

火电厂脱硫、脱硝技术的优化与创新

张义, 张霞龙, 郭忠恺

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ETQM.2026070036

摘 要 : 本文围绕火电厂烟气 SO_2 与 NO_x 治理, 综述传统脱硫脱硝技术: 脱硫含湿法、干法、半干法; 脱硝以 SCR 和 SNCR 为主。随后阐述优化方向: 脱硫优化工艺参数与设备; 脱硝优化催化剂及反应条件, 优化后效率与经济性提升。最后分析创新路径与挑战: 脱硫创新新型脱硫剂、新工艺; 脱硝创新生物、等离子体脱硝及技术融合, 前景广但存成熟度、成本问题, 需政策与技术推动火电绿色转型。

关 键 词 : 火电厂; 脱硫技术; 脱硝技术; 优化; 创新

Optimization and Innovation of Desulfurization and Denitrification Technologies in Thermal Power Plants

Zhang Yi, Zhang Xialong, Guo Zhongkai

State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : This paper focuses on the treatment of flue gas SO_2 and NO_x in thermal power plants, providing an overview of traditional desulfurization and denitrification technologies: desulfurization methods include wet, dry, and semi-dry processes; denitrification primarily relies on SCR and SNCR. Subsequently, it elaborates on optimization directions: optimizing process parameters and equipment for desulfurization; refining catalysts and reaction conditions for denitrification, leading to improved efficiency and cost-effectiveness after optimization. Finally, it analyzes innovation pathways and challenges: introducing new desulfurization agents and processes for desulfurization; exploring biological and plasma denitrification as well as technological integration for denitrification. While the prospects are promising, there are issues regarding maturity and cost, necessitating policy and technological support to drive the green transformation of thermal power.

Keywords : thermal power plant; desulfurization technology; denitrification technology; optimization; innovation

引言

火电厂作为能源供应的核心设施, 在发电过程中会产生大量含二氧化硫 (SO_2) 和氮氧化物 (NO_x) 的烟气, 这些污染物不仅会加剧酸雨、雾霾等环境问题, 还对生态系统与人体健康构成严重威胁。随着国家环保政策日益严格, 以及“碳达峰、碳中和”目标的推进, 火电厂烟气治理的标准不断提高, 传统脱硫脱硝技术在效率、成本、二次污染控制等方面的局限性逐渐凸显, 已难以完全满足当前环保与可持续发展需求。

一、传统技术综述

(一) 传统脱硫技术

传统脱硫技术在火电厂烟气治理中占据重要地位, 其主要包括湿法、干法和半干法三种类型。湿法脱硫技术以石灰石-石膏湿法脱硫工艺为代表, 是目前世界上应用范围最广且技术最为成熟的脱硫方法之一。该技术通过将石灰石磨碎后与水混合制成浆液, 并将其注入吸收塔内与烟气中的二氧化硫充分反应, 最终生成硫酸钙沉淀物实现脱硫目的^[7]。湿法脱硫技术具有脱硫效率高、运行稳定性强的优点, 但其设备投资成本较高且能耗较大,

同时可能产生废水处理等二次污染问题^[6]。

干法脱硫技术把固态脱硫剂也就是钙基化合物等喷入烟道当中, 和二氧化硫进行化学反应, 生成固态产物来实现脱硫, 跟湿法技术比起来, 干法脱硫开展操作工作比较简单, 并且没有废水排放出来, 不过它所具备的脱硫效率比较低, 对于脱硫剂的选择性方面的要求会比较高。半干法脱硫技术将湿法以及干法的优点融合起来, 把雾化液体脱硫剂喷入到烟道当中, 来形成气液固三相反应体系, 进而提高了脱硫效率, 并且降低了能耗, 然而, 半干法技术在实际运用当中会面临设备腐蚀以及副产物去处理等方面的问题。

（二）传统脱硝技术

传统脱硝技术主要有两种，也就是选择性催化还原 SCR 以及选择性非催化还原 SNCR，在火电厂烟气治理方面起到了重要作用，SCR 技术会把氨气当作还原剂喷入到烟气当中，在催化剂的作用下将氮氧化物还原成氮气以及水，脱硝效率能够达到 80%–90%。SCR 技术的核心之处在于催化剂的性能。不同的催化剂对于反应温度的要求是不一样的，要是反应温度过低的话，那就会导致催化剂的活性出现下降，要是过高的话，那就可能会引发氨气氧化，从而生成新的氮氧化物^[1]。另外，SCR 技术开展脱硝工作所取得的效果非常优异，不过设备投资以及运行成本比较高，并且催化剂容易遭受烟气当中重金属元素中毒的影响，这就限制了它的广泛运用。

SNCR 技术也就是选择性非催化还原技术，会把尿素或者氨水当作还原剂，直接喷入到高温烟气当中，并且借助高温非催化反应来将氮氧化物还原为氮气，和 SCR 技术相比，SNCR 技术不需要使用催化剂，设备方面的投资成本比较低。然而，它的脱硝效率一般只有 30%–50%，对反应温度的依赖性比较强，要是温度控制得不合适，就会导致氨逃逸，此外，SNCR 技术在实际运用当中会面临还原剂利用率低以及副产物生成等方面的问题。

二、火电厂脱硫技术的优化

（一）脱硫工艺参数优化

火电厂烟气脱硫效率会受到多种工艺参数的综合影响，像 pH 值、液气比以及温度这些就是关键因素，在湿法脱硫工艺当中，pH 值会直接对吸收剂以及二氧化硫的化学反应速率和溶解性产生影响。研究显示，较高的 pH 值有助于来提高二氧化硫的吸收效率，不过要是 pH 值过高，那就会导致吸收剂的利用率有所下降以及设备出现结垢情况，那么，要借助实时监测以及反馈控制系统，把 pH 值维持在 5.5 – 6.5 这个适宜范围当中，来实现高效脱硫，并且降低运行成本。液气比决定了吸收液以及烟气体积的比例关系，会显著地对传质效果产生影响，那么，适当增加液气比的话，就能够增强气液的接触面积，并且能进一步提高脱硫的效率；然而，要是液气比过高的话，那就会导致能耗有所增加，并且废水处理的压力也会上升。对喷淋层数以及喷嘴布置进行优化，同时结合烟气流量来动态调整液气比，这样在保证脱硫效果的同时可以降低运行能耗，除此之外，温度对于脱硫反应动力学特性所产生的影响是极大的。那么，较低的温度会有利于二氧化硫的吸收，不过却有可能降低某些催化剂的活性；较高的温度可以提高反应的速率，不过可能会导致氨逃逸等方面的问题。

（二）设备改进

脱硫设备的性能会直接影响到火电厂烟气脱硫系统的运行效率以及经济性，所以对吸收塔、喷淋系统等核心设备开展改进工作具有重大意义，吸收塔是开展脱硫反应的主要场所，它的内部结构设计会决定气液传质的效果。近年来，研究者对吸收塔内部填料层的结构进行了优化，把高效规整填料或者新型湍流器当作材料来使用，极大程度上提高了气液接触面积以及传质效率，同时，在吸收塔底部开展增设搅拌装置的工作，能够有效地防止吸收液当中的固体颗粒出现沉积的情况，从而提高设备运行的稳定性。喷淋系统是另外一个重点开展改进工作的设备，它的喷嘴设

计以及布置会直接对吸收液分布的均匀程度以及覆盖范围产生影响，研究表明，运用多层喷淋设计并且结合旋转式喷嘴，能够显著改善吸收液的分布效果，提升脱硫效率^[2]。此外，针对传统喷淋系统所存在的堵塞问题，可以把自清洁喷嘴技术引入进来，并且对吸收液过滤装置进行优化，来减少设备维护的频率以及运行成本，在设备材料方面，把耐腐蚀性更强的合金或者复合材料当作材料来使用，能够有效延长设备的使用寿命，降低由于腐蚀所导致的维修费用。这些改进措施提高了脱硫设备的运行效率，来为火电厂实现节能减排目标提供了技术方面的支持。

三、火电厂脱硝技术的优化

（一）催化剂性能改进

脱硝催化剂是选择性催化还原也就是 SCR 技术的核心组件，它的性能好坏会直接决定脱硝效率的高低，近年来，关于开展催化剂活性、稳定性以及抗中毒能力方面的改进研究，取得了显著进展。研究显示，对催化剂的载体材料以及活性组分进行优化，能够显著提高它的高温催化性能，那么，把钛基载体当作载体来使用，并且掺杂适量过渡金属氧化物，就可以有效增强催化剂的氧化还原能力，提高对氮氧化物也就是 NO_x 的转化率。除此之外，开展催化剂微观结构的调控工作，也是提高它稳定性的一个重要方面，引入介孔结构或者纳米级活性位点，能够增加催化剂的比表面积，改善其抗中毒的能力，当面对烟气当中硫化物等杂质时，它的耐受性更强^[3]。那么这些改进措施能够让脱硝系统在长期运行的过程当中保持较高的脱硝效率，并且还降低了由于催化剂失活所导致的频繁更换成本。

（二）反应条件优化

开展脱硝反应条件的优化工作，是提高脱硝效率的关键，而温度、氨氮比以及停留时间这些方面，是非常重要的参数，研究显示，适宜的反应温度可以显著提高 SCR 系统的脱硝性能，然而要是温度过高，就会加剧氨逃逸，进而引发二次污染方面的问题。那么，在实际应用当中，通常会把反应温度控制在 300 – 400℃，以保证脱硝效率以及氨逃逸率之间的平衡可以得以实现，此外，进行氨氮比的精确调控也会是优化脱硝效果的一个重要手段。要是氨氮比过低，那就会导致脱硝工作无法完全开展，而要是氨氮比过高，那就会增加氨逃逸方面的风险，进而造成资源的浪费以及所带来的环境污染，进行实时的烟气中 NO_x 浓度监测，开展氨气注入量的动态调整，就可以精确地控制氨氮比，提高脱硝效率，并且降低运行成本。对于停留时间的优化可不能忽视，要是停留时间比较长，就有助于提高脱硝反应的彻底性，不过同时也会增加设备投资以及占地面积。

（三）优化后的优势

对脱硝催化剂的性能以及反应条件进行优化，火电厂脱硝技术在多个方面所具备的优势非常显著，那么，优化过后的脱硝系统可以在更宽的温度范围当中高效地开展运行工作，从而契合不同工况下的烟气处理方面的需求。其次，对催化剂性能进行改进之后，显著提高了脱硝效率，部分先进系统的脱硝率达到了 90% 以上，同时极大程度上降低了 NO_x 的排放量，此外，优化措施能有效地减少氨逃逸现象，避免氨气泄漏所造成的二次污染问题^[4]。从经济方面来看，把催化剂的寿命延长以及对反应的条件

进行优化，这降低了运行和维护方面所产生的成本，能够有力地来支持火电厂得以实现节能环保的目标。

四、火电厂脱硫技术的创新

（一）新型脱硫剂研发

随着火电厂对烟气脱硫效率的要求得以提高，传统脱硫剂在性能以及经济性方面的局限性逐渐显现出来了，开展新型脱硫剂的研发工作，目的是对成分设计进行优化，来提高吸收效率、选择性以及稳定性，并且降低运行成本和环境负荷。目前开展的研究主要把重心集中在开展多组分复合脱硫剂以及以工业废弃物当作原料来使用的环保型脱硫剂的开发工作当中^[9]，比如说，某些新型脱硫剂把钙基材料以及活性金属氧化物当作复合配方来使用，既可以极大程度上提高二氧化硫的捕集能力，还拥有良好的再生性能，减少了废弃物的产生量。此外，鉴于粉煤灰或者钢渣等工业副产物来开展制备的脱硫剂，由于低成本以及资源化利用的优势，正受到广泛的关注，这类脱硫剂通常会去进行改性处理，来增强孔隙结构以及表面化学活性，进而改善和酸性气体反应的动力学特性。新型脱硫剂相较于传统石灰石基脱硫剂，脱硫效率更高了、使用寿命更长了、能耗也更低了，这为火电厂来实现高效经济脱硫目标提供了新的可能^[8]。

（二）创新脱硫工艺

创新脱硫工艺的研究工作致力于突破传统技术方面的瓶颈，借助引入新原理或者优化流程设计来提高脱硫系统的性能，近些年来，把湿法以及干法的优势结合起来的半干法脱硫工艺，引起了学术界和工业界方面的关注。该工艺把喷雾干燥塔当作核心设备来使用，在塔内让脱硫剂以及烟气开展快速混合并且进行反应，生成固态产物之后马上排出系统，避免了湿法工艺去处理废水方面的问题，同时，鉴于把反应温度控制在了较低的范围，能够有效地减少设备腐蚀的风险，并且降低运行的能耗。另一种值得留意的创新工艺也就是生物脱硫技术，它借助特定微生物的代谢活动来把硫化物转化成无害物质，拥有绿色环保的特性，这种技术虽然目前还处在实验室研究的阶段，不过在去处理低浓度二氧化硫烟气这个方面所具有的潜力是极大的^[9]。

五、火电厂脱硝技术的创新

（一）脱硝新技术应用

随着环保要求变得愈发严格，传统脱硝技术难以满足火电厂高效、经济以及环境友好型的脱硝需求，那么，新型脱硝技术的研发以及应用就成了研究方面的热点，生物脱硝技术也就是借助

参考文献

微生物的代谢活动来把氮氧化物转化成无害氮气的方法，其核心就是通过特定菌株的筛选以及培养，来高效地去除烟气当中的NO_x。这种技术开展操作的条件比较温和，运行的成本比较低，并且不会产生二次污染，尤其适宜用于低浓度NO_x的处理工作场景当中，此外，等离子体脱硝技术凭借高压电场放电来生成高能电子，激活烟气分子并且让它发生化学反应，进而把NO_x分解成N₂和O。这个技术反应速度很快、适用范围相当广，能够和其他污染物控制技术开展协同，来提高整体的处理效率。

（二）技术融合创新

为了提高脱硝效率，并且降低运行成本，把多种脱硝技术进行融合创新成为了重要的技术发展方向，比如，把选择性催化还原也就是SCR以及等离子体技术结合起来，就可以在低温环境当中高效率地去处理去除NO_x的工作。具体来说，等离子体技术可以对烟气开展预处理工作，让部分NO_x氧化成为容易被催化剂分解的中间产物，也就是能够显著降低SCR系统的运行温度以及氨逃逸率，此外，生物脱硝技术以及传统化学吸收法开展结合的潜力极大。

（三）创新技术的挑战与机遇

新型脱硝技术以及融合创新技术虽然展现出了广阔的应用前景，不过在火电厂当中进行实际推广的时候，还是会面临诸多挑战，首先，技术成熟度不足也就是制约它广泛开展应用工作的一个主要缘由了。比如，生物脱硝技术对于微生物培养条件以及运行环境的要求比较高，等离子体技术存在能耗高并且设备稳定性不足的问题^[10]，其次，新型技术的设备投资以及运行维护成本要比传统技术高，这给火电厂带来了较大的经济压力。那么，尤其是在当下环保政策逐渐趋紧的背景当中，火电厂需要在满足排放标准的同时去开展成本的控制工作，这会对技术创新方面提出更高的要求，然而，这些挑战也伴随着巨大的发展机遇。一方面，随着科研投入得以增加以及技术水平得到提升，新型脱硝技术的成熟度会逐步提高；另一方面，政府政策的支持以及市场需求的增长，为技术创新提供了一个良好的外部环境。

六、结束语

火电厂脱硫脱硝技术经历了从传统运用到不断优化以及创新的发展过程，传统技术为开展烟气治理工作奠定了基础，不过在环保要求以及经济性平衡这个方面存在着明显的短板；借助对工艺参数开展精准调控、对核心设备进行改进以及对催化剂和反应条件进行优化，现有脱硫脱硝系统的效率以及运行稳定性得到了显著提升，有助于火电厂降低污染排放开展控制成本的工作提供了有效的路径。

[1] 施泰峰；袁旭光；舒贝利. 火电厂烟气脱硫脱硝技术的应用与节能环保探究 [J]. 装备维修技术, 2020, (4): 394-394.
[2] 蔡正阳. 火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保 [J]. 清洗世界, 2024, 40(2): 4-6.
[3] 岳义刚. 火力发电厂烟气脱硫脱硝技术的应用与节能环保策略分析 [J]. 新潮电子, 2023, (11): 97-99.
[4] 李鹏飞. 火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保策略探讨 [J]. 石油石化物资采购, 2020, (23): 70-70.
[5] 颜青尧. 关于火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保的相关分析研究 [J]. 今日自动化, 2021, (12): 71-73.
[6] 闫峰. 火电厂烟气脱硫脱硝技术的节能环保问题探讨 [J]. 科学与信息化, 2021, (27): 151-153.
[7] 李国辉. 火电厂脱硫脱硝技术应用 [J]. 经济技术协作信息, 2021, (19): 126-126.
[8] 贺敬龙. 火电厂脱硫脱硝技术应用现状和发展前景展望 [J]. 中国科技投资, 2024, (10): 28-30.
[9] 丁琨. 关于火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保的相关分析 [J]. 中小企业管理与科技, 2020, 0(1): 151-152.
[10] 张权明. 火电厂烟气脱硫脱硝技术应用与节能环保分析 [J]. 消费电子, 2022, (6): 87-89.