

锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术研究

姜智中 辛颖慧 王 斌

内蒙古和林发电有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 011558

摘要：本文综述了锅炉脱硫、脱硝及烟气除尘技术的现状与发展趋势。详细介绍了湿法、干法、半干法脱硫脱硝技术的原理、应用及优缺点，分析了布袋除尘、静电除尘及湿式静电除尘技术的特点与适用场景。指出技术选择、系统运行与维护、经济性与环保性平衡等关键问题，并展望未来技术在高效、低成本、低能耗和智能化方面的发展趋势。研究旨在为燃煤电厂和工业锅炉的烟气治理提供技术参考和解决方案。

关键词：脱硫脱硝；烟气除尘；技术研究

锅炉作为火力发电和工业生产的重要设备，其燃烧过程中产生的烟气包含大量二氧化硫、氮氧化物及粉尘等污染物，对环境和人类健康构成严重威胁。因此，锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术的研发与应用显得尤为重要。在探讨现有脱硫脱硝及烟气除尘技术的原理、应用效果及存在的问题，并分析未来技术发展的方向和趋势，以期为实现锅炉烟气的清洁排放和环境保护提供有力支持。

1 锅炉脱硫、脱硝及烟气除尘技术概述

锅炉作为火电厂及工业领域广泛应用的热能转换设备，其在燃烧过程中产生的烟气往往含有大量的二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）以及粉尘等污染物，对环境质量构成严重威胁。因此，锅炉脱硫、脱硝及烟气除尘技术的研发与应用，成为了减少大气污染、促进可持续发展的关键环节。这些技术旨在通过物理、化学或生物方法，有效去除烟气中的有害物质，使排放的烟气达到环保标准。

1.1 锅炉脱硫、脱硝及烟气除尘原理

脱硫技术主要针对烟气中的SO₂进行去除，其原理主要包括吸收、吸附、催化转化等多种方式。例如，湿法脱硫通过喷淋吸收剂（如石灰石浆液）与烟气中的SO₂发生化学反应，生成石膏等稳定化合物实现脱硫；干法或半干法脱硫则利用固体吸附剂或催化剂，在较高温度下促进SO₂的吸附与转化。脱硝技术则侧重于降低NO_x的排放，主要方法包括选择性催化还原（SCR）、选择性非催化还原（SNCR）等，这些技术通过向烟气中注入还原剂（如氨气），在催化剂的作用下将NO_x转化为无害的氮气和水。烟气除尘则通过机械过滤、静电沉积或湿式洗涤等方法，将烟气中的颗粒物捕集下来，达到净化烟气的目的。

1.2 常见的脱硫脱硝及烟气除尘技术及设备

常见的脱硫技术包括湿法脱硫（如石灰石-石膏法）、半干法脱硫（如循环流化床脱硫）、干法脱硫（如炉内喷钙脱硫）等。这些技术各有优缺点，适用于不同的工况和需求。在脱硝方面，SCR技术以其高效性和可靠性被广泛应用，尤其是在大型火电厂中；而SNCR技术则因其投资成本较低，适用于中小规模的锅炉系统。烟气除尘技术则主要包括布袋除尘器、电除尘器（ESP）和湿式除尘器等。布袋除尘器通过布袋的过滤作用捕集颗粒物，适用于高浓度粉尘的捕集；电除尘器则利用电场力使粉尘颗粒荷电并沉积在极板上，适合处理大流量、低浓度的烟气；湿式除尘器则通过水雾与烟气的接触，利用水的惯性力和粘附力去除颗粒物，特别适用于处理含有腐蚀性或粘性颗粒物的烟气^[1]。

2 锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术关键问题

锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术在实际应用中面临着几个关键问题，这些问题的解决直接关系到环保效率和系统运行的稳定性。第一，技术选择与匹配是关键。不同锅炉型号、煤种及烟气特性需要选择适合的脱硫脱硝及除尘技术，以达到最佳处理效果。例如，高硫煤燃烧产生的烟气需采用高效的湿法脱硫技术，而低硫煤则可能适合干法或半干法脱硫。同时，SCR脱硝技术需考虑催化剂的选择与匹配，以确保高效转化NO_x。第二，系统运行与维护的复杂性也是一个重要问题。脱硫脱硝及除尘系统包含多个设备和环节，需要精确控制各参数，如烟气温度的、压力、流量以及吸收剂或还原剂的投加量等。系统维护难度大，需定期检查设备性能，及时清理或更换催化剂、布袋等关键部件，以防止结垢、堵塞等问题影响系统效率。第三，经济性与环保性的平衡也是锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术需要关注的问题。一方面，这些技术的投入和运行成本较高，企业需考虑经济效益；另一方面，随着环保法规的日益严格，企业必须

采取措施减少污染物排放,以满足环保要求。因此,在技术应用过程中,需要综合考虑经济性与环保性的平衡,寻求最优解决方案。

3 锅炉脱硫脱硝技术研究

3.1 湿法脱硫脱硝技术

湿法脱硫脱硝技术是目前锅炉烟气治理中应用最为广泛的技术之一。该技术主要通过液相反应来去除烟气中的二氧化硫(SO_2)和氮氧化物(NO_x)。在湿法脱硫过程中,常用的吸收剂包括石灰石和石灰,它们与烟气中的 SO_2 在脱硫塔内发生化学反应,生成硫酸钙(CaSO_4)等副产物,即石膏。这一过程中,烟气首先经过增压风机增压,并通过气-气热交换器降温,然后进入脱硫塔。在塔内,烟气与自上而下的石灰石/石灰浆液形成逆向流动,发生热量交换和化学反应,有效去除 SO_2 。净化后的烟气再经过除雾器去除携带的液滴,并通过气-气热交换器升温后排出。湿法脱硝技术则主要通过液相络合剂将烟气中的NO络合,增加其在吸收液中的溶解度,并利用烟气中的氧气将络合下来的NO氧化成易溶于水的 NO_2 ,再与碱性吸收剂(如氨、氧化镁等)反应生成硝酸盐。这种技术可以与湿法脱硫技术结合,形成同时脱硫脱硝的集成系统,如氨法同时脱硫脱硝技术,能够在一个塔内完成脱硫和脱硝任务,生成硫酸铵与硝酸铵的混合铵肥。湿法脱硝技术的优点在于脱硝效率高,可达90%以上,且能够实现资源化利用,降低运行成本^[2]。

3.2 干法脱硫脱硝技术

干法脱硫脱硝技术主要利用颗粒或粉状的吸收剂等化学物质,在干燥状态下将锅炉废气中的硫和氮氧化物去除。干法脱硫技术中,循环流化床反应器脱硫是较为常见的方法。石灰石加入循环流化床锅炉后,通过燃烧分解反应和硫酸化反应两步高温气固反应来脱硫。这种技术不需要使用大量的水,因此不会产生废水,且对锅炉设备的腐蚀较小。在干法脱硝方面,无氨低温催化脱硝技术是一种新兴的技术。该技术不使用氨气,而是采用催化剂直接催化烟气中的氧气和一氧化氮反应生成二氧化氮,再通过还原反应生成氮气。这种技术具有操作简单、投资运行成本低、无二次污染等优点,且能够同步去除烟气中的重金属汞元素,实现多污染物协同控制。

3.3 半干法脱硫脱硝技术

半干法脱硫脱硝技术结合了湿法和干法的优点,在气液固三相状态下进行脱硫脱硝。喷雾干燥法是半干法脱硫中较为常见的技术之一。该技术通过机械或气体的力量将吸附剂(如石灰乳)分散成极细微的雾状液体,与烟气产生较大的接触表面积,在气液两相间发生热量

交换、质量传递和化学变化,从而去除烟气中的 SO_2 。喷雾干燥法的脱硫率一般在65%~85%之间,具有工艺技术简单、反应物易处理、设备腐蚀和堵塞现象较少等优点。另外,半干半湿法脱硫技术也是半干法脱硫的一种重要形式。该技术结合了湿法和干法的特点,通过喷水增湿和除尘器装置的结合,提高脱硫效率。粉末-颗粒喷动床法则是另一种半干法脱硫技术,通过将脱硫剂制成粉末状与水混合后喷入喷动床内,与热烟气接触进行脱硫和干燥。这种技术具有较高的脱硫率和脱硫剂利用效率,且对环境影响较小^[3]。

湿法、干法和半干法脱硫脱硝技术各有其特点和优势,在实际应用中需根据具体条件选择合适的技术方案。随着环保要求的不断提高和技术的不断进步,这些技术将不断优化和完善,为锅炉烟气治理提供更加高效、节能、环保的解决方案。

4 锅炉烟气除尘技术研究

4.1 静电除尘技术

静电除尘技术是一种高效、广泛应用的锅炉烟气除尘方法。该技术基于电场中带电粒子(如烟气中的粉尘颗粒)受到电场力作用而发生迁移和沉积的原理。在静电除尘器中,烟气首先通过高压电场区域,其中的粉尘颗粒在电晕放电的作用下被电离并带上电荷,随后在电场力的作用下向收尘极板移动并沉积下来。沉积的粉尘通过定期振打收尘极板的方式清除,并收集处理。静电除尘技术的优点在于除尘效率高,一般可达99%以上,尤其适用于处理大风量、高浓度的含尘烟气;该技术对粉尘的物理性质适应性强,能够处理粒径范围广泛的粉尘颗粒。然而,静电除尘器的设备投资和运行维护成本相对较高,且对烟气温度、湿度等条件有一定要求。

4.2 布袋除尘技术

布袋除尘技术,又称袋式除尘技术,是一种利用纤维织物制成的滤袋来捕集烟气中粉尘颗粒的除尘方法。在布袋除尘器中,含尘烟气通过滤袋时,粉尘颗粒被滤袋表面的纤维层拦截并沉积下来,而清洁的烟气则通过滤袋排出。随着滤袋上粉尘的积累,除尘效率会逐渐降低,因此需要定期采用清灰机制(如脉冲喷吹、机械振打等)来清除滤袋上的粉尘。布袋除尘技术的优点在于除尘效率高,特别是对微细粉尘的捕集效果好,且设备占地面积小、运行稳定可靠。另外,该技术对烟气成分和温度的变化适应性较强,能够处理含湿量较高的烟气;布袋除尘器的滤袋材料成本较高,且易受到高温、腐蚀等因素的影响而损坏,需要定期更换。

4.3 湿式静电除尘技术

湿式静电除尘技术是在传统静电除尘技术的基础上发展而来的一种新型除尘方法。该技术结合湿法和静电除尘的优点,通过向烟气中喷入适量的水雾来降低粉尘的比电阻、提高除尘效率。在湿式静电除尘器中,烟气与水雾混合后形成湿润的烟气环境,粉尘颗粒在电场中更容易被电离并带上电荷,同时湿润的粉尘颗粒也更容易被收尘极板捕获并沉积下来。沉积的粉尘与水雾结合形成泥浆状物质,通过排水系统排出。湿式静电除尘技术的优点在于能够处理高比电阻粉尘、去除SO₃气溶胶等难以捕集的污染物,且除尘效率极高,一般可达99.9%以上。此外,该技术还具有降低烟气温度、抑制酸雾生成等优点。然而,湿式静电除尘器的设备复杂、占地面积大、运行维护成本较高,且对水质和排水处理有一定要求。在实际应用中,应根据锅炉烟气的特性、除尘效率要求以及经济成本等因素综合考虑选择合适的除尘技术方案^[4]。

5 锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术未来发展趋势

锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术作为环保领域的重要组成部分,其未来发展趋势将紧密围绕高效、低成本、低能耗和智能化等方向展开。第一,在脱硫脱硝技术方面,未来将更加注重技术创新与升级。传统的湿法脱硫和SCR脱硝技术虽然已经相对成熟,但面临着运行成本高、能耗大等问题。因此,未来研发的重点将放在开发更高效、低成本的脱硫脱硝催化剂和吸附剂上,同时优化工艺流程,减少副产物的产生,提高资源化利用率;干法脱硫脱硝技术也将得到更多关注,特别是那些能够同时处理二氧化硫和氮氧化物的复合技术,有望实现更高效、更经济的脱除效果。第二,烟气除尘技术也将向更高标准、更智能化方向发展。随着环保法规的日益严格,对烟气排放的要求也将更加严格。布袋除尘技术和静电除尘技术作为当前主流的除尘方式,将继续进行技术革新,提高除尘效率,特别是对微细粉尘的捕集能力。同时,湿式静电除尘技术将因其高效处理高比电阻

粉尘和酸雾等优势而得到更多应用;智能化技术的融入将成为未来烟气除尘技术的重要趋势,通过引入物联网、大数据、人工智能等技术手段,实现除尘设备的远程监控、故障诊断和智能调度,提高设备运行的可靠性和稳定性,降低运维成本。第三,锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术的未来发展还将更加注重资源化和循环经济。随着技术的不断进步,这些技术将不再仅仅停留在污染物控制层面,而是向资源回收利用方向转变^[5]。例如,脱硫脱硝过程中产生的副产物如石膏、硫酸铵等可以通过适当处理成为有价值的资源产品;除尘器收集的粉尘也可以经过回收处理用于其他工业生产领域。这种资源化利用不仅有助于减少环境污染,还能为企业带来额外的经济效益。

结束语

综上所述,锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术是实现燃煤电厂和工业锅炉烟气清洁排放的重要手段。未来,随着科技的不断进步和环保法规的日益严格,这些技术将继续向高效、低成本、低能耗和智能化方向发展。通过不断优化和完善这些技术,推动燃煤行业和工业锅炉领域向更加环保、可持续的方向发展,为实现“碳中和”目标和促进生态文明建设贡献力量。

参考文献

- [1]张殿坤,祁连中,李坤.锅炉烟气脱硫脱硝除尘一体化超低排放技术研究与实践[J].中国环保产业,2021(05):30-35.
- [2]王桂彩,鲁晓鹏,刘柳,杨泽广.玻璃熔窑烟气高温脱硫除尘脱硝一体化工艺[J].玻璃,2021,48(05):59-62.
- [3]王建国.燃煤锅炉烟气脱硫、脱硝、除尘改造技术的应用[J].自动化应用,2021(03):124-127.
- [4]沈淼,苏晖,孙芳婷.探究电厂锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术[J].节能与环保,2020(4):42-43.
- [5]龚祺昊,陈志华.锅炉烟气治理研究进展[J].广东化工,2020,47(15):278-279.