

絮凝工艺研究与应用进展

徐应星¹, 张玉龙¹, 崔学军², 周友胜², 傅龙², 夏强²

¹国能水务环保有限公司南京分公司, 江苏 南京

²国能长源汉川发电有限公司, 湖北 汉川

收稿日期: 2024年12月2日; 录用日期: 2025年1月20日; 发布日期: 2025年1月28日

摘要

面对工业化加速和环境污染问题的加剧, 高效的水处理技术变得至关重要。本文介绍了絮凝工艺在水处理领域的研究与应用进展。絮凝工艺通过促进水中悬浮颗粒聚集成絮体, 便于分离和去除, 广泛应用于给水处理、污水处理和工业废水处理。本文详细探讨了6种絮凝工艺的技术特点、原理及应用情况。同时, 对絮凝工艺的未来研究方向进行了展望。

关键词

絮凝, 水处理, 悬浮颗粒

Research and Application Progress of Flocculation Process

Yingying Xu¹, Yulong Zhang¹, Xuejun Cui², Yousheng Zhou², Long Fu², Qiang Xia²

¹Nanjing Branch, China Energy Water Industry Environmental Protection Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

²CHN Energy Changyuan Hanchuan Power Generation Co., Ltd., Hanchuan Hubei

Received: Dec. 2nd, 2024; accepted: Jan. 20th, 2025; published: Jan. 28th, 2025

Abstract

In the face of accelerated industrialization and the intensification of environmental pollution issues, highly efficient water treatment technologies have become of utmost importance. This article presents the research and application progress of the flocculation process in the field of water treatment. The flocculation process, which promotes the aggregation of suspended particles in water into flocs for convenient separation and removal, is widely utilized in water supply treatment, sewage treatment, and industrial wastewater treatment. This article meticulously explores the technical characteristics, principles, and application scenarios of six types of flocculation processes. Meanwhile, the future research directions of the flocculation process are also prospected.

文章引用: 徐应星, 张玉龙, 崔学军, 周友胜, 傅龙, 夏强. 絮凝工艺研究与应用进展[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(1): 151-156. DOI: 10.12677/aep.2025.151019

Keywords

Flocculation, Water Treatment, Suspended Particles

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

絮凝技术是水处理领域中广泛采用的一种方法，其主要原理是通过物理或化学方法使水中的悬浮颗粒集结成较大的絮凝体，以便于后续的分离和清除。这项技术在饮用水处理、废水处理以及工业废水净化等多个领域扮演着核心角色。絮凝技术包括多种类型，如折板絮凝、斜管絮凝、网格絮凝、电絮凝、磁絮凝和微涡流絮凝等，目前，国内依旧以传统的絮凝工艺为主，传统工艺发展较为成熟，但不可避免地存在效率低，絮凝效果差等问题，而国外已经开始大范围地运用更先进的絮凝技术，包括高效絮凝剂的应用、智能化控制系统以及绿色化学技术的集成。但是依然存在絮凝过程中产生的大量污泥无法得到有效处理的问题。近年来，随着科学技术的进步，絮凝工艺不断创新和发展，出现了多种新型絮凝技术和设备，本文旨在系统回顾絮凝工艺的研究进展，详细介绍不同类型的絮凝技术及其应用现状，并探讨未来可能的研究方向和技术突破。

2. 絮凝工艺的概述和应用

2.1. 折板絮凝

2.1.1. 特点及原理

折板絮凝池是一种高效的水力混合设备，旨在优化絮凝环境，增强絮凝效果。该装置通过在池中安装折板，引导水流在折板间流动，以实现絮凝作用。依据水流的移动方向，折板絮凝池可以分为竖流式和平流式两种。同时，根据折板的排列方式，还可以进一步细分为同波折板和异波折板两种类型[1]。折板絮凝池的特点是通过水流在通道中连续转折或连续缩放造成水体紊动产生很多的涡旋增加了凝聚颗粒碰撞的机率有利于颗粒的絮凝不易堵塞；停留时间短一般在 10 min~15 min 左右。但板距小对施工要求较高安装维修都比较困难[2]。

2.1.2. 折板絮凝的应用

折板絮凝池在自来水处理厂的水净化和海水脱盐领域有着广泛的应用。特别是在原水的浑浊度波动较大或者在低温且浑浊度较低的环境下，这种装置能够显著提升供水的水质以及单个池的产水能力。川南地区某县城水厂为解决供水紧张的问题，采用了运行稳定可靠、对原水水质抗冲击能力强、运维方便的折板絮凝平流沉淀池和 V 型滤池工艺对水库水和江水进行净化[3]。某钢铁公司采用折板絮凝沉淀 + V 型滤池 + UF + SWRO + 二级 BWRO 海水淡化工艺，长期运行产水水量与水质稳定，SWRO 回收率与脱盐率达 45%、98.5% 以上，产水加碱微调 pH 后，可供不同用户生产使用[4]。

2.2. 斜管絮凝

2.2.1. 特点及原理

斜管絮凝技术通过在沉淀池内安装斜置的板或管来扩大沉淀面积，并将水流分割成多个薄层，以此

提升沉淀效率。这项技术的核心优势在于运用层流原理,使得水流在板间或管内流动时,水力半径减小,雷诺数降低,这有利于沉淀过程的进行,同时,缩短了颗粒的沉淀路径和沉淀所需时间。在斜板或斜管内部,絮状颗粒能够重新聚集,进一步增大颗粒体积,从而提高沉淀效率[5]。斜管沉淀池上升流速可达10 m/h,而普通絮凝沉淀池上升流速最高为2.16 m/h [6]。但部分斜管沉淀工程依然存在排泥不畅和局部短流导致的絮体破碎对处理效果影响的问题[7]。斜板斜管的长度、间距、形状和材质都会影响沉淀效果。进口布水不均匀或短流现象可能导致出水浊度升高,需要保证配水均匀[8]。

2.2.2. 斜管絮凝的应用

斜板絮凝广泛应用于水和废水处理中,适用于处理含悬浮物和胶体颗粒的水质。九江化纤厂的水厂采用接触絮凝斜管沉淀技术对脉冲澄清池进行改造,在确保出水水质的前提下,使产水量从 $7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 $9.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ [9]。

2.3. 网格絮凝

2.3.1. 特点及原理

网格絮凝技术是一种高效的水处理方法,它通过在水中设置网格结构来促进絮凝体的生成。在网格絮凝池中,通过精确布置的多层网格结构来控制水流,创造出适宜的絮凝条件。这种技术通过增强的紊流效应,促进水中微小颗粒的有效碰撞和结合,加快了凝聚体的形成和增长。由于其结构简单且絮凝效果显著,网格絮凝技术在规模较小、水量变化不大的水厂中得到了广泛应用。不同尺寸的过水孔洞对水流场的影响会在其下游竖井内的网格板上得到增强,而较小的过水孔洞能够降低上游不同结构特征网格板对水流紊动特性的影响差异。按照絮体多级成长的理论,每个竖井内水动力学环境的不同会导致该竖井及其下游竖井内絮体形成过程的差异,最终影响到絮凝末期絮体的形状和质量。在设计网格絮凝池时,不仅要保证整体的水动力学条件达到规范要求,还要特别关注不同区域或竖井内水流紊动的相互作用,以便找到最佳的参数配置,以优化絮凝效果[10]。

网格絮凝也存在以下问题,在不进行排泥的时段,竖井底部的排泥管道可能会变成水流的通道,导致短流现象的发生。而在排泥时段,各个竖井的排泥效果并不均衡,特别是那些距离排泥阀较远的竖井,排泥量较少,容易积累污泥。在极端情况下,这种积泥现象可能会导致排泥管道的堵塞[11]。通常情况下,在空池状态下进水,排泥管的短流现象会对网格絮凝池的絮凝效果造成不利影响。而在正常运行状态下,排泥管的短流现象对网格絮凝池的絮凝效果影响较小[12]。

2.3.2. 网格絮凝的应用

网格絮凝适用于水量变化不大的水厂,尤其适合于土地资源紧张的城市水处理项目。如果在水量变化较大的水厂可能需要额外的调节措施。某自来水厂由于絮凝效果差、斜管沉淀区底部排泥不彻底、“跑矾”等原因导致产水量不足,采取延长絮凝时间、将机械+网格絮凝改为网格絮凝并优化布置、用桁架式吸泥机替代穿孔管排泥、增加配水区高度等技术改造措施后,产水量有了显著提升[13]。

2.4. 电絮凝

2.4.1. 特点及原理

电絮凝技术电能来替代成本较高的化学药剂,能够有效地清除水中的重金属、悬浮固体、乳化有机物以及其他类型的污染物。在处理过程中,水被引导流过金属极板间的缝隙,而通电的金属极板会有一部分物质溶解并释放到水中。在这个电场中,离子和非离子污染物受到电场力的影响,与电场中电离出的物质以及钢板溶解后的物质发生反应。这些离子相互作用,最终形成最稳定的固体颗粒,这些颗粒随后会沉淀出水面,完成电化学处理。电絮凝技术通过在多块钢板上施加直流电,创建电场,以此达到净

化水质的效果[14]。电絮凝技术通过电解作用产生金属离子、多核羟基络合物和氢氧化物，从而实现对溶液中污染物的凝聚、吸附和氧化处理。这种技术以其高效的去除能力、简便的操作控制、较低的污泥产生量和低廉的处理成本等优势而受到青睐。目前，电絮凝技术的基础研究已经相对成熟，未来的研究重点将转向探索如何进一步增强电絮凝效果的领域[15]。电絮凝技术主要可分为电源技术，电极技术和集成技术三个研究大体的方向[16]。电絮凝技术在当前的水处理领域中，主要应用于染料废水的处理、去除重金属离子、除磷以及处理含油废水等方面。然而，这项技术也存在一些不足之处。由于阳极在电解过程中会溶解到溶液中，因此电絮凝过程中使用的牺牲阳极需要定期更换。此外，阴极的钝化现象也可能降低电絮凝工艺的效能。在电力供应不足的地区，电絮凝的运行成本可能会相对较高[17]。电絮凝流程如图 1。

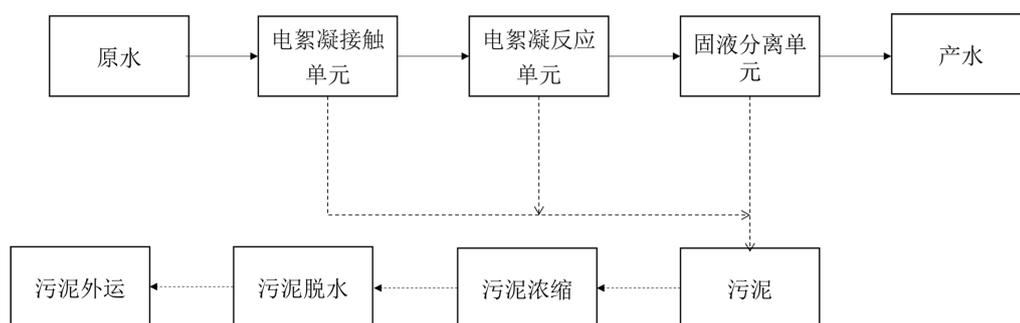


Figure 1. Schematic diagram of the electrocoagulation process

图 1. 电絮凝流程图

2.4.2. 电絮凝的应用

陕西某油井的注水中油含量较高，采用电絮凝的方式，在使用铝电极板，电解时间为 8 min，电极板间距为 20 mm，电流密度为 5 mA/cm² 时，油田注水时可达到企业油田注水的标准。且相较于其他处理方式，电絮凝的处理效率高，铝电极板的成本低，在对含油废水的处理中拥有较好的发展前景[18]。

2.5. 磁絮凝

2.5.1. 特点及原理

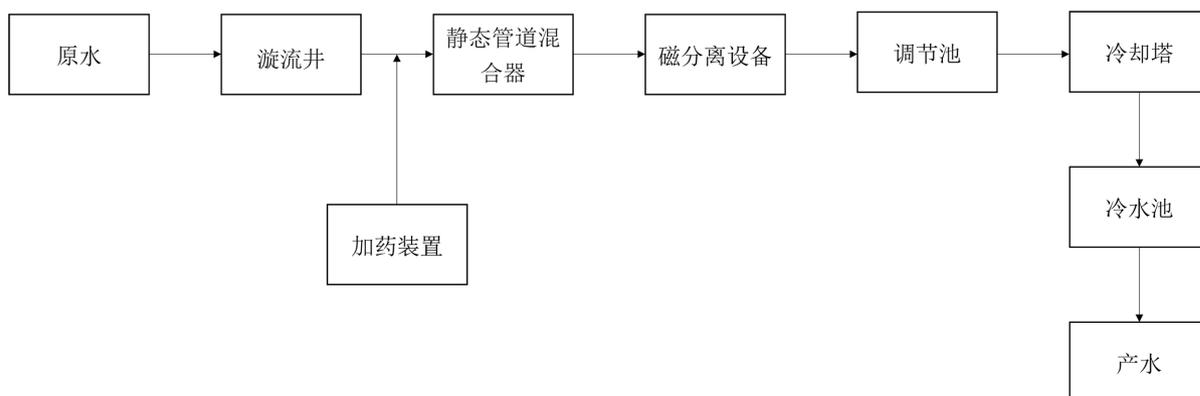


Figure 2. Diagram of magnetic flocculation process

图 2. 磁絮凝流程

磁混凝是混凝与磁技术的有机结合。在混凝前或混凝过程中，待处理水体与铁磁性物质混合而获得磁性，使磁分离成为可能[19]。漩流井使水中原有的悬浮颗粒聚集，提高后续的处理效率，加药后再通过

静态管道混合器内的特殊结构实现水与絮凝剂的充分混合, 进一步提升絮凝和后续的磁分离效率。磁絮凝拥有絮凝效率高, 沉降速度快, 成本低的特点。磁絮凝已被证明是一种有效的强化絮凝的技术, 对重金属废水、煤化工废水、矿井水、含油废水、生活污水、除藻等均具有显著的絮凝效果, 具有广阔的应用前景[20]。但是与其他滤池相比, 增加了磁粉投加费用及混合液回流电耗。磁絮凝流程如图 2。

2.5.2. 磁絮凝的应用

漳浦污水处理厂为去除水中形成 SS 和 TP 的颗粒状和胶体状杂质, 计划对二级处理后的污水再进行深度处理。由于可用空间较小, 在保证出水水质稳定, 效果好的前提下, 最终选用了成本低, 占地小, 运行成熟稳定的 SediMag®磁絮凝沉淀作为深度处理工艺。在根据实际情况对设计参数, 池体布局, 设备选型等方面进行优化后, 出水水质能稳定达到一级 A 标准, 并且占地面积极小, 运行费用低[21]。

2.6. 微涡絮凝

2.6.1. 特点及原理

微涡流混凝是近年来逐步得到推广应用的一项絮凝强化新技术。该技术通过放置小网眼网格、添加空心球等技术手段形成微小涡旋来强化絮凝效果, 具有占地面积小、絮凝效果好的显著优势[22]。涡流混凝技术的关键组件是涡流反应器, 这种反应器通常由 ABS 塑料制造, 具有中空的球形结构, 球体表面分布着多个圆形孔洞, 内外表面经过特殊处理以增加粗糙度, 其比重略大于水。这种反应器主要通过微涡流凝聚和立体接触絮凝的原理来实现反应。涡流反应器的设计特点赋予了它以下优势: 1) 耐用性强, 使用寿命长, 且由于其空心球体的设计, 投放时无需考虑方向, 可以直接投入水体中的反应区域。2) 结构设计简单, 便于大规模生产和运输储存, 工厂化批量注塑生产和工程施工周期短。3) 过孔水流的速度和方向变化, 加上内外壁面的摩擦阻力, 使得水流产生微涡旋流动。4) 在上向流中可以自由浮动和旋转, 不会漂浮在水面上, 也不易被漂浮物堵塞[23]。利用计算流体动力学(CFD)进行数值模拟, 可以分析微涡流絮凝区的流场, 优化工艺参数, 探究不同流量下絮凝区液流状态变化, 确定最佳絮凝时间[24]。

2.6.2. 微涡絮凝的应用

微涡流絮凝技术适用于城市供水行业, 特别是在水源水质污染、需求总量增加和出水水质标准提高的背景下, 对现有水处理工艺进行改进和强化。十堰某水厂采用涡流反应器对机械澄清池进行改造, 改造后单池处理规模由 1280 m³/h 提高到 2500 m³/h, 澄清池出水浊度 < 3 NTU, 出厂水浊度 < 1 NTU, 改造投资 < 30 元/m³。说明了微涡絮凝具有效率高, 成本低, 施工方便等优点, 是一种值得推广的水处理工艺[25]。

3. 结论与展望

絮凝工艺作为水处理的一种重要方式, 经过多年的发展已经相当成熟。折板絮凝以其高效的水力混合特性, 在原水浑浊度波动较大或低温低浑浊度环境下表现出色; 斜管絮凝则凭借其独特的层流设计, 大幅提高了沉淀效率; 网格絮凝利用简单的结构实现了良好的絮凝效果, 特别适合小规模水厂的应用; 电絮凝技术以电能替代传统化学药剂, 能够有效地清除重金属和其他污染物; 磁絮凝结合了混凝与磁分离的优势, 对特定类型的废水处理具有明显优势; 而新兴的微涡流絮凝技术由于其高效率、快速施工和低成本的特点, 正逐渐获得业界的认可。微涡流絮凝作为近年来兴起的新技术, 以其高效率、快速施工和低成本的优势而受到关注。然而, 这并不意味着传统絮凝技术会被淘汰, 因为它们在管理和操作方面仍然具有明显的优势。尽管微涡流絮凝技术是一项创新, 但它仍面临缺乏统一的技术标准和设计规范的挑战。此外, 尽管其运行成本较低, 但初始投资和维护成本可能相对较高, 特别是在更换填料和系统升级方面。此外, 这项技术还要求操作人员具备更高的技术水平。

未来的研究, 应该进一步微涡絮凝工艺方向发展, 做到更高效、低成本的填料和系统设计。并且结合现代信息技术, 使微涡絮凝工艺实现智能化控制, 提高处理效率和稳定性。同时研究方向可以向将不同的工艺结合起来的方向发展, 南京某矿业公司将微涡流絮凝和斜管沉淀技术结合起来, 提升了处理水量和出水水质[26]。案例说明将不同的工艺结合起来是可行的, 未来的研究可以尝试将不同的两种或多种絮凝工艺结合起来, 进一步提升水处理的效率。

参考文献

- [1] 马绍基, 朱康怡. 折壁式水平隔板絮凝池设计[J]. 中国给水排水, 1998, 14(5): 41-43.
- [2] 孙友勋, 谭章荣, 秦祖群, 等. 异波折板絮凝单元水头损失公式研究[J]. 给水排水, 1999, 25(11): 9-13.
- [3] 王波. 川南地区某县城水厂改造方案研究[J]. 给水排水, 2023, 59(S1): 27-31.
- [4] 王为民, 郭彩荣, 明辉, 等. 钢铁企业海水淡化工程实例[J]. 水处理技术, 2022, 48(2): 148-152.
- [5] 周平, 张戎. 影响斜管沉淀池稳定运行因素探讨[J]. 给水排水, 2007, 33(7): 21-22.
- [6] 张慧, 杨娟. 有关斜管沉淀池的上升流速讨论[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S2): 305-307.
- [7] 冯二军. 给水净化工艺在制浆造纸企业中的设计与应用[J]. 中华纸业, 2009, 30(7): 82-86.
- [8] 李三中, 陈俊学, 郝庆玲, 等. 斜管沉淀池斜管积泥成因及解决措施[J]. 中国给水排水, 2002, 18(8): 76-77.
- [9] 王白杨, 熊树林, 胡兆吉, 等. 斜管沉淀技术用于脉冲澄清池的改造[J]. 中国给水排水, 2006, 22(14): 19-21.
- [10] 贺维鹏, 曹玉烛, 施周, 等. 基于 CFD 的网格絮凝池内水流紊动协同效应分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, 40(4): 14-20.
- [11] 胡远来, 陆先镭, 贺卫宁, 等. 排泥管对网格絮凝池流态的影响[J]. 中国给水排水, 2017, 33(23): 51-54.
- [12] 许靖航. 排泥管对网格絮凝池的絮凝效果影响[J]. 给水排水, 2023, 59(S1): 154-158.
- [13] 曾正仁, 孙政, 白华清, 等. 老旧自来水厂絮凝沉淀池技术改造实践[J]. 中国给水排水, 2024, 40(4): 89-92.
- [14] 王德次, 许平. 水处理技术与水处理设备的选择[J]. 中国农村水利水电, 2007(4): 38-40.
- [15] 祝海涛. 电絮凝集成技术及应用研究进展[J]. 水处理技术, 2023, 49(9): 7-10, 33.
- [16] 戴常超, 陈大宏, 刘峻峰, 等. 强化电絮凝技术的基础、现状和未来展望[J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 1-14.
- [17] 周杰, 宋小三, 王三反. 水处理电絮凝技术的研究进展与挑战[J]. 化工进展, 2020, 39(S2): 329-335.
- [18] 王玲燕, 张国辉, 朱瑞龙, 等. 电絮凝法去除油田回注水中油含量的研究[J]. 应用化工, 2023, 52(2): 494-497.
- [19] 王东升, 张明, 肖峰. 磁絮凝在水与废水处理领域的应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 705-713.
- [20] 王淑军, 李恩泽, 齐文豪, 等. 磁絮凝技术在水处理中的应用研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(1): 244-249.
- [21] 孙少群. 磁絮凝沉淀用于漳浦污水处理厂一级 A 升级改造[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 95-100.
- [22] 何亚其, 白健华, 孙超, 等. 新型微涡流混凝器絮凝效果评价及数值模拟分析[J]. 工业水处理, 2021, 41(6): 206-210.
- [23] 童祯恭, 方永忠. 微涡流混凝技术在西桥水厂中的应用[J]. 给水排水, 2004, 30(6): 19-22.
- [24] 徐琪珂, 戴红玲, 赵国强, 等. 微涡流絮凝工艺处理高浊水的数值模拟与响应面优化试验[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 62-69.
- [25] 童祯恭, 方永忠, 胡锋平. 微涡流混凝技术在十堰水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2008, 34(4): 66-68.
- [26] 黄继华. 微涡流絮凝/斜管沉淀技术用于脉冲澄清池的改造[J]. 中国给水排水, 2012, 28(2): 74-76.