

热电厂锅炉烟气脱硫除尘技术分析

张 宁

国家能源集团华北电力有限公司廊坊热电厂 河北 廊坊 065000

摘 要：随着全球工业化进程的加速，热电厂作为能源供应的重要支柱，其烟气排放对大气环境的影响日益显著。本文围绕热电厂锅炉烟气脱硫除尘技术展开分析，首先剖析了烟气的成分、排放特点及影响因素，为技术应用提供基础依据。随后重点阐述了主流脱硫技术与除尘技术的原理与应用特性。最后探讨了该领域的发展趋势，包括技术集成化协同治理、低碳化与资源化利用、智能化管理及高效节能低成本运行等方向。研究旨在为热电厂烟气净化技术的选择与优化提供参考，助力实现环保达标与可持续发展。

关键词：热电厂；锅炉烟气；脱硫；除尘；技术

引言：热电厂作为能源供应核心，其锅炉烟气排放中的硫氧化物和颗粒物是大气污染的重要来源，对生态环境和人体健康构成显著威胁。随着环保法规日趋严格，高效脱硫除尘技术成为热电厂可持续运行的关键。当前，脱硫除尘技术呈现多元化发展，但不同技术在效率、成本、适用性等方面存在差异，亟需系统分析与梳理。文章从烟气特性出发，深入解析主流脱硫与除尘技术的原理及应用现状，结合行业发展需求探讨未来技术方向，为热电厂选择适宜的净化方案、提升环保绩效提供理论与实践参考，推动能源与环境协同发展。

1 热电厂锅炉烟气特性分析

1.1 烟气成分

热电厂锅炉烟气成分复杂多样。其中，氮氧化物（ NO_x ）主要源于燃料高温燃烧时空气中的氮气与氧气反应生成，它会导致酸雨和光化学烟雾等环境问题。二氧化硫（ SO_2 ）是含硫燃料燃烧的产物，是形成酸雨的主要物质之一，对土壤、水体和植被等危害极大。烟尘包含多种颗粒物，其粒径大小不一，大颗粒易沉降，细颗粒则能长时间悬浮在空气中，被人吸入后危害健康。此外，烟气中还含有少量的一氧化碳（ CO ）、二氧化碳（ CO_2 ）以及水蒸气等，二氧化碳虽无直接污染性，但过量排放会加剧温室效应。

1.2 排放特点

热电厂锅炉烟气排放具有显著特点。从排放量来看，由于其规模较大，燃料消耗多，烟气排放总量庞大，持续向大气中输送大量污染物。排放的连续性较强，锅炉需长时间稳定运行以满足电力和热力需求，这使得烟气排放几乎不间断。在排放高度上，为减少对周边近地面环境的影响，烟囱通常设计较高，污染物在高空扩散。而且，不同季节和时段，因发电负荷、燃料种

类及燃烧工况的变化，烟气排放的成分和浓度也会有所波动，增加了治理的难度和复杂性。

1.3 影响因素

热电厂锅炉烟气特性受多种因素影响。燃料性质是关键因素之一，不同煤种的含硫量、灰分含量等差异较大，含硫量高的燃料燃烧产生的二氧化硫就多，灰分高则烟尘排放量大。燃烧方式也至关重要，合理的燃烧调整能降低氮氧化物和一氧化碳的生成，如采用低氮燃烧技术可有效减少氮氧化物排放。运行工况方面，锅炉负荷的变化会影响燃烧的稳定性及充分性，负荷过低可能导致燃烧不完全，污染物排放增加^[1]。

2 热电厂锅炉烟气脱硫的关键技术

2.1 石灰石-石膏湿法脱硫技术

石灰石-石膏湿法脱硫技术是热电厂锅炉烟气脱硫的主流工艺，全球装机容量占比超80%。该技术以石灰石浆液为吸收剂，通过吸收塔内气液逆流接触，将烟气中的二氧化硫转化为亚硫酸钙，再经氧化风机强制氧化生成石膏（硫酸钙）。其核心优势在于脱硫效率高（可达95%以上）、适应煤种硫分范围广（0.6%-6%）、副产物石膏纯度达90%以上，可用于建材生产。典型工艺流程包括石灰石浆液制备、吸收塔反应、氧化系统、石膏脱水及烟气再热等环节。例如，某水泥生产线采用三层喷淋层及屋脊式除雾器，入口二氧化硫浓度2500mg/m³时，出口浓度可控制在50mg/m³以下。但该技术存在设备腐蚀严重、烟气再热能耗高（占发电量0.5%-1.2%）及脱硫废水处理难题，需采用镍基合金或玻璃钢防腐，并通过三联箱工艺处理废水中的重金属离子。

2.2 海水法脱硫技术

海水法脱硫技术以天然海水为吸收剂，通过海水与烟气逆流接触，利用海水的天然碱性（pH值7.5-8.3）中

和二氧化硫,生成硫酸盐后经曝气处理恢复海水pH值并排回海洋。该技术适用于沿海燃煤电厂,具有无需淡水、无副产品、运行成本低等特点,脱硫效率普遍超过90%。其核心机理为依托海洋硫循环,避免二次污染,系统由海水输送、吸收、水质恢复等子系统构成。例如,深圳西部电厂4号机组采用挪威技术,脱硫率达92%-97%,排水符合海洋环保标准。但该技术受限于燃煤含硫率(需 $\leq 1\%$)及海水水质稳定性,推广比例较低。近年来,我国通过自主设计建造模式,在厦门嵩屿电厂、漳州后石电厂等项目实现技术国产化,显著降低投资与运行成本。

2.3 氨法脱硫技术

氨法脱硫技术以氨水或液氨为吸收剂,通过气液反应将烟气中的二氧化硫转化为硫酸铵化肥,实现资源化利用。该技术脱硫效率可达98%以上,且兼具20%左右的氮氧化物脱除能力,适用于中高硫煤烟气处理。其工艺流程包含吸收、氧化、结晶等环节,生成直径0.2-0.6mm的硫酸铵晶体作为农用肥料,系统无废水废渣排放。例如,某氨法脱硫装置每吸收1吨液氨可脱除2吨二氧化硫,生产4吨硫酸铵,按市场价格计算,每吨二氧化硫体现约400元价值。该技术还具有系统阻力小(总阻力约1000Pa)、能耗低(循环泵功耗降低70%)等优势,且可与SCR脱硝工艺共享氨供应系统。目前,国内已有30余套投运装置,单塔处理能力达50万千瓦机组规模,逐步成为高硫煤机组脱硫的主流技术之一^[2]。

3 热电厂锅炉烟气除尘的关键技术

3.1 机械除尘技术

机械除尘技术通过重力、惯性力和离心力等物理作用分离烟气中的粉尘颗粒,是热电厂锅炉烟气净化的基础环节。重力沉降室利用烟气流速降低(通常 $< 1.5\text{m/s}$),使大粒径粉尘($> 50\mu\text{m}$)在重力作用下自然沉降,结构简单但效率较低,适用于小型锅炉或作为多级除尘的预处理。惯性除尘器通过气流方向突变(如90°弯头)使粉尘因惯性撞击挡板后分离,可去除粒径 $> 10\mu\text{m}$ 的颗粒,效率较重力沉降室提升20%-30%,但对细颗粒捕捉能力有限。旋风除尘器利用离心力将颗粒甩向器壁后滑落,对5-20 μm 颗粒效率达80%-90%,且具有结构紧凑、耐高温(可达500℃)的特点,广泛应用于中小型锅炉。多管旋风除尘器通过多级串联可进一步提升效率至95%以上,如某生物质锅炉采用陶瓷制造的多管旋风除尘器,在处理含尘浓度15g/m³的烟气时,出口浓度降至1.2g/m³,且设备磨损率较单管型降低40%,显著延长了使用寿命。

3.2 电除尘器

电除尘器,又称静电除尘器,是工业烟气治理领域的核心设备,通过高压静电场实现烟气中颗粒物的高效分离。其工作原理基于电晕放电现象:在放电极(阴极)与集尘极(阳极)间施加高压直流电,使周围空气电离产生大量正负离子,含尘气流通过时,粉尘颗粒与离子碰撞荷电,在电场力作用下向异性电极迁移并沉积,最终通过振打或水冲洗清灰,实现粉尘与气体的分离。电除尘器具有显著的技术优势:除尘效率可达99%以上,尤其擅长捕集0.01微米以上的细微颗粒;处理风量大,单台设备最大截面积超400平方米,可满足大型电站需求;运行阻力小,能耗仅为袋式除尘器的1/5;自动化程度高,支持PLC智能控制,可实时调节电压、振打频率等参数。其应用领域广泛,覆盖火电、钢铁、水泥、化工等行业,例如在燃煤电厂中,电除尘器可降低烟尘排放浓度至30mg/m³以下,满足超低排放标准。技术发展方面,高频电源、脉冲供电等创新技术提升了电除尘器的能效比,而物联网与AI算法的融合则实现了设备状态实时监测与故障预警。

3.3 布袋除尘器

布袋除尘器是一种高效、环保的粉尘处理设备,广泛应用于电力、冶金、建材、化工等行业的烟气除尘及物料回收。其核心原理是通过滤袋的筛滤、碰撞、拦截等作用,将含尘气体中的粉尘颗粒阻留在滤袋表面,而清洁气体透过滤袋排出,实现气固分离。布袋除尘器主要由上箱体、中箱体、灰斗、滤袋、喷吹装置及控制系统等组成。含尘气体经导流系统进入灰斗,大颗粒粉尘因重力作用直接落入灰斗,细粉尘则均匀进入中箱体并吸附在滤袋外表面。随着过滤进行,滤袋表面粉尘逐渐增厚,设备阻力上升。当阻力达到设定值时,控制系统触发脉冲喷吹清灰:压缩空气通过脉冲阀瞬间喷入滤袋,使其产生振动并抖落粉尘至灰斗,由排灰装置排出。该设备具有除尘效率高(可达99.5%以上)、排放浓度低(通常低于30mg/m³)、运行稳定、维护方便等优点。其清灰方式采用分室离线脉冲喷吹技术,避免了传统清灰方式强度不足或过滤与清灰同时进行的缺陷,显著延长了滤袋使用寿命。

3.4 湿式除尘器

湿式除尘器是利用水或其他液体与含尘气体充分接触,通过惯性碰撞、拦截、扩散以及凝聚等作用,使粉尘颗粒从气流中分离出来的除尘设备,在热电厂锅炉烟气除尘中发挥着重要作用。其工作过程中,含尘气体进入除尘器后,与喷淋的水雾或水膜发生激烈碰撞,粉

尘颗粒被水湿润并凝聚变大,随后在重力作用下沉降到集尘池中,净化后的气体则从顶部排出。根据结构和工作原理的不同,湿式除尘器可分为喷淋塔、文丘里洗涤器、水膜除尘器等多种类型。湿式除尘器具有诸多优势。它能有效处理高温、高湿、易燃易爆的含尘气体,且对微细粉尘的捕集效率较高,尤其适用于净化含有黏性粉尘或气溶胶的烟气。同时,在除尘过程中还能对气体进行降温 and 加湿处理。然而,湿式除尘器也存在一些不足。设备需要消耗大量的水资源,并且会产生含有粉尘和污染物的废水,若处理不当会造成二次污染^[3]。

4 热电厂锅炉烟气脱硫除尘技术的发展趋势

4.1 技术集成化与协同治理

未来热电厂烟气治理将向多污染物协同控制技术集成方向发展。传统脱硫、脱硝、除尘工艺独立运行的模式,正被一体化技术取代。例如,吸附法通过活性炭等材料同步吸附硫化物、氮氧化物和粉尘,实现三效合一;高能电子氧化法利用电子束照射烟气,使污染物发生氧化还原反应后被捕集。这种集成化技术不仅减少设备占地面积,还能通过工艺耦合提升治理效率,降低二次污染风险。协同治理模式将成为主流,推动烟气净化系统向紧凑化、高效化升级。

4.2 低碳化与资源化利用

脱硫副产物资源化利用是低碳转型的关键方向。湿法脱硫产生的石膏可通过深加工制成建材、土壤改良剂,或作为水泥原料实现循环利用;干法脱硫的固废可通过再生技术提取有用成分,减少填埋量。此外,脱硫过程与碳捕集技术(CCUS)的融合成为新趋势,例如在脱硫塔内同步捕集二氧化碳,将其转化为化工原料或地质封存,实现硫、碳协同减排。资源化利用不仅降低环境负荷,还能通过副产物增值创造经济效益,推动热电厂向绿色低碳模式转型。

4.3 智能化与数字化管理

智能化技术将重塑烟气治理运维模式。通过物联网传感器实时监测脱硫塔pH值、液气比、粉尘浓度等参数,结合AI算法动态调整工艺条件,实现精准治理。例如,智能控制系统可根据烟气成分变化自动优化喷淋量,避免过

度能耗;数字孪生技术可模拟设备运行状态,提前预警故障,减少非计划停机。此外,大数据平台可整合多电厂运行数据,通过机器学习优化治理方案,形成行业最佳实践库。智能化管理将提升系统稳定性,降低人力成本,推动治理技术向自主化、精细化演进。

4.4 高效节能与低成本运行

技术优化与材料创新是降低运行成本的核心路径。新型脱硫剂如生物脱硫菌剂、纳米吸附材料的应用,可提升反应效率,减少吸收剂用量;低温脱硫技术通过开发耐低温催化剂,降低加热能耗,适应低温烟气工况。设备改进方面,高效雾化喷嘴、低阻力滤袋等部件的研发,可降低系统压降,减少风机功耗。此外,模块化设计使设备能够根据处理规模灵活组合,降低初期投资。通过工艺创新与装备升级,热电厂可在满足超低排放要求的同时,实现治理成本与能耗的双重下降^[4]。

结束语

热电厂锅炉烟气脱硫除尘技术作为大气污染防治的关键环节,正随着环保要求的提升与能源转型的推进不断迭代升级。从传统工艺的优化到集成化、智能化技术的突破,行业在提升治理效率、降低运行成本的同时,更注重低碳化与资源化利用,推动污染物控制向“零排放”目标迈进。未来,技术融合与创新将成为核心驱动力,通过多污染物协同治理、数字化运维管理以及副产物高值化利用,实现环境效益与经济效益的双赢。

参考文献

- [1]彭彦宁,王三小.火电厂锅炉烟气同时脱硫脱硝技术探讨[J].百科论坛电子杂志,2021,(001):374-375.
- [2]吕雪飞,甘树坤,吕颖.燃煤电厂锅炉烟气湿法脱硫技术的现状与展望[J].吉林化工学院学报,2022,36(05):22-25.
- [3]姜治国.火力发电厂已建成机组锅炉烟气脱硫工艺研究[J].区域治理,2021,000(010):64-65.
- [4]张林治,刘桂,董雷.合成氨企业自备电厂锅炉烟气氨法脱硫技术应用总结[J].中氮肥,2021,000(004):121-124.