR+臭氧氧化联合脱硝一方面能够解决 SNCR 技术导致的氨逃逸过高的问题, 另一方面, 当床温过高时, 仅靠 SNCR 难以满足脱硝要求, 此时联合脱硝就能弥补这个不足^[68]。

臭氧辅助 SCR 脱硝在 250 °C 时脱硝效率从改造前的 56.84% 提高到改造后的 88.25%。通常在 100~250 °C 内, NO_x 的氧化效率相对较高, 而臭氧在温度逐渐上升的过程中会开始分解, 所以其利用率会下降, NO_x 的转化率随之降低^[69]。唐海荣^[70]

对某 200 MW 燃煤机组采用“SNCR+SCR+臭氧氧化”三种脱硝方式进行联合改造。通过前期 SNCR+SCR 的联合脱硝, 在 50~75% 负荷内, 成功将臭氧反应器入口的 NO_x 浓度降低至 80~140 mg/Nm³。当锅炉负荷过低时, SNCR 和 SCR 脱硝效率出现严重下降, 可以通过增加臭氧投加量来提高尾部的脱硝效率, 补足二者的效率缺口, 此时臭氧脱硝系统出口 NO_x 浓度可以降低至 50 mg/Nm³ 以下, 且能够保持稳定。

4. 结论

双碳目标下, 燃煤机组参与深度调峰是推动构建新型电力系统的重要举措。此时燃煤电厂低负荷运行已成为常态, 本文总结分析了燃煤机组在低负荷下分别进行 SCR、SNCR 以及联合脱硝技术改造的原理与应用效果, 主要结论如下:

(1) SCR 脱硝系统进行高性能宽温脱硝催化剂替代和智能精细化喷氨是实现 SCR 优化运行的趋势, 值得关注的是电热合金包埋的新型宽温催化剂在烟气温度低至 100 °C 显示出较高的脱硝性能和抗水稳定性。在提高烟气温度的改造方案中, 尾部烟气加热技术能够满足 15% 负荷下的氮氧化物排放要求, 但其运行成本过高; 适应性最广的是烟气旁路技术, 其安装简单, 便于控制; 未来有潜力的是流量置换技术, 能够结合给水和热水再循环两种技术, 能够满足锅炉在全负荷下的脱硝要求, 但对直流锅炉有限制, 实际应用中可根据机组条件进行选择。

(2) SNCR 脱硝系统改造方案中烟气再循环能够有效降低 NO_x 排放浓度, 但增加了系统复杂性和能耗; 喷枪调整可改善燃烧过程的稳定性和还能降低 NO_x 排放, 但需要精确的调整和监测; 宽温助燃剂可以针对锅炉不同条件调整反应温度, 提高脱硝效率。

(3) 采用多种烟气脱硝技术的联合方法可以有效增强低负荷下燃煤机组的脱硝效率。其中, SCR+SNCR 联合脱硝技术在循环流化床锅炉中取得了显著成效。在机组负荷为 30% 和 40% 时, 脱硝效率分别提高了 61.6% 和 36.4%, 满足了 NO_x 排放的要求。在煤粉锅炉中采用联合脱硝技术不仅可以提高脱硝效率, 还能降低投资成本并减少设备堵塞的风险。此外, 当使用臭氧氧化技术与 SNCR 联合脱硝技术时, 可在机组负荷超过 90% 时弥补 SNCR 脱硝能力的不足, 从而实现 NO_x 超低排放。同时, 臭氧氧化技术分别与二者联合脱硝时, 可以充分发挥各自的优势, 提高脱硝效率, 并增强机组的负荷适应性。

参考文献(References):

- [1] WANG G, DENG J, ZHANG Y, et al. Air pollutant emissions from coal-fired power plants in China over the past two decades[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140326.
- [2] WU Y, XU Z, LIU S, et al. Emission characteristics of particulate matter from coal-fired power units with different load conditions[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2022, 233(11): 447.
- [3] YIN J, LIU M, WU Q, et al. Optimized flue gas denitrification control strategy to enhance SCR performance during load-cycling transient processes in coal-fired power plants[J]. *Fuel*, 2023, 344: 127837.
- [4] 王煜伟. 1000 MW 塔式锅炉全负荷脱硝技术研究与应用[J]. *热力发电*, 2020, 49(02): 104-109.
WANG Yuwei. Research and application of full load denitrification technology for 1000 MW tower boiler[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49 (02) : 104-109.
- [5] 吴朝刚, 周旭, 孟庆松, 等. 440 t/h CFB 锅炉低氮改造试验研究[J]. *山东电力技术*, 2023, 50(05): 72-76.
WU Chaogang, ZHOU Xu, MENG Qingsong, et al. Experimental study on low nitrogen retrofit of 440 t/h CFB boiler [J]. *Shandong Electric Power Technology*, 2023, 50 (05): 72-76.
- [6] CHENG G, ZHANG C. Desulfurization and denitrification technologies of coal-fired flue gas[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(2).
- [7] 胡琦. SCR与SNCR混合脱硝技术在燃煤电厂的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2011: 34-39.
HU Qi. Application of SCR and SNCR hybrid denitration technology in coal-fired power plants[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011: 34-39.
- [8] 潘昊. 煤粉锅炉污染物限值排放综合控制系统研究[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(02): 115-122.
PAN Hao. Research on integrated control system of pollutant limit emission of pulverized coal boiler[J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26 (02): 115-122.
- [9] GAO X, WANG B, YUAN X, et al. Optimal design of selective catalyst reduction denitrification system using numerical simulation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 909-918.
- [10] LIN D, ZHANG L, LIU Z, et al. Progress of selective catalytic reduction denitrification catalysts at wide temperature in carbon neutralization[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2022, 10: 946133.
- [11] TI S, KUANG M, WANG H, et al. Experimental combustion characteristics and NO emissions at 50% of the full load for a 600-MWe utility boiler: Effects of the coal feed rate for various mills[J]. *Energy*, 2020, 196: 117128.
- [12] 魏永林, 陈红萍, 侯欣辛, 等. Fe-Mn/TiO₂ 低温 NH₃-SCR 脱硝催化剂的 SO₂ 中毒机理[J]. *功能材料*, 2021, 52(4): 4132-4139, 4146.
WEI Yonglin, CHEN Hongping, HOU Xinxin, et al. SO₂ poisoning mechanism of Fe-Mn/TiO₂ low temperature NH₃-SCR denitrification catalyst[J]. *Functional Materials*, 2021, 52(4): 4132-4139, 4146.

- [13] 彭以以, 孙振动, 梅博伦, 等. 宽温脱硝催化剂工业应用研究[J]. 河南化工, 2023, 40(7): 22-24.
PENG Yiyi, SUN Zhendong, MEI Bolun, et al. Industrial application research of wide temperature denitration catalyst[J]. Henan Chemical Industry, 2023, 40(7): 22-24.
- [14] 侯环宇, 田京雷. 钒系和锰系中低温脱硝催化剂的应用研究[J]. 河北冶金, 2021(8): 21-24+38.
HOU Huanyu, TIAN Jinglei. Application status of vanadium and manganese denitration catalysts[J]. Hebei Metallurgy, 2021(8): 21-24+38.
- [15] GONG P, XIE J, FANG D, et al. Novel heterogeneous denitrification catalyst over a wide temperature range: Synergy between CeO₂, ZrO₂ and TiO₂[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 356: 598-608.
- [16] LI W, DU X, LI Z, et al. Electrothermal alloy embedded V₂O₅-WO₃/TiO₂ catalyst for NH₃-SCR with promising wide operating temperature window[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 159: 213-220.
- [17] 赵俊平, 马子然, 赵春林, 等. 330 MW机组宽温脱硝催化剂布置方案设计与运行效果分析[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(6): 51-56.
ZHAO Junping, MA Ziran, ZHAO Chunlin, et al. Design of wide temperature De-NO_x catalyst and operation effect analysis for a 330 MW coal-fired power plant[J]. Power Technology and Environmental Protection, 2021, 37(6): 51-56.
- [18] 马子然, 周佳丽, 马静, 等. 燃煤电厂脱硝催化剂宽负荷运行的现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8415-8431.
MA Ziran, ZHOU Jiali, MA Jing, et al. Current status and development of wide-load operation of SCR catalysts in coal-fired power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8415-8431.
- [19] 李文华. 660 MW超临界机组SCR脱硝优化调整[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(S1): 184-189.
LI Wenhua. Optimal adjustment of SCR denitrification for 660 MW supercritical unit[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(S1): 184-189.
- [20] 刘国富. 基于多运行参数耦合的SCR精细化喷氨控制系统及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2021: 6-7.
LIU Guofu. An intelligent control technology for the oriented injection of ammonia into of ammonia into SCR system and its application. Nanjing: Southeast University, 2021: 6-7.
- [21] 杨宇. 深度调峰下脱硝系统喷氨优化试验[J]. 吉林电力, 2019, 47(02): 52-56.
YANG Yu. Under deep peak regulation optimization test of ammonia injection in denitrification system[J]. Jilin Electric Power, 2019, 47(02): 52-56.
- [22] 金理鹏, 何金亮, 方朝君, 等. SCR脱硝精准喷氨控制的试验研究与应用[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 382-387.
JIN Lipeng, HE Jinliang, FANG Zhaojun, et al. Experimental research and application for SCR accurate ammonia injection control[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 382-387.
- [23] 彭志福. 基于负荷系数的全时段喷氨调整方法[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2022, 27(3): 58-64.
PENG Zhifu. Full-time ammonia injection adjustment method based on load coefficient[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, 2022, 27(3): 58-64.
- [24] 唐潇, 徐仁博, 张发捷, 等. SCR脱硝氨转化、吸附及飞灰氨脱除技术研究现状[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(04): 75-85.
TANG Xiao, XU Renbo, ZHANG Fajie, et al. Research status of SCR ammonia conversion, adsorption and ammonia removal technology from fly ash[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(04): 75-85.
- [25] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报, 2023, 1-22.
OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LV Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 1-22.
- [26] ZHU S, HUI J, LYU Q, et al. Experimental study on pulverized coal combustion preheated by a circulating fluidized bed: Preheating characteristics for peak shaving[J]. Fuel, 2022, 324: 124684.
- [27] ZHU S, LYU Q, ZHU J. Experimental investigation of NO_x emissions during pulverized char combustion in oxygen enriched air preheated with a circulating fluidized bed[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(5): 1388-1398.
- [28] 陈世田, 王世杰, 吴芳, 等. 冶金工业废渣对燃煤助燃脱硝的影响[J]. 煤炭转化, 2015, 38(02): 83-87.
CHEN Shitian, WANG Shijie, WU Fang, et al. The effect of metallurgical industrial waste residue on coal-fired combustion assisted denitration[J]. Coal Conversion, 2015, 38(02): 83-87.

- [29] 林国辉, 姜国强, 赵丽, 等. 中储式制粉系统燃煤锅炉低氮燃烧技术改造与优化[J]. 能源工程, 2023, 43(02): 69-74.
LIN Guohui, JIANG Guoqiang, ZHAO Li, et al. Retrofitting and optimization of low NO combustion technology for coal-fired boiler with intermediate storage bunker coal pulverized system[J]. Energy Engineering, 2023, 43(02): 69-74.
- [30] 闫碧晨. 石油焦和煤混烧过程中NO生成与控制规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023: 41-43.
YAN Bichen. NO emission and control during co-combustion of coal and petroleum coke[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023: 41-43.
- [31] DU H, LI Z, LIU Z, et al. Industrial measurement of combustion and NO_x formation characteristics on a low grade coal-fired 600 MWe FW down-fired boiler retrofitted with novel low-load stable combustion technology[J]. Fuel. 2022, 321: 123926.
- [32] 李红兵, 刘一, 周棋. 某600 MW超临界锅炉综合降排烟温度改造方案及节能效果[J]. 电站系统工程, 2023, 39(04): 9-13+17.
LI Hongbing, LIU Yi, ZHOU Qi. Scheme and energy-saving effect of exhaust temperature reduction modification for 600 MW supercritical boiler[J]. Power System Engineering, 2023, 39(04): 9-13+17.
- [33] 邹祥波, 席剑飞, 伍宇鹏. 省煤器分级在提升700 MW燃煤机组SCR脱硝系统投运率的应用研究与实践[J]. 锅炉技术, 2020, 51(1): 65-69.
ZOU Xiangbo, XI Jianfei, WU Yupeng. Application research and practice of classification transformation of economizer in increasing the operation rate of SCR denitration system of 700 MW coal-fired unit[J]. Boiler Technology, 2020, 51(1): 65-69.
- [34] 龚明烨. 锅炉省煤器分级改造技术研究[J]. 科学技术创新, 2020(2): 186-187.
GONG Mingye. Research on classification transformation technology of boiler economizer[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(2): 186-187.
- [35] 高伟, 刘明, 赵永亮, 等. 采用烟气旁路的燃煤机组脱硝系统变负荷过程的经济性分析[J]. 能源环境保护, 2023, 37(1): 13-20.
GAO Wei, LIU Ming, ZHAO Yongliang, et al. Economic analysis of denitration system in a coal-fired power with flue gas bypass during load cycling processes[J]. Energy Environmental Protection, 2023, 37(1): 13-20.
- [36] 周晓韡, 花桥建, 王安, 等. 1000 MW机组深度调峰锅炉全负荷脱硝优化改造技术研究[J]. 电站系统工程, 2021, 37(1): 57-60.
ZHOU Xiaowei, HUA Qiaojian, WANG An, et al. Study on optimization and transformation technology of SCR system in deep peak-shaving boiler for 1000 MW units[J]. Power System Engineering, 2021, 37(1): 57-60.
- [37] 洪军, 刘志刚, 周科, 等. 660 MW机组超临界锅炉炉内活性调峰技术试验研究[J]. 锅炉技术, 2021, 52(02): 55-59.
HONG Jun, LIU Zhigang, ZHOU Ke, et al. Experimental study on the technology of enhancing the flexibility of a 660 MW supercritical boiler[J]. Boiler Technology, 2021, 52(02): 55-59.
- [38] 王廷焱, 龚德鸿, 蒋松, 等. 低负荷下SCR脱硝系统入口烟道补燃特性的数值模拟研究[J]. 电站系统工程, 2022, 38(02): 1-4.
WANG Tingyi, GONG Dehong, JIANG Song, et al. Numerical simulation of supplementary combustion properties in entrance flue of SCR denitration system of low load[J]. Power System Engineering, 2022, 38(02): 1-4.
- [39] 田舜尧. 基于秸秆补燃的SCR低负荷投运及提高再热汽温的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 46-47.
TIAN Shunyao. Research on low-load SCR operation and reheat steam temperature enhancement based on straw after-burning[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 46-47.
- [40] 祝志福, 宋国辉, 朱景权, 等. 烟道补燃宽负荷脱硝技术的研究与应用[J]. 动力工程学报, 2019, 39(11): 870-875.
ZHU Zhifu, SONG Guohui, ZHU Jingquan, et al. Research and application of the wide-range De-NO_x technology with flue gas reheating device[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(11): 870-875.
- [41] 胡清. 燃煤电厂全负荷脱硝技术的应用研究[J]. 能源与节能, 2020(7): 67-68+76.
HU Qing. Research on the application of full-load denitration technology in coal-fired power plant[J]. Energy and Energy Conservation, 2020(7): 67-68+76.
- [42] 王克, 陈艺, 汤陈怀. 630 MW超临界机组锅炉全负荷脱硝技术路径选型研究[J]. 特种设备安全技术, 2022(02): 16-20.
WANG Ke, CHEN Yi, TANG Chenhuai. Research on full load denitration technology path selection of 630 MW

- supercritical unit boiler[J]. Safety Technology of Special Equipment, 2022(02): 16-20.
- [43] 舒凯. 火力发电厂宽负荷脱硝技术初探[J]. 电力设备管理, 2020, 45(06): 125-126+165.
SHU Kai. Preliminary study on wide-load denitration technology in thermal power plant[J]. Electric Power Equipment Management, 2020, 45(06): 125-126+165.
- [44] 钟耕垒, 闫金山, 王珊, 等. 全负荷脱硝在亚临界锅炉的研发应用[J]. 中国设备工程, 2022, 512(23): 137-140.
ZHONG Genglei, YAN Jinshan, WANG Shan, et al. Research and application of full load denitrification in subcritical boiler[J]. China Plant Engineering, 2022, 512(23): 137-140.
- [45] 徐嘉叶, 朱晓磊, 李剑宁, 等. 全负荷脱硝技术的应用与分析[J]. 动力工程学报, 2020, 40(07): 580-585+604.
XU Jiaye, ZHU Xiaolei, LI Jianing, et al. Theoretical analysis and application of a denitration technology over the whole load range[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(07): 580-585+604.
- [46] 蒋蓬勃. 超超临界深度调峰机组锅炉全时段脱硝技术研究[J]. 电站系统工程, 2023, 39(01): 77-80+84.
JIANG Pengbo. Research on boiler full-time denitration technology of USC deep peak regulation unit[J]. Power System Engineering, 2023, 39(01): 77-80+84.
- [47] HAN X, CHEN N, YAN J, et al. Thermodynamic analysis and life cycle assessment of supercritical pulverized coal-fired power plant integrated with No.0 feedwater pre-heater under partial loads[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233: 1106-1122.
- [48] 曹建文. 超超临界机组零号高加系统的优化改造[J]. 电站辅机, 2021, 42(02): 1-6.
CAO Jianwen. Optimization of No.0 high pressure heater system of ultra-supercritical unit[J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2021, 42(02): 1-6.
- [49] 徐民. 超超临界锅炉宽负荷脱硝改造方案对比分析[J]. 发电设备, 2022, 36(06): 433-436.
XU Min. Comparative and analysis on wide-load denitration retrofit scheme for an ultra-supercritical boiler[J]. Power Equipment, 2022, 36(06): 433-436.
- [50] 李英俊. 600 MW超临界机组全负荷脱硝探讨[J]. 电力设备管理, 2019, 36(09): 66-68.
LI Yingjun. Discussion on full-load denitrification of 600 MW supercritical unit[J]. Electric Power Equipment Management, 2019, 36(09): 66-68.
- [51] 李沙. 600 MW机组锅炉低负荷脱硝投运改造工程实践[J]. 锅炉技术, 2019, 50(01): 64-69.
LI Sha. The reformation project practice for low-load denitrification put into operation in 600 MW unit boiler[J]. Boiler Technology, 2019, 50(01): 64-69.
- [52] 刘沛奇, 王建峰, 李乾坤, 等. 600 MW级燃煤机组宽负荷脱硝改造方案论证及评价[J]. 锅炉技术, 2021, 52(04): 69-73.
LIU Peiqi, WANG Jianfeng, LI Qiankun, et al. Demonstration and evaluation of wide-load denitration transformation scheme of 600 MW coal-fired unit[J]. Boiler Technology, 2021, 52(04): 69-73.
- [53] 刘军, 汪瑞平, 宫恩蒙. 基于烟气再循环的循环流化床锅炉SNCR-SCR联合脱硝系统设计[J]. 电力学报, 2022, 37(4): 318-323.
LIU Jun, WANG Ruiping, GONG Enmeng. Design of SNCR-SCR combined denitration system for circulating fluidized bed boiler based on flue gas recirculation[J]. Journal of Electric Power, 2022, 37(4): 318-323.
- [54] YOON S H, KIM S J, BAEK G U, et al. Operational optimization of air staging and flue gas recirculation for NO_x reduction in biomass circulating fluidized bed combustion[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 387: 135878.
- [55] 张思海, 张双铭, 张俊杰, 等. 330 MW亚临界CFB锅炉烟气再循环深度调峰运行性能研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(1): 291-298.
ZHANG Sihai, ZHANG Shuangming, ZHANG Junjie, et al. Performance research on deep peak regulation with flue gas recirculation in a 330 MW subcritical CFB boiler[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1): 291-298.
- [56] 刘彬, 吴喜军, 王海涛. 喷枪对SNCR工艺脱硝效率的影响[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(S2): 308-312.
LIU Bin, WU Xijun, WANG Haitao. Effect of spray gun on the denitration efficiency of SNCR system[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(S2): 308-312.
- [57] 辛胜伟, 韩平, 段彩丽, 等. 300 MW机组循环流化床锅炉选择性非催化还原系统模拟及优化研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 122-129.
XIN Shengwei, HAN Ping, DUAN Caili, et al. Simulation and optimization of SNCR system of 300 MW circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 122-129.
- [58] 吴小勇, 陈喆, 曾南. 浅谈循环流化床脱硝SNCR喷枪布置优化[J]. 中国井矿盐, 2021, 52(03): 26-28.
WU Xiaoyong, CHEN Zhe, ZENG Nan. Fluidized bed denitration brief discussion on optimization of SNCR

- spray lance arrangement in circulating[J]. *China Well and Rock Salt*, 2021, 52(03): 26-28.
- [59] ZHAO Q, ZHANG Z, RUNA A, et al. Application of SNCR denitration technology in circulating fluidized bed boiler[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 804(4): 042021.
- [60] LIAO W, ZHANG X, CHEN J B, et al. There using of waste bio-oil as additive on enhanced urea-based selective non-catalytic reduction denitrification[J]. *Waste Management*, 2023, 158.
- [61] 张涛. 运城电厂600 MW火电机组脱硝改造研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2019: 15-16.
- ZHANG Tao. Study on denitrification of 600 MW thermal power unit in Yuncheng power plant[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019: 15-16.
- [62] 郭威. 135 MW 燃煤机组深度脱硝改造技术方案探讨[J]. *环境与发展*, 2019, 31(11): 64-66.
- GUO Wei. Discussion on the technical scheme of deep denitration transformation of 135 MW coal-fired power unit[J]. *Environment and Development*, 2019, 31(11): 64-66.
- [63] 孙尊强, 舒喜, 马修元, 等. 小型热电厂脱硝超低排放改造技术路线研究[J]. *电力科技与环保*, 2020, 36(06): 23-26.
- SUN Zunqiang, SHU Xi, MA Xiuyuan, et al. Research on technical route of denitrification ultra-low emission transformation in small thermal power plant[J]. *Power Technology and Environmental Protection*, 2020, 36(06): 23-26.
- [64] 胡刚, 刘伟. 大型CFB锅炉的SNCR-SCR耦合脱硝技术应用[J]. *电力学报*, 2022, 37(04): 336-342.
- HU Gang, LIU Wei. Application and discussion of SNCR-SCR coupling denitrification technology in large CFB boiler[J]. *Journal of Electric Power*, 2022, 37(04): 336-342.
- [65] 周英贵. 大型电站锅炉 SNCR/SCR 脱硝工艺试验研究、数值模拟及工程验证[D]. 南京: 东南大学, 2016: 181-182.
- ZHOU Yinggui. Hybrid SNCR/SCR denitrification technology in large thermal power plant boiler: experimental study, numerical simulation and engineering validation[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 181-182.
- [66] 张峰. 130 t/h煤粉炉脱硝技术改造运行分析[D]. 南京: 东南大学, 2019: 40-41.
- ZHANG Feng. Analysis of denitrification retrofits of 130 t/h coal-fired boiler[D]. Nanjing: Southeast University, 2019: 40-41.
- [67] 宋刚, 陈燕辉, 庄露凯. 氧化脱硝技术在CFB机组深度调峰中的应用[J]. *电力学报*, 2022, 37(04): 329-335.
- SONG Gang, CHEN Yanhui, ZHUANG Lukai. Application of oxidation denitrification technology in deep peaking shaving of CFB units[J]. *Journal of Electric Power*, 2022, 37(04): 329-335.
- [68] 雷雨, 刘洋, 牛艳青, 等. SNCR/烟气再循环协同脱硝技术研究[J]. *洁净煤技术*, 2019, 25(03): 110-115.
- LEI Yu, LIU Yang, NIU Yanqing, et al. Research on SNCR/flue gas recycling synergistic denitration technology[J]. *Clean Coal Technology*, 2019, 25(03): 110-115.
- [69] 刘美艺. 臭氧辅助SCR低温烟气脱硝技术的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020: 22-24.
- LIU Meiyi. Study on NO_x removal from flue gas by ozone assisted low temperature SCR technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020: 22-24.
- [70] 唐海荣. 臭氧耦合催化氧化脱除烟气中NO_x和Cl-VOCs的试验与机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023: 125-128.
- TANG Hairong. Experimental and mechanism investigation on ozonation coupled catalytic oxidation for removal of NO_x and Cl-VOCs in flue gas[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023: 125-128.