



# 草甘膦废盐水中有机物臭氧氧化过程的强化分析

陈威涛<sup>a</sup>, 高锦炜<sup>a</sup>, 刘梅红<sup>b</sup>, 俞三传<sup>a</sup>

(浙江理工大学, a.理学院; b.建筑工程学院, 杭州 310018)

**摘要:**为实现草甘膦废盐水的资源化利用,采用臭氧氧化工艺去除草甘膦废盐水中的有机物,研究臭氧投加量、反应时间、初始 pH 对有机物去除率的影响;采用氧化镁(MgO)催化剂对臭氧氧化过程进行强化,研究催化剂投加量对氧化效率的影响;在分析氧化过程自由基特性的基础上,采用自由基猝灭抑制工艺进一步强化氧化过程。结果表明:臭氧氧化对草甘膦废盐水中有机物的去除率随臭氧投加量的增大和反应时间的延长而提高,随初始 pH 的提高先提高后下降,在臭氧投加量为 2000 mg/h、初始 pH 11.0 条件下,总有机碳(Total organic carbon, TOC)去除率在反应 4 h 达到最高值 76.9%;MgO 催化可提高臭氧氧化效率,在臭氧投加量保持不变、初始 pH 10.0、催化剂投加量 1.0 g/L 条件下,反应 3 h 后 TOC 去除率可达到 79.1%;通过去除体系中的碳酸根离子,可进一步提高 MgO 催化臭氧氧化效率,TOC 去除率可提高至 85.7%。研究结果可为臭氧氧化草甘膦废盐水中有机物的工艺选择和优化提供一定的指导。

**关键词:**草甘膦废盐水;氧化镁;催化臭氧氧化;TOC 去除率;自由基猝灭抑制

**中图分类号:** TQ457.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2022) 09-0722-07

## Intensification of ozonation process of organics in glyphosate waste brine

CHEN Weitao<sup>a</sup>, GAO Jinwei<sup>a</sup>, LIU Meihong<sup>b</sup>, YU Sanchuan<sup>a</sup>

(a.School of Science; b.School of Civil Engineering and Architecture,  
Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** This work focused on the removal of organic matters in the glyphosate waste brine through ozonation process for resource utilization of glyphosate waste brine. The effects of ozone dosage, reaction time and initial pH on the removal of organics were studied. The catalyst magnesium oxide (MgO) was firstly used to intensify the ozonation process and the effect of catalyst dosage on oxidation efficiency was explored. Based on an analysis of free radical characteristics, the oxidation process was further intensified through the free radical quenching and inhibition process. The results showed that the removal rate of ozonation for organics in glyphosate waste brine increased with the increase of ozone dosage and reaction time. With the increase of initial pH, the efficiency of ozonation first increased and then decreased. With an ozone dosage of 2 000 mg/h and an initial pH of 11.0, the removal rate of total organic carbon (TOC) reached a maximum 76.9% after 4 h of reaction. The catalyst MgO can enhance the efficiency of ozonation. When the ozone dosage remained unchanged, the initial pH was 10.0 and the catalyst dosage was 1.0 g/L, the removal rate of TOC can reach 79.1% after 3 h of reaction. Moreover, the catalyzation and ozonation efficiency was further intensified by removing carbanions in the reaction system and the removal rate of

收稿日期: 2022-03-11 网络出版日期: 2022-06-02

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C03172)

作者简介: 陈威涛(1996—),男,浙江丽水人,硕士研究生,主要从事废水处理与资源化技术方面的研究。

通信作者: 俞三传,研究员;E-mail: yuschn@163.com

TOC could grow to 85.7%. The research results will provide some guidance for the process selection and optimization of ozonation of organic matters in glyphosate waste brine.

**Key words:** glyphosate waste brine; magnesium oxide; catalyzation and ozonation; removal rate of TOC; free radical quenching and inhibition

0 引 言

我国是草甘膦生产大国,每生产 1 吨草甘膦约产生 5~6 t 的废盐水<sup>[1]</sup>。草甘膦废盐水成分复杂,有机物含量高,高盐难以生化。目前草甘膦废盐水的处理方法主要有物理法和化学法<sup>[2-4]</sup>。物理法主要利用分离膜对废水中各组分进行选择分离,去除草甘膦废盐水中的大分子有机物,但无法去除小分子有机物<sup>[5-6]</sup>。化学法主要采用臭氧氧化、芬顿类氧化、电化学氧化和光催化氧化等高级氧化法(Advanced oxidation processes, AOPs)去除草甘膦废盐水中的有机物<sup>[7-8]</sup>。其中臭氧氧化技术具有氧化能力强、无二次污染、工艺简便、易操作管理等特点,是目前研究和应用相对较多的工艺。然而,臭氧氧化存在氧化效率偏低、选择性不高等缺陷。

催化剂催化是目前强化臭氧氧化过程的有效技术手段之一,主要分为均相催化和非均相催化两大类<sup>[9]</sup>。非均相催化臭氧氧化具有催化效率高、操作简便、催化剂易回收等特点<sup>[10]</sup>,更受研究者们的关注。Liu 等<sup>[11]</sup>采用氧化铝基双金属(Mn-Ce)催化剂催化臭氧氧化高盐有机废水,对环比沙星的矿化率可从 35% 提升至 76%。催化剂,如 MnO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeOOH、TiO<sub>2</sub> 等金属氧化物,需要在中性或者酸性环境下才能发挥催化作用,限制了其在废水处理中的应用<sup>[12]</sup>。氧化镁(MgO)是一种典型的固体碱金属氧化物,不仅在碱性环境中具有催化作用,还能显著提高溶液的 pH 值,可缓解氧化过程中溶液酸化带来的影响,是目前研究和应用较多的非均相催化剂<sup>[13]</sup>。Moussavi 等<sup>[14]</sup>采用天然的菱镁矿制备而成的纳米级粉末 MgO 来催化臭氧氧化高盐苯酚废水,反应 80 min 后,苯酚的去除率高达 96%。催化臭氧氧化技术虽然可提高臭氧分解产生羟基自由基的效率,但羟基自由基仍然存在寿命短、容易猝灭以及相互无效碰撞等造成氧化效率偏低的缺点。在实际应用中,为提高臭氧氧化的高效性和经济性,需对臭氧氧化过程进行强化,这就需要探明臭氧氧化工艺的反应机理。

本文首先采用臭氧氧化工艺去除草甘膦废盐水中有机物,研究臭氧投加量、反应时间和初始 pH 对

有机物去除效率的影响,然后采用非均相催化剂 MgO 对臭氧氧化过程进行强化,研究催化剂投加量对有机物去除率的影响,最后对反应机理的分析,并采用自由基猝灭抑制工艺对臭氧催化氧化过程进一步强化,以提升有机物的去除率。该研究可为臭氧氧化草甘膦废盐水中有机物的工艺参数优化和过程强化提供一定的指导。

1 实验部分

1.1 实验材料

氧化镁(MgO),立方晶型纳米级粉末,比表面积 5.6149 m<sup>2</sup>/g,平均孔体积 0.0194 cm<sup>3</sup>/g,平均孔径 5.4139 nm,分析纯,购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;去离子水为二级反渗透膜(RO)产水;碘化钾(KI)、叔丁醇(TBA)、氢氧化钠和盐酸,分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司;草甘膦废盐水取自江苏南通某农药公司,具体水质参数见表 1。

表 1 草甘膦废盐水水质的参数

参数	参数值
总有机碳/(mg·L <sup>-1</sup> )	520±50
氯离子/(mg·L <sup>-1</sup> )	73000±1500
总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )	30±3
pH	10.1±0.2
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.18±0.05

1.2 实验方法

臭氧氧化实验采用间歇序批式工艺,在半连续鼓泡式反应器中进行,装置示意图如图 1 所示,其中的反应器直径长 6 cm、高 40 cm。臭氧和氧气的混合气体从反应器底部进入,与液体接触反应,同时作为推动力,使催化剂粉末悬浮在水体内,尾气从反应器上端排出,经碘化钾溶液吸收后排放至室外。实验开始前,将 500 mL 草甘膦废盐水和一定量催化剂注入反应器内,先通过调节气体流量计控制进气量不变(0.5 L/min),再调节臭氧发生器频率改变混合气体中臭氧浓度,调节完毕后,开始实验。实验期间控制反应温度在(20.0±1.0)℃,每隔一段时间取样检测废水 TOC 和 pH 值等参数,混合气体中的臭氧浓度使用在线气相臭氧浓度检测仪进行实时监测(山东智普测控技术有限公司的 UVOZ-1200 型)。

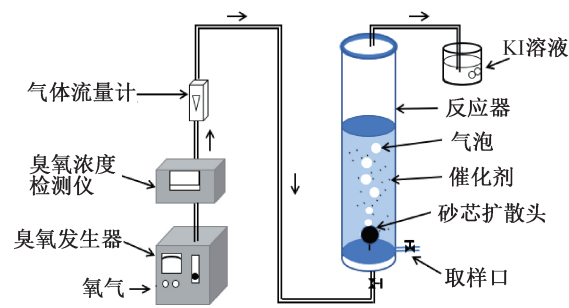


图1 臭氧氧化实验装置示意图

1.3 测试和表征

采用程序升温脱附二氧化碳(CO<sub>2</sub>-TPD),在气体吸附分析仪(AutoChem1 II 2920)上测量催化剂表面碱性位的数量和种类<sup>[15]</sup>。采用加盐法测定催化剂的表面零电荷点(pH<sub>PZC</sub>)<sup>[16-17]</sup>。采用酸碱指示剂滴定法检测溶液中碳酸根和碳酸氢根的总含量<sup>[18]</sup>。采用总有机碳分析仪(GE InnovOx)测量废水的TOC含量。TOC去除率(R,%)的计算公式可用式(1)表示:

$$R/\% = \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) \times 100 \tag{1}$$

其中:C<sub>0</sub>为反应前原水中TOC的含量,mg·L<sup>-1</sup>; C<sub>t</sub>为反应一定时间后水中TOC的含量,mg·L<sup>-1</sup>。

2 结果与讨论

2.1 草甘膦废盐水中有机物的臭氧氧化

臭氧投加量直接影响体系的氧化效率。图2给出了不同臭氧投加量下臭氧氧化草甘膦废盐水中有机物的TOC去除率随反应时间的变化。由图2可知,TOC去除率随着臭氧投加量的增大和反应时间的延长而提高。当臭氧投加量为1000、1500、2000 mg/h和2500 mg/h时,反应4 h后TOC去除率分别为53.9%、64.2%、71.9%和72.2%。当臭氧投加量较小时(小于2000 mg/h),液相中反应消耗的臭氧得不到迅速补充,气液传质是反应的控制因素,TOC去除率随臭氧投加量增大而提高<sup>[19]</sup>,而当臭氧投加量到达一定量后,液相中反应消耗的臭氧能得到迅速补充,气液传质成为了反应的制约因素,过量的臭氧气体无法进入液相参与反应,再增加臭氧投加量对TOC去除率的提升作用减弱。综合考虑经济性和TOC去除率,设定臭氧投加量为2000 mg/h。

影响臭氧氧化效率的另一重要因素是废水初始pH值,其主要影响臭氧在水中的分解情况。前期实验中发现,当pH<3.0时,臭氧几乎不分解;当

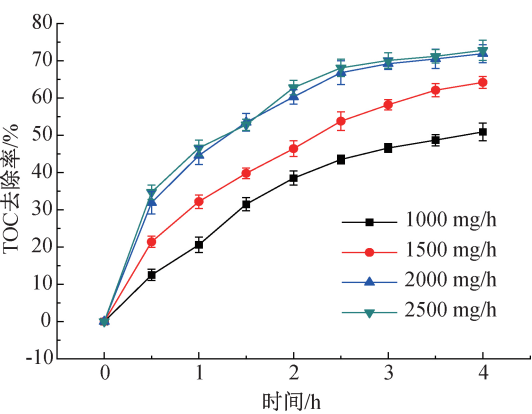


图2 不同臭氧投加量下TOC去除率随时间的变化曲线

pH在7.0~10.0时,臭氧半衰期为15~25 min;而当pH>10.0时,臭氧在水中快速分解。由此说明,碱性环境更利于臭氧氧化<sup>[20]</sup>。图3给出了臭氧投加量为2000 mg/h时,不同初始pH值下,TOC去除率随反应时间的变化。由图3可知,在相同反应时间4 h下,当废水初始pH值从9.0提升到11.0时,TOC去除率随着pH值的增大而提高,从60.2%提高到76.9%;然而,进一步提升pH值到12.0时,TOC去除率反而下降到67.4%。造成以上现象的主要原因是,在低pH值下臭氧分子难以分解成羟基自由基,且臭氧分子与有机物的直接反应会生成醛和羧酸,这两种物质都不会与臭氧分子继续发生反应,从而造成TOC去除率偏低<sup>[10]</sup>。过高pH值下臭氧氧化效率下降的原因则可能与溶液中过量自由基和溶液中阴离子的影响有关<sup>[21-22]</sup>。

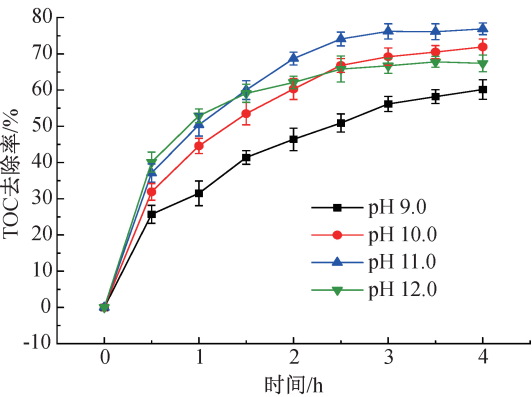


图3 不同废水初始pH值下TOC去除率随时间的变化

2.2 异相催化剂强化臭氧氧化过程分析

本文采用MgO催化剂对臭氧氧化过程进行强化。图4和图5分别给出了所用催化剂的pH<sub>PZC</sub>检测图和CO<sub>2</sub>-TPD信号图。由图4可知,MgO表面零电荷点接近12.0。由图5可知,MgO在低温(0~200℃)、中温(200~400℃)、高温(>400℃)区均出现了脱附峰,这表明MgO具有强碱性且具

有羟基基团<sup>[23]</sup>。表面羟基基团或者质子化的表面羟基基团能与臭氧反应生成羟基自由基,同时表面强碱性能显著提高溶液的 pH 值,促进氢氧根离子与臭氧反应产生羟基自由基<sup>[15]</sup>。因而,MgO 催化剂可以在低 pH 值下更好地发挥催化作用,实现臭氧和羟基自由基的受控分解<sup>[24]</sup>。此外,吸附有机物的实验结果表明 MgO 对废盐水中有机物几乎不存在吸附效果,可能是高浓度的氯离子和磷酸根离子与有机物竞争吸附点位<sup>[25-26]</sup>,说明 MgO 主要是通过提高自由基产率来实现催化作用。

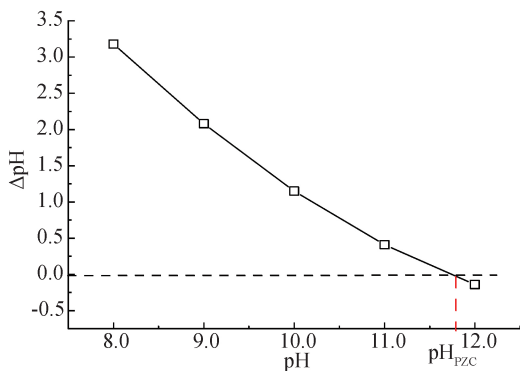


图 4 MgO 催化剂的  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  检测图

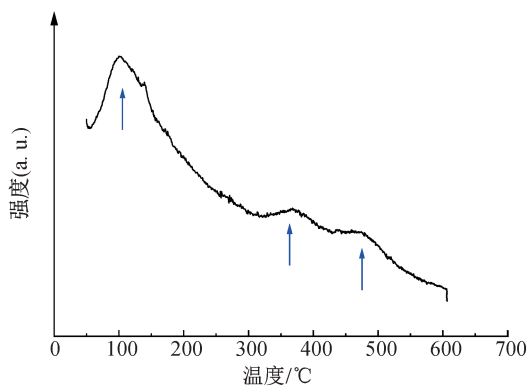


图 5 MgO 催化剂的  $\text{CO}_2$ -TPD 信号图

图 6 给出了臭氧投加量为 2000 mg/h、初始 pH 值为 10.0 时,不同催化剂投加量下 TOC 去除率随反应时间的变化。由图 6 可知,在反应时间 4 h 下,当 MgO 的投加量从 0 增加到 0.6 g/L 和 1.0 g/L 时,TOC 去除率从 71.9% 提升至 76.7% 和 78.9%;继续增加催化剂投加量至 1.4 g/L 时,TOC 去除率从 78.9% 下降至 77.1%。这主要是由于在高催化剂浓度下,产生的高浓度自由基之间容易发生无效结合,使 TOC 去除率下降<sup>[21]</sup>。因此,MgO 催化剂的投加量确定为 1.0 g/L,此时反应 3 h 即可达到 TOC 去除率的平衡。

图 7 给出了臭氧和 MgO 投加量分别为 2000 mg/h 和 1.0 g/L 时,不同初始 pH 值下,TOC

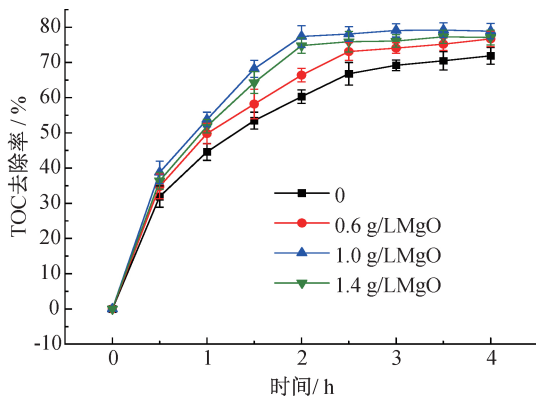


图 6 不同催化剂投加量下草甘膦废盐水的 TOC 去除率

去除率随反应时间的变化。由图 7 可知,对不同初始 pH 值的废水,MgO 催化剂均能提高臭氧氧化效率。对于初始 pH 为 9.0、10.0 和 11.0 的废水,催化臭氧氧化 3 h 后,TOC 去除率分别为 77.2%、79.1% 和 74.3%,而单独臭氧氧化 3 h 后,TOC 去除率仅为 56.2%、69.2% 和 76.2%。可见,初始 pH 值越低,催化氧化效果越明显。对于低初始 pH 值废水,MgO 的加入可一定程度提升废水 pH 值(图 8),促进臭氧分解,提高氧化效率<sup>[10]</sup>;对于高初始 pH 值废水,臭氧分子在强碱环境中来不及扩散到催化剂表面就有可能被溶液中高浓度的氢氧根离子分解,使催化剂催化作用变弱<sup>[15]</sup>。此外,由图 7 可知,在反应时间 3 h,初始 pH 值为 11.0 时,催化臭氧氧化下的 TOC 去除率反而低于单独臭氧氧化。这主要是因为,臭氧氧化有机物是一个不断酸化的过程,单独臭氧氧化的 pH 值从 11.0 降低至 8.0 左右(图 8),导致水中臭氧分解变弱,此时单独臭氧氧化是以分子直接反应和自由基间接反应结合的方式进行,而催化臭氧氧化一直以自由基间接反应为主。随着有机物不断被氧化,溶液中溶解的碳酸根离子含量不断增加,羟基自由基的猝灭率不断变高。间接反应受限而直接反应不受限,使得反应后期间接反应效率低于直接反应效率<sup>[27]</sup>。从实验结果看,在初始废水 pH 为 10.0 时,催化剂对臭氧氧化强化效果最佳,TOC 去除率达到 79.1%,但对废水中有机物的去除效果仍不够理想。

### 2.3 自由基猝灭抑制工艺强化催化臭氧氧化分析

鉴于 TBA 与自由基的反应速率远大于与臭氧的反应速率<sup>[28]</sup>,本文首先以 TBA 为羟基自由基猝灭剂,对催化臭氧氧化的自由基特性进行验证。图 9 给出了添加 TBA 对催化臭氧氧化效率的影响。由图 9 可知,在催化臭氧氧化体系中加入 TBA (60 mg/L) 后,TOC 去除率为 31.3%,低于催化臭



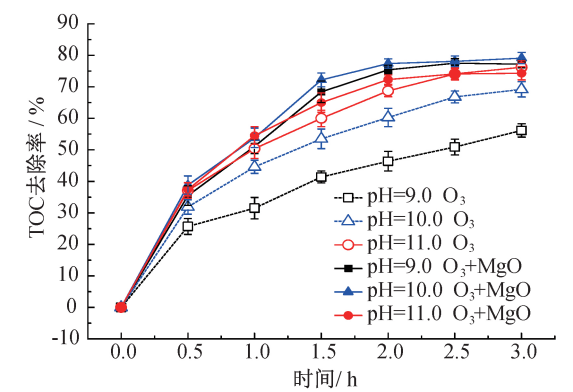


图7 不同氧化反应体系下 TOC 去除率随时间的变化

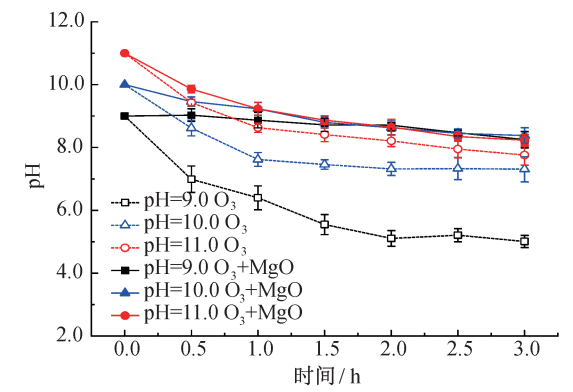


图8 不同氧化反应体系下 pH 值随时间的变化

氧化下的 TOC 去除率(77.4%),下降了 59.6%左右。这表明该体系遵循自由基机理,且羟基自由基在有机物氧化降解过程中起主要作用。

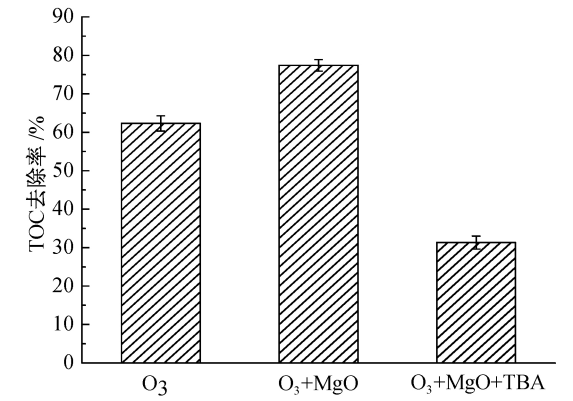


图9 不同氧化反应条件下草甘膦废盐水的 TOC 去除率

由于有机物矿化会不断产生碳酸根离子,其会与羟基自由基抢先反应,生成氧化能力更弱的新自由基<sup>[22]</sup>,故本文推测 MgO 催化臭氧氧化效率低的原因是溶液中碳酸根含量过高<sup>[27]</sup>。采用阶段性去除碳酸根离子的实验方法来抑制其对羟基自由基的猝灭作用。在催化臭氧氧化反应 2 h 后,停止投加臭氧,记录此时的 pH 值( $\text{pH}_{2\text{h}}$ )。将反应液过滤后,调节 pH 值至 4.0 以下,剧烈搅拌 40 min,去除碳酸根离子,再将 pH 值重新调回  $\text{pH}_{2\text{h}}$ ,重新加入

滤出的 MgO 催化剂继续反应 1 h。在总反应时间 3 h 和臭氧及催化剂投加量不变的前提下,对比常规催化臭氧氧化(常规工艺)和基于自由基猝灭抑制的催化臭氧氧化(强化工艺)体系下,碳酸根含量变化和 TOC 去除率。图 10 给出了不同臭氧氧化工艺体系下碳酸根含量随时间的变化。由图 10 可知,随着反应时间的延长,常规工艺体系中碳酸根离子浓度不断增加,而强化工艺经 pH 调节处理后,最后 1 h 体系内的碳酸根离子浓度明显低于常规工艺。图 11 给出了不同臭氧氧化工艺体系下的 TOC 去除率,由图 11 可知,反应 3 h 后,常规工艺的 TOC 去除率为 79.1%,强化工艺在减少了阴离子含量后 TOC 去除率提升至 85.7%。

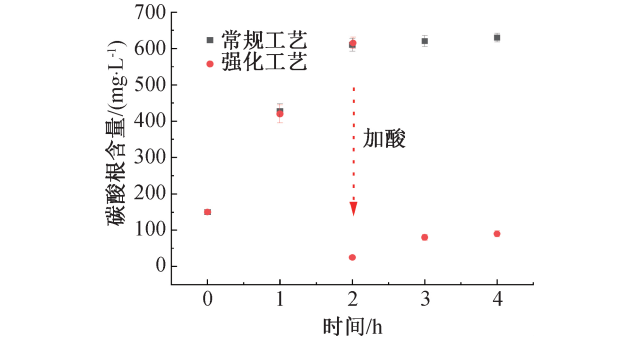


图10 不同臭氧氧化工艺体系的碳酸根含量随时间的变化情况

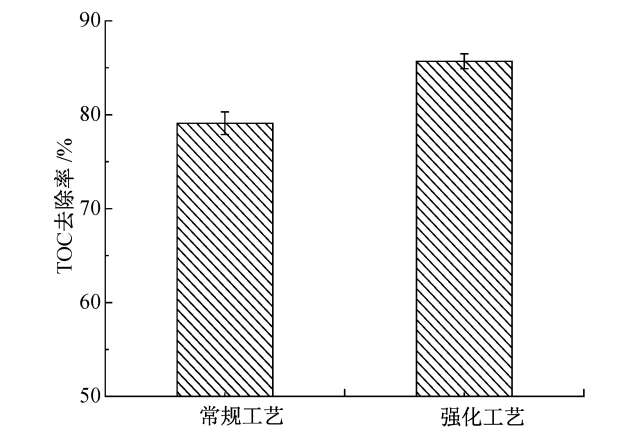


图11 不同臭氧氧化工艺体系下的 TOC 去除率

### 3 结 论

本文采用臭氧氧化工艺去除草甘膦废盐水中的有机物,通过研究臭氧投加量、反应时间和溶液初始 pH 等因素对 TOC 去除率的影响,优化了臭氧氧化工艺条件,并采用非均相催化剂 MgO 对氧化过程进行强化以优化催化剂的投加量,最后分析催化臭氧氧化的反应机理,采取阶段性去除碳酸根离子的方法来进一步提升有机物去除率。所得主要结论

如下:

a)臭氧氧化工艺体系下 TOC 去除率随臭氧投加量和反应时间延长而增加,低和过高 pH 均会抑制臭氧的氧化效率。在臭氧投加量为 2000 mg/h、反应时间 4 h、初始 pH 11.0 时,TOC 去除率达到 76.9%。

b)MgO 可促进臭氧分解,随着催化剂投加量增加,TOC 去除率呈现出先提升后下降的趋势,其主要因为高催化剂浓度下自由基容易发生互相猝灭而影响氧化效率。在臭氧投加量为 2000 mg/h、反应时间 3 h、初始 pH 10.0、催化剂投加量为 1.0 g/L 时,TOC 去除率达到 79.1%,而相同条件下单独臭氧氧化的 TOC 去除率仅为 69.2%。

c)MgO 催化臭氧氧化有机物的体系遵循自由基反应机理。在保持臭氧和催化剂投加量、反应时间、初始 pH 不变的前提下,通过去除氧化反应过程中产生的碳酸根离子,可进一步提升 TOC 去除率至 85.7%,从而成功实现对臭氧氧化过程的强化。

## 参考文献:

[1] 陈俊,金杰,吴克,等. 氧化镁催化臭氧氧化偶氮染料废水[J]. 合肥学院学报(综合版), 2017, 34(5): 66-71.

[2] 张哲飞,周长印,赵海彤,等. 草甘膦废水处理技术研究进展[J]. 山东化工, 2018, 47(10): 201-202.

[3] Bhatnagar A, Sillanpää M. Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption-A review[J]. Chemosphere, 2017, 166: 497-510.

[4] Mostafa H Y, El Naggar A M A, Elshamy E A, et al. Microwave-assisted extraction for refining of petroleum wax distillate feedstock [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228: 1034-1047.

[5] 朱鋈珊,马平,郭丽. 膜分离技术及其应用[J]. 当代化工, 2017, 46(6): 1193-1195.

[6] 黄宁欣,陈俊超,唐红艳. PDMS 对 PEI/TMC 复合纳滤膜结构和性能的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(4): 506-511.

[7] Wang J L, Xu L J. Advanced oxidation processes for wastewater treatment: Formation of hydroxyl radical and application[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2012, 42(3): 251-325.

[8] RAJIB M D, 胡能,张家新,等. 纳米二氧化钛的制备及其光催化性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 322-327.

[9] Malik S N, Ghosh P C, Vaidya A N, et al. Hybrid ozonation process for industrial wastewater treatment: principles and applications: A review[J]. Journal of

Water Process Engineering, 2020, 35: 101193.

- [10] Nawrocki J, Kasprzyk-Hordern B. The efficiency and mechanisms of catalytic ozonation [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2010, 99(1/2): 27-42.
- [11] Liu H B, Gao Y, Wang J, et al. Catalytic ozonation performance and mechanism of  $\text{Mn-CeO}_x$  @  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{O}_3$  in the treatment of sulfate-containing hypersaline antibiotic wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2022, 807: 150867.
- [12] 刘莹,何宏平,吴德礼,等. 非均相催化臭氧氧化反应机制[J]. 化学进展, 2016, 28(7): 1112-1120.
- [13] Wang Q, Yang Z C, Chai B, et al. Heterogeneous catalytic ozonation of natural organic matter with goethite, cerium oxide and magnesium oxide[J]. RSC Advances, 2016, 6(18): 14730-14740.
- [14] Moussavi G, khavanin A, Alizadeh R. The integration of ozonation catalyzed with MgO nanocrystals and the biodegradation for the removal of phenol from saline wastewater[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2010, 97(1/2): 160-167.
- [15] 沈佟栋. 含镁金属氧化物催化臭氧氧化水中有机物的效能和机理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020: 35-42.
- [16] Bakatula E N, Richard D, Neculita C M, et al. Determination of point of zero charge of natural organic materials [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(8): 7823-7833.
- [17] Mahmood T, Saddique M T, Naeem A, et al. Comparison of different methods for the point of zero charge determination of NiO [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50 (17): 10017-10023.
- [18] 国家环保局本书编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 120-124.
- [19] 尚会建. 非均相臭氧-光催化氧化高盐含氨废水的工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2016: 49-51.
- [20] Kasprzyk-Hordern B, Ziółek M, Nawrocki J. Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2003, 46(4): 639-669.
- [21] Wu C W, Chen W M, Gu Z P, et al. A review of the characteristics of Fenton and ozonation systems in landfill leachate treatment[J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143131.
- [22] Ignat'ev A N, Pryakhin A N, Lunin V V. Mathematical simulation as a method to study the influence of oxygen, hydrogen peroxide, and phosphate and carbonate ions on the kinetics of ozone

- decomposition in aqueous solution [J]. Russian Chemical Bulletin, 2009, 58(6): 1097-1105.
- [23] Hu J, Zhu K, Chen L, et al. MgO (111) nanosheets with unusual surface activity [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2007, 111(32): 12038-12044.
- [24] Wang J, Chen H. Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective [J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135249.
- [25] Gimsing A L, Borggaard O K. Phosphate and glyphosate adsorption by hematite and ferrihydrite and comparison with other variable-charge minerals [J]. Clays and Clay Minerals, 2007, 55(1): 108-114.
- [26] Sebben D, Pendleton P. Analysis of ionic strength effects on the adsorption of simple amino acids [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2015, 443: 153-161.
- [27] 王群, 杨志超, 徐贺. 无机阴离子对催化臭氧氧化邻苯二甲酸的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2113-2118.
- [28] Zhang S, Quan X, Zheng J F, et al. Probing the interphase “HO zone” originated by carbon nanotube during catalytic ozonation [J]. Water Research, 2017, 122: 86-95.

(责任编辑:刘国金)