

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2026.01.002

## 聚丙烯酸芬顿催化功能纤维涂层成型及性能

徐乃库<sup>1</sup>, 闫向远<sup>1</sup>, 封 严<sup>2</sup>

(1. 天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387)

**摘要:**为解决活性铁物种流失以及 $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ 循环问题,采用湿法纺丝-后拉伸-紧张热定型工艺制备聚丙烯酸(PAA)芬顿催化纤维,基于氧化聚合机理利用配位态 $Fe^{3+}$ 引发苯胺、吡咯或噻吩在纤维表面聚合,为PAA纤维构建涂层,进而优化铁离子配位PAA纤维的应用性能。结果表明:涂层可提高PAA纤维的力学性能,同时可提高纤维的尺寸稳定性,其中聚苯胺涂层表现最为优异,使PAA纤维的断裂强度提高了45.7%,收缩率降低了49.6%;聚苯胺涂层的引入有效抑制了铁离子流失,在处理染料废水时,循环使用40次时亚甲基蓝(MB)脱色率仍达90%以上,铁离子总滤出质量浓度仅为0.26 mg/L,相比于未涂层PAA纤维降低了95%;聚苯胺涂层的氧化还原特性可有效促进 $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ 的循环,使得涂有聚苯胺涂层的PAA纤维40次脱色亚甲基蓝的总反应时间相比未涂层PAA纤维缩短了18.3%。

**关键词:**聚丙烯酸纤维;芬顿催化功能;纤维表面涂层;染料废水

中图分类号: TS102.52

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2026)01-0010-05

## Coating formation and performance of polyacrylic acid Fenton catalytic functional fiber

XU Naiku<sup>1</sup>, YAN Xiangyuan<sup>1</sup>, FENG Yan<sup>2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of active iron species loss and  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  cycling, polyacrylic acid (PAA) Fenton catalytic fibers were prepared using the technologies of wet spinning, post-stretching, and heat setting under tension. Based on the oxidative polymerization mechanism, the polymerization of aniline, pyrrole, or thiophene on the surfaces of fibers was initiated using  $Fe^{3+}$  coordinated with PAA as an initiator, and a coating, which was used to optimize the application properties of PAA fibers, was formed. The results showed that the coating could improve the mechanical properties of PAA fibers and enhance the dimensional stability of fibers. Among them, polyaniline (PANI) coating worked best, and it could increase the tensile strength of PAA fibers by 45.7% and reduce the shrinkage ratio by 49.6%. When the fiber was used to treat dye wastewater, the methylene blue decolorization efficiency was still more than 90% after 40 cycles, and the total leaching concentration of iron ions was only 0.26 mg/L, which is 95% lower than that of uncoated PAA fibers, so that the introduced polyaniline coating could effectively inhibit the loss of iron ions. In addition, polyaniline coating could promote the cycling of  $Fe^{3+}$  to  $Fe^{2+}$  based on its redox property, and the total reaction time that polyaniline-coated PAA fibers took to decolorize MB aqueous solution during 40 cycles was decreased by 18.3% compared with that of uncoated PAA fibers.

**Key words:** polyacrylic acid (PAA) fiber; Fenton catalytic function; fiber surface coating; dye wastewater

染料废水具有降解难、颜色深等特点,其污染的水体危害生物生存<sup>[1-2]</sup>以及人类的健康<sup>[3]</sup>。因此,染料废水处置备受关注。目前处理染料废水的方法有吸附

法<sup>[4]</sup>、离子交换法<sup>[5]</sup>、电化学反应法<sup>[6]</sup>、微生物降解<sup>[7]</sup>和高级氧化技术(AOPs)<sup>[8]</sup>等。芬顿技术作为最重要的AOPs之一,因具有强氧化能力和高有机物降解效率而被广

收稿日期: 2024-03-14

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2015T80221); 国家海洋局产业链协同创新项目(BHSF2017-01)

通信作者: 徐乃库(1981—),男,博士,教授,主要研究方向为高分子功能纤维材料。E-mail: xunaiku@tiangong.edu.cn

泛应用<sup>[9]</sup>,但均相芬顿技术面临着铁污泥生成、pH适用范围窄以及催化剂不能重复使用等问题<sup>[10-11]</sup>。相比于均相芬顿技术,非均相芬顿工艺拥有pH适用范围广、铁离子浸出率低以及催化剂可回收利用<sup>[12-14]</sup>等优点。因此,非均相芬顿催化剂开发受到关注。

聚丙烯酸富含可与铁离子配位的羧基,故可基于配位作用设计载铁型非均相芬顿催化剂,并用于处理染料废水<sup>[15]</sup>。尽管如此,应用过程中 $\text{Fe}^{3+}$ 的快速累积与慢还原矛盾以及铁离子滤出问题限制了芬顿反应速率<sup>[16-17]</sup>,阻碍了聚丙烯酸基芬顿催化功能纤维的实际应用。氧化还原性聚合物(如聚苯胺<sup>[18]</sup>、聚吡咯<sup>[19]</sup>和聚噻吩<sup>[20]</sup>)具有丰富的氧化还原位点,已被用作电子穿梭剂以加快 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的循环,提高芬顿催化活性,同时还可以基于配位作用锚定铁离子,进一步降低铁离子的滤出,优化芬顿催化剂的性能。

本文首先利用湿法纺丝-后拉伸-紧张热定型工艺制备铁离子配位聚丙烯酸芬顿催化功能纤维,然后基于氧化聚合机理利用配位态 $\text{Fe}^{3+}$ 引发苯胺、吡咯或噻吩在纤维表面聚合,为纤维创建新的涂层,以期优化纤维性能。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

试剂:丙烯酸(AA)、苯胺、吡咯、噻吩,化学纯,上海市麦克林化学试剂有限公司;过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,质量分数30%),分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;马来酸酐(MA)、过氧化苯甲酰(BPO),均为分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;无水乙醇( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )、氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )、浓硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,质量分数98%),均为分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;无水氯化铁( $\text{FeCl}_3$ ),化学纯,国药集团化学试剂股份有限公司;无水氯化铝( $\text{AlCl}_3$ ),分析纯,福晨(天津)化学试剂有限公司;亚甲基蓝(MB)、邻菲罗啉( $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ),均为化学纯,天津市天新精细化工开发中心;盐酸羟胺( $\text{HONH}_2\text{Cl}$ ),化学纯,天津市光复科技发展有限公司;氧化石墨烯(GO),化学纯,昂星新型碳材料常州有限公司;去离子水,天津蓝洋工业用水经营部。

仪器:YG026型电子单纤维强力仪,温州际高测试仪器有限公司;TU-1810型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限公司;Gemini SEM500型热场发射扫描电子显微镜,德国Zeiss公司;NEXSA型X射线光电子能谱仪,美国Thermo Fisher公司。

### 1.2 纤维制备与涂层成型

首先根据文献[15]合成聚丙烯酸(PAA),随后将0.015 g石墨烯加入到27.000 g去离子水中,室温条件下搅拌30 min,超声30 min,加入3.000 g PAA,在85 °C条件下搅拌至PAA完全溶解,制得质量分数为10%的纺丝溶液;冷却至室温后,将纺丝溶液静置12 h以排除气泡;然后通过注射泵以0.7 mL/min速率将纺丝溶液由孔径为0.42 mm的单孔喷丝头挤出,在凝固浴(由120.00 g  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、400.00 g 水、3.00 g  $\text{AlCl}_3$ 、32.95 g  $\text{FeCl}_3$ 组成)中凝固纺丝细流制备初生纤维,同时执行金属离子配位反应;接着将初生纤维拉伸至16倍,在紧张状态下于100 °C热定型5 h制得PAA纤维,命名为 $F_1$ 。

将定量PAA纤维 $F_1$ 置于一定量苯胺单体中,室温下反应12 h;随后沥干纤维表面多余的单体,在无乙醇中浸泡1 min洗去纤维表面多余的单体,制备聚苯胺涂层PAA纤维,命名为 $F_1@PANI$ 。并按照上述方法制备聚吡咯涂层PAA纤维以及聚噻吩涂层PAA纤维,分别命名为 $F_1@PPy$ 、 $F_1@PT$ 。

### 1.3 性能测试与结构表征

#### 1.3.1 力学性能

室温下利用YG026型电子单纤维强力仪测试纤维样品的力学性能,夹距间纤维长度为10 mm,拉伸速率为10 mm/min,相对湿度为30%。

#### 1.3.2 收缩率

将一定长度纤维浸入10 mL去离子水中,浸泡10 min后测量纤维的长度,利用式(1)计算纤维的收缩率:

$$S_R = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $S_R$ 为收缩率(%); $L_0$ 为收缩前纤维的长度(cm); $L$ 为收缩后纤维的长度(cm)。

#### 1.3.3 纤维形貌

将纤维样品在液氮中淬断,以获得横截面,采用电沉积法喷金,利用Gemini SEM500型热场发射扫描电子显微镜(FESEM)在10.0 kV加速电压下观察样品的形貌特征。

#### 1.3.4 催化性能

室温下将10 mL质量浓度为20 mg/L的MB水溶液加入到50 mL烧杯中,使用移液枪量取2  $\mu\text{L}$   $\text{H}_2\text{O}_2$ ,并将其加入到烧杯中;称取0.06 g纤维置于上述MB水溶液中,不断振荡烧杯,利用TU-1810型紫外可见分光光度计监测目标溶液在664 nm波长下的吸光度值,根据式(2)计算脱色率( $R_D$ )以评价纤维的催化性

能。当  $R_D$  高于 90 % 时,将纤维样品从烧杯中取出,并用滤纸除去纤维表面残留的水分,按照上述步骤再次使用纤维脱色新的 MB 水溶液,以评价其重复使用性。

$$R_D = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \quad (2)$$

式中:  $R_D$  为脱色率(%);  $C_0$  为 MB 水溶液的初始质量浓度(mg/L);  $C_1$  为处理后的 MB 水溶液的质量浓度(mg/L),由浓度与吸光度的标准曲线求得。

### 1.3.5 平均铁离子浸出质量浓度

根据文献[21]方法测量脱色后 MB 水溶液中的铁离子浓度,计算公式为:

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i - 0.04329)}{0.23243} \times 100 \quad (3)$$

式中: AE 为平均铁离子浸出质量浓度(mg/L);  $A_i$  为定容后混合溶液的吸光度值;  $n$  为循环使用次数。

### 1.3.6 元素含量变化

为检测纤维应用前后  $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$  质量比的变化,利用 NEXSA 型 X 射线光电子能谱仪,以单色化 Al K $\alpha$  作为辐射源,分析纤维表面元素含量的变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层种类对纤维物理性能的影响

涂层前后纤维的力学性能与收缩率如图 1 所示。

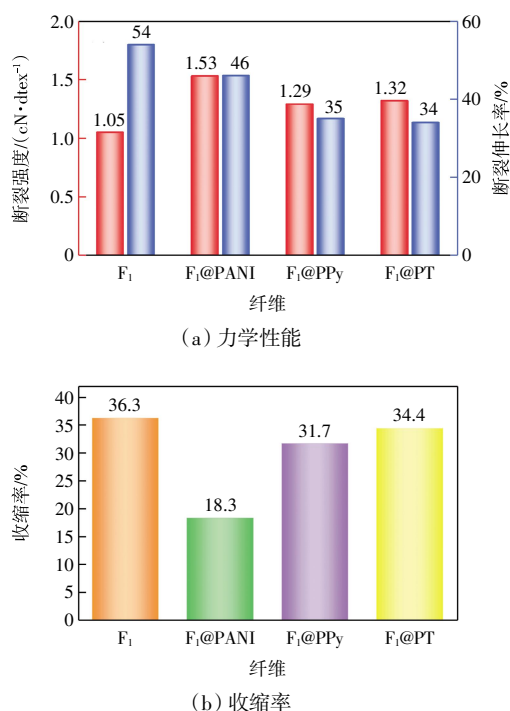
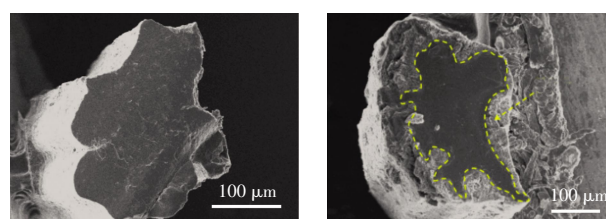


图 1 纤维的力学性能与收缩率

Fig.1 Mechanical properties and shrinkage ratio of fibers

由图 1(a)可以看出,基体纤维  $F_1$  的拉伸断裂强度为 1.05 cN/dtex,断裂伸长率为 54%;相比于  $F_1$ ,涂层后所得纤维  $F_1$ @PANI、 $F_1$ @PPy 和  $F_1$ @PT 的断裂强度均有所提高,断裂伸长率均有所降低。其中,纤维  $F_1$ @PANI 的断裂强度达 1.53 cN/dtex,与  $F_1$  相比提高 45.7%,效果最明显。由图 1(b)可以得知,相比于基体纤维  $F_1$ ,涂层后所得纤维的收缩率均有所降低,其中纤维  $F_1$ @PANI 的收缩率最低,为 18.3%,与  $F_1$  相比降低了 49.6%。由此可知,涂层不仅可以改善纤维的力学性能,而且还可以提高纤维的尺寸稳定性。

图 2 为涂覆聚苯胺前后纤维的横截面 FESEM 照片。



(a) 纤维  $F_1$

(b) 纤维  $F_1$ @PANI

图 2 纤维横截面的 SEM 图

Fig.2 SEM images of fiber cross-sections

由图 2 可知,涂覆聚苯胺前纤维横截面由 PAA 组成,呈现单相结构;涂覆聚苯胺后纤维的横截面不再是单相结构,显现了涂层相,证明涂层构建成功,即为 PAA 纤维设置了保护层。由这一保护层优化所导致的优异力学性能与低收缩率均有助于纤维在脱色 MB 水溶液过程中保持高比表面积,有益于纤维催化活性的稳定。

### 2.2 不同涂层对纤维应用性能的影响

涂层种类对纤维催化脱色性能的影响如图 3 所示。

由图 3(a)可以看出,在催化过氧化氢脱色 MB 水溶液方面,所有纤维均可循环使用,循环 40 次过程中 MB 脱色率均可达 90% 以上。由图 3(b)可知,纤维脱色 MB 水溶液所需时间均先降低后升高,这与浸润、反应以及铁离子洗脱有关。相比于基体纤维,涂层后所得纤维  $F_1$ @PANI 和  $F_1$ @PT 的总反应时间均有缩短,特别是纤维  $F_1$ @PANI,其对 MB 水溶液的脱色效率最高,这一结果表明,PANI 涂层可有效提升 PAA 纤维的催化活性。相比于基体纤维,纤维  $F_1$ @PPy 的总反应时间有所增加,由此可以肯定,涂层聚吡咯不利于纤维催化活性的改善。

为分析 PANI 涂层对纤维催化性能的影响机理,测定了应用前后  $F_1$  和  $F_1$ @PANI 纤维中的  $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$  的含量比,如表 1 所示。

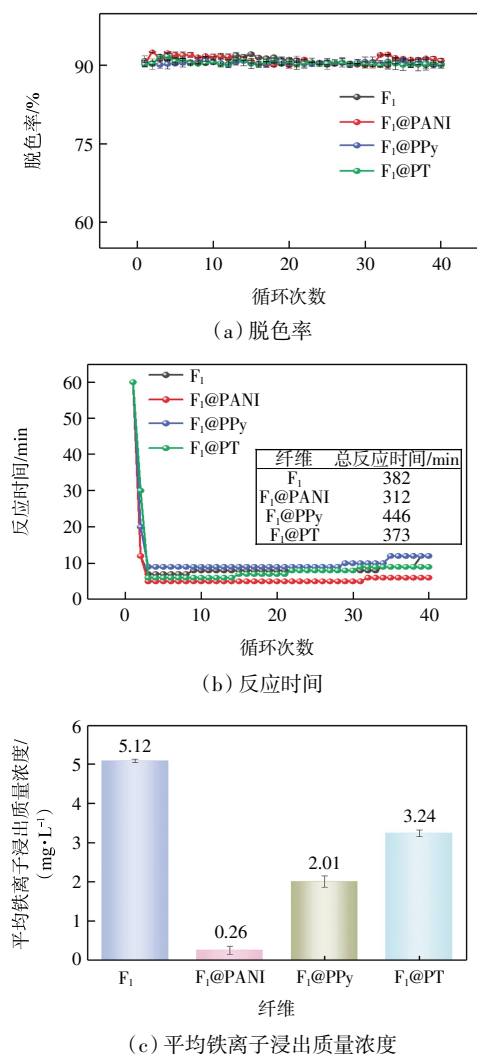


图 3 纤维对 MB 的脱色效果与平均铁离子浸出浓度

Fig.3 MB decolorization by fibers and average iron ion leaching concentration

表 1 聚苯胺涂层对纤维中 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>质量比的影响Tab.1 Effect of polyaniline coating on mass ratio of Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> in fibers

纤维样品	应用前	应用后
F <sub>1</sub>	96.6%/3.4%	—
F <sub>1</sub> @PANI	83.7%/16.3%	69.8%/30.2%

由表 1 可知,对于未涂覆聚苯胺的纤维 F<sub>1</sub>,应用前其 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>的质量比为 96.6%/3.4%;而涂覆有聚苯胺的纤维 F<sub>1</sub>@PANI,应用前其 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>的质量比为 83.7%/16.3%。这一结果表明,聚苯胺涂层可将一部分 Fe<sup>3+</sup>还原为 Fe<sup>2+</sup>,进而降低 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>的质量比,为快速催化过氧化氢氧化 MB 创造了条件。应用后,涂覆有聚苯胺的纤维 F<sub>1</sub>@PANI 的 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>质量比进一步降低至 69.8%/30.2%,这一结果表明,应用过程中聚苯胺涂层可利用自身的氧化还原特性继续促进 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>的循

环,为稳定纤维催化效率创造了条件。此外,由图 3(c)可知,相比于基体纤维 F<sub>1</sub>,涂层后所得纤维 F<sub>1</sub>@PANI、F<sub>1</sub>@PPy 和 F<sub>1</sub>@PT 脱色 MB 水溶液过程中平均铁离子浸出浓度均有所降低,这一结果表明,涂层可协助 PAA 基体有效锚定铁离子,进而抑制铁离子洗脱。其中,纤维 F<sub>1</sub>@PANI 展现了超低的平均铁离子浸出质量浓度,仅为 0.26 mg/L,不足基体纤维 F<sub>1</sub>的 6%,这一结果表明,聚苯胺涂层可协助 PAA 基体握持住绝大多数活性铁物质,进而维持了催化稳定性。由此可知,聚苯胺涂层不仅可显著抑制铁离子流失,而且有效地促进了 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>的循环,因此,纤维 F<sub>1</sub>@PANI 拥有更为优异的催化性能。

为进一步说明 F<sub>1</sub>@PANI 纤维的优异性能,本文对几种催化剂的性能进行了对比,结果如表 2 所示。

表 2 纤维 F<sub>1</sub>@PANI 与其他芬顿催化剂性能比较Tab.2 Performance comparison of the fiber F<sub>1</sub>@PANI and other Fenton catalysts

参数	催化剂量/mg	MB/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 质量比/(mg·mg <sup>-1</sup> )	循环次数	平均脱色时间/min	平均铁离子浸出质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	参考文献
F <sub>1</sub> @PANI	60	11.1	40	7.8	0.26	本文
rGSs/Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /PPy	100	11 000.0	4	30.0	>>0.26	[22]
Fe(II)Fe(III)-LDHs	10	34.0	1	60.0	4.70	[23]
C-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -2	100	51.0	5	420.0	1.65	[24]

由表 2 可以看出,与其他非均相芬顿催化剂相比,纤维 F<sub>1</sub>@PANI 具有反应时间短、循环使用次数多、铁离子浸出量低等优异特性,在处理染料废水方面显现出自身的应用优势。

### 3 结论

本文采用湿法纺丝技术,结合拉伸、热定型工艺制备出 PAA 纤维,并基于氧化聚合机理为 PAA 纤维构建涂层,研究结果表明:

(1) 聚苯胺、聚吡咯和聚噻吩涂层可提高 PAA 纤维的力学性能和尺寸稳定性,其中,聚苯胺涂层效果最为明显,使 PAA 纤维的拉伸断裂强度提高了 45.7%,收缩率降低了 49.6%。

(2) 聚苯胺和聚噻吩涂层可有效提升 PAA 纤维的脱色效率,而聚吡咯涂层则会负面影响 PAA 纤维的脱色效率,在 40 次循环使用脱色 MB 过程中聚苯胺涂层 PAA 纤维有效地促进 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>循环,进而使得总反应时间仅为 312 min,相比基体纤维缩短了 70 min。

(3) 聚苯胺、聚吡咯和聚噻吩涂层还可协助 PAA 基体锚定铁离子,从而有效降低了平均铁离子浸出浓度,在 40 次循环使用过程中聚苯胺涂层 PAA 纤维的平均铁离子浸出质量浓度仅为 0.26 mg/L,不足基体纤维的 6%,有效地抑制了活性铁物种的流失。

#### 参考文献:

- [1] 谢学辉, 范凤霞, 袁学武, 等. 高效混合菌群 FF 的筛选及其对活性黑 5 的脱色作用[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 802-813.  
XIE X H, FAN F X, YUAN X W, et al. Isolation of high performance bacterial consortium FF and its decolorization effects on reactive black 5[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2013, 39(6): 802-813(in Chinese).
- [2] 刘雍, 曹栋源, 夏兆鹏, 等. 静电纺制备 ZnO@PAN 纳米复合膜及其光催化性能[J]. 天津工业大学学报, 2019, 38(6): 1-6.  
LIU Y, CAO D Y, XIA Z P, et al. Preparation of ZnO nano-wires@PAN membranes by electrospinning and its photo-catalytic performance[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2019, 38(6): 1-6(in Chinese).
- [3] 魏欣. 自稳定沉淀聚合制备功能性聚合物微球及染料废水处理研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2022.  
WEI X. Preparation of functional polymer microspheres by self-stabilized precipitation polymerization and treatment of dye wastewater[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022(in Chinese).
- [4] ZHANG X Y, ZHANG H, CHEN P T, et al. One-step dye wastewater treatment by combined adsorption, extraction, and photocatalysis using g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Pickering emulsion[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 644: 128814.
- [5] KUMAR SINHA A, KUMAR SASMAL A, PAL A, et al. Ammonium phosphomolybdate [(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>PMo<sub>12</sub>O<sub>40</sub>] an inorganic ion exchanger for environmental application for purification of dye contaminant wastewater[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2021, 418: 113427.
- [6] YAO J C, LV S N, WANG Z Y, et al. Variation of current density with time as a novel method for efficient electrochemical treatment of real dyeing wastewater with energy savings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(33): 49976-49984.
- [7] VARJANI S, RAKHOLIYA P, NG H Y, et al. Microbial degradation of dyes: An overview[J]. Bioresource Technology, 2020, 314: 123728.
- [8] LIU L M, CHEN Z, ZHANG J W, et al. Treatment of industrial dye wastewater and pharmaceutical residue wastewater by advanced oxidation processes and its combination with nanocatalysts: A review[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 42: 102122.
- [9] PERAMUNE D, MANATUNGA D C, DASSANAYAKE R S, et al. Recent advances in biopolymer-based advanced oxidation processes for dye removal applications: A review[J]. Environmental Research, 2022, 215: 114242.
- [10] THABET R H, TONY M A, EL SHERBINY S A, et al. Catalytic oxidation over nanostructured heterogeneous process as an effective tool for environmental remediation[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 975(1): 012004.
- [11] SALEH M, BILICI Z, KAYA M, et al. The use of basalt powder as a natural heterogeneous catalyst in the Fenton and Photo-Fenton oxidation of cationic dyes[J]. Advanced Powder Technology, 2021, 32(4): 1264-1275.
- [12] WANG H, ZHANG C Y, ZHANG X L, et al. Construction of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@β-CD/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanocomposite catalyst for degradation of PCBs in wastewater through photodegradation and heterogeneous Fenton oxidation[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 429: 132445.
- [13] 赵永男, 黄国辉, 高海燕, 等. 玻璃纤维负载 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 催化膜的制备及其降解染料性能[J]. 天津工业大学学报, 2022, 41(1): 16-20.  
ZHAO Y N, HUANG G H, GAO H Y, et al. Preparation of glass fiber supported Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> catalytic membrane and its dye degradation performance[J]. Journal of Tiangong University, 2022, 41(1): 16-20(in Chinese).
- [14] 张姿, 薛佳丹, 王惠钢. 不同 Cu<sup>+</sup>掺杂量 MIL-53(Fe, Cu) 的制备及其光芬顿性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(4): 565-572.  
ZHANG Z, XUE J D, WANG H G. Preparation of MIL-53(Fe, Cu) with different doping contents of Cu<sup>+</sup> and its photo-Fenton properties[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences), 2022, 47(4): 565-572(in Chinese).
- [15] XU N, ZHANG Y, HAN J, et al. Coordination and hydrogen bond-coadjusted highly stretchable wet-spun poly(acrylic acid) fiber and its stable activity as Fenton catalyst[J]. Materials Today Chemistry, 2022, 24: 100864.
- [16] XU Z J, GUO Y. Preparation and performance of degradable slow-release fertilizer coating material by a new ionic cross-linked hydrogel material[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(5): 110785.
- [17] CHAI M N, TONG W S, WANG Z H, et al. Piezoelectric-Fenton degradation and mechanism study of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PVDF-HFP porous film drove by flowing water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 430: 128446.
- [18] 孙建东, 马振华, 姚晓霞, 等. 基于自组装原位生长法制备聚苯胺/CNTs 纳米复合物修饰叉指电极的葡萄糖生物传感 (下转第 23 页)