

Fe²⁺ 强化 UV/H₂O₂ 降解水中喹啉的研究

陈莉荣, 于楷伦, 谷振超

(内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 采用 UV/H₂O₂ 体系来降解水中的喹啉, 研究了氧化剂投加量和溶液初始 pH 值对喹啉降解效果的影响, 同时考察了 Fe²⁺ 强化 UV/H₂O₂ 体系对喹啉的降解率和矿化率的影响。结果表明, 当喹啉初始浓度(C_0) = 15 mg/L、紫外光照强度(I_0) = 8.96 mW/cm²、反应温度为 25 °C 时, 在 pH = 7.01、[H₂O₂]:[QL] = 40 的条件下, 反应 60 min 后, 喹啉的去除率为 41.11%, 反应 120 min 后, TOC 的去除率为 32.89%。控制上述反应条件不变, 向原反应体系中加入 Fe²⁺, 当 [Fe²⁺]:[H₂O₂] = 1:65 时, 喹啉和 TOC 的去除率分别提升至 90.90% 和 65.07%。喹啉的降解过程符合一级动力学方程($R^2 \geq 0.960$), Fe²⁺ 强化前后, 喹啉的降解速率常数(k_{obs}) 由 0.008 5 min⁻¹ 增加至 0.063 8 min⁻¹。采用每一对数减小级电能输入(E_{Eo}) 指标对两种工艺的电效率进行评估, 结果表明, Fe²⁺ 的加入显著减小了 UV/H₂O₂ 体系的电能消耗, 研究结果可为实际工程提供参考。

关键词: 喹啉; Fe²⁺; UV/H₂O₂; 高级氧化; 降解速率常数

中图分类号: TQ 032; TQ 034 文献标识码: A 文章编号: 1671-3206(2020)11-2808-04

DOI:10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20200824.027

Study on degradation of quinoline in water by UV/H₂O₂ enhanced by Fe²⁺

CHEN Li-rong, YU Kai-lun, GU Zhen-chao

(School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: UV/H₂O₂ system was used to degrade quinoline in water. The effects of oxidant dosage and initial pH value of solution on the degradation of quinoline were studied. At the same time, the degradation rate and mineral content of quinoline by Fe²⁺ enhanced UV/H₂O₂ system were investigated. The results show that when the initial concentration of quinoline is $C_0 = 15$ mg/L, the ultraviolet light intensity is $I_0 = 8.96$ mW/cm² and the reaction temperature is 25 °C, under the conditions of pH = 7.01, [H₂O₂]:[QL] = 40, after 60 min of reaction, the removal rate of quinoline was 41.11%, and after 120 min of reaction, the removal rate of TOC was 32.89%. Controlling the above reaction conditions remains unchanged, adding Fe²⁺ to the original reaction system. When [Fe²⁺]:[H₂O₂] = 1:65, the removal rates of quinoline and TOC are increased to 90.90% and 65.07%, respectively. The degradation process of quinoline conforms to the first-order kinetic equation($R^2 \geq 0.960$). The degradation rate constant k_{obs} of quinoline increases from 0.008 5 min⁻¹ to 0.063 8 min⁻¹ before and after Fe²⁺ strengthening. The energy efficiency of the two processes was evaluated using each logarithmic reduction energy input(E_{Eo}) index. The results show that the addition of Fe²⁺ significantly reduces the power consumption of the UV/H₂O₂ system. The research results can provide a reference for practical engineering.

Key words: quinoline; Fe²⁺; UV/H₂O₂; advanced oxidation; degradation rate constant

喹啉(QL)是一种典型的含氮杂环化合物,在煤化工废水二级生化出水中含量较多,属于难生物降解有机污染物^[1-3]。高级氧化技术是一种高效的水处理技术^[4],其中紫外光活化过氧化氢(UV/H₂O₂)工艺

具有良好的应用前景^[5-6]。研究表明,在 UV/H₂O₂ 基础上联合过渡金属活化技术可组成过渡金属强化 UV/H₂O₂ 工艺,如在 UV/H₂O₂ 体系中加入适量的亚铁离子(Fe²⁺)可提高 UV/H₂O₂ 的氧化速率^[7]。

收稿日期: 2020-03-06 修改稿日期: 2020-04-15

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2017MS(LH)0212); 内蒙古科技大学创新基金项目(2017QDL-B15)

作者简介: 陈莉荣(1971-),女,内蒙古包头人,内蒙古科技大学教授、硕士生导师,主要从事水处理及资源化的研究。电话: 18647209636, E-mail: chenlirong@imust.cn

通讯联系人: 谷振超, E-mail: k098k3@mail.nankai.edu.cn

本实验采用 UV 活化 H_2O_2 工艺降解水中的喹啉,接着向反应体系中加入 Fe^{2+} ,对比 UV/ H_2O_2 和 Fe^{2+} /UV/ H_2O_2 两种体系对喹啉降解效果的影响,研究结果以期为实际工程去除废水中的喹啉提供参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

七水合硫酸亚铁、过氧化氢(质量分数为 30%)、氢氧化钠、喹啉(纯度 $\geq 98\%$)、硫酸、硫代硫酸钠均为分析纯。

ZQ-GHX-II 型光化学反应仪(仪器内部石英冷阱内装有汞灯光源,功率 300 W);UV180G 型紫外可见分光光度计;TOC-V CPN 型 TOC 分析仪;GWA-UN1-20 型超纯水机;PHS-3C 型精密酸度计。

1.2 水样配制

用去离子水自配喹啉模拟废水(初始浓度 $C_0 = 15 \text{ mg/L}$, $\text{TOC}_0 = 14.98 \text{ mg/L}$,原液 $\text{pH} = 7.01$),常温下保存不超过 24 h。

1.3 实验方法

实验均在图 1 所示的光化学反应仪中进行,紫外光照强度(I_0) = 8.96 mW/cm^2 ,反应温度为 25°C 。实验时,取 200 mL 配制的喹啉溶液于光反应器中,投加一定量的 H_2O_2 溶液,同时开启恒温磁力搅拌器和紫外灯开关,紫外灯预热 2 min 后开始计时,分别在 0, 2, 5, 8, 10, 15, 20, 30, 50, 60 min 时取样 10 mL,随即加入 50 μL 硫代硫酸钠终止反应,测定溶液中剩余喹啉浓度。本实验分别进行不同 H_2O_2 投加量和不同溶液初始 pH 值(用 0.1 mol/L 硫酸和 0.1 mol/L 氢氧化钠调节溶液的 pH 值)对 UV/ H_2O_2 工艺降解喹啉效果的影响,并考察不同浓度的亚铁离子(Fe^{2+})强化 UV/ H_2O_2 工艺对喹啉去除率和矿化率的影响。

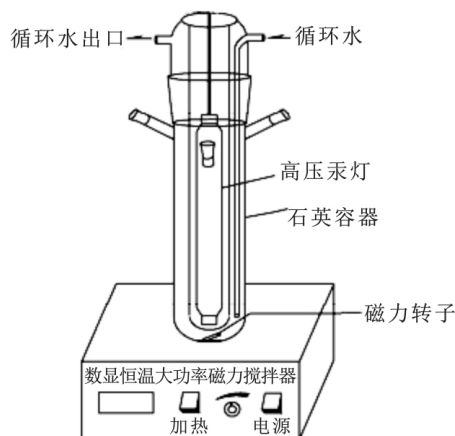


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

1.4 分析方法

采用紫外分光光度法测量喹啉的浓度,测定波

长为 313 nm^[8];TOC 采用 TOC 分析仪进行分析;pH 值采用精密酸度计测定。

2 结果与讨论

2.1 H_2O_2 投加量对喹啉降解的影响

当喹啉(QL)初始浓度(C_0) = 15 mg/L ,废水的 $\text{pH} = 7.01$ 时,考察不同 H_2O_2 投加量(图中用 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{QL}]$ 的摩尔浓度比值表示)对喹啉降解的影响,实验结果见图 2。

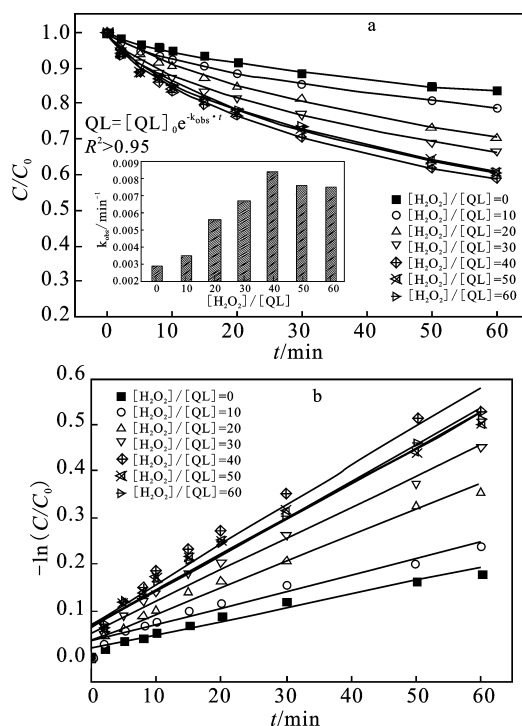
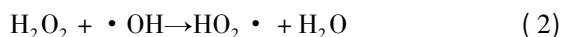


图 2 H_2O_2 投加量对喹啉降解的影响

Fig. 2 Effect of H_2O_2 dosage on quinoline degradation

由图 2b 可知, $-\ln(C/C_0)$ 与反应时间 t 有较好的拟合($R^2 > 0.95$),说明喹啉的降解符合一级动力学方程 $-\ln(C/C_0) = k_{\text{obs}}t$ (其中 k_{obs} 为一级反应速率常数, C 为喹啉浓度)。由图 2a 可知,当 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{QL}]$ 从 0 开始增加至 40 时,反应 60 min 后,喹啉的降解率由 16.55% 增加到了 41.11%, k_{obs} 也由 0.0029 min^{-1} 增加到了 0.0085 min^{-1} 。单独紫外光对喹啉有一定的光解作用,但 UV/ H_2O_2 对喹啉的降解有协同作用,主要是因为 UV 活化 H_2O_2 产生了 $\cdot\text{OH}$,见公式(1)。当继续增加 H_2O_2 量时,喹啉的降解率和 k_{obs} 都有所下降,这可能是过量的 H_2O_2 与 $\cdot\text{OH}$ 反应生成氧化性较弱的 $\text{HO}_2\cdot$ 所致,见公式(2)。



2.2 溶液初始 pH 值对喹啉降解的影响

溶液初始 pH 值影响反应体系中自由基的含量,进而影响降解效果^[9],因此研究不同 pH 值对喹啉降解的影响很有必要。图 3 为在 $[\text{QL}]_0 = 15 \text{ mg/L}$,

$[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{QL}] = 40$ 的条件下,不同的溶液初始 pH 值对喹啉降解效果的影响。

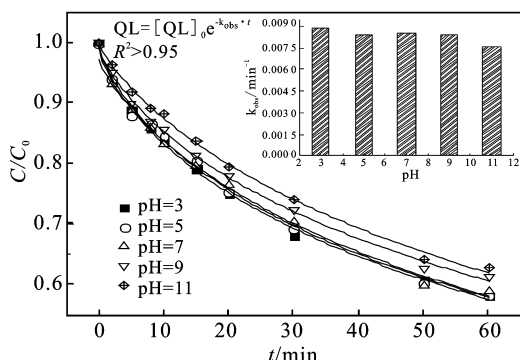


图 3 溶液初始 pH 对喹啉降解的影响
Fig. 3 Effect of initial pH of solution on degradation of quinoline

由图 3 可知,酸性和中性条件下喹啉的降解效果优于碱性条件。当喹啉溶液为酸性和中性条件下,反应 60 min 时,喹啉的降解率基本都在 40% 左右, k_{obs} 都在 $0.0085 \sim 0.0089 \text{ min}^{-1}$ 。而当 $\text{pH} > 9$ 时,喹啉降解率和 k_{obs} 都开始下降,分析其原因,可能与 H_2O_2 稳定性有关。在 $\text{pH} \leq 7$ 的条件下, H_2O_2 可持续被紫外光活化产生 $\cdot\text{OH}$,从而促进喹啉的降解。而在碱性条件下, H_2O_2 易被分解成 H_2O 和 O_2 ,削弱了体系对喹啉的降解。芬顿法降解有机物一般都需要强酸性的操作体系^[10],UV/ H_2O_2 不仅拓宽了水处理的 pH 值范围,也降低了因酸碱调节造成的运行成本,简化了反应操作过程,在应用于实际水体或煤化工二级生化出水中喹啉等含氮杂环有机物的处理中,无需调节废水的 pH 值。

2.3 Fe^{2+} 强化 UV/ H_2O_2 降解喹啉的研究

为了提高污染物的降解效率,通常将适量的过渡金属离子引入光催化反应体系内^[11]。在 $[\text{QL}]_0 = 15 \text{ mg/L}$ 、 $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{QL}] = 40$ 和 $\text{pH} = 7.01$ 的条件下,本节实验研究了不同浓度的硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 强化 UV/ H_2O_2 体系降解喹啉的效果,结果见图 4。

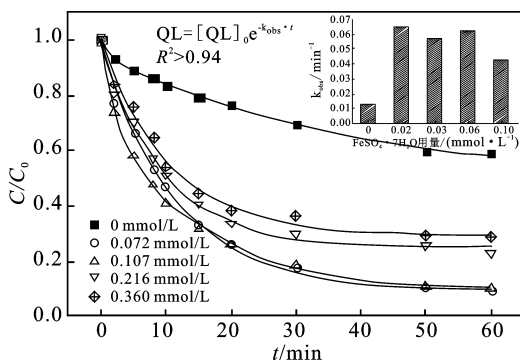
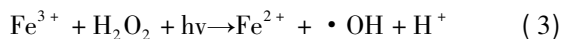


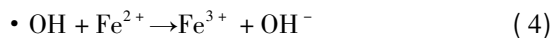
图 4 Fe^{2+} 浓度对 UV/ H_2O_2 体系降解喹啉的影响
Fig. 4 Effect of Fe^{2+} concentration on degradation of quinoline by UV/ H_2O_2 system

由图 4 可知,在 $\text{Fe}^{2+}/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ 系统中,当 Fe^{2+}

浓度由 0 mmol/L 增至 0.072 mmol/L 时,反应 60 min 时,喹啉的降解率由 41.11% 增至 90.90%, k_{obs} 由 0.0085 min^{-1} 增至 0.0638 min^{-1} ($R^2 = 0.982$),此时 Fe^{2+} 与 H_2O_2 的摩尔浓度比值为 $[\text{Fe}^{2+}]:[\text{H}_2\text{O}_2] = 1:65$ 。当 Fe^{2+} 浓度继续增至 0.107 mmol/L 时,喹啉的降解率稳定在 91% 左右。降解率增大的原因可能是反应体系中除了 Fe^{2+} 与 H_2O_2 反应生成 $\cdot\text{OH}$ 和 Fe^{3+} (同传统的芬顿反应机理) 之外, Fe^{3+} 会产生类芬顿反应,UV 照射会使类芬顿反应氧化能力提高,促进反应体系生成 $\cdot\text{OH}$,见公式 (3)^[12],从而提高了喹啉的降解率和反应速率常数。



由图 4 可知,当 Fe^{2+} 浓度增至 0.360 mmol/L 时,喹啉的降解率反而减小至 71.05%,其原因可能是反应体系中的 $\cdot\text{OH}$ 被过多的 Fe^{2+} 消耗,从而使喹啉的降解率下降,见公式 (4)。



Kavitha 等^[13]对比了芬顿法和光芬顿法降解苯酚的效果,结果表明,光芬顿法不仅提高了苯酚的降解率和矿化率,而且也降低了 Fe^{2+} 的投加量,芬顿法中 $[\text{Fe}^{2+}]:[\text{H}_2\text{O}_2] = 1:29$,光芬顿法中 $[\text{Fe}^{2+}]:[\text{H}_2\text{O}_2] = 1:39$,而本实验中 $[\text{Fe}^{2+}]:[\text{H}_2\text{O}_2] = 1:65$, Fe^{2+} 的投加量很低,光芬顿法相对芬顿法在提高有机物降解率的同时,也减少了含铁污泥的产率。

2.4 不同反应体系中 TOC 的去除率

在喹啉初始浓度 (C_0) = 15 mg/L ,紫外光强度 (I_0) = 8.96 mW/cm^2 , $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{QL}] = 40$,反应初始 $\text{pH} = 7.01$, $[\text{Fe}^{2+}]:[\text{H}_2\text{O}_2] = 1:65$ 的条件下,考察了 H_2O_2 、UV、UV/ H_2O_2 、 $\text{Fe}^{2+}/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ 几种不同的氧化体系在 120 min 内的 TOC 去除率,结果见图 5。

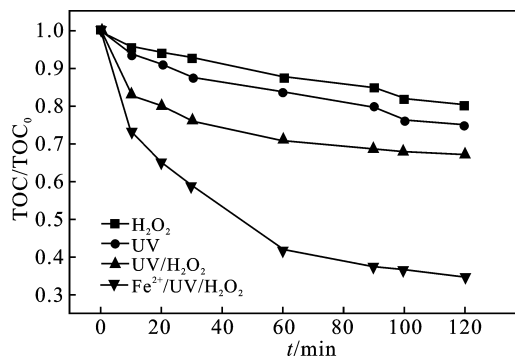


图 5 不同反应体系中的 TOC 去除率
Fig. 5 TOC removal rate in different reaction systems

由图 5 可知,在四种不同的反应系统中, $\text{Fe}^{2+}/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ 的矿化效果最为显著。当喹啉初始浓度 (C_0) = 15 mg/L 时,在单独投加 H_2O_2 和单独 UV 照射的条件下,反应 120 min 时,TOC 的去除率分别为 19.54% 和 25.07%,表明单独 H_2O_2 氧化和单独 UV

照射对喹啉的矿化效果较差,而相同条件下的 UV/ H_2O_2 系统的矿化效率为 32.89%,由此可见,UV/ H_2O_2 系统对喹啉的矿化具有协同作用。在相同条件下,将 Fe^{2+} 引入 UV/ H_2O_2 系统中,喹啉的矿化率增至 65.07%,表明引入 Fe^{2+} 可提高 UV/ H_2O_2 系统的矿化效率。在 Fe^{2+} /UV/ H_2O_2 体系中, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 皆可以与 H_2O_2 反应生成 $\cdot\text{OH}$,且 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 之间建立起循环反应,使反应体系中不断产生 $\cdot\text{OH}$,矿化作用增强。因此,将 Fe^{2+} 强化 UV/ H_2O_2 氧化技术应用于实际水体或煤化工二级生化出水中喹啉等含氮杂环有机物的处理中,投入适量的 Fe^{2+} 在保证出水水质的同时,还能降低运行成本。

2.5 电能效率

本实验中的光催化氧化过程会消耗电能,而电能消耗是运营成本的主要部分。针对消耗电能的高级氧化技术,国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)拟定了电能效率评价指标,用每个对数减小级电能输入 E_{Eo} ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$) 来评估有机污染物的电能效率,即在 1 m^3 废水中,有机物的浓度减少一个对数级所消耗的电能, E_{Eo} 越低,证明反应消耗的电能越少。计算方法见公式(5) [14]。

$$E_{\text{Eo}} = \frac{38.4P}{Vk} \quad (5)$$

式中 E_{Eo} ——单位电能消耗量 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;

P ——紫外灯功率 kW ;

V ——溶液的体积 L ;

k ——反应速率常数 min^{-1} 。

表 1 为 UV/ H_2O_2 与 Fe^{2+} /UV/ H_2O_2 降解喹啉的 E_{Eo} 值。

表 1 不同系统降解喹啉的电能消耗
Table 1 Electric energy consumption for quinoline degradation in different systems

反应体系	$E_{\text{Eo}}/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$
UV/ H_2O_2	126.32
Fe^{2+} /UV/ H_2O_2	13.95

由表 1 可知,在 UV/ H_2O_2 中加入 Fe^{2+} 后 E_{Eo} 由 $126.32 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 降至 $13.95 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,类似的现象出现在冯欣欣等 [15] 采用 UV/ H_2O_2 技术降解羟苯甲酮(BP-3)的实验中,结果显示在 BP-3 的初始浓度为 10 mg/L 时,将阳离子 Fe^{3+} 加入 UV/ H_2O_2 系统中后,UV/ H_2O_2 和 Fe^{3+} /UV/ H_2O_2 的 E_{Eo} 分别为 $1792 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 和 $92 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,说明 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 可显著降低电能消耗。

3 结论

(1) 当喹啉初始浓度(C_0) = 15 mg/L 、紫外光照强度(I_0) = $8.96 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 、反应温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,其最佳氧化条件为: $[\text{H}_2\text{O}_2]:[\text{QL}] = 40$ 、 $\text{pH} = 7.01$ 、

$[\text{Fe}^{2+}]:[\text{H}_2\text{O}_2] = 1:65$ 。反应 60 min 后,喹啉的去除率为 90.90%,反应 120 min 后,TOC 的去除率为 65.07%。

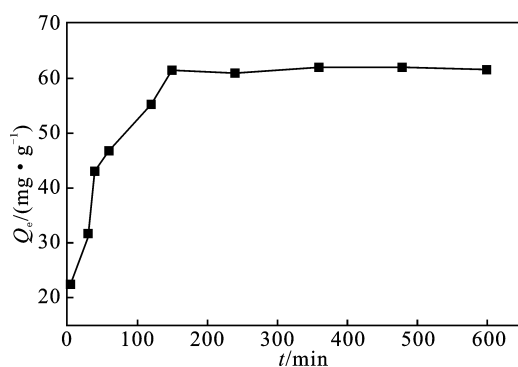
(2) 喹啉的降解符合一级动力学方程,在 UV/ H_2O_2 体系中加入 Fe^{2+} ,反应速率常数 k_{obs} 由 0.0085 min^{-1} ($R^2 = 0.960$) 增至 0.0638 min^{-1} ($R^2 = 0.982$),由此可见, Fe^{2+} 可促进喹啉降解。

(3) 两种工艺的电能效率评价表明, Fe^{2+} /UV/ H_2O_2 比 UV/ H_2O_2 工艺更加有优势, Fe^{2+} 的加入可使能耗由 $126.32 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 降至 $13.95 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,具有较低的经济成本。

参考文献:

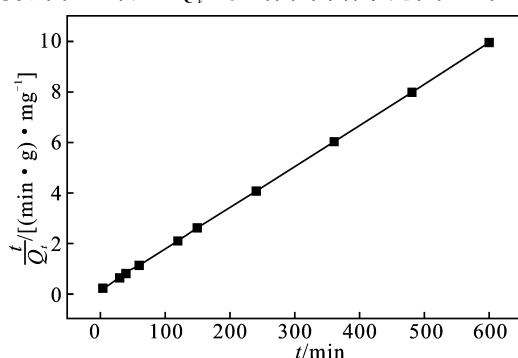
- [1] FELCZAK A, ZAWADZKA K, LISOWSKA K. Efficient biodegradation of quinolone-Factors determining the process [J]. International Biodeterioration & Biodegradation 2014, 96: 127-134.
- [2] SHI J X, XU C Y, HAN Y X, et al. Enhanced anaerobic biodegradation efficiency and mechanism of quinoline, pyridine and indole in coal gasification wastewater [J]. Chemical Engineering Journal 2019, 361: 1019-1029.
- [3] ZHU H, MA W C, HAN H J, et al. Catalytic ozonation of quinoline using nano-MgO: Efficacy, pathways, mechanisms and its application to real biologically pretreated coal gasification wastewater [J]. Chemical Engineering Journal 2017, 327(1): 91-99.
- [4] KRALIK P, KUSIC H, KOPRIVANAC N, et al. Degradation of chlorinated hydrocarbons by UV/ H_2O_2 : The application of experimental design and kinetic modeling approach [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 158(2): 154-166.
- [5] ZUORRO A, FIDALEO M, FIDALEO M, et al. Degradation and antibiotic activity reduction of chloramphenicol in aqueous solution by UV/ H_2O_2 process [J]. Journal of Environmental Management 2014, 133(15): 302-308.
- [6] TUGBA Olmez-Hanci, IDIL Arslan-Alaton. Comparison of sulfate and hydroxyl radical based advanced oxidation of phenol [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 224: 10-16.
- [7] GHALY M Y, GEORG Härtel, ROLAND Mayer, et al. Photochemical oxidation of *p*-chlorophenol by UV/ H_2O_2 and photo-Fenton process. A comparative study [J]. Waste Management 2001, 21(1): 41-47.
- [8] LU X, SHAO Y S, GAO N Y, et al. Degradation of diclofenac by UV-activated persulfate process: Kinetic studies, degradation pathways and toxicity assessments [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety 2017, 141: 139-147.
- [9] WU F, DENG N S. Photochemistry of hydrolytic iron(III) species and photoinduced degradation of organic compounds. A minireview [J]. Chemosphere, 2000, 41(8): 1137-1147.

(下转第 2815 页)

图 9 反应时间对 MGO 吸附 Cu^{2+} 的影响Fig. 9 Effect of reaction time on Cu^{2+} adsorption of MGO

实验数据用准二级动力学模型 $\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e}$

进行拟合^[10], 以 t/Q_t 对 t 作图, 结果见图 10 和表 1。

图 10 MGO 对 Cu^{2+} 吸附的准二级动力学Fig. 10 Quasi-second-order kinetics of MGO adsorption of Cu^{2+}

由图 10 可知, 得到良好的线性关系, 表明 MGO 对溶液中 Cu^{2+} 的动力学吸附符合准二级动力学模型。

表 1 磁性氧化石墨烯对 Cu^{2+} 吸附的动力学参数Table 1 The kinetic parameter of magnetic graphene oxide on Cu^{2+} adsorption

准二级动力学方程		
$Q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_2 / [\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}]$	R^2
61.4	0.001 7	0.999 0

3 结论

采用一步共沉淀法, 以 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot$

$6\text{H}_2\text{O}$ 和氧化石墨烯为原料, 在碱性条件下制备氧化石墨烯/四氧化三铁的磁性复合吸附材料(MGO), 对 20 mL 浓度为 200 mg/L、pH=5.5 的 Cu^{2+} 溶液, 加入 MGO=20 mg。温度 30 ℃ 吸附 150 min 后基本达到平衡, 最大吸附容量为 61.4 mg/g, Cu^{2+} 去除率为 98.1%。磁性氧化石墨烯材料对 Cu^{2+} 的吸附符合准二级动力学模型。

参考文献:

- [1] 梁松, 唐玉霖, 王炜龙, 等. 磁性高分子复合微球去除重金属的研究进展[J]. 水处理技术, 2012, 38(10): 8-11.
- [2] 徐震耀, 李新. 巯基表面修饰磁性复合纳米粒子用于重金属离子去除的研究[J]. 材料导报, 2015, 29(25): 34-37.
- [3] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [4] ZHU M C, HE Q L, SHAO L, et al. An overview of the engineered graphene nanostructures and nanocomposites[J]. RSC Advances, 2013(3): 22790-22824.
- [5] CHANG J, ZHOU G, CHRISTENSEN E R, et al. Graphene-based sensors for detection of heavy metals in water: a review[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2014, 406(16): 3957-3975.
- [6] 滕洪辉, 彭雪, 高彬. 石墨烯基复合材料去除水中重金属研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(2): 602-610.
- [7] YU C, GUO Y, LIU H, et al. Ultrasensitive and selective sensing of heavy metal ions with modified graphene[J]. Chemical communications, 2013, 49(58): 6492-6494.
- [8] 龚爱琴, 朱霞石, 金凯凯. 环糊精修饰磁性纳米材料制备及对环境水样中重金属处理研究[J]. 化学研究与应用, 2016, 28(12): 1680-1687.
- [9] 布林朝克, 郭婷, 张邦文, 等. 部分还原氧化石墨烯- Fe_3O_4 对水中 $\text{Mn}(\text{II})$ 的快速去除[J]. 高等学校化学学报, 2017, 38(2): 217-224.
- [10] HO Y S, MCKAY G. Pseudo-second order model for sorption processes[J]. Process Biochemistry, 1999, 34(5): 451-465.

(上接第 2811 页)

- [10] 孙剑辉, 孙胜鹏, 王慧亮, 等. Fenton 氧化技术处理难降解工业有机废水研究进展[J]. 工业水处理, 2006, 26(12): 9-13.
- [11] LI Ming-Jerou Liou, LU C M, CHEN J N. Oxidation of TNT by photo-Fenton process[J]. Chemosphere, 2004, 57(9): 1107-1114.
- [12] CHEN R Z, PIGNATELLO J J. Role of quinone intermediates as electron shuttles in Fenton and photoassisted Fenton oxidations of aromatic compounds[J]. Environmental

Science & Technology, 1997, 31(8): 2399-2406.

- [13] KAVITHA V, PALANIVELU K. Degradation of nitrophenols by Fenton and photo-Fenton processes[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry, 2005, 170(1): 83-95.
- [14] 苟莹莹, 张盼月, 钱锋, 等. UV/ H_2O_2 降解水中磺胺嘧啶影响因素及机理[J]. 环境工程学报, 2017(11): 30-39.
- [15] 冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 等. UV/ H_2O_2 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素[J]. 环境科学, 2015(6): 221-229.