

工业废水零排放处理中水资源循环利用技术研究

南 峰

新疆中部合盛硅业有限公司 新疆乌鲁木齐 830000

摘 要：本研究针对工业废水零排放目标下水资源循环利用技术的优化与集成展开系统分析。研究以物理法（沉淀、过滤、气浮）、化学法（混凝沉淀、氧化还原）及生物法（活性污泥、生物膜）为基础技术框架，结合膜分离（反渗透、纳滤）与蒸发结晶（多效蒸发、机械压缩蒸发）等先进工艺，构建多技术协同处理体系。通过案例分析验证技术集成效果，结果表明：针对复杂成分废水，采用“预处理—生化降解—深度膜分离—浓缩液蒸发”的组合工艺，可实现95%以上水资源回用率，同时将残渣产生量降低至0.5%以下。研究进一步提出基于工艺参数优化、设备智能化管理以及副产物资源化的技术升级策略，为工业废水零排放工程实践提供理论支撑与实施路径。

关键词：工业废水；零排放处理；水资源；循环利用技术

工业生产作为水资源消耗与污染的主要源头，其废水排放问题已成为制约可持续发展的关键瓶颈。传统末端治理模式存在处理效率低、资源浪费严重等缺陷，难以满足日益严格的环保要求。本研究立足工业水循环闭环管理需求，系统梳理物理、化学、生物三大基础处理技术，并深入探讨膜分离与蒸发结晶等前沿工艺的技术特性与应用边界。通过解析典型行业技术集成案例，揭示多工艺协同机制对提升水资源回用率、降低残渣处置量的核心作用。研究旨在突破单一技术局限，构建适应复杂工业场景的零排放技术体系，为推动工业节水减排提供科学依据与技术解决方案。

一、工业废水零排放概述

（一）工业废水零排放的定义与内涵

工业废水零排放并非指工业生产过程中完全不产生废水，而是通过一系列先进的处理技术与管理手段，使工业废水在经过处理后得到最大程度的回用，仅有少量不可回收利用的浓缩废物进行安全处置，从而实现对外排放废水为零的目标。这一概念涵盖了从废水的产生源头控制、处理过程优化到最终回用与处置的全过程，强调水资源在工业体系内的闭环循环，以减少对自然水体的污染与水资源的浪费^[1]。

（二）工业废水零排放的现状与挑战

目前，部分发达国家在工业废水零排放方面已取得一定进展，通过严格的法规政策推动和企业技术创新，在一些高耗水行业如电力、化工、造纸等实现了一定程度的废水零排放示范。然而，在全球范围内，工业废水零排放仍面临诸多挑战。一方面，现有处理技术在处理

效率、成本、稳定性等方面存在不足，例如一些先进的膜分离技术虽然处理效果好，但膜易污染且更换成本高；另一方面，不同行业、不同企业的工业废水成分复杂多样，使得通用性的零排放技术难以广泛应用，需要针对特定废水特点进行个性化技术研发与整合。此外，工业废水零排放项目的初始投资巨大，运行成本较高，对企业的经济承受能力和技术水平提出了较高要求，这些都在一定程度上限制了工业废水零排放的大规模推广与实施。

二、水资源循环利用技术基础

（一）物理法水资源循环利用技术

1. 沉淀与过滤技术

沉淀是利用重力作用使废水中的悬浮固体颗粒沉降分离的过程。例如在冶金工业废水处理中，含有大量金属氧化物和氢氧化物的悬浮颗粒，通过设置沉淀池，可使这些颗粒逐渐沉降到池底，上清液则可进一步处理或回用。过滤则是通过多孔介质拦截废水中的杂质，如在纺织印染废水处理中，采用砂滤或活性炭过滤，能有效去除废水中的纤维绒毛、染料颗粒等微小悬浮物，使水质得到初步改善，为后续深度处理创造条件。

2. 气浮技术

气浮是通过向废水中通入空气，使水中的微小悬浮颗粒黏附在气泡上，随气泡一起上浮到水面形成浮渣而去除。在石油炼制废水处理中，由于废水中含有大量的油滴和细小固体颗粒，气浮技术能够有效地将这些物质分离出来。例如，向废水中加入表面活性剂，使油滴和固体颗粒表面活性增强，更容易与气泡黏附，从而提高气浮效果，处理后的水资源可回用于工业生产的冷却、

冲洗等环节，实现水资源的部分循环利用。

（二）化学法水资源循环利用技术

1. 混凝沉淀技术

混凝沉淀是通过向废水中投加混凝剂，使水中的胶体颗粒和微小悬浮物脱稳凝聚成较大的絮体，然后通过沉淀去除。在市政污水处理中，常使用聚合氯化铝（PAC）等混凝剂，它能够水解生成一系列多核羟基配合物，吸附水中的胶体杂质，如泥沙、有机物等，形成较大的矾花沉淀下来。这一技术不仅可以降低水的浊度，还能去除部分有机物和重金属离子，处理后的水可作为城市绿化、道路冲洗等用水，实现水资源的再利用。

2. 氧化还原技术

氧化还原技术是利用氧化剂或还原剂与废水中的污染物发生氧化还原反应，将其转化为无害或易于处理的物质。例如在电镀废水处理中，含有剧毒的六价铬离子 $[\text{Cr}(\text{VI})]$ ，可通过加入亚硫酸盐等还原剂，将其还原为毒性较低的三价铬离子 $[\text{Cr}(\text{III})]$ ，然后再通过沉淀等方法去除。对于含有有机污染物的化工废水，可采用臭氧氧化技术，臭氧具有强氧化性，能将大分子有机物分解为小分子有机物或无机物，提高废水的可生化性，经过后续处理后，水资源可重新回到工业生产流程中，实现循环利用。

（三）生物法水资源循环利用技术

1. 活性污泥法

活性污泥法是一种常见的生物处理技术，通过培养大量的活性污泥微生物，利用它们对废水中的有机物进行吸附、氧化分解和合成代谢。在生活污水处理中，活性污泥中的好氧微生物在有氧条件下，将污水中的有机物质分解为二氧化碳、水和无机营养盐等^[2]。例如，某城市污水处理厂采用活性污泥法处理生活污水，经过一级处理去除大颗粒杂质后，污水进入曝气池与活性污泥充分接触，微生物大量繁殖并分解有机物，处理后的水再经过沉淀、消毒等工序，可达到排放标准或回用于城市景观补水等，实现了水资源在一定程度上的循环利用。

2. 生物膜法

生物膜法是利用附着在固体载体表面的生物膜来处理废水。在工业有机废水处理中，如食品加工废水处理，生物膜附着在填料表面，废水流经填料时，有机物被生物膜吸附并降解。生物膜中的微生物种类繁多，包括细菌、真菌、原生动物等，它们形成了一个稳定的生态系统，对有机物具有较强的去除能力。处理后的水可以回用于生产车间的清洗、设备冷却等环节，减少了对新鲜水资源的需求，提高了水资源的循环利用率。

三、工业废水零排放中的先进水资源循环利用技术

（一）膜分离技术

1. 反渗透技术

反渗透技术是利用半透膜的特性，在高于溶液渗透压的压力作用下，使溶剂（水）透过半透膜，而溶质（盐分、有机物等）被截留，从而实现废水的浓缩与净化。在海水淡化和苦咸水脱盐领域已有广泛应用，在工业废水零排放处理中同样发挥着重要作用。例如在电子芯片制造行业，生产过程中产生的超纯水制备废水含有少量的盐分和有机杂质，采用反渗透技术可以将这些废水进行处理，使其达到回用标准，用于芯片清洗等环节，不仅节约了水资源，还降低了生产成本。然而，反渗透膜容易被污染和堵塞，需要定期进行清洗和更换，且操作压力较高，能耗相对较大，这在一定程度上限制了其大规模应用。

2. 纳滤技术

纳滤技术介于超滤和反渗透之间，对二价及以上离子和分子量较大的有机物有较高的截留率，而对一价离子的截留率相对较低。在饮用水净化和食品加工废水处理方面有独特优势。例如在果汁加工废水处理中，纳滤膜可以截留废水中的糖分、果胶等大分子物质，而允许钾、钠等一价离子通过，这样既可以回收有用的物质用于生产，又可以使处理后的水回用于车间清洗等环节，实现水资源的循环利用。但纳滤技术同样面临膜污染和浓缩倍数有限的问题，需要与其他技术相结合以提高处理效果和水资源回用率^[3]。

（二）蒸发结晶技术

1. 多效蒸发技术

多效蒸发技术是利用多个蒸发器串联，使前一效蒸发器产生的二次蒸汽作为后一效蒸发器的加热蒸汽，从而充分利用热能，减少能源消耗。在化工、制药等高浓度有机废水处理中应用较多。例如在农药生产废水处理中，经过预处理后的废水进入多效蒸发系统，在第一效蒸发器中，废水被加热蒸发，产生的二次蒸汽依次进入下一效蒸发器作为热源，最后一效蒸发器排出的浓缩液进行结晶处理，得到的蒸馏水可回用于生产过程，而结晶盐则进行妥善处置。多效蒸发技术虽然能有效处理高浓度废水并实现水资源回用，但设备投资大，运行成本高，且对水质要求较高，需要进行严格的预处理以防止结垢和腐蚀。

2. 机械压缩蒸发技术

机械压缩蒸发技术（MVR）是通过机械压缩机将蒸

发器产生的二次蒸汽压缩升温后重新作为热源返回蒸发器，使废水持续蒸发浓缩。在电力行业脱硫废水处理中有成功应用案例。例如某火力发电厂的脱硫废水，采用MVR技术进行处理，将废水中的盐分浓缩结晶，得到的冷凝水可作为电厂的补充水，实现了水资源的循环利用。MVR技术具有节能、节水、占地面积小等优点，但压缩机等关键设备价格昂贵，且对操作人员的技术水平要求较高，一旦设备出现故障，维修难度较大。

四、工业废水零排放中水资源循环利用技术的集成与优化

(一) 技术集成的必要性

单一的水资源循环利用技术往往难以满足工业废水零排放的复杂要求。由于工业废水的成分多样性、水量波动性以及不同行业的特殊需求，需要将多种技术进行集成，发挥各自的优势，弥补相互的不足。例如，对于含有高浓度有机物和重金属离子的电镀废水，单独采用生物法可能无法有效去除重金属，而单纯使用化学法处理成本又过高且可能产生二次污染。因此，将物理法、化学法和生物法进行合理组合，如先采用化学沉淀法去除重金属离子，再通过生物法降解有机物，最后用膜分离技术进行深度净化和回用，能够实现更高效的水资源循环利用和废水零排放。

(二) 技术集成的案例分析

以某大型化工园区的工业废水处理为例，该园区内企业众多，废水种类繁多，包括有机化工废水、无机化工废水、精细化工废水等。园区采用了一套综合的技术集成方案，首先通过格栅、调节池等物理设施去除废水中的大颗粒杂质和均质水质水量；然后利用混凝沉淀和气浮技术去除部分悬浮物和油脂类物质；接着采用厌氧-好氧生物处理工艺降解有机物，提高废水的可生化性；之后通过反渗透和纳滤膜分离技术对处理后的水进行深度脱盐和净化；最后对膜浓缩液采用蒸发结晶技术处理，回收有用的盐分并将少量的残渣进行安全处置。通过这种技术集成，园区实现了工业废水的零排放，处理后的水资源回用于园区内企业的生产过程，如冷却、洗涤、工艺用水等，大大提高了水资源的利用效率，降低了对外部水资源的依赖，同时也减少了环境污染风险^[4]。

(三) 技术优化策略

为了进一步提高水资源循环利用技术在工业废水零

排放中的效果，需要不断进行技术优化。一是优化工艺参数，如调整混凝剂的投加量、生物处理的反应时间、膜分离的操作压力等，通过实验和实践经验总结，找到各环节的最佳运行参数，提高处理效率和水质稳定性。二是加强设备的维护与管理，建立完善的设备巡检、保养和维修制度，及时更换老化或损坏的设备部件，确保设备的正常运行，减少因设备故障导致的处理效果下降和运行成本增加。三是开展资源的回收利用研究，对于废水处理过程中产生的污泥、浓盐水等副产物，探索其资源化利用途径，如将污泥进行焚烧发电、制成建材，将浓盐水中的盐分提取为工业原料等，不仅可以降低处理成本，还能实现资源的循环利用，提高整个工业系统的资源利用效率^[5]。

结语

工业废水零排放是实现水资源可持续利用的必由之路，其技术突破需立足“源头减量-过程控制-末端回用”的全流程优化。本研究证实，通过物理法预处理、生化法降解、膜技术深度净化及蒸发结晶终极处置的技术集成模式，可显著提升水资源循环效率，降低环境负荷。未来需聚焦三方面深入研究：一是开发抗污染膜材料与低能耗蒸发设备，突破成本制约；二是构建智能控制平台，实现工艺参数动态优化；三是拓展副产物资源化路径，构建“废水-资源”转化闭环。随着技术迭代与政策驱动，工业废水零排放将从示范应用走向规模化推广，助力产业绿色转型。

参考文献

- [1] 房盼.工业废水零排放技术在燃煤电厂的应用研究[J].清洗世界, 2025, 41(02): 61-63.
- [2] 郑晓晓, 张家涛, 董卫娜.工业废水处理中的零排放技术与其挑战探讨[J].安家, 2024(10): 0256-0258.
- [3] 王思思.工业废水零排放水质稳定方案设计[J].山西化工, 2022, 42(08): 158-159+169.
- [4] 涂德贵.工业废水深度处理新工艺的研究与应用[J].河南科技, 2022(041-009).
- [5] 樊哲寅, 谈迎.石油化学工业水资源循环评价指标选择及应用[J].洛阳理工学院学报(自然科学版), 2021, 31(03): 1-5.