

# 芬顿氧化法处理氧化性泡沫去污废液中的有机物

罗 丹, 郭丽潇, 郝全爱, 黄淑龙, 石 亮

中国辐射防护研究院, 山西 太原 030000

**摘要:** 氧化性泡沫去污废液因含有大量有机物而无法被直接处理。针对该问题, 将芬顿氧化法用于降解泡沫去污废液中的有机物, 为泡沫去污废液的预处理提供了一种新思路。采用芬顿氧化法以及两步联合降解工艺对氧化性泡沫去污废液进行了预处理, 探索了过氧化氢用量、亚铁离子用量、反应时间、反应温度、紫外光照等工艺参数对氧化性泡沫去污废液化学需氧量去污率的影响规律, 以及每步降解实验的适宜操作条件。结果表明: 在初次降解的最佳工艺条件下, 芬顿氧化法可将废液的化学需氧量从  $(37\ 000 \pm 1\ 850)$  mg/L 降至  $(2\ 064 \pm 95)$  mg/L ( $n=3$ ), 化学需氧量去除率高达  $(94.40 \pm 0.54)\%$  ( $n=3$ ), 但化学需氧量为  $(2\ 064 \pm 95)$  mg/L 的残液仍不符合既有废液处理方法的条件; 在二次降解的最佳工艺条件下, 芬顿联合紫外法可继续将残液的化学需氧量从  $(2\ 064 \pm 95)$  mg/L 降至  $(478 \pm 12)$  mg/L, 满足了既有废液处理方法的条件。结果说明, 芬顿氧化法以及两步联合降解工艺适宜作为氧化性泡沫去污废液的预处理方法。

**关键词:** 芬顿氧化法; 氧化性泡沫去污废液; 降解

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2024)02-0170-07

**doi:** 10.7538/hhx.2024.YX.2023095

## Treatment of Organic Compounds in Oxidative Foam Decontamination Waste Liquid by Fenton Oxidation Method

LUO Dan, GUO Li-xiao, HAO Quan-ai, HUANG Shu-long, SHI Liang

China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030000, China

**Abstract:** Oxidative foam decontamination waste liquid could not be treated directly due to high levels of organic compounds. In order to solve this problem, Fenton oxidation method was applied for the first time to degrade organic compounds in foam decontamination waste liquid, which provided a new idea for the pretreatment. Fenton oxidation method and two-step combined degradation process were adopted. The effects of various process parameters on COD removal rate of foam decontamination waste liquid and the suitable operating conditions of each degradation process were explored in this study. The results show that under the suitable operating conditions of initial degradation, Fenton oxidation method can reduce the COD of waste liquid from  $(37\ 000 \pm 1\ 850)$  mg/L to  $(2\ 064 \pm 95)$  mg/L ( $n=3$ ), with a COD removal rate of up to  $(94.40 \pm 0.54)\%$  ( $n=3$ ). However, the residual liquid with COD of  $(2\ 064 \pm 95)$  mg/L still do not meet the conditions of existing methods of waste liquid treatment. Under the suitable operating conditions of second degradation, Fenton-UV combined method can continue to reduce the COD of residual liquid from  $(2\ 064 \pm 95)$  mg/L

to (478±12) mg/L, which meets the conditions of existing methods of waste liquid treatment. In conclusion, Fenton oxidation method and two-step combined degradation process are suitable for the pretreatment of oxidative foam decontamination waste liquid.

**Key words:** Fenton oxidation method; oxidative foam decontamination waste liquid; degradation

泡沫去污技术是以泡沫为载体,载带化学去污剂到污染表面,使污染表面的放射性核素与去污剂保持较长时间的接触,从而实现去污目的的一种技术<sup>[1-3]</sup>。该技术在大批量放射性废液槽罐的去污工程中有广泛应用,由此而产生泡沫去污废液。泡沫去污废液中通常含有表面活性剂、增稠剂、螯合剂等多种有机物,总有机物含量较高,化学需氧量高于10 000 mg/L。废液中有机物的存在致使操作人员无法采用既有的废液处理方法(沉降、蒸发、离子交换)对其进行直接处理,需要对其进行降解预处理,才能进行后续的处理<sup>[4]</sup>。

目前,国内外关于预处理泡沫去污废液中有机物的研究相对较少。2022年,Hee-Chul等<sup>[5]</sup>采用活性炭吸附的方式对泡沫去污废液中的非离子表面活性剂等有机物进行了预处理。但是,该法会产生新的废物,即吸附了有机物和放射性离子的活性炭,引发了新的废物处理问题。2012—2014年,武明亮等<sup>[6-8]</sup>采用臭氧氧化法对碱性泡沫去污废液中的有机质进行了预处理。但是,臭氧氧化法对试验装置要求较高,需要配备有臭氧发生器、尾气吸收及排放单元等,这无疑降低了该方法在工程实践中的可用性。为了简化泡沫去污废液的预处理程序,可以考虑采用芬顿氧化法降解。

芬顿氧化法是利用过氧化氢和亚铁离子作用产生的羟基自由基来氧化降解有机物。羟基自由基具有较强的氧化能力,可以无选择地氧化大多数有机物。国内外大多数研究<sup>[9-11]</sup>已将芬顿氧化法用于处理低浓度有机废液,针对1~1 000 mg/L的有机废液,该方法表现出良好的处理效果。然而,采用芬顿氧化法处理高浓度有机废液的研究却鲜为少见。本工作的研究对象是超高浓度氧化性泡沫去污废液,因而需要开发针对它的降解工艺。

本工作拟针对芬顿氧化法降解氧化性泡沫去污废液的工艺条件,以废液的化学需氧量去除率以及残液中化学需氧量为指标,进行单因素考察实验,考察过氧化氢用量、亚铁离子用量、反应时

间、反应温度、紫外光照等因素的影响,从而选出最佳工艺条件,为工程实践应用提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

七水合硫酸亚铁,分析纯,天津市北辰方正试剂厂; $\omega=30\%$ 过氧化氢,分析纯,山西同杰化学试剂有限公司。硝酸(纯度为65%)、阴离子表面活性剂(纯度为70%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;硝酸铈铵,纯度为99%,上海麦克林生化科技股份有限公司;黄原胶,美国药典级(USP),上海易恩化学技术有限公司。

BA-GHX-DC型光化学反应装置,定制,配备有反应暗箱、紫外灯、加热搅拌反应器等配件,长沙巴跃仪器有限公司;反应暗箱为长方体,长50 cm、宽50 cm、高90 cm;紫外灯的照射波长峰值、功率和强度分别为254 nm、28 W和80  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。FA3204C型电子天平,精度为0.000 1 g,上海衡际科学仪器有限公司;5B-3B型化学需氧量速测仪,兰州连华环保科技有限公司;集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;LC-MP-31型pH计,上海力辰仪器科技有限公司。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 氧化性泡沫去污废液的配制** 鉴于去污前后氧化性泡沫去污液中有有机物的含量变化不大,本工作以氧化性泡沫去污原液来模拟氧化性泡沫去污废液,用作待降解对象。氧化性泡沫去污原液的配制过程如下:先用一定量的水将黄原胶溶解;再在另一烧杯中加入一定量的水、硝酸铈铵和硝酸,搅拌至完全溶解;最后向溶有黄原胶的烧杯中加入一定量的阴离子表面活性剂和硝酸铈铵等水溶液,搅拌至混合均匀;配制结束后静置3 h即可用于芬顿氧化法降解实验。经测定本氧化性泡沫去污废液的初始化学需氧量约为(37 000±1 850) mg/L, pH≈3。

**1.2.2 芬顿法降解实验** 为使降解后的残液能够按既有的废液处理方法进行处理,需尽可能地降低其化学需氧量。参考中核四川环保工程有限

责任公司废液接收标准,将残液中化学需氧量 $\leq 500$  mg/L 界定为可符合既有废液处理方法的标准。为实现该处理标准,采用芬顿两步法对其进行降解。(1) 量取 10 mL 泡沫去污原液于烧瓶中,并将该烧瓶置于恒温油浴锅内,开启搅拌,调节搅拌速率为 600 r/min。然后向烧瓶中加入 5 mL 一定浓度的七水合硫酸亚铁溶液,待充分混合后,再向其中加入 10 mL 一定浓度的过氧化氢溶液,开始反应一段时间。待反应结束后,取样测量残液的化学需氧量。(2) 在加热搅拌的同时向第一步降解得到的残液中继续添加一定量的七水合硫酸亚铁溶液和过氧化氢溶液。然后将整个反应溶液置于光化学反应装置中,开启紫外灯照射和加热搅拌,开始反应。反应一定时间后,对第二步降解的残液进行化学需氧量测定。以上每组实验均进行三次,实验数据为三次实验所得的平均值。

**1.2.3 化学需氧量测定** 分别以化学需氧量和化学需氧量去除率来表征废液中有机物的含量和降解程度。废液中化学需氧量的测定步骤如下:先将反应后得到的废液按比例稀释至一定的浓度范围后,采用化学需氧量速测仪,结合国标 HJ 828-2017 方法<sup>[12]</sup>进行测定。废液化学需氧量去除率的计算如式(1)。

$$Y = \frac{\text{COD}_i - \text{COD}_f}{\text{COD}_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $Y$  为化学需氧量去除率,%; $\text{COD}_i$  为降解前样品溶液的化学需氧量,mg/L; $\text{COD}_f$  为降解后样品溶液的化学需氧量,mg/L。

## 2 结果与讨论

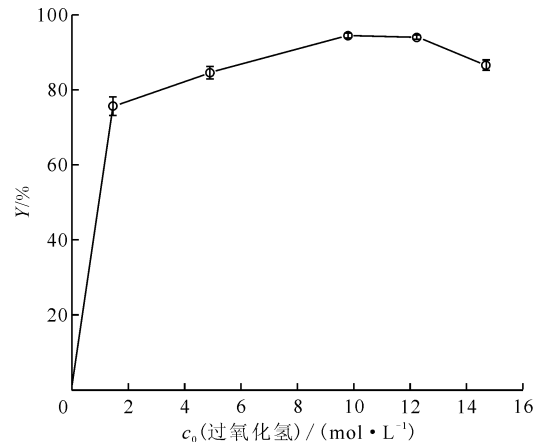
为实现氧化性泡沫去污废液的化学需氧量从  $(37\ 000 \pm 1\ 850)$  mg/L 降低至 $\leq 500$  mg/L, 本工作采用了芬顿两步法联合降解工艺,并通过单因素控制变量法确定了每步降解实验的适宜操作条件。

### 2.1 初次降解实验结果

鉴于氧化性泡沫去污废液的  $\text{pH} \approx 3$ , 处于芬顿试剂氧化性能最佳的  $\text{pH}$  范围内<sup>[13-14]</sup>, 本工作没有考察  $\text{pH}$  对降解实验的影响,主要考察了过氧化氢用量、亚铁离子用量、反应时间、反应温度、紫外光照等其他因素对降解实验的影响。

**2.1.1 过氧化氢用量的影响** 控制七水合硫酸亚铁的投加浓度( $c_0$ )为 0.675 mol/L, 反应时间

( $t$ )为 30 min, 反应温度( $\theta$ )为 90 °C, 无紫外光照射,过氧化氢的投加浓度( $c_0$ (过氧化氢))分别为 0、1.47、4.90、9.79、12.24、14.69 mol/L。探究过氧化氢不同投加浓度对氧化性泡沫去污废液化学需氧量去除率的影响,结果示于图 1。由图 1 可知:当过氧化氢投加浓度为 1.47 mol/L 时,氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率已高达  $(75.60 \pm 2.12)\%$  ( $n=3$ , 下同),说明废液中的大部分有机物(黄原胶和阴离子表面活性剂)已被降解。废液化学需氧量去除率在低过氧化氢浓度下的大幅增长可能归因于两点:一是羟基自由基的利用率高,其由过氧化氢分解产生后主要参与降解有机物的主反应,而非一些副反应;二是废液中有有机物初始呈大分子形态,易于被羟基自由基氧化降解<sup>[15-17]</sup>。进一步增大过氧化氢投加浓度,可使氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率小幅增长。这可能是因为随着降解过程的进行,废液中的有机物逐步呈中、小分子形态,其降解难度会高于大分子有机物,需要更大量的羟基自由基参与氧化降解主反应,进而导致需要更大浓度的过氧化氢分解产生羟基自由基。当过氧化氢投加浓度增大至 9.79 mol/L 时,氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率达到最大值,即  $(94.40 \pm 0.54)\%$ 。再增大过氧化氢投加浓度,氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率反而呈略微减小趋势。这可能是因为过量的过氧化氢会与反应体系中的羟基自由基反应(式(2))<sup>[18]</sup>,致使羟基自由基的量减少,进而导致化学需氧量去除率减小。基于上述结果得



$c_0 = 0.675$  mol/L,  $t = 30$  min,  $\theta = 90$  °C, 无紫外光照射

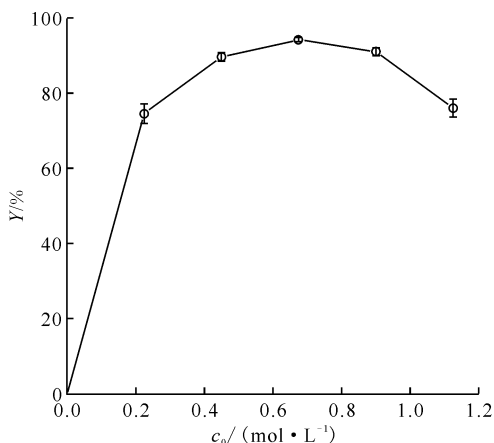
图 1 废液化学需氧量去除率随过氧化氢用量的变化

Fig. 1 Change of COD removal rate of waste liquid with  $\text{H}_2\text{O}_2$  dosage

知,在初次降解实验中,将过氧化氢投加浓度确定为 9.79 mol/L 较为合适。



**2.1.2 七水合硫酸亚铁用量的影响** 控制过氧化氢的投加浓度为 9.79 mol/L,反应时间为 30 min,反应温度为 90 °C,无紫外光照射,七水合硫酸亚铁的投加浓度( $c_0$ )分别为 0、0.225、0.450、0.675、0.900、1.125 mol/L。探究七水合硫酸亚铁不同投加浓度对氧化性泡沫去污废液化学需氧量去除率的影响,结果示于图 2。由图 2 可知:当七水合硫酸亚铁投加浓度从 0 增大至 0.225 mol/L 时,氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率呈大幅增长趋势。这可能归因于:尽管在少量亚铁离子催化下过氧化氢分解产生的羟基自由基较少,但羟基自由基的氧化能力极强且利用率较高,足以将废液中大部分大分子有机物氧化降解成中、小分子。当七水合硫酸亚铁投加浓度从 0.225 mol/L 增大至 0.675 mol/L 时,氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率呈小幅增长趋势。其中原因可能与 2.1.1 节中类似,废液降解难度的逐步增加使得需要更多羟基自由基参与氧化降解反应,进而导致需要更大量的亚铁离子催化过氧化氢分解产生更多羟基自由基。当七水合硫酸亚铁投加浓度为 0.675 mol/L 时,氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率达到最大值,即(94.40±0.54)%。继续增大七水合

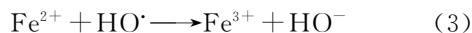


$c_0$ (过氧化氢)=9.79 mol/L,  $t=30$  min,  
 $\theta=90$  °C,无紫外光照射

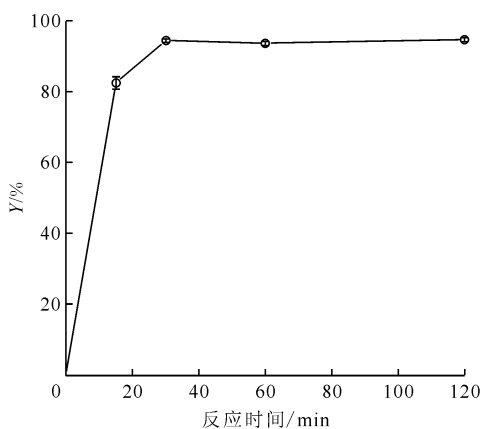
图 2 废液化学需氧量去除率随七水合硫酸亚铁用量的变化

Fig.2 Change of COD removal rate of waste liquid with  $\text{FeSO}_4$  dosage

硫酸亚铁投加浓度会使废液的化学需氧量去除率显著下降。这可能是因为过量的亚铁离子会与反应体系中的羟基自由基反应(式(3))<sup>[18]</sup>,进而导致羟基自由基被消耗,化学需氧量去除率减小。基于上述结果得知,初次降解实验确定七水合硫酸亚铁的最佳投加浓度为 0.675 mol/L。



**2.1.3 反应时间的影响** 控制过氧化氢的投加浓度为 9.79 mol/L,七水合硫酸亚铁的投加浓度为 0.675 mol/L,反应温度为 90 °C,无紫外光照射,反应时间( $t$ )分别为 0、15、30、60、120 min,探究不同反应时间对氧化性泡沫去污废液化学需氧量去除率的影响,结果示于图 3。由图 3 可知,氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率会随反应时间的延长呈现出先急剧增大、后趋于平缓的趋势。这说明芬顿氧化法降解反应的速率很快,在反应进行 30 min 后,化学需氧量去除率已达到最大值(94.40±0.54)%,进一步延长时间对化学需氧量去除率没有明显提升。由上述结果得知,初次降解实验选择反应时间为 30 min。

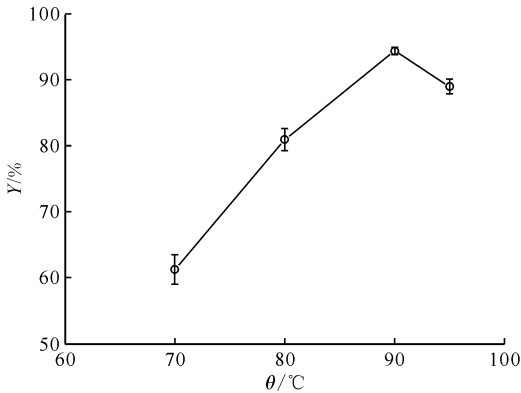


$c_0$ (过氧化氢)=9.79 mol/L,  $c_0=0.675$  mol/L,  
 $\theta=90$  °C,无紫外光照射

图 3 废液化学需氧量去除率随反应时间的变化  
Fig.3 Change of COD removal rate of waste liquid with reaction time

**2.1.4 反应温度的影响** 控制过氧化氢的投加浓度为 9.79 mol/L,七水合硫酸亚铁的投加浓度为 0.675 mol/L,无紫外光照射,反应时间为 30 min,反应温度分别为 70、80、90、95 °C,探究不同反应温度对氧化性泡沫去污废液化学需氧量去除率的影响,结果示于图 4。由图 4 可知:当反应温度低于 90 °C 时,氧化性泡沫去污废液的化学需

氧量去除率会随反应温度的升高而增大。这是因为反应温度的适当提高有利于降低反应活化能,加快反应速率,使得羟基自由基的生成速率以及其与有机物的氧化降解速率均加快,进而导致化学需氧量去除率增加。当反应温度为 90 °C 时,氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率达到最大值,即(94.40±0.54)%;当反应温度高于 90 °C 时,氧化性泡沫去污废液的化学需氧量去除率会随反应温度的升高而减小,这归因于过氧化氢在高温下的自分解反应,致使羟基自由基的生成量减少。由上述结果得知,初次降解实验选择反应温度为 90 °C。



$c_0$ (过氧化氢)=9.79 mol/L,  $c_0$ =0.675 mol/L,  
无紫外光照射,  $t=30$  min

图4 废液化学需氧量去除率随反应温度的变化

Fig. 4 Change of COD removal rate of waste liquid with reaction temperature

**2.1.5 紫外光照的影响** 控制过氧化氢的投加浓度为 9.79 mol/L,七水合硫酸亚铁的投加浓度为 0.675 mol/L,反应时间为 30 min,反应温度为 90 °C,在有、无紫外光照射两种条件下进行实验,探究紫外光照对氧化性泡沫去污废液化学需氧量去除率的影响,结果列入表 1。由表 1 可知:在初次降解实验过程中,有无紫外光照对氧化性泡沫去污废液化学需氧量去除率的影响不大,并没有表现出对芬顿降解反应的促进作用,这可能是因为初次降解实验中氧化性泡沫去污废液的初始化学需氧量较高,使用无紫外光照射的操作条件就足以将废液中的大分子有机物氧化降解。由上述结果得知,初次降解实验选择在没有紫外光照射的条件下进行。

通过单因素控制变量法掌握了过氧化氢用量、七水合硫酸亚铁用量、反应时间、反应温度、紫

外光照等各因素对芬顿氧化法初次降解氧化性泡沫去污废液的影响规律,并获得了首次降解实验的适宜操作条件,即:过氧化氢和七水合硫酸亚铁的投加浓度分别为 9.79、0.675 mol/L,反应时间为 30 min,反应温度为 90 °C,无紫外光照射。在该操作条件下,芬顿氧化法对氧化性泡沫去污废液表现出良好的降解效果,残液中化学需氧量从(37 000±1 850) mg/L 降至(2 064±95) mg/L,化学需氧量去除率高达(94.40±0.54)%。但初次降解后残液中化学需氧量仍有(2 064±95) mg/L,仍不符合既有废液处理方法的条件。为此,对初次降解后的残液进行了二次降解实验。

表 1 紫外光照射对废液化学需氧量去除率的影响

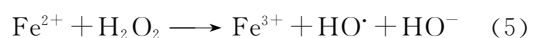
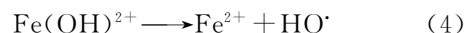
Table 1 Effect of UV on COD removal rate of waste liquid

方法	Y/%	COD/(mg·L <sup>-1</sup> )
Fenton	94.40±0.54	2 064±95
Fenton-UV	93.61±0.49	2 360±85

注: $c_0$ (过氧化氢)=9.79 mol/L,  $c_0$ =0.675 mol/L,  $t=30$  min,  
 $\theta=90$  °C;  $n=3$

## 2.2 二次降解实验结果

为寻找二次降解实验的合理操作条件,采用控制变量法进行了探索,结果列入表 2。表 2 中 1、2 组样品的实验是改变紫外光照射条件探究其对二次降解实验的影响,结果表明,紫外光照射对二次降解反应表现出明显的促进作用,可将化学需氧量去除率从(48.12±2.26)%提升到(57.96±2.84)%。这与 2.1.5 节中紫外光照射对初次降解反应的影响规律不同,可能归因于二次降解实验中待处理残液的初始化学需氧量偏低,残液中残留了顽固的小分子有机物,其进一步降解为无机物的难度极高。紫外光的促进作用是源于它可以和亚铁离子对过氧化氢的催化分解产生协同效应,即紫外光和亚铁离子同时存在下的过氧化氢分解速率远大于紫外光或亚铁离子单独存在下的过氧化氢分解速率之和。而协同效应产生的机理见式(4)、(5):



其主要是三价铁的羟基络离子吸收紫外光后可以生成羟基自由基和亚铁离子,亚铁离子可以继续与过氧化氢反应产生更多的羟基自由基,从而促

表2 二次降解实验结果  
Table 2 Experimental results of secondary degradation

序号	方法	$c_0$ (过氧化氢)/ (mol·L <sup>-1</sup> )	$t$ /min	$\theta$ /°C	$c_0$ /(mol·L <sup>-1</sup> )	$Y$ /%	降解后的化学需氧量/ (mg·L <sup>-1</sup> )
1	Fenton	9.79	30	90	0.675	48.12±2.26	1 070±46
2	Fenton-UV	9.79	30	90	0.675	57.96±2.84	866±26
3	Fenton-UV	9.79	120	90	0.675	58.30±1.79	860±31
4	Fenton-UV	9.79	30	90	0.450	46.03±2.49	1 113±49
5	Fenton-UV	9.79	30	90	0.900	49.27±3.77	1 045±40
6	Fenton-UV	9.79	30	90	1.125	48.59±3.65	1 059±36
7	Fenton-UV	19.58	30	90	0.675	59.27±1.69	840±32
8	Fenton-UV	19.58	30	90	1.350	76.80±1.47	478±12

注: $n=3$

进有机物的氧化<sup>[13, 19]</sup>。基于上述结果得知,二次降解实验需要配置紫外光照射。2、3组样品实验是改变反应时间探究其对二次降解实验的影响,结果表明,将反应时间从30 min延长到120 min对提升二次降解实验中的化学需氧量去除率没有促进作用,这与2.1.3节中反应时间对初次降解反应的影响规律完全一致。因此,二次降解实验选择反应时间为30 min即可。2、4、5、6组样品的实验是改变七水合硫酸亚铁的投加浓度探究其对二次降解实验的影响,结果表明,在过氧化氢浓度为9.79 mol/L时,0.675 mol/L是七水合硫酸亚铁的最佳投加浓度,单独调整七水合硫酸亚铁用量无法实现二次降解实验中化学需氧量去除率的提升。2、7组样品的实验是改变过氧化氢的投加浓度探究其对二次降解实验的影响,结果表明,在七水合硫酸亚铁浓度为0.675 mol/L时,单独增加过氧化氢用量对二次降解实验中的化学需氧量去除率也没有明显提升。2、8组样品的实验是同时改变过氧化氢和七水合硫酸亚铁的投加浓度探究其对二次降解实验的影响,结果表明,将过氧化氢用量和七水合硫酸亚铁用量同时翻倍,可实现化学需氧量去除率从(57.96±2.84)%到(76.80±1.47)%的大幅提升,以及二次降解后残液中化学需氧量低于500 mg/L、满足了既有废液处理方法条件的目的。基于上述结果得知,二次降解实验选择过氧化氢和七水合硫酸亚铁的适宜投加浓度分别为19.58、1.350 mol/L。

通过设计对比实验获得了二次降解反应的适宜操作条件,即:过氧化氢和七水合硫酸亚铁的投加浓度分别为19.58、1.350 mol/L,反应时间为

30 min,反应温度为90 °C,紫外光照射。在该操作条件下,芬顿联合紫外光照射法可将初次降解后残液中的化学需氧量从(2 064±95) mg/L降至(478±12) mg/L,符合了既有废液处理方法的条件。

基于上述结果,对比了本工作芬顿氧化法和文献[7]中臭氧氧化法对氧化性泡沫去污废液中有机物的降解效果,可以发现:文献中臭氧氧化法对氧化性泡沫去污废液中的有机物有较强的氧化能力,可使废液的化学需氧量去除率高达80%,但在废液的化学需氧量去除率达到80%后,继续增加臭氧的通入量对化学需氧量去除率的提高没有明显作用;本工作芬顿氧化法在初次降解的最佳工艺条件下,可使废液的化学需氧量去除率高达(94.40±0.54)%,在二次降解的最佳工艺条件下,可进一步将废液的化学需氧量去除率提升至约98.7%。显然,芬顿氧化法对氧化性泡沫去污废液中有机物的降解效果好于臭氧氧化法。芬顿氧化法有望为氧化性泡沫去污废液的预处理提供一种新思路。

### 3 结论

采用芬顿氧化法以及两步联合降解工艺对氧化性泡沫去污废液中的有机物进行了预处理,结果表明:芬顿试剂对氧化性泡沫去污废液中的有机物有较好的降解效果,经两步联合降解后,氧化性泡沫去污残液中化学需氧量可从(37 000±1 850) mg/L降至(478±12) mg/L( $n=3$ ),满足了既有废液处理方法的条件。因此,芬顿氧化法以及两步联合降解工艺适宜作为氧化性泡沫去污废液固化处理的预处理方法。

## 参考文献:

- [1] Zhang H, Xi H, Li Z, et al. The stability and decontamination of surface radioactive contamination of biomass-based antifreeze foam[J]. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects*, 2021, 624: 126774.
- [2] Gossard A, Lilin A, Faure S. Gels, coatings and foams for radioactive surface decontamination: state of the art and challenges for the nuclear industry[J]. *Prog Nucl Energy*, 2022, 149: 104255.
- [3] Yoon I H, Jung C H, Yoon S B, et al. Effect of silica nanoparticles on the stability of decontamination foam and their application for oxide dissolution of corroded specimens[J]. *Ann Nucl Energy*, 2014, 73: 168-174.
- [4] 韩宝华. 放射性去污废液中的有机物及其处理技术[J]. *辐射防护通讯*, 2007, 27(1): 36-41.
- [5] Hee-Chul E, Bok L S, Choi M, et al. Treating waste liquid from foam decontamination process, comprises e. g. mixing sulfate ions, nonionic surfactants, radionuclides and water to convert sulfate ion into barium sulfate, and converting precipitate into precipitate in form of precipitate; Korea, KR 2389011-B1[P]. 2022-04-22.
- [6] 武明亮, 张文俊, 张涛革, 等. 臭氧对含表面活性剂碱性废水泡沫稳定性的影响[J]. *日用化学工业*, 2013, 43(4): 276-279.
- [7] 武明亮, 周连泉, 王旭东, 等. 臭氧氧化法处理泡沫去污废液中有机质的初步研究[J]. *辐射防护*, 2012, 32(1): 34-39.
- [8] 武明亮, 张涛革, 张文俊, 等. 曝气法臭氧氧化处理高含量烷基多苷废水的研究[J]. *日用化学工业*, 2014, 44(2): 83-86.
- [9] 刘学军, 龙兴贵, 金武剑, 等. 响应曲面法优化 Fenton 法氧化降解废闪烁液的条件[J]. *核化学与放射化学*, 2018, 40(4): 226-233.
- [10] 马露, 张鹏, 肖棱, 等. 超声波/紫外光-纳米  $\text{Fe}^0$  类芬顿法处理络合态重金属废水[J]. *电镀与精饰*, 2023, 45(4): 57-63.
- [11] 单宁, 汤梅洁. 芬顿法深度处理印染废水[J]. *浙江化工*, 2015, 46(2): 47-49.
- [12] 中华人民共和国环境保护部. HJ 828-2017 水质化学需氧量的测定重铬酸盐法[S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
- [13] 刘勇弟, 徐寿昌. 紫外光-Fenton 试剂的作用机理及在废水处理中的应用[J]. *环境化学*, 1994, 13(4): 302-306.
- [14] 刘夏杰, 刘峰, 詹杰, 等. Fenton-UV 照射法对超高浓度聚乙烯醇有机废液的降解效能[J]. *核化学与放射化学*, 2021, 43(6): 517-522.
- [15] 孙涛, 熊小英, 魏颖隽, 等. 黄原胶降解及其抗氧化性能研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2012, 24: 102-104.
- [16] 钱方. 黄原胶生物降解及其寡糖生理活性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [17] 陈芳艳, 施琦, 唐玉斌. 微波强化 Fenton 氧化法降解水中阴离子表面活性剂的研究[J]. *水处理技术*, 2011, 37(6): 23-26.
- [18] 孟想. 基于芬顿及 PMS 高级氧化法降解废离子交换树脂[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [19] 张乃东, 郑威, 黄君礼. UV-Vis/ $\text{H}_2\text{O}_2$ /草酸铁络合物法在水处理中的应用[J]. *感光科学与光化学*, 2003, 21(1): 72-78.