

电厂燃气轮机的NO_x污染危害及治理技术现状

崔瑞康

华电湖北发电有限公司武昌热电分公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月26日; 录用日期: 2026年4月8日; 发布日期: 2026年6月4日

摘要

燃气轮机作为一种常用的发电设备,与传统的燃煤锅炉相比,其尾气含尘量极低,主要以CO₂和水为主,无需复杂处理,环保优势显著。但是燃气轮机在运行过程中依然避免不了NO_x的生成。NO_x根据生成机制和条件分为热力型、燃料型和快速型三类。NO_x的危害涵盖人体健康、生态环境、气候系统及材料设施等多个维度。针对该问题,详细介绍了目前NO_x的主要治理技术。NO_x的治理技术分为源头控制与末端治理:源头控制以低氮燃烧技术为核心,包括分级燃烧、烟气再循环、富氧燃烧、MILD技术以及氢/氨新能源燃料掺烧的NO_x控制技术。末端治理则包括干法与湿法脱硝技术。未来需聚焦现有技术优化、多技术协同、绿色低碳创新及政策驱动下的超净排放技术开发,为电厂燃气轮机的清洁高效运行提供支撑。

关键词

NO_x, 低氮燃烧技术, 脱硝技术

Hazards of NO_x Pollution from Gas Turbines in Power Plants and Current Status of Abatement Technologies

Ruikang Cui

Wuchang Thermal Power Branch, Huadian Hubei Power Generation Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: March 26, 2026; accepted: April 8, 2026; published: June 4, 2026

Abstract

NO_x is classified into three categories based on its formation mechanisms and conditions: thermal, fuel-bound, and prompt types. The hazards of NO_x span multiple dimensions, including human health, ecological environment, climate system, and material facilities. Abatement technologies are divided into source control and end-of-pipe treatment: Source control centers on low-NO_x combustion

technologies, including staged combustion, flue gas recirculation, oxygen-enriched combustion, and MILD (Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution) technology, which suppress NO_x formation by optimizing combustion conditions. End-of-pipe treatment encompasses dry and wet denitration technologies, which achieve NO_x removal through chemical reactions. Among them, dry denitration includes selective catalytic reduction (SCR) and selective non-catalytic reduction (SNCR) technologies; wet denitration includes oxidative absorption, absorptive reduction, and complexation absorption technologies. In the future, focus should be placed on the optimization of existing technologies, synergy of multiple technologies, green and low-carbon innovation, and the development of ultra-clean emission technologies driven by policies, so as to provide support for the clean and efficient operation of gas turbines in power plants.

Keywords

NO_x , Low- NO_x Combustion Technology, Denitration Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

燃气轮机是目前使用较为广泛的一种发电设备，其主要运行原理是将燃料与空气混合后在燃烧室中燃烧，产生的高温高压气体推动燃气轮机转动，进而驱动发电机发电。与传统燃煤锅炉相比，燃气轮机占地小，启动速度快，使用灵活，能源转化效率高，且以天然气作为主要燃料，污染物排放极低，环保性能更优。但是，在实际使用过程中，燃气轮机并不能做到零排放，依然会产生污染物，其中最主要的便是 NO_x 。文章对 NO_x 的生成机理及危害进行概括，并对目前电厂燃气轮机排放 NO_x 的控制，治理技术进行归纳总结，探讨治理 NO_x 的新技术和未来电厂燃气轮机的发展方向。

2. NO_x 的生成机理和危害

2.1. NO_x 的生成机理

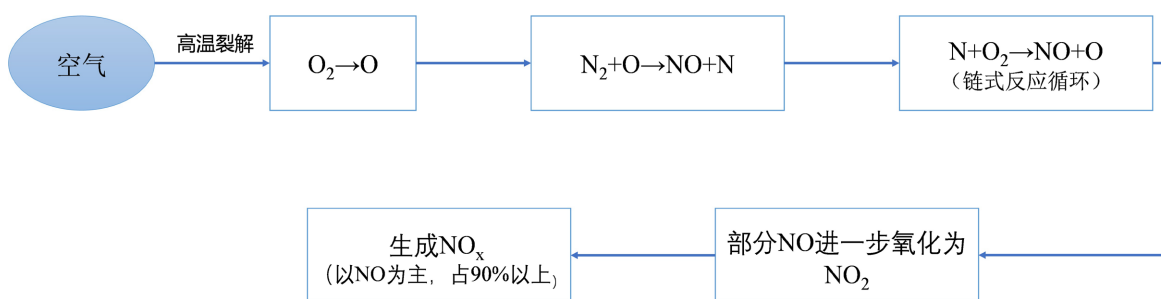


Figure 1. Generation process of thermal NO_x

图 1. 热力型 NO_x 生成机理

根据生成机制和条件，燃气轮机中 NO_x 的生成主要分为热力型、燃料型和快速型三类[1]。热力型 NO_x 是空气 N_2 与 O_2 在高温 ($>1500\text{ K}$) 下反应生成，是主要来源，燃气轮机燃烧室火焰温度 $1800\sim 2200\text{ K}$ ，温度每升 100°C 其生成速率增 $5\sim 10$ 倍[2]，反应分初始反应、链传递、次要反应三阶段[3]。热力型 NO_x 生成机理见图 1；燃料型 NO_x 由燃料中氮元素氧化生成，量取决于燃料氮含量及燃烧条件[4]，生成分氮释

放、氮氧化两阶段[5]，天然气因氮含量低可忽略，高氮燃料(重油等)下则为重要来源。燃料型 NO_x 生成机理见图 2；快速型 NO_x 在燃料与空气混合不均的低温区($<1500\text{ K}$)生成，量极少，仅含碳氢化合物燃料燃烧时产生[6]，由碳氢化合物热解生成自由基后反应生成 NO 。快速型 NO_x 生成机理见图 3。

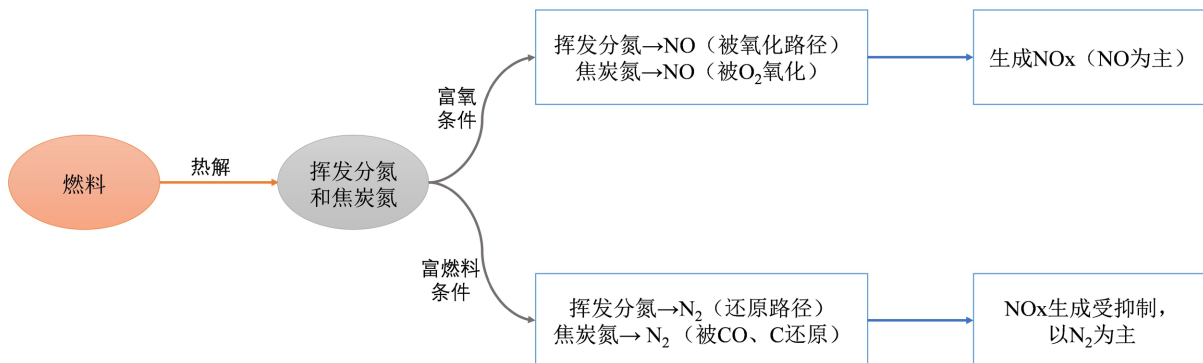


Figure 2. Generation process of fuel NO_x

图 2. 燃料型 NO_x 生成机理



Figure 3. Generation process of prompt NO_x

图 3. 快速型 NO_x 生成机理

2.2. NO_x 的危害

NO_x 的危害广泛涉及人体健康、生态环境、气候及材料和建筑设施多个领域，具体而言，在人体健康方面，它是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物[7]，与挥发性有机物反应生成的硝酸盐颗粒物是 $\text{PM}_{2.5}$ 关键组分，而 $\text{PM}_{2.5}$ 可深入肺部甚至进入血液引发肺癌、心血管疾病，被世界卫生组织列为 I 类致癌物[8]，其与 VOCs 在紫外线照射下还会生成光化学烟雾，其中臭氧刺激眼睛和呼吸道、过氧乙酰硝酸酯具强刺激性且损伤眼角膜[9]，同时 NO_2 强烈刺激呼吸道黏膜、 NO 进入人体后降低血液携氧能力，长期暴露分别增加肺相关疾病风险和影响中枢神经系统[10]；在生态环境方面， NO_x 是硝酸型酸雨核心成因，与 OH 自由基反应生成的 HNO_3 随降水致土壤酸化(破坏胶体结构、流失营养元素)和水体酸化(降低鱼类产卵率、破坏水生食物链)[11]，其干湿沉降还为水体提供氮元素，引发藻类爆发形成“水华”或“赤潮”，高浓度 NO_2 亦会破坏植物叶片气孔结构、抑制光合作用[12]；在气候方面， NO_x 作为重要温室气体和气候强迫因子， NO_2 局部浓度升高会加剧区域变暖，且在 VOCs 充足区域催化生成的对流层臭氧会加剧全球变暖，其转化的硝酸盐颗粒物还会改变云的反射率和寿命[13][14]；在材料和建筑设施方面， NO_x 生成的 HNO_3 具强腐蚀性，会加速桥梁、管道等金属锈蚀，溶解石材、混凝土等建筑材料，导致建筑物表面风化剥落并损害工业设备及文物古迹[15]。

3. NO_x 的控制与治理

燃气轮机运行过程中 NO_x 的控制与治理技术可分为源头控制和末端治理两大类。源头控制主要指的是低氮燃烧技术，目前主要的研究方向有分级燃烧技术，烟气再循环技术，富氧燃烧技术以及 MILD (moderate and intense low oxygen dilution) 燃烧技术。而末端治理即烟气脱硝技术，主要可分为干法脱硝和湿法脱硝。

3.1. 源头控制

3.1.1. 分级燃烧技术

分级燃烧技术主要包括燃料分级、空气分级及浓淡燃烧三类。燃料分级技术通过按比例分层送入燃料，生成 CO、HCN 等还原性物质还原燃烧区的 NO_x ，对热力型氮氧化物和燃料型氮氧化物的转化控制具有良好的效果，其效率受温度，含氧量和反应时间影响[16]。

空气分级技术是目前应用最广泛的低 NO_x 燃烧技术，原理是将空气分级送入燃烧区，在第一阶段注入少量的助燃空气，营造缺氧环境，降低燃烧室的温度，以减少热力型 NO_x 生成，随后在第二阶段注入过量助燃空气，使得第一阶段未燃尽的燃料完全燃烧，这也是目前工业上最常用的低氮燃烧方法。空气分级技术受燃烧室结构，空气比以及烟气在燃烧室的停留时间影响。王超伟等人[17]通过模拟实验发现，当甲烷空气分级燃烧得到燃尽风比例为 35% 时，对应的 NO_x 转化率最低。

浓淡燃烧技术融合前两者，形成燃料浓区(空气不足，非完全燃烧)与淡区(空气过量，完全燃烧)，借中间还原物质实现 NO_x 减排。分级燃烧技术成熟度高，应用广泛，尤其是空气分级技术，是目前工业上最常用的低氮燃烧方法，适配多数燃气轮机燃烧室结构。无需额外添加设备或药剂，仅通过优化燃料与空气的供给方式即可实现 NO_x 减排，并且该方法运行成本较低，对燃料类型适应性较强，可用于天然气、重油等多种燃料。但是燃料分级技术的还原效率依赖温度、含氧量和反应时间的协同，在工况波动较大时，如燃气轮机负荷快速变化，脱硝稳定性易下降。

3.1.2. 烟气再循环技术

烟气再循环技术是将排放前的烟气，通过烟道引流(外部循环，如抽取燃气轮机尾部低温烟气注入燃烧室)或燃烧室内部结构改造(内部循环，使烟气回燃烧区)，与新鲜空气混合后送入燃烧区再次燃烧的技术，原理是降低燃烧区氧含量、抑制燃烧并降低温度以控制 NO_x 生成，在实际使用过程中常内外循环相结合[18]。该方法能有效降低燃烧区氧含量和燃烧温度，从源头抑制热力型 NO_x 生成，减排效果直接且稳定。宋少鹏等人[19]研究发现当烟气再循环率为 10% 时， NO_x 的排放量相较于之前减少 65%。高晗等人[20]通过实验发现，当烟气再循环率从 0 增加至 20% 时， NO_x 的排放量显著降低。但是由于烟气循环会增加系统阻力，需额外消耗动力，会导致燃气轮机整体效率略有下降。内部循环依赖燃烧室结构改造，对设计精度要求高，改造周期长，不适用于老旧机组的快速升级。烟气再循环技术工艺流程见图 4。

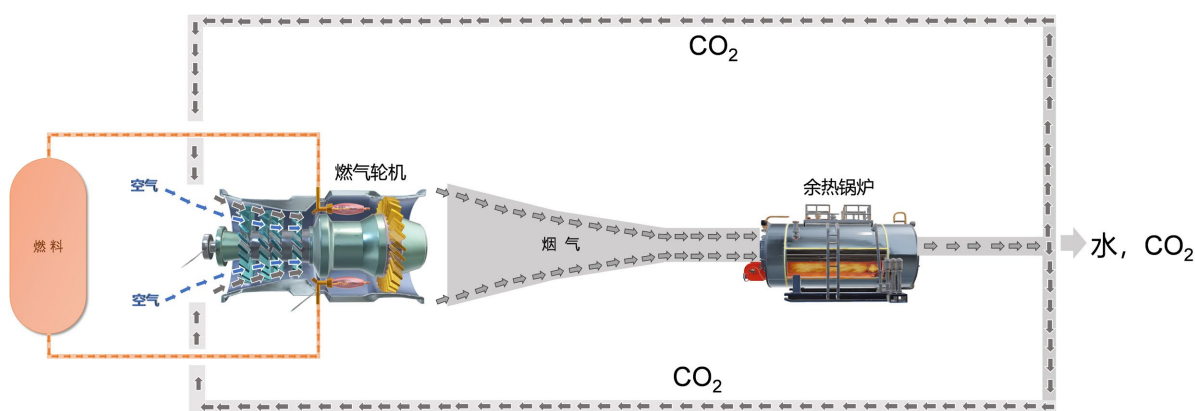


Figure 4. Flow chart of flue gas recirculation process

图 4. 烟气再循环工艺流程图

3.1.3. 富氧燃烧技术

富氧燃烧是以高纯度氧气替代空气的燃烧技术，助燃剂氧浓度显著高于空气，按浓度可分为

20.93%~40%的富氧燃烧与 $\geq 93\%$ 的全氧燃烧,工业应用中氧纯度常超 95%,由于使用高纯度的氧气助燃,因此燃烧速度更快,燃烧效率也更高。由于燃烧速度更快、含氮量更低,富氧燃烧能有效减少 NO_x 的产生[21]。在污染物控制上,富氧燃烧优势突出。由于使用纯氧助燃,与空气相比,其中的氮气含量减少,从源头减少氮氧反应基础。传统燃烧中,温度超 1300°C 时氮气与氧气易生成 NO_x ,温度每上升 10°C ,生成量增加 2~3 倍,而富氧环境虽燃烧温度更高,却能减少氮氧化学键断裂,加之燃料与氧气充分混合,进一步抑制热力型 NO_x 的生成。和稀释氧化剂的燃烧方式不同,富氧燃烧通过降低氮气浓度、提高氧气浓度,有效确保了燃料能够充分燃烧。富氧燃烧技术可加速燃烧反应,提升燃烧效率和燃料利用率,减少未燃尽损失。但该技术大规模应用面临挑战,高纯度氧气依赖空分技术,能耗高;设备投资大,燃烧室需采用耐高温材料与专用调压阀站;氧气与燃料混合比例需精准控制,否则易引发爆燃或腐蚀。这些因素导致其经济性较差,限制了其大规模应用。

3.1.4. MILD 技术

MILD 技术是一种通过低氧环境与高温空气协同作用实现高效清洁燃烧的前沿技术,其核心机制是利用高速射流卷吸大量炉膛内的高温烟气,与新鲜燃料和空气充分混合后形成分布式容积燃烧,无明显火焰锋面,燃烧反应过程较为温和,反应速率较低,从而将燃烧峰值温度控制在 1500°C 以下,显著抑制热力型 NO_x 生成,同时减少 CO 和碳黑排放[22]。全雨航等人[23]将 NH_3/CH_4 混合燃料利用 MILD 燃烧方式进行燃烧,发现相较于常规燃烧,MILD 燃烧能有效降低 NO_x 的排放量。法国阿尔斯通 G26 型燃气轮机的设计就利用了 MILD 燃烧技术。叶片吸入的空气与燃料首先在一级燃烧室进行常规燃烧,产生的烟气与空气混合后,在二级燃烧室再次燃烧,由于与烟气混合后,二级燃烧室的氧含量较低,而一级燃烧产生的烟气使二级燃烧室有较高的预热温度,达成了高温低氧的条件,从而减少了热力型 NO_x 的排放,具体见图 5。该技术热效率突出,燃料适应性极强,可稳定燃烧天然气、纯氢、生物质气等,且燃烧过程抗回火、噪音低,已广泛应用于燃气轮机掺氢发电、特钢加热炉等场景。

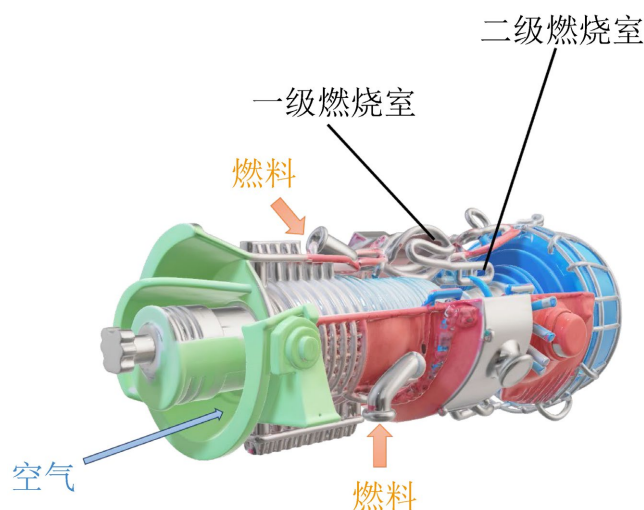


Figure 5. Gas turbine using MILD combustion technology
图 5. 利用 MILD 燃烧技术的燃气轮机

尽管面临高温空气预热、系统复杂性较高等挑战,但近年来燃料 MILD、无预热 MILD 及智能化控制等技术的突破,正持续拓展其应用边界,成为清洁燃烧与能源转型的重要技术方向。目前 MILD 技术主要应用于大功率机组或特定工业场景,在中小功率燃气轮机中的适配性仍需突破,规模化应用受限,而且预热设备成本高、能耗大,且高温下材料易老化,维护难度大。

3.2. 末端治理

3.2.1. 干法脱硝

干法脱硝主要包括选择性催化还原(SCR)和选择性非催化还原(SNCR)技术。SCR 技术在催化剂作用下,通过通入含氨还原剂使 NO_x 还原为 N_2 和 H_2O 。广泛应用于化石燃料发电厂,脱硝率高。郑振海等人[24]采用 SCR 技术对鞍钢股份鲅鱼圈钢铁分公司 1 台 150MW 联合循环发电机组进行改造,改造后的机组在满功率运行的情况下, NO_x 的排放量降低了 74.4%。但 SCR 技术存在产生 N_2O 、催化剂成本高、易因含硫物质或烟尘中毒堵塞及氨逃逸导致二次污染等问题,反应遵循 Langmuir-Hinshelwood (L-H)和 Eley-Rideal (E-R)机理[25]。L-H 机理是指吸附态的 NO_x 与邻近的活性位上吸附的 NH_3 反应生成 N_2 和 H_2O 。E-R 机理是指吸附态的 NH_3 与气态 NO_x 反应形成过渡态中间产物,该中间产物进一步分解为 N_2 和 H_2O 。SCR 技术工艺流程见图 6。

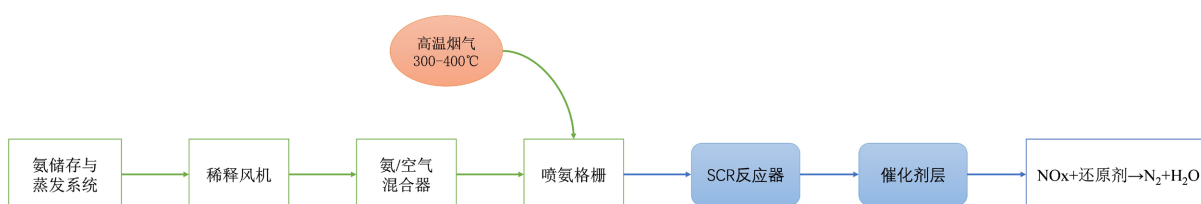


Figure 6. Flow chart of SCR technology process

图 6. SCR 技术工艺流程图

SNCR 无需催化剂,在高温下通过含氨还原剂还原 NO_x ,投资成本低、装置简单经济,但反应需在 $800^\circ\text{C}\sim 1050^\circ\text{C}$ 高温下进行,温度过高易使 NH_3 被 O_2 氧化生成 NO 。因此 SNCR 对加入还原剂的操作控制比较严格,否则不仅会造成烟气中 NO_x 含量增多,而且会增加还原剂的用量和投资成本[26]。SNCR 因温度高存在氨逃逸造成二次污染的风险,且 SNCR 脱硝效率较低,该技术适用于去除垃圾焚烧过程中和中小型发电厂产生的 NO_x 。SNCR 技术工艺流程见图 7。

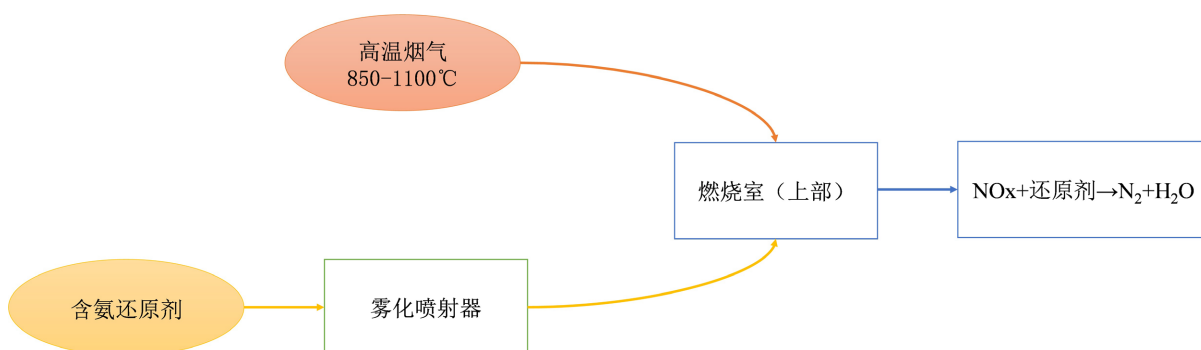


Figure 7. Flow chart of SNCR technology process

图 7. SNCR 技术工艺流程图

中海油惠州石化采用低温 SNCR + SCR 的脱硝方案,把高温型 300°C 催化剂更换为低温型 180°C 催化剂,在 SO_2 含量 $\geq 500 \text{ mg/Nm}^3$ 的工况条件下运行,该方案下 NO_x 的排放量保持在 50 mg/Nm^3 以下,平均脱硝效率超过 88%,同时有效降低燃气消耗,综合年度运行成本将节约 200 万元以上[27]。

3.2.2. 湿法脱硝

湿法脱硝主要包括氧化吸收法、吸收还原法和络合吸收法。氧化吸收法先利用 O_3 、 Cl_2 、 ClO_2 等气相

氧化剂或 H_2O_2 、 KMnO_4 、 NaClO_2 等液相氧化剂将 NO 氧化为 NO_2 ，再用碱液吸收，该方法简单易行、占地少、脱硝率高，但生成物复杂、不易二次利用且易造成二次污染[28]。

吸收还原法利用硫化物、亚硫酸盐、尿素等还原剂的水溶液将 NO_x 还原为 N_2 。Mok [29]采用 O_3 注入和 Na_2S 辅助的吸收还原技术去除废气中的 NO_x ，脱硝率达 95%以上，但仍存在诸多问题：约 75%的 Na_2S 未与 NO_x 发生反应就被消耗，这使得实际所需的 Na_2S 用量需为去除 NO_x 理论所需量的 4 倍；而且在吸收还原过程中， Na_2S 容易释放出 H_2S 气体；此外，从废气中去除的 NO_x 中，约 25%会在还原剂溶液中溶解形成 NO_2^- 和 NO_3^- ，这些物质难以回收利用，若直接排放会造成水质富营养化，因此还需要进行后续处理。

络合吸收法通过亚铁螯合物等络合剂与 NO 形成络合物提高气液传质效率，常用于联合脱除 NO_x 和 SO_2 ，其中以亚铁螯合物作为吸收剂的研究较多[30]。吸收剂的损耗和再生是目前络合吸收法面临的主要问题。

4. 主流 NO_x 控制技术关键性能对比

为直观对比各主流技术的应用特性，基于文献数据与工程应用案例，整理燃气轮机主流 NO_x 控制技术的关键性能参数见表 1。

Table 1. Key performance comparison of mainstream NO_x control technologies

表 1. 主流 NO_x 控制技术关键性能对比

技术类别	具体技术	典型脱硝效率	工程成熟度	核心优势	核心劣势
源头控制	空气分级燃烧	30%~60%	极高	改造成本低、无二次污染、适配性强	深度分级易影响燃烧稳定性
	烟气再循环	50%~70%	高	减排效果稳定、不影响燃烧组织	增加系统阻力、存在效率损失
	MILD 燃烧	60%~80%	中	超低氮排放、燃料适应性广、燃烧噪音低	需高温预热、系统复杂、改造成本高
末端治理	SCR 脱硝	70%~95%	极高	脱硝效率高、运行稳定、适配宽工况	催化剂成本高、存在氨逃逸风险
	SNCR 脱硝	30%~50%	中	投资成本低、无催化剂依赖	温度窗口严苛、脱硝效率低

5. 总结与展望

电厂燃气轮机相较于传统的燃煤锅炉在能量转换和环境保护方面具有诸多优势，但是燃气轮机在运行过程中，依然会产生部分污染，其中以 NO_x 为主。燃气轮机产生的 NO_x 主要分为热力型、燃料型和快速型三类，其对人体健康、生态环境、气候系统具有不同程度的危害。 NO_x 的控制治理主要分为源头控制和末端治理两部分。源头控制以低氮燃烧技术为核心，包括分级燃烧、烟气再循环、富氧燃烧及 MILD 燃烧技术，通过优化燃烧条件，如降低峰值温度、调整氧浓度抑制 NO_x 生成；末端治理则依赖烟气脱硝技术，干法脱硝中的 SCR 和 SNCR 通过还原剂还原 NO_x ，湿法脱硝中的氧化吸收、吸收还原及络合吸收法则利用化学反应实现脱除，两类技术各有优劣，需根据应用场景选择。目前较为成熟的 NO_x 的源头控制技术是分级燃烧技术中的空气分级技术，较为成熟的末端治理技术是干法脱硝技术。但其依旧存在过于依赖外界因素，可能造成二次污染等缺陷。

未来电厂燃气轮机 NO_x 控制与治理技术的发展需兼顾高效性、经济性与环保性，向多技术协同耦合

方向发展,推动源头控制与末端治理的协同应用:①富氧-MILD燃烧技术,对富氧燃烧和MILD燃烧技术进行整合,能够进一步增强富氧燃烧的稳定性。涂焱杰[31]使用0.3 MW的燃烧炉进行实验,对比富氧燃烧和富氧-MILD燃烧,结果表明富氧-MILD燃烧产生的NO_x的量更低。②烟气再循环与SCR/SNCR技术结合,利用再循环烟气降低燃烧温度的同时,为SCR/SNCR提供适宜的入口烟温与湿度,提升整体脱硝效率。刘军等人[32]设计基于烟气再循环的SNCR-SCR脱硝系统,并通过实验证明在机组处于30%负荷下时,脱硝效率较改造前提高了50%以上。③MILD这一较新的技术,需进一步提升燃烧的稳定性与适用性,开发低成本高温空气预热系统,突破其在中小功率燃气轮机中的应用限制。

参考文献

- [1] 毛洪钧,李悦宁,林应超,等. 生物质锅炉氮氧化物排放控制技术研究进展[J]. 工程科学学报, 2019, 41(1): 1-11.
- [2] 余明程,王光华,李文兵,等. 焦炉加热过程中热力型氮氧化物的生成及影响因素研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(10): 75-78.
- [3] 范宝田,严祯荣,林齐叠,等. 生物质燃料锅炉脱硝技术研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(5): 1490-1494.
- [4] 刘敦禹,秦明,刘辉,等. 深度空气分级条件下炉内氮氧化物生成的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(5): 469-475.
- [5] 王杰. 天然气低氮燃烧技术研究现状与进展[J]. 现代化工, 2022, 42(S2): 47-50.
- [6] 王晶,廖昌建,王海波,等. 锅炉低氮燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(2): 99-114.
- [7] 陈耿,李瑞瑜,陈春贻,等. 典型大气细颗粒物与臭氧复合污染过程中挥发性有机物的贡献及来源[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(9): 1222-1227.
- [8] Sun, S., Zheng, N., Wang, S., Li, Y., Hou, S., An, Q., *et al.* (2022) Inhalation Bioaccessibility and Risk Assessment of Metals in PM_{2.5} Based on a Multiple-Path Particle Dosimetry Model in the Smelting District of Northeast China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 8915. <https://doi.org/10.3390/ijerph19158915>
- [9] Thangavel, P., Park, D. and Lee, Y. (2022) Recent Insights into Particulate Matter (PM_{2.5})-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 7511. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127511>
- [10] Demchenko, I.T., Atochin, D.N., Gutsaeva, D.R., *et al.* (2008) Contributions of Nitric Oxide Synthase Isoforms to Pulmonary Oxygen Toxicity, Local vs. Mediated Effects. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology*, **294**, L984-L990. <https://doi.org/10.1152/ajplung.00420.2007>
- [11] 王迪,李少宁,鲁绍伟,等. 城市森林对氮氧化物(NO_x)净化作用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(8): 114-125.
- [12] 李勇华. 大气中二氧化硫和氮氧化物的污染及防治方法[J]. 资源节约与环保, 2015(12): 140.
- [13] 俞璐. 氮氧化物对臭氧层的威胁[J]. 中国环境科学, 2010, 30(3): 327.
- [14] Da Silva Vasconcelos, L.C., Do Nascimento, A.Q., Moreira, M.C., *et al.* (2009) Acid Rain and Geographic Climatology in Medium School. *Geo UERJ*, **1**, 44-61. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2009.1404>
- [15] Kim, J. and Park, J. (2024) Numerical Analysis of Major Reaction Affecting to Nitrogen Oxide Formation under Okafor Reaction Mechanism. *Energy & Environment*, in Press.
- [16] 杨远平,马佳琪,王茜,等. 掺氢燃料先进清洁燃烧技术研究进展及探讨[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 29-40.
- [17] 王超伟,王长安,王鹏乾,等. 空气深度分级燃烧 NO_x 排放特性的 CHEMKIN 模拟研究[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(1): 42-50.
- [18] 张群力,苏媛,刘涛,等. 燃气锅炉低氮排放技术应用与进展[J]. 化学工程, 2024, 52(8): 18-24+83.
- [19] 宋少鹏. 基于烟气再循环的工业锅炉天然气低氮燃烧研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2016.
- [20] 高晗,朱彤,朱荣俊,等. 烟气再循环对 350kW 燃气锅炉超低氮燃烧工况稳定性的影响[J]. 工业锅炉, 2020(1): 32-37+46.
- [21] 刘敦禹,蔡雨阳,金晶,等. 富氧燃烧烟气净化工艺研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 79-91.
- [22] 王吉龙,揭涛,苏毅,等. MILD 燃烧的研究进展及应用[J]. 工业锅炉, 2025(3): 1-10.
- [23] 仝雨航,涂焱杰,刘豪. NH₃/CH₄ 在 MILD 燃烧方式下的 NO_x 排放特性实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2025,

45(9): 3563-3572.

- [24] 郑振海, 秦伟, 张超, 等. SCR 烟气脱硝工艺在联合循环发电机组的应用[J]. 冶金动力, 2025(2): 99-102.
- [25] Chen, Y., Liu, X., Wang, P., Mansoor, M., Zhang, J., Peng, D., *et al.* (2024) Challenges and Perspectives of Environmental Catalysis for Nox Reduction. *JACS Au*, **4**, 2767-2791. <https://doi.org/10.1021/jacsau.4c00572>
- [26] 李红霞, 薄雯, 李春颖, 等. 烟气脱硝技术研究进展[J]. 现代化工, 2015, 35(9): 30-33.
- [27] 刘豪, 安丰磊, 王辉, 等. 低温型 SCR 催化剂在危废焚烧中的应用[J]. 冶金信息导刊, 2025, 62(4): 47-50.
- [28] 杨加强, 梅毅, 王驰, 等. 湿法烟气脱硝技术现状及发展[J]. 化工进展, 2017, 36(2): 695-704.
- [29] Mok, Y.S. (2006) Absorption-Reduction Technique Assisted by Ozone Injection and Sodium Sulfide for Nox Removal from Exhaust Gas. *Chemical Engineering Journal*, **118**, 63-67. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.011>
- [30] 杨景瑞, 王莹, 陈虎, 等. 烟气中 NO_x 脱除技术的研究进展[J]. 化工环保, 2020, 40(5): 461-466.
- [31] 涂垚杰. 低温预热条件下天然气和氧/煤 MILD 燃烧特性研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [32] 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.