

工业废水处理工艺及循环再利用技术研究

阮俊丽

邢台市生态环境科学研究院

摘要: 随着工业化进程的加速以及环境保护法规的日趋严格,工业废水的处理与循环再利用技术成为环境科学领域的热点研究课题。本文重点探讨了当前工业废水处理的常见工艺,包括物理法、化学法和生物法,并对膜技术、高级氧化过程、电化学处理等先进技术的应用情况进行了分析。同时,本文也对工业废水的循环再利用进行了深入讨论,重点关注了节水和成本效益的平衡,以及相关的政策与法规支持。以期对未来工业废水处理和再利用技术提供创新思路。

关键词: 工业废水处理; 循环再利用技术; 膜技术; 高级氧化过程; 环境保护

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6261.2022.07.222

引言

随着工业生产的持续发展,工业废水对环境造成的威胁日益严重,其中包含的有机物、重金属、毒害物质等污染物对生态系统及公共健康构成了不容忽视的风险。因此,开发和优化高效的工业废水处理与循环再利用技术刻不容缓。本文将从现有工业废水处理技术的基础上出发,探讨其发展趋势和面临的挑战,以及如何通过科学创新提升废水再利用的品质和效率。

一、工业废水的环境影响

工业废水对环境所造成的影响是多方面的,具有复杂而深远的后果。首先,工业废水常含有多种有害化学物质,如重金属、有机污染物和放射性物质,这些物质能够严重污染水体和土壤,破坏生态系统的平衡,导致水生生物的死亡和生物多样性的减少。其次,工业废水中的营养物质如氮和磷,可引发水体富营养化,导致藻类过度生长,消耗水中的氧气,使得水中其他生物难以存活,出现缺氧或无氧的“死区”。此外,废水中的某些物质可能对人类健康构成威胁,如若未经处理或处理不当直接排放,其有毒成分有可能渗透到地下水中,进入人类的饮用水源,引起各类健康问题。环境中的污染物还可通过食物链累积,造成长期和间接的健康影响。工业废水排放还可能导致温度升高(热污染),影响水体的物理特性和生物环境。高温的废水排入河流或湖泊,可造成当地水域温度上升,打破自然水温的季节变化规律,从而破坏本地水生生物的生存模式。此外,当废水被用作排放或灌溉水时,也可能引起土壤结构和地质特性的变化,影响农业的可持续性及其食品安全。因此,工业废水的影响是广泛且深刻的,不仅对生态环境造成伤害,也间接威胁着人类的健康和生存环境,其污染防治和资源化利用对于实现可持续发展具有紧迫性和

重要性。

二、工业废水处理的常规工艺

1. 物理法

在工业废水处理中,物理法是指通过物理作用去除废水中悬浮固体和某些溶解物的一系列技术。物理法具有操作简单、成本相对较低的特点,是工业废水处理中常用的初级处理方法。沉淀法是最基本的物理处理技术之一,它通过减缓水流速度或添加助凝剂,使废水中的悬浮颗粒由于重力作用沉降到容器底部,从而实现固液分离。这种方法对于去除废水中的颗粒物和重金属等不溶性污染物非常有效。沉淀池的设计、沉淀时间以及沉淀效率是确保沉淀法有效运行的关键参数。浮选法则是利用气泡将悬浮在废水中或沉于水底的颗粒物吸附在气泡上,并随气泡一同上浮到水表面形成水渣,再通过刮除水渣的方式将污染物移出水体。浮选法特别适合于那些粒子密度接近水的或者油脂类污染物的处理。在实施过程中,常通过向水中注入空气或者气体产生大量微小气泡,也会配合使用表面活性剂增加颗粒与气泡的吸附作用。浮选法的效率依赖于气泡的产生率、粒子与气泡间的接触程度以及气泡上浮速度。

2. 化学法

化学法在工业废水处理中扮演着至关重要的角色,主要是通过加入化学试剂改变污染物的性质,使其易于去除。其中,混凝方法是一个通过加入混凝剂,如铁盐、铝盐或有机高分子,促进悬浮颗粒和胶体聚集沉降的过程。这种技术对于移除悬浮固体、有机物、磷、重金属和部分微生物非常有效。混凝剂的选择和投加量,以及混凝条件如pH和搅拌速度,都直接影响到处理效率。氧化还原反应也是化学处理中的一种常见方式,这涉及通过向废水中加入氧化剂或还原剂来破坏有机污染

物或将有害的化合物转变为低毒或无毒形式。例如，氯、臭氧、过硫酸钠和高锰酸钾都可以用作氧化剂，这些氧化剂能够有效地降解难降解有机物，去除水中的色度和异味。在一些重金属处理的情况下，氧化还原反应可以将污染物转化为更容易沉淀或去除的形式。氧化还原过程的控制包括适量的化学剂量、适宜的反应条件、充分的反应时间等，这些都是保证处理效果的关键因素。

3. 生物法

生物法是指运用微生物的代谢活动来降解和去除废水中的有机污染物及部分无机物的过程。在工业废水处理中，生物法既环保又高效。它主要通过模拟自然界的自净过程，在人为控制的条件下加速污染物的生物降解。活性污泥法是生物法中最常用的一种工艺，该方法利用培养在废水处理系统中的微生物群体来吸收溶解在水中的有机物，这些微生物被称为活性污泥。在充氧条件下，它们快速繁殖并消耗废水中的有机物质，从而净化水体。活性污泥系统通常包括一个曝气池，在这里空气或纯氧被强制吹入废水中以供微生物呼吸；随后是沉淀池，用于分离净化后的水和污泥。活性污泥池中的微生物块要定期一部分排出，以保持系统的稳定运行。生物膜反应器（Biofilm Reactor）是另一种广泛应用于工业废水处理的生物法。在这种方法中，微生物生长在固定介质表面上形成一层生物膜，废水通过这层生物膜进行流动，接触过程中生物膜上的微生物会分解和吸收水中的污染物。生物膜反应器的操作可以是流动床、滴滤池或旋转生物盘等多种形式，其优势在于占地面积小、对冲击负荷有较强的抵抗力，以及微生物与废水中污染物的高效接触。

三、先进工业废水处理技术

1. 膜技术

膜技术是一种高效的先进废水处理技术，它依赖于特定孔径的半透膜来分离废水中的溶解固体、有机物、微生物和其他污染物。此技术适用于各种工业领域，特别是在对废水质量要求很高的情况下。反渗透是膜技术中的一种，它通过使用密度很高的半透膜在高压下操作，使水分子通过膜而溶解固体、盐分及其他大分子不能透过。反渗透能够移除废水中约99%的溶解固体，包括大部分有机物和无机物，从而产生高纯度的水。由于其高效的分离性能，反渗透广泛用于去除海水中的盐分，也用于处理工业废水，使之达到再循环利用或排放标准。纳滤作为膜技术的另一个分支，其孔隙率较反渗

透略大，能够去除废水中多数有机物质、部分无机物、微生物和某些离子。它的工作压力低于反渗透，通常用于软化水质或分离废水中大小不等的有机物质。纳滤同时具有一定的选择性，如能特定地拒绝某些离子，这在某些工业加工过程中非常有用，例如在食品和药品行业中分离和浓缩成分。

2. 高级氧化过程

高级氧化过程（AOPs）是一类利用高反应性自由基，尤其是羟基自由基（ $\cdot\text{OH}$ ），来降解废水中难以生物降解的有机污染物的技术。这些自由基能有效破坏有机分子，转化为无害或易于生物降解的小分子。AOPs对于处理染料、农药、石油化学产品、药品及个人护理品中的有机污染物尤其有效，因此在工业废水处理中得到了广泛应用。Fenton反应是一种经典的AOP，主要通过过氧化氢（ H_2O_2 ）和铁离子（ Fe^{2+} ）的反应生成羟基自由基。这种反应在酸性条件下进行，能够有效地分解有机污染物。反应的主要优势是在室温和常压下进行，但反应后需要对pH值进行调节，并处理剩余的铁离子。另外一种AOP是紫外光/臭氧处理，它结合了紫外光的光解作用和臭氧的强氧化作用。紫外光可以激发臭氧分解成水解氧（ O_2 ）和羟基自由基，而后者具有极高的氧化潜力，可以快速降解复杂的有机污染物。这个过程还可以增强臭氧本身的氧化作用，加速污染物的降解过程。紫外光/臭氧处理的效率不仅取决于臭氧的剂量和紫外光的强度，也受到水体中溶解固体和其他化学物质的影响。高级氧化过程通常具有处理速度快、应对范围广和最终产物相对无害等特点。它们能够补充或替代传统的废水处理方法，对于控制和管理难降解有机污染物起到了关键作用。尽管AOPs的操作成本相对较高，但由于它们在废水处理中的高效性和灵活性，仍是许多工业应用的首选技术之一。

3. 电化学处理

电化学处理方法包含多个不同的技术，如电絮凝、电浮、电除盐和电氧化等。电絮凝通过电流的作用使污染物凝聚成大颗粒，然后容易被去除。电浮利用产生的微小气泡将颗粒物携带至水面。电除盐则主要用于去除水中的离子，尤其是用于制备脱盐水或纯净水。电氧化过程涉及在阳极上形成的强氧化剂，可以直接矿化有机污染物。电化学处理具有诸多优点，例如可操作性强、反应时间短、通常无须添加外部化学物质或添加量很少。由于其运行成本主要来自电能，因此与某些化学处理方法相比，在环境上可能更可持续。然而，这种技

术也存在一些挑战，比如电极材料的选择和维护、电能消耗以及处理效率可能受到废水成分的影响。不过，在合适的应用和工艺优化下，电化学处理技术被证明对于一些难以处理的工业废水来说是一种非常有效的解决方案。

四、工业废水的循环再利用技术

工业废水循环再利用对于满足我国水资源需求方面有着非常重要的帮助，虽然我国的淡水资源总净流量达到了27115亿立方米，能够达到全球平均值的89.9%，不过由于我国人口众多，淡水资源平均分配后人均水资源只有2350立方米，只能满足全球平均值的25%。从这组数据分析来看，工业水循环再利用对于缓解我国用水压力，满足社会日常用水需求非常重要，而利用专业的技术对工业用水进行处理，确保工业废水的安全性和可应用性必须要得到进一步关注。

1. 再利用技术的开发

工业废水的循环再利用技术旨在减少工业生产中水的总需求，通过净化和再处理工业废水，实现水资源的回用和循环利用。这些技术的开发，从简单的物理方法到复杂的物理化学和生物化学过程，目的都是降低有害污染物浓度，以符合工业用水或排放标准。工业废水循环再利用的技术途径，通常包括过滤、沉淀、反渗透、电渗析、纳滤、超滤、生物处理和高级氧化过程等。开发这些技术的动力来自环境保护的要求、水资源的节约以及经济效益的考虑。通过循环再利用，工厂可以减少对外部水源的依赖，降低处理和供水成本，并有助于降低企业的环境足迹。

2. 循环利用中的技术经济分析

循环利用中的技术经济分析是评估工业废水再循环投入与收益之间关系的重要工具。这种分析会综合考虑技术的运行成本、维护费用、节约的水资源成本、避免的污染排放罚金，以及可能获得的各种经济或税收优惠。技术经济分析还包括对项目的资本成本、运营和维护支出的现值计算，以及投资回收期的估算。正确的评估有助于企业或决策者比较不同工艺的经济可行性，选择成本效益最高的废水再利用方法。这种分析应当结合生命周期成本评估（LCCA）和环境影响评估，以确保所选择的技术既经济合理又环境友好。通过技术经济分析，企业也能更好地规避潜在的金融风险，并在长期运营中实现可持续的水资源管理。

五、政策与法规

政策与法规在推动工业废水的治理与再利用方面发

挥着核心作用。首先，国家法规框架确定了企业对废水处理和排放的基本要求，确保它们遵循最低环保标准。这包括排放标准、水质监管、许可证申请和管制方案等，旨在减少环境污染并推动可持续的水资源管理。其次，政策激励与支持通过提供补贴、税收优惠以及研发资金支持等，激励企业投资于先进的废水处理和回用技术。这些措施有助于降低企业的经济负担，促进环保技术的发展和运用。同时，政策与法规面临的挑战与机遇并存。随着环境保护意识的提高和技术的发展，法规不断更新，要求更高的环保标准，这迫使企业必须不断适应新的要求，投入更新更有效的处理技术。法规的严格执行同样促使企业创新，寻求更高效、成本低的废水处理解决方案。另一方面，这也带来了投资和运营成本的增加，特别是对那些规模较小或者财力有限的企业来说，法规的严格要求可能成为一大负担。因此，在制定政策与法规时，既要考虑环保目标，又要兼顾企业承受能力，实现经济和环境的双赢。在面临挑战的同时，越来越多的政策和法规也加大了绿色发展的机遇，鼓励企业采用绿色生产方式，创造新的市场和就业机会。在本质上，政策与法规对环境和企业活动的影响具有双向性，既是驱动力也是约束力，对于实现可持续发展，提供了重要的制度支撑和导向。

结束语

通过不断的科技进步和创新，工业废水的处理技术将会更加成熟和高效。为了实现废水处理和循环利用的最大化和经济化，技术创新需要结合政策法规的引导与约束，以及市场经济机制的激励。未来研究应关注高效节能技术的开发，跨学科合作的推进，以及不断优化的环境政策与法规系统，共同促进可持续发展的实现。

参考文献

- [1] 祝海涛, 吴雅琴, 吴思梵, 等. 印染废水除杂及资源化处理工艺研究[J]. 水处理技术, 2021, 49(11): 128-130.
- [2] 祝海涛, 吴雅琴, 吴思梵, 等. 印染废水除杂及资源化处理工艺研究[J]. 水处理技术, 2020, 49(11): 128-130.
- [3] 李天兵. 浅谈化工工业废水处理工艺[J]. 化工管理, 2017(15): 83-84.
- [4] 张胜田. 染料工业废水处理工艺技术研究[D]. 江苏: 南京理工大学, 2004.