

燃煤电厂脱硫废水零排放工艺路线分析

方琳

浙江浙能科技环保集团股份有限公司 浙江 杭州 311100

摘要：燃煤电厂作为能源供应的重要来源，其脱硫废水处理是实现零排放的关键。脱硫废水主要来源于湿法脱硫工艺，具有弱酸性、高悬浮物含量、含多种金属离子和无机盐等特点。实现脱硫废水零排放不仅是环保需求，也是电力行业绿色转型的必然。本文详细分析了脱硫废水零排放工艺路线，包括预处理、浓缩减量、蒸发固化和结晶与回收等环节，并对比了不同工艺路线的处理效果、运行稳定性、能源消耗以及占地面积和空间要求等方面的特点。电厂在选择工艺路线时，需综合考虑实际情况，以确保废水处理效果最佳、运行稳定可靠、能源消耗经济合理且占地面积和空间要求满足需求。

关键词：燃煤电厂；脱硫废水；零排放；工艺路线

1 燃煤电厂脱硫废水概述

1.1 脱硫废水产生来源

燃煤电厂作为能源供应的重要来源，其发电过程中会产生大量的废气、废水和固体废弃物，其中脱硫废水是燃煤电厂废水处理的重要一环。脱硫废水主要来源于燃煤电厂的湿法脱硫工艺，尤其是石灰石-石膏法。这种工艺是燃煤电厂中常用的烟气脱硫技术，通过向烟气中喷入石灰石浆液，与烟气中的二氧化硫进行化学反应，生成硫酸钙（石膏）等可溶性物质和固体物质，从而有效去除烟气中的二氧化硫，减少大气污染。在脱硫过程中，烟气和石灰石浆液在吸收塔内发生反应，生成的石膏浆液经过脱水处理后，大部分可回收作为建筑材料使用，但处理过程中会产生大量的废水，即脱硫废水。这些废水的产生主要包括以下几个方面：第一，石膏浆液废水是脱硫废水的主要来源之一。在脱硫过程中，烟气与石灰石浆液反应生成的石膏浆液含有较高的水分，处理后的石膏浆液在排放过程中会产生大量废水。这些废水中含有石膏晶体颗粒、未反应完全的石灰石浆液以及其他悬浮物。第二，冲洗废水也是脱硫废水的重要组成部分。为了防止脱硫设备在运行过程中结垢而影响正常运行，需要定期对脱硫系统进行冲洗。冲洗过程中产生的废水含有悬浮物、有机物等污染物，这些废水同样需要处理。第三，脱硫系统中的浆液循环平衡也需要定期排放废水以维护。随着运行时间的增加，吸收塔内的杂质含量逐渐增加，为了保持系统的正常运行，需要定期排放一部分废水以去除这些杂质。

1.2 脱硫废水的水质特点

脱硫废水的水质特点复杂且多样，主要包括以下几个方面：（1）脱硫废水呈弱酸性，pH值一般在4.0至6.0

之间。由于废水中含有硫酸根离子、亚硫酸根离子等酸性物质，使得废水具有一定的腐蚀性。这种弱酸性环境不仅增加了废水处理的难度，也对处理设备提出了更高的耐腐蚀要求。（2）脱硫废水中的悬浮物含量高，质量浓度通常在10000mg/L以上。这些悬浮物主要包括未反应完全的石灰石浆液、石膏晶体颗粒以及其他杂质。高悬浮物含量不仅增加了废水处理的难度，还容易在管道和设备中造成堵塞和磨损^[1]。（3）脱硫废水中还含有多种金属离子和无机盐类。这些金属离子主要包括钙离子、镁离子、铁离子、铝离子等，它们在高温下容易结垢，影响电厂的安全运行。同时，废水中还含有氟化物、重金属（如铅、锌、铜等）以及难以降解的有机物等污染物。这些污染物不仅对环境造成危害，还可能对人体健康产生不良影响。脱硫废水的含盐量也普遍较高，通常在30000mg/L到60000mg/L之间。高含盐量不仅增加废水处理的难度，还使得废水在排放过程中容易对水体造成污染。

2 燃煤电厂脱硫废水零排放的重要性

燃煤电厂脱硫废水零排放的重要性不言而喻，它不仅是环境保护的迫切需求，也是实现电力行业绿色转型的关键一环。燃煤电厂在运行过程中，通过湿法脱硫技术有效减少二氧化硫的排放，但这一过程中产生的脱硫废水，若未经妥善处理直接排放，将对水体生态系统构成严重威胁。脱硫废水中含有高浓度的悬浮物、重金属离子、无机盐以及难以降解的有机物，这些污染物若进入水体，将严重破坏水质，影响水生生物的生存，甚至通过食物链对人类健康构成潜在风险。实现脱硫废水零排放，意味着电厂在生产电能的同时，能够最大限度地减少对环境的不良影响，体现了企业对社会责任的担

当。这要求电厂采用先进的废水处理技术和工艺，如膜浓缩、蒸发结晶等，将废水中的有害物质分离并妥善处理，最终实现废水的循环利用或无害化排放。这一过程不仅有助于保护水资源，减少水污染，还能促进资源的节约与循环利用，推动电力行业向更加环保、可持续发展的方向发展。脱硫废水零排放的实现，不仅是对现有环保法规的积极响应，更是电厂提升自身竞争力、迎接未来更严格环保标准挑战的重要举措^[2]。通过技术创新和工艺优化，电厂可以在保证电力供应的同时，实现环境效益与经济效益的双赢，为全球应对气候变化贡献自己的力量。

3 脱硫废水零排放工艺路线分析

3.1 预处理工艺

预处理工艺是脱硫废水零排放工艺路线的第一步，也是整个处理过程的基础。预处理的主要目的是去除废水中的悬浮物、胶体物质和部分溶解性有机物，为后续工艺创造有利条件。这一步骤的完成质量直接影响到后续工艺的运行效果和稳定性。在预处理过程中，混凝沉淀是一个重要的环节；通过向废水中添加混凝剂，如铁盐、铝盐等，可以使废水中的悬浮物和胶体物质形成较大的絮体并沉淀下来。混凝剂的选择和投加量需要根据废水的具体水质和工艺要求来确定。混凝沉淀后，废水中的悬浮物浓度显著降低，为后续过滤环节提供了便利；过滤环节则是利用过滤介质（如砂滤、活性炭滤等）进一步去除废水中的悬浮物和杂质。过滤介质的选择需要根据废水的特性和处理要求来确定。通过过滤，可以进一步降低废水中的悬浮物浓度，提高废水的清澈度；另外，调节pH值也是预处理过程中的一个重要环节。通过向废水中添加酸或碱，可以控制废水的酸碱度，使其符合后续工艺的要求。pH值的调节不仅有助于保护后续设备的正常运行，还可以提高废水处理的效率和质量。

3.2 浓缩减量工艺

经过预处理后的脱硫废水，其体积仍然较大，直接进行蒸发固化会消耗大量的能源。因此，在蒸发固化之前，需要对废水进行浓缩减量处理。浓缩减量工艺的主要目的是通过物理或化学方法，将废水中的水分去除，使废水体积大幅减小，同时提高废水中污染物的浓度。常用的浓缩减量方法包括反渗透、电渗析和热蒸发等。反渗透技术利用半透膜的选择透过性，将废水中的水分和溶解性盐类分离，实现废水的浓缩。电渗析技术则是利用电场作用下的离子迁移现象，将废水中的盐分去除，实现废水的脱盐。热蒸发技术则是通过加热废水，使其迅速蒸发，从而实现废水的浓缩。这些方法各有特

点，可以根据废水的具体水质和工艺要求选择合适的技术路线。例如，对于含有大量溶解性盐类的废水，反渗透和电渗析技术可能更为适用；而对于含有大量挥发性物质的废水，热蒸发技术可能更为合适。

3.3 蒸发固化工艺

蒸发固化工艺是脱硫废水零排放工艺路线的核心环节；这一步骤的主要目的是将浓缩减量后的废水中的水分完全蒸发，使污染物以固体形式析出，从而实现废水的无害化处理和资源化利用。蒸发固化工艺可以采用自然蒸发或强制蒸发两种方式：自然蒸发主要利用太阳能等自然能源，适用于废水处理量较小且气候条件适宜的地区。在这种方式下，废水被置于蒸发池中，通过太阳的辐射热使废水逐渐蒸发。自然蒸发方式具有运行成本低、操作简便等优点，但受到气候条件的限制，处理效率相对较低；强制蒸发则是通过加热废水，使其迅速蒸发，适用于废水处理量大或气候条件不利的地区。在这种方式下，废水被置于蒸发器中，通过加热装置对废水进行加热，使其迅速蒸发。强制蒸发方式具有处理效率高、不受气候条件限制等优点，但运行成本相对较高；在蒸发固化过程中，需要严格控制温度、压力等参数，以确保工艺的稳定运行和废水的完全处理。同时，还需要对蒸发产生的蒸汽进行冷凝回收，以实现资源的最大化利用^[3]。

3.4 结晶与回收工艺

蒸发固化后产生的固体物质，即结晶物，是脱硫废水处理过程中的重要产物。这些结晶物中含有大量的有价值的物质（如石膏、硫酸盐等），可以进行回收和利用。结晶与回收工艺的主要目的是将蒸发固化后的固体物质进行分离、提纯和回收，以实现资源的最大化利用。在这一步骤中，需要采用适当的分离技术（如离心分离、过滤等）将固体物质从废水中分离出来。然后，利用提纯技术（如重结晶、化学沉淀等）对固体物质进行提纯处理，提取出其中的有用成分。

4 不同脱硫废水零排放工艺路线的技术特点对比

在燃煤电厂废水处理领域，脱硫废水零排放工艺路线的选择至关重要。这不仅关系到废水处理的效果，还直接影响到电厂的运行稳定性、能源消耗以及占地面积和空间要求。

4.1 处理效果

脱硫废水零排放工艺路线的处理效果是评估其优劣的首要标准，热法蒸发结晶工艺以其技术成熟、可靠性高的特点，在处理效果上表现出色；该工艺能有效去除废水中的重金属离子、硫酸根离子、氯化物等有害物

质, 确保废水达到零排放的标准。膜法浓缩结晶工艺虽然运行成本相对较低, 但水质波动适应性较差, 处理效果可能受到一定影响^[4]。相比之下, 直接热法干燥和热法浓缩干燥工艺路线则表现出更好的水质波动适应性, 且预处理简单, 吨水运营成本远低于结晶工艺。这些工艺路线在处理效果上均能满足电厂对废水零排放的严格要求。需要注意的是, 不同工艺路线的处理效果还受到废水水质、处理规模以及运行条件等多种因素的影响。

4.2 运行稳定性

运行稳定性是评估脱硫废水零排放工艺路线优劣的关键因素之一, 热法蒸发结晶工艺虽然技术成熟, 但需要进行复杂的预处理环节, 软化成本高, 且蒸汽热耗量大, 这可能在一定程度上影响其运行稳定性。相比之下, 膜法浓缩结晶工艺虽然水质波动适应性较差, 但经过浓缩后运行成本略低, 且设备相对简单, 易于维护。直接热法干燥和热法浓缩干燥工艺路线则以其运行稳定、预处理简单、吨水运营成本低等优势, 成为电厂在选择脱硫废水零排放工艺路线时的优选。另外, 运行稳定性还受到设备性能、操作人员的技能水平以及维护保养情况等多种因素的影响。

4.3 能源消耗情况

能源消耗是评估脱硫废水零排放工艺路线经济性的重要指标, 热法蒸发结晶工艺由于需要消耗大量的蒸汽进行蒸发结晶, 因此能源消耗相对较高。膜法浓缩结晶工艺虽然经过浓缩后运行成本略低, 但膜设备的投资和运行成本也不容忽视。相比之下, 直接热法干燥和热法浓缩干燥工艺路线则以其能源消耗低、运行成本低的优势, 成为电厂在选择脱硫废水零排放工艺路线时的经济之选。要注意的是, 能源消耗情况还受到废水处理规模、设备运行效率以及操作人员的操作水平等多种因素的影响。

4.4 占地面积及空间要求

占地面积及空间要求是评估脱硫废水零排放工艺路线可行性的重要指标, 热法蒸发结晶工艺由于需要设置蒸发器、结晶器等大型设备, 因此占地面积相对较大。膜法浓缩结晶工艺虽然设备相对简单, 但膜组件的占地

面积也不容小觑。相比之下, 直接热法干燥和热法浓缩干燥工艺路线则以其设备简洁、占地面积小的优势, 成为电厂在选择脱硫废水零排放工艺路线时的优选。需要注意的是, 占地面积及空间要求还受到废水处理规模、设备布置方式以及现场环境等多种因素的影响^[5]。不同的脱硫废水零排放工艺路线在处理效果、运行稳定性、能源消耗以及占地面积和空间要求等方面各有特点。电厂在选择工艺路线时, 根据自身实际情况进行综合考虑, 以确保废水处理效果达到最佳、运行稳定可靠、能源消耗经济合理以及占地面积和空间要求满足实际需求。因此, 电厂在选择工艺路线时, 充分考虑这些因素, 以确保工艺路线的可行性和实用性。同时, 电厂还需要加强技术创新, 不断优化和完善工艺路线, 提高废水处理的效果和效率, 为环保事业和可持续发展做出贡献。

结束语

综上所述, 燃煤电厂脱硫废水零排放工艺路线的选择与实施对于环境保护和电力行业可持续发展具有重要意义。通过优化和创新工艺路线, 电厂可以有效提高废水处理效率和效果, 降低能源消耗和占地面积, 实现废水的无害化处理和资源化利用。未来, 随着技术的不断进步和环保要求的日益严格, 燃煤电厂需要不断加强技术创新, 推动脱硫废水零排放技术的升级和普及, 为构建绿色、低碳、可持续的能源体系贡献力量。

参考文献

- [1]章小园.燃煤电厂脱硫废水零排放工艺路线分析[J].中国资源综合利用,2024,42(01):159-161.
- [2]刘静颖,贾阳杰,杨凤玲,等.燃煤电厂脱硫废水零排放预处理工艺研究进展[J].无机盐工业,2023,55(12):12-25.
- [3]张胜梅.燃煤电厂脱硫废水零排放处理工艺分析[J].中国资源综合利用,2022,40(03):178-179.
- [4]高明楷,杨普,吴海滨,等.碳减排情景下燃煤电厂烟气脱硫技术优化及评价方法[J].洁净煤技术, 2022, 28(7): 177-188.
- [5]王智麟,张胜寒,祁伟健.燃煤电厂脱硫废水中氯离子去除技术研究进展[J].现代化工, 2021, 41(11): 67-76.