

# 实验废水的处理研究

王国瑞, 周继柱, 冯春晖, 马 凯, 李雁鸿, 曾凡迅

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

收稿日期: 2021年3月21日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月29日

## 摘 要

随着我国教育水平和科技创新水平的不断提高, 我国的化学化工行业呈现出突飞猛进的发展趋势, 其中高校实验室、科研实验室、化工企业实验室以及三方检测机构的不断增加, 日常实验中需要用到大量各种各样的化学试剂, 产生大量有毒有污染的废水, 因其量少而往往被人们所忽视, 未经任何处理的实验废水随意排放在环境中对人类及生态环境产生严重危害, 其中实验室所产生的废水是检测和处理的重点。实验室废水具有难处理、量少、间断、组分复杂、危害性大的特点。化学实验废水的处理具有一定的处理难度, 如果直接排入环境中会对环境以及人类的生活环境产生严重的危害。本文针对实验室所产生的废水展开研究, 并针对实验室废水的特点提出一套可行性实验室废水处理工艺, 以达到实验室废水的无污染排放。

## 关键词

环境污染, 实验室废水, 废水处理工艺

# Study on the Treatment of Experimental Wastewater

Guorui Wang, Jizhu Zhou, Chunhui Feng, Kai Ma, Yanhong Li, Fanxun Zeng

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

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2021; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2021; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Along with our country education level and the innovation of science and technology level unceasing enhancement, our country's chemical industry is showing a development trend by leaps and bounds. The laboratory of colleges and universities, scientific research laboratory, chemical

enterprises in the laboratory and the three parties detection institutions continue to increase, daily experiments need to use a large number of various types of chemical reagents, to produce large amounts of toxic pollution of waste water, because of its less but often neglected by people, without any processing of the experimental wastewater drained off in the environment have serious harm to human and ecological environment, the laboratory is the key of the detection and treatment of waste water produced. Laboratory wastewater has the characteristics of being difficult to treat, small amount, discontinuous, complex composition and great harm. The treatment of chemical experiment wastewater is difficult to deal with. If it is directly discharged into the environment, it will cause serious harm to the environment and human living environment. In this paper, the waste water produced by the laboratory is studied, and a set of feasible laboratory waste water treatment technology is proposed according to the characteristics of laboratory waste water, so as to achieve the pollution-free discharge of laboratory waste water.

## Keywords

Environmental Pollution, Laboratory Waste Water, Wastewater Treatment Technology

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. 研究背景

近年来随着我国高校教育、科研以及化工等领域的不断高速发展,相关的化学实验室也在成倍地增加,在实际中产生了大量的有毒有污染的实验废水;实验室废水不同于其它工业废水有稳定的排放周期和污染物,处理也相对容易,故各类实验室废水有其自身的特点:一次性排放量少、间断性强、成分复杂、瞬时多变等[1],对环境污染也是多方面,如各种酸、碱、重金属盐、有机物等对人体和环境都有害。因此,实验室废水的处理不仅是科研人员的职责,也是考察科研管理的一个重要方面,在实现科研创新的同时不要给社会、环境造成危害。因此,建立一套经济可行的实验室废水处理方案已成为一项迫在眉睫的环境问题。

## 2. 实验室废水的现状 & 危害

### 2.1. 实验室废水的现状

近年来,随着我国教育和科技水平的不断提升,各类高校实验室、科研实验室、化工实验室以及第三方检测机构的不断增多,产生了大量的实验室废水,但相应的实验废水处理却没有得到明显的重视[2],实验废水通常是通过稀释后排入下水道,而现有的处理技术也相对匮乏。实验室废水是指科学研究、科研教育、分析化验、成品检验等活动过程中产生的废水,其中还包括实验室清洁用水、消毒水等,甚至包括大量未使用的过期实验试剂、过期原料等。此类废水呈现出多样性,成分复杂多变,含有毒化学物质、有机化合物、重金属、细菌等,随意排放会对生态环境和人体健康带来严重的危害,其被认为污染最严重的废水之一[3]。现阶段在我国,实验室废水排放尚未出台具体的标准和相应的处理措施以及完整的处理工艺,导致很多实验室废水未经处理直接将实验室废水通过稀释排入下水道,其中含有大量的酸碱性和有毒物质,长时间排放会对地下的排水管网产生严重的腐蚀作用,减少使用年限增加了检修难度,同时增加了下游污水处理厂的负荷,严重时会对生态环境造成严重的危害并。其主要污染物如表 1 所示。

**Table 1.** Laboratory wastewater survey table**表 1.** 实验室废水调查表

废水种类	酸碱废液	有机废液	重金属	综合废水
污染物种类	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			
	HNO <sub>3</sub>			
	NaOH	苯酚、甲苯、二甲苯、乙醇、丙酮	Cr <sup>6+</sup> Cu <sup>2+</sup> Hg <sup>2+</sup> Ag <sup>+</sup>	COD SS
	Ca(OH) <sub>2</sub>			
	KOH			

## 2.2. 实验室废水的危害

实验废水的成分相当复杂，并会伴随不同实验室或同一实验室所从事的科研课题不同而不同，其中含有大量的酸、碱、有毒物质氰化物、六价铬、砷化物及有机物酚、苯、甲苯、二甲苯等，直接排放会对人们的身体健康和环境造成严重污染[4]。其中以重金属对人体的危害最大，重金属主要指的是汞、镉、铅、铬以及内金属砷等生物毒性比较显著的金属，重金属非常难以被生物降解，相反却能在食物链的生物放大作用下成千、成百倍的富集，最后进入人体。重金属在人体内能与蛋白质、酶等发生强烈的相互作用，使它们失去活性，也可能在人体的某些器官中积累，造成慢性中毒，对人体造成不可逆转的危害。

## 3. 化学实验废水的分类

实验室废水有其特定来源，废水的性质与其他类废水的各不相同，其来源包括来自高校的各种实验室、科研院所在实验研究、各种检测机构以及化工企业实验室等中产生的各种危险废液、过期的实验药剂、原料等[5]。而实验室废水必须先进行分类收集处理后在进行合理的排放。其排放标准以上海市发布的废水纳管相关规定如表 2 所示。

**Table 2.** Relevant regulations on wastewater management**表 2.** 废水纳管相关规定

序号	污染物	最高允许排放浓度 mg/L
1	总汞	0.02
2	总 Cr	1.5
3	六价 Cr	0.5
4	铜、锌	1.0
5	pH	6-9
6	SS	400
7	COD	500
8	BOD5	300
9	TN	60
10	氨氮	40
11	挥发酚	1.0
12	色度	60
13	苯	2.5

### 3.1. 按来源分类

实验室废水根据来源可分为化工类、生物类、环境类、医药类、以及材料类[6]；化工类废水主要来源于化工实验室及高校实验室、科研单位和三方检测机构等，通常化学药剂使用比较多，此外还含有大量重金属离子等。生物类主要来自生物实验室，其特点是废水中含有大量的微生物，细菌等，活性微生物类是此类废水的特征污染物。环境类主要来自监测水样废水，废水特征为水质差污染物种类复杂。医药类主要来自医科院校实验室，其主要特征是含有病毒，药剂等污染物。

### 3.2. 按污染程度分类

按污染程度可分为高浓实验废水、低浓实验废水和无污染水等[7]。其中高浓实验废水包括一般失效试剂(废铬酸洗液、废氰化钾溶液、各种药剂贮备液等)，各种高浓洗涤溶液、仪器或器皿的润洗液等；低浓实验废水包括实验器皿和实验产物的低浓洗涤废水，低浓低毒失效试液和实验室各项清洁卫生用水等；无污染水包括实验中的各种冷冻、冷却用水、水浴、恒温等加热水减压抽滤用水和其他清洁水等。

### 3.3. 按性质分类

按性质可分为无机实验废水和有机实验废水。无机废水主要含有重金属如铜、汞、铅、铬等、重金属络合物，酸碱，氰化物，硫化物，卤素离子以及其他无机离子等。有机废水含有常用的有机溶剂，有机酸，醚类，表面活性剂，有机磷化合物，酚类，石油类，油脂类物质。从废水处理的角度，按燃烧性可分为可燃性废液和不可燃性废液；按挥发性可分为低沸点废液和高沸点废液；按原子的种类可分为C、H、O化合物，有机卤化物，含N化合物，含S、P化合物，高分子化合物和其他有机物等[8]。

## 4. 实验室废水的处理技术

高校实验室废水一般为难生物降解废水，此类废水如不经过处理排放到城市下水道会造成管道的腐蚀，严重影响周围水环境破坏及污水处理厂生物中毒。通过对大量不同类型的实验室有机废液、重金属废液、酸碱废液及实验室综合废水为研究对象，并对各污染物浓度进行测定，通过查阅、学习相关废水处理技术及方法，设计实验室废水(废液)的一体化综合处理工艺。

### 4.1. 无机废水的处理技术

#### 金属离子的处理

重金属以污染危害巨大，降解周期长、处理成本高而备受关注，环境中重金属离子存在时间长，难以被生物降解，相反却能在食物链的生物放大作用下成千、成百倍的富集，最后通过食物链的作用下进入人体。属于一种持久性污染物，对土壤、水环境危以及生物害巨大[9]。

常用的传统方法有物理法、化学法和生物法，其中物理法主要包含吸附、静置、离子交换、反渗透等[11]；化学法包含沉淀法、氧化还原法、电解法等；新型的生物法主要包括活性污泥吸附法、生物絮凝法、生物表面活性剂修复、复合硫酸盐还原菌去除法、纳米材料与微生物复合材料等方法。

其中以化学法以其处理技术成熟、操作简单以及去除效率高等被大量应用，常用的为氧化还原和絮凝沉淀法相结合用在重金属废水处理中的前处理。一般而言氧化法主要用于去除水中  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 在碱性条件下形成  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  和  $\text{Mn}(\text{OH})_n$  沉淀；全丽等[10]药剂还原法主要用于去除水中的  $\text{Cr}^{6+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 和  $\text{Hg}^{2+}$ 等重金属离子，在碱性条件下形成絮体，通过沉淀的形式去除。

### 4.2. 实验室有机废水的处理技术

实验室有机废液作为一种常见危险废液，产生量较大，污染物种类复杂，生物可生化性低等特点[12]。

与生活污水不同实验有机废液中通常含有高分子有机聚合物、酚类、醇醚类等，这些有机污染物具有生物毒性，普通生物处理难以降解。其中挥发酚类为此类废液的一种特征污染物，处理难度较大。

#### 4.2.1. 活性炭吸附法

活性炭吸附法多用于去除用生物或物理、化学法不能去除的微量的有机物。实验室有机废水含有大量试验残液和废溶剂，其主要成分为烷烃类、芳香族等，且废水浓度高、量小、呈酸性，很适合用活性炭吸附处理。处理工艺流程为先经过简单分离，把废水中的有机相分离出来，再经过活性炭二级吸附，赵丽等[13][14]活性炭吸附法 COD 的去除率可达到 93%，同时活性炭还吸附部分无机重金属离子。降低废水的 COD，同时提高废水的可生化性。

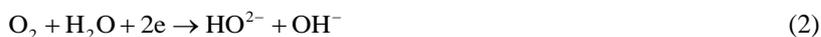
#### 4.2.2. 混凝沉淀

混凝沉淀[15]是高效、无选择性的处理技术，在水处理工艺中得到广泛应用。混凝沉淀池一般和混凝反应池合建，通常采用高效沉淀池如斜管沉淀池对产生的絮体进行泥水分离，从而达到最终去除污染物的目的。孔昊楠等[16]研究结果表明单一混凝沉淀对实验室废水 COD<sub>Cr</sub> 的去除不到 50%，所以，混凝处理实验室废水只能作为一种预处理技术，达到更好的去除效果还需进一步处理。

#### 4.2.3. Fenton/类 Fenton 法

Fenton 体系主要利用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 受 Fe<sup>2+</sup> 的催化产生强氧化性·OH，可以将有机物如苯系物，酮类，脂肪酸类氧化成无机小分子物质 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O，无机酸等[17]。随着社会生产生活方式的改变，所产生废水水质的性质也发生变化，一些难生物降解废水产生越来越多，Fenton 法由于其具有较好的无差别降解废水能力，选择性不强而得到广泛运用。

基于传统 Fenton 试剂的作用机理, Electro-Fenton [18][19]也是由 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 Fe<sup>2+</sup> 反应产生强氧化性的·OH。其中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的电化学产生是通过在阴极充氧或曝气的条件下，发生(1)氧气的还原生成的。而 Fe<sup>2+</sup> 也可以通过(2)阴极的还原反应得到。在酸性条件下，通过充氧或曝气的方法，氧气在阴极会发生还原反应产生 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。在此过程中，氧气首先溶解在溶液中，然后在溶液中迁移到阴极表面，在那还原成 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，在 Electro-Fenton 中，溶液中的 Fe<sup>3+</sup> 可通过反应(3)在阴极还原成 Fe<sup>2+</sup>。由于阴极持续的 Fe<sup>2+</sup> 再生提高了有机污染物的降解速率，这也减小了污泥；在最佳条件下，有机物可实现低花费的全部矿化的可行性。Electro-Fenton 有其自身的优势：电化学产生 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，可避免其在运输、储存和操作的危险；控制降解速率实现机理研究的可能性；



研究结果表明单一混凝沉淀对实验室废水 COD<sub>Cr</sub> 的去除不到 50%，所以，混凝处理实验室废水只能作为一种预处理技术，达到更好的去除效果还需进一步处理；活性炭是一种高效吸附剂但因其活性炭运行费用高，再生困难，通常运用于深度处理或者痕量污染物净化中，不适用于处理大量的有机废水；Electro-Fenton 法是常见的高级氧化技术，具有产泥量少，操作简单，处理效果好，一体化程度高等优点逐渐被人们所认可，其原理是在酸性条件下 Fenton 试剂产生强氧化性(·OH)与水中有机物发生反应，使有机物矿化，最终生成 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> [19]。

## 5. 实验室废水处理工艺的探索

### 5.1. 实验室废水处理的分类

废水处理方法直接决定着废水的处理效果，如方法选择不当，则会造成处理效果不达标严重时还会

造成第二次污染，同时也将会造成巨大的资源浪费。因此在废水处理方法设计前，应首先进行废水处理方案论证，从而选择决定废水处理方案，首先必须了解废水的水质情况，由于各个化学实验室从事的实验大不相同，废水的性质差异比较大，要对废水全面了解，盲目处理会发生危险，要采用科学、严谨的态度对废水进行分析、鉴定[20]。本文将对中低浓度实验室有机废液、重金属废液、酸碱废液进行处理工艺设计，实现自动化控制，有针对性的高效去除污染物：

### 5.2. 工艺流程

经过多方论证后本设计采用“实验室废液分类 + Electro-Fenton + 混凝沉淀 + 生物接触池”综合处理工艺，其设计流程图如图 1 所示。本设计提供一套水处理技术，主要针对实验室高浓度危险废液(实验室有机废液、实验室酸碱废液、实验室重金属废液)与实验室综合废水。工艺中包括废液预处理、混合废液物化处理、中水深度处理等三个重要步骤。

#### 工艺流程说明

首先实验室废水经过分类收集在相应的储罐中，有机废水先经过处理降低其 COD，重金属离子利用化学沉淀法去除；酸碱废液分类贮存作为调节反应中的 pH 值。具体工艺流程如图 1 所示：实验室废液收集在玻璃钢结构储存罐中，分别包括有机废液储罐、含 Cr 废液储罐、含 Hg<sup>+</sup>废液储罐、含 Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>废液储罐、其中有机储罐底部连接有计量泵与 Electro-Fenton 反应器连接，Electro-Fenton 反应器连接曝气装置，Electro-Fenton 反应器出水连接调节池；含 Cr<sup>6+</sup>废液储罐、含 Hg<sup>+</sup>废液储罐、含 Cu<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Zn<sup>2+</sup>等废液储罐底部出水口连接重金属废液泵与化学沉淀连接，化学沉淀出水进入调节池[21]；同时调节池还接收来自实验室冲洗、清洁等实验室综合废水，混合水池内调节水质水量，反应出水通过重力自流进入混凝沉淀池。混凝沉淀池采用中孔穿流，混凝池加入石灰乳调节 pH 后加入助凝剂 PAM 辅助沉降；沉淀池上清液出水进入生物池，去除有机等污染物质；经过生物接触氧化池处理达标后排放城市污水管网；沉淀池底部污泥与沉淀罐底部沉泥收集到污泥池，经浓缩压滤泥饼外运。

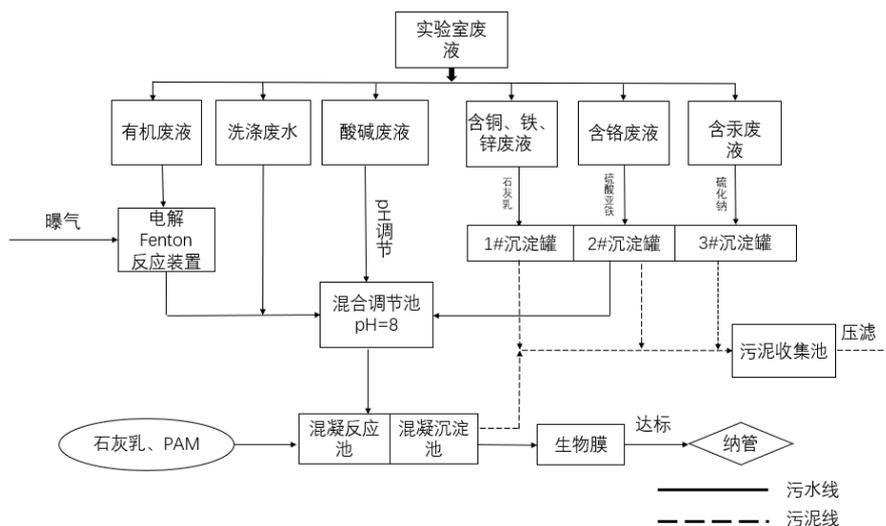


Figure 1. Flow chart  
图 1. 工艺流程图

### 5.3. 处理结果

“实验室废液分类 + Electro-Fenton + 混凝沉淀 + 生物接触池”综合处理工艺处理过后的实验室废

水其出水能达到国家允许的污染物最高排放浓度以下，具体数值如表 3 所示。此工艺可根据不同实验室所产生的废水进行合理的调整，具有很高的实用性。

**Table 3.** Design the main pollutant indicators of effluent  
**表 3.** 设计出水主要污染物指标

序号	污染物	最高允许排放浓度 mg/L
1	总汞	0.02
2	总 Cr	1.5
3	六价 Cr	0.5
4	铜、锌	1.0
5	pH	6-9
6	SS	400
7	COD	500
8	苯	2.5

## 6. 科学控制和存在的问题

### 6.1. 科学控制

在实际的科研实验环节中，对于实验方法的选择应该是对环境没有污染或者是污染较低的试剂[22]。使用的洗涤剂应该是可以降解的，使得废水之中含有的污染物减少。在样品和试剂的管理中，应该避免囤积大量的试剂，对于试剂的存有量有科学的控制。在条件允许的情况下，对于废水的处理应该尽可能回收利用，这不仅解决了废水的污染问题，也使得成本降低了。废水经过处理后，应该运输到污水处理厂进一步处置，保障其排放完全达到保护环境的标准。

### 6.2. 存在的问题及防范措施

#### 6.2.1. 存在的问题

- 1) 长期以来我国的科研人员环保意识薄弱。将关注重心放在了实验进程和结果上，忽视了实验过程中产生的废水给环境带来的危害，实验室所产生的废水没有得到足够的重视；
- 2) 现阶段我国实验室废水缺乏管理部门的监管和实验室废水排放标准。在科研进程紧张且没有具体制度的情况下，科研人员并不希望把大量的时间和精力投入废水处理的研究中；
- 3) 缺乏相关实验室完善管理体系。因实验室废水量少分散，对实验过程中产生的副产物及废液未做明确收集处理的要求。这些问题都导致目前尚没有严格的实验室废水管理体系。

#### 6.2.2. 防范措施

- 1) 需要加强科研人员和科研院所领导的环保意识。在注重科研创新成果给社会带来便利的同时，也要考虑其造成的环境影响；
- 2) 完善实验室废水排放标准和监管制度。建成完整的实验室废水处理工艺使其能达标排放；
- 3) 完善实验室管理体系。对产生的废液分类收集后按要求处理达标后才能排放。

## 7. 结语

“实验室废液分类 + Electro-Fenton + 混凝沉淀 + 生物接触池”综合一体化处理工艺具备对实验废

液与综合废水具有较好的去除效果,是一种处理实验室废液的高效方法,在电流的作用下可以强化 Fenton 氧化效率,可以实现中低浓度有机废液的原位处理,快速降级废液中有有机污染物,与其他高级化学氧化技术相比,其在成本和效果上具有优势。随着环境问题越来越受到重视,水污染控制近年来越来越严格,因此实验废水的研究及处理已经迫在眉睫。因实验室废水分散、量少、污染程度高等特殊性,适合采用一体化设备对其进行处理,采用工艺简单、能耗少、占地面积小、自动化程度高的实验室废水处理设备必然成为日后研究的主要方向[22]。如何低成本的有效处理实验室废水废液产生的污染问题是各实验室要重视的问题,本课题采用的“Electro-Fenton + 混凝体系”高级化学氧化技术和实验室废水(废液)一体化处理工艺可为实验室废水、废液的最终处置提供参考[23]。

## 参考文献

- [1] 彭实. 学校化学实验室的废液问题[J]. 教学仪器与实验, 2004, 20(11): 38-39.
- [2] 曲凤臣. 我国化工行业废水排放特征分析及防治对策[J]. 化学工业, 2015, 33(9): 45-48.
- [3] 张长水, 张立敏, 王洁新. 化学实验室常见废液处理的探讨[J]. 洛阳农业高等专科学校学报, 2001, 21(3): 197-198.
- [4] 张奕, 贺纓, 程文涛. 高校实验室废水处理及污染防治措施评价初探[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(8): 54-56.
- [5] 梅光泉. 重金属废水的危害及治理[J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21(4): 54-56.
- [6] 沈晓君, 华德尊, 李春燕. 高校实验室废水处理及污染防治措施研究[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(10): 107-109.
- [7] 杨志毅, 彭丽, 李跃华, 等. 高校实验室废水的调查及处理方法[J]. 大理学院学报, 2010, 9(10): 32-34.
- [8] 刘德春, 杨定明, 钟国清. 高校化学实验室废水的处理技术研究进展[J]. 科技资讯, 2012(17): 102.
- [9] 黄继国, 张永祥. 重金属废水处理技术综述[J]. 世界地质, 1999, 18(4): 83-86.
- [10] 王焕英. 实验室废水中重金属离子的无害化处理[J]. 西部皮革, 2016, 38(2): 19.
- [11] 全丽. 研究化学法处理实验室含铜和含铬污水[J]. 中国化工贸易, 2013, 5(2): 146.
- [12] 张伟军, 高雅, 马士龙, 等. 不同来源高浓度有机废水的集中处理[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1213-1218.
- [13] 赵丽, 王成端, 赵诚. 实验室废水的絮凝-活性炭吸附处理[J]. 科技导报, 2007, 25(8): 34-39.
- [14] 孔昊楠, 陆国红, 秦承华, 等. 混凝法处理实验室废水的研究[J]. 环境卫生工程, 2007, 15(6): 25-27.
- [15] 许永, 邵立南, 杨晓松. Fenton 法处理实验室有机废水的试验研究[J]. 矿冶, 2010, 19(2): 88-90.
- [16] 刘晓茜. Fenton 与电解氧化技术处理实验室高浓度有机废水的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [17] 陈胜兵, 何少华, 娄金生, 等. Fenton 试剂的氧化作用机理及其应用[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(3): 105-107.
- [18] 赵军, 王学华, 王浩, 李蕾. 电芬顿/混凝/水解/接触氧化处理荧光渗透液废水[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14): 108-110.
- [19] Oturan, M.A., Guivarch, E., Oturan, N. and Sirés, I. (2008) Oxidation Pathways of Malachite Green by Fe<sup>3+</sup> Catalyzed Electro-Fenton Process. *Applied Catalysis B: Environmental*, **82**, 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.01.016>
- [20] 李铁龙, 金晖, 宣晓梅, 等. 实验室废水处理初探[J]. 环境卫生工程, 2004, 12(2): 73-76.
- [21] 梁广秋. 某校化工类实验室废水处理工艺设计[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [22] 邱国华, 胡龙兴. 污水处理一体化装置的研究现状与展望[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005(5): 15.
- [23] 张静, 侯红勋, 等. 小型一体化污水处理设备工艺研究[J]. 工业用水与废水, 2014(1): 60-64.