

关于工业水处理技术的发展趋势分析

李雁鸿, 周继柱, 王国瑞, 马 凯, 张志平

神美科技有限公司, 河北 河间
Email: liyanhong@shenmeikeji.com

收稿日期: 2021年1月12日; 录用日期: 2021年2月16日; 发布日期: 2021年2月23日

摘 要

近年来随着工业的迅速发展, 对水资源的需求也急剧增长, 伴随着水资源的供需矛盾也日益尖锐, 因此急需优化、升级工业水处理技术水平已满足现代化工业生产和生态文明需求。通过对不同工业水处理技术特色进行分析, 提出节能降耗、智能水务和引入多维度的评价标准是工业水处理技术发展的核心要素, 未来的工业水处理技术发展潜力将向集成型、综合型、智能型、可持续发展型方向发展。

关键词

工业水, 处理技术, 核心要素, 发展趋势

Development Trend Analysis of Industrial Water Treatment Technology

Yanhong Li, Jizhu Zhou, Guorui Wang, Kai Ma, Zhiping Zhang

Smedic Technology Co. Ltd., Hejian Hebei
Email: liyanhong@shenmeikeji.com

Received: Jan. 12th, 2021; accepted: Feb. 16th, 2021; published: Feb. 23rd, 2021

Abstract

In recent years, with the rapid development of industry, the demand for water resources has also increased sharply. And the contradiction between water supply and demand has become increasingly acute. Therefore, it is an urgent need to optimize and upgrade industrial water treatment technology to meet the needs of modern industrial production and ecological civilization. Through the characteristic analysis of different industry water treatment technologies, the energy saving-consumption reduction, future intelligence, and the introduction of multi-dimensional evaluation standards are the core elements of the development of industrial water treatment technology.

The development potential of industrial water treatment technology will be in the direction of integrated, comprehensive, intelligent, and sustainable development.

Keywords

Industrial Water, Water Treatment Technology, Core Elements, Development Trends

Copyright © 2021 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

水是工业的血液，任何工业生产都离不开水资源，工业用水一般占城市用水总量的 80%左右，如发电、冶金、机械、化工、石油、印染、采矿、食品等工业用水量都非常大[1]。根据联合国的最新资料显示：我国水资源总量位于世界第六位，但人均占有量却在全球排列第 109 位。“十四五”规划也指出要进一步强化源头治理、系统治理、整体治理，深入实施可持续发展战略，持续改善环境质量，促进经济社会发展全面绿色转型[2]。因此作为水质保障的工业水处理技术发展显得格外关键，不仅在为工业的发展提供最强有力的支撑，更在保护人类生态文明中起着至关重要的作用。

2. 工业水处理技术发展现状

工业水处理技术是指根据不同的水质要求和生产工艺需求，采用的具有针对性的水处理过程，使水质达到标准工业条件。近年来，随着工业水处理技术的不断发展，对降低能耗、提高水资源的循环再利用率提出了更高要求[3]。我国在工业污水处理技术领域也取得了一定的进步：更多的技术进行了成果转化，更多的污水处理工艺进行了更新换代和升级，出水水质的标准也得到了进一步提高。但快速发展的背后也暴露了一些问题：大中小工业企业污水处理技术发展不平衡，研发投入产出不成比例；盲目扩张、设备升级，造成设备利用率低，资源浪费；一味的套用模式，没有因地制宜发展符合自身工业特色的污水处理技术等。

传统的离子交换技术和投加化学物质软化水质的方式已不能满足我国快速的工业经济发展和科学技术的进步，虽然静电处理法、反渗透法、电子处理法等在国内取得了一定的应用，但与世界发达国家相比还有一定的差距[4]。为此只有通过工业水处理技术开展有针对性的系统研究，才能为工业发展提供更为科学的技术基础，为生态保护提供更加友好的技术支撑，为人类经济发展提供更强大的技术保障。

3. 工业水处理技术核心要素

3.1. 节能降耗

随着工业领域的不断进步和新产品的出现，工业领域对水量和水质的需求不断提高，如果没有高效的能源利用率，必然导致能耗的增加[5]。由于能源价格的持续上涨，如何提高能源利用率，更好的平衡水资源和能耗的关系，降低成本，是提高工业水处理技术甚至是企业发展的首要因素。

能耗的降低不能靠某一个或几个环节实现，而是需要对整个生产的各个环节进行综合评估，包括工艺流程、设备选型、物料优选等。通过开发新技术、新工艺、新型环保材料，整合优化先进技术，调整已有工艺流程、工艺设计等，可以降低设备使用数量，提高贵重金属材料的回收效率，提升水循环和催

化工艺中的热量循环利用率。同时需要加强综合管理水平,做到优化控制、精准投加、科学维护保养、合理运行等,可以更好的提升设备功率、设备利用率、燃料利用率、减少热量损失、设备损耗、无用消耗等,真正实现“资源节约型,环境友好型”发展[6]。

3.2. 智能水务

互联网时代的到来必将带来传统工业的改革升级,如何更好的将现代化信息技术与传统水处理工业技术深度融合,紧跟互联网、物联网、AI 大数据的发展步伐,是大幅度全面升级工业水处理技术的关键因素。

智能水务管理系统[7]要通过搭建水资源数字化网络,将水资源管理、能源管理和物料仓储管理集成在一起,通过不断的数据分析,进行优化资源配置、指导生产、完善工艺流程,提高水资源、特殊组分和能源的高效循环利用率。将精细化学和微生物学与在线测量技术相结合,搭建在线监测数据库,不仅仅能准确检测水质、设备参数及运行状态,更重要的是能跟踪监测微量元素、高成本物料、超低浓度有毒物质的动态变化和行踪轨迹,更好的控制有毒物质间的相互作用和新物质转化,将事后处理改为事前分析和预防,更好的提高物料的循环利用率,提高数据的实时性和准确度。

智能水务管理系统要保持资源共享和不断的创新功能[8]:一是要充分发挥市政与工业之间,工业生产不同部门之间的资源协同效应。二是在不断更新数据库的基础上,加强自我分析和评价能力,挖掘潜在的利用价值。三是通过打造自己独特的信息化团队和独有的专业数据开发管理平台,为水处理技术革新提供源源不断的数据支撑和解决办法,帮助企业由简单的仅凭经验管理升级为全方位的智能化综合管理,从而提升企业效益,提高生态环境社会效益。

3.3. 多维度评价

水资源是可再生资源,但随着工业和城镇化的发展以及环境的破坏,造成了水资源的严重匮乏,是否符合生态的绿色发展成为评价水处理技术能否可持续发展的决定性因素,传统单一的评价方法已不能满足工业水处理技术的评价要求,多维度、多领域交叉融合的综合评价指标必将纳入到新的评价体系中,是保持工业水处理技术的健康、平稳、持续、科学发展的必要因素。

英国学者早在 2008 年提出了“生态足迹”的概念,随着工业领域的不断发展,能源的消耗不断增加,二氧化碳的排放量也急剧增加,“碳足迹”的概念被提出,目的是为评价一个工业产品的环境承载量[9]。而在此基础上,又提出了“虚拟水”、“水足迹”的概念,是从社会、环境、制度、经济等全维度对水资源占用的技术综合评价指标[10]。目前对水处理技术的评价指标目前尚无统一的计算模型,随着中国“建设面向未来的中国污水处理概念厂”的提出,以“碳中和”实现水资源再生和贵重物质材料回收为根本目标[11],可以加快中国在工业水处理领域的技术突破和发展,从而形成一套适合我国国情的、多维度的、可持续发展的工业水处理技术评价体系。

3.4. 小结

节能降耗、智能水务、多维度评价体系组成了工业水处理技术发展的核心要素,随着工业新技术的不断研究,工业新产品的陆续出现,将会衍变更多、更先进的污水处理工艺,随着人类对工业技术、产品、工艺的深入认知,将需要更多的发展要素对新型的工业水处理技术进行评价支撑,从而可以更好的保持工业水处理技术的健康发展。

4. 工业水处理技术发展趋势

目前工业水处理技术主要围绕物理法、化学法、生物处理法等进行处理。本文主要针对几种常见领域中具有发展潜力的工业水处理技术进行分析研究。

4.1. 循环水领域：高效处理技术

工业循环水又称为工业生产冷却水，80%左右的工业用水为循环冷却水[12]。高质量的冷却水对提升设备运行状态，维持设备寿命，提高生产能力方面扮演着非常重要的角色。目前循环水处理技术主要以物理、化学方法为主，虽然处理应用相对简单，但处理不彻底或引入二次污染物，会对整个生产工艺设备产生二次伤害，间接影响产品质量和生产速度。

膜工艺的开发和应用实现了将水中金属离子和化合物的过滤处理，是目前较为安全的水处理方式，目前发展的超滤、微滤膜等技术可以减少化学药剂的使用，较少对水体的二次污染，因其耐酸碱、抗高温等性能得到普遍应用[13]。但是长时间运行易造成滤膜污染问题反映了该领域的技术不成熟，所以发展低成本的新型膜材料，提高滤膜的功能性、选择性和稳定性是急需解决的问题。

另一方面高效环保复合型工业循环水处理剂作为精细化工的分支是水处理药剂领域的发展趋势[14]，因传统的单一组分药剂只能解决某一项问题，因此在常规缓蚀剂、阻垢剂、杀菌剂等药剂基础上研发新型的、性能更加稳定的、无毒易降解的复合型水处理药剂将成为重要的发展方向。

4.2. 有价值物质回收领域：精细分类回收技术

工业水中的有价值物质主要包括：贵金属，有色金属，碱金属，稀土金属，金属类如硒，碲，砷，铋，硼，镓，锗，铟以及磷(例如磷酸盐)，氮(例如氨水或硝酸盐)，锂，碘，此外还包括酸(有机矿物质)，表面活性剂，溶剂，萃取剂，酚类，木质素以及制药业或作物保护中的活性成分等[15]。随着原材料价格的进一步上涨，有价值物质的分类回收技术变得越来越具有吸引力。

目前主要的处理方法有化学沉淀、铁氧体法、电渗析、膜分离、吸附法、萃取法、离子交换法等，但由于处理效果不理想、提取浓度低、运行成本高、操作复杂等原因，导致部分技术未能更好的应用和发展。随着精细化学和高分子材料的发展，可以更加精准的描述、追踪各类有价值物质的足迹变化，将有助于提高吸附性能和选择性离子交换效率，结合新型膜工艺技术的研发，将有效的克服传统工艺方法的局限性，实现对有价值物质的回收利用，有助于实现真正意义的“零排放”[16]。不仅可以极大降低有毒有害物质对环境的污染，还可以极大降低生产成本，给企业创造更高的利润空间。

4.3. 高含盐废水领域：深度处理技术

高含盐废水是指总含盐量大于 1000 mg/L 的废水，废水中含有大量有机物，增加了处理难度，造成传统工艺处理成本较高，操作控制要求高，能耗高，抗负荷能力低，回收率低，出水水质不稳定等问题，盐的回收达不到经济效益[17]。随着国家对环保的要求越来越严格，对高浓度盐处理的经济可行性将成为急需解决的问题。

对于高含盐废水的处理主要是在热法和膜法的基础上发展起来，机械蒸汽浓缩，低温多效蒸发，真空膜蒸馏，电渗透，纳滤，反渗透等[18]。不同的工艺技术各有利弊，适用于不同类型的工业含盐废水，以热法分离为基础的工艺设备体积大、能耗高，并且对来水的水质要求比较严格。以膜法为基础的工艺虽然能耗低，但对膜的损耗较高。所以对现有工艺进行优化升级，将有助于充分发挥各项技术的优势，达到最理想的处理效果。近年来飞速发展起来的生物处理法，因其经济高效而被广泛研究，但处理高含盐废水需要培养特殊的微生物，适应高含盐的特殊环境进行生长与繁殖，同时增加了基建规模和投资成本，因此培养适合不同浓度梯度的微生物，提升运行管理效率，降低成本是未来生物法处理高含盐废水的发展趋势。

4.4. 生物领域：差异化处理技术

工业水的生物处理技术理念是“分解”与“降解”，即在尽可能降低能耗的情况下，进行废物的转

化、分解、利用,达到水处理的目的[19]。生物处理的关键在于反应池以及所需微生物的培养条件控制,利用厌氧/缺氧/好氧环境发展起来的各种工艺及其改良升级工艺,成为生物处理的主流技术。但由于工业废水的性质复杂性,生物处理在一定程度上受到影响。某些难生物降解的物质,需要结合物理/化学过程进行处理。不同微生物所需的生产环境不同,有毒化合物(例如重金属)的存在,高盐负荷, pH 和温度变化等都会对微生物活性造成冲击,给微生物的培养带来困难。对微生物反应机理认识不全面,目前绝大多数是通过经验分析、物理、化学测量来进行过程控制,并未真正发挥微生物处理的潜能。

随着技术的不断进步以及对微生物活性影响因素的有了更全面认识,主要包括新的菌株培养手段,更高效的生物降解能力,新型分子结构菌株的发现等,能够极大提升微生物的水处理能力[20]。在此条件下可以培养具有针对性的细菌、藻类、真菌和生物活性酶等,针对不同行业的污水特性投放特定功能的菌群进行强化,培养出能适应高温、高盐、高酸碱、甚至低浓度等不同极端条件的优势菌群,再依托各种新型填料作为载体,可以有效应对水体、环境变化造成的冲击,保持生物处理系统的稳定性,提升深度处理能力和经济效益,提高出水水质。

4.5. 难降解领域：高级氧化处理技术

高级氧化技术在于自由基,羟基自由基的氧化电位要比普通氧化剂高很多,其氧化电势(2.80 V)仅低于氟(2.87 V),氧化能力非常强[21],主要是羟基自由基参与反应,将有机物氧化分解为易于被微生物吸收的小分子,最后分解成为二氧化碳,水和无机盐。常见的方法有:Fenton 氧化法、臭氧氧化法、湿式氧化法、光催化氧化法、超临界水氧化法、超声波氧化法及过硫酸盐氧化法等。

氧化过程的一个特殊性是中间体和副产物的形成,这些转化产物可能具有毒性作用,造成二次污染,并且高级氧化催化剂成本较高,处理效率相对较低[22],因此在应用之前,需要过程进行准确的分析并进行精确设计。往往单一的氧化处理技术不能达到理想的效果,需要组合多种技术协同发挥作用,因此未来的发展方向是在传统高级氧化基础上的复合技术,利用电化学、高分子材料、膜载体、生物处理等,针对不同的污染物,在降低氧化剂用量的前提下,延长羟基自由基的存留时间,提升氧化效果,扩大污染物的去除率,提高有价值物质的回收,提升水的循环利用率,提高经济效益。

4.6. 膜分离领域：新型材料膜优化技术

膜分离作为一种低能耗的物理分离方法,在废水处理中起着重要的作用。依托的是薄膜的选择功能进行物质的分离、提纯和浓缩,因此薄膜成为了该项技术的核心要素[23],而该项技术的制约因素也是薄膜,薄膜极易受到滤饼、难溶大颗粒、小颗粒聚集堵塞造成的污染,严重的导致某项技术无法应用。为克服这一缺点,薄膜的物理、化学清洗方法得到了大量的研究和应用,但长期的清洗必然会造成薄膜的二次伤害,无法从根本上解决问题,因此对高性能膜材料的研发也备受关注。

根据膜的材质不同,可分为有机膜和无机膜[24]。目前聚合物膜已成功用于处理大量废水,不仅可以分离悬浮的物质和细菌,而且可以分离溶解的盐和低分子。在化学和制药工业中,必须使用特种功能膜进行分离处理,陶瓷膜鉴于其较好的机械性,化学和热稳定性,被广泛应用。随着国家对环保升级的需求,气体分离膜、石墨烯新型膜等高性能膜将得到飞速发展。工业水处理技术应当更加灵活的运用不同类型的膜载体,使其各自在不同的领域发挥优势,创新研发适应于某些特定物质、特殊环境、较强选择性的成本更低的新膜,可以提高分离效率,改善膜的化学、机械、稳定性和使用寿命,提升抗污染能力。另外将膜的功能性与其它技术组合使用可以更好的发挥膜的作用,扩大其适用范围,提高去污净化效果。

4.7. 小结

循环水高效处理技术、有价物质精细分类回收技术、高含盐废水深度处理技术、生物差异化处理技

术、难降解物质高级氧化处理技术和新型膜材料优化技术将在不同的工业领域发挥不同的作用。但工业水不同于市政水，其水质差异性较大，不同工业领域的工艺流程、水质需求、水处理方式也存在差异，在实际工业生产中，各行业需要根据自身性质特点有针对性的借鉴一种或几种组合技术进行污水的深度处理，才能最大化的提升企业效益，减少环境污染。

5. 工业水处理技术发展总结

随着现代工业领域的不断拓展和挖深，工业产品需求的提升必将对水质提出更高的要求，传统工业水处理技术正在逐步升级和完善，工业水处理技术必然向着专业化、个性化、功能化、能源节约化、环境友好化的方向发展。

节能降耗、智能化、多维度评价等标准将成为工业水技术发展的新思想、新理念、新方向，用于指导技术不断的改革、创新与完善。工业水处理技术应在更高效、更经济、更精细方向发挥潜力，结合国内外先进技术模型的特点以及不同技术间的协同配合作用，可以最大程度的发挥各技术的优势互补效果。未来工业水处理技术还将与 AI 人工智能结合的更加紧密，通过持续的数据输入、分析、反馈，不断加强大数据在工业水处理领域的规模化应用，提升自动化管理水平，将为工业水处理技术带来实质性的变革。未来工业水处理技术的发展将是集功能、特色、科技和智能于一体的可持续发展的综合技术体系。

参考文献

- [1] 张统, 李志颖, 董春宏, 周振. 我国工业废水处理现状及污染防治对策[J]. 给水排水, 2020, 46(10): 1-3.
<http://dx.chinadoi.cn/10.13789/j.cnki.wwe1964.2020.10.001>
- [2] 董战峰, 陈金晓, 葛察忠, 毕粉粉, 王金南. 国家“十四五”环境经济政策改革路线图[J]. 中国环境管理, 2020, 12(1): 5-13. <http://dx.chinadoi.cn/10.16868/j.cnki.1674-6252.2020.01.005>
- [3] 刘鲁建, 董俊, 张岚欣, 熊蔚. PACT-UF 组合工艺深度处理工业废水的中试[J]. 中国给水排水, 2019, 35(15): 86-89.
- [4] 杨帆, 盛亮, 岳晓霞. 工业水处理技术的发展概况与技术进步[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(4): 140-142.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1008-9500.2020.04.038>
- [5] 刘悦. 中国工业绿色水资源效率的时空分异及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 安徽: 安徽理工大学, 2019.
- [6] 张峰, 王晗, 薛惠锋. 环境资源约束下中国工业绿色全要素水资源效率研究[J]. 中国环境科学, 2020, 40(11): 5079-5091.
- [7] 金亚颀. “工业智慧水网”的研究和探索[J]. 城镇供水, 2018: 19-21.
- [8] 罗贤伟. 智慧水务评价指标体系研究[J]. 给水排水, 2020, 46(2): 125-127+132.
<http://dx.chinadoi.cn/10.13789/j.cnki.wwe1964.2020.02.025>
- [9] Mujica, M., Blanco, G. and Santalla, E. (2016) Carbon Footprint of Honey Produced in Argentina. *Journal of Cleaner Production*, **116**, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.086>
- [10] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 吕乐婷. 中国省际碳足迹广度深度评价及时空格局[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 447-449.
<http://dx.chinadoi.cn/10.5846/stxb201901010003>
- [11] 宋新新, 林甲, 刘杰, 徐相龙, 李佳, 李传举, 等. 面向未来污水处理技术应用研究现状及工程实践[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 39-53.
- [12] 张红. 工业循环水处理技术改进措施[J]. 资源与环境, 2020, 46(10): 181-182.
- [13] 李红果, 李天祥, 朱静, 胡雪, 王睿哲. 膜分离技术处理工业废水研究进展[J]. 应用化工, 2018(10): 2739-2743.
- [14] 陈朋利. 水处理药剂的应用与发展[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(6): 162-164.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1008-9500.2019.06.053>
- [15] James, P.B., Laura, R.R., Robert, D. and Ogden, M.D. (2019) Ion Exchange Removal of Cu (II), Fe(II), Pb(II) and Zn(II) from Acid Extracted Sewage Sludge-Resign Screening in Weak Acid Media. *Water Research*, **158**, 257-267.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.042>
- [16] 黄远奕. 我国工业废水重金属灰水足迹的分布特征及驱动因子研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京科技大学,

2020.

- [17] 刘展, 郭瑞亚, 李娜, 闫美芳, 郭茹辉, 刘振法. 高含盐废水资源化利用技术的研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(10): 2657-2661.
- [18] 韦锋涛, 贾铭椿, 王晓伟, 门金凤, 杜志辉, 梁成强. 高含盐废水浓缩处理技术研究进展[J]. 现代化工, 2019, 39(9): 21-25.
- [19] 王亚军, 蔡文娟, 王惠. 生物强化技术及其在污水处理中应用研究评述[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 1062-1070. <http://dx.chinadoi.cn/10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.05.024>
- [20] 张少统. 厌氧生物技术在工业废水处理中的应用[J]. 当代化工研究, 2020(8): 111-112.
- [21] 冯雪梅, 卫新来, 陈俊, 吴克, 李明发. 高级氧化技术在废水处理中的应用进展[J]. 应用化工, 2020, 49(4): 993-996.
- [22] 许征宇, 陈洁, 余进. 高级氧化技术在污水处理中的应用及研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(10): 112-114. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1008-9500.2020.10.030>
- [23] 史冬梅, 张雷, 李丹. 高性能膜材料国内外发展现状与趋势[J]. 科技中国, 2019(4): 4-7.
- [24] 张慎祥. 高性能分离膜的设计及性能研究[D]: [博士学位论文]. 中国科学技术大学, 2018.