

电厂废水零排放中的废水处理工艺研究

张兴棠¹ 辛书庭²

1. 山东省泰安市泰山电建集团有限公司 山东 泰安 271000

2. 山东能源内蒙矿业集团乌兰察布市宏大实业 内蒙古 乌兰察布 013650

摘要：在环保要求日益严苛的当下，电厂废水零排放成为行业发展的必然趋势。本文聚焦电厂废水零排放中的废水处理工艺展开研究。首先阐述电厂废水的来源及特点，进而详细介绍常用处理工艺，包括物理、化学、生物及蒸发结晶工艺。同时，深入分析该处理工艺面临的污泥处理、膜污染、高盐废水处理难度大以及投资运行成本高的挑战。最后探讨其发展趋势，涵盖新型膜技术研发、多工艺集成化、智能化控制及资源回收综合利用等方面，旨在为电厂废水零排放处理工艺的优化提供理论参考。

关键词：电厂废水；零排放中的废水处理；工艺研究

引言：随着环保标准日益严格，电厂废水零排放成为行业发展的必然趋势。电厂废水若未经有效处理直接排放，不仅会对周边水体、土壤等生态环境造成严重污染，还可能影响水资源的可持续利用。因此，研究高效的电厂废水零排放处理工艺至关重要。本文全面剖析电厂废水来源与特点，深入探究各类处理工艺，分析面临的挑战并展望发展趋势，以期为推动电厂废水零排放技术的进步与应用提供有益思路。

1 电厂废水的来源及特点

电厂废水来源复杂，具有多种类型。其一为冷却水排水，电厂在发电过程中，需大量冷却水带走热量，经多次循环后，水中盐分、杂质浓缩，需定期排放，以维持冷却系统正常运行。其二是锅炉排污水，锅炉运行时，水中杂质、盐分不断浓缩，为保证蒸汽品质，需定期排放部分高浓度污水。其三是脱硫废水，在采用石灰石-石膏湿法脱硫工艺时，会产生含有重金属离子（如汞、铅、镉等）及大量悬浮物的废水。此外，还有化学水处理系统酸碱再生废水，离子交换树脂在去除水中离子杂质后，需酸碱再生，此过程会产生含酸碱及重金属的废水。电厂废水特点鲜明。水质方面，不同来源废水成分差异大，导致处理难度高。水量上，会随电厂负荷变化而波动，缺乏稳定性。部分废水含盐量极高，如冷却水排水，增加了处理难度与成本。部分废水，像脱硫废水含重金属，若排放将严重污染土壤、水体，危害生态与人体健康^[1]。

2 电厂废水零排放中的常用处理工艺

2.1 物理处理工艺

2.1.1 膜分离技术

膜分离技术在电厂废水零排放处理中至关重要。它

基于膜的选择透过性，借压力驱动实现物质分离。如微滤（MF），膜孔径0.1-10μm，能截留悬浮物、细菌等大颗粒。超滤（UF）膜孔径0.001-0.1μm，可去除胶体、大分子有机物。纳滤（NF）和反渗透（RO）对二价及多价离子、小分子有机物有高截留率。此技术流程简单，能高效分离回收有用物质，减少废水排放。但膜易污染，需定期清洗或更换，成本较高，且对进水水质要求严格。

2.1.2 浮选技术

浮选技术通过向电厂废水中通入气体产生微小气泡，使疏水的污染物颗粒附着气泡上浮，实现与水分离。比如处理含油废水时，油滴黏附气泡升至水面被刮除。该技术能有效去除废水中悬浮固体、油脂及部分胶体。在浮选过程中，添加浮选剂可改变污染物表面性质，提高浮选效率。其设备简单、操作方便、处理速度快。然而，它主要针对疏水性污染物，对溶解性物质去除效果不佳，通常需与其他工艺联用，以全面净化废水。

2.2 化学处理工艺

2.2.1 中和法

中和法是针对电厂废水中酸碱性失衡问题的重要化学处理工艺。电厂废水常因化学清洗、离子交换等过程产生酸性或碱性废水。对于酸性废水，通常投加碱性药剂，如石灰、氢氧化钠等，通过酸碱中和反应，使废水pH值达到中性范围。反之，碱性废水则需加入酸性物质，如硫酸、盐酸等进行中和。此方法操作相对简单，能有效调整废水的酸碱度，避免酸性或碱性废水对后续处理设备与环境造成腐蚀和危害。但在实际应用中，需精准控制药剂投加量，否则易导致二次污染或处理效果不佳。

2.2.2 化学沉淀法

化学沉淀法是利用化学反应,向电厂废水中加入特定沉淀剂,使废水中的重金属离子或其他溶解性污染物形成难溶性沉淀物,从而实现从废水中分离去除的目的。例如,对于含重金属离子(如铜、铅、锌等)的废水,加入硫化物沉淀剂,可生成硫化物沉淀。这种方法能有效去除废水中特定污染物,降低其浓度。在处理高浓度重金属废水时优势明显,处理效果稳定可靠。不过,该方法需根据废水中污染物种类选择合适沉淀剂,且沉淀产生的污泥后续处理较为复杂,需妥善处置以防止二次污染。

2.2.3 氧化法

氧化法是通过强氧化剂将电厂废水中的有机污染物或还原性无机物氧化分解,转化为无害或易于处理的物质。常见氧化剂有臭氧、过氧化氢、二氧化氯等。以臭氧为例,它具有强氧化性,能快速与废水中的有机物反应,将其氧化为二氧化碳和水等小分子物质。在处理含酚、氰化物等有毒有害物质的废水时,氧化法效果显著,可有效降低废水的毒性和污染物含量。该方法反应速度快,处理效率高,且不会引入新的杂质。但部分氧化剂成本较高,设备投资大,对操作条件要求较为严格,限制了其大规模应用。

2.3 生物处理工艺

2.3.1 好氧生物处理

好氧生物处理是利用好氧微生物在有氧环境下,将电厂废水中的有机污染物分解为二氧化碳和水等无机物。在处理过程中,好氧微生物以废水中的有机物为营养源,通过自身新陈代谢活动实现对污染物的降解。例如活性污泥法,通过向曝气池中注入废水和活性污泥,在曝气充氧的条件下,活性污泥中的好氧微生物迅速分解有机物,使废水得到净化。该方法处理效率高,能有效去除废水中的大部分有机污染物,且出水水质较好。但它对废水的水质、水温、pH值等条件要求较为苛刻,且需消耗大量氧气,运行成本相对较高。

2.3.2 厌氧生物处理

厌氧生物处理是在无氧条件下,依靠厌氧微生物将电厂废水中的有机污染物转化为甲烷、二氧化碳等气体。在厌氧处理系统中,复杂有机物首先被水解细菌分解为简单有机物,再经产酸菌进一步转化为挥发性脂肪酸,最后由产甲烷菌生成甲烷。该工艺无需曝气,能耗低,且能产生可作为能源的沼气,降低处理成本。同时,它对高浓度有机废水处理效果良好,可承受较高的有机负荷。然而,厌氧生物处理启动时间长,微生物对环境变化敏感,如温度、pH值的微小波动都可能影响处

理效果,且出水水质通常难以达到排放标准,常需后续处理。

2.4 蒸发结晶工艺

2.4.1 多效蒸发(MED)

多效蒸发(MED)是电厂废水零排放中常用的蒸发结晶工艺。它利用多个蒸发器串联,前一效蒸发器产生的二次蒸汽作为下一效的热源,实现热能的多效利用,有效降低能耗。在MED系统中,废水依次进入各效蒸发器,随着水分不断蒸发,盐分等溶质浓度逐渐升高,最终结晶析出。该工艺操作相对稳定,对水质适应性强,能处理多种成分复杂的高盐废水。而且,多效蒸发技术成熟,运行可靠性高,结晶盐品质较好,可实现部分资源回收。不过,MED设备占地面积大,投资成本较高,且对设备密封性要求严格,否则易导致蒸汽泄漏,影响蒸发效率。

2.4.2 机械式蒸汽再压缩技术(MVR)

机械式蒸汽再压缩技术(MVR)通过压缩机对蒸发产生的二次蒸汽进行压缩,提高其温度和压力,再将其作为热源送回蒸发器循环利用。此过程极大减少了对外界生蒸汽的需求,显著降低能耗。在处理电厂废水时,MVR系统能高效蒸发水分,使废水中的盐分结晶分离。该工艺设备紧凑,占地面积小,自动化程度高,可连续稳定运行。同时,由于减少了蒸汽消耗,运行成本大幅降低。但MVR对设备的性能和稳定性要求极高,压缩机等关键设备的投资较大,且设备维护和维修技术要求高,一旦出现故障,可能影响整个系统的运行^[2]。

2.4.3 烟道蒸发技术

烟道蒸发技术是将电厂脱硫废水雾化后喷入烟道,利用高温烟气的余热使废水迅速蒸发,废水中的盐分等杂质随烟气进入除尘器被捕集。该技术巧妙利用了电厂自身的烟道余热,无需额外热源,投资和运行成本相对较低。而且,设备简单,安装方便,可快速融入现有电厂系统。此外,该工艺对废水的处理量大,能有效解决脱硫废水的排放问题。然而,烟道蒸发可能会对烟道及下游设备造成一定的腐蚀和磨损,影响设备使用寿命。同时,废水蒸发过程中可能会产生一些细颗粒物,对烟气的除尘效果产生影响,需要对相关设备进行优化和调整。

3 电厂废水零排放处理工艺面临的挑战

3.1 污泥处理问题

电厂废水处理过程中会产生大量污泥,这些污泥成分复杂,不仅含有重金属等有害物质,还可能还存在未完全降解的有机物。若处理不当,容易造成二次污染。而且污泥产量大,传统的填埋、焚烧等处置方式,面临着

场地资源紧张、焚烧成本高以及可能产生二噁英等新污染物的问题，给污泥的妥善处理带来诸多挑战。

3.2 膜污染问题

在采用膜分离技术处理电厂废水时，膜污染是难以避免的难题。废水中的悬浮物、胶体、有机物及微生物等，会在膜表面或膜孔内吸附、沉积，导致膜通量下降，过滤阻力增大。这不仅降低了膜分离效率，缩短膜的使用寿命，还需频繁进行清洗或更换膜组件，增加处理成本与操作难度。

3.3 高盐废水处理难度大

电厂高盐废水中盐分含量高，成分复杂，包含多种无机盐。高盐环境对微生物具有抑制作用，使得生物处理工艺难以有效发挥。蒸发结晶等物理化学方法虽能实现盐分与水的分离，但能耗高，且结晶过程易出现结垢、堵塞等问题，影响设备稳定运行，增加处理难度与成本。

3.4 投资和运行成本高

实现电厂废水零排放，需采用多种先进处理工艺，从预处理到深度处理，涉及众多设备与技术，这使得前期投资巨大。运行过程中，不仅要消耗大量的能源，如电力、蒸汽等，还需定期更换耗材、对设备进行维护保养，同时需要专业人员进行操作管理，这些因素都导致运行成本居高不下，给电厂带来较大经济压力^[3]。

4 电厂废水零排放处理工艺的发展趋势

4.1 新型膜技术的研发

随着对电厂废水处理要求的提高，新型膜技术研发成为关键趋势。传统膜易污染、寿命短等问题亟待解决，研发重点在于提升膜的抗污染能力、通量及选择性。例如，开发具有特殊表面结构或材质的膜，使其不易吸附污染物，减少膜污染频率。同时，提高膜的分离效率，在保证截留效果的前提下，增加水通量，降低处理成本。另外，探索新型制膜材料，如石墨烯基膜材料，利用其独特的二维结构和优异性能，有望实现更高效的废水处理，为电厂废水零排放提供更可靠的技术支持。

4.2 多工艺集成化

单一处理工艺难以满足电厂废水零排放的复杂要求，多工艺集成成为必然趋势。将物理、化学、生物及蒸发结晶等工艺有机结合，发挥各工艺优势。比如，先通过物理沉淀或过滤去除大颗粒杂质，再用化学沉淀法去除重金属，接着利用生物处理降解有机物，最后采用蒸发结晶实现水资源与盐分的分离回收。这种集成方式

可针对废水不同污染物特性，进行分步处理，提高整体处理效率与出水水质，降低运行成本，解决单一工艺的局限性，更有效地实现电厂废水零排放目标。

4.3 智能化控制

在电厂废水零排放处理系统中，智能化控制是重要发展方向。利用传感器实时监测废水水质、流量、设备运行参数等信息，并将数据传输至控制系统。控制系统借助大数据分析、人工智能算法，根据实时数据自动调整处理工艺参数，如药剂投加量、设备运行时间与强度等，实现精准处理。智能化控制不仅提高处理效率，还能降低人力成本，及时发现并预警设备故障，保障处理系统稳定可靠运行。

4.4 资源回收与综合利用

未来电厂废水零排放处理将更注重资源回收与综合利用。废水中除水之外，还含有多种有价值的物质，如重金属、盐类等。通过优化处理工艺，将这些资源进行有效分离与回收。例如，从含重金属废水中回收铜、镍等金属，实现资源再利用。对于废水中的盐分，可通过蒸发结晶得到工业用盐。同时，处理后的再生水回用于电厂冷却、脱硫等环节，提高水资源利用率。这种资源回收与综合利用模式，不仅减少废弃物排放，还能为电厂创造额外经济效益，推动电厂向绿色可持续发展^[4]。

结束语

综上所述，电厂废水零排放处理工艺的研究至关重要且意义深远。尽管当前面临污泥处理、膜污染、高盐废水处理及成本高等诸多挑战，但新型膜技术研发、多工艺集成化、智能化控制与资源回收利用等趋势，为解决这些问题带来曙光。未来，需持续创新与实践，不断优化和完善处理工艺，提高处理效率，降低成本，真正实现电厂废水零排放及资源的高效循环利用，助力电力行业的可持续发展。

参考文献

- [1]钱感,关洪银.燃煤电厂脱硫废水综合处理工艺[J].水处理技术,2017,43(02):136-138.
- [2]李兵,张其龙,王学同,周灿.燃煤电厂废水零排放处理技术[J].水处理技术,2017,43(06):24-28+33.
- [3]单涛.电厂废水零排放工艺路线探究[J].中国环保产业,2017(07):59-62.
- [4]曹蕃.燃煤电厂废水零排放技术路线研究[J].华北电力技术,2017(12):56-62.