

水能源的研究现状与芬顿氧化法治污的应用

高若普^{1,2}, 李美青^{1,2}, 梁一凡^{1,2}, 宋雯雯¹, 夏宝国^{1,2*}

¹伊犁师范大学化学化工学院, 新疆 伊宁

²中国化工学会伊犁师范大学学生分会, 新疆 伊宁

收稿日期: 2023年10月17日; 录用日期: 2023年11月17日; 发布日期: 2023年11月28日

摘要

水能具有很大的潜力可以开发和利用。特别是在中国这类水电资源较为丰富的国家, 水力发电已经成为国内主要的电力供应方式之一。但是发展水能依然面临许多挑战, 其中人类活动对于水资源的影响, 是目前影响水能发展的主要原因之一。由于工农业的发展, 导致水资源被污染的现象愈发严重, 这便导致水能的开发受到了极大地限制。为了解决这一现状, 我国积极倡导可持续发展理念, 许多科研人员开始着手这一理念来解决水污染问题。本文主要综述了近些年来国内外水能开发的现状, 并对光芬顿氧化法及非均相芬顿催化氧化法在解决水污染问题方面的可持续性进行了分析。

关键词

水污染, 水资源, 芬顿氧化

Current Research Status of Water Energy and Application of Fenton Oxidation for Pollution Treatment

Ruopo Gao^{1,2}, Meiqing Li^{1,2}, Yifan Liang^{1,2}, Wenwen Song¹, Baoguo Xia^{1,2*}

¹College of Chemistry and Chemical Engineering, Yili Normal University, Yining Xinjiang

²CIESC Student Chapter of Yili Normal University, Yining Xinjiang

Received: Oct. 17th, 2023; accepted: Nov. 17th, 2023; published: Nov. 28th, 2023

Abstract

Hydropower has great potential to be developed and utilized. Particularly in countries such as
*通讯作者。

文章引用: 高若普, 李美青, 梁一凡, 宋雯雯, 夏宝国. 水能源的研究现状与芬顿氧化法治污的应用[J]. 可持续能源, 2023, 13(5): 59-67. DOI: 10.12677/se.2023.135006

China, which is rich in hydropower resources, hydropower has become one of the main forms of electricity supply in the country. However, there are still many challenges to the development of hydropower, including the impact of human activities on water resources, which is one of the main reasons affecting the development of hydropower. As a result of the development of agriculture and industry, the phenomenon of water resources being polluted has become more and more serious, which has led to the development of hydro energy being greatly restricted. In order to solve this situation, China actively advocates the concept of sustainable development; many researchers began to embark on this concept to solve the problem of water pollution. In this paper, the current situation of water energy development at home and abroad in recent years is reviewed, and the sustainability of photo-Fenton oxidation and non-homogeneous Fenton catalytic oxidation in solving the water pollution problem is analyzed.

Keywords

Water Pollution, Water Resources, Fenton Oxidation

Copyright © 2023 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

水能作为一种重要的可再生能源，近年来受到了广泛的关注和研究。水力发电作为水能的主要利用方式，已经在全球范围内得到了广泛的应用和发展。然而，在当前全球能源需求不断增加、环境问题日益突出的背景下，水能的开发利用仍面临着一些挑战和机遇。其中，水资源是水能的基础，水资源的丰富程度和人文循环的正常运行对于水能的开发利用至关重要。可随着工业化和城市化的快速发展，生产和生活废水、工业废水以及农业面源污染等因素不断增加，导致水质恶化、河流湖泊富营养化、水生态系统破坏等问题日益突出。这便大大地限制了水能的开发和利用。为了解决水污染的问题，科研人员采用了大量的措施，如：生物降解法、膜分离技术、电化学法等等，而其中的光芬顿氧化法和非均相芬顿催化氧化法，一个通过光能强化芬顿法，进而产生了更多氧化性极强的 $\cdot\text{OH}$ ；一个通过载体解决传统芬顿的二次污染问题，增强其可持续性。此外，两者都具有反应条件较为温和，符合可持续发展理念的特点，且可结合使用，因此具有广泛的研究前景[1]。

2. 水能

水能是指通过利用水的动能和重力势能进行能量转换的过程，如：水在高位具有重力势能，当水流下降时，其重力势能将转化为动能，这个动能可以被捕捉和利用，这便是水能利用的基础原理之一。在建设水坝和水力发电站时，便是利用了这一原理，通过利用水流的落差，将水流从高位流向低处产生的动能来驱动涡轮机等设备进而产生电能。

水能具有环保、可再生等特点。水力发电不消耗水资源，更不会污染水体和产生排放物，因此被认为是一种清洁的能源形式。同时，水能是可再生的，只要水循环存在，水能资源就会持续存在，所以还是一种可持续能源。而中国拥有众多的河流和湖泊，其水能资源技术可开发量在全球范围内居于首位，丰富的水资源为水力发电提供了良好的条件。根据 2003 年全国水力资源复查成果，我国的水能资源技术可开发装机容量为 5.42 亿千瓦，年发电量为 2.47 万亿千瓦时[2]。而在 2022 年，全国水电的总发电量为 1.36 万亿千瓦时，占全口径发电的 15.6% [3]。这个数据充分的表明，目前我们对于水电的利用还是有待

提高,我们可以建设更多的水力发电站,并将其转化为可靠的清洁能源供应。这不仅有助于满足国内电力需求,还能促进经济发展,减少对传统能源的依赖,实现可持续发展的目标。

2.1. 水能开发的国内外现状

根据国际能源机构(IEA)的预测,从2021年到2030年,全球水电发电量有望增加近850 TWh。在这个增长中,中国将占据41%以上的比例,而印度、印度尼西亚、巴基斯坦、越南和巴西共同贡献了21%。因此,可以说全球水电的开发势头不会停止,相反还有巨大的增长潜力。这意味着水电市场有着巨大的发展空间,等待着人们进一步的开发。近些年来,中国在水电产业链上技术研发和专利申请活跃,在国内市场占据领先地位,并具备国际竞争力。俄罗斯、泰国和波兰等国也有一定的水电开发优势和潜力。下面将分别进行详细的介绍。

2.1.1. 国内现状

目前中国的水电产业链已经相当成熟和完善。产业链主要分为上游、中游和下游。上游主要包括建筑及机电设备原材料供应产业,中游则涉及建筑咨询施工和机电设备制造安装产业,下游则是水力发电产业。在技术方面,中国的核心技术主要集中在超大型水轮机制造技术领域,少数企业如东方电气、哈尔滨电机厂、重庆水轮机厂、浙富控股等掌握了这些关键技术。而水电厂和水电站是这些水电设备技术的主要应用领域。过去几十年来,中国水电设备的技术研发和制造能力有了显著提高,与国外企业的技术合作也日益加强。中国企业在水电技术专利申请方面表现活跃,申请量呈上升趋势。从统计数据来看,大型国企和高校科研院所是国内水电技术主要专利申请人。比如国家电网在并网控制、电网计划制定等方面具有专利技术;成都勘测设计研究院在隧洞、导流洞、引水系统等领域有独特贡献;哈尔滨电机厂作为龙头企业,在潮流能、抽水蓄能、水轮机等方面申请的专利也遥遥领先。对于全国专利申请量的细分统计,水电行业产业链上游的申请量较高的省市依次是浙江省、江苏省、广东省,反映了长三角、珠三角地区在装备制造领域的优势;中游的申请量较高的省市依次是四川省、浙江省、贵州省,体现了水电站的布局分布;下游的申请量较高的省市依次是北京市、湖北省、江苏省,反映了电网企业在各省份的分布[4]。

综上所述,中国水电产业链已经相当完善,技术研发和专利申请活跃,不仅在国内市场占据领先地位,也在国际市场上具备竞争力。

2.1.2. 国外现状

俄罗斯经常被认为是一个“能源超级大国”[5],拥有丰富的能源和燃料资源,尽管俄罗斯的传统能源有着如此密切和广泛的覆盖范围,但是在俄罗斯和前苏联国家当中对于可再生能源的研究依然越来越多。在俄罗斯,电力工业是当代经济的主要分支,它决定着所有其他分支和社会领域的位置、发展、经济效率和稳定性。其水电发电量在各类发电量中排名第三。并且俄罗斯具有很大的水电潜力。世界上约9%的水电储量集中在其境内。在水能资源方面仅次于中国居世界第二位,领先于美国、巴西、加拿大。可尽管其水电工程的机会相当广泛,但在现阶段,俄罗斯近期的水电开发被许多专家评价为不利的,这是由于近年来俄罗斯受到全球和国内经济危机的影响,以及2014年以来的经济制裁和全球能源市场油价下跌的冲击,导致其国内对电力和新发电能力的需求明显减少,并且出现了这些能力过剩的问题。所以,俄罗斯近些年在水能方面的研究和发展明显较少。

泰国拥有丰富的可用于发电的水资源[6]。在未来的发展中,截至2013年9月底,泰国水电上网容量达到3497 MW,约占整个电力系统的11%。到了2015年,泰国水电的现有潜力为15,155 MW,约为当时容量的4倍。此外,该国的25个河流地区可以容纳总潜力不低于1500 MW的小型水力发电厂。2021

年, 能源部预计泰国将能够将替代能源和可再生能源的发电量增加到 9201 MW, 其中 1608 MW 由水力发电。由此可以看出, 泰国具有一个良好的水电发展趋势。

波兰的水能潜力也是很高的[7], 但是波兰的水电资源利用率就比较低了仅为 12%, 其目前使用的水轮机发电的设备功率目前在 994 个水电站中达到 611 兆瓦(761 兆瓦, 不包括抽水蓄能物体), 其中 746 个设施是小水电站。其水电站大多为小水电站, 这是由于波兰的水电部门认为, 非常大的水电站, 特别是那些有水库的水电站, 也对环境产生负面影响; 而开发小型水电站, 其环境影响有限, 并且为调节水文条件、改善土壤湿度和地下水位的系统的一部分, 非常有益。

3. 光芬顿法及非均相芬顿催化氧化法处理水污染

水资源是水能发展的基础, 但是由于工业废水排放、农业活动、城市生活污水、土地排水和排泄物、天然因素以及油污等多种因素, 越来越多的水资源被污染, 这大大的限制了水能的发展。为了缓解这一现状, 研究人员采用可持续能源——光能结合芬顿氧化技术, 来处理水污染。而在光芬顿法中, 为了提高该体系的可持续性, 往往还结合非均相芬顿催化氧化法来处理水污染。

3.1. 芬顿氧化法的起源

在 1894 年, 法国的科学家 Fenton 发现, Fe^{2+} 离子在酸性环境中通过催化 H_2O_2 , 能够有效地对酒石酸进行氧化[8], 自此芬顿氧化技术问世。后人则将 Fe^{2+} 加 H_2O_2 统称为 Fenton 试剂。1964 年, Eisenhower 首次尝试使用 Fenton 试剂来处理苯酚和烷基苯污水, 这一实践为芬顿氧化法在污水处理领域的应用奠定了基础[9]。芬顿氧化法不仅可用于污水处理的初步处理, 还可作为最终处理方案。因此, Fenton 试剂在污水处理领域有着广泛的应用潜力, 并且在国内外受到越来越多的关注[10]。

3.2. 芬顿氧化法的机理

芬顿法自从被发明以来, 就被各种学者提出了多种反应的机理[11]。而其中目前被人们广泛认可的便是自由基假说。其认为芬顿反应便是 Fe^{2+} 与 H_2O_2 反应生产 $\cdot\text{OH}$ 的过程, 其反应过程通常包括以下链反应历程, 如公式(1~5)所示。 H_2O_2 本身的氧化性并不高, 但在加入了 Fe^{2+} 并产生了 $\cdot\text{OH}$ 之后, 整个反应体系的氧化性迅速提升, 因此便可以用于处理废水中的有机污染物[12]。

- 1) 链的起始: $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{OH}^- + \cdot\text{OH} + \text{Fe}^{3+}$;
- 2) 链的传递: $\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{HO}_2 \cdot + \text{H}^+$;
- 3) $\text{RH} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{R} + \text{H}_2\text{O}$;
- 4) $\text{R} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{ROH} + \cdot\text{OH}$;
- 5) 链的终止: $\text{Fe}^{2+} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{OH}^- + \text{Fe}^{3+}$ 。

3.3. 光芬顿法

3.3.1. 光芬顿法的原理

芬顿反应的一个不足之处便是 Fe^{2+} 再生速度较慢, 而光芬顿氧化法在解决这一问题上有着一一定成效。光芬顿法利用紫外线或太阳光与芬顿试剂结合, 可以加速 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} [13]。这是因为在水中, Fe^{3+} 主要以 $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ 的形式存在, 并具有光敏性(吸收波长高达 400 nm)。当吸收光能后, $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ 可以再生为 Fe^{2+} , 从而形成铁循环, 加速有机污染物的降解过程。此外, H_2O_2 也可以直接通过光解产生 $\cdot\text{OH}$ 自由基, 参与有机污染物的降解[14]。上述的反应机理如公式(1)~(4)所示[15]。相对于传统的芬顿体系, 光芬顿法减少了 Fe^{2+} 的消耗和铁污泥的产生, 且 Fe^{2+} 和光的协同作用可产生更多的 $\cdot\text{OH}$, 从而更好的实现有机污染物的降解。



3.3.2. 光芬顿法在处理抗生素废水方面的研究进展

抗生素废水来源广泛,包括医疗行业、畜禽养殖和制药废水等多种途径。这些废水可能含有复杂的化学成分、剧毒物质以及微生物难以降解的物质。且这些废水中的抗生素残留可能会通过饮用水、食用肉类等渠道进入人体,导致人体产生相应的抗生素耐药性。而传统的微生物降解法却很难有效处理这种难降解的有机废水[16]。而又为了响应国家可持续发展的号召,充分利用光能的光芬顿法引起了人们的广泛关注。

如 Ahmed, Y [17]等人在中性 pH 条件下,开发了 EDDS 改性的光-Fenton 法,可同时去除多种水样中的 ARB、ARGs 和 MPs。其实验结果表明,在 0.1 mM Fe(III)、0.2 mM EDDS 和 0.3 mM H₂O₂ 处理 30 min、15 min 和 10 min 后,UPW 中 ARB、e-ARG 和 MPs 的相对浓度分别降至检测限以下。

而 Sun, S. [18]等人则是研究评估了光-Fenton 陶瓷膜过滤对磺胺嘧啶(SDZ)作为一种常见抗生素化学品的去除效果。批实验验证了以针铁矿(α -FeOOH)为光芬顿催化剂的光芬顿反应在 SDZ 初始浓度为 12 mg·L⁻¹时,60 min 内降解率达到 100%。同时,获得了 80% 以上的矿化率。在连续过滤中,仅用未涂覆或涂覆催化剂的膜过滤原料液时,SDZ 的去除率可忽略不计。然而,在紫外光(UV)照射下,SDZ 的去除率显著提高,分别达到 70% (无 H₂O₂)和 99% (有 H₂O₂),证实了光芬顿反应的活性降解。当 UV₂₅₄ 强度为 100 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、H₂O₂ 浓度为 10 mmol·L⁻¹时,表观量子效率(AQY)最高,达到 25% 左右。此外,该研究团队还证明了光芬顿反应可以有效地减轻污染和防止通量下降。

Lin, X. [19]等人则是采用了光芬顿结合多级孔 Fe₂O₃ 的方法。而多级孔 Fe₂O₃ 催化 UV-Fenton 反应是一种很有前途的有机污染物氧化技术,具有避免传统均相 Fenton 反应初始酸性强、H₂O₂ 浓度要求高和铁泥等缺点的优点。在氧化四环素水溶液时,多级孔 Fe₂O₃ 催化 UV-Fenton 反应可在较宽的初始 pH 范围(3.0~9.0)内有效降解四环素,且 H₂O₂ 的使用浓度显著降低。此外,分级多孔 Fe₂O₃ 在实际应用中表现出优异的可重复使用性。并且紫外光照射和多级孔 Fe₂O₃ 极大地增强了羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和超氧阴离子自由基($\cdot\text{O}_2^-$)的产生效率以及 Fe(III)/Fe(II)对的氧化还原循环,进而活化了界面催化位点,从而实现了非凡的高光降解效率。因此,这种多级孔 Fe₂O₃ 催化 UV-Fenton 体系在有机污染物去除方面提供了潜在的优势。也充分的说明了多种方法联合使用在处理有机污染物上的重要性。

综上所述,光芬顿法通过利用可持续能源——光能,来强化传统的芬顿氧化法,进而使得其处理污水的能力大大提升,并且减少了传统芬顿法造成的二次污染现象,而且因为光芬顿法通常是结合催化剂进行使用,具有良好的循环性,所以光芬顿法是符合可持续发展战略的。

3.4. 非均相芬顿催化氧化法

非均相芬顿氧化法是在均相芬顿氧化法的基础上进行了改进,是一种可持续性较高的污水处理法。其通过将铁离子及其复合物固定在催化剂的结构中或孔隙内,有效降低了氧化铁污泥的生成量、催化剂的损失量,并且改善了 pH 值的适用范围。因此,非均相芬顿氧化法成功解决了均相芬顿氧化法存在的一些问题,如催化剂无法回收利用、高污泥产量以及铁离子导致催化剂失活引发的二次污染等问题。这种改进方法有效地提高了芬顿氧化的效率和可持续性,为处理有机污染物提供了更可靠的选择[20] [21]。该法以固相过渡金属作为催化剂,通常为金属单质、氧化物以及其他晶体固体颗粒,可对水中的污染物的进行吸附以及络合作用,且不同于均相芬顿法中将 Fe²⁺均匀分散于废水中,其氧化剂须与催化剂表面

接触才能发生进一步反应[21] [22]。其催化剂的载体类型主要包括有机、无机和铁氧化物载体。这里主要针对有机载体结合光芬顿法进行介绍。

其中离子交换膜体系是以膜过滤为基础结合光芬顿法来降解有机污染物，活性炭体系则是通过活性炭自身的良好吸附性来结合芬顿法，而半导体体系是通过半导体来改善光芬顿的光响应范围进而提高其降解污染物的效率。且活性炭体系以及部分的半导体体系相较于离子交换膜体系和其它的半导体体系具有成本较低的显著优势。

3.4.1. 离子交换膜芬顿体系

以离子交换膜作为催化剂的基质，这样可以有效地解决从处理过的废水中分离光催化剂的困难的问题。并且对污水的催化氧化效率有着明显的提高。目前大多是结合光芬顿来使用。

Wang, T. [23]等人，采用 PVDF@CuFe₂O₄ 催化膜结合光芬顿法来处理水污染问题，为通过光芬顿与膜工艺的集成成功制备高性能膜提供了一种有前途的方法，并进一步提出了新一代催化膜功能材料的设计和应用的新策略。在光芬顿清洗的辅助下，PVDF@CuFe₂O₄ 膜(CuFe₂O₄ 的 1.0%)显著提高了分离效率，MB 分离率为 99.77%，RhB 分离率为 81.02%，HA 分离率为 36.35%，BSA 分离率为 82.94%。通量和截留率分别增加至单独膜过滤的相应数据的三倍和两倍。说明了该结合法，相对于单一的使用膜过滤的效果要好的多，因此可以有效的处理污水问题。此外，该法即使经过了 15 次循环的实验，平均 MB 截留率仍然高于 70%，这进一步表明 PVDF@CuFe₂O₄ 膜具有良好的稳定性和可重复使用性。并且该法还可以消除膜表面积的各种污垢，提高了膜的寿命，有利于膜技术的实际应用。但是也存在着一定的问题，那便是成本较高，这对于该法的实施产生了一定的限制。而 Gumy, D. [24]则是采用了另一种膜——Nafion 膜，其是一种常用的载体，属于阳离子交换膜，具有有耐腐蚀、耐高温、强度较高等优点。该团队将 Nafion 膜负载 Fe²⁺结合光芬顿氧化技术来降解污水中的有机污染物，研究表明，其降解的速率得到了很大的提升。但同 PVDF 一样 Nafion 膜同样具有成本较高的问题，其推广和应用也受到了限制。

综上所述，目前离子交换膜芬顿体系虽然有着可以解决分离催化剂的问题和促进污染物降解的优势，但是其缺点也较为明显，便是交换膜的成本较高，未来如果解决了成本上的问题，其推广和应用才会更加的现实。

3.4.2. 活性炭催化剂体系

活性炭具有成本低，较强的耐酸、碱性，耐高温，表面具有大量官能团，并拥有发达的孔隙结构，巨大的比表面积和良好的吸附性能的特点[25]。并且负载在活性炭上的贵金属可通过燃烧便可回收，并且由于其活性炭的性质可通过物理或化学的方法来进行调整，因此活性炭作为载体，备受人们的关注。

Rodrigues, C [26]等人采用具有不同表面化学性质的活性炭分别用作吸附剂或催化剂，通过结合芬顿法去除对硝基苯酚(PNP, 500 mg/L)。研究表明，载体的表面化学性质在 PNP 吸附和相应铁负载催化剂的催化性能中起着重要作用。并在制备的一系列材料中，发现掺杂三聚氰胺的载体作为氮前体，并用铁浸渍的样品 Fe/ACM，呈现出最佳的催化性能。该催化剂具有良好的循环性，在连续五次重复利用过程中保持稳定，没有任何铁浸出，有效的解决了 Fe 离子难回收的问题。此外，通过对比非均相芬顿过程(采用 Fe/ACM)与均相芬顿过程，发现非均相测定中的 PNP 和 TOC 去除率高于均相测定中的去除率。该团队认为非均相过程中去除量的增加，可能是由于协同过程(载体和铁物质对自由基形成的贡献)并且主要是由于与芬顿反应同时发生的吸附现象。而 Secula, M. S. [27]等人研制了含铁(II)的多孔活性炭(AC)材料，并用作非均相光芬顿催化剂去除靛蓝胭脂红。发现在对 AC 的 PH_{pzc} 调至酸性后，Fe(II)的浸渍使得光芬顿过程能够以更高的恒定速率进行，且 pH 值较低时光降解率会增加，还具有好的循环性能。

综上所述,充分的说明了活性炭催化体系循环性能的优良,以及其在结合了光芬顿法之后,通过协同作用使得污水处理的效果大大提升,是符合绿色发展理念的优秀措施。

3.4.3. 半导体材料催化剂体系

半导体材料作为催化剂载体,通常是与光芬顿氧化技术结合使用,半导体由于其出色的光催化性能和可改善光芬顿氧化体系的紫外可见光使用范围的作用,所以半导体材料结合光芬顿氧化技术近些年被人们广泛关注。而在光芬顿反应应用中具有代表性的半导体载体,包括金属氧化物、金属硫化物、贵金属、金属卤氧化物/钨酸盐/钒酸盐/钼酸盐/磷酸盐、金属有机框架(MOF)和无金属石墨碳氮化物(g-C₃N₄)。在这些半导体中,TiO₂、g-C₃N₄、铋相关材料和 MOF 吸引了最多的研究兴趣,主要归因于它们优异的光学性能以及与铁物质的适当相互作用。其中,TiO₂和 BiOCl 是宽带隙半导体,只能响应紫外光,而 g-C₃N₄和含铁 MOF 通常是窄带隙半导体,对可见光有响应。将铁物质负载到这些不同的半导体载体上后,所得催化剂在特定光照射下的光吸收、能带结构调制和电子迁移方面发挥着独特的作用[28]。

李渊[29]构建了 Fe₂O₃/TiO₂ 光催化-芬顿氧化体系,利用光催化-芬顿氧化体系来协同降解有机污染物。研究发现,在 Fe₂O₃/TiO₂ 光催化-芬顿体系协同处理有机物污染物时,Fe₂O₃ 修饰量对复合光催化剂的降解性能有重要影响,该体系在 Fe₂O₃/TiO₂ 的修饰量为 3%时,便可在三分钟内对 20 ppm 的达到 90%的降解率,相较于单一的光催化或者芬顿反应分别提高了 3.75 和 15 倍。其通过实验分析,认为光催化-芬顿协同降解活性的极大提高主要是因为 Fe₂O₃ 的引入,一方面光生电子可将 Fe³⁺还原为 Fe²⁺,极大的促进了光生电荷的快速分离,提高光催化活性;另一方面,Fe²⁺与 H₂O₂ 发生芬顿反应生成强氧化性的·OH,促进芬顿反应中 Fe²⁺/Fe³⁺的循环。但依然没有解决 TiO₂,只能响应紫外光的问题。而杨婷婷[30]则是分别构建了 CeO₂/g-C₃N₄ 复合光催化剂和 Fe₃O₄/g-C₃N₄ 复合催化剂,且都比单独的光催化体系和非均相芬顿体系降解有机污染物的性能有了较大的提高。并且其可以响应可见光。但所合成的复合催化剂比表面积较低,对 H₂O₂ 以及目标污染物的吸附能力较差。由于单独的 TiO₂ 和 g-C₃N₄ 都有着各自的缺点和优势,便有人想通过对 g-C₃N₄ 对 TiO₂ 进行复合,来提升光催化性能。孟汝浩[31]等人便通过静电吸附法制得了 TiO₂/g-C₃N₄ 复合催化剂,且通过实验发现,TiO₂ 和 g-C₃N₄ 复合后可以显著提高单一催化剂性能,其带隙宽度明显减小,同时催化效率显著提高。在一定程度上,有效的解决了两种催化剂单独使用时出现的问题。

4. 结论

1) 水能是一种重要的可持续能源,具有环保和可再生的特点。它在中国的开发利用与国外的一些国家相比已相当完善,并且在技术研发和专利申请方面有着竞争力,但仍需要不断地改进现有的技术,进而提高其在中国的总供电量的占比,代替传统能源的消耗。

2) 光芬顿氧化法和非均相芬顿催化氧化法被广泛应用于水污染处理。光芬顿法通过结合光能和 Fenton 试剂,有效降解有机污染物。非均相芬顿催化氧化法通过固定铁离子在催化剂载体中,提高了效率和可持续性。这些技术在处理废水方面取得了显著的降解效果。离子交换膜芬顿体系、活性炭催化体系 and 半导体材料催化剂体系表现出良好的降解性能和循环性能,为解决废水污染问题提供了解决方案。

3) 总之,水能具有巨大的开发潜力,光芬顿氧化法和非均相芬顿催化氧化法是处理水污染的有效手段。我们需要不断加大水能的开发利用力度,并推动相关技术的研究和应用,以实现可持续发展和水环境的保护。

4) 本文不仅对水能源的研究进展进行了分析,还介绍了其重要性,并提出目前面临的主要问题——水污染。为了解决这一问题,本文介绍了光芬顿法及其在治污方面的应用,深入剖析了治污的意义和重要性,相较于其他单一的水能源或治污的研究,使得本文具有更深层次的论述和更完善的结论。

参考文献

- [1] 王雪, 王良, 赵爽, 高林. Fenton 催化应用于治理环境水体中有机污染物[J]. 科技创新与应用, 2020(2): 181-182.
- [2] 韩冬, 赵增海, 严秉忠, 崔正辉, 任艳. 2021 年中国常规水电发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(6): 1-5+72.
- [3] 魏景东, 郭雁珩, 艾琳, 邱辰. 我国构建新型电力系统实现路径分析[J]. 水力发电, 2023, 49(11): 11-15.
- [4] 张瑜, 胡春妍. 水能发电技术发展专利趋势[J]. 中国科技信息, 2023(18): 19-21.
- [5] Bogoviz, A.V., Lobova, S.V. and Alekseev, A.N. (2020) Current State and Future Prospects of Hydro Energy in Russia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, **10**, 482-488. <https://doi.org/10.32479/ijeep.8968>
- [6] Aroonrat, K. and Wongwiset, S. (2015) Current Status and Potential of Hydro Energy in Thailand: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **46**, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.010>
- [7] Igliński, B. (2019) Hydro Energy in Poland: The History, Current State, Potential, SWOT Analysis, Environmental Aspects. *International Journal of Energy and Water Resources*, **3**, 61-72. <https://doi.org/10.1007/s42108-019-00008-w>
- [8] 邓南圣, 吴峰. 环境光化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 274-284.
- [9] 相欣奕, 郑怀礼. Fenton 反应处理染料废水研究进展[J]. 重庆建筑大学学报, 2004(4): 126-130.
- [10] 包木太, 王娜, 陈庆国, 郭省学, 李希明. Fenton 法的氧化机理及在废水处理中的应用进展[J]. 化工进展, 2008(5): 660-665.
- [11] Fernandes, A., Pacheco, M.J., Ciriaco, L. and Lopes, A. (2015) Review on the Electrochemical Processes for the Treatment of Sanitary Landfill Leachates: Present and Future. *Applied Catalysis B: Environmental*, **176-177**, 183-200. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.03.052>
- [12] 田江南. 非均相电芬顿法处理制药废水的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所), 2017.
- [13] 冉玉芳, 徐春, 李鑫鹏, 宫瑶, 冯卫博, 胡家硕, 赵承旺. Fenton 氧化处理焦化废水的工艺优化及有机物降解机制[J]. 中国环境科学, 2023.
- [14] Avetta, P., Pensato, A., Minella, M., et al. (2015) Activation of Persulfate by Irradiated Magnetite: Implications for the Degradation of Phenol under Heterogeneous Photo-Fenton-Like Conditions. *Environmental Science & Technology*, **49**, 1043-1050. <https://doi.org/10.1021/es503741d>
- [15] 林爱秋, 程和发. 芬顿及光芬顿法降解氟喹诺酮类抗生素研究进展[J]. 环境化学, 2021, 40(5): 1305-1318.
- [16] 阮洋, 邹禾宇, 白红霞, 吴必玉, 张伟. 光芬顿法在废水处理中的应用进展[J]. 山东化工, 2021, 50(15): 61-62.
- [17] Ahmed, Y., Zhong, J., Yuan, Z. and Guo, J. (2021) Simultaneous Removal of Antibiotic Resistant Bacteria, Antibiotic Resistance Genes, and Micropollutants by a Modified Photo-Fenton Process. *Water Research*, **197**, Article ID: 117075. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117075>
- [18] Sun, S., Yao, H., Fu, W., Xue, S. and Zhang, W. (2019) Enhanced Degradation of Antibiotics by Photo-Fenton Reactive Membrane Filtration. *Journal of Hazardous Materials*, **386**, Article ID: 121955. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121955>
- [19] Lin, X., Xie, F., Yu, X., Tang, X., Guan, H., Chen, Y. and Feng, W. (2019) Ultraviolet Light Assisted Hierarchical Porous Fe₂O₃ Catalyzing Heterogeneous Fenton Degradation of Tetracycline under Neutral Condition with a Low Requirement of H₂O₂. *Chemical Research in Chinese Universities*, **35**, 304-310. <https://doi.org/10.1007/s40242-019-8238-y>
- [20] 高崇, 李亚峰, 龚飞铭. 芬顿法在水处理中的发展与现状[J]. 辽宁化工, 2021, 50(3): 372-374.
- [21] 李翠翠. 芬顿氧化技术处理难降解有机废水的研究进展[J]. 广东化工, 2019, 46(10): 97-99.
- [22] 李慧玲, 程凡, 石冬妮, 滕然, 蒋进元, 陈明, 谭伟. 非均相芬顿催化剂催化机理及性能提升策略综述[J]. 工业水处理, 2022.
- [23] Wang, T., Wang, Z., Wang, P. and Tang, Y. (2018) An Integration of Photo-Fenton and Membrane Process for Water Treatment by a PVDF@CuFe₂O₄ Catalytic Membrane. *Journal of Membrane Science*, **572**, 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.11.031>
- [24] Gumy, D., Fernández-Ibáñez, P., Malato, S., Pulgarin, C., Enea, O. and Kiwi, J. (2005) Supported Fe/C and Fe/Nafion/C Catalysts for the Photo-Fenton Degradation of Orange II under Solar Irradiation. *Catalysis Today*, **101**, 375-382. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.03.036>
- [25] 兰美晨. 基于活性炭载体催化裂解废塑料制备碳纳米管的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- [26] Rodrigues, C.S.D., Soares, O.S.G.P., Pinho, M.T., Pereira, M.F.R. and Madeira, L.M. (2017) p-Nitrophenol Degradation

- tion by Heterogeneous Fenton's Oxidation over Activated Carbon-Based Catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, **219**, 109-122. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.07.045>
- [27] Secula, M.S., Vajda, A., Cagnon, B., Warmont, F. and Mamaliga, I. (2019) Photo-Fenton-Peroxide Process Using FE (II)-Embedded Composites Based on Activated Carbon: Characterization of Catalytic Tests. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **98**, 650-658. <https://doi.org/10.1002/cjce.23662>
- [28] Wang, X., Zhang, X., Zhang, Y., Wang, Y., Sun, S.-P., Wu, W.D. and Wu, Z. (2020) Nanostructured Semiconductor Supported Iron Catalysts for Heterogeneous Photo-Fenton Oxidation: A Review. *Journal of Materials Chemistry A*, **8**, 15513-15546. <https://doi.org/10.1039/D0TA04541A>
- [29] 李渊. 半导体氧化物复合光催化剂降解有机废水及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 华北理工大学, 2019.
- [30] 杨婷婷. g-C₃N₄ 基光芬顿催化剂的制备及其降解四环素的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [31] 孟汝浩, 班新星, 左宏森, 李跃, 栗正新, 邵俊永, 孙冠男, 郝素叶, 韩少星, 张霖, 张国威, 周少杰. TiO₂/g-C₃N₄ 复合粉体的制备及其在紫外/芬顿反应中光催化性能[J]. *人工晶体学报*, 2022, 51(8): 1466-1472.