

# 锅炉脱硝及烟气除尘技术分析

李天宝

呼伦贝尔金新化工有限公司生产运营中心 内蒙古呼伦贝尔 021500

**摘要:** 锅炉在燃烧过程中排放的二氧化硫、氮氧化物和颗粒物是导致大气污染的重要因素,对生态环境和人体健康均产生严重危害。随着环保标准的日益严格,锅炉烟气治理技术逐渐成为大气污染防治的重点与难点。本文围绕锅炉脱硫、脱硝与除尘三大环节展开分析。首先,对石灰石—石膏湿法、半干法、干法及海水脱硫等主流工艺进行了比较,探讨了不同技术在效率、成本和副产物利用方面的特点。其次,结合选择性催化还原、选择性非催化还原及低氮燃烧等典型脱硝路径,分析其适用范围与技术局限。再次,从布袋、电除尘及湿式除尘等角度梳理了颗粒物治理思路,并通过某电厂的电袋复合除尘改造案例,展示了综合治理在实践中的成效与经验。研究表明,锅炉烟气治理的发展趋势是向高效化、低成本化与智能化方向演进,未来应更加注重多种工艺的耦合应用以及副产物的资源化利用,以实现环境效益与经济效益的统一。

**关键词:** 锅炉烟气; 脱硫技术; 脱硝技术; 除尘技术; 污染治理

## 引言

锅炉作为能源转换和供热的重要装备,在我国电力、冶金、化工、建材以及居民采暖等领域发挥着基础性作用。然而,长期以来以煤炭为主导的能源消费格局,使得锅炉燃烧过程中排放的大量二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )及颗粒物成为大气污染的主要来源之一。这些污染物不仅会造成酸雨、雾霾和光化学烟雾等一系列环境问题,还会通过呼吸道进入人体,对心肺功能和免疫系统造成损害,从而威胁生态安全与公共健康。特别是在工业化和城镇化快速推进的背景下,锅炉烟气治理已成为我国大气污染防治工作的核心环节之一。

近年来,国家不断加大环保政策的力度,相继颁布了《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等纲领性文件,并逐步提高锅炉排放标准。例如,《火电厂大气污染物排放标准》对 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和颗粒物排放浓度提出了更为严格的控制指标,这不仅为锅炉烟气治理技术的升级提供了政策指引,也为企业绿色转型提出了更高要求。在此背景下,脱硫、脱硝和除尘技术的研究与应用进入快速发展阶段,逐渐形成了由单一治理向多污染物协同治理、由传统工艺向高效低碳工艺转变的趋势。

从技术层面来看,石灰石—石膏湿法脱硫、SCR脱硝和静电除尘等主流工艺已在电力及大型工业锅炉领域成熟应用,并在提升治理效率方面发挥了重要作用。然而,这些技术在运行成本、能耗水平、副产物利用率等方面仍存在一定不足。同时,中小型锅炉在能源利用效

率和治理能力上依然存在短板,成为实现整体减排目标的难点。近年来,随着新材料、新工艺及信息化技术的引入,锅炉烟气治理逐渐呈现智能化、集成化和低碳化的发展方向,推动了治理水平的持续提升。

因此,系统梳理锅炉脱硫、脱硝及除尘技术的发展现状,分析其原理、优势与不足,并探索未来可能的发展路径,不仅有助于总结经验、优化工艺,还能为实现超低排放目标和构建清洁能源体系提供理论与实践支撑。基于此,本文将从锅炉烟气污染特征出发,依次探讨各类脱硫、脱硝及除尘技术的原理与应用现状,并结合工程案例进行分析,旨在为我国锅炉烟气治理和大气环境改善提供参考。

## 一、锅炉烟气污染物排放及危害

锅炉在燃烧过程中会排放出多种大气污染物,其中二氧化硫、氮氧化物和颗粒物是最主要的成分。二氧化硫是酸雨的前体物质,其排放量与燃料的硫含量高度相关,长期排放会导致土壤酸化、水体富营养化及建筑物腐蚀;氮氧化物则主要在高温燃烧条件下由燃料氮和空气中的氮生成,不仅能引发光化学烟雾和臭氧污染,还会参与二次颗粒物的形成,加剧雾霾问题;颗粒物则来源于燃料不完全燃烧所产生的碳粒、灰分及其他杂质,其粒径细小,易在大气中长时间悬浮并通过呼吸道进入人体,对肺部、心血管系统乃至全身健康造成不良影响。更为严重的是,这些污染物在大气中往往会发生复杂的

物理和化学反应，形成酸性物质或二次污染颗粒物，从而降低能见度、加剧区域环境酸化并破坏生态平衡，进而对农业生产、生态系统安全以及人类健康带来长期而深远的威胁。随着环境问题日益突出，公众环保意识显著提高，国家相继出台一系列严格的大气污染防治政策，对锅炉烟气排放提出更高要求，使锅炉烟气治理成为大气污染防治中的重点和难点。因此，深入研究并优化锅炉脱硫、脱硝及除尘技术，不仅是改善环境质量、守护公共健康的必然选择，也是推动能源清洁化转型和实现可持续发展的战略任务。

## 二、锅炉脱硫技术

锅炉脱硫是控制二氧化硫排放的关键环节，也是大气污染防治和实现超低排放标准的重要措施。目前应用的锅炉脱硫技术主要包括石灰石—石膏湿法脱硫、半干法脱硫、干法脱硫和海水脱硫等传统工艺，同时新型高效脱硫技术也不断涌现。不同技术在脱硫效率、投资成本、副产物利用及应用场景方面存在差异，需要根据锅炉容量、燃料特性及环保要求进行合理选择与组合。

### 1. 石灰石—石膏湿法脱硫

石灰石—石膏湿法脱硫（WFGD）是目前最为成熟和应用最广泛的脱硫工艺，其核心原理是利用石灰石浆液与烟气中的 $\text{SO}_2$ 发生中和反应生成亚硫酸钙，再通过鼓入空气氧化生成石膏，从而实现二氧化硫的去除。该方法脱硫效率通常可达90%以上，甚至可满足超低排放要求，且副产物石膏可广泛应用于建材行业，实现资源化利用，经济效益较好。然而，该系统工艺流程较复杂，占地面积大，初期投资和运行成本较高，同时还需要处理废水，设备易受腐蚀，对运维提出了较高要求。因此，该技术更适用于大型燃煤电厂和环保标准严格的地区。

### 2. 半干法脱硫技术

半干法脱硫通常采用喷雾干燥吸收塔工艺，将石灰浆液雾化后与高温烟气接触，过程中既能通过蒸发冷却降低烟气温度，又能与 $\text{SO}_2$ 发生化学反应生成固态反应产物，从而达到脱硫目的。该技术设备相对简单，占地面积小，投资成本较低，且无废水排放，运维难度较低，尤其适合中小容量锅炉的应用。但由于受限于反应时间与传质效率，其脱硫率一般在70%~90%之间，难以稳定满足超低排放标准。因此，半干法脱硫常作为中小企业或地区性锅炉治理的过渡性方案，在成本控制与脱硫效果之间寻求平衡。

### 3. 干法脱硫技术

干法脱硫是指在不使用液态吸收剂的条件下，直接

将干粉状碱性物质如石灰粉或碳酸钠喷入锅炉烟道中，与 $\text{SO}_2$ 进行反应生成固态副产物。该方法流程简洁，投资较少，设备紧凑，占地面积小，适合中小型工业锅炉和分布式能源系统的应用。同时，由于无废水产生，管理较为便利。但其脱硫效率较低，一般仅在50%~70%之间，吸收剂利用率偏低，运行成本相对较高，难以满足日益严格的环保标准。因此，在大容量电厂锅炉中应用受到限制，多用于环保要求相对宽松或对运行成本极度敏感的场景。

## 4. 海水脱硫技术

海水脱硫是利用海水天然碱度吸收烟气中的 $\text{SO}_2$ ，最终将反应产物以硫酸盐形式稀释排入海洋的一种脱硫方式。该技术流程简单，无需额外的化学药剂，运行费用低，系统能耗少，且不存在固体废物处理问题，整体上属于一种绿色环保工艺。在沿海地区的燃煤电厂应用较多，能有效降低治理成本。然而，其应用范围受限于地理条件，只适用于临海电厂，同时排放水体需要满足严格的海洋环保标准，以避免对海洋生态造成潜在影响。因此，该技术虽然环保优势明显，但推广受限，不具备普遍性。

## 5. 新型脱硫技术发展趋势

近年来，随着环保政策日益严格以及能源利用率要求的提高，许多新型高效脱硫技术不断涌现。例如，循环流化床干法脱硫通过提高吸收剂与烟气的接触效率，能够显著提升脱硫效果；双碱法脱硫利用钠碱或氨碱吸收 $\text{SO}_2$ ，再通过石灰乳再生吸收液，从而提高吸收剂利用率；氧化镁法脱硫不仅能实现较高的脱硫效率，还可回收副产物制成有用化工原料。这些新兴技术在提升脱硫效率、降低能耗、资源化利用等方面展现出巨大潜力，但在大规模工业化应用中仍面临设备可靠性、运行成本控制及副产物市场消化等问题。总体来看，锅炉脱硫技术的发展方向是高效化、低能耗化、系统集成化及副产物的综合利用，未来趋势将是传统工艺与新型技术的深度融合，以实现清洁能源利用和大气污染物的超低排放。

## 三、锅炉脱硝技术

锅炉氮氧化物排放是大气污染治理的重点内容之一，其产生主要源于燃烧过程中的高温反应，对环境和人体健康危害显著。为降低氮氧化物的排放，通常采取源头控制与末端治理相结合的方式，其中选择性催化还原、选择性非催化还原以及低氮燃烧等技术是当前应用最为广泛的路径。

### 1. 选择性催化还原技术

选择性催化还原是一种较为成熟的脱硝工艺，其原

理是在一定温度条件下，利用催化剂促使还原剂与烟气中的氮氧化物反应，生成氮气和水。该方法具有效率高、适用性强的优点，尤其在大型燃煤电厂中应用广泛。其不足之处在于投资和运行成本相对较高，同时催化剂容易中毒和失活，需要定期更换和维护。因此，在实际推广中往往需要结合成本控制和运行保障，才能实现良好的治理效果。

## 2. 选择性非催化还原技术

选择性非催化还原无需使用催化剂，而是直接在炉膛高温区喷入还原剂，与氮氧化物发生反应生成无害物质。该方法设备简单、投资较低，因而在中小型锅炉中较为常见。其局限性在于效率相对有限，且对炉膛温度条件要求严格，若温度波动较大容易导致反应不完全，从而出现氨逃逸等问题。

## 3. 低氮燃烧技术

低氮燃烧是一种在燃烧源头减少氮氧化物生成的手段，通过优化燃烧方式、控制空气分配和温度分布来抑制其形成。该技术具有结构简单、运行费用低的优点，能够在一定程度上降低排放。但其效果往往受到燃料特性和锅炉运行状态的影响，若控制不当还可能造成燃烧不完全，降低热效率。因此，低氮燃烧通常与后端治理措施配合使用，以在保证燃烧稳定性的同时满足严格的环保标准。

## 4. 脱硝技术发展趋势

随着国家对氮氧化物排放控制要求不断提高，锅炉脱硝技术的发展趋势日益呈现多元化和集成化。未来，一方面将进一步推动低成本高效催化剂和新型还原剂的研发，提升SCR和SNCR的整体性能，降低运行费用；另一方面，低氮燃烧与SCR、SNCR的联合应用将成为主流，以发挥源头削减和末端治理的协同效应。同时，多污染物协同治理理念逐渐受到重视，将脱硝与脱硫、除尘等工艺集成在同一系统中，能够有效节约资源、降低能耗并减少二次污染。

## 四、锅炉烟气除尘技术及案例分析

锅炉燃烧过程中产生的大量颗粒物是大气污染的重要来源之一，因此除尘技术在烟气治理中占有极为重要的地位。当前应用较为广泛的技术包括布袋除尘、电除尘以及湿式除尘等，不同方式各具优缺点。布袋除尘依靠滤料截留烟气中的颗粒物，除尘效率高，尤其对细微粉尘具有良好的捕集能力，但运行中滤袋需定期更换，维护成本相对较高。电除尘利用高压电场使颗粒物带电后沉积在极板上，具有处理气量大、运行阻力小的优势，但对微细颗粒物的去除能力有限，且受粉尘比电阻影响

较大。湿式除尘则通过液滴与颗粒物的碰撞和吸收作用实现除尘，同时还能部分去除气态污染物，但容易产生二次废水，增加后续处理压力。

某电厂在超低排放改造过程中，针对原有除尘设施难以满足严格排放要求的情况，采取了电袋复合除尘的技术路线。该系统先通过电除尘器对大颗粒粉尘进行高效去除，再利用布袋除尘器对细颗粒物进行深度捕集，最终实现了超过百分之九十九的除尘效率。改造后排放浓度稳定控制在国家标准之下，且系统运行阻力较低，能耗得到有效控制。同时，该电厂还在运行过程中引入在线监测与智能控制手段，根据锅炉工况变化自动调节除尘系统的运行参数，使整体效率与经济性保持在较优水平。该案例表明，结合不同除尘技术的优势，形成互补的复合工艺，不仅能够有效提升治理水平，还能为类似企业在满足日益严格的环保要求的同时实现成本控制提供借鉴。

## 结束语

锅炉烟气治理是大气污染防治体系中的核心内容，脱硫、脱硝和除尘技术在改善环境质量、保障生态安全方面具有不可替代的作用。从技术发展角度来看，湿法脱硫、选择性催化还原以及布袋除尘等工艺已较为成熟，但在能耗、运行成本、副产物处理以及适用性等方面仍存在一定局限。随着环保政策趋严与能源结构调整的深入推进，如何在保证高效治理的前提下降低运行负担、提高资源利用水平，成为未来技术进步的关键方向。本文结合案例分析表明，单一工艺往往难以满足复杂工况与超低排放标准，复合工艺与智能化运行模式更能体现治理优势。总体而言，锅炉烟气治理的发展必然走向多技术协同、节能降耗与清洁化利用的综合路径，为我国大气环境质量的持续改善和可持续发展目标的实现提供有力支撑。

## 参考文献

- [1] 关忠亮. 锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术分析[J]. 热处理技术与装备, 2025, 46(04): 52-55.
- [2] 刘鹏飞, 李萍. 锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术研究[J]. 资源节约与环保, 2024, (11): 60-63.
- [3] 任璞. 焦化厂锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术探究[J]. 山西冶金, 2024, 47(01): 213-215.
- [4] 刘迪生. 锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术分析[J]. 锅炉制造, 2024, (01): 36-38.
- [5] 孙泽. 电厂锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术探究[J]. 大陆桥视野, 2022, (08): 121-122.