

# 浅析危险化学品污染水处置技术发展现状

秦汉强, 齐丽红, 刘星明, 杨金星\*, 左国民\*

陆军防化学院, 北京

Email: <sup>\*</sup>yangjinxing007@126.com, <sup>\*</sup>zuoguomin\_fh@yeah.net

收稿日期: 2021年3月23日; 录用日期: 2021年4月23日; 发布日期: 2021年4月30日

## 摘要

我国水资源相对匮乏, 水污染问题突出、形势严峻, 需要加强水污染处置技术研究。本文在分析污染水分类和排放标准的基础上, 主要介绍吸附过滤、絮凝沉淀、高级氧化以及生物处理等技术, 阐述各种技术的优缺点、发展现状以及应用情况。目前高级氧化技术是水污染处置的关键, 联合处理技术成为水污染治理的有效手段。

## 关键词

水污染排放标准, 高级氧化, 吸附过滤, 絮凝沉淀, 联合处理

# The Development of Hazardous Chemicals' Polluted Water Treatment Technology

Hanqiang Qin, Lihong Qi, Xingming Liu, Jinxing Yang\*, Guomin Zuo\*

Institute of NBC Defence, Beijing

Email: <sup>\*</sup>yangjinxing007@126.com, <sup>\*</sup>zuoguomin\_fh@yeah.net

Received: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2021; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Our country's water resources are relatively scarce, water pollution problems are prominent and the situation is grim, so it is necessary to strengthen the research on water pollution disposal technology. Based on the analysis of the classification and discharge standard of polluted water, this paper mainly introduces the technologies of adsorption filtration, flocculation sedimentation, advanced oxidation and biological treatment, and expounds the advantages and disadvantages, development status and application of various technologies. At present, advanced oxidation tech-

\*通讯作者。

nology is the key of water pollution disposal, and combined treatment technology has become an effective means of water pollution control.

## Keywords

Discharge Standard of Water Pollutant, Advanced Oxidation, Adsorption Filtration, Flocculent Settling, Combined Processing

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

水是人类赖以生存和发展重要资源，地球上可以直接利用的淡水资源总量很少。我国人均淡水为世界人均水平的四分之一，时空上分布不均，水资源相对匮乏。化工产业作为“污染大户”，排放的污水中污染量大、种类多，对生态环境造成极其严重的危害，必须经过处理才能排放。我国有 80% 以上的河流水体存在着不同程度的污染情况，超过 90% 的地下水资源都遭受了程度不一的污染，60% 左右的地下水受到了严重污染[1]。由于污水中的物质是多种多样的，必须采用多种污水处理技术才能达到净化的目的。

## 2. 污染水分类及排放标准

污染水依据来源可分为工业废水、生活污水、农业生产污染、实验室废水和突发性水污染等。国家对污水排放有明确的规定，必须经过处理达到标准方可向环境排放。工业废水具有成分复杂、副产物多、污染物含量高和处理难度大的特点。2020 年 6 月发布的《第二次全国污染源普查公报》显示 2017 年全国工业源水污染排放化学需氧量 90.96 万吨，氨氮 4.45 万吨、总氮 15.57 万吨、总磷 0.79 万吨。生活污水中含有大量的有机物、致病菌和虫卵等，随意排放导致大量的水生动植物死亡产生黑臭水体，严重影响人们的生活质量。农药和化肥的滥用导致严重水和土壤污染，破坏生态环境。根据国家统计局的数据，截止 2019 年我国近五年年均农用化肥施用折纯量仍近 5700 多万吨，年均农药使用量 160 多万吨。实验室废水种类多、毒害作用大和回收利用困难，形成污染的主要原因是实验室多分布分散、相对独立、监管难度大。突发性水污染事件是指由各种意外、突发事件造成的水资源污染和水质恶化的突发情况，如农药或者化学品泄露，威胁人类生产生活正常秩序，造成严重社会影响。

根据使用功能和排放水域的不同，水体的各项指标有不同的要求。《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准要求经处理污水 COD、TN、氨氮等指标在 50 mg/L、15 mg/L、5 mg/L 以内，可排入国家和省确定的重点流域及湖泊、水库。《城市污水再生利用标准》要求经处理污水 pH、BOD<sub>5</sub>、氨氮等指标在 6.0~9.0、10 mg/L、5 mg/L 以内，可作为“中水”用于厕所冲洗、汽车清洗、环境绿化等方面。污染水必须经过各种水处理技术净化处理，各项指标才能达到相关排放标准，进而排入水域或者用于“中水”回用。

## 3. 污染水处理技术

### 3.1. 吸附过滤技术

吸附过滤技术作为污水处理的最常用手段，具有性价比高，产生污染小的优点，吸附过滤的去污效

率和成本很大程度上取决于吸附过滤材料。在水处理中常用的吸附过滤材料有活性炭、活性氧化铝、膨润土、海棉铁以及(活化)沸石等。近年来,滤料改进技术不断发展,树脂、石墨烯及其衍生物、活性炭改性材料以及金属氧化物改性等滤料对水中的重金属离子、总有机碳、微生物等的去除效果均高于普通滤料。

例如,MAP-树脂联用工艺处理稀土高浓度氨氮废水,氨氮去除率 98.55% [2]。13X/SBA-15 复合分子筛对造纸废水 COD<sub>Cr</sub> 的去除率 81.4% [3]。聚醚砜膜接枝氧化石墨烯改性膜吸附铅离子在重复使用 4 次后吸附量仍能达到初次吸附量的 72.75% [4]。NaCl 改性沸石对饮用水中的铅去除率达 96%, 达到《生活饮用水卫生标准》的标准[5]。制备的 PDA-PEI 共聚高疏水海绵通过油吸附和水过滤作用分离油水乳状液,对各种油类具有良好的吸附性能,吸附量可达到自重的 67.2 至 178.6 倍[6]。通过纤维球、颗粒活性炭和沸石多级过滤,废水中 COD<sub>Cr</sub> 从 115.35 mg/L 下降到 33.57 mg/L, 达到中水回用标准[7]。

### 3.2. 絮凝沉淀技术

絮凝沉淀法是一种较为有效且成本较低的污染水预处理方法。絮凝剂是絮凝沉淀法处理污染水的核心,直接影响絮凝沉淀的效果。主要分为无机絮凝剂、有机高分子絮凝剂、微生物絮凝剂和复合絮凝剂,具体情况见表 1。

Table 1. Category, characteristics and application of flocculants

表 1. 絮凝剂的种类与特点及应用

类别	种类	特点	应用
无机絮凝剂	传统: 明矾、硫酸铁、氯化铝; 新型: 聚合氯化铝、聚合硫酸铝、聚硅酸硫酸铁、聚合磷酸铁等	易生产、价廉、使用范围广	饮用水、工业废水、水体富营养化等方面
有机高分子絮凝剂	天然: 壳聚糖、海藻酸钠、淀粉衍生物、季铵盐木质素、 合成: 聚丙烯酰胺	絮凝架桥能力较强, 絮凝效果优异	工业废水和生活污水的处理中发挥较大作用
微生物絮凝剂	微生物的代谢产物, 由多糖、蛋白质、纤维素、 等高分子物质构成。例螺旋藻产生的胞外多糖、 MBF-W6	固液分离迅速、安全、绿色、 可生物降解、产量小、成本低	给水排水、食品加工和 发酵工业方面应用广泛
复合絮凝剂	无机高分子复合: 聚硅酸硫酸氯化铝铁、聚硅酸铁锌; 有机复合: 壳聚糖衍生物、羧甲基壳聚糖接枝聚丙烯酰胺、 羧甲基瓜尔胶接枝聚丙烯酰胺; 无机-有机复合: 羧甲基纤维素-氯化铁、聚合氯化铝铁-壳聚糖	克服单一絮凝剂适用范围小的缺点	能够满足的各种废水的处理要求, 在工业废水及生活污水中应用较多

以聚乙二醇和日本杉木为原料通过催化反应制得聚乙二醇改性木质素具有较好的絮凝效果, 并且随着聚乙二醇分子量的增大, 絮凝效果越好[8]。培养志贺氏菌产生的絮凝剂对高岭土悬浊液的絮凝率达到 85% [9]。用聚硅酸铝铁/羧基壳聚糖复合絮凝剂明显提升对硫化黑染料废水的 COD、色度和浊度的去除率[10]。新型的阳离子型稀土-铝高分子杂聚絮凝剂对水基钻井液废液处理, 脱水率可达 90% 以上[11]。

### 3.3. 高级氧化技术

高级氧化技术(AOPs)在污水处理方面具有高效、快速、应用灵活等特点, 是指利用光、声、磁和电等物化过程生成活性极强、氧化性也很强的自由基和自由基中间体(HO·、O<sub>2</sub>·和 O<sub>3</sub>·等)把水中有机污染物氧化成小分子物质。根据反应条件的不同, 高级氧化技术主要分为湿式氧化法、超临界水氧化法、化学氧化法、光化学氧化法、电化学氧化法、声化学氧化法, 见表 2。

**Table 2.** Characteristics and application examples of advanced oxidation technology  
**表 2.** 高级氧化技术的过程与特点及应用实例

类别	反应过程	特点	应用实例
湿式氧化技术	高温高压下氧气把有机物氧化成为小分子物质	处理效率高、反应速度快, 对温度、压力等条件要求苛刻	Cu-Ce 为催化剂, $Al_2O_3$ 作载体, 焦化废水 COD 去除率 91.9% [12]
化学氧化技术	利用有效的氧化剂将有机物转化为小分子物质	其中过氧化氢氧化法氧化性强、无选择性、无二次污染	$\gamma-Al_2O_3$ 催化臭氧处理亚麻生产废水, COD 去除率可达 67.21% [13]
超临界水氧化技术	超临界状态下水与空气将有机物几乎全部氧化	快速、高效、彻底, 对温度、压力等条件要求苛刻、对设备性能要求高限制其应用	超临界水氧化核电厂去油污溶剂, COD 去除率可达 99.8% 以上 [14]
光化学氧化法	产生光生电子和空穴对分别和溶解氧、氢氧根离子和水反应生成氧负离子、羟基自由基将有机污染物氧化	催化剂易流失、难回收、费用高, 催化剂固定化技术和改性处理成为研究的方向	$Bi_2WO_6-TiO_2$ 和 (C,N,B)- $TiO_2$ 复合光催化提高冷轧生化水 COD 去除率 [15]
超声氧化技术	超声波辐射产生超声空化, 空化作用产生 $H_2O_2$ 和 $\cdot OH$ 等活性物质降解有机物	无污染、应用灵活、较高的成本限制工业化应用	氮化碳辅助超声氧化去除模拟油中的二苯并噻吩, 去除率 82.2% [16]

在高级氧化技术中, 化学氧化法具有成本低、效率高, 氧化能力强而应用广泛, 在化学氧化技术中,  $H_2O_2$  产生的  $\cdot OH$  能够无选择地氧化降解水中有机污染物, 同时  $H_2O_2$  的分解产物无污染, 因此被广泛应用于污染水的处理。 $H_2O_2$  单独使用时产生  $\cdot OH$  少、氧化效率不高, 必须使用催化剂提高其水处理效能。主要包括金属离子催化、金属氧化物催化、金属配位体催化和有机活化等方法。然而, 有机活化方法处理有机污染水可能引入新的 COD, 故在水污染处理中不常使用。

### 3.3.1. $H_2O_2$ /金属离子催化体系

金属离子催化体系主要包括 Fenton 试剂和类芬顿技术, 类芬顿技术克服了传统芬顿法对 pH 值要求苛刻, 活性氧利用率不高、持续作用时间短的缺点, 如光-Fenton 法和电-Fenton 法、超声-Fenton 法等技术, 见表 3。

**Table 3.** Mechanism, characteristics and application examples of Fenton  
**表 3.** Fenton 和类芬顿的机理与特点及应用实例

类别	催化机理	特点	应用实例
Fenton 法	在酸性条件下 $Fe^{2+}$ 催化 $H_2O_2$ 产生 $\cdot OH$ 氧化污染物	成本低, 对 pH 值要求苛刻, 活性氧利用率低、持续作用时间短, 含铁污泥量大	尤其是对芳香类及杂环化合物具有很好处理效果 [17]
电 Fenton 法	利用电化学法在阴极产生 $H_2O_2$ 和 $Fe^{2+}$ 作为 Fenton 试剂	多种作用协同降解, $Fe^{2+}$ 可以不断产生, 成本高、电流效率低, $H_2O_2$ 产量不高	电-Fenton 处理含有诺氟沙星的有机废水, COD 去除率超过 90% [18]
光 Fenton 法	可见光或紫外光和 $Fe^{2+}$ 协同催化 $H_2O_2$	有机物矿化程度好, 降低 $Fe^{2+}$ 的用量, 提高 $H_2O_2$ 的利用率, 但成本高、光效率低	MOF(Fe) 为催化剂的可见光芬顿处理酸性大红 3R 废水, 降解率 100% [19]
超声 Fenton 法	超声空化效应促进 $\cdot OH$ 的产生	增加 $\cdot OH$ 的产生率, 提高污染物的降解率, 但耗能大、成本高	超声芬顿处理油田压裂返排液废水、COD 去除率 77.85% [20]

重金属离子 ( $Cu^{2+}$ 、 $Ni^{2+}$ 、 $Ag^+$ 、 $Cr^{3+}$  等) 也可催化  $H_2O_2$  分解产生活性很强的  $\cdot OH$  和  $HO_2$  等氧化有机物。 $Cu^{2+}$  催化  $H_2O_2$  氧化降解高浓度含酚模拟废水, 苯酚降解率达到 97%, 且反应速率较快 [21]。

### 3.3.2. $H_2O_2$ /金属盐催化体系

金属氧化物主要包括 Fe、Mn、Cu、Ce 等的氧化物和钼酸盐。金属氧化物催化体系具有氧化效率高、

有效的 pH 窗口和催化剂的可再生优势。在 75℃ 条件下, 采用  $\text{Cu}_2\text{O}$  催化双氧水降解质量浓度为 15 mg/L 罗丹明 B 溶液, 反应 4 min 脱色率达到 100% [22]。以 W-CeO<sub>2</sub>-0.4 作为电芬顿催化剂, 对含油污水总有机碳(TOC)去除率达到了约 90%, COD 去除率达到了 76% [23]。 $\text{MoO}_4^{2-}$  催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  氧化有机物的反应机制存在较大争议, 王梦[24]在钼酸根催化过氧化氢降解邻氯苯酚的研究中认为体系中活性自由基在不同 pH 值时的组成不同:  $^1\text{O}_2$  在 pH 为 11.0 的体系中起主要作用, 而在 pH 为 12.0 的条件下  $\text{O}_2^-$  是氧化有机物的主要因素。有人认为是钼酸根催化过氧化氢降解芥子气的反应中单线态氧( $^1\text{O}_2$ )和  $\text{MoO}_n(\text{OO})_{(4-n)}^{2-}$  是主要活性物种[25]。有研究表明, 在 pH 为 3.0 时,  $\text{MoO}_4^{2-}$  对  $\text{H}_2\text{O}_2$  的催化效率相对较低, 经过 24h 对苯酚的降解效率只有 0.76% [26]; 可通过掺杂  $\text{Cu}^{2+}$  协同催化提高催化效率[24]。

### 3.3.3. $\text{H}_2\text{O}_2$ /金属配位体催化体系

金属配合物催化剂主要包括酞菁配合物、卟啉配合物、含氮大环配合物、席夫碱配合物和杂多酸(盐)。金属配合物具有催化效能好、催化剂用量少、催化条件温和的特点。席夫碱铜配合物可以在近中性的水相条件下实现三氯生的氧化降解[27]。希夫碱铜配合物在低温条件下催化漂白的织物白度可以达到较好水平[28]。在室温条件下自制的铁大环金属配合物催化过氧化氢降解苯酚, 降解率达 99.93% [29]。在 60℃ 的条件下卟啉铁催化双氧水漂白棉织物的白度可达 75.02% [30]。杂多酸(盐)通式  $[\text{X}_a\text{M}_x\text{O}_y]^{q-}$ , 例如 Keggin 型  $[\text{PMo}_{12}\text{O}_{40}]^{3-}$  和 Wells-Dawson 型  $[\text{P}_2\text{W}_{18}\text{O}_{62}]$ , Keggin 型的杂多酸能够催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  生成多氧、过氧化活性物质作为氧化反应的高活性中间体[31]。Jing Dong [32]证明了复合材料  $\text{Mg}_3\text{Al-LDH-Nb}_6$  通过催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  产生活性过氧化物氧化 2-氯乙基硫醚。目前杂多酸(盐)催化主要应用在石油化工和有机化学合成领域, 包括各类光催化、酸催化和催化氧化反应。马姗姗[33]在杂多酸催化过氧化氢氧化聚乙烯醇时加入磷钨酸, 聚乙烯醇去除率有 37.9% 的提升。在温和的条件下  $\text{Mg}_3\text{Al-LDH-Nb}_6$  催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  可选择性地降解糜烂性和神经毒剂的模拟物[32]。

二维过渡金属硫化物( $\text{MoS}_2$ 、 $\text{WS}_2$  和  $\text{TiS}_2$  等)可作为芬顿反应的助催化剂。 $\text{MoS}_2$  可促进芬顿体系中  $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{Fe}^{3+}$  的循环, 提高  $\text{Fe}^{3+}$  与  $\text{H}_2\text{O}_2$  的反应速率, 在反应中形成的  $\text{Mo}^{6+}$  和复合过氧钼离子有利于  $\text{H}_2\text{O}_2$  的分解和污染物的降解[34]。 $\text{MoS}_2$  作为 Fenton 反应的助催化剂可快速和高效地去除废水中的苯[35]。 $\text{CoS}_2$  作助催化剂降解罗丹明 B 模拟废水比普通 Fenton 体系的反应速率提高了近 3 倍[36]。

## 3.4. 生物处理技术

生物处理法具有处理量大、处理效果好、运行成本低、不产生二次污染等特点, 最常用的是好氧处理和厌氧处理技术, 在污水处理中两种技术通常结合使用, 具体见图 1。

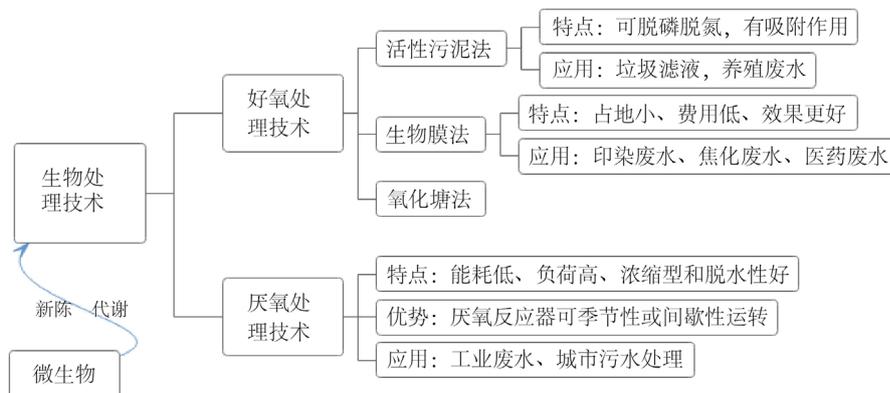


Figure 1. Category, characteristics and application of biological treatment  
图 1. 生物处理技术的类别、特点及应用

生物挂膜法与活性污泥法复合使用对醋酯废水的 COD 去除率达到 85% [37]。厌氧氨氧化技术处理污泥消化液, 总氮去除率达到 85%~95% [38]。厌氧消化技术在农村污水处理中可用于化粪池、沼气池和厌氧滤池。

污水处理技术包含了吸附过滤、絮凝沉淀、高级氧化以及生物处理技术, 但是针对污水中污染物种类多、含量高、处理难度大的特点, 单一的处理技术无法达到污水净化的目的, 多种水处理技术联合使用成为研究的热点。利用  $\text{Fe/C} + \text{H}_2\text{O}_2$  + 联合生化工艺处理制药废水, 使废水污染因子参数得到有效降低, 最终达标排放标准[39]。采用壳聚糖絮凝 - IC 反应器 - A/O 池 - 生态塘组合工艺处理红薯淀粉废水, 对 COD、氨氮、总氮的综合去除率为 98.8%, 96.4%, 93.9%, COD、氨氮、总氮指标达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准[40]。采用气浮 - 厌氧 - 好氧联合工艺处理 1,4 丁二醇、聚四氢呋喃废水, COD 的去除率 94% [41]。

#### 4. 结束语

由于污水中含有的污染物种类繁多、性质各异, 多含有难以降解的有机物, 而每种污水处理技术各有优缺点, 采用单一的污水处理技术无法达到彻底净化污水的要求。因此, 必须根据污染物的性质灵活采用几种污水处理技术, 形成一个专门的污水联合处理技术, 才能达到污水处理的目的。在联合处理技术中, 以高级氧化水处理剂为核心的高级氧化技术可以把有机污染物快速、高效地氧化成小分子无害的物质, 成为污水处理的关键。

#### 参考文献

- [1] 杨清龙, 彭思毅. 我国地下水污染原因分析以及策略思考[J]. 环境科学导刊, 2020, 39(增): 34-35.
- [2] 何彩庆, 陈云嫩, 殷若愚, 刘晨, 江洋, 邱廷省. MAP-树脂联用工艺对稀土高浓度氨氮废水的处理研究[J/OL]. 应用化工, 2021, 50(3): 1-11. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20201221.035>, 2021-01-13.
- [3] 宋成建, 许鹏翔, 王文博, 张延兵, 程相龙, 丁明洁. 13X/SBA-15 复合分子筛的制备及其处理造纸废水的研究[J]. 中国造纸, 2020, 39(7): 92-96.
- [4] 伍惠玲, 党铭铭. 聚醚砜膜接枝氧化石墨烯改性膜吸附铅离子的研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(1): 87-90.
- [5] 刘静静. 吸附法去除饮用水中铅的研究[J]. 甘肃冶金, 2019, 41(5): 109-112.
- [6] Liu, W.Q., Huang, X.F., et al. (2021) PDA-PEI Copolymerized Highly Hydrophobic Sponge for Oil-in-Water Emulsion Separation via Oil Adsorption and Water Filtration. *Surface & Coatings Technology*, **406**, Article ID: 126743. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126743>
- [7] 魏琦, 颜维敏. 基于多级过滤吸附的水回收处理工艺研究[J]. 当代化工, 2019, 48(7): 1507-1510.
- [8] Takahashi, S., et al. (2020) Flocculation Properties of Polyethylene Glycol-Modified Lignin. *Separation and Purification Technology*, **253**, Article ID: 117524. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117524>
- [9] 田瑜琳, 雒晓芳, 朱雅雯, 等. 微生物絮凝剂 ZF-1C 的絮凝效果研究[J]. 生物化工, 2020, 6(3): 90-94.
- [10] 仝海娟, 欧阳辉祥, 史兵方, 等. 聚硅酸铝铁/羧基壳聚糖复合絮凝剂处理硫化黑染料废水的研究[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(1): 73-75+102.
- [11] 王岳能, 刘庆旺, 范振忠, 等. 阳离子型稀土-铝高分子杂聚絮凝剂的合成及其在废弃钻井液处理中的应用[J]. 石油化工, 2020, 49(5): 484-489.
- [12] 谢古月, 廉畅. 催化湿式氧化铜系催化剂研究进展[J]. 山东化工, 2016, 45(15): 50-51+54.
- [13] 高明龙, 夏立全, 陈贵锋, 等. 臭氧催化氧化深度处理亚麻生产废水实验研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(6): 100-103.
- [14] 袁誉坤, 尹宇发宁, 舒睿, 等. 超临界水氧化处理核电厂去油污溶剂及反应动力学分析[J]. 核化学与放射化学, 2020(3): 192-197.
- [15] 郭道清. 负载型光催化氧化工艺的冷轧生化出水深度处理[J]. 宝钢技术, 2019(5): 73-77.
- [16] 曹水, 贾秀峰, 曹祖宾, 等. 氮化碳辅助超声氧化脱除模拟油硫化物[J]. 当代化工, 2015, 44(10): 2314-2317.

- [17] 潘继生, 邓家云, 张棋翔. 羟基自由基高级氧化技术应用进展综述[J]. 广东工业大学学报, 2019, 36(2): 71-76.
- [18] Yahya, M.S., Arbane, M.E., Oturan, N., *et al.* (2016) Mineralization of the Antibiotic Levofloxacin in Aqueous Medium by Electro-Fenton Process: Kinetics and Intermediates Products Analysis. *Environmental Technology*, **37**, 1276-1287. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1111427>
- [19] 岳琳, 张迎. MOF(Fe)材料用于光-芬顿催化降解酸性大红 3R 废水[J]. 现代化工, 2019, 39(9): 119-113.
- [20] 刘波潮, 高俊斌, 曹宝升, 等. 超声辅助芬顿氧化降解油田压裂返排液[J]. 油田化学, 2020, 37(2): 358-362.
- [21] Zhang, X.Y., Ding, Y.B., Tang, H.Q., Han, X.Y., Zhu, L.H. and Wang, N. (2014) Degradation of Bisphenol A by Hydrogen Peroxide Activated with CuFeO<sub>2</sub> Microparticles as a Heterogeneous Fenton-Like Catalyst: Efficiency, Stability and Mechanism. *Chemical Engineering Journal*, **236**, 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.051>
- [22] 康琳, 周明. Cu<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>类芬顿工艺用于染料废水的脱色研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(3): 18-22+27.
- [23] 刘义刚, 赵鹏. W 元素掺杂 CeO<sub>2</sub>非均相电芬顿催化剂高效处理含油污水[J]. 高等学校化学学报, 2020, 41(3): 498-504.
- [24] 王梦. 钼酸盐催化过氧化氢降解邻氯苯酚的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2017.
- [25] Fakhraian, H. and Valizadeh, F. (2010) Activation of Hydrogen Peroxide via Bicarbonate, Sulfate, Phosphate and Urea in the Oxidation of Methyl Phenyl Sulfide. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, **331**, 69-72. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2010.09.017>
- [26] Dong, L.L., Wang, W.M., *et al.* (2016) Catalytic Activities of Dissolved and Sch-Immobilized Mo in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Decomposition: Implications for Phenol Oxidation under Acidic Conditions. *Applied Catalysis B: Environmental*, **185**, 371-377. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.12.010>
- [27] 彭建彪, 张耀宗, 等. 一种席夫碱铜配合物催化过氧化氢氧化降解三氯生[J]. 环境化学, 2019, 38(5): 978-984.
- [28] 张帆, 张儒, 等. 金属铜配合物催化双氧水用于棉针织物的低温漂白[J]. 纺织学报, 2019, 40(8): 102-109.
- [29] 蔡辉, 孙志敏. 铁配合物/过氧化氢体系降解苯酚的影响因素[J]. 毛纺科技, 2016, 44(5): 45-48.
- [30] 黄益, 李思琪, 阮斐斐, 等. 卟啉铁/双氧水体系在棉织物低温催化漂白中的应用[J]. 纺织学报, 2018, 39(6): 75-80.
- [31] 郭芬草, 李鹏翔, 廉红蕾. 基于杂多酸的高效氧化脱硫催化剂的合成及应用[J]. 现代化工, 2018, 38(3): 62-66+68.
- [32] Dong, J., Lv, H.J., Sun, X.G., *et al.* (2018) A Versatile Self-Detoxifying Material Based on Immobilized Polyoxoniobate for Decontamination of Chemical Warfare Agent Simulants. *Chemistry (Weinheimander, Bergstrasse, Germany)*, **24**, 19208-19205. <https://doi.org/10.1002/chem.201804523>
- [33] 马姗姗. 典型杂多酸催化氧化降解聚乙烯醇模拟废水的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [34] Luo, H.W. (2020) Enhanced Decomposition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> by Molybdenum Disulfide in a Fenton-Like Process for Abatement of Organic Micropollutants. *Science of the Total Environment*, **732**, Article ID: 139335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139335>
- [35] Xing, M., Xu, W. and Dong, C. (2018) Metal Sulfides as Excellent Co-Catalysts for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Decomposition in Advanced Oxidation Processes. *Chem*, **4**, 1359-1372. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2018.03.002>
- [36] 藕贤, 应迪文, 江璇, 等. Fenton 反应助催化剂碳基黄铁矿型纳米二硫化钴的合成[J]. 化工环保, 2019, 39(5): 557-561.
- [37] 陆亚伟, 刘佳, 王圣之, 等. 好氧复合式生物反应器在醋酯废水处理中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(6): 192-195+204.
- [38] 张树军, 蒋勇, 彭永臻, 等. 高氨氮废水厌氧氨氧化耦合内源反硝化深度脱氮技术创新与应用[J]. 建设科技, 2020(10): 22-25.
- [39] 黄都都. Fe/C+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+联合生化工艺处理制药废水[J]. 工业水处理, 2020, 40(6): 102-104.
- [40] 冯可, 匡武, 王翔宇, 等. 壳聚糖絮凝-厌氧-好氧-深度处理红薯淀粉废水[J]. 安徽大学学报, 2020, 44(4): 101-108.
- [41] 王文娜, 刘芳, 杨叶青. 气浮-厌氧-好氧联合工艺处理 1,4-丁二醇、聚四氢呋喃废水[J]. 环境与发展, 2019(4): 118-119.