

烟气治理中的资源化利用技术与环境效益

傅海波

北京铝能清新环境技术有限公司 北京 100036

摘要: 随着工业的快速发展, 烟气排放带来的环境污染问题日益严峻。烟气治理不仅关乎生态环境的保护, 也蕴含着资源化利用的巨大潜力。本文深入探讨了烟气治理中的多种资源化利用技术, 包括脱硫副产物利用、脱硝产物资源化、除尘灰渣综合利用等, 并详细分析了这些技术所带来的环境效益, 如减少污染物排放、降低能源消耗、促进循环经济发展等。旨在为推动烟气治理与资源化利用的协同发展提供理论支持和实践参考。

关键词: 烟气治理; 资源化利用技术; 环境效益

1 引言

全球工业革命以来, 化石能源的规模化利用导致大气污染物排放量激增。据世界银行数据, 2020年全球SO₂排放量达3100万吨, NO_x排放量超过4800万吨, 其中工业烟气贡献占比超60%。传统烟气治理技术以末端达标排放为目标, 但存在资源浪费、二次污染等问题。例如, 石灰石-石膏湿法脱硫产生的劣质石膏年堆积量超2亿吨, 仅中国就有约30亿吨历史遗留堆存, 造成严重的土壤污染风险。资源化利用技术的兴起为烟气治理开辟了新路径。通过将污染物转化为硫酸、氢气、建材等高附加值产品, 不仅可减少废弃物处置成本, 还能创造新的经济增长点。例如, 金川集团通过烟气制酸技术年回收SO₂超60万吨, 生产硫酸625万吨, 直接经济效益达27亿元。这种“以废治废”的模式, 正在重塑工业烟气治理的底层逻辑。因此, 深入研究烟气治理中的资源化利用技术及其环境效益具有重要的现实意义。

2 烟气治理中的资源化利用技术

2.1 脱硫副产物利用技术

2.1.1 石灰石-石膏湿法脱硫副产物利用

石灰石-石膏湿法脱硫是目前应用最广泛的烟气脱硫技术。该技术以石灰石为脱硫剂, 与烟气中的SO₂反应生成亚硫酸钙, 再经氧化生成硫酸钙(石膏)。脱硫石膏是一种优质的建筑材料, 可用于生产石膏板、石膏砌块等。与天然石膏相比, 脱硫石膏具有纯度高、粒度细、成分稳定等优点。在生产石膏板时, 脱硫石膏经过煅烧、磨细、与添加剂混合等工序, 制成石膏浆料, 再通过成型、干燥等工艺制成石膏板。这种石膏板具有重量轻、强度高、防火性能好等特点, 广泛应用于建筑内墙和吊顶。此外, 脱硫石膏还可用于水泥生产中的缓凝剂, 调节水泥的凝结时间, 提高水泥的质量。

2.1.2 氨法脱硫副产物利用

氨法脱硫是利用氨水或液氨作为脱硫剂, 与烟气中的SO₂反应生成亚硫酸铵, 再经氧化生成硫酸铵。硫酸铵是一种重要的氮肥, 可直接施用于农田, 为农作物提供氮素营养。与传统的化肥生产相比, 氨法脱硫副产物硫酸铵的生产过程具有能耗低、污染小等优点^[1]。同时, 由于硫酸铵中含有硫元素, 还能为土壤补充硫营养, 改善土壤肥力。在一些大型燃煤电厂和化工企业, 采用氨法脱硫技术不仅实现了SO₂的高效脱除, 还将脱硫副产物转化为优质的化肥, 实现了资源的循环利用。

2.2 脱硝产物资源化技术

2.2.1 选择性催化还原(SCR)脱硝产物资源化

SCR脱硝技术是目前应用最成熟的烟气脱硝技术之一。该技术以氨气为还原剂, 在催化剂的作用下, 将烟气中的NO_x还原为氮气(N₂)和水(H₂O)。虽然SCR脱硝的主要产物是氮气和水, 但在脱硝过程中, 催化剂可能会发生中毒、失活等现象, 需要定期更换。废旧催化剂中含有钛、钒、钨等金属元素, 具有一定的回收价值。目前, 废旧SCR催化剂的回收利用技术主要包括物理法、化学法和生物法等。物理法主要是通过破碎、筛分等工艺, 将废旧催化剂中的有用成分与杂质分离; 化学法则是利用酸、碱等化学试剂, 将金属元素溶解出来, 再通过沉淀、萃取等方法进行分离和提纯; 生物法是利用微生物的代谢作用, 将金属元素转化为可回收的形式。回收后的金属元素可用于生产新的催化剂或其他化工产品, 实现资源的循环利用。

2.2.2 选择性非催化还原(SNCR)脱硝产物资源化

SNCR脱硝技术是在高温条件下, 将氨水或尿素等还原剂喷入炉膛内, 与烟气中的NO_x发生还原反应, 生成氮气和水。与SCR脱硝相比, SNCR脱硝技术具有投资少、运行成本低等优点, 但脱硝效率相对较低。SNCR脱硝过程中产生的副产物主要是未反应的氨和少量的铵盐。这

些副产物可通过后续的处理工艺进行回收利用。例如,未反应的氨可回收用于下一次的脱硝反应,铵盐可作为肥料或化工原料进行利用。

2.3 除尘灰渣综合利用技术

2.3.1 电除尘灰渣利用

电除尘器是工业烟气除尘的主要设备之一。电除尘过程中产生的灰渣中含有一定量的金属氧化物、碳等成分。对于一些含铁量较高的电除尘灰渣,可通过磁选、重选等物理选矿方法,将其中的铁元素回收利用,生产铁精矿或直接用于炼铁^[2]。此外,电除尘灰渣还可用于生产建筑材料,如砖块、水泥等。将电除尘灰渣与黏土、石灰等原料按一定比例混合,经过成型、烧制等工艺,可制成环保砖块。这种砖块具有强度高、保温性能好等优点,可替代传统的黏土砖,减少对土地资源的破坏。

2.3.2 袋式除尘灰渣利用

袋式除尘器具有除尘效率高、适应性强等优点,广泛应用于各种工业烟气除尘。袋式除尘灰渣的成分较为复杂,含有纤维、粉尘等物质。对于一些含有有机纤维的袋式除尘灰渣,可通过热解、气化等方法,将其中的有机成分转化为燃料气或生物油,实现能源的回收利用。同时,灰渣中的无机成分可用于生产土壤改良剂或肥料。例如,将灰渣进行适当的处理后,添加到土壤中,可改善土壤结构,提高土壤肥力。

2.4 其他烟气成分资源化利用技术

2.4.1 二氧化碳捕集与利用(CCUS)

二氧化碳是烟气中的主要温室气体之一。随着全球对气候变化问题的关注度不断提高,二氧化碳的捕集与利用技术成为研究热点。目前,二氧化碳捕集技术主要包括燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧捕集等。捕集到的二氧化碳可用于多种领域,如化工合成、食品加工、地质封存等。在化工合成方面,二氧化碳可与氢气反应生成甲醇、甲烷等燃料,或与环氧化合物反应生成聚碳酸酯等高分子材料。在食品加工行业,二氧化碳可用于饮料的碳酸化、食品的保鲜等。地质封存则是将二氧化碳注入地下深部的咸水层、枯竭油气田等地质构造中,实现长期封存,减少向大气中的排放。

2.4.2 重金属回收利用

工业烟气中可能含有汞、铅、镉等重金属污染物。这些重金属对人体健康和生态环境具有严重的危害,但同时也具有一定的回收价值。目前,重金属回收技术主要包括吸附法、离子交换法、膜分离法等。吸附法是利用活性炭、分子筛等吸附剂,将烟气中的重金属吸附下来,再通过解吸、回收等工艺,将重金属从吸附剂上分

离出来。离子交换法是利用离子交换树脂对重金属离子的选择性吸附作用,实现重金属的分离和回收。膜分离法则是利用半透膜的选择性透过性,将重金属离子从烟气中分离出来。回收后的重金属可用于生产电池、催化剂等产品,实现资源的循环利用。

3 烟气治理资源化利用技术的环境效益

3.1 减少污染物排放

3.1.1 降低大气污染物浓度

烟气治理资源化利用技术首先能够显著降低烟气中污染物的排放浓度。通过脱硫、脱硝、除尘等技术的综合应用,可有效去除烟气中的SO₂、NO_x、颗粒物等污染物。例如,石灰石-石膏湿法脱硫技术可将烟气中的SO₂排放浓度降低至35mg/m³以下,满足国家超低排放标准要求;SCR脱硝技术可使NO_x排放浓度降低至50mg/m³以下。减少这些污染物的排放,可有效改善大气环境质量,降低酸雨、光化学烟雾等环境问题的发生频率和危害程度。

3.1.2 减少温室气体排放

二氧化碳捕集与利用技术的应用,可显著减少烟气中二氧化碳的排放。通过将捕集到的二氧化碳进行地质封存或转化为有价值的产品,可降低大气中二氧化碳的浓度,缓解全球气候变化^[3]。例如,在一些大型燃煤电厂实施CCUS项目后,二氧化碳排放量可减少80%以上。此外,烟气治理资源化利用技术还可通过提高能源利用效率,间接减少因能源生产和使用过程中产生的温室气体排放。

3.2 降低能源消耗

3.2.1 余热回收利用

在烟气治理过程中,烟气通常携带大量的余热。通过安装余热回收装置,如余热锅炉、热管换热器等,可将烟气中的余热回收利用,用于加热锅炉给水、产生蒸汽或为其他工艺过程提供热源。例如,在钢铁企业的烧结工序中,通过余热回收装置可将烧结烟气中的余热回收用于发电,每吨烧结矿可发电20-30kWh,不仅降低了企业的能源消耗,还提高了能源利用效率。

3.2.2 资源化利用过程中的能源节约

烟气治理资源化利用技术本身也可实现能源的节约。例如,在脱硫副产物利用方面,利用脱硫石膏生产石膏板等建筑材料,相比传统的天然石膏开采和加工过程,可减少能源消耗和矿山开采对环境的破坏。在二氧化碳捕集与利用过程中,通过优化捕集工艺和提高能源利用效率,可降低捕集过程中的能耗。同时,将二氧化碳转化为燃料气或生物油等产品,可替代部分化石能

源,减少对传统能源的依赖。

3.3 促进循环经济发展

3.3.1 资源循环利用

烟气治理资源化利用技术实现了烟气中污染物的资源化转化,将原本被视为废弃物的污染物转化为有价值的资源,促进了资源的循环利用。例如,脱硫石膏用于生产建筑材料,废旧SCR催化剂回收金属元素,电除尘灰渣用于生产铁精矿或建筑材料等。这些资源化利用方式不仅减少了对自然资源的开采,还降低了废弃物的排放,实现了资源的可持续利用。

3.3.2 产业协同发展

烟气治理资源化利用技术的发展促进了相关产业的协同发展。例如,在脱硫副产物利用方面,形成了以燃煤电厂、脱硫公司、建材企业等为主体的产业链。燃煤电厂产生的脱硫石膏提供给建材企业用于生产石膏板等产品,实现了产业间的资源共享和优势互补^[4]。在二氧化碳捕集与利用方面,涉及化工、能源、地质等多个领域,推动了跨行业的合作与创新,促进了循环经济的发展。

3.4 改善生态环境质量

3.4.1 减少土壤和水体污染

烟气中的污染物如重金属、酸性物质等,如果未经处理直接排放到大气中,会通过沉降作用进入土壤和水体,造成土壤和水体污染。烟气治理资源化利用技术有效减少了这些污染物的排放,降低了对土壤和水体的污染风险。例如,通过重金属回收技术,将烟气中的重金属回收利用,减少了重金属向土壤和水体的排放,保护了土壤和水体的生态环境。

3.4.2 保护生物多样性

大气污染对生物多样性造成了严重威胁。烟气治理资源化利用技术降低了大气污染物的排放,改善了大气环境质量,为生物提供了更适宜的生存环境。例如,减

少酸雨的发生,可保护森林、湖泊等生态系统,维护生物多样性。同时,通过促进循环经济发展,减少了对自然资源的过度开采,保护了生物的栖息地,有利于生物多样性的保护和恢复。

结语

烟气治理中的资源化利用技术是解决烟气污染问题、实现资源可持续利用的重要途径。通过脱硫副产物利用、脱硝产物资源化、除尘灰渣综合利用以及其他烟气成分资源化利用等技术,可将烟气中的污染物转化为有价值的资源,带来显著的环境效益,如减少污染物排放、降低能源消耗、促进循环经济发展和改善生态环境质量等。然而,目前烟气治理资源化利用技术还面临着技术、经济和政策管理等方面的挑战。为了推动烟气治理资源化利用技术的进一步发展,需要加强技术研发与创新,完善经济激励机制,强化政策和管理支持。只有这样,才能实现烟气治理与资源化利用的协同发展,为我国的生态环境保护和可持续发展做出更大的贡献。

在未来的发展中,随着科技的不断进步和政策的不断完善,烟气治理资源化利用技术将不断创新和发展,其应用范围和效益将不断扩大。我们应充分认识到烟气治理资源化利用技术的重要性,积极推动相关技术的研发和应用,为实现绿色发展、建设美丽中国而努力。

参考文献

- [1]杨倩.锅炉烟气深度治理及资源化利用技术研究[D].江苏大学,2021.
- [2]段飞飞,胡金良,肖海平.火电厂烟气余热利用及深度治理综合技术应用[J].中国环保产业,2020,(02):36-40.
- [3]李怡然.烟气污染治理中的能源回收技术[J].中国轮胎资源综合利用,2025,(01):64-66.
- [4]路光杰.燃煤烟气污染物治理行业热点及煤电绿色转型的重要举措[J].中国环保产业,2024,(12):24-26.