

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2025.06.002

# 硅烷改性 CNC 掺杂聚丙烯酸 Fenton 催化纤维的制备及其性能

徐乃库, 张佳涵

(天津工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300387)

**摘要:** 为有效提升聚丙烯酸(PAA)Fenton 催化纤维的力学性能、活性铁物种自握持特性以及  $Fe^{3+}$  自还原能力, 利用硅烷偶联剂对纤维素纳米晶(CNC)进行改性, 以优化 CNC 的分散性, 随后制备分散有 CNC 的 PAA 纺丝溶液, 采用湿法纺丝技术制备硅烷改性 CNC 掺杂 PAA 基 Fenton 催化纤维; 探究硅烷偶联剂用量与种类对改性 CNC 掺杂 PAA 纤维力学性能和催化活性的影响, 同时研究 KH560 改性 CNC 在改善 PAA 纤维活性铁物种自握持特性以及  $Fe^{3+}$  自还原能力方面的作用。结果表明: 当改性体系中硅烷偶联剂用量为 0.070 mol 时, 纤维拥有最佳的力学性能; 与其他硅烷偶联剂相比, KH560 改性 CNC 掺杂 PAA 纤维具有更突出的力学性能, 其抗拉强度达 107.3 MPa, 与未改性 CNC 掺杂 PAA 纤维相比提高了 105.6%; KH560 改性 CNC 可协助 PAA 锚定铁离子, 致使 KH560 改性 CNC 掺杂纤维 M2-P 的平均铁离子浸出质量浓度仅为 0.74 mg/L, 不足 PAA 纤维的 6.0%; KH560 改性 CNC 还可作为还原剂促进  $Fe^{3+}$  的还原, 使 M2-P 中  $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$  的原子数目比达 69.7/30.3, 远高于 PAA 纤维的 13.5/86.5,  $Fe^{2+}$  含量高以及铁离子滤出低的特性使 KH560 改性 CNC 掺杂纤维 M2-P 循环使用 42 次脱色 90% 以上 MB 时所需总时间仅为 270 min, 远低于其他纤维, 体现出优异的催化活性。

**关键词:** 纤维素纳米晶(CNC); 硅烷改性; 聚丙烯酸(PAA); Fenton 催化纤维

中图分类号: TQ032

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)05-0009-06

## Preparation of silane-modified CNC-doped polyacrylic acid Fenton catalytic fiber and its performance

XU Naiku, ZHANG Jiahuan

(School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** To enhance the mechanical properties, retention of active iron species, and  $Fe^{3+}$  self-reduction capability of polyacrylic acid (PAA)-based Fenton catalytic fibers, cellulose nanocrystals (CNCs) were modified with a silane coupling agent to improve their dispersion. A PAA spinning solution containing the modified CNCs was then prepared. Silane-modified CNC-reinforced PAA-based Fenton catalytic fibers were fabricated via wet spinning. The effects of silane coupling agent type and dosage on the mechanical properties and catalytic activity of the modified CNC-reinforced PAA fibers were investigated. Additionally, the role of KH560-modified CNC in enhancing iron species retention and  $Fe^{3+}$  self-reduction within the fibers was examined. The results indicated that the optimal mechanical properties were achieved when 0.07 mol of silane coupling agent was used during the modification process. Among the silane coupling agents tested, KH560-modified CNC-reinforced PAA fibers exhibited the best mechanical performance, with a tensile strength of 107.3 MPa—an increase of 105.6% compared to unmodified CNC-reinforced PAA fibers. KH560-modified CNC facilitated the immobilization of iron ions within the PAA matrix, leading to a low average Fe leaching concentration of 0.74 mg/L in the M2-P fiber—less than 6.0% of that observed in pristine PAA fibers. Additionally, KH560-modified CNC acted as a reducing agent, converting  $Fe^{3+}$  to  $Fe^{2+}$ . As a result, the  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  atomic ratio in the M2-P fiber reached 69.7/30.3, significantly higher than the 13.5/86.5 ratio observed in pristine PAA fibers.

收稿日期: 2024-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51103099)

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

**Key words:** cellulose nanocrystals(CNC); silane-modify; poly acrylic acid(PAA); Fenton catalytic fiber

近年来,随着我国国民经济的高速发展,纺织工业迅速崛起,同时废水排放量也急剧增多<sup>[1]</sup>,特别是染料废水,由于具有高毒性和难降解等特性,给生态环境和人类健康造成了极大危害<sup>[2]</sup>。因此,染料废水处置势在必行。与传统处理染料废水的方法相比,高级氧化法(AOPs)利用催化剂催化氧化剂产生羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ ),进而利用 $\cdot\text{OH}$ 非选择性地将有有机染料矿化为二氧化碳、水和小分子有机酸等无污染物质<sup>[3]</sup>。Fenton 氧化法作为最常见的 AOPs 之一,具有操作简单、反应效率高、氧化能力强和成本低廉等优点,因此被用于处置各类染料废水<sup>[4]</sup>。其中,异相 Fenton 工艺因摒弃了均相 Fenton 过程的缺陷而被广泛应用于染料废水处理领域。异相 Fenton 过程的重点是制备固体催化剂<sup>[5]</sup>,但常规异相 Fenton 催化剂存在活性低、金属组分易流失等问题。因此,设计和开发高效、稳定的异相 Fenton 催化剂对于推动异相 Fenton 技术的实际应用至关重要。

聚丙烯酸(PAA)是一种具有线性分子结构的可纺性聚合物,可溶于水和多种有机溶剂<sup>[6]</sup>,可通过湿法纺丝技术将其制成具有大比表面积的纤维,PAA 富含的羧基可与铁离子形成配位键,进而有效固定铁离子<sup>[7-8]</sup>。这种情况下,PAA 纤维可作为良载体,经铁离子负载制备异相 Fenton 催化剂。尽管如此,力学性能差、活性铁离子浸出以及  $\text{Fe}^{3+}$  的累积与慢还原所导致的催化活性衰减仍为制约 PAA 基 Fenton 催化纤维应用的瓶颈。

纤维素纳米晶(CNC)是一种天然结晶的纤维素类高分子化合物<sup>[9-10]</sup>,具有制备简单、强度高、大比表面积、可完全降解和可再生等优点,作为纳米增强剂已被广泛用于制备高强度纳米复合材料<sup>[11-13]</sup>,更为重要的是,CNC 可作为稳定剂和还原剂来固定以及还原金属离子<sup>[14-15]</sup>。因此,将 CNC 与 PAA 结合有望解决 PAA 基 Fenton 催化纤维面临的瓶颈问题。然而,由于 CNC 表面含有丰富的羟基,在强氢键作用下,其自身易团聚,影响其在聚合物基体中的分散,最终影响纳米复合材料的应用性能<sup>[16-17]</sup>。利用硅烷偶联剂对 CNC 进行疏水改性是改善其分散性的有效途径<sup>[18-19]</sup>。

本文首先用硅烷偶联剂对 CNC 进行改性,随后制备掺杂有改性 CNC 的 PAA 纺丝溶液,采用湿法纺丝-铁离子配位-高倍拉伸-紧张热定型串联技术制备硅烷改性 CNC 掺杂聚丙烯酸 Fenton 催化纤维,以优化纤维处理染料废水的性能为目标,探究 CNC 改性过程中硅烷偶联剂用量与种类的影响,通过掺杂解决 PAA

基 Fenton 催化纤维存在的力学性能差、催化活性低以及铁离子浸出量大等问题,以期进一步推动异相 Fenton 技术的发展应用。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

试剂:丙烯酸(AA)、十六烷基三甲氧基硅烷、 $\gamma$ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(KH560)、3-氨基丙基三乙氧基硅烷(KH550),均为化学纯,上海市麦克林化学试剂有限公司;纤维素纳米晶(CNC),化学纯,湖州闪思新材料有限公司;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;过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,质量分数为 30%),分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;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;氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )、浓硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,质量分数为 98%)、无水乙醇( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ),均为分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;三氯化铁( $\text{FeCl}_3$ ),化学纯,国药集团化学试剂股份有限公司;氯化亚铁( $\text{FeCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ),分析纯,上海市展云化工有限公司;去离子水,天津市蓝洋工业用水经营部。

仪器:BX43 型成像显微镜,日本 Olympus 公司;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;NEXSA 型 X 射线光电子能谱仪(XPS),美国 Thermofish Scientific 公司;Gemini SEM500 型热场发射扫描电子显微镜(FESEM),德国 Zeiss 公司。

### 1.2 纤维制备

#### 1.2.1 CNC 改性

将 0.35 g CNC 超声分散于 63 mL 无水乙醇和 7 mL 去离子水中,通入氮气,磁力搅拌下 2 h 内将一定量的硅烷偶联剂滴加到上述溶液中,结束滴加后,磁力搅拌下继续反应 3 h,随后在 10 000 r/min 条件下离心分离 CNC 纳米颗粒,用无水乙醇洗涤 3 次后干燥,制得本实验所需改性 CNC 粉末。将未改性 CNC 定义为 U-CNC;将 0.035、0.070 和 0.140 mol KH560 改性后的 CNC 分别定义为  $\text{M}_1$ -CNC、 $\text{M}_2$ -CNC 和  $\text{M}_3$ -CNC;将 0.070 mol 十六烷基三甲氧基硅烷改性 CNC 定义为  $\text{M}_4$ -CNC;将 0.070 mol KH550 改性 CNC 定义为  $\text{M}_5$ -CNC。

### 1.2.2 PAA 合成

室温下, 首先将 0.083 3 g BPO 溶解在 14.166 7 g AA 和 2.500 0 g MA 混合溶液中, 然后将 100.000 0 g 去离子水添加至上述溶液中, 所得混合物记为组分 1#。室温下将 0.166 7 g BPO 溶解于 33.333 3 g AA 中, 制得的溶液记为组分 2#。将组分 1# 转移至 250 mL 装配有搅拌器、氮气导管和回流冷凝管的四口烧瓶中, 在 85 °C 和氮气气氛下以 180~200 r/min 的速率搅拌混合物, 在搅拌过程中将组分 2# 逐滴加入至四口烧瓶内, 滴加时间为 30 min, 完成滴加后, 在 85 °C 和氮气气氛下继续反应 2 h, 洗涤胶状产物, 随后经干燥、粉碎、洗涤和再干燥制得实验所需聚合物。

### 1.2.3 CNC 掺杂 PAA 基 Fenton 纤维成形

取 3.00 g PAA, 称取占 PAA 质量 1% 的 CNC 粉末, 将 CNC 粉末倒入 27.00 g 去离子水中, 室温下磁力搅拌 30 min、超声分散 1 h, 随后将称取的 PAA 加入上述分散液中, 85 °C 下磁力搅拌至 PAA 完全溶解, 制得质量分数为 10% 的 PAA 纺丝液; 将上述纺丝液冷却至室温, 静置 12 h 以去除气泡, 利用注射泵在 0.7 mL/min 的挤出速率下将纺丝液从孔径为 0.42 mm 的单孔喷头中挤出, 挤出纺丝细流在由 400.00 g 去离子水、120.00 g 浓硫酸、53.86 g  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  和 10.98 g  $\text{FeCl}_3$  组成的凝固浴中凝固为细丝, 同时在凝固浴中执行铁离子配位反应(4 h), 将制得的长丝切割成 2 cm 长的短纤维, 拉伸后于 60 °C 下紧张热定型 12 h, 制得 CNC 掺杂 PAA 纤维。不同 PAA 纤维的定义如表 1 所示。

表 1 PAA 纤维的定义

Tab.1 Definition of PAA fibers

CNC 样品	拉伸倍数	纤维命名
-	1	N
-	10	P
U-CNC	15	U-P
M1-CNC	15	M1-P
M2-CNC	15	M2-P
M3-CNC	15	M3-P
M4-CNC	15	M4-P
M5-CNC	15	M5-P

## 1.3 性能测试与表征

### 1.3.1 力学性能

利用 BX43 型成像显微镜测量纤维样品的直径, 随后使用 YG026 型电子单纤维强力仪测量其力学性能。测试条件为: 室温, 相对湿度 30%, 夹间距纤维长度为 10 mm, 拉伸速率为 10 mm/min。纤维的抗拉强度计算公式为:

$$T_s = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式中:  $T_s$  为纤维的抗拉强度(MPa);  $F$  为纤维断裂时承受的力(N);  $S$  为纤维的横截面积( $\text{mm}^2$ )。

### 1.3.2 收缩率

将一定长度的纤维完全浸入 100 mL 去离子水中 10 min 后, 再次测量其长度。纤维的收缩率为:

$$S_h = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $S_h$  为纤维的收缩率(%);  $L_0$  为纤维的原长(cm);  $L_1$  为收缩后纤维的长度(cm)。

### 1.3.3 催化性能

室温下, 将 10 mL 质量浓度为 20 mg/L 的 MB 溶液倒入玻璃小瓶中, 用移液枪精确量取 2  $\mu\text{L}$   $\text{H}_2\text{O}_2$ , 并将其加入到上述玻璃小瓶中。称取 0.06 g 纤维, 将其放入小瓶中, 持续振荡下利用 TU-1810 型紫外可见分光光度计在 664 nm 波长下监测目标溶液的吸光度值, 根据浓度-吸光度标准曲线获得 MB 溶液的质量浓度; 利用式(3)计算 MB 溶液的脱色率(DR), 以评价纤维的催化性能。当 MB 溶液的 DR 达到 90% 及以上时将纤维取出, 用滤纸除去纤维表面残留的液体后, 重复上述实验, 以评价纤维的可重复使用性。

$$\text{DR} = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: DR 为脱色率(%);  $C_0$  为初始 MB 溶液的质量浓度(mg/L);  $C_1$  为脱色后 MB 溶液的质量浓度(mg/L)。

### 1.3.4 平均铁离子浸出浓度

根据 1.3.3 节所述程序, 当 MB 溶液的脱色率达到 90% 及以上后, 将纤维从小瓶中取出, 根据文献[20]所述方法测量脱色后 MB 溶液中铁离子的浸出浓度, 并使用式(4)计算平均铁离子浸出浓度:

$$\text{AE} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i - 0.04329}{0.23243} \times 100 \right)}{n} \quad (4)$$

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。

### 1.3.5 XPS 测试

利用 NEXSA 型 X 射线光电子能谱仪(XPS)分析纤维样品表面不同价态铁离子的含量比。

### 1.3.6 形貌观察

首先将纤维样品在液氮中淬断, 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 加速电压下观察纤维样品的形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硅烷偶联剂用量对纤维性能的影响

在改性 CNC 过程中, 硅烷偶联剂用量会影响 CNC 的性能, 最终对纤维性能产生影响, 如图 4 所示。

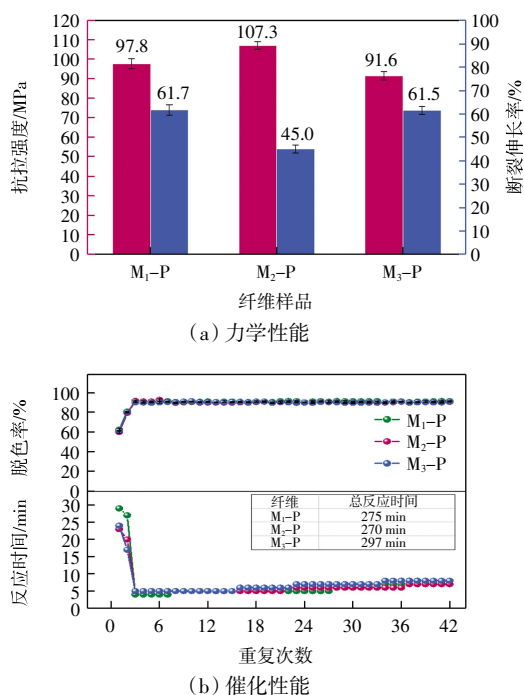


图 1 硅烷偶联剂用量对纤维性能的影响

Fig.1 Effect of silane coupling agent dosage on fiber properties

由图 1(a)可以发现, 与纤维 M<sub>2</sub>-P 相比, 纤维 M<sub>1</sub>-P 和 M<sub>3</sub>-P 的抗拉强度分别降低了 8.9% 和 14.6%, 断裂伸长率分别提高了 37.1% 和 36.7%。这一结果表明, 改性时硅烷偶联剂用量过少或者过多, 均不利于纤维力学性能的提高。这是由于: 少量的硅烷偶联剂只能封闭 CNC 中小部分羟基, 不能有效破坏羟基的氢键作用, 致使 CNC 分散性依旧较差; 而过量的硅烷偶联剂则可能发生自身缩合反应, 而并未接枝到 CNC 表面, 这导致 CNC 仍具有高度亲水的特性, 因羟基间氢键作用突出而发生团聚, 影响其分散性。因此, 少量或者过量硅烷偶联剂改性的 CNC 均不能均匀地分散于 PAA 基体, 从而使纤维具有较低的力学性能。由图 1(b)可知, 纤维 M<sub>2</sub>-P 的催化活性优于纤维 M<sub>1</sub>-P 和 M<sub>3</sub>-P, 这一结果再次证明, 少量或者过量硅烷偶联剂改性的 CNC 不仅不利于力学性能的改善, 同时也不利于纤维催化性能的提升。图 1 中力学性能与催化性能的研究结果表明, 由 0.070 mol 硅烷偶联剂 KH560 改性的 CNC 能够有效提升纤维的性能, 故接下来的研究均采用这一摩尔量。

### 2.2 硅烷偶联剂种类对纤维性能的影响

不同种类硅烷偶联剂改性 CNC 对纤维性能的影响也不同, 如图 2 所示。

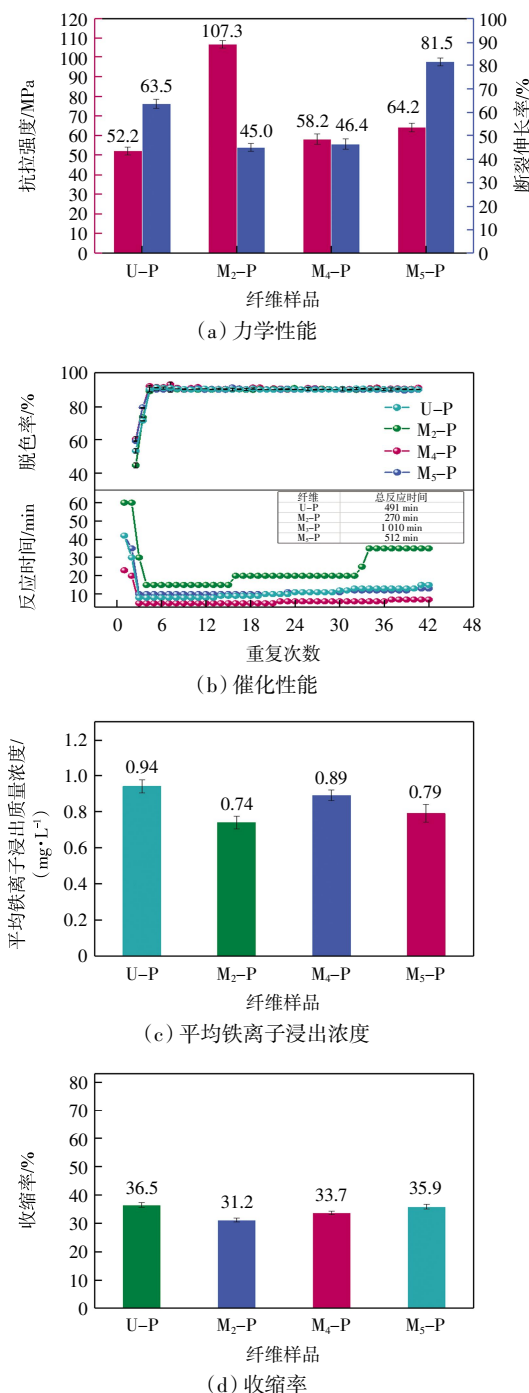


图 2 硅烷偶联剂种类对纤维性能的影响

Fig.2 Effect of silane coupling agent type on fiber properties

由图 2(a)可以看出, 改性 CNC 掺杂 PAA 纤维的抗拉强度均大于未改性 CNC 掺杂 PAA 纤维, 这是由于硅烷偶联剂改性可以有效改善 CNC 在 PAA 基体中的分散性, 使其能够更均匀地分散于 PAA 基体中, 从而增强纤维的力学性能<sup>[21]</sup>。纤维 M<sub>2</sub>-P 的抗拉强度达到

了 107.3 MPa, 与纤维 U-P、M<sub>4</sub>-P 和 M<sub>5</sub>-P 相比分别提高了 105.6%、84.4%和 67.1%; 纤维 M<sub>2</sub>-P 的断裂伸长率仅为 45.0%, 分别比纤维 U-P、M<sub>4</sub>-P 和 M<sub>5</sub>-P 降低了 29.1%、3.0%和 44.8%, 由此可知, 与其他硅烷偶联剂相比, 硅烷偶联剂 KH560 拥有更为优异的改性效果, 其改性的 CNC 可以赋予 PAA 纤维优异的力学性能。

由图 2(b)可知, 催化过氧化氢脱色 MB 过程中, 重复使用 42 次时, 纤维 M<sub>2</sub>-P 的总反应时间仅为 270 min, 远低于其他纤维所需时间, 在循环使用过程中纤维 M<sub>2</sub>-P 脱色 90%以上 MB 所需时间几乎不随循环次数的增加而增加, 体现出优异的催化稳定性。由图 2(c)可知, 重复使用 42 次时, 纤维 M<sub>2</sub>-P 的平均铁离子浸出质量浓度仅为 0.74 mg/L, 分别比纤维 U-P、M<sub>4</sub>-P 和 M<sub>5</sub>-P 降低了 22.9%、16.9%和 6.3%, 显然这与改性 CNC 分散性的好坏有关, 同时也与纤维 M<sub>2</sub>-P 拥有较好的尺寸稳定性有关(图 2(d)), 使其在催化过程中始终保留较大的比表面积, 提供较多的活性位点, 其裸露的羧基与均匀分散 CNC 中的羟基可以与铁离子配位, 有效抑制铁离子流失, 为稳定催化活性创造了条件。

### 2.3 硅烷偶联剂改性 CNC 掺杂对 Fe<sup>3+</sup>还原的影响

硅烷偶联剂 KH560 改性 CNC 掺杂前后, 纤维中 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>的含量比如表 2 所示。

表 2 KH560 改性 CNC 对纤维中 Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>含量比的影响

Tab.2 Effect of KH560-modified CNC on Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> ratio in fibers

纤维样品	Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup> 含量比
P	13.5/86.5
M <sub>2</sub> -P	69.7/30.3

由表 2 可知, 与未掺杂 CNC 纤维 P 相比, KH560 改性 CNC 掺杂纤维 M<sub>2</sub>-P 中 Fe<sup>2+</sup>的含量更高, 表明 KH560 改性 CNC 可协助 PAA 基体还原 Fe<sup>3+</sup>, 与 Fe<sup>3+</sup>相比, Fe<sup>2+</sup>可快速催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 氧化 MB, 因此, KH560 改性 CNC 的还原能力亦为稳定催化活性创造了条件。在超低铁离子浸出浓度以及高的 Fe<sup>2+</sup>含量影响下, KH560 改性 CNC 掺杂纤维 M<sub>2</sub>-P 拥有了优异的应用性能。

### 2.4 硅烷偶联剂改性 CNC 掺杂对纤维形貌的影响

硅烷偶联剂 KH560 改性 CNC 掺杂前后, 纤维的形貌变化如图 3 所示。

由图 3 可以发现, 与未掺杂 CNC 纤维 P 相比, KH560 改性 CNC 掺杂纤维 M<sub>2</sub>-P 拥有更为有利的形貌结构。2 种纤维虽然具有极为相似的表面结构, 但内部结构极为不同, 与未掺杂 CNC 纤维 P 相比, KH560 改性 CNC 掺杂纤维 M<sub>2</sub>-P 由发达的片晶组成, 这一特殊结构为其应用提供了力学与接触面积保障。

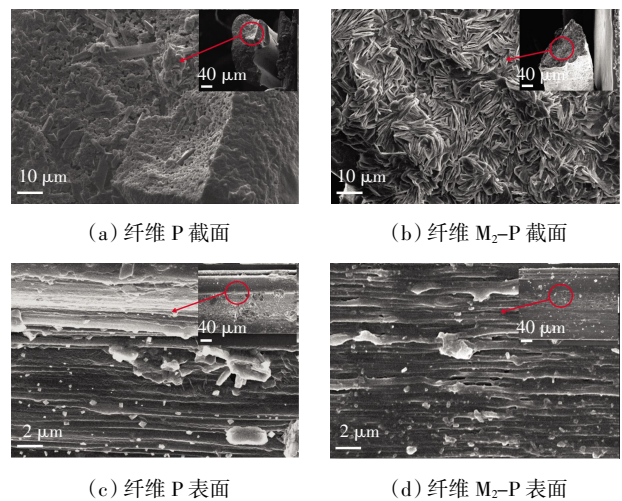


图 3 纤维 P 和纤维 M<sub>2</sub>-P 的 FESEM 图像

Fig.3 FESEM images of fibers P and M<sub>2</sub>-P

## 3 结论

本文利用硅烷偶联剂对 CNC 进行改性, 将改性 CNC 添加至 PAA 基质中, 采用湿法纺丝技术并结合铁离子配位、拉伸和紧张热定型工艺成功制备了硅烷改性 CNC 掺杂 PAA 基 Fenton 催化纤维。结果表明:

(1) 在改性 CNC 过程中, 硅烷偶联剂用量过多或过少均不利于 PAA 纤维性能的提升, 硅烷偶联剂的最佳用量为 0.070 mol, 改性体系组成为 0.35 g CNC、63 mL 无水乙醇、7 mL 去离子水、0.070 mol 硅烷偶联剂。

(2) 与十六烷基三甲氧基硅烷以及 KH550 相比, KH560 改性 CNC 掺杂 PAA 纤维的力学性能和催化性能显著提高, 平均铁离子浸出浓度降低; KH560 改性 CNC 掺杂 PAA 纤维的抗拉强度、断裂伸长率、收缩率和平均铁离子质量浓度分别为 107.3 MPa、45.0%、31.2%和 0.74 mg/L, 其在 42 次重复使用中脱色 90%以上 MB 所需总反应时间仅为 270 min, 远低于其他纤维, 催化效率更高。

(3) KH560 改性 CNC 掺杂 PAA 纤维拥有更为发达的结晶结构, 为力学性能提升提供了结构保障, 而 KH560 改性 CNC 协助 PAA 基体还原 Fe<sup>3+</sup>以及锚定铁离子的能力则为催化活性提升提供了条件, 使 KH560 改性 CNC 掺杂 PAA 纤维体现出更为优异的催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 脱色 MB 性能。

### 参考文献:

- [1] LI W, MU B N, YANG Y Q. Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology[J]. Bioresource Technology, 2019, 277: 157-170.

- [2] CAO X L, YAN Y N, ZHOU F Y, et al. Tailoring nanofiltration membranes for effective removing dye intermediates in complex dye-wastewater[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 595: 117476.
- [3] ARAVIND P, SELVARAJ H, FERRO S, et al. A one-pot approach: Oxychloride radicals enhanced electrochemical oxidation for the treatment of textile dye wastewater trailed by mixed salts recycling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 182: 246-258.
- [4] 王朱良, 曾泽亭, 杨杰, 等. 高级氧化技术处理染料废水研究进展[J]. *日用化学品科学*, 2023, 46(7): 57-60.  
WANG Z L, ZENG Z T, YANG J, et al. Research progress of advanced oxidation processes for treatment of dye wastewater[J]. *Detergent & Cosmetics*, 2023, 46(7): 57-60(in Chinese).
- [5] LIU Y, ZHAO Y, WANG J L. Fenton/Fenton-like processes with in situ production of hydrogen peroxide/hydroxyl radical for degradation of emerging contaminants: Advances and prospects[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 404: 124191.
- [6] GUO J X, HANIF A, SHANG J, et al. PAA@ZIF-8 incorporated nanofibrous membrane for high-efficiency PM<sub>2.5</sub> capture[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405: 126584.
- [7] LI D K, ZHAN W, ZUO W, et al. Elastic, tough and switchable swelling hydrogels with high entanglements and low cross-links for water remediation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 138417.
- [8] GAO C, WANG X L, WANG H S, et al. Highly efficient and stable catalysis of *p*-nitrophenol via silver/lignin/polyacrylic acid hydrogel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 144: 947-953.
- [9] YANG G H, XIA Y Y, LIN Z Y, et al. Physicochemical impact of cellulose nanocrystal on oxidation of starch and starch based composite films[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 184: 42-49.
- [10] 仲珍珍, 孟玲玲, 黄新民, 等. 纤维素纳米晶的柔性光子晶体复合膜制备及性能分析[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2022, 35(4): 52-60.  
ZHONG Z Z, MENG L L, HUANG X M, et al. Preparation and property analysis of flexible photonic crystal composite films of cellulose nanocrystals[J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2022, 35(4): 52-60(in Chinese).
- [11] WANG J, ZHANG K T, ZHANG L, et al. Preparation and stabilization of Pickering emulsions by cationic cellulose nanocrystals synthesized from deep eutectic solvent[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 209: 1900-1913.
- [12] LIZUNDIA E, PUGLIA D, NGUYEN T D, et al. Cellulose nanocrystal based multifunctional nanohybrids[J]. *Progress in Materials Science*, 2020, 112: 100668.
- [13] PENG C, YANG Q, ZHAO W P, et al. Relationship between interface chemistry and reinforcement in polybutadiene/cellulose nanocrystal nanocomposites[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 177: 103-110.
- [14] KAUSHIK M, MOORES A. Review: Nanocelluloses as versatile supports for metal nanoparticles and their applications in catalysis[J]. *Green Chemistry*, 2016, 18(3): 622-637.
- [15] XIE Z T, ASOH T A, UETAKE Y, et al. Dual roles of cellulose monolith in the continuous-flow generation and support of gold nanoparticles for green catalyst[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 247: 116723.
- [16] ZAKANI B, ENTEZAMI S, GRECOV D, et al. Effect of ultrasonication on lubrication performance of cellulose nanocrystalline (CNC) suspensions as green lubricants[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 282: 119084.
- [17] TARHANLI İ, SENSES E. Cellulose nanocrystal and Pluronic L121-based thermo-responsive composite hydrogels[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 321: 121281.
- [18] ZHANG K, ZHOU M, CHENG F, et al. Preparation and characterization of starch-based nanocomposites reinforced by graphene oxide self-assembled on the surface of silane coupling agent modified cellulose nanocrystals[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 198: 187-193.
- [19] SHENG K C, ZHANG S, QIAN S P, et al. High-toughness PLA/Bamboo cellulose nanowhiskers bionanocomposite strengthened with silylated ultrafine bamboo-char[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 174-182.
- [20] CHEN S Q, XU N K, REN M R, et al. PEI/GO-codecorated poly(acrylic acid-co-hydroxyethyl methacrylate) fiber as a carrier to support iron ions and its catalytic performance for methylene blue decolorization[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 2020, 57(7): 531-543.
- [21] SAFAVI-MIRMAHALLEH S A, SALAMI-KALAJAHI M, ROGHANI-MAMAQANI H. Effect of surface chemistry and content of nanocrystalline cellulose on removal of methylene blue from wastewater by poly(acrylic acid)/nanocrystalline cellulose nanocomposite hydrogels[J]. *Cellulose*, 2019, 26(9): 5603-5619.

#### 本文引文格式:

徐乃库, 张佳涵. 硅烷改性 CNC 掺杂聚丙烯酸 Fenton 催化纤维的制备及其性能[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(6): 9-14.

XU N K, ZHANG J H. Preparation of silane-modified CNC-doped polyacrylic acid Fenton catalytic fiber and its performance[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(6): 9-14 (in Chinese).

(责任编辑: 孙广宇)