

循环流化床锅炉的脱硫脱硝一体化技术研究

常艳春

内蒙古伊泰煤制油有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010321

摘要: 本文详细阐述了循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化技术,介绍了其脱硫原理基于石灰石受热分解产生的CaO与SO₂反应生成CaSO₄,脱硝原理包括低氮燃烧技术和SNCR技术。论述了该技术的工艺特点,如高效性、经济性、适应性强和对锅炉运行影响小等。还介绍了国内外研究与应用现状,国外起步早且应用广泛,国内近年来发展迅速并在多行业大量应用。同时分析了影响该技术的因素,包括燃烧工况、脱硫脱硝剂的性质和用量、反应温度、烟气成分和停留时间等。最后介绍了常见的脱硫脱硝一体化技术组合形式及其优缺点,如SNCR/SCR+炉内喷钙脱硫技术、循环流化床半干法脱硫+SCR脱硝技术、活性焦一体化脱硫脱硝技术等。

关键词: 循环流化床锅炉; 脱硫脱硝; 一体化技术

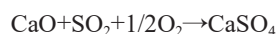
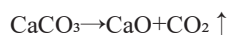
引言

随着经济的发展和能源需求的增长,煤炭燃烧所释放的二氧化硫和氮氧化物造成的环境污染问题日益严重。循环流化床锅炉作为一种高效清洁的燃烧设备,其脱硫脱硝一体化技术受到了广泛关注。该技术能够在同一设备或工艺流程中同时去除二氧化硫和氮氧化物,不仅可以提高污染物的综合脱除效率,还能减少设备投资和运行成本,具有显著的环境和经济效益,对解决大气污染问题具有重要意义。

1 循环流化床锅炉脱硫脱硝原理

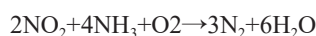
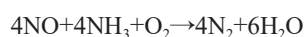
1.1 脱硫原理

循环流化床锅炉内的脱硫过程主要基于炉内添加的脱硫剂(如石灰石CaCO₃)与燃烧产生的SO₂发生化学反应。在高温条件下,石灰石受热分解为氧化钙(CaO),CaO与SO₂及氧气反应生成硫酸钙(CaSO₄),从而将硫固定在炉渣中,实现脱硫目的。其主要化学反应方程式如下:



1.2 脱硝原理

循环流化床锅炉的脱硝主要有两种途径:一是燃烧过程中的低氮燃烧技术,通过优化燃烧过程,降低燃烧温度、控制过量空气系数等手段,减少热力型NO_x的生成;二是采用选择性非催化还原(SNCR)技术,向炉内合适位置喷入还原剂(如尿素或氨水),还原剂在高温下分解产生氨气(NH₃),NH₃与NO_x发生反应,将其还原为氮气(N₂)和水(H₂O),主要反应方程式如下:



2 循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化技术工艺特点

2.1 高效性

循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化技术通过巧妙地在锅炉内部或尾部烟道集成脱硫与脱硝功能,实现了对二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)的同时高效脱除。相较于传统的分步处理工艺,即先脱硫后脱硝或反之,一体化技术避免了多次加热和冷却过程,减少了能量损失,同时利用CFB锅炉内高温、高湍流度的特性,促进了脱硫剂(如石灰石)与烟气的充分接触反应,以及脱硝催化剂的高效利用,从而显著提高了污染物的综合脱除效率。这种高效性不仅体现在脱除率的提升上,还体现在对细微颗粒物、重金属等其他污染物的协同去除效果上,为燃煤电站的环保达标排放提供了坚实保障。

2.2 经济性

一体化技术通过整合脱硫与脱硝系统,大幅减少了设备占地面积,降低了初期投资成本。此外,它简化了操作流程,减少了运维人员的配置需求,降低了长期运营管理的复杂性及成本。特别是避免了单独建设脱硫塔和脱硝装置的重复投资,以及相应的维护费用,使得整体经济效益显著^[1]。同时,该技术还能有效利用CFB锅炉产生的高温灰渣作为脱硫剂的一部分,进一步降低了物料消耗,实现了资源的循环利用。

2.3 适应性强

CFB锅炉以其燃料适应性强、负荷调节范围大著称。脱硫脱硝一体化技术通过精确控制脱硫剂的给料速率、床温和氧量等关键参数,能够灵活适应锅炉负荷的频繁波动和燃料性质的多样变化,确保在不同工况下都能维持稳定的脱硫脱硝效率。这种适应性不仅增强了系统的可靠性,也为电站运行提供了更大的灵活性和操作空间。

2.4 对锅炉运行影响小

在一体化技术的设计与实施过程中,通过精细的工艺布局和参数优化,如合理布置脱硝催化剂层、优化脱硫剂的喷射策略等,最大限度地减少了对锅炉燃烧效率和热效率的不利影响。同时,通过实时监测与调整,确保锅炉的燃烧稳定性和安全性不受影响,保障了电站的持续高效运行。此外,一体化技术还有助于减少锅炉尾部受热面的腐蚀和积灰问题,延长了设备的使用寿命,进一步提升了整体的经济效益和环境效益。

3 国内外研究与应用现状

3.1 国外研究与应用情况

国外对循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化技术的研究起步较早,许多发达国家已经在工业领域进行了广泛的应用和实践^[2]。例如,芬兰的Ahlstrom公司开发的Pyroflow循环流化床锅炉采用了先进的脱硫脱硝一体化技术,通过优化燃烧过程和添加合适的添加剂,实现了较高的污染物脱除效率,并在多个国家的电厂中得到成功应用。德国的Lurgi公司也在循环流化床锅炉技术方面取得了显著成果,其研发的脱硫脱硝一体化工艺在欧洲的一些工业锅炉和电站锅炉中得到推广,为当地的节能减排做出了贡献。

3.2 国内研究与应用情况

近年来,随着国内对环保问题的重视程度不断提高,循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化技术也得到了快速发展。国内各大高校、科研机构和企业纷纷开展相关研究工作,并取得了一系列成果。例如,清华大学在循环流化床燃烧理论和技术方面进行了深入研究,开发了具有自主知识产权的脱硫脱硝一体化技术,并在多个工业示范项目中进行了应用验证,取得了良好的效果。此外,国内的一些锅炉制造企业也在引进国外先进技术的基础上,结合国内实际情况,对循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化工艺进行了改进和优化,提高了设备的国产化水平和性能可靠性,推动了该技术在国内的广泛应用。目前,循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化技术已经在我国的火电、供热、化工等行业得到了大量应用,为我国的大气污染治理发挥了重要作用。

4 循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化技术的影响因素

4.1 燃烧工况

循环流化床锅炉的燃烧温度、空气过剩系数、燃料粒度分布等燃烧工况参数对脱硫脱硝效果有显著影响^[3]。较高的燃烧温度有利于石灰石的分解和脱硫反应,但会导致 NO_x 生成量增加;空气分级燃烧等低氮燃烧技术可以降低 NO_x 生成,但可能影响炉内的流场和温度分布,进而

影响脱硫效率。因此,需要优化燃烧工况,平衡脱硫与脱硝的要求。

4.2 脱硫脱硝剂的性质和用量

脱硫剂(如石灰石)的活性、粒度以及脱硝剂(如尿素、氨水、氨气等)的浓度和喷入量等因素直接关系到脱硫脱硝效果。活性高、粒度合适的脱硫剂能够提高脱硫效率,而准确控制脱硝剂的喷入量和喷入方式对于保证脱硝效果和减少还原剂的浪费至关重要。

4.3 反应温度

SNCR技术的脱硝效率对反应温度窗口要求严格,温度过高会使还原剂氧化生成 NO_x ,温度过低则反应速率过慢,脱硝效率下降。SCR技术中,催化剂的活性也与温度密切相关,需要将烟气温度控制在合适的范围内,以确保催化剂的高效催化性能,实现稳定的脱硝效果。对于脱硫反应,温度过高可能导致石灰石烧结,降低其反应活性和脱硫效率。

4.4 烟气成分

烟气成分在循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化过程中扮演着至关重要的角色。氧气含量作为关键参数,直接影响脱硫脱硝反应的氧化还原进程,适量的氧气有助于促进反应的进行,但过高或过低的含量均可能导致效率下降。高浓度的 SO_2 不仅增加了脱硫负担,还可能与脱硝剂发生竞争反应,消耗脱硝剂,从而降低脱硝效率。同时,烟气中的粉尘浓度也不容忽视,过高的粉尘不仅可能堵塞SCR催化剂的孔隙,阻碍 NO_x 的有效还原,还会干扰脱硫剂与烟气的充分接触,影响脱硫效果^[4]。此外,烟气中的碱金属、氯等杂质成分对催化剂具有潜在的毒性作用,可导致催化剂中毒失活,显著降低脱硝性能,并对脱硫过程产生不利影响,如加速脱硫剂的消耗或降低其活性。因此,精确控制烟气成分,优化脱硫脱硝条件,是实现高效、稳定污染物脱除的关键。

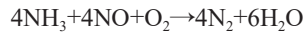
4.5 停留时间

脱硫剂、脱硝剂与烟气中的污染物在炉膛及后续烟道(如脱硫塔、SCR反应器等)中的停留时间需足够,以确保化学反应充分进行,从而达到理想的脱硫脱硝效果。合理的停留时间设计,不仅能提升污染物的脱除效率,还能有效控制设备规模和运行成本。过短的停留时间可能导致反应不充分,污染物脱除效率低下;而过长的停留时间虽能提高脱除效率,但也会增加设备体积、能耗及运行维护成本。因此需要合理设计和优化系统,确保合适的停留时间。

5 常见的脱硫脱硝一体化技术组合形式

5.1 SNCR/SCR+炉内喷钙脱硫技术

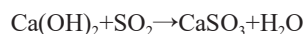
SNCR（选择性非催化还原）技术：在炉膛内合适的温度区域喷入尿素或氨水等还原剂，将 NO_x 还原为 N_2 和 H_2O 。其反应机理是还原剂在高温下分解产生的氨与氮氧化物发生反应，例如：



在锅炉尾部烟道安装催化剂层，在催化剂的作用下，喷入的氨与烟气中的 NO_x 进一步反应，提高脱硝效率。反应方程式与SNCR类似，但反应温度相对较低。向炉内添加石灰石，利用石灰石分解后的 CaO 与 SO_2 反应实现脱硫。SNCR技术前期投资和运行成本相对较低，适合对现有CFB锅炉进行改造；SCR技术能够进一步提高脱硝效率，满足更高的排放标准；炉内喷钙脱硫工艺简单，与燃烧过程结合紧密，可实现一定程度的脱硫效果，三者结合能在较大程度上实现脱硫脱硝一体化，且对锅炉的适应性较好。SNCR技术的脱硝效率相对有限，一般在30%-60%左右，且氨逃逸量较大，容易造成二次污染；SCR催化剂成本较高，且对烟气中的粉尘、二氧化硫等有一定的耐受性要求，需要对烟气进行预处理；炉内喷钙脱硫会增加锅炉灰渣量，且脱硫效率受石灰石品质和炉内工况影响较大。

5.2 循环流化床半干法脱硫+SCR脱硝技术

循环流化床半干法脱硫：将消石灰（ Ca(OH)_2 ）等脱硫剂喷入循环流化床反应塔内，与烟气中的 SO_2 发生反应，生成亚硫酸钙（ CaSO_3 ）和硫酸钙等产物，同时通过增湿活化等措施提高脱硫效率。反应方程式如下：



在脱硫后的烟气中喷入氨并通过催化剂层进行脱硝反应。循环流化床半干法脱硫具有占地面积小、脱硫效率较高、产物易于处理等优点；与SCR脱硝技术结合，能实现高效的脱硫脱硝一体化，且对烟气的适应性较强，可处理高硫高尘烟气，适用于新建或改造的CFB锅炉项目^[5]。半干法脱硫系统的运行稳定性相对较差，对操作要求较高，需要精确控制脱硫剂的喷入量和烟气湿度等参数；SCR催化剂的寿命和中毒问题仍然是需要关注的重点，同时系统的整体投资和运行成本相对较高。

5.3 活性焦一体化脱硫脱硝技术

活性焦具有较大的比表面积和丰富的孔隙结构，能够吸附烟气中的 SO_2 ，并在氧气和水的存在下将其氧化为硫酸，从而实现脱硫。同时，活性焦表面的催化活性物质能够促进氮氧化物与喷入的氨发生选择性催化还原反应，达到脱硝的目的。其脱硫和脱硝反应过程较为复杂，涉及到吸附、氧化、还原等多个步骤。实现了真正意义上的脱硫脱硝一体化，能够同时高效脱除 SO_2 和 NO_x ，脱硫效率可达95%以上，脱硝效率可达80%以上；活性焦可再生循环使用，减少了脱硫脱硝剂的消耗和废弃物的产生，降低了运行成本；对烟气中的重金属、二噁英等污染物也有一定的吸附去除能力，具有较好的环保综合效益。活性焦的制备成本较高，初期投资较大；活性焦在吸附和再生过程中会逐渐磨损和失活，需要定期补充和更换，增加了运行成本；再生系统较为复杂，对操作和维护要求较高，且再生过程需要消耗一定的能量。

结束语

循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化技术在国内外的研究与应用中都取得了显著的成果，具有广阔的发展前景。然而，该技术在实际应用中仍面临一些挑战，如燃烧工况的优化、脱硫脱硝剂的选择和用量控制、反应温度的精确调节、烟气成分的影响以及停留时间的合理设计等。未来，需要进一步深入研究这些影响因素，不断改进和优化技术组合形式，降低成本，提高效率，以实现循环流化床锅炉脱硫脱硝一体化技术的更广泛应用和更好的环境效益，为解决全球大气污染问题做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 郝卫兵.循环流化床锅炉SNCR脱硝系统技术改造[J].齐鲁石油化工,2022,50(03):222-224.
- [2] 付兆君.循环流化床锅炉SNCR脱硝技术浅析[J].全面腐蚀控制,2024,38(07):53-55.
- [3] 陈树茂.循环流化床半干法脱硫脱硝一体化技术应用[J].山东工业技术,2018(20):21.
- [4] 刘栋栋.SCR脱硝提效改造流场数值模拟及物模试验研究[J].中国环保产业,2023,295(1):51-56.
- [5] 牛玉广,潘岩,李晓彬.火力发电厂烟气SCR脱硝自动控制研究现状与展望[J].热能动力工程,2019,34(4):1-9.