

污水深度处理技术在工业废水处理中的应用

文 / 王 琦 山东宏达建设工程有限公司

摘要: 工业废水的组成主要包括有机物和无机盐两大类。其中有机物包括各种有机酸、酮、醛、酯等,无机盐包括各种离子如钠、钙、镁、钾、硫酸根、氯等。这些有机物和无机盐的组成成分复杂,对环境和人类健康造成潜在危害。因此,对工业废水进行处理和资源化利用至关重要,以减少对环境的污染并提高资源利用率。文章重点针对工业废水处理中污水深度处理技术的应用进行分析。

关键词: 工业废水; 污水深度处理; 技术要点

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.06.115

引言

工业废水是工业生产过程中产生的废水,其来源广泛,组成成分复杂。相关污水处理单位需要明确工业废水组成,合理选用废水处理技术,从而提高污水处理效果,保证工业排放的废水能够达到国家排放标准要求,避免污染生态环境。

一、工业废水的来源与组成

根据不同的生产过程和行业,工业废水可以分为以下几种类型:

(1) 制造业废水: 制造业是工业废水的主要来源之一,包括食品加工、纺织、造纸、化工、钢铁、机械制造等行业。这些行业在生产过程中会产生大量的废水,其中含有各种有害物质,如有机物、重金属、酸碱等^[1]。

(2) 采矿和冶金废水: 采矿和冶金行业在矿物开采、选矿、金属冶炼等过程中会产生含有矿物质、重金属、酸碱等物质的废水。这些废水往往具有高污染性,需要经过处理才能达到排放标准。

(3) 电力废水: 火力发电厂在燃煤、燃气或燃油的过程中会产生含有悬浮固体、重金属、放射性物质等废水和废液。此外,电厂冷却水也是一种重要的工业废水来源。

(4) 城市污水: 城市生活污水中含有大量的有机物、悬浮固体、氮磷等营养物质。这些污水通常来自家庭、商业、工业和城市公用设施等。

(5) 农业废水: 农业生产过程中使用的化肥、农药等化学物质会随雨水流入水体,形成农业废水。此外,养殖业产生的粪便和尿液等也会形成含有有机物、营养物质和病原体的废水^[2]。

二、工业废水的危害

工业废水带来的伤害是多维度的,它对环境、生态系统以及人们的健康都带来了深重的打击。首先,工业废水中包含了大量的有害成分,例如重金属和有机溶剂等。这些有害物质具有很高的毒性和持久性,可以通过多种方式进入环境和人体,如果长时间累积,将对生物体造成严重的生理和生化损害。其次,如果工业废水中的有机和营养成分,例如氮、磷等,未经适当处理就

直接排放,这可能会引发水体的富营养化问题。水体的富营养化会导致水中藻类的过度增长,从而形成水华。水华的大量死亡和分解会消耗水中的溶解氧,这会导致水体缺氧,进而影响到鱼、虾等水生生物的生存,严重的情况下可能会导致水生生态系统的崩溃。再次,如果工业废水中的某些酸性或碱性成分被直接排放到土壤,这将破坏土壤的酸碱均衡,对土壤中的微生物生存和活动产生不良影响,从而降低土壤的肥力和植物的生长潜力。最后,工业废水里的有毒成分也有可能经由食物链传播,最后对人类健康造成不良影响。比如说,当人们食用了被污染的水产品或食用了种植在污染土地上的作物时,这些有毒物质有可能进入人体,从而对人类健康构成潜在风险。因此,处理和治理工业废水成了我国在环境保护和生态文明建设方面的一项关键任务。为了避免工业废水对环境、生态和人类健康带来更严重的伤害,必须实施有力的策略,强化对工业废水的管理和处置^[3]。

三、污水深度处理技术类型

(一) 膜处理技术

污水深度处理中的膜处理技术,是一种基于选择性透过原理的先进水处理方式,通过利用半透膜的微孔结构,在外界压力驱动下实现对液体中不同粒径物质的高效分离。该技术囊括了反渗透(RO)、纳滤(NF)、超滤(UF)及微滤(MF)等多种形式,每种技术针对不同分子大小的物质具有特定的截留能力。膜处理技术的优势在于处理效率高、出水水质优良、占地面积小,且不产生二次污染。然而,这一技术存在膜污染与阻塞的问题,需要定期清洗与维护,且初期投资及运行成本相对较高。尽管如此,鉴于其在深度净化和水回用领域的显著效果,膜处理技术已成为现代污水处理厂不可或缺的重要组成部分,在工业废水处理中得到了较为广泛地应用。在实际应用过程中,膜处理技术还可与其他技术相结合,进一步提高工业废水处理的效率与效果。例如,某第三污水处理厂项目是该地区首个全地下污水处理厂工程,采用地下全封闭生产工艺处理模式,在污水处理上采用了改良膜生物反应器(MBR)技术^[4]。MBR将膜技术与处理污水的生物反应器相结合,用于固体的分离与截

留、用于在反应器中进行无泡曝气和从工业污水中萃取优先污染物。其工作原理是利用反应器的好氧微生物降解污水中的有机污染物。同时，利用反应器内的硝化细菌转化污水中的氨氮，以去除污水中产生的异味。最后，通过中空纤维膜进行高效的固液分离出水。经过改良的MBR技术能够截留各种菌团，结合生化池形成高效的膜生物反应器系统和进行泥水分离。膜区中的MBR膜组件自身配置了空气吹扫系统，用于抖动和清洁膜丝并可补充生化所需的氧量。经生化处理后的混合液在产水泵（或虹吸）的抽吸作用下，滤过液进入MBR中空纤维膜丝，再汇集于MBR集水管后排出，几乎全部细菌及悬浮物均被截流在膜池中，使出水达到悬浮物接近于零的优良水质。

（二）高级氧化工艺

高级氧化工艺是近年来在水处理领域内迅速发展起来的一系列高效深度处理技术，其核心在于产生具有极高反应活性的羟基自由基，以实现水中难降解有机物、微生物、无机污染物的快速氧化分解。这一过程能够将污染物转化为 CO_2 、水和无害的无机盐，从而达到深度净化水质的目的。常用的高级氧化工艺包括臭氧氧化、过氧化氢氧化等。高级氧化能够有效去除生物难降解有机物，提高出水水质，且其产物多为无害物质，极大地减少了二次污染的风险。

（三）磁混凝技术

磁混凝技术在深度处理污水方面的运用，得益于其独到的工艺理念和明显的污水处理成效。磁混凝技术的关键在于，在传统的混凝沉淀过程中，同步加入磁粉，使磁粉与污染物进行絮凝合成，从而增强混凝和絮凝的效果，实现高速沉降。磁混凝技术主要涵盖了磁絮凝反应系统、高效率的澄清系统、药物添加系统以及磁粉的回收机制。在磁絮凝的反应过程中，通过加入磁粉和混凝剂，实现了污染物絮体与磁粉的结合，从而产生了大而紧密的磁絮团。这类磁絮团拥有相对较高的密度，能够在沉淀池内迅速下沉，进而有效地清除水中的悬浮污染物。在一个高效的澄清系统里，磁絮团会在沉淀池里沉淀下来，而污泥的回流则参与到二次反应中，这有助于减少药物的成本。此外，通过加入高效的复合絮凝剂PAM，可以使已经形成混凝的不同粒径的微粒和有机氮等污染物聚集在一起，并确保在搅拌和输送过程中，凝聚体更加紧密，不会散开重新进入水中。磁粉的回收系统确保了磁混凝沉淀技术的稳定运作^[5]。磁粉主要由 Fe_3O_4 组成，并且它们是无序排列的。尽管磁粉本身没有磁性，但它具有导磁功能，并可以通过磁力进行回收。此外，磁粉表面呈现出规则的形态，并具备一定程度的物理吸附能力，同时表面电荷吸附也能在一定程度上发挥作用。利用磁混凝技术，不仅能够有效地去除污水中的悬浮污染物，还能减少絮凝剂的使用量，从而降低整体的运营成本。

（四）活性炭吸附技术

活性炭吸附技术利用活性炭的多孔结构和表面特性来去除有机废气中的有害物质。活性炭是一种拥有高度多孔特性的碳基材料，其具有较大的比表面积和出色的吸附性能。利用活性炭的物理和化学吸附特性，活性炭吸附技术能够将有机废气中的有害成分有效地吸附到活性炭的外层或通道中，进而达到废气净化的目的。活性炭的物理吸附特性主要是由其多孔的构造所决定的。由于活性炭具有孔道结构，这为其提供了丰富的表面积，从而使其能更有效地吸附有害物质。活性炭表面的化学特性决定了其化学吸附的能力。活性炭的表面具有不平衡和未饱和的分子吸引或化学键的力量，这些力量导致有害物质被吸入并在炭层表面聚集。在有机废气处理领域，活性炭吸附技术得到了广泛的应用。该物质具有吸附各类有机溶剂、苯、酮、酯、酸等有毒物质的能力，并在化工、制药、印刷和涂装等多个行业中得到广泛应用。利用活性炭吸附技术，不仅能够高效地从有机废气中移除有害成分，降低对环境的污染，还能避免有机溶剂的蒸发，从而降低火灾和爆炸的可能性。但是，活性炭的吸附方法也有其固有的不足之处。比如说，活性炭作为吸附剂，在吸附一段时间后会达到饱和状态，因此需要进行再生处理。由于活性炭吸附技术的运营成本相对较高，因此有必要定期更换活性炭作为吸附材料。另外，在处理高浓度和大流量的有机废气时，活性炭吸附技术的效果并不理想。为了增强活性炭吸附技术的管理效能并减少运营成本，有必要进行技术上的优化和创新。存在几个潜在的发展路径，其中包括研发创新的活性炭材料以及增强活性炭的吸附性能；对活性炭的再生技术进行研究，以达到活性炭循环再利用的目的；研制出既高效又经济的活性炭吸附设备，以增强其处理性能；对新型吸附材料进行研究，以提升其吸附效能。

四、污水深度处理技术在工业废水处理中的实践应用

某污水处理厂设计规模为 $20\text{万m}^3/\text{d}$ ，采用厌氧-缺氧-好氧法（UCT）进行处理为了进一步改善河涌水质，进行了提标改造工程，改造方案是利用厂内空地，新建深度处理工程磁混凝+超滤膜工艺，设计日处理污水规模为 20万m^3 。磁混凝工艺流程如图1所示。

（一）磁混凝技术及其工艺流程

该系统的主要设备设施有：磁混凝混合池、磁粉投加池、磁混凝絮凝池、磁混凝高效沉淀池、智能精准加药系统、自动控制系统、污泥脱水系统。该工程在最优情况下，浊度小于 1NTU ，油类、藻类的去除率高达99%，重金属的去除率高达99.7%；出水清澈透亮，优于一级水质的排放标准。

（二）磁混凝反应系统

该系统设置混凝池4座，每座分为3个池子，每个池子安装搅拌机一台，水力停留时间为 $5\sim 8\text{min}$ 。磁混凝反应池搅拌器均为工频运行，由于投加磁粉的比重较

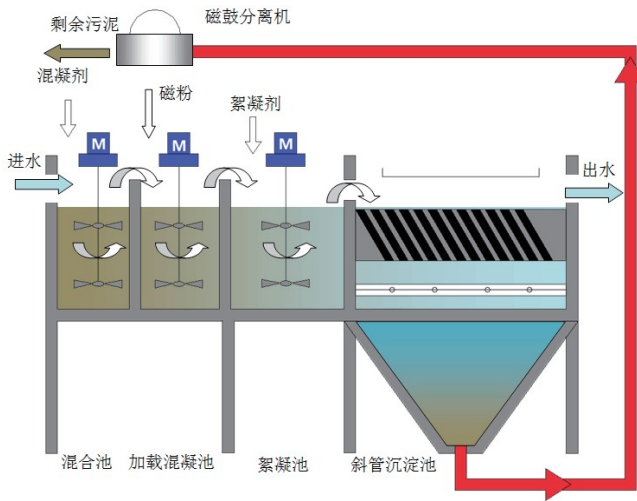


图1 磁混凝工艺流程

大，为了避免其沉降，实际搅拌功率大于混合液体搅拌功率的设计值。絮凝池主要用于控制矾花大小，过大的矾花结构松散，不利于其沉淀；矾花过于细小同样不易沉淀，进入沉淀池后容易跑泥。经过多次对模拟搅拌速度进行小试，将絮凝池上层的絮体矾花控制在2~3mm左右，即小米粒大小，发黑色，泥水有分离现象但又不会分层严重即为最佳状态。

（三）沉淀分离系统

设置澄清池4座，设有进水区、沉淀区、斜管分离区、底部污泥区，每一座澄清构筑物均采用了独特的上部方形与底部圆形单泥斗相结合的设计理念，实现了中心进水与边缘出水的布局，并配备了单台刮泥设备以确保系统的高效运行。磁絮凝沉淀池主要是使磁絮团在池体内快速沉降，进行固液分离。通过斜管的辅助作用，上清液从集水堰中溢流达标排放，沉降在池体底部的污泥则通过泵进入到回流和回收系统。

（四）混合池加药系统

1. PAC投加控制技术

PAC（聚合氯化铝）投药系统的泵采用了先进的变频调速技术，该技术能够依据进水流量、出水水质的具体状况以及实时的絮凝成效，灵活调节计量泵的流量输出。同时，该系统还具备将运行数据上传至中央控制室的功能，从而实现了PAC投药过程的远程监控与管理。

2. 磁粉投加控制技术

磁粉为袋装投加，通常将磁粉和水搅拌混合后用泵投加到反应池中。根据运行数据和检测分析及小试结果，在出水水质稳定达标的情况下，应保持回流污泥里磁粉的占比为60~70%左右；剩余的污泥排放损失磁粉量一般占排放绝干泥的10%左右，日常运行时要以此为参考补充系统中的磁粉量。

3. 阴离子PAM投加控制技术

阴离子型聚丙烯酰胺（PAM）以干粉形式在现场进

行配制，为此配置了1台PAM自动配药装置，并辅助配备了6台螺杆式药剂添加泵。这些计量泵的流量由自动化控制系统依据进水流量的变化进行智能调节。在磁混凝反应池中，加入了絮凝剂和助凝剂，以促进混凝絮体的生成。

五、污水深度处理技术在工业废水处理中的发展趋势

首先，未来的污水深度处理技术将更加重视绿色环保。传统的废水处理技术常常依赖于大量的化学试剂，而这些化学试剂在处理废水的过程中，也有可能产生二次污染。因此，在未来，污水处理技术将更多地聚焦于环保和绿色，减少化学试剂的使用，或者开发新的、对环境更为友好的处理方式，以降低对环境造成的负面影响。

接下来，未来污水的深度处理技术预计会变得更加智能。伴随着人工智能和大数据技术的不断进步，未来污水处理技术预计将变得更加智能，具备自动调整处理参数的能力，从而实现废水处理的自动化和智能化。此外，利用大数据的分析手段，能够更为精确地掌握废水的特性和污染水平，进而设计出更为高效的处理策略。

再次，未来污水的深度处理技术预计将变得更加丰富和多元。各种工业废水都有其独特的性质和污染水平，因此，未来的污水处理技术将变得更加丰富和多样，可以根据废水的各种特性选择合适的处理策略，从而实现更优的处理成果。

最终，预期未来的污水深度处理方法会更为高效。随着科技进步，将会不断出现新的处理方法和新技术，这些新的方法和新技术可以更高效地处理废水，提高处理效率，降低处理成本。

结语

总体而言，随着科技进步和环境保护意识的增强，未来的污水深度处理技术预计将变得更加环保、智能、多元和高效。在未来发展中，污水处理方法能更加有效地守护生态环境，并为持续发展贡献更多力量。

参考文献

[1] 冯仕训, 张万里, 蒋岚岚. 太湖流域8座污水处理厂新地标提标改造设计总结[J]. 中国给水排水, 2023, 39(08): 61-67.
 [2] 穆春艳, 杨良, 杨雅娟. 威海某工业污水处理厂深度处理工艺中试研究[J]. 给水排水, 2022, 58(S1): 256-260.
 [3] 邓海波. 徐州市奎河污水处理厂改建方案研究[D]. 扬州大学, 2021.
 [4] 何光辉. 某工业园区污水处理厂提标改造工艺研究[D]. 南昌大学, 2020.
 [5] 王鸿儒. 大连市某污水处理厂CWSBR工艺达标改造工程方案研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.