

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.015

MoS₂助催化芬顿反应降解水中苯酚

文奕匀¹, 刘璧铭², 刘若愚¹, 张润泽¹, 陈姗姗¹, 武海霞¹

(1. 南京工业大学 城市建设学院, 江苏 南京 211816; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘要: 为解决传统Fenton反应处理废水时药剂用量大、铁泥产量多等缺点,通过向低Fe²⁺浓度的Fenton反应系统中投加助催化剂MoS₂,对水中的苯酚进行处理,探究其助催化效果。考察了Fe²⁺、H₂O₂和MoS₂投加量以及pH对苯酚降解效果的影响,并分析了溶液中共存离子对反应系统的影响。结果表明,在Fe²⁺投加量为30 μmol/L、H₂O₂投加量为2.5 mmol/L、MoS₂投加量为2.0 g/L、pH为4.0的条件下,反应40 min后对苯酚的去除率最高可达84.25%,与相同Fe²⁺及H₂O₂投加量的Fenton体系相比提升了6.83%,比相同苯酚去除率的Fenton体系降低了50%~80%的Fe²⁺投加量。自由基抑制实验表明,MoS₂助催化Fenton反应去除苯酚过程中起主要作用的活性物种是·OH。X射线衍射仪(XRD)表征和重复实验证实,MoS₂具有较强的催化稳定性和可重复利用性。综上所述,MoS₂可促进Fenton反应降解苯酚、减少Fe²⁺投加量。

关键词: MoS₂; 芬顿反应; 苯酚; 助催化剂

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0097-08

MoS₂ Facilitating Fenton Reaction for Degradation of Phenol in Water

WEN Yi-yun¹, LIU Bi-ming², LIU Ruo-yu¹, ZHANG Run-ze¹, CHEN Shan-shan¹,
WU Hai-xia¹

(1. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. College of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To address the limitations of traditional Fenton reaction in wastewater treatment, such as high chemical dosage and excessive iron sludge production, MoS₂ was introduced as a co-catalyst in conjunction with low-concentration Fe²⁺ to treat phenol-contaminated water, and the co-catalytic effects of this approach was investigated. The impact of Fe²⁺ dosage, H₂O₂ dosage, MoS₂ dosage, and pH on the phenol degradation process was systematically investigated. Additionally, the influence of co-existing ions in solution on the reaction system was analyzed. Under the conditions of Fe²⁺ of 30 μmol/L, H₂O₂ of 2.5 mmol/L, MoS₂ of 2.0 g/L, and pH of 4.0, the maximum phenol removal efficiency reached 84.25% following a 40-minute reaction period. Compared to the Fenton system with equivalent dosages of Fe²⁺ and H₂O₂, the removal efficiency of the modified system was increased by 6.83%. Additionally, the Fe²⁺ dosage was reduced by 50% to 80% when achieving the same phenol removal efficiency as the traditional Fenton system. Free radical inhibition experiments demonstrated that hydroxyl radical (·OH) was the

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX21_0474); 南京工业大学大学生创新项目(2021)

通信作者: 武海霞 E-mail: vividhaixia@163.com; 刘璧铭 E-mail: bimingliu@tsinghua.edu.cn

predominant active species responsible for phenol removal via MoS_2 catalyzed Fenton reaction. X-ray diffraction (XRD) analysis and replicate experiments confirmed that MoS_2 exhibited robust catalytic stability and reusability. In conclusion, MoS_2 facilitated the degradation of phenol via the Fenton reaction while simultaneously reducing the required dosage of Fe^{2+} .

Key words: MoS_2 ; Fenton reaction; phenol; co-catalyst

苯酚是地表水和地下水中的主要污染物之一,来源广泛,其存在于石油化工、油漆、纺织、农药生产等各个行业的废水中。不仅严重污染水源,还会对人类和水生生物造成致癌和致突变危害^[1]。因此,如何有效处理苯酚废水是亟需解决的问题。Fenton法是典型的高级氧化处理技术之一,具有反应快、操作简单、易实施、化学药剂普遍易得和无额外能量输入等优势,因此常被用于处理苯酚废水。但Fenton体系存在pH适用范围小、矿化程度不完全等缺陷。为进一步提高Fenton法处理有机污染物的效能,研究者们采用金属异相催化剂(金属零价铁^[2]、金属氧化物 Fe_2O_3 ^[3]和针铁矿^[4]、金属负载型 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GO}$ ^[5]和铁浸渍生物炭^[6]、金属离子掺杂型铁基金属有机框架化合物^[7])形成非均相Fenton体系^[8-9]。非均相Fenton体系通过固体催化剂表面活性中心的氧化还原反应驱动界面电子迁移,诱发 H_2O_2 分解形成 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{HO}_2$ 和 $\cdot\text{O}_2^-$ 等活性物种,可高效矿化水体中的难降解有机物^[10-11]。

近年来,金属硫化物(如 MoS_2 ^[12]、 WS_2 ^[13]、 ZnS ^[14]等)作为助催化剂被成功引入Fenton反应中。Xing等^[15]发现,其表面的不饱和S原子可以从溶液中捕获质子形成 H_2S ,同时暴露还原性金属活性位点,极大地加速了 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的转化并提高了 H_2O_2 利用效率和减少铁泥的生成,具有显著的协同催化作用。二硫化钼(MoS_2)作为一种典型的二维层状过渡金属硫化物,其稳定性强且普遍易得,在电催化、光催化、生物传感器和超级电容器等领域有着广泛的应用^[12]。已有研究表明, MoS_2 助催化Fenton反应可快速高效地灭活大肠杆菌和金黄色葡萄球菌^[16]。

为探究 MoS_2 助催化Fenton反应对苯酚的去除效果,笔者考察了 Fe^{2+} 、 H_2O_2 和 MoS_2 投加量以及初始pH和体系中其他离子的影响,并探讨了 MoS_2 的可回收性和催化稳定性。通过自由基淬灭实验研究助催化过程中起主要作用的活性物种,并探究相关催化降解机理。

1 材料与方法

1.1 实验药品和仪器

实验化学试剂包括 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 H_2O_2 (30%)、 MoS_2 、 H_2SO_4 、 NaOH 、 NaCl 、 Na_2CO_3 、 Na_2SO_4 、 KNO_3 、甲醇等,均为分析纯。各溶液均由纯水配制而成。实验仪器包括超纯水机、恒温振荡器、紫外可见分光光度计、pH计、X射线衍射仪(XRD)等。

1.2 实验方法

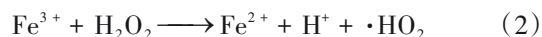
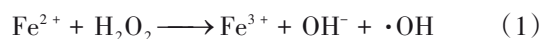
取一定量浓度为100 mg/L的苯酚溶液于100 mL锥形瓶中,再加入 NaOH (0.1 mmol/L)与 H_2SO_4 (0.1 mmol/L)溶液调节苯酚废水pH。投加一定量的固体 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 H_2O_2 和 MoS_2 后置于恒温振荡器中。反应温度为25 °C,振荡器的转速为150 r/min,反应时间为40 min。按照设定的时间间隔进行取样,样品经滤膜(0.22 μm)过滤后,用甲醇淬灭自由基测量苯酚浓度及 H_2O_2 剩余量。

采用XRD对反应前后 MoS_2 的晶型结构进行分析;采用激光粒度仪分析 MoS_2 反应前后的粒径;采用ICP-OES检测反应后水样中钼浓度;采用钛盐分光光度法测定 H_2O_2 浓度;采用4-氨基安替吡啉分光光度法测定苯酚浓度。

2 结果与讨论

2.1 MoS_2 助催化效能

Fenton反应降解苯酚废水是通过 Fe^{2+} 催化 H_2O_2 生成 $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{OH}$ 再将废水中的有机物分解成 CO_2 和 H_2O 。反应包括两个步骤^[6],见式(1)和(2)。其中式(1)的反应极快,可在几分钟内完成;式(2)是 Fe^{3+} 与 H_2O_2 反应生成 Fe^{2+} 的过程,决定了Fenton反应速率。由于 Fe^{3+} 和 H_2O_2 反应生成 Fe^{2+} 的速率较慢,导致Fenton体系后续降解速率缓慢。因此,加快式(2)的反应速率是提高Fenton系统降解苯酚的有效途径之一。



在Fe²⁺投加量为30 μmol/L、H₂O₂投加量为2.5 mmol/L、MoS₂投加量为2.0 g/L、pH为4.0条件下,不同反应体系对苯酚的去除效果如图1(a)所示。可以看出,MoS₂对苯酚存在一定的吸附能力,反应40 min后,单独MoS₂体系对苯酚的去除率为4%。单独Fenton体系对苯酚的去除率为77.42%。MoS₂加入Fenton体系后,0~20 min苯酚浓度迅速降低,与单独Fenton反应相比,对苯酚的去除率最大可提高14.72%。20 min后,对苯酚的去除速率变缓,反应40 min时对苯酚的去除率为84.25%,与单独Fenton体系相比提升了6.83%。可见,MoS₂能够加快体系的反应速度,促进苯酚降解。

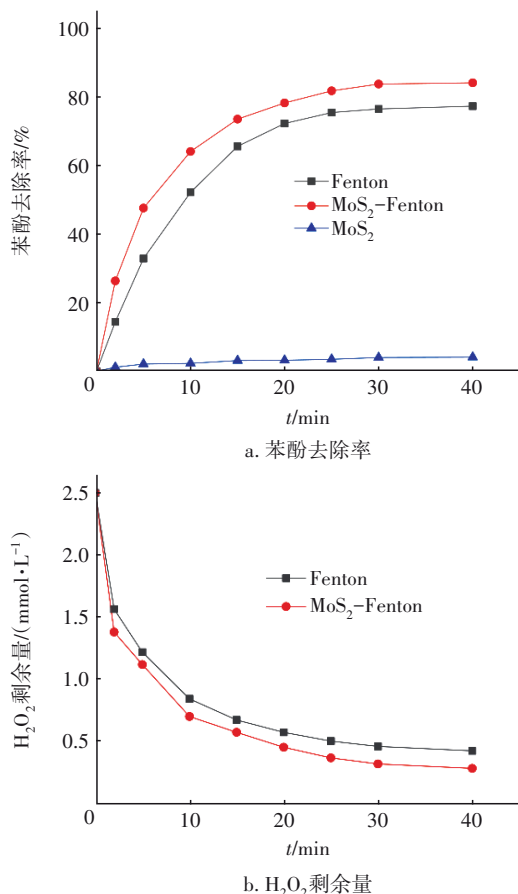


图1 不同反应体系对苯酚的去除效果和H₂O₂剩余量的变化

Fig.1 Removal efficiency of phenol and change in residual H₂O₂ in different reaction systems

从图1(b)可以看出,0~20 min反应快速进行,H₂O₂剩余量迅速下降。虽然两种体系的Fe²⁺和H₂O₂投加量相同,但是MoS₂-Fenton体系的H₂O₂剩余量低于Fenton体系。以上结果表明,MoS₂可能强化了Fenton反应中Fe³⁺/Fe²⁺循环,促进式(2)的发生,使得

更多的Fe³⁺变成了Fe²⁺,提高了H₂O₂利用率并加快了·OH的生成速率,进而提高了苯酚降解率。

2.2 Fe²⁺投加量对苯酚去除率的影响

在H₂O₂投加量为1.6 mmol/L、MoS₂投加量为2.0 g/L、pH为4.0的条件下,考察Fe²⁺投加量对MoS₂-Fenton体系去除苯酚的影响,结果见图2。

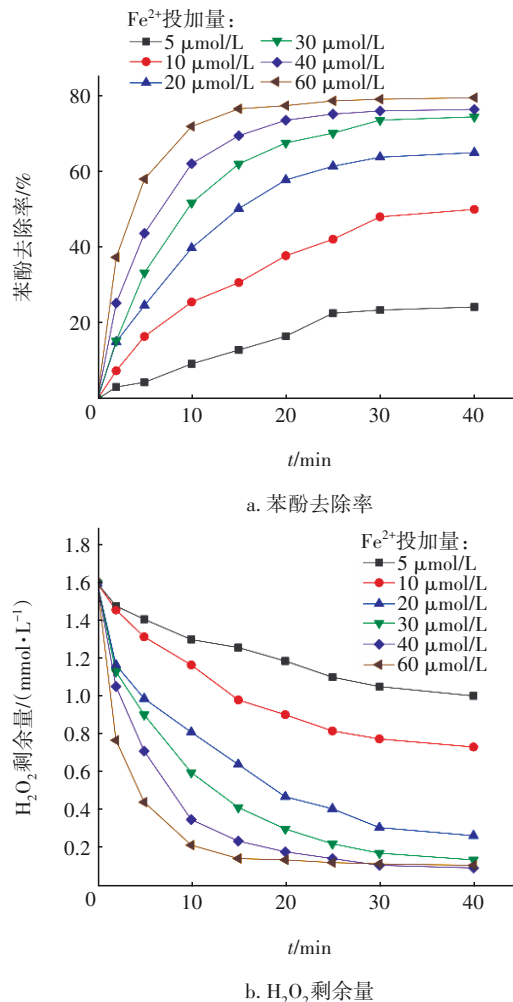
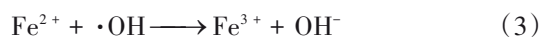


图2 Fe²⁺投加量对去除苯酚的影响

Fig.2 Effect of Fe²⁺ dosage on phenol removal

从图2(a)可知,Fe²⁺浓度对Fenton系统的影响较大,随着Fe²⁺投加量的增加,苯酚去除率不断升高。这是因为在Fenton反应中,Fe²⁺投加量越大,便会产生更多的·OH。当Fe²⁺投加量为30 μmol/L时,反应40 min后对苯酚的去除率达到74.36%。继续增加Fe²⁺投加量,苯酚去除率增加幅度变缓,而当Fe²⁺投加量为60 μmol/L时,苯酚去除率仅增至79.41%,这说明Fe²⁺投加量存在一个适宜的范围。若Fe²⁺投量过多会发生如式(3)^[17]所示的反应,溶液中的·OH被消耗,从而影响对污染物的降解效果。



从图2(b)可知,当 Fe^{2+} 投加量为30~60 $\mu\text{mol/L}$ 时,反应40 min后 H_2O_2 剩余量均低于0.2 mmol/L,这是由于体系中的 H_2O_2 被逐渐消耗,即使持续增加 Fe^{2+} 投加量,也不会产生更多的 $\cdot\text{OH}$,从而无法继续降解苯酚。因此,以下实验中 Fe^{2+} 投加量均设置为30 $\mu\text{mol/L}$ 。该浓度与常见的强化Fenton体系相比^[18],减少了50%~80%的 Fe^{2+} 投加量,可以有效降低Fenton体系中产生的铁泥量。

2.3 H_2O_2 投加量对苯酚去除率的影响

在 Fe^{2+} 投加量为30 $\mu\text{mol/L}$ 、 MoS_2 投加量为2.0 g/L、pH为4.0的反应条件下,考察 H_2O_2 投加量对苯酚去除率的影响,结果如图3所示。

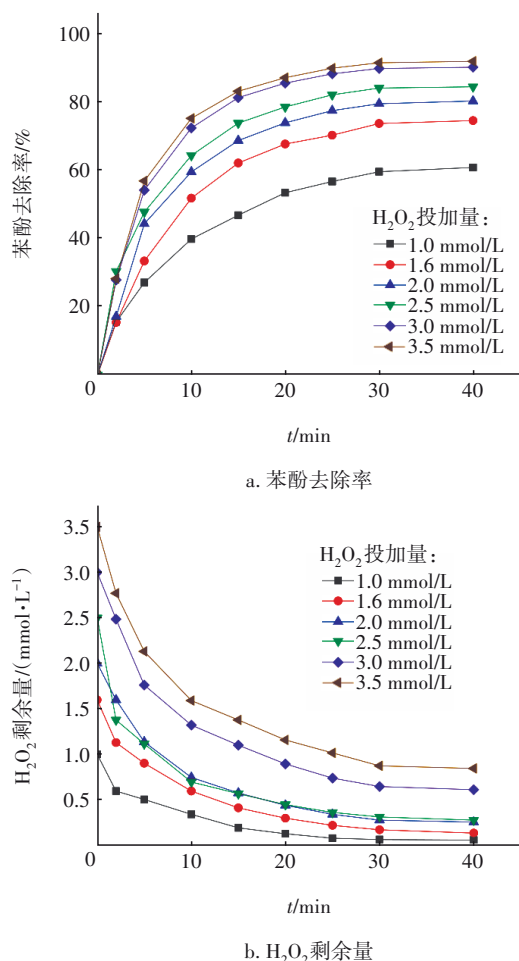


图3 H_2O_2 投加量对去除苯酚的影响

Fig.3 Effect of H_2O_2 dosage on phenol removal

从图3(a)可知,苯酚去除率与 H_2O_2 投加量呈正相关。主要原因是在 Fe^{2+} 投加量充足的情况下,若增加 H_2O_2 初始浓度,则体系中会产生更多的 $\cdot\text{OH}$,

有利于去除苯酚,这与Liu等^[16]的研究结果一致。当 H_2O_2 投加量为2.5 mmol/L时,反应40 min后苯酚去除率可以达到84.25%,而当 H_2O_2 投加量达到3.0 mmol/L以上时,虽然苯酚去除率(约为90%)略微提高,但是 H_2O_2 剩余量较大。当 H_2O_2 投加量为3.5 mmol/L时, H_2O_2 剩余量接近1.0 mmol/L,如图3(b)所示。也就是说,反应结束时仍有部分 H_2O_2 未被利用。并且,过量的 H_2O_2 会清除溶液中的 $\cdot\text{OH}$,见式(4),不利于增强Fenton反应的效果^[3]。过量的 H_2O_2 会导致设备腐蚀,大大增加经济成本。因此,从降低费用角度考虑,以下实验中将 H_2O_2 投加量设置为2.5 mmol/L。



2.4 MoS_2 投加量对苯酚去除率的影响

在 Fe^{2+} 投加量为30 $\mu\text{mol/L}$ 、 H_2O_2 投加量为2.5 mmol/L、pH为4.0条件下,考察 MoS_2 投加量对苯酚去除率的影响,结果如图4所示。

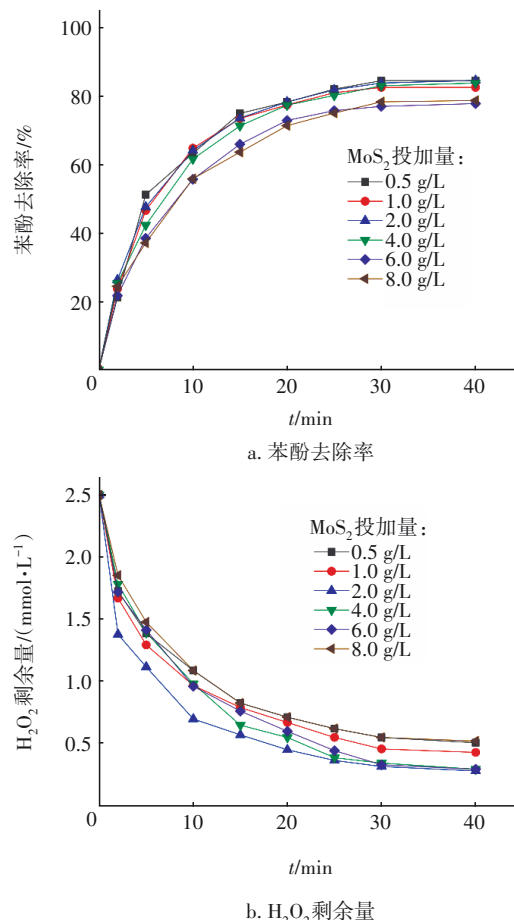


图4 MoS_2 投加量对去除苯酚的影响

Fig.4 Effect of MoS_2 dosage on phenol removal

从图4(a)可知,当MoS₂投加量为0.5、1.0、2.0、4.0 g/L时,反应40 min后系统对苯酚的去除率均可以达到85%左右。当MoS₂投加量大于4.0 g/L后,对苯酚的去除率反而下降。该结果与杨镇杉等^[19]利用负载型催化剂 α -Fe₂O₃/CuO/rGO催化Fenton反应降解苯酚废水的一致,其研究结果表明,当催化剂投加量为2.0 g/L时苯酚去除率开始下降。当MoS₂投加量超过4.0 g/L后,过多的催化剂提供了充足的活性位点,导致H₂O₂分解并产生了O₂和H₂O,且过多的活性位点可能会捕获溶液中的·OH,从而抑制苯酚的降解。

图4(b)表明,当MoS₂投加量为2.0 g/L时,反应40 min后H₂O₂剩余量最低,利用率较高。因此,在本实验体系中MoS₂的最佳投加量确定为2.0 g/L。在MoS₂最佳投加量条件下,反应后溶液中的铜浓度为0.001 mg/L,符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的限值(0.07 mg/L)。

2.5 pH对苯酚去除率的影响

在MoS₂助催化Fenton反应过程中,pH是决定苯酚去除效果的关键因素。在上述最佳实验条件下,考察pH对苯酚去除率的影响,结果如图5所示。在此pH范围内,MoS₂表面带负电,不饱和的S原子解离后被H⁺捕获生成H₂S,暴露出Mo⁴⁺的活性位点,使Mo⁴⁺与Fe³⁺之间发生电子转移,生成Fe²⁺继续分解H₂O₂^[20]。从图5(a)可以看出,当溶液初始pH为3.5~4.5时,系统对苯酚的去除率较为接近,可达到80%以上。当pH为4.0时,对苯酚的去除率最高,为84.25%,表明此时MoS₂对Fenton反应表现出最佳的助催化活性。当pH为3.0和5.5时,系统对苯酚的去除效果下降,去除率均低于70%。He等^[21]利用MoS₂助催化PMS体系降解有机物时也表现出同样的现象。这是由于在强酸性条件下,溶液中过多的H⁺会清除系统中的·OH^[22],所以对苯酚的去除率较低。

Clarizia等人^[23]的研究表明,过高的pH会降低溶液中溶解铁的浓度。当pH高于4.0时,溶解的铁会以氢氧化铁的形式沉淀。且pH过高时,溶液中H⁺浓度过低,无法捕获S原子,从而抑制Mo⁴⁺与Fe³⁺反应,这同样不利于Fenton反应。从图5(b)也可以看出,在pH为4.0时,水样中H₂O₂剩余量仅为0.3 mmol/L,低于其他pH下的H₂O₂剩余量。因此,确定

MoS₂助催化Fenton反应去除苯酚的较佳pH范围为3.5~4.5。

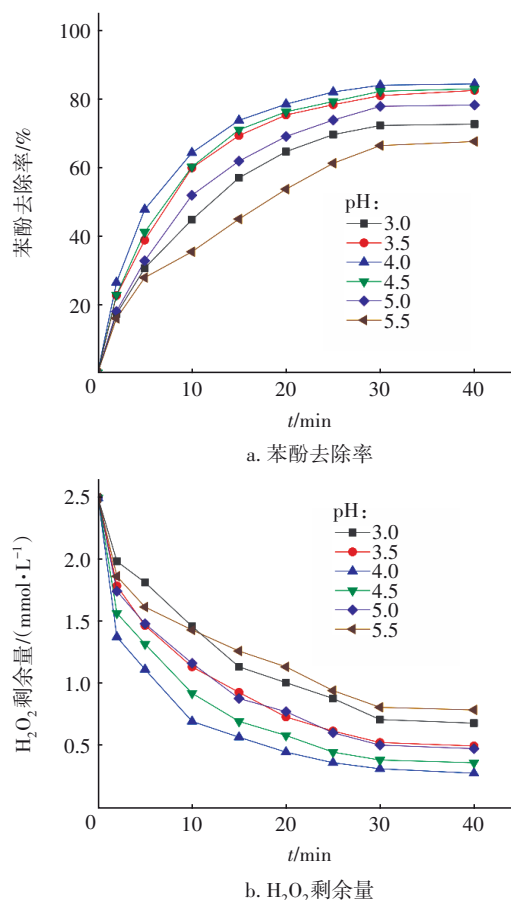


图5 pH对去除苯酚的影响

Fig.5 Effect of pH on phenol removal

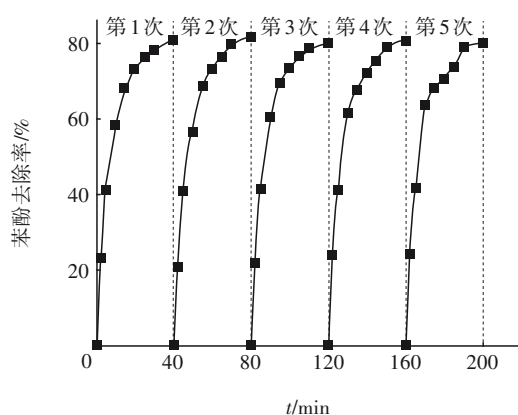
2.6 催化剂特性分析

2.6.1 MoS₂粒径分布

MoS₂粒径分布结果表明,反应前后其粒径的差异较小,基本无损失。

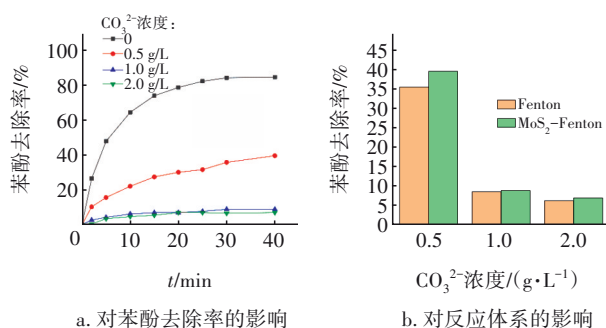
2.6.2 MoS₂的稳定性

为测试MoS₂在Fenton反应中的催化稳定性,取最佳实验条件反应后的溶液,用纯水冲洗、过滤得到MoS₂,将其置于60℃烘箱烘干后重复实验5次,循环实验结果如图6所示。可知,经过5次循环实验后,反应40 min后系统对苯酚的去除率仍可以达到80%以上,且MoS₂剩余量为0.8 g/L,MoS₂的单次损失率约为20%~30%,成本为20 000~30 000元/t。XRD分析结果显示,反应前后MoS₂的微观结构一致。综上所述,MoS₂具有较强的催化稳定性和可重复利用性,说明MoS₂在助催化Fenton反应降解有机废水方面具有一定的应用前景。

图6 MoS₂循环实验结果Fig.6 Repeated experiments results of MoS₂

2.7 共存离子对苯酚去除率的影响

在实际工业废水中会存在各种无机离子,如Cl⁻、CO₃²⁻、SO₄²⁻等,会对Fenton体系去除污染物的效果产生影响。因此,考察了共存离子(Cl⁻、CO₃²⁻、SO₄²⁻和NO₃⁻)对MoS₂-Fenton体系(最佳实验条件下)去除苯酚的影响。结果表明,Cl⁻、SO₄²⁻和NO₃⁻对MoS₂-Fenton体系降解苯酚的影响可以忽略不计,即使在高浓度情况下,反应40 min后体系对苯酚的去除率仍可达80%以上。相反,CO₃²⁻对苯酚去除率的影响显著,如图7所示。当溶液中CO₃²⁻浓度为0.5 g/L时,反应40 min后苯酚去除率显著降低,随着CO₃²⁻浓度升高到2.0 g/L,反应40 min后苯酚去除率仅为6.90%,说明此时体系中仅存在MoS₂对苯酚的吸附作用而无Fenton反应。



a. 对苯酚去除率的影响

b. 对反应体系的影响

图7 CO₃²⁻对去除苯酚的影响Fig.7 Effect of CO₃²⁻ concentration on phenol removal

图7(b)反映了CO₃²⁻对Fenton与MoS₂-Fenton体系去除苯酚的影响。可以看出,CO₃²⁻对两个体系均具有很强的抑制作用。分析原因,CO₃²⁻会与苯酚争夺溶液中的·OH^[24]。向MoS₂-Fenton体系加入CO₃²⁻后,其会与·OH发生反应,从而抑制Fenton反应的催化氧化性能。因此,MoS₂-Fenton体系用于处理实

际工业废水时有必要先采取预处理措施,以消除CO₃²⁻的影响。

2.8 催化机理

2.8.1 自由基淬灭实验

Fenton反应是通过产生高氧化性·OH氧化废水中的苯酚,为验证MoS₂-Fenton体系产生的活性物种也是·OH,采用常用的自由基抑制剂甲醇清除反应中的·OH,在最佳条件下进行了自由基淬灭实验,结果如图8所示。可以看出,苯酚去除率与甲醇投加量呈负相关。加入少量甲醇后,苯酚去除率略微下降,当投加量达到1 mL以上时,苯酚去除率低于10%;当投加量达到2 mL以上时,仅有4%的苯酚被去除,说明反应过程中只存在MoS₂对苯酚的吸附作用,未发生Fenton反应。可见,MoS₂-Fenton体系去除苯酚的过程也是依靠·OH完成的。

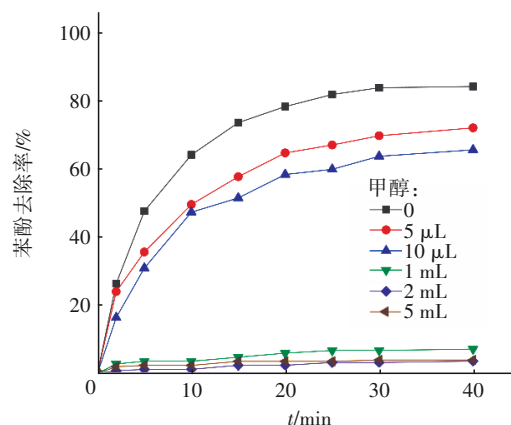
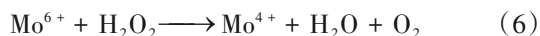
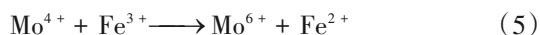


图8 自由基淬灭实验结果

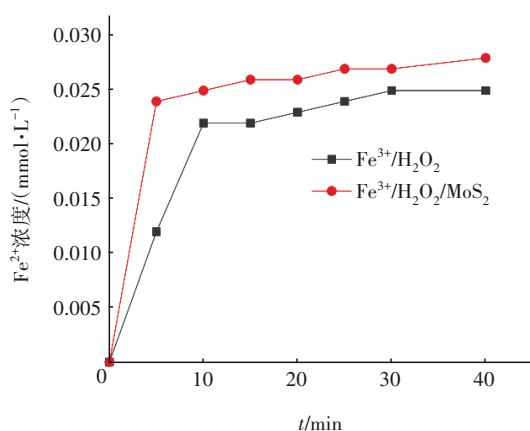
Fig.8 Results of free radical quenching experiment

2.8.2 MoS₂助催化的机理

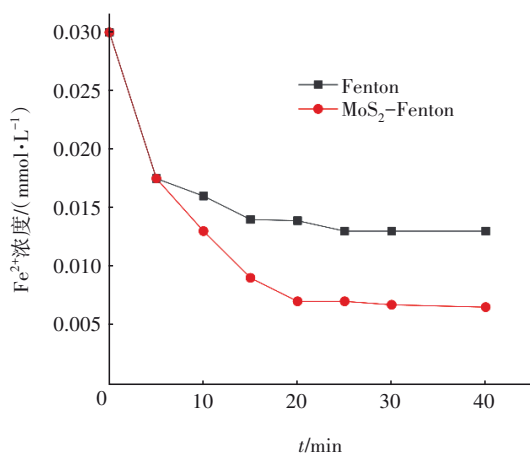
硫化物表面的不饱和S原子可捕获质子^[25]。Xing等^[15]通过观察Ag₂S吸收光谱,验证了当AgNO₃与MoS₂上清液混合时,在水分散液中形成H₂S。因此可知,MoS₂表面的不饱和S原子通过结合H⁺生成H₂S而被去除。然后表面暴露的Mo⁴⁺被氧化成Mo⁶⁺的同时将Fe³⁺还原成Fe²⁺,见式(5),而Mo⁶⁺又可以继续与H₂O₂反应,生成Mo⁴⁺,见式(6)。本研究中,反应结束后溶液pH为3.6,经水洗后,酸性变弱,pH升高到6,可能是因为水洗过程去除了H₂S。



为验证MoS₂助催化Fenton反应的机理,探究了MoS₂对Fe²⁺浓度的影响,结果如图9所示。

图9 MoS₂对Fe²⁺浓度的影响Fig.9 Effect of MoS₂ on Fe²⁺ dosage

最初溶液中只投加了30 μmol/L的Fe³⁺,发现存在MoS₂时Fe³⁺/Fe²⁺循环更明显,仅5 min即将大部分Fe³⁺转化成Fe²⁺,而Fenton体系中Fe²⁺的生成能力相对较弱。且从图10可以看出,在Fe²⁺投加量相同的前提下,MoS₂-Fenton反应过程中Fe²⁺浓度低于单独Fenton的,且在Fenton反应的后阶段Fe²⁺浓度不再下降时,MoS₂-Fenton体系仍可观察到亚铁浓度有所下降。证实了MoS₂可以促进Fe³⁺/Fe²⁺循环,从而更好地利用H₂O₂,产生更多的·OH来提高苯酚去除率。

图10 不同系统中Fe²⁺浓度的变化Fig.10 Change in Fe²⁺ concentration in different systems

3 结论

MoS₂对Fenton反应具有一定的助催化作用,在反应时间为40 min、pH为4.0、Fe²⁺投加量为30 μmol/L、H₂O₂投加量为2.5 mmol/L、MoS₂投加量为2.0 g/L的条件下,体系对苯酚的去除率可以达到84.25%,比传统Fenton体系提高了6.83%,比传统Fenton体系减少50%~80%的Fe²⁺投加量。而且

MoS₂还可以促进Fe³⁺/Fe²⁺循环,减少了Fe³⁺流失,提高了Fenton反应中H₂O₂利用率。自由基抑制实验表明,·OH是MoS₂助催化Fenton反应过程中的主要自由基。此外,循环实验表明,MoS₂具有较强的催化稳定性和可重复利用性,在处理难降解有机废水时具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] GÜMÜŞ D, AKBAL F. Comparison of Fenton and electro-Fenton processes for oxidation of phenol [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016, 103: 252-258.
- [2] MONDAL S K, SAHA A K, SINHA A. Removal of ciprofloxacin using modified advanced oxidation processes: kinetics, pathways and process optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 1203-1214.
- [3] CHEN Y, LI H, MA Q, *et al.* Facile synthesis of various α-Fe₂O₃ micro/nanostructures: highlighting on the enhanced catalysis activities by formation of bowl-like α-Fe₂O₃/Au composites [J]. Materials Research Bulletin, 2018, 103: 285-293.
- [4] WANG Y, GAO Y W, CHEN L, *et al.* Goethite as an efficient heterogeneous Fenton catalyst for the degradation of methyl orange [J]. Catalysis Today, 2015, 252: 107-112.
- [5] 张寒旭,何争光,刘亚琦,等. 氧化石墨烯负载纳米Fe₃O₄类芬顿处理制药废水[J]. 水处理技术, 2021, 47 (3): 124-128.
ZHANG Hanxu, HE Zhengguang, LIU Yaqi, *et al.* Graphene oxide-loaded nano-Fe₃O₄ multiphase Fenton-like treatment for pharmaceutical wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47 (3): 124-128 (in Chinese).
- [6] PARK J H, WANG J J, PARK K H, *et al.* Heterogeneous Fenton oxidation of methylene blue with Fe-impregnated biochar catalyst [J]. Biochar, 2020, 2 (2): 165-176.
- [7] 高聪. 铁基金属有机框架化合物催化类芬顿反应降解有机污染物研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
GAO Cong. Iron Based Metal Organic Frameworks Catalyzed Fenton-like Reaction for Organic Pollutants Degradation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [8] 吕来,胡春. 多相芬顿催化水处理技术与原理[J]. 化学进展, 2017, 29(9): 981-999.

- LÜ Lai, HU Chun. Heterogeneous Fenton catalytic water treatment technology and mechanism[J]. *Progress in Chemistry*, 2017, 29(9): 981-999(in Chinese).
- [9] 厉鹏远,邱立平,孙绍芳,等. 强化传统芬顿/类芬顿氧化效能的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(10): 34-40.
- LI Pengyuan, QIU Liping, SUN Shaofang, *et al.* Research progress on enhancing the oxidation efficiency of traditional Fenton/Fenton-like process [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(10): 34-40(in Chinese).
- [10] FENG M B, WANG Z Y, DIONYSIOU D D, *et al.* Metal-mediated oxidation of fluoroquinolone antibiotics in water: a review on kinetics, transformation products, and toxicity assessment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 1136-1154.
- [11] ZHANG Y, ZHOU M H. A critical review of the application of chelating agents to enable Fenton and Fenton-like reactions at high pH values [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 362: 436-450.
- [12] XIA F, NAN Z. Excellent Fenton-like catalyst application in alkaline solution[J]. *Functional Materials Letters*, 2020, 13(2): 2050002.
- [13] DONG C C, JI J H, SHEN B, *et al.* Enhancement of H_2O_2 decomposition by the co-catalytic effect of WS_2 on the Fenton reaction for the synchronous reduction of $Cr(VI)$ and remediation of phenol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(19): 11297-11308.
- [14] GAO J, LIU Y T, XIA X N, *et al.* $Fe_{1-x}Zn_xS$ ternary solid solution as an efficient Fenton-like catalyst for ultrafast degradation of phenol [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 353: 393-400.
- [15] XING M Y, XU W J, DONG C C, *et al.* Metal sulfides as excellent co-catalysts for H_2O_2 decomposition in advanced oxidation processes [J]. *Chem*, 2018, 4(6): 1359-1372.
- [16] LIU J, DONG C C, DENG Y X, *et al.* Molybdenum sulfide co-catalytic Fenton reaction for rapid and efficient inactivation of *Escherichia coli* [J]. *Water Research*, 2018, 145: 312-320.
- [17] MOUSSET E, FRUNZO L, ESPOSITO G, *et al.* A complete phenol oxidation pathway obtained during electro-Fenton treatment and validated by a kinetic model study [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, 180: 189-198.
- [18] BABUPONNUSAMI A, MUTHUKUMAR K. Degradation of phenol in aqueous solution by Fenton, sono-Fenton and sono-photo-Fenton methods [J]. *Clean—Soil, Air, Water*, 2011, 39(2): 142-147.
- [19] 杨镇杉,李耀威,吴宏海. $\alpha-Fe_2O_3/CuO/rGO$ 非均相芬顿催化剂的制备及其降解苯酚的性能 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(6): 36-41.
- YANG Zhenshan, LI Yaowei, WU Honghai. Preparation of $\alpha-Fe_2O_3/CuO/rGO$ heterogeneous Fenton catalyst and its degradation of phenol [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 51(6): 36-41(in Chinese).
- [20] ZHOU H Y, LAI L D, WAN Y J, *et al.* Molybdenum disulfide (MoS_2): a versatile activator of both peroxymonosulfate and persulfate for the degradation of carbamazepine [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 384: 123264.
- [21] HE D Q, CHENG Y, ZENG Y F, *et al.* Synergistic activation of peroxymonosulfate and persulfate by ferrous ion and molybdenum disulfide for pollutant degradation: theoretical and experimental studies [J]. *Chemosphere*, 2020, 240: 124979.
- [22] TAKDASTAN A, KAKAVANDI B, AZIZI M, *et al.* Efficient activation of peroxymonosulfate by using ferroferric oxide supported on carbon/UV/US system: a new approach into catalytic degradation of bisphenol A [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 331: 729-743.
- [23] CLARIZIA L, RUSSO D, DI SOMMA I, *et al.* Homogeneous photo-Fenton processes at near neutral pH: a review [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, 209: 358-371.
- [24] XU Z, SHAN C, XIE B H, *et al.* Decomplexation of $Cu(II)$ -EDTA by UV/persulfate and UV/ H_2O_2 : efficiency and mechanism [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, 200: 439-447.
- [25] VOIRY D, FULLON R, YANG J, *et al.* The role of electronic coupling between substrate and 2D MoS_2 nanosheets in electrocatalytic production of hydrogen [J]. *Nature Materials*, 2016, 15(9): 1003-1009.

作者简介: 文奕匀(1998-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为水中有机物的去除。

E-mail: striveWYY@163.com

收稿日期: 2021-10-03

修回日期: 2022-01-28

(编辑: 任莹莹)