

# 热活化过硫酸钠氧化降解水中 2,4-二氯苯酚的研究

姜思佳,张碧涵,单潇清,刘钰琪,高畅,肖鹏飞\*

(东北林业大学林学院,黑龙江哈尔滨150040)

**摘要:**以水中2,4-二氯苯酚为目标污染物,比较了不同活化方式下过硫酸钠对2,4-二氯苯酚的降解去除效果以及热活化过硫酸钠降解2,4-二氯苯酚的影响因素。结果表明,过硫酸钠的活化效果依次为:热活化>碱活化>超声波活化>过氧化氢活化>无活化。升温有利于提升过硫酸钠的活化效率,60℃时活化过硫酸钠的降解效果可达到最佳。热活化过硫酸钠降解的适宜条件为:2,4-二氯苯酚与过硫酸钠摩尔比为1:30、过硫酸钠分3次等量添加、pH为11~12、反应时间200 min,该条件下水中初始质量浓度为50 mg/L及以下的2,4-二氯苯酚几乎完全降解去除。研究结果表明,热活化过硫酸盐氧化法能高效去除水中的氯苯酚类污染物。

**关键词:**2,4-二氯苯酚;热活化;过硫酸盐;氧化降解;影响因素

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)04-0094-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.04.021

## Degradation of 2,4-dichlorophenol in aqueous solution by thermal activated sodium persulfate

JIANG Si-jia, ZHANG Bi-han, SHAN Xiao-qing, LIU Yu-qi, GAO Chang, XIAO Peng-fei\*

(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** The degradation efficiencies of 2,4-dichlorophenol in aqueous solution by sodium persulfate ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) with different activation methods are compared, and the influences of activation temperature,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  dosage, initial pH, reaction time and initial concentration of 2,4-dichlorophenol are investigated systematically. The results show that the activation effect on  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  is in the order of thermal activation > alkaline activation > ultrasonic activation >  $\text{H}_2\text{O}_2$  activation > no activation. Heating up is beneficial to increasing the activation efficiency of  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ . The best degradation efficiency can be gained by using  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  that is activated under 60℃. Almost all of 2,4-dichlorophenol in aqueous solution can be degraded over thermal activated  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  in the optimal treatment conditions that the mole ratio of 2,4-dichlorophenol and  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  is 1:30,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  is added by three times, pH is in the range of 11~12, reaction time is 40 min and the initial concentration of 2,4-dichlorophenol is less than  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  in aqueous solution. The results confirm that the oxidation technology using thermal activated  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  can apply to treating with 2,4-dichlorophenol-contaminated wastewater.

**Key words:** 2,4-dichlorophenol; thermal activation; persulfate; oxidative degradation; influence factors

氯苯酚类化合物在农药、医药、石油化工等领域应用广泛,是一种常见的环境污染物<sup>[1]</sup>。氯苯酚具有毒性,可通过皮肤接触吸收,从而对肝、肾、肺等器官造成损伤。同时,氯苯酚还具有很强的“三致”效应,已被国内外列入优先控制的污染物,如何高效去除环境中的氯苯酚类化合物是今后环境科学领域的研究重点之一。

高级氧化技术是一种通过产生强氧化性的自由基降解有机污染物的方法。其中,Fenton氧化法会

产生大量铁污泥,且在中碱性条件下效果不佳<sup>[2]</sup>;臭氧氧化法存在着臭氧传质效率低和臭氧利用率低等限制因素<sup>[3]</sup>;湿式氧化法和超临界氧化法需要在高温、高压条件下进行,操作难度大,投资运行费用高,对设备也会造成一定的腐蚀和堵塞<sup>[4]</sup>。过硫酸盐是一种环境友好的氧化剂,通过一定的激活方式 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 可被活化分解为 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ , $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的氧化还原电位为2.5~3.1 V,具有强氧化性,并可通过电子转移、抽氢反应与加成反应等途径与有机污染物质反应,

收稿日期:2018-08-07;修回日期:2019-01-31

基金项目:国家自然科学基金项目(41201307);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572017CA08);黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(201710225027)

作者简介:姜思佳(1997-),女,本科,研究方向为过硫酸盐氧化技术,16512988@qq.com;肖鹏飞(1978-),男,博士,副教授,研究方向为有机污染物的高级氧化降解技术,通讯联系人,xpfawd@nefu.edu.cn。

进而达到消除污染物的目的;相比于 $\text{OH}\cdot$ 、 $\text{SO}_4\cdot^-$ 在环境中的半衰期更长,有利于充分接触污染物<sup>[5]</sup>。常用的活化方式有过渡金属离子活化、碱活化、紫外活化、氧化剂活化等,其中热活化过硫酸盐氧化是一种十分清洁型的活化技术,操作简便,不会对环境引入新的污染物,实际应用性较强。热活化是在众多活化方式中最容易产生 $\text{SO}_4\cdot^-$ 的方式,高温能提供足够的活化能,使 $-\text{O}-\text{O}-$ 键断裂而导致 $\text{SO}_4\cdot^-$ 的产生,从而实现对有机污染物的氧化。但相比其他活化方式,目前国内利用热活化过硫酸盐氧化法降解水中有机污染物的研究不多<sup>[6-10]</sup>。

笔者比较了多种方式活化过硫酸钠对水中2,4-二氯苯酚的氧化降解效果,并进一步探讨了温度、过硫酸钠浓度及添加方式、pH、反应时间以及2,4-二氯苯酚浓度对热活化过硫酸钠降解效果的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

2,4-二氯苯酚标准样品(质量分数为99%);过硫酸钠、氢氧化钠、过氧化氢(30%)等试剂均为国产分析纯;实验用水为去离子水。

UV-1800型紫外-可见分光光度计(Mapada)、HNY-1102型空气浴振荡器、H1650台式高速离心机(湖南湘仪)、DH3600型电热恒温培养箱(Taisite)、FE20型pH计(Mettler)、SK8200HP型超声清洗器(上海科导)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 不同活化方式下过硫酸钠对2,4-二氯苯酚的降解

实验中采取过氧化氢活化、超声波活化、碱活化和热活化4种活化方式。向棕色反应瓶中分别加入配制好的2,4-二氯苯酚溶液和过硫酸钠溶液,使溶液中2,4-二氯苯酚的初始质量浓度为50 mg/L,2,4-二氯苯酚与过硫酸钠摩尔比为1:20,摇匀后进行不同活化方式处理,除超声波活化与热活化外均振荡处理(150 r/min),除热活化外其余活化方式均在室温中进行,反应时间均为160 min,反应结束后添加一定量的甲醇以终止反应。

过氧化氢活化:加入的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 与过硫酸钠摩尔比为2:1;超声波活化:将反应瓶放入超声波清洗仪中,超声功率为200 W;碱活化:用NaOH调节pH为11;热活化:将反应瓶置于电热恒温培养箱,设置温

度为60℃。同时设无活化处理作为对照。

#### 1.2.2 不同条件下热活化过硫酸钠对2,4-二氯苯酚的降解

反应温度:溶液中2,4-二氯苯酚的初始质量浓度为50 mg/L,2,4-二氯苯酚与过硫酸钠摩尔比为1:30,温度分别设置为30、40、50、55、60、70℃和80℃,160 min后进行取样分析。

反应时间:溶液中2,4-二氯苯酚的初始质量浓度为50 mg/L,与过硫酸钠摩尔比为1:30,反应温度为60℃,每隔40 min进行取样分析。

过硫酸钠添加量:溶液中2,4-二氯苯酚质量浓度为50 mg/L,与过硫酸钠摩尔比分别为1:1、1:5、1:10、1:20和1:30,反应温度为60℃,160 min后进行取样分析。

过硫酸钠添加方式:溶液中2,4-二氯苯酚质量浓度为50 mg/L,与过硫酸钠摩尔比为1:30,过硫酸钠分为一次性添加和等量多次添加,反应温度为60℃,160 min后进行取样分析。

pH:溶液中2,4-二氯苯酚的初始质量浓度为50 mg/L,与过硫酸钠摩尔比为1:30,用氢氧化钠调节pH分别为7、8、9、10、11和12,反应温度为60℃,160 min后进行取样分析。

2,4-二氯苯酚质量浓度:溶液中2,4-二氯苯酚质量浓度分别为25、50、75、100、125 mg/L和150 mg/L,与过硫酸钠摩尔比均保持为1:30,反应温度为60℃,160 min后进行取样分析。

### 1.3 分析方法

定时从样品中取出一定体积反应液,离心分离后取上清液,采用紫外-可见分光光度计在285 nm处测定溶液中2,4-二氯苯酚吸光度,利用其标准曲线测定其质量浓度,并根据反应前后质量浓度的变化计算降解率,以上所有实验均设3组平行实验,结果取平均值。2,4-二氯苯酚降解率的计算式如下:

$$\text{降解率} = [(\rho_0 - \rho) / \rho_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\rho_0$ 、 $\rho$ 分别为氧化降解前后溶液中2,4-二氯苯酚的质量浓度,mg/L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同活化方式下过硫酸钠对水中2,4-二氯苯酚的降解

比较了超声波活化、过氧化氢活化、碱活化和热活化多种活化方式下过硫酸钠对水中2,4-二氯苯酚的降解效果,结果如表1所示。由表1可以看出,

2,4-二氯苯酚在不同的活化方式下降解效果有明显差异。在未活化过硫酸钠处理体系中,2,4-二氯苯酚几乎未发现明显的降解,表明在没有活化因子存在时,溶液中的  $S_2O_8^{2-}$  未转化成  $SO_4^{\cdot-}$ 。在超声波和过氧化氢活化过硫酸钠处理体系中,降解率分别只有 5.58% 和 5.42%,表明这 2 种活化方式的降解效率较低。碱活化方式下对 2,4-二氯苯酚的降解去除率虽有所提高但也仅为 25.37%。而热活化过硫酸钠的效果最显著,81.69% 的 2,4-二氯苯酚被降解去除。该结果表明,不同活化条件下产生  $SO_4^{\cdot-}$  的难易程度有所区别,60℃ 高温条件下提供的热量足以使溶液中的过硫酸钠分子中—O—O—键断裂,产生大量的  $SO_4^{\cdot-}$ ,进而对水中的 2,4-二氯苯酚进行高效降解。

表 1 不同活化方式下过硫酸钠对 2,4-二氯苯酚的降解

活化方式	未活化	超声波活化	过氧化氢活化	碱活化	热活化
降解率/%	1.31	5.58	5.42	25.37	81.69

## 2.2 不同温度活化过硫酸钠对 2,4-二氯苯酚的降解

为了探索热活化过硫酸钠氧化降解效果的最适温度,研究了不同温度活化下 2,4-二氯苯酚的降解率,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,30℃ 和 40℃ 时未见 2,4-二氯苯酚的去除;在 50℃ 和 55℃ 时降解率较低,表明该温度下开始生成少量的  $SO_4^{\cdot-}$ ;而随着温度增加至 60℃ 时,2,4-二氯苯酚的降解率迅速提升至 95%;而在 70℃ 和 80℃ 时 2,4-二氯苯酚则全部降解去除。因此,温度的升高有利于过硫酸钠发挥氧化降解作用,这是由于高温条件下使更多的过硫酸钠分子中—O—O—键断裂,进而产生大量的  $SO_4^{\cdot-}$  对 2,4-二氯苯酚进行降解。试验结果表明, $SO_4^{\cdot-}$  的生成在升温至 60℃ 时呈现出较大的跃迁效果。

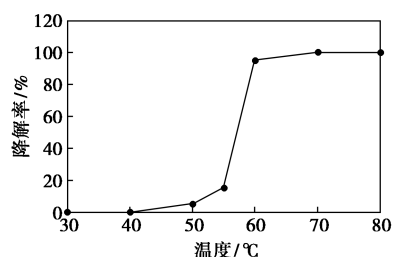


图 1 不同温度活化过硫酸钠对 2,4-二氯苯酚的降解

Waldemer 等<sup>[11]</sup>在探究热活化过硫酸盐降解地下水中的三氯乙烯时发现,在 20℃ 时三氯乙烯的去除率几乎为零,但当温度升至 60℃ 后水中的三氯乙烯几乎全部被降解。顾小钢等<sup>[12]</sup>研究了热活化  $Na_2S_2O_8$  降解泥浆中的三氯乙烷,当温度升至 50℃,去除率可升高至 72%。在该条件下,考虑到成本因素,60℃ 对发挥热活化过硫酸钠的降解效果是非常合适的。

## 2.3 过硫酸钠的添加量对热活化过硫酸钠降解率的影响

过硫酸钠的用量既是决定其处理效率的重要因素,也决定着实际应用的成本。过硫酸钠添加量对热活化过硫酸钠降解 2,4-二氯苯酚的影响如表 2 所示。由表 2 可以看出,当 2,4-二氯苯酚与过硫酸钠的摩尔比为 1:1 时,2,4-二氯苯酚降解率仅为 3.32%;继续增大 2,4-二氯苯酚与过硫酸钠的摩尔比至 1:5 和 1:10 时,降解率迅速提高为 39.65% 和 68.35%;而当 2,4-二氯苯酚与过硫酸钠的摩尔比达 1:20 和 1:30 时,降解率分别达到 85.69% 和 94.66%。结果表明,其他条件一定时,过硫酸钠投加量在一定程度上与 2,4-二氯苯酚降解率呈正相关。这是由于过硫酸钠投加量增大,过硫酸钠被活化产生更多的  $SO_4^{\cdot-}$ ,从而使得 2,4-二氯苯酚分子与  $SO_4^{\cdot-}$  的接触概率增加,加快了反应的进行。朱思瑞等<sup>[6]</sup>的研究结果表明,在热激活过硫酸盐氧化降解水中双酚 A 的降解率与过硫酸盐投加量呈正相关,当过硫酸钠与双酚 A 的摩尔比从 20:1 升至 75:1 时,降解率从 8.57% 升高为 23.41%。蒋梦迪等<sup>[8]</sup>研究显示,在热活化过硫酸盐降解三氯生研究中,当  $Na_2S_2O_8$  的浓度从 0.5 mmol/L 上升为 2 mmol/L 时,其降解率提高了 45%。但也有研究表明过硫酸钠的量并不能使降解率无限增加,当产生过多硫酸根自由基后,自由基彼此间会发生湮灭作用,降解效率反而下降<sup>[13-14]</sup>。

表 2 过硫酸钠添加量对热活化过硫酸钠降解 2,4-二氯苯酚的影响

$n(2,4\text{-二氯苯酚})$ :	1:1	1:5	1:10	1:20	1:30
$n(\text{过硫酸钠})$					
降解率/%	3.32	39.65	68.35	85.69	94.66

## 2.4 过硫酸钠投加方式对热活化过硫酸钠降解率的影响

过硫酸钠作为氧化剂,其添加方式可分为一次

性添加和序批式添加,而不同的添加方式可一定程度上影响污染物的降解去除效果<sup>[15]</sup>。研究了过硫酸钠总添加量相同时,一次性添加和多次等量添加条件下2,4-二氯苯酚的降解情况,如表3所示。与初始一次性添加相比,过硫酸钠分2次和3次等量添加时2,4-二氯苯酚的降解率略有提升,但4次和5次等量添加过硫酸钠时,降解率逐渐下降,5次等量添加时的降解率甚至低于1次性添加。原因是序批式添加使得反应更充分,防止局部 $\text{SO}_4\cdot^-$ 产生量过高,使得自由基之间的淬灭反应概率降低,从而保证了系统中高浓度自由基的存在<sup>[16]</sup>。而随着添加次数的增加,使得过硫酸钠的每次添加量减少,导致初期氧化剂浓度不够,自由基产生受抑制,氧化反应推动力不足,从而影响降解效果<sup>[17]</sup>。过硫酸钠分3次等量添加的效果比较合适。

表3 投加方式对热活化过硫酸钠降解2,4-二氯苯酚的影响

过硫酸钠的投加次数	1	2	3	4	5
降解率/%	92.44	93.58	95.52	93.70	87.69

### 2.5 反应时间对热活化过硫酸钠降解效率的影响

60℃热活化过硫酸钠条件下,2,4-二氯苯酚的降解率随时间的变化情况如图2所示。由图2可以看出,随着反应时间的增加,热活化过硫酸钠对2,4-二氯苯酚的降解率增大。前40 min内2,4-二氯苯酚的降解速度很快,随后降解速度略有放缓。在80 min和120 min时2,4-二氯苯酚的降解率分别达到62.87%和75.43%,160 min时2,4-二氯苯酚的降解率达到85.69%,此后降解速度进一步减缓,200 min时的降解率缓慢上升至90%。研究表明,反应开始时,降解率随着反应时间的延长不断增大,当反应达到了一定程度,大部分 $\text{SO}_4\cdot^-$ 被消耗掉,氧化反应速度变慢,污染物降解率逐渐趋于顶峰。赵进英等<sup>[18]</sup>发现,60℃条件下,活化过硫酸钠对

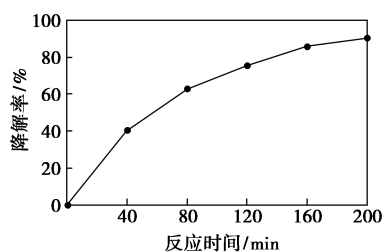


图2 反应时间对热活化过硫酸钠降解2,4-二氯苯酚的影响

4-氯苯酚的降解率在4 h达到100%;朱杰等<sup>[16]</sup>研究60℃热活化过硫酸盐氧化水中的氯苯发现,在前50 min降解速度极快,随后降解速率变缓,160 min时可达90%,300 min时降解完全,与本研究中的降解时间曲线较为接近。

### 2.6 pH对热活化过硫酸钠降解效率的影响

pH是热活化过硫酸盐氧化降解过程中的重要影响因素,pH可以影响溶液中的主要反应类型,进而影响污染物的降解效果与机制。考察了60℃热活化过硫酸钠条件下,溶液pH对2,4-二氯苯酚的降解效果如图3所示。由图3可以看出,在中性条件下(pH 7.0),2,4-二氯苯酚的降解率为83.5%,在弱碱性条件下(pH 8.0~9.0),降解率略有下降,而在强碱性条件下(pH 11.0~12),降解率升高至85.21%和92.92%,降解去除效果较好。这是由于在碱性条件下,溶液中的 $\text{OH}^-$ 会与 $\text{SO}_4\cdot^-$ 反应生成氧化还原电位更高、氧化能力更强的 $\cdot\text{OH}$ (2.8 V), $\text{SO}_4\cdot^-$ 和 $\cdot\text{OH}$ 2种自由基共同作用使得污染物的去除效果大于只有1种自由基存在时的效果。同时, $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4\cdot^-$ 的反应机理不同, $\cdot\text{OH}$ 与有机物主要通过 $\text{C}=\text{C}$ 双键的加成反应以及抽氢反应来进行。朱杰等<sup>[16]</sup>研究碱热活化过硫酸盐降解水中氯苯时发现,pH为11.0时的降解率和反应常数均为最高。马京帅等<sup>[9]</sup>研究发现,随着溶液pH的增大,热活化过硫酸盐对水中普萘洛尔的降解率随之增大。虽然碱性条件下2,4-二氯苯酚的降解率最佳,但中性条件下同样能保持较高的降解效果,即热活化过硫酸钠氧化法具有相对较宽的pH适用范围。

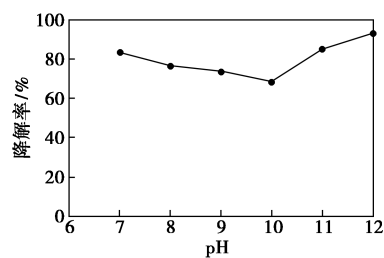


图3 pH对热活化过硫酸钠降解2,4-二氯苯酚的影响

### 2.7 2,4-二氯苯酚浓度对热活化过硫酸钠降解效率的影响

为探求2,4-二氯苯酚质量浓度对其氧化降解效率的影响,考察了60℃热活化过硫酸钠氧化降解水中不同初始质量浓度的2,4-二氯苯酚的效果,结果如图4所示。由图4可以看出,2,4-二氯苯酚初

始质量浓度为 25 mg/L 和 50 mg/L 时,其降解率分别为 91.98% 和 92.71%。但随着 2,4-二氯苯酚初始质量浓度的继续增加,其降解率开始持续下降,初始质量浓度为 125 mg/L 和 150 mg/L 时的降解率甚至不到 50 mg/L 时降解率的一半。该结果表明,随着 2,4-二氯苯酚初始质量浓度的增加,反应中污染物的降解率逐渐降低。其原因是由于一定条件下  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  的缺乏,使大量的 2,4-二氯苯酚无法与活性自由基充分接触,反应速率减慢,进而降低反应的降解率。朱思瑞等<sup>[6]</sup>发现其他条件一定时,双酚 A 初始质量浓度与热激活过硫酸盐对双酚 A 的去除率呈负相关,当双酚 A 的初始质量浓度从 0.0219 mmol/L 升高至 0.087 6 mmol/L,去除率从 49.98% 降低至 16.66%。林国峰等<sup>[10]</sup>研究也发现,在 50℃ 热激活过硫酸盐的条件下,随目标污染物双氯芬酸钠初始质量浓度从 2.5 mg/L 上升至 20 mg/L,其去除率从 97.2% 降为 27.9%。

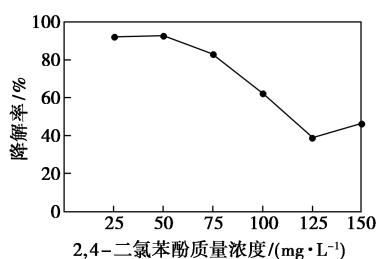


图 4 2,4-二氯苯酚初始质量浓度对热激活过硫酸钠降解效率的影响

### 3 结论

(1) 比较了不同活化方式下过硫酸钠对水中 2,4-二氯苯酚的氧化降解效果,其降解率依次为:热活化>碱活化>超声波活化>过氧化氢活化>无活化。升温有利于活化过硫酸钠产生更多的  $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ,提高 2,4-二氯苯酚的降解率,温度达到 60℃ 以上时,2,4-二氯苯酚几乎全部被降解。

(2) 在 60℃ 热激活过硫酸钠氧化降解条件下,降解率随着 2,4-二氯苯酚与过硫酸钠摩尔比的提高而提高,其最适摩尔比为 1:30,过硫酸钠分 3 次等量添加的效果要好于 1 次添加;在中性和碱性条件下均有较高的降解率,表明该方法对 pH 的使用范围较宽;热激活过硫酸钠氧化降解速率较快,在反应 200 min 后 2,4-二氯苯酚几乎全部被降解去除;热激活过硫酸钠对低质量浓度 2,4-二氯苯酚的降

解效果更佳。研究结果表明热活化过硫酸盐氧化法能高效去除水中的氯苯酚类污染物。

### 参考文献

- [1] 张娟,黄彦旻,吴斌程,等.羟胺强化 Fe(II)/过一硫酸盐体系降解氯酚的研究[J].现代化工,2017,37(8):94-97,99.
- [2] 肖鹏飞,宋玉珍.表面活性剂洗脱/类 Fenton 氧化对六氯苯污染黑土的处理[J].环境工程学报,2017,11(7):4383-4389.
- [3] 魏海江,杨兴伦,叶茂,等.活化过硫酸钠氧化法修复 DDTs 污染场地土壤研究[J].土壤,2014,46(3):504-511.
- [4] 赵霞,Ismoilov B,李亚斌,等.污水高级氧化技术的研究现状及其新进展[J].水处理技术,2018,44(4):7-10,16.
- [5] 杨世迎,杨鑫,王萍,等.过硫酸盐高级氧化技术的活化方法研究进展[J].现代化工,2009,29(4):13-19.
- [6] 朱思瑞,高乃云,鲁仙,等.热激活过硫酸盐氧化降解水中双酚 A[J].中国环境科学,2017,37(1):188-194.
- [7] Deng J,Shao Y,Gao N,*et al.*Thermally activated persulfate (TAP) oxidation of antiepileptic drug carbamazepine in water[J].Chemical Engineering Journal,2013,228:765-771.
- [8] 蒋梦迪,张清越,季跃飞,等.热激活过硫酸盐降解三氯生[J].环境科学,2018,39(4):1661-1667.
- [9] 马京帅,吕文英,刘国光,等.热激活过硫酸盐降解水中的普萘洛尔[J].环境化学,2017,36(2):221-228.
- [10] 林国峰,任峰,孙军益,等.热激活过硫酸盐降解水中双氯芬酸钠机理[J].净水技术,2017,36(S2):93-96,144.
- [11] Waldemer R H,Tratnyek P G,Johnson R L,*et al.*Oxidation of chlorinated ethenes by heat activated persulfate: Kinetics and products[J].Environ Sci Technol,2007,41(3):1010-1015.
- [12] 顾小刚,吕树光,邱兆富,等.热激活过硫酸钠处理水溶液及泥浆系统中 1,1,1-三氯乙烷的研究[J].环境科学学报,2012,32(6):1374-1380.
- [13] Liang C,Huang C F,Chen Y J.Potential for activated persulfate degradation of BTEX contamination[J].Water Research,2008,42(15):4091-4100.
- [14] Huang K C,Zhao Z,Hong G E,*et al.*Degradation of volatile organic compounds with thermally activated persulfate oxidation[J].Chemosphere,2005,61:551-560.
- [15] Liang C,Bruell C J,Marley M C,*et al.*Persulfate oxidation for in situ remediation of TCE. II. Activated by chelated ferrous ion[J].Chemosphere,2004,55(9):1225-1233.
- [16] 朱杰,罗启仕,郭琳,等.碱热活化过硫酸盐氧化水中氯苯的试验[J].环境化学,2013,32(12):2256-2262.
- [17] 吴昊,孙丽娜,李玉双,等.活化过硫酸钠去除长期污染土壤中的 TPH[J].环境工程学报,2016,10(9):5231-5237.
- [18] 赵进英,张耀斌,全燮,等.加热和亚铁离子活化过硫酸盐氧化降解 4-CP 的研究[J].环境科学,2010,31(5):1233-1238. ■