

碱改性 ZSM-5 负载金属组分催化臭氧降解工业废水

徐增益¹, 余金鹏^{1,2,3,4}, 李 森¹, 王鹏飞^{1,2,3,4}

(1. 上海化工研究院有限公司, 上海 200062; 2. 上海绿强新材料有限公司, 上海 201608; 3. 聚烯烃催化技术与高性能材料国家重点实验室, 上海 200062; 4. 上海市聚烯烃催化技术重点实验室, 上海 200062)

[摘要] 采用氢氧化钠对 ZSM-5 分子筛进行碱改性, 并结合 SEM、XRD、BET、FT-IR、UV-Vis 等技术对其进行了分析。利用改性后的 ZSM-5 分子筛负载 Fe、Mn、Co 等活性组分制备了 Fe/ZSM-5(1)、Mn/ZSM-5(1)、Co/ZSM-5(1) 负载型催化剂, 并用其催化臭氧降解工业废水, 考察了 3 种催化剂的催化降解效果。结果表明, Co/ZSM-5(1) 负载型催化剂的催化降解效果最佳。处理 200 mL COD 为 400~500 mg/L 的工业废水, 当 Co/ZSM-5(1) 催化剂投加量为 1.0 g/L, 温度为 40 ℃, pH 为 6~7, 臭氧质量浓度为 4 mg/L, 臭氧通量为 25 L/h, 反应 60 min 时, 废水 COD 降解率可达 89.7%。该催化剂性能较为稳定, 循环使用 4 次后仍具有较好的 COD 降解效果。

[关键词] 工业废水; 臭氧; 碱改性; ZSM-5 分子筛; 催化氧化

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0109-05

Catalytic ozonation degradation of industrial wastewater by alkaline modified ZSM-5 supported metal component

XU Zengyi¹, YU Jinpeng^{1,2,3,4}, LI Sen¹, WANG Pengfei^{1,2,3,4}

(1. Shanghai Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Shanghai 200062, China;
2. Shanghai Lvqiang New Materials Co., Ltd., Shanghai 201608, China; 3. State Key Laboratory of Polyolefin Catalytic Technology and High Performance Materials, Shanghai 200062, China;
4. Shanghai Key Laboratory of Catalysis Technology for Polyolefins, Shanghai 200062, China)

Abstract: The ZSM-5 molecular sieve was modified by sodium hydroxide, and analyzed by SEM, XRD, BET, FT-IR, UV-Vis and other characterization techniques. Fe/ZSM-5(1), Mn/ZSM-5(1) and Co/ZSM-5(1) supported catalysts were prepared by using modified ZSM-5 molecular sieve supported with active components such as Fe, Mn and Co. The prepared catalysts were used to catalyze ozone degradation of industrial wastewater to investigate their catalytic degradation effects. The results showed that Co/ZSM-5(1) supported catalysts had the best catalytic degradation effect. The COD degradation ratio of wastewater could reach 89.7% at conditions of 200 mL of industrial wastewater with COD of 400~500 mg/L, Co/ZSM-5(1) catalyst dosage 1.0 g/L, temperature 40 ℃, pH 6~7, ozone concentration 4 mg/L, ozone flux 25 L/h and time 60 min. Moreover, the performance of catalyst was relatively stable, and it still had a good wastewater COD degradation effect after 4 times recycle usage.

Key words: industrial wastewater; ozone; alkali modification; ZSM-5 molecular sieve; catalytic oxidation

近年来,随着我国工业化进程的不断加快,产生的工业废水量大大增加^[1]。工业废水对环境造成的危害远远高于生活污水,且其成分日益复杂,处理难度日益增大^[2-4]。工业废水中含有苯系物、表面活性

剂等多种有毒有害物质,若废水中的有害物质超标排放,将严重影响水生生物的生长,导致水体环境急剧恶化,并对人类健康产生危害^[5-7]。

截至目前,国内外学者对工业废水的降解已进

行了大量的研究。研究表明,采用传统的物理法^[8-10]、生物法^[11-13]、化学法^[14-16]等降解工业废水均存在一定的局限性,特别是对于组分复杂的工业废水的降解效果更是有待提高。由此,Fenton 氧化法、臭氧氧化法、光催化氧化法以及湿式氧化法等高级氧化技术应运而生,其中,臭氧氧化技术因其安全、装置简单、操作方便等优点而备受青睐。但臭氧单独作用对废水中有机物的处理效果有限,若采用催化剂催化臭氧氧化降解废水中的有机物,则处理效果会明显提升。目前,常见的用于工业废水处理的催化剂载体为硅藻土、活性炭、分子筛等^[17-19],其中,ZSM-5 分子筛是近年来研究的热点。ZSM-5 分子筛结构稳定、比表面积较大,而对其进行碱改性则可以优化孔道结构,提高活性组分的负载性能^[20]。

本研究以 ZSM-5 分子筛作为催化剂载体,采用氢氧化钠对其进行碱改性,探究了碱改性后 ZSM-5 的结构特征变化情况。利用改性后的 ZSM-5 分子筛分别负载 Fe、Mn、Co 活性组分制备的负载型催化剂催化臭氧降解工业废水,考察了不同催化剂的催化降解效果。

1 实验部分

1.1 试剂

氢氧化钠,分析纯,上海强顺化学试剂有限公司;六水硝酸钴、四水硝酸锰、九水硝酸铁、重铬酸钾、硫酸汞、浓硫酸(纯度>98%),分析纯,上海国药化学试剂集团有限公司;硫酸银、邻苯二甲酸氢钾,优级纯,上海国药化学试剂集团有限公司;ZSM-5 分子筛,上海复旭分子筛有限公司。

1.2 实验废水

废水取自浙江绍兴某厂印染废水,主要污染物为对苯二甲酸、乙二醇等,废水 COD 在 10 000~11 000 mg/L 之间。根据实验需要,稀释成 COD 为 400~500 mg/L 的实验用废水。

1.3 复合催化剂制备

取 20 g 硅铝物质的量比为 36 的 ZSM-5 分子筛浸渍于 100 mL 浓度为 0.15 mol/L 的 NaOH 溶液中,在 50 ℃下浸渍 2 h。静置 24 h,过滤浸渍液并洗涤至中性,然后在 120 ℃下烘干,再在 550 ℃下焙烧 4 h,备用,记作 ZSM-5(1)。分别取 3 g 碱改性后的 ZSM-5 于 10 mL 质量分数为 10%的硝酸铁、硝酸锰、

硝酸钴的溶液中浸渍 2 h,然后在 150 ℃下烘干,再在 550 ℃下焙烧 4 h。冷却后,密封留存,并分别记为 Fe/ZSM-5(1)、Zn/ZSM-5(1)、Co/ZSM-5(1)。将未经碱处理的 ZSM-5 直接负载活性组分制备的催化剂分别记为 Fe/ZSM-5(0)、Mn/ZSM-5(0)、Co/ZSM-5(0)。

1.4 表征方法

采用 Merlin Compact 型扫描电子显微镜对样品进行形貌表征;采用 PE Spectrum Two 傅立叶红外光谱仪对样品进行结构分析;采用 ASAP 2020 型物理吸附仪进行 BET 相关表征;采用日立 UV-3010 紫外光谱仪对样品进行漫反射分析;采用 D/max-2550VB/PC 型 X 射线衍射仪进行晶体结构分析,测试条件:衍射源 Cu-K α ($\lambda=0.154$ nm),管电流 40 mA,管电压 40 kV,扫描速率 2 (°)/min,扫描范围 5°~90°。

1.5 催化剂的评价方法

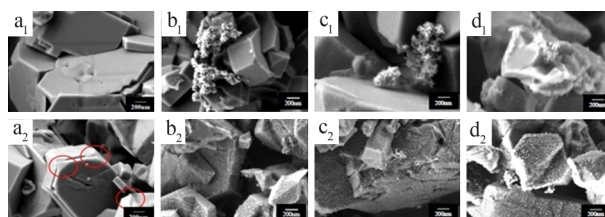
取 200 mL 实验废水置于 400 mL 的玻璃反应器中,调节溶液 pH 为 6~7。从反应器的底端通入臭氧,臭氧通量为 25 L/h,控制臭氧质量浓度为 4 mg/L,然后投加 1.0 g/L 的催化剂,在温度 40 ℃下进行反应。定时取样,测定 COD。采用重铬酸钾法测定废水 COD,COD 值用邻苯二甲酸氢钾法校正。

2 结果与讨论

2.1 表征分析

2.1.1 扫描电镜(SEM)分析

图 1 为碱改性前后 ZSM-5 分子筛及制备的负载型催化剂的形貌图。



a₁—ZSM-5; a₂—ZSM-5(1); b₁—Co/ZSM-5(0); b₂—Co/ZSM-5(1); c₁—Fe/ZSM-5(0); c₂—Fe/ZSM-5(1); d₁—Mn/ZSM-5(0); d₂—Mn/ZSM-5(1)。

图 1 碱改性前后 ZSM-5 分子筛及制备的负载型催化剂的扫描电镜图

Fig. 1 SEM of ZSM-5 molecular sieve and the prepared supported catalyst before and after alkali modification

由图 1 可见,没有经过碱处理的 ZSM-5 原粉表面及棱角处相对光滑,颗粒粒径相对较大;经过碱处理后的 ZSM-5 分子筛颗粒表面及棱角处皆出现了

轻微的破损及腐蚀现象,但仍保持了 ZSM-5 分子筛原有的形貌特征,这可能是因为碱液虽可对 ZSM-5 分子筛造成腐蚀,但由于碱液的浓度适中,使得分子筛破损及腐蚀程度较小^[20]。由图 1 还可以较为明显地看出,经碱改性后的 ZSM-5 表面负载的金属活性组分更为均匀,而未经碱改性的 ZSM-5 表面负载的金属活性组分存在黏连、堆积现象,分布十分不均匀,这说明碱改性有利于金属活性组分在 ZSM-5 表面上均匀分布。

2.1.2 X 射线衍射(XRD)分析

碱改性前后 ZSM-5 分子筛及制备的负载型催化剂的 XRD 表征结果如图 2 所示。

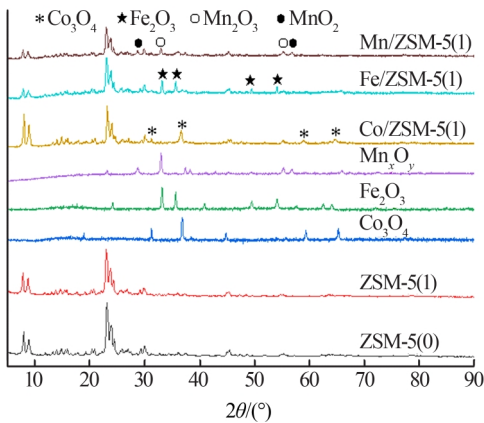


图2 碱改性前后 ZSM-5 分子筛及制备的负载型催化剂的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD spectrogram of ZSM-5 molecular sieve and the prepared supported catalyst before and after alkali modification

由图 2 可以看出,改性前后的 ZSM-5 分子筛在 2θ 为 7.9°、8.8°、22.9°、23.8°、24.3°处均出现较为明显的特征衍射峰,表明经过碱改性后的 ZSM-5 分子筛仍保留了 ZSM-5 特有的晶体结构。碱改性后的 ZSM-5 的衍射峰强度较未改性的 ZSM-5 衍射峰强度有所降低,这可能是由于碱液对 ZSM-5 分子筛骨架的轻微腐蚀作用所致,与 SEM 表征结果相吻合。此外,对比金属氧化物的特征衍射峰位置可以看出,负载型催化剂出现了相应金属氧化物的特征衍射峰,分子筛表面成功负载上了金属组分;但出峰位置较少,峰强较弱,这表明金属活性组分在载体上高度分散。

2.1.3 比表面积(BET)分析

碱改性前后 ZSM-5 分子筛的 BET 分析结果见表 1。

表 1 改性前后 ZSM-5 分子筛结构性性质变化

Table 1 ZSM-5 structure change before and after modification

样品	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	孔容/(cm ³ ·g ⁻¹)	孔径/nm
ZSM-5 原粉	315.1	0.214	2.822
碱改性 ZSM-5	324.8	0.273	3.105

由表 1 可知,相比 ZSM-5 原粉,经过碱改性后的 ZSM-5 分子筛的比表面积、孔径和孔容均出现了一定程度的增大。一方面可能是由于碱液清除了 ZSM-5 分子筛孔道以及表面易溶于碱或与碱反应的杂质,导致孔容、孔径增大;另一方面可能是碱液能够溶解 ZSM-5 中的骨架硅,同样导致孔容、孔径增大^[20]。可见,0.15 mol/L 的 NaOH 溶液对 ZSM-5 分子筛可以起到改性效果。

2.1.4 傅立叶变换红外光谱(FT-IR)分析

图 3 为碱改性前后 ZSM-5 分子筛的 FT-IR 表征结果。

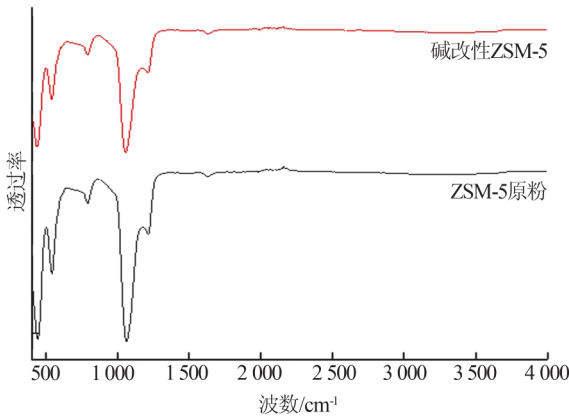


图3 改性前后 ZSM-5 分子筛的FT-IR 图

Fig. 3 FT-IR spectrogram of ZSM-5 before and after modification

由图 3 可知,碱改性前后的 ZSM-5 在 400~1 300 cm⁻¹ 范围内均出现了相同的特征吸收峰,表明碱改性并没有改变 ZSM-5 分子筛的结构。经过碱改性后的 ZSM-5 的特征峰强度较 ZSM-5 原粉略有减弱,这可能是由于碱液对 ZSM-5 分子筛造成了一定程度的侵蚀^[21]。此外,从图 3 还可以看出,改性前后的 ZSM-5 在 1 630 cm⁻¹ 处均有小峰出现,为 H—O—H 弯曲振动而产生的特征峰,ZSM-5 分子筛可从环境中吸收水分,这也从侧面说明了改性前后的 ZSM-5 都具有多孔结构,与 BET 的表征结果一致。

2.1.5 紫外可见漫反射(UV-Vis)分析

图 4 为碱改性前后 ZSM-5 分子筛的 UV-Vis

表征结果。

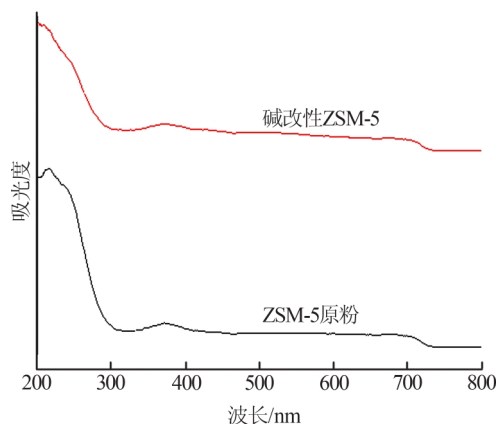


图4 改性前后 ZSM-5 分子筛的 UV-Vis 谱图

Fig. 4 UV-Vis spectrogram of ZSM-5 before and after modification

由图 4 可知, 未经过碱改性的 ZSM-5 的特征峰较为明显; 而经碱改性后的 ZSM-5 分子筛的特征峰强度出现了减小的趋势, 且吸收峰出现了蓝移, 这可能是由于 ZSM-5 分子筛的骨架被部分溶解, 使得吸收峰减小。

2.2 催化剂性能评价

2.2.1 碱改性 ZSM-5 负载活性组分降解废水的效果对比

在相同的实验条件下, 分别采用碱改性 ZSM-5 负载金属活性组分得到的 Fe/ZSM-5(1)、Co/ZSM-5(1)、Mn/ZSM-5(1) 3 种催化剂催化臭氧降解实验废水, 结果见图 5。

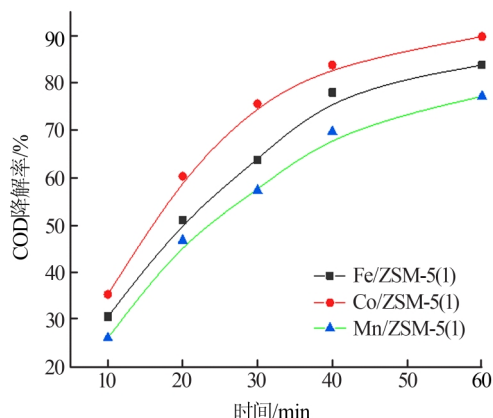


图5 碱改性 ZSM-5 负载活性组分对 COD 的催化降解效果

Fig. 5 COD degradation effect by the alkali-modified ZSM-5 loaded active components

通过图 5 可以看出, Fe/ZSM-5(1)、Mn/ZSM-5

(1)、Co/ZSM-5(1) 对废水都具有一定的催化降解效果, 反应 30 min 后, 在 3 种催化剂的作用下, 废水 COD 的降解率均高于 50%。3 种催化剂的催化性能由大到小依次为 Co/ZSM-5(1) > Fe/ZSM-5(1) > Mn/ZSM-5(1)。以 Co/ZSM-5(1) 为催化剂, 在 20 min 内, COD 降解率已经达到了 60% 左右; 反应 60 min 时, COD 降解率可达 89.7%。有研究表明^[22], Co 的酸性位点和臭氧的酸性位点互补。因此, Co 活性组分可以更好地分解臭氧, 产生更多具有强氧化性的羟基自由基, 从而使降解效果得到显著提升。

2.2.2 不同体系下废水降解效果的比较

探究不同体系对废水 COD 的降解效果, 结果见图 6。

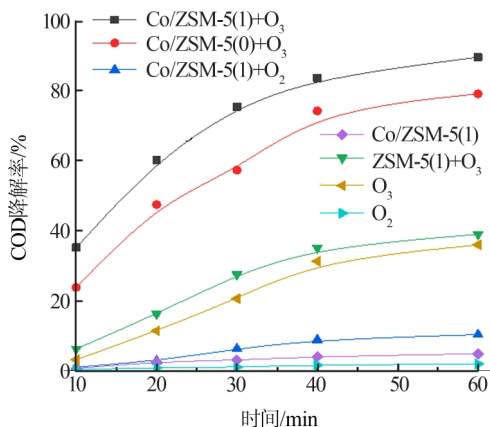


图6 不同体系对废水 COD 的降解效果

Fig. 6 COD degradation effect under different systems

由图 6 可见, Co/ZSM-5(1) 协同臭氧作用的体系对废水 COD 的降解效果最好, 60 min 时 COD 降解率可达 89.7%; 其次是 Co/ZSM-5(0) 和臭氧组成的体系, 60 min 内 COD 降解率可达 79.2%。在 ZSM-5(1) 和臭氧协同作用下, 60 min 内 COD 降解率为 39.1%, 较臭氧单独作用的 COD 降解率增加了 3.0%, 这可能是由于 ZSM-5(1) 少量的吸附作用所致, 表明 ZSM-5(1) 在本体系下仅起到了催化剂载体的作用。60 min 内 Co/ZSM-5(1) 单独作用下的 COD 降解率为 4.9%; 空气单独作用下的 COD 降解率为 2.0%, 几乎没有降解效果。Co/ZSM-5(1)+空气体系 60 min 内对废水 COD 的降解率达 10.4%, 高于金属催化剂和空气单独作用的效果, 表明催化剂可催化空气对废水中有机物产生一定的降解, 但降解效果一般。

实验结果表明,Co/ZSM-5(1)对废水 COD 具有较为可观的催化降解能力,这可能是因为相比 Co/ZSM-5(0),经过碱改性的 ZSM-5 的比表面积及孔容、孔径均有所增大,使得可吸附废水中有机大分子的活性位点增多,为反应体系提供了更多的接触场所;且经碱改性后的 ZSM-5 负载的金属活性组分较未改性的 ZSM-5 分布更均匀,活性作用点数量更多,故降解效果更为明显。Co/ZSM-5(1)协同臭氧作用的效果远高于 Co/ZSM-5(1)和臭氧二者单独作用的加和,臭氧的利用率显著提升。这可能是因为一部分臭氧可直接氧化降解有机物大分子,一部分臭氧被金属催化剂分解产生具有更强氧化性的羟基自由基,进一步进攻有机物大分子,进而增强了降解废水的效果。

2.2.3 Co/ZSM-5(1)催化剂的稳定性

回收催化剂,在 150 ℃下烘干后,再移至马弗炉中于 550 ℃下焙烧 4 h 后复用。在相同的实验条件下,投加相同剂量的 Co/ZSM-5(1)催化剂进行废水降解实验,催化剂循环使用 4 次。Co/ZSM-5(1)催化剂的重复使用效果及金属离子溶出情况见表 2。

表 2 催化剂重复使用效果及 Co 离子溶出情况

Table 2 Catalyst reuse effect and Co ion dissolution	循环次数	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
COD 降解率/%		89.7	87.6	83.7	81.5
Co 析出量/% (以质量分数计)		0.62	0.55	0.44	0.49

通过表 2 可以看出,Co/ZSM-5(1)催化剂循环使用 4 次后,COD 降解率从 89.7%下降至 81.5%,循环使用到第 4 次,催化剂对废水 COD 仍保持着较优的催化降解效果。而 Co/ZSM-5(0)重复使用 1 次,COD 降解率即下降了 20.7%。

Co/ZSM-5(1)的重复使用效果较好,且金属离子溶出量较少。金属离子随着重复使用次数的增加而减少,致使催化分解臭氧的作用体减少,故废水 COD 的降解率相应呈下降趋势。但因催化剂载体经过碱液改性,负载的活性组分较为稳定,脱落程度小,所以在循环使用了 4 次后,仍保持了较高的 COD 降解率。

3 结论

(1)表征结果表明,经 0.15 mol/L NaOH 改性的 ZSM-5 仍保留了原有的晶体结构,部分形貌出现

轻微腐蚀、微损现象,孔容和孔径均在一定程度上增加。

(2)催化剂性能评价实验结果表明,在以碱改性 ZSM-5 负载金属活性组分制备的 3 种负载型催化剂中,Co/ZSM-5(1)的催化降解效果最佳。处理 200 mL COD 为 400~500 mg/L 的工业废水,当 Co/ZSM-5(1)催化剂投加量为 1.0 g/L,温度为 40 ℃,pH 为 6~7,臭氧质量浓度为 4 mg/L,臭氧通量为 25 L/h,反应 60 min 时,废水 COD 的降解率可达 89.7%。该催化剂性能较为稳定,在使用 4 次后,废水 COD 的降解率仍可达 81.5%。

参考文献

[1] HONG Bin, CUI Guangbai, ZHANG Runrun, et al. Study on the evaluation of economic loss caused by water pollution in China[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(5): 15-17.

[2] 钱莎莎,王伟,王志宁,等. 难降解精细化工废水深度处理技术的研究进展[J]. 化工管理, 2020(34): 96-97.

[3] 谢慧娜,嵇斌,李杰,等. 响应面法优化 Fenton 预处理精细化工废水[J]. 环境科学研究, 2019, 32(8): 1419-1426.

[4] 章森森. 工业废水处理方法研究及技术进展探析[J]. 化工管理, 2019(12): 52-53.

[5] HERNANDEZ-FRANCISCO E, PERAL J, BLANCO-JEREZ L M. Removal of phenolic compounds from oil refinery wastewater by electro-coagulation and Fenton/photo-Fenton processes[J]. Journal of Water Process Engineering, 2017, 19: 96-100.

[6] JUN L Y, YON L S, MUBARAK N M, et al. An overview of immobilized enzyme technologies for dye and phenolic removal from wastewater[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(2): 446-459.

[7] ALSHABIB M, ONAIZI S A. A review on phenolic wastewater remediation using homogeneous and heterogeneous enzymatic processes; Current status and potential challenges[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 219: 186-207.

[8] 张小璇,叶李艺,沙勇,等. 活性炭吸附法处理染料废水[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2005, 44(4): 542-545.

[9] PONNUSAMY S K, SUNITA V J, SUBBURAJ S. Treatment of dye wastewater using an ultrasonic aided nanoparticle stacked activated carbon; Kinetic and isotherm modeling[J]. Bioresource Technology, 2018, 250: 716-722.

[10] 刘桂芳,马军,关春雨,等. 改性活性炭对水溶液中双酚-A 的吸附研究[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 349-355.

[11] AKSU Z, GONEN F. Binary biosorption of phenol and chromium(VI) onto immobilized activated sludge in a packed bed: Prediction of kinetic parameters and breakthrough curves[J]. Separation and Purification Technology, 2006, 49(3): 205-216.

(下转第 118 页)

件清洗恢复效果良好,采用常规清洗方法,通量恢复率达到 98%。

(2)采用耐高温的超滤膜组件,产水水质稳定,产水浊度 ≤ 0.1 NTU,SDI₁₅ ≤ 5 ,可有效去除原水中的悬浮物和胶体,满足后续工艺要求。

(3)在水温为 75~90℃条件下,耐高温的超滤膜组件运行时未出现变形、浇注胶面开裂等情况,可连续稳定运行。研究表明,制备的新型中空纤维超滤膜组件适用于高温凝结水的处理。

参考文献

- [1] 朱俊明,李广虎. 高温凝结水回收节能效益分析[J]. 能源研究与利用,2014(1):45-47.
- [2] 邢卫红,徐南平. 膜集成工艺处理高温凝结水的方法:中国,200710024848.8[P]. 2009-10-07.
- [3] 赵姗姗. 用于高温凝结水回用的超滤和纳滤膜的制备及性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [4] 王玉东. 炼油厂蒸汽凝结水处理措施[J]. 化工设计通讯,2018,44(2):206.
- [5] 周莉,高利民,祝晓亮,等. 石化高温凝结水除盐技术实验研究[J]. 水处理技术,2015,41(3):96-98.
- [6] 冷树成. 凝结水的净化技术[J]. 工业水处理,2010,30(3):64-67.
- [7] 徐德志,相波,邵建颖,等. 膜技术在工业废水处理中的应用研究进展[J]. 工业水处理,2006,26(4):1-4.
- [8] 齐鲁山,孙惠山. 陶瓷膜除油除铁装置回收高温凝结水应用研究[J]. 辽宁化工,2019,44(8):770-772.
- [9] 唐元晖,林亚凯,李倩,等. 热致相分离法聚偏氟乙烯膜的制备及应用[J]. 膜科学与技术,2015,35(2):98-107.
- [10] 何柳东,林亚凯,赵杰,等. 一种用于微/超滤膜组件浇注的耐温型环氧胶:中国,201610903584.2[P]. 2017-02-15.
- [作者简介] 何柳东(1982—),硕士,高级工程师. E-mail:liuhedong@126.com. 通讯作者:林亚凯, E-mail:yk_lin@tsinghua.edu.cn.
- [收稿日期] 2021-07-28(修改稿)

(上接第 113 页)

- [12] FELFOLDI T, SZEKELY A J, GORAL R, et al. Polyphasic bacterial community analysis of an aerobic activated sludge removing phenols and thiocyanate from coke plant effluent[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(10):3406-3414.
- [13] KHAN K A, SUIDAN M T, CROSS W H. Anaerobic activated carbon filter for the treatment of phenol-bearing wastewater[J]. Journal of the Water Pollution Control Federation, 1981, 53(10):1519-1532.
- [14] CHAUDHARY A J, GRIMES S M. A combined photolytic-electrolytic system for the simultaneous recovery of copper and degradation of phenol or 4-chlorophenol in mixed solutions[J]. Chemosphere, 2008, 72(11):1636-1642.
- [15] HARIANTI A R, SAKSONO N. Application of plasma electrolysis method for simultaneous phenol and Cr(VI) wastewater degradation using Na₂SO₄ electrolyte[C]//3rd International Symposium on Applied Chemistry, USA: American Institute of Physics Conference, 2017:020041.
- [16] 尹红霞,康天放,张雁,等. 电化学催化氧化法降解水中甲基橙的研究[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):88-91.
- [17] ZHANG Gaosheng, QU Jiuhui, LIU Huijian, et al. CuFe₂O₄/activated carbon composite: A novel magnetic adsorbent for the removal of acid orange II and catalytic regeneration[J]. Chemosphere, 2007, 68(6):1058-1066.
- [18] SON B H D, MAI V Q, DU D X, et al. Catalytic wet peroxide oxidation of phenol solution over Fe-Mn binary oxides diatomite composite[J]. Journal of Porous Materials, 2017, 24(3):601-611.
- [19] PEEBLES B, NAGY A, WALDMAN W J, et al. Fenton activity and cytotoxicity studies of iron-loaded carbon particles[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(17):6887-6892.
- [20] 徐国皓,余金鹏,徐华胜,等. TPAOH 处理 HZSM-5 分子筛及其催化丙烷脱氢反应性能研究[J]. 石油炼制与化工,2019,50(3):41-47.
- [21] 韩海波,王有和,付春峰,等. 碱处理改性对 Zn/HZSM-5 分子筛催化剂性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2018,37(2):456-461.
- [22] 崔福旭,张晶,张波,等. 金属负载 ZSM-5 分子筛催化臭氧氧化苯酚废水[J]. 辽宁石油化工大学学报,2019,39(2):10-14.
- [作者简介] 徐增益(1995—),硕士研究生. E-mail:1181512974@qq.com. 通讯作者:王鹏飞,博士研究生,教授级高级工程师. E-mail:wpf@sh-lq.com.
- [收稿日期] 2021-07-20(修改稿)