

◀ 油气田开发工程 ▶

非晶合金催化氧化去除钻井废水 COD 的试验研究*

刘凯文¹ 杨迅¹ 张虎虎² 汪喆³ 郝燕燕⁴ 任武¹(1. 中石油江汉机械研究所有限公司 2. 中石油辽河油田公司锦州采油厂
3. 华中科技大学 4. 山西省临汾市科技情报研究所)

刘凯文, 杨迅, 张虎虎, 等. 非晶合金催化氧化去除钻井废水 COD 的试验研究. 石油机械, 2020, 48 (5): 78-83.

摘要: 目前报道的关于非晶合金催化降解废水研究主要采用实验室条件下的模拟废水, 有关非晶合金处理实际油田废水的研究尚未见报道。为此, 以某页岩气探井钻井废水为研究对象, 研究非晶合金化学成分、催化剂用量、 H_2O_2 浓度、pH值以及反应温度对石油钻井废水 COD 去除率的影响规律及作用机制。研究结果表明: 针对高 COD 的石油钻井废水, 非晶合金最佳剂量为 20 g/L; 反应最优条件为 pH 值 3, H_2O_2 浓度 0.14 mol/L, 温度为室温; 非晶合金催化氧化对 COD 去除率高达 90%以上, 处理后 COD 为 100 mg/L。此外, 研究了 MoS_2 助催化剂、外场电流对非晶合金催化去除石油废水 COD 的影响, 发现纳米 MoS_2 助催化剂能够略微提高非晶合金催化降解速率, 当电流密度达到 5 mA/cm²时, COD 去除率在 30 min 内达到 90%。非晶合金 Fenton 催化氧化与电 Fenton 催化氧化技术在去除油田废水 COD 方面具有广泛的应用前景。

关键词: 非晶合金; Fenton 氧化技术; 电 Fenton; 油田废水; 催化剂**中图分类号:** TE992 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2020.05.013

Experimental Study on Removing COD in Drilling Wastewater by Amorphous Alloy Catalytic Oxidation

Liu Kaiwen¹ Yang Xun¹ Zhang Huhu² Wang Zhe³ Hao Yanyan⁴ Ren Wu¹

(1. Jiangnan Machinery Research Institute Limited Company of CNPC; 2. Jinzhou Oil Production Plant, PetroChina Liaohe Oil-field Company; 3. Huazhong University of Science and Technology; 4. Shanxi Linfen Science and Technology Information Institute)

Abstract: Reported researches on catalytic degradation of wastewater by amorphous alloy almost used simulated wastewater in laboratory, but few on field drilling wastewater treatment have been published. Taking drilling wastewater from shale gas wells as the object, this study analyzed the effects and mechanism of removing COD from drilling wastewater in terms of the chemical composition of amorphous alloy, catalyst concentration, H_2O_2 concentration, pH value and reacting temperature. The results show that, for the drilling wastewater with a high COD content, when the optimal concentration of amorphous alloy is 20 g/L, the optimal pH is 3, the H_2O_2 concentration is 0.14 mol/L, the temperature is ambient, the removal rate of COD is more than 90%, and the COD concentration after treatment is 100 mg/L. In addition, the effects of MoS_2 (a co-catalyst) and external current on the catalytic removal of COD in drilling wastewater were studied. It is found that nano- MoS_2 could slightly increase the catalytic degradation rate of amorphous alloy. When the current density reached 5 mA/cm², the COD removal rate was up to 90% within 30 min. Fenton catalytic oxidation aided by amorphous alloy and electricity are promising for removing COD from oilfield wastewater.

Keywords: amorphous alloy; Fenton oxidation technology; electric Fenton; oilfield wastewater; catalyst

* 基金项目: 国家科技重大专项“页岩气等非常规油气开发环境监测与保护关键技术”之课题3“废弃物处理与利用技术”(2016ZX05040003)。

0 引言

现代工业社会对石油的需求量巨大,在石油开采过程中会产生大量废水,其中钻井废水的排放量每年超过130万t,但钻井废水的处理回用率不足40%^[1],对生态环境和人类健康造成了严重影响。与其他行业产生的废水相比,钻井废水成分复杂,化学需氧量(COD)高、色度重,并伴随浓烈的刺鼻味,导致其处理复杂、困难。因此,如何高效处理钻井废水是一个亟待解决的难题。

目前,钻井废水的常用处理技术包括:化学絮凝、活性炭吸附及高级氧化技术等。基于Fenton反应的高级氧化技术被认为是能够有效、深度处理钻井废水的技术之一^[2],其基本原理是:利用催化剂分解H₂O₂产生强氧化活性的羟自由基或者氢氧自由基(·OH,氧化电位2.8V),几乎能无选择性地氧化降解任何有机污染物。目前市场上的商用Fenton催化剂多为铁盐(Fe²⁺),其活化利用H₂O₂效率较低,导致使用时需要投加大剂量的催化剂与H₂O₂,使得处理成本显著增加^[3]。近年来,关于非晶合金催化剂的研究引起了世界各国的广泛关注,特别是其在污水处理领域具有效率高和稳定性强的特点。2013年,日本东北大学采用雾化法以及球磨法制备出FeNbSiB非晶粉末,发现非晶合金粉末降解直接蓝6染料的能力是商用零价Fe粉的200倍^[4]。澳大利亚埃迪斯科文大学的张来昌研究组发现,FeSiBY非晶合金催化降解性能远优于Fenton催化剂以及同成分的晶态催化剂,其催化活性达到目前商用Fe粉的1000倍以上,并且不会产生二次污染。他们还发现非晶合金循环使用20次后,依然保持了良好的催化降解性能^[5-6]。与目前常用的Fenton催化剂相比,非晶合金表现出更强的催化活化H₂O₂的本征活性。以上研究大多针对实验室模拟条件下的有机污染物染料,其组分相对单一^[7-10],而有关非晶合金处理成分更加复杂的油田钻井废水的相关研究鲜有报道。

笔者探索了铁基非晶合金对石油钻井废水的降解性能及相关作用机理,系统研究了非晶合金成分、反应温度、pH值、催化剂用量及助催化剂的添加对Fenton氧化降解COD的影响规律,优化了Fenton工艺的反应条件,并在此基础上,分析了非晶合金电Fenton氧化技术对钻井废水COD去除率的影响,以期石油钻井废水的回收处理工艺发展提供借鉴。

1 试验

1.1 试验材料

本研究采用的石油废水取自湖北省宜昌市某页岩气探井,取上清液用于研究。上清液呈浑浊的深褐色,COD为1800mg/L,有明显刺激性气味。采用ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪)精确测量水样中离子浓度,具体数据如下:Li⁺质量浓度0.50mg/L,Mg²⁺质量浓度2.90mg/L,K⁺质量浓度56.55mg/L,Ca²⁺质量浓度27.18mg/L,Cl⁻质量浓度9136.00mg/L。试验采用的双氧水、硫酸、重铬酸钾、硫酸汞、硫酸银、硝酸银及氢氧化钠均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 非晶合金催化剂的制备

将Fe、FeB、Si、Cu、Nb、Cr及FeP合金等工业级原料按目标比例称量,通过高真空电弧熔炼→吸铸及感应熔炼→倾倒浇注系统(沈科仪)制备非晶合金条带催化剂。具体制备步骤包括:①按设计的合金质量配置相应的金属原料,然后将原料放入高真空感应熔炼炉中熔炼,反复熔炼3~4次保证合金的成分均匀。②熔炼完毕后取出,采用急冷铜辊法进行甩带获得非晶薄带。非晶粉末催化剂采用高压气雾化技术^[11]制备。

1.3 废水处理试验过程

取50mL油田钻井废水置于锥形瓶中,加入1mol/L的稀硫酸调整pH到一定数值,称取一定质量的非晶催化剂并量取一定体积的双氧水(浓度1mol/L)加入其中,设定好磁力搅拌水浴锅的温度后,将锥形瓶置于磁力搅拌水浴锅中进行试验。在Fenton氧化试验中,每0.5h取2mL试样,持续2h。反应终止后测定试样的COD值。本研究采用微波消解法测定COD值。因钻井废水Cl⁻质量浓度较大,在用硝酸银排除Cl⁻对测量结果的干扰之后,取2mL试样于消解管中,加入3mL COD消解液,设定COD消解仪的温度为150℃,放入COD消解仪中消解2h后,在COD测定仪中测COD值。

2 结果与讨论

2.1 非晶合金体系的设计与遴选

设计并制备了4种不同成分(Fe含量依次变化)、不同形态(条带、粉末)的铁基非晶合金,以初步遴选具有高效降解效率的非晶合金催化剂用于后续研究。具体非晶合金催化剂名义成分(原

子百分比) 包括 $\text{Fe}_{80}\text{Si}_7\text{B}_{13}$ 、 $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$ 、 $\text{Fe}_{68}\text{Mo}_5\text{Ni}_5\text{Cr}_2\text{P}_{12.5}\text{C}_5\text{B}_{2.5}$ 和商用铁粉 (对比试样)。不同成分非晶合金材料去除石油废水 COD 性能如图 1 所示。由图 1 可见, $\text{Fe}_{80}\text{Si}_7\text{B}_{13}$ 非晶条带及粉末的降解性能最好, 在没有工艺优化的条件下, 处理 1.5 h 后废水 COD 值从初始的 1 800 mg/L 降至约 460 mg/L, COD 去除率接近 80%。商用 Fe 粉也具有较好的降解效果, 但 60 min 后基本失去化学活性, 进一步延长反应时间, COD 值基本不再变化。因此, 非晶合金 (条带) 比晶态 Fe 粉末具有更佳的催化性能。此外, 非晶合金催化降解效果与 Fe 含量紧密相关, 高 Fe 含量对应更佳的降解性能, 这也给后续非晶合金的成分设计提供了参考。粉末材料虽然比表面积大, 但考虑到实际应用中粉末材料不利于回收, 因此选择 FeSiB 非晶条带催化剂作为后续研究对象。

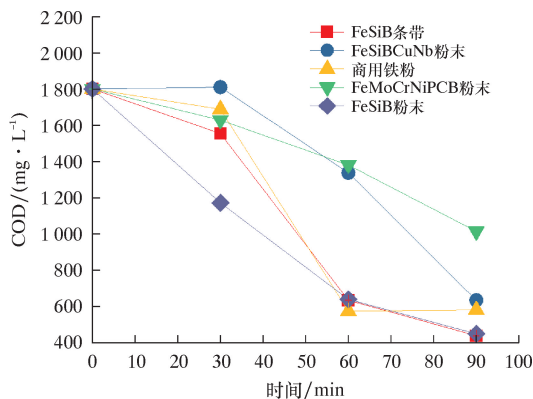


图 1 不同成分非晶合金材料去除石油废水 COD 的性能曲线

Fig. 1 Performances of amorphous alloy with different compositions removing COD

2.2 非晶合金 Fenton 氧化技术工艺研究

为了获得最佳的降解效率, 系统研究了各反应参数, 包括反应温度、溶液 pH 值、催化剂用量和 H_2O_2 浓度对石油废水 COD 去除率的影响。

2.2.1 反应温度的影响

前人的研究表明, 温度对 Fenton 催化反应有显著影响, 一般情况下, 在一定范围内升高温度会加快反应速率。本文选取 25~85 °C 共 5 个温度梯度, 分别测量了不同温度下非晶合金条带去除石油废水 COD 的性能, 结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在温度 25~85 °C 之间, 反应温度对非晶条带的降解性能没有明显影响。这一发现不同于文献通常报道的反应温度促进非晶合金染料污水降解性能的结论^[12-13]。这可能是由于本研究采用的是组分复杂的实际油田污水, 并非实验室模拟的单一有机污染

物, 而不同化学性质的污染物 (包括油质、各种离子、大分子有机污染物等) 混合在一起对温度不敏感或不呈现单一线性变化。但值得注意的是: 非晶合金在室温 (25 °C) 即能发生高效催化降解反应, 这对实际应用更为有利, 可以极大地节省成本。

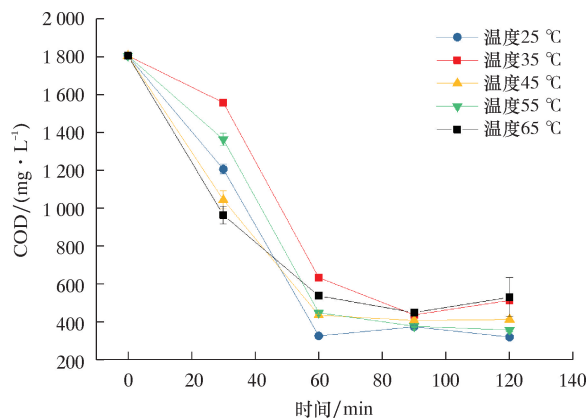


图 2 反应温度对非晶合金降解石油废水 COD 的影响曲线
Fig. 2 The effect of reacting temperature on the degradation of COD in oilfield wastewater by amorphous alloy

2.2.2 pH 值的影响

本文使用的油田废水初始 pH 值为 6.7, 而对于 Fenton 反应机理来说, 一般需要在酸性条件下才能反应^[14]。为研究 pH 值对非晶合金降解效率的影响, 笔者选取了 pH 值为 2.0、3.0、4.0、5.0 和未处理过的水样 (pH 值为 6.7) 进行研究, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 在 pH 值为 2.0~7.0 范围内, pH 值越小, COD 去除率越高。在 pH 值为 2.0~3.0 时, COD 去除效率达到 80%。值得关注的是: 在中性条件下 COD 的去除率也能到达 60%。这说明非晶合金在处理石油钻井废水时能够减少酸性溶液的使用量, 进而可以节约成本。溶液 pH 值会影响非晶条带表面氧化层的带电性, 有利于静电吸附带电的有机污染物分子。此外, 在酸性条件下, 非晶合金表面难以形成致密的氧化层结构, 可提供更多的反应位点, 从而提高降解效率。与传统催化剂相比, FeSiB 非晶条带的表面性质受各类金属元素的控制, 适当降低 Si 含量而提高 Fe 含量能避免致密氧化层 (SiO_2) 的形成, 所以在中性的 pH 环境中, 该非晶合金催化剂依然保持了较好的降解性能。

2.2.3 催化剂用量的影响

在催化剂用量工艺上分别选取 1、5、10、15 和 20 g/L 共 5 种不同的用量, 研究其对非晶合金去除 COD 的影响。由图 4 可以看出, 在催化剂用量为 1 g/L 时, 非晶合金催化剂用量处于不足状

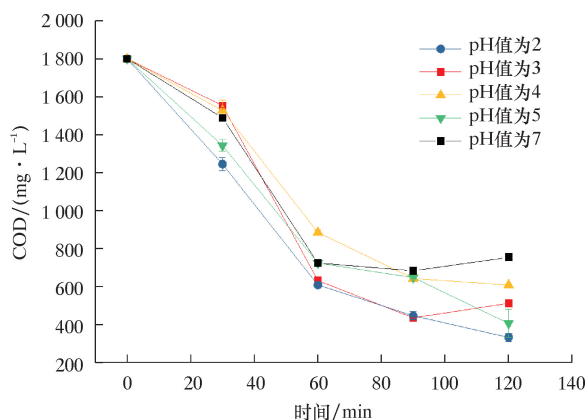


图3 pH值对非晶合金降解石油废水COD的影响曲线

Fig. 3 The effect of pH on the degradation of COD in oilfield wastewater by amorphous alloy

态,反应60 min后COD仍高达1 000 mg/L,进一步延长反应时间,COD略微降低但仍保持在较高水平(700 mg/L以上);催化剂用量在5~20 g/L之间时,COD去除效果比1 g/L时显著提升,COD去除率在反应90 min时达到最大(高于80%)。但在此范围内,并非催化剂用量越大,COD去除效率越高,推测非晶合金催化剂用量已处于过量状态。过量的Fe基催化剂会导致 H_2O_2 无效分解产生 O_2 ^[15],进而降低体系氧化效率。考虑经济成本,本文选择5 g/L作为最佳的催化剂用量。

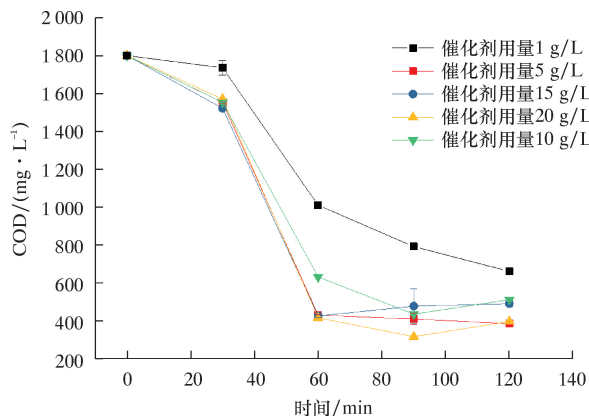


图4 催化剂用量对非晶合金降解石油废水COD的影响曲线

Fig. 4 The effect of catalyst concentration on the degradation of COD in oilfield wastewater by amorphous alloy

2.2.4 H_2O_2 浓度的影响

H_2O_2 是Fenton反应中最常用的一种氧化剂,一般需要与催化剂联用才能高效地催化降解废水污染物。与常见的Fenton反应过程类似,非晶条带与 H_2O_2 降解油田钻井废水污染物的过程同样发生在非晶合金表面,即废水中的有机物被近非晶表面的强氧化性 $\cdot OH$ 氧化分解。在此过程中, H_2O_2 用

量是影响降解性能的关键因素,因此笔者选取了7种 H_2O_2 用量(0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12和0.14 mol/L)来研究其对非晶条带降解性能的影响,结果如图5所示。

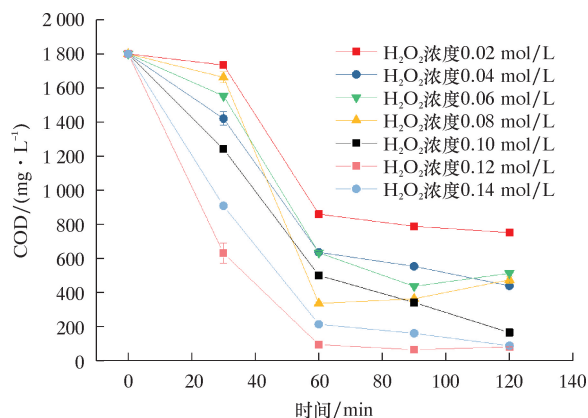
图5 H_2O_2 浓度对非晶合金降解石油废水COD的影响曲线

Fig. 5 The effect of H_2O_2 concentration on the degradation of COD in oilfield wastewater by amorphous alloys

由图5可知,在0.12 mol/L之前, H_2O_2 浓度越大,COD去除率越高,并且在0.12 mol/L处达到顶点。若 H_2O_2 浓度继续增大,在0.14 mol/L处COD去除率反而降低。这是因为过量的 H_2O_2 与羟自由基($\cdot HO$)能进一步发生耦合反应($H_2O_2 + \cdot HO \rightarrow \cdot HO_2$)^[16],消耗掉部分 $\cdot HO$ 而生成氧化能力较弱的 $\cdot HO_2$,降低降解效率。在最佳反应条件下,非晶合金与 H_2O_2 的催化系统COD去除率高达90%以上(依据污水排放国家二级标准要求,当进水COD超过350 mg/L时,COD去除率需超过60%),最低的COD仅为100 mg/L。综合以上原因,在工艺优化中选择0.12 mol/L作为最佳的 H_2O_2 用量。

2.2.5 纳米 MoS_2 助催化剂的影响

研究发现,纳米 MoS_2 可以作为一种高效的助催化剂,能有效加速均相Fenton体系中 H_2O_2 的分解速率^[3]。其基本原理是利用 MoS_2 的还原活性中心,原位还原水相中 Fe^{3+} ,从而提高Fe循环效率与催化活性。根据这一原理,开展了非晶合金/ MoS_2 共催化剂的研究。 MoS_2 采用商用纳米粉末。根据XING M. Y.等^[3]的研究,Fenton反应中 MoS_2 添加量可选用0.3~3.0 g/L。为了最大程度地展现纳米 MoS_2 助催化剂是否对非晶合金降解石油废水有效果,本研究 MoS_2 添加量选取了最大值3.0 g/L。在上述试验优化出的最佳条件下,进行非晶合金催化降解油田废水污染物性能测试,结果如图

6所示。由图6可知, MoS₂助催化剂的加入在一定程度上提高了非晶合金降解污染物速率, 但对最终COD去除率没有影响。这可能与非晶合金/H₂O₂依靠Fe⁰与Fe²⁺共同作用的异相Fenton体系有关。

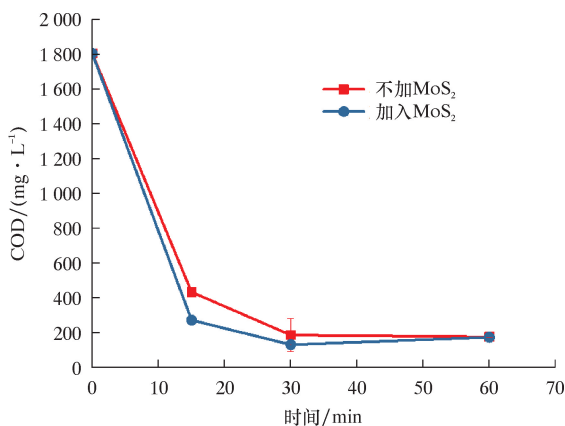
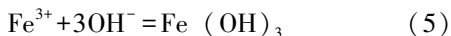
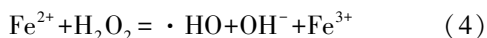


图6 纳米 MoS₂助催化剂对非晶合金降解石油废水 COD 的影响曲线

Fig. 6 The effect of nano-MoS₂ on the degradation of COD in oilfield wastewater by amorphous alloy

2.2.6 外场电流的影响

为了进一步提高非晶合金处理石油废水的能力, 尝试在反应体系内引入外场电流, 开发出了基于电 Fenton 技术的铁基非晶合金高效催化处理石油废水的系统。反应系统中的 Fe²⁺由非晶合金催化剂氧化产生, H₂O₂由外界加入。电解槽通电时, 体系中除产生·OH外, 还有强絮凝、络合及吸附作用产生的 Fe(OH)²⁺和 Fe(OH)₃, 对有机物的去除效果好。电解槽内的电极反应如下:



试验研究了6个不同的电流强度对非晶合金催化剂氧化去除石油废水COD的影响, 如图7所示。由图7可知, 外加电流确实大幅加快了Fenton反应速度。随着外加电流密度的增大, COD去除率逐步增加。当电流密度为5 mA/cm²时, 30 min前就达到了最大的COD去除率(90%), 处理后COD仅为100 mg/L左右。但当电流密度超过5 mA/cm²以后, 继续增大电流密度对Fenton体系的催化反应并没有促进作用。这是因为高电流密度一方面会增加溶液中羟自由基浓度, 另一方面也会加速双氧水分解并促使副反应(析氢反应)和极化作用的加剧, 从而降低羟自由基数量。因此, 从

催化性能、能耗以及经济性3方面考虑, 确定5 mA/cm²的电流密度为电Fenton/非晶合金催化剂技术应该施加的最佳电流强度。

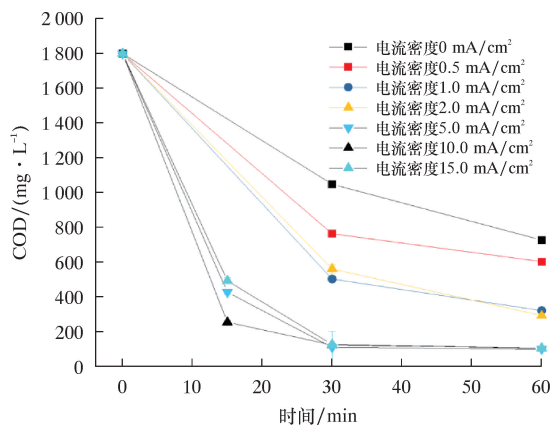


图7 外场电流密度对非晶合金降解石油废水 COD 的影响曲线

Fig. 7 The effect of external current density on the degradation of COD in oilfield wastewater by amorphous alloy

采用ICP-M测量了处理后水样中离子质量浓度, 发现除了铁离子之外, 其他离子的质量浓度在处理前后并无明显变化, 原因是Fenton氧化反应在催化过程中析出微量铁离子, 造成铁离子浓度上升; 另外, Cl⁻质量浓度为9.136 g/L, 由滴定法测出。处理后的水样中未检测到有毒的重金属离子。采用电Fenton非晶合金复合技术处理钻井废水30 min后的外观照片如图8所示。由图8可见, 原始废水呈现浑浊的深褐色, 处理后的水样无色无味, 且COD很低。



图8 处理前、后石油废水外观对比

Fig. 8 The appearances of oilfield wastewater before and after treatment

3 结论

(1) 系统研究了非晶合金催化剂去除油田钻

井废水 COD 的性能,发现高 Fe 含量非晶合金 (FeSiB) 具有更好的 COD 去除效果。

(2) 通过非晶合金 Fenton 技术降解钻井废水的工艺研究得到了合适的反应条件,即非晶合金用量为 5 g/L, pH 值为酸性, H_2O_2 浓度为 0.12 mol/L, 反应温度 25 °C。在该工艺条件下获得了最高 COD 去除率 (>90%, 2 h 处理时间)。

(3) 研究了纳米 MoS_2 助催化剂对 COD 去除率的影响,发现其可以适当提高降解速率,但对最终降解效率影响不大。通过施加外场电流,非晶合金的降解能力得到了有效提高。当电流密度达到 5 mA/cm² 时, COD 去除率在 30 min 内达到 90%, 降解后 COD 为 100 mg/L。非晶合金电 Fenton 技术更适合高效、快速处理油田钻井废水。

参 考 文 献

- [1] 印树明. 大港油田钻井废水深度处理技术研究 [D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2010.
YIN S M. Study on drilling waster water advanced treatment technique for Dagang Oilfield [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2010.
- [2] 唐一鸣, 李启彬, 陈炜鸣, 等. Fenton 法处理聚合物钻井废水中有机物的实验研究 [J]. 工业水处理, 2019, 39 (3): 58-62.
TANG Y M, LI Q B, CHEN W M, et al. Experimental research on the treatment of organic matter in polymer drilling wastewater by Fenton process. [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39 (3): 58-62.
- [3] 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.
- [4] WANG J Q, LIU Y H, CHEN M W, et al. Rapid degradation of azo dye by Fe-based metallic glass powder [J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22 (12): 2567-2570.
- [5] JIA Z, DUAN X G, QIN P, et al. Disordered atomic packing structure of metallic glass: toward ultrafast hydroxyl radicals production rate and strong electron transfer ability in catalytic performance [J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27 (10): 1001-1011.
- [6] LIANG S X, JIA Z, LIU Y J, et al. Compelling rejuvenated catalytic performance in metallic glasses [J]. Advance Materials, 2018 (2): 1802764.
- [7] 王盼. 铁基非晶在苯酚废水处理中的应用 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
WANG P. Application of Fe-based metallic glass in treating phenol wastewater [D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [8] DENG Z, ZHANG X H, CHAN K C, et al. Fe-based metallic glass catalyst with nanoporous surface for azo dye degradation [J]. Chemosphere, 2017, 174 (5): 76-81.
- [9] CHEN S Q, YANG G N, LUO S T, et al. Unexpected high performance of Fe-based nanocrystallized ribbon for azo dye decomposition [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 27 (5): 1206-1212.
- [10] YANG W M, WANG Q Q, LI W Y, et al. A novel thermal-tuning Fe-based amorphous alloy for automatically recycled methylene blue degradation [J]. Materials and Design, 2019, 161: 136-146.
- [11] 欧阳鸿武, 陈欣, 余文焘, 等. 气雾化制粉技术发展历程及展望 [J]. 粉末冶金技术, 2007, 25 (1): 53-63.
OUYANG H W, CHEN X, YU W T, et al. Progress and prospect on the gas atomization [J]. Powder Metallurgy Technology, 2007, 25 (1): 53-63.
- [12] QIN X D, ZHU Z W, LIU G, et al. Ultrafast degradation of azo dyes catalyzed by cobalt-based metallic glass [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 2045-2322.
- [13] WANG Q Q, YUN L, CHEN M X, et al. Competitive effects of structural heterogeneity and surface chemical states on catalytic efficiency of FeSiBPCu amorphous and nanocrystalline alloys [J]. ACS Appl. Nano. Mater., 2019, 2: 214-227.
- [14] CRANE R A, SCOTT T B. Nanoscale zero-valent iron: future prospects for an emerging water treatment technology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 211/212: 112-125.
- [15] MERIC S, SELCUK H, BELGIORNO V. Acute toxicity removal in textile finishing wastewater by Fenton's oxidation, ozone and coagulation-flocculation processes [J]. Water Research, 2005, 39 (6): 1147-1153.
- [16] YANG C, ZHANG C, LIU L. Excellent degradation performance of 3D hierarchical nanoporous structures of copper towards organic pollutants [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 42 (6): 20992.

第一作者简介: 刘凯文, 高级工程师, 生于 1968 年, 2003 年毕业于清华大学环境工程专业, 现从事油气田水处理技术及装备开发等方面的研究工作。地址: (430074) 湖北省武汉市。电话: (027) 83567929。E-mail: liukaiw@cnpc.com.cn。

收稿日期: 2019-12-30

(本文编辑 王刚庆)