深度空气分级模式下煤氨混燃 NO_x 生成 特性的试验研究

崔立明1,李雄威2,张仪祥3,张 素3,初 伟4,李 明4,谭厚章3,王学斌3

(1.中国神华能源股份有限公司,北京 100011; 2.国家能源投资集团有限责任公司,北京 100011; 3.热流科学与工程教育部重点实验室 (西安交通大学),陕西西安 710049; 4.烟台龙源电力技术股份有限公司,山东烟台 264006)

摘 要:在全球碳减排的背景下,氮作为一种廉价、安全、易储存和运输的零碳燃料越来越受到关注。 利用氨来替代煤炭燃烧发电,是促进清洁能源消纳、减少碳排放的重要途径。氨热值低、燃烧速度慢和 NO_x 排放高是在燃煤锅炉中掺烧氨时所面临的难点。在两段式沉降炉反应系统开展了深度空气分级 条件下煤氨混燃的试验,研究了温度、分离二次风比、掺氨方式对煤氨混合燃烧时 NO_x 生成特性的影 响。试验结果表明,一次风掺氨时,NO 排放随温度升高单调增加,在1200 ℃ 后排放急剧升高;NO 随 分离二次风比的增加先降低后上升,最佳分离二次风比在30% 左右。分离二次风掺氨时,由于 NH₃ 的 SNCR 效应,NO 排放在1100 ℃ 以下都较低,低掺烧下甚至与纯煤燃烧相当,随着分离二次风 比的增加,NO 排放先下降后上升,最佳分离二次风比为20%。试验证明通过调整合适的反应温度和 配风可以在掺烧比低于20% 时控制煤氨混燃 NO 排放与纯煤燃烧相比不增加,且 CO 排放和飞灰含碳 量都低于纯煤燃烧。

关键词:氨;掺烧;空气分级;掺烧方式;NO_x

中图分类号: TQ53; TK114 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2025)04-0078-07

Experimental study on NO_x formation characteristics of coal and ammonia co-firing in deep air staging mode

CUI Liming¹, LI Xiongwei², ZHANG Yixiang³, ZHANG Su³, CHU Wei⁴, LI Ming⁴, TAN Houzhang³, WANG Xuebin³ (1. China Shenhua Energy Company Limited, Beijing 100011, China; 2. CHN Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 3. MOE Key

Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;

4. Yantai Longyuan Power Technology Co., Ltd., Yantai 264006, China)

Abstract: Against the backdrop of global carbon emission reduction, ammonia is receiving increasing attention as a cheap, safe, easy-tostore and transport zero-carbon fuel. Utilizing ammonia to replace coal combustion for power generation is an important way to reduce carbon emissions. The combustion characteristics of ammonia with low calorific value, slow combustion rate and high NO_x emission are the difficulties that need to be faced when blending ammonia in coal-fired boilers. In this paper, the experiment of coal-ammonia co-firing under the condition of deep air classification was carried out in a two-stage drop tube furnace reaction system. The effects of temperature, separated secondary air ratio and ammonia blending method on the combustion characteristics of coal-ammonia co-firing were studied. The experimental results show that when ammonia is added to the primary air, NO emissions increase monotonically with temperature, and sharply increase after 1 200 °C. NO first decreases and then increases with the increase of the separated secondary air, and the optimal separated secondary air ratio is around 30%. When ammonia is added to the separated secondary air, due to the SNCR effect of NH₃, NO emissions are lower below 1 100 °C, which is comparable to pure coal combustion under low co-firing conditions. As the separated secondary air ratio increases, NO emissions first decrease and then increase, and the optimal separated secondary air ratio is 20%.

收稿日期:2025-01-12;策划编辑:白娅娜;责任编辑:钱小静 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CBJ25011201						
基金项目:国家能源投资集团合作资助项目 (HT/YTLY-GJ-JF);科技部重点研发计划资助项目 (2022YFB4100500)						
作者简介:崔立明(1973—),女,河北石家庄人,高级工程师。E-mail: cuilm@shenhua.cc						
通讯作者: 王学斌(1984—),男,山东潍坊人,教授,博士生导师,博士。E-mail: wxb005@mail.xjtu.edu.cn	lei ki					
引用格式:崔立明,李雄威,张仪祥,等.深度空气分级模式下煤氨混燃 NO _x 生成特性的试验研究 [J].洁净煤技术, 2025,	- 22					
31(4):78–84.	1.59					
CUI Liming, LI Xiongwei, ZHANG Yixiang, et al. Experimental study on NO _x formation characteristics of coal and						
ammonia co-firing in deep air staging mode[J].Clean Coal Technology, 2025, 31(4): 78–84.	田公					

Experimental results have shown that appropriate air distribution can control the NO emissions of coal ammonia co combustion with a co combustion ratio below 20% without increasing the ratio of pure coal combustion, and the CO emissions and fly ash carbon content are lower than those of pure coal combustion. Therefore, NH_3 can be used as an alternative fuel to reduce CO_2 emissions from coal-fired power plants.

Key words: ammonia; co-firing; air classification; blending method; NO_x

0 引 言

随着经济的快速发展和人口的激增,全球一次 能源消费急剧增加,气候变化日益严重。为应对气 候变化,响应《巴黎协议》,全球已有 120 多个国 家和地区宣布了到 2050 年实现碳中和的目标^[1]。由 于政府对能源和二氧化碳排放的监管越来越严格, 寻找低碳和零碳能源,开发旨在减少能源消耗有关 问题的新技术成为大多数国家的迫切需要。在所有 零碳燃料的选择中,氢和氨被商业评估为有发展为 未来燃料的潜力^[2]。氨具有普通燃料所需的廉价、 安全、易获取、易储存、低污染等特性^[3]。作为一 种氢载体,氨的质量载氢能力高达17.6%,体积载 氢效率是氢气的150%^[4]。相比较于氢气在常压下的 极低液化温度(-283℃),氨在-33℃就能够被液 化^[5](或者在常温下,9个大气压)。氨的来源广 泛,可通过化石燃料、可再生能源和生物质生产, 是世界上第二大商业化化学品,全球每年生产 1.8 亿 t,具有完备的生产、储存和运输设施,大大 降低了运输成本和相关的开发成本^[6]。从能源角度 看,氨的完全燃烧产物只有氮气和水,不仅可替代 部分化石能源为发动机提供清洁燃烧,而且可替代 部分煤炭为电力系统提供清洁燃料。

煤炭燃烧产生的 CO₂ 是温室气体的主要来源之一。作为全球最大碳排放国之一,中国碳核算数据 库(CEADs)有效数据显示^[7],2021年中国碳排放 累计 110 亿 t,约占全球碳排放量的 28.87%,其中 电力行业排放 51 亿 t,占比高达 46.37%。燃煤电站 作为新型电力系统中基础支撑性和调节型性发电主 体,利用氨来部分替代煤炭燃烧发电,是减少碳排 放、促进可再生能源消纳的有效途径。但由于氨的 热值较低、燃烧速度慢、可燃性范围窄、燃料含氮 量较高,在燃煤锅炉中掺氨燃烧仍然存在许多问 题^[8-10]。

日本等发达国家最早开展燃煤锅炉掺氨的研究,YAMAMOTO等^[11]在760kW 卧式炉上开展了20% 掺氨燃烧试验,研究发现侧墙注入氨气的位置越靠近燃烧器,炉膛出口 NO_x 排放越低。TAMURA^[12]和 NAGATANI^[13]分别在 1.2 MW 和 10 MW 平台对 IHI 公司开发的新型煤粉掺氨燃烧器进行了测试,

在掺氨比 20% 和保证稳燃前提下实现了 NO_x 排放 与纯煤相当。YOSHIZAKI 等^[14] 在 Chugoku 电厂的 156 MW 燃煤机组进行了 0.6%~0.8% 掺氨尝试,试 验发现混合燃烧前后的 NO, 体积分数差为-8×10⁻⁶ 至+7×10⁻⁶,这项研究证实氨可以作为一种燃料用于 发电,且不会对环境造成重大影响。最近, JERA 与 IHI 联手在爱知县碧南电厂完成了 1GW 机组的 20% 掺氨试验,乃是当前国际上机组容量最大的掺 氨试验^[15]。近年来我国也加强了火电机组耦合绿氨 的工业化研究,马仑等^[16]在 20 KW 沉降炉上开展 了煤氨掺烧的数值模拟研究,结果表明氨的混入位 置、过量空气系数对于 NO 的最终排放影响显著。 牛涛等^[17] 在 40 MW 燃煤中试平台上完成了 0~25% 混氨比例的氨煤混合燃烧试验,研究发现通过空气 分级和控制锅炉运行氧量能显著降低氨煤混合燃烧 的 NO_x 排放。皖能集团在完成了 300 MW 火电机组 掺氨 10%~35% 到的工业试验, 实现 100 MW 功率 下掺氨比例 35% 工况下的锅炉安全平稳运行^[18]。台 山电厂在 500、300 MW 等多个负荷工况下,实现了 掺氨比 10% 的稳定燃烧, NO_x 增加幅度可控制在 20 mg/m³以内^[19]。

综上所述,在大型试验炉上进行燃煤掺氨燃烧 研究多为技术可行性的点火工况试验,缺乏技术原 理和核心参数规律研究。鉴于此,笔者借助两段式 沉降炉反应系统开展了深度空气分级条件下煤氨混 燃的试验,并对部分工况进行相关的数值模拟研 究,讨论了空气分级、燃烧温度、掺氨方式等对于 氮氧化物排放的影响,以期为氨煤混烧技术的推广 提供有效的数据支撑。

1 试验系统与研究方法

燃煤掺混氨燃烧试验在1台两段式加热燃烧炉 系统上开展,具体如图1所示。整个试验系统分为 给粉系统、炉体部分、供气系统、采样系统、烟气 处理系统。在系统中,2台串联高温电炉采用不锈 钢法兰连接,并采用耐火石墨填料密封,以保证密 闭性。将上炉和下炉分别命名为"主燃区"和"再 燃区"。2个炉的最高温度都是1500℃。采用内径 为50mm、长度为1200mm的氧化铝管作为2个 炉的反应器。炉膛温度经过平均停留时间为 (5±1.5)s的几次测试,使用K型热电偶从炉的顶 部到底部测量实际温度,温度曲线如图1所示。 TANIGUCHI等^[20]使用的沉降炉具有相对较宽的试 验条件范围(高达1600℃),恒温区的温度误差 范围选择为±20℃,以此为参考,本文所使用的沉 降炉在较高温度下,上、下炉的恒温区的长度可达 400 mm。在低温下,上、下炉的测恒温区的长度可达 400 mm。试验过程中,煤粉通过给料系统从炉 顶进料,再由水冷探头引入主燃区,避免煤粉在炉 顶等温区外预热。煤粉的进料速率为(0.3±

0.05)g/min,各试验条件下的进料时间控制在8~ 10 min 间。氧化剂由 O₂与 Ar 按 1:4 混合而成, 其分成一次风、二次风和分离二次风,其中一次风 携带煤粉经水冷枪进入炉膛恒温区,二次风经水冷 枪与反应管内壁间的环形通道送入,并在恒温区进 口与一次风迅速混合。连接部分可注入再燃的分离 二次风,并在连接部分设计排气取样孔。由于氨气 具有腐蚀性,因此氨气的流量经由特制的氨质量流 量计控制其分别与一次风和分离二次风混合后送入 炉内进行燃烧。煤粉进入主燃区燃烧后,未燃尽的



Fig. 1 Two stage settling furnace experimental system

煤粉和氨在下炉膛内燃烧,粉煤灰经冷却水淬火, 最后由不锈钢板收集。在烟气排放管上设置有差压 表和烟气取样口,试验过程中炉内需保持由压力表 控制的-40~-100 Pa 的弱负压。试验中所有气体流 量由质量流量计(Sevenstar, CS200)控制,最大不 确定度为±1%F.S.。使用傅里叶红外烟气分析仪 (GASMET, FTIR Dx4000)测量尾部烟气成分,在烟 气分析仪读数稳定后 3 min 内记录 NO、NH₃和 CO 的平均值。每个工况进行 2 次平均重复测量。 NO 和 NH₃ 的最大相对不确定度小于 2%, CO 的最 大不确定度低于 5%。

试验中采用的煤为榆林烟煤,其工业分析和元 素分析信息见表 1。本文研究的所有试验工况中一 次风的动量基本保持不变,在一次风掺氨工况中, 与添加的 NH₃质量流量相同的一次空气被移到二次 风中。初始一次风流量为 300~400 mL/min, 分离 二次风占比在 0~50% 变化, 总的过量空气系数为 1.2, 与全尺寸锅炉的设置接近。燃烧温度(恒温区 壁温,由温控热电偶控制)为900~1300℃,主燃 区温度与再燃区温度保持一致。掺烧比例为 0~40%。氨气流量与总气量相比较小,所有工况下 的总的停留时间几乎不变。改变掺氨方式对于上下 段炉膛的停留时间有小幅度的影响,上段沉降炉的 停留时间为(2.1±0.15)s,下段沉降炉(2±0.1)s。 试验过程中首先升高炉温至试验工况,在根据工况 设计参数启动微量给粉机给入煤粉和二次风,当监 测仪器的氮氧化物数据稳定后迅速开启氨气气路。

表 1	煤的工业分析和元素分析
Table 1	Industrial and elemental analysis

工业分析/%				元素分析/%					Q _{net,ar} /
M _{ar}	FC _{ar}	A _{ar}	$V_{\rm daf}$	C _{ar}	$H_{\rm ar}$	$O^*_{ m ar}$	$N_{\rm ar}$	S _{ar}	(MJ \cdot kg ⁻¹)
7.5	26.1	44.36	45.84	34.35	2.39	9.7	0.63	1.08	12.34
注:*表示差减法。									

2 结果与讨论

2.1 温度的影响

试验研究了不同温度条件下掺烧比对氨煤混烧 过程中氮氧化物排放的影响,其中各工况下总空气 过量系数为 1.2 不变。如图 2a 所示,在一次风中掺氨 预混的条件下,随着温度的升高,NO体积分数单 调上升,1200 ℃工况下的 NO_x 排放体积分数约 1154×10⁻⁶,而1300 ℃下测得的 NO_x 排放体积分数 接近前者的 2 倍,由此可说明 1300 ℃下氨的氧化 反应极为敏感。由图 2b 可知,分离二次风掺氨的温 度低于 1 100 ℃ 时,煤氨掺烧的 NO 排放量较低, 甚至都低于纯煤燃烧。在 20% 掺烧比例下,温度 为 900、1 000 和 1 100 ℃ 时的 NO 的排放量分别为 365、214 和 252×10⁻⁶,然 而当温度高于 1 200 ℃ 时,NO_x 排放量显著增加,在 1 300 ℃ 时可高达 1 074×10⁻⁶。LYON 等^[21] 报道称,只有在 900 ~ 1 100 ℃ 的特定温度范围内,使用 NH₃ 可以增强火 焰中的 NO_x 还原。当温度低于 850 ℃ 时,NH₃ 分 解效率降低因此有 NH₃ 泄露的风险。而当温度超过 1 200 ℃ 时,NH₃ 氧化速度的加快会限制其本身还 原 NO 的路径。此外温度升高提高了煤炭的燃烧速 率,因而未燃碳的含量随温度显著减少。注意当温 度较高时,碳消耗的增多也会使煤燃料中燃料 N 转 化为 NO_x 的比例增加。



图 2 温度对 NO_x 排放的影响



2.2 分离二次风比的影响

分级燃烧被广泛应用来降低燃煤锅炉中 NO_x 的 排放,因为它可以创造一个还原环境,抑制了 NO 的生成和强化了含氮原子团 NHi、CN 转化为 N₂ 的反应^[22]。因此在煤氨掺烧时考虑应用分级燃烧 技术来降低 NO_x 的排放。图 3a 显示 1 200 ℃下, NH3 由一次风口注入主燃区时, NO 排放随分离二 次风比的变化趋势。从图 3a 中可以明显看到,一次 风混氨后的 NO 排放明显高于纯煤燃烧,但随着分 离二次风比的增加,煤氨混烧与煤燃烧排放的 NO 差值越来越小, 在分离二次风比达到 30% 以 后,低掺氨比工况的 NO 排放与煤燃烧相当。图 3b 显示分离二次风掺氨时 NO 随分离二次风比的变化 趋势与一次风掺氨有很大不同。NO 排放随分离二 次风比的增加呈先降低后升高的趋势,在分离二次 风比接近 20% 时达到最低值。这是因为 NH, 从分 离二次风附近注入的位置氧含量较低,可以有效抑 制燃料型 NO_x的生成,且 NH₃的 SNCR 效应在下 炉的低 O2 和高 NOx 环境中效果突出。但当分离二 次风比例太大时,低氧环境被破坏,NO 生成增 多。ISHIHARA 等^[23] 也发现,通过选择合适的分级 风比例,可以使得煤氨掺烧时的 NO 排放低于纯煤 燃烧时的 NO 排放。



Fig. 3 The impact of the third wind ratio on NO_x

图 4 显示了 2 种掺氨方式下尾部烟气中 NO 和 CO 随掺氨比的变化趋势。一次风掺氨时, NO 排放 随掺氨比增大单调增长, 而 CO 排放则单调下降。 这是因为煤炭输入量减少,且氨气氧化过程中会产 生大量 H 和 OH 自由基,可以促进反应式 CO + OH → H + CO₂ 的发生因而使得掺混燃烧时产生的 CO 小于纯煤燃烧高的原因是,从再燃区注入的氨气 比未燃尽的煤粉更先与 NO 和 O₂ 反应,导致再燃 效果减弱。随着氨气比例增大,氨氧化释放的自由 基对反应的强化效果超过了抢氧效应,因此 CO 排 放又开始逐渐下降。试验过程中,不同掺氨方式及 0~40% 不同掺氨比的工况下都未检测到明显 NH₃ 逃逸。







2.3 掺氨方式的影响

图 5 显示了 1 200℃ 炉温及最佳配风条件下氨 气不同掺混燃烧方式对煤和氨气混合燃烧特性的影 响,从一次风掺氨时最佳分离二次风比为 30%,从 分离二次风附近掺氨时最佳分离二次风比为 20%。 试验证明,在 20% 掺烧比下,通过调整配风可以 让 2 种掺氨方式都实现 NO 排放基本与纯煤燃烧相 当。而在 40% 掺烧比下,最佳配风条件下的 NO 排 放接近纯煤燃烧的 2 倍,此掺氨工况下的 CO 排放 和飞灰含碳量同样都低于纯煤燃烧。这是由于采用 分级燃烧时,若从一次风掺氨,由于只有 70%~ 80% 的空气随 NH₃ 和煤粉注入主燃区,因此从燃料 喷口到分级风出口阶段处于富燃料区域,抑制了氨 燃烧时 NO 的生成,随着分离二次风比的增大, NH₃ 和煤粉会在这种富燃料区域内的停留时间增 长,使得 NO_x 排放随着分离二次风比例增大而持续 降低。若从分离二次风附近掺氨,大量氨气将与主 燃区内煤粉产生的 NO 发生还原反应,控制合适的 分离二次风比即可控制 SNCR 的反应效率,从而降 低最终的 NO_x 排放。试验发现分离二次风掺氨的 CO 排放和飞灰含碳量高于一次风掺氨,这是因为 从一次风掺氨时,煤粉在高温脱挥发后有助于氨气 着火,氨气燃烧时也能促进煤粉进一步脱挥发和燃 烧,从而提高煤粉在主燃区的燃烧效率,导致最终 CO 排放和飞灰含碳量都有所降低。



3 结论和展望

1)一次风掺氨时,NO排放随温度升高而增加,反应温度达到 1 200 ℃ 后能明显促进煤氨掺烧 过程中的 NO_x 排放,且随着煤氨掺烧比例的增大而 提高。分离二次风掺氨时,由于 NH₃ 的 SNCR 效应 在下炉的低 O₂ 和高 NO_x 的环境下作用十分显著, 且 SNCR 的最适反应温度为 850~1100 ℃,因此 NO_x 排放在 1100 ℃以下排放都较低,低掺烧下能 与纯煤燃烧相当。

2)一次风掺氨时,NO排放随分离二次风比的 增加先降低后上升,最佳分离二次风比在 30% 左 右。氨气氧化过程中会产生大量 H 和 OH 自由基促 进 CO 氧化,使得掺烧后烟气中的 CO 排放低于纯 煤,说明一次风掺氨有利于煤粉烧净。分离二次风 掺氨时,分离二次风比较低工况(<20%)的尾部 NO 排放要普遍低于一次风掺氨工况,随着分离二 次风比的增加,NO 排放先下降后上升,这是下炉 膛氧含量较低,可以有效抑制燃料型 NO_x的生成, 但当分离二次风比例太大时,低氧环境被破坏, NO 生成增多,因此分离二次风比不应超过 30%。

3)合适的配风可以控制掺烧比低于 20% 的煤 氨掺烧 NO 排放与纯煤燃烧相当,且 CO 排放和飞 灰含碳量都低于纯煤燃烧。进行大比例掺 NH₃ 燃烧 时可以通过产生具有高当量比的局部 NH₃ 火焰区以 及确保足够的停留时间来减少 NO_x 释放。在本文所 研究的条件下,任何掺混方法和比例都几乎没有发 现 NH₃ 泄露,因此 NH₃ 可以作为替代燃料来降低 燃煤电站的 CO₂ 排放。

参考文献 (References):

- WANG F, HARINDINTWALI J D, YUAN Z Z, et al. Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality[J]. The Innovation, 2021, 2(4): 100180.
- [2] JINOVIĆ P, SCHÜTH F. Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015: 183–199.
- [3] LI J, LAI S N, CHEN D N, et al. A review on combustion characteristics of ammonia as a carbon-free fuel[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 760356.
- [4] CARDOSO J S, SILVA V, ROCHA R C, et al. Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 296: 126562.
- [5] YAPICIOGLU A, DINCER I. A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 103: 96–108.
- [6] BROWN T. Ammonia: the other hydrogen[C]//Energy Storage for Manufacturing and Industrial Decarbonization Workshop (Energy StorM). Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2022: 13.
- [7] XU Jinghua, GUAN Yuren, OLDFIELD J, et al. China carbon emission accounts 2020—2021[J]. Applied Energy, 2024, 360: 122837.
- [8] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 69: 63–102.

- [9] 谭厚章,周上坤,杨文俊,等. 氨燃料经济性分析及煤氨混燃研 究进展 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 181-191.
 TAN Houzhang, ZHOU Shangkun, YANG Wenjun, et al. Economic analysis of ammonia and research progress of coalammonia co-firing[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 181-191.
- [10] 王圣烨, 崔名双, 牛芳. 氨煤混燃技术在工业应用中的研究进展
 [J]. 煤质技术, 2024, 39(2): 32-42.
 WANG Shengye, CUI Mingshuang, NIU Fang. Research progress

on ammonia-coal co-combustion in industrial applications[J]. Coal Quality Technology, 2024, 39(2): 32–42.

- [11] YAMAMOTO A, KIMOTO M, OZAWA Y, et al. Basic co-firing characteristics of ammonia with pulverized coal in a single burner test furnace[C]//2018 AIChE Annual Meeting. AIChE, 2018.
- [12] TAMURA M, GOTOU T, ISHII H, et al. Experimental investigation of ammonia combustion in a bench scale 1.2 MW-thermal pulverised coal firing furnace[J]. Applied Energy, 2020, 277: 115580.
- [13] NAGATANI G, ISHI H, ITO T, et al. Development of co-firing method of pulverized coal and ammonia to reduce greenhouse gas emissions[J]. IHI Engineering Review, 2020, 53(1): 1–10.
- YOSHIZAKI T. CO₂ free ammonia as an energy carrier: Japan's insights[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 601–611.
- [15] IHI and JERA Complete Fuel Ammonia Substitution Demonstration Testing at Hekinan Thermal Power Station[EB/OL].
 (2024-06-26) [2025-04-08]. https://www.ihi.co.jp/en/all_news/ 2024/resources_energy_environment/1200954_13691.html.
- [16] 马仑, 方庆艳, 张成, 等. 深度空气分级下煤粉耦合氨燃烧及 NO 生成特性 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 201-213.

MA Lun, FANG Qingyan, ZHANG Cheng, et al. Combustion and NO formation characteristics of pulverized coal co-firing with ammonia in a deep-air staging condition[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 201–213.

- [17] 牛涛,张文振,刘欣,等. 燃煤锅炉氨煤混合燃烧工业尺度试验研究 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 193-200.
 NIU Tao, ZHANG Wenzhen, LIU Xin, et al. Industrial-scale experimental investigation of ammonia-coal cofiring in coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 193-200.
- [18] 人民网. 安徽: 氨能清洁燃烧发电取得突破,煤电机组将实现掺
 氨 降碳 [EB/OL]. (2023-04-09)[2025-04-08]. http://finance.
 people.com.cn/n1/2023/0409/c1004-32660058.html.
- [19] 台山人民政府: 奋战百千万工程| 国能台山电厂 600 兆瓦燃煤 发电机组 掺氨燃烧试验成功 [EB/OL]. (2023-12-04)
 [2025-04-08]. http://www.cnts.gov.cn/tssrmzf/tsyw/tskx/content/post_2988208.html.
- [20] TANIGUCHI M, KAMIKAWA Y, TATSUMI T, et al. Staged combustion properties for pulverized coals at high temperature[J].
 Combustion and Flame, 2011, 158(11): 2261–2271.
- [21] LYON R K, BENN D. Kinetics of the NO– NH_3 O_2 reaction[C]//Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1979, 17(1): 601-610.
- [22] TAMURA M, WATANABE S, KOMABA K, et al. Combustion behaviour of pulverised coal in high temperature air condition for utility boilers[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75: 445–450.
- [23] ISHIHARA S, ZHANG J W, ITO T. Numerical calculation with detailed chemistry on ammonia co-firing in a coal-fired boiler: Effect of ammonia co-firing ratio on NO emissions[J]. Fuel, 2020, 274: 117742.