

氧化改性活性炭纤维吸附材料制备 及其性能研究

杨欢, 杨森, 申展, 戴文俊

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 以不同浓度的双氧水溶液对活性炭纤维进行氧化改性, 制备 SO_2 、 NO_x 腐蚀气氛吸附材料。**方法** 采用红外光谱、X 射线衍射仪、X 射线光电子能谱仪等表征方式, 揭示双氧水改性对活性炭纤维孔隙结构、表面物理化学性质、吸附性能的影响, 并将装有吸附材料的防护包装贮存于湿热海洋气候环境中, 验证腐蚀气氛控制效果。**结果** 双氧水改性活性炭纤维后, 其表面官能团未发生变化, 比表面积先减小、后增大。改性后, 活性炭纤维表面活性位点有所增加, 对应的吸附性能显著增加, 30%双氧水改性活性炭纤维对 SO_2 、 NO_2 、 NO 的饱和吸附量分别为 100、153、128 mg/g, 与改性前相比, 分别提高了 67%、180%、137%。应用吸附材料的防护包装内部腐蚀气氛浓度在 3 个月内几乎为 0。**结论** 双氧水改性活性炭纤维具有良好的腐蚀气氛吸附性能, 在长贮微环境中具有良好应用前景。

关键词: 双氧水; 活性炭纤维; 二氧化硫; 氮氧化物; 吸附; 湿热海洋气候

中图分类号: TJ089

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)10-0139-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.10.017

Preparation and Properties of Oxidized Modified Activated Carbon Fiber Adsorbent

YANG Huan, YANG Sen, SHEN Zhan, DAI Wen-jun

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare SO_2 and NO_x corrosive atmosphere adsorption materials by oxidation modification with different concentrations of hydrogen peroxide solution. The effects of hydrogen peroxide modification on the pore structure, surface physicochemical properties, and adsorption performance of activated carbon fibers were studied by characterization methods such as infrared spectroscopy, X-ray diffraction, and X-ray photoelectron spectroscopy. The protective packaging containing adsorption materials was stored in a humid and hot marine environment to verify the effectiveness of corrosive atmosphere control. There were no significant changes in the surface functional groups of oxidized activated carbon fiber. With the increase of hydrogen peroxide concentration, the specific surface area firstly decreased and then increased. After modification, the active site on the surface of activated carbon fiber increased and the corresponding adsorption performance significantly increased. The saturated adsorption capacity of 30% hydrogen peroxide modified activated carbon fiber for SO_2 , NO_2 , and NO was 100 mg/g, 153 mg/g, and 128 mg/g respectively, which was 67%, 180%, and 137% higher than that before modification. The concentration of corrosive atmosphere inside the protective packaging with adsorption materials was almost zero within 3 months. Hydrogen peroxide modified activated carbon fiber has good adsorption performance in corrosive atmosphere, and has good application prospects in long-term storage microenvironment.

收稿日期: 2023-06-14; 修订日期: 2023-08-22

Received: 2023-06-14; Revised: 2023-08-22

引文格式: 杨欢, 杨森, 申展, 等. 氧化改性活性炭纤维吸附材料制备及其性能研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 139-146.

YANG Huan, YANG Sen, SHEN Zhan, et al. Preparation and Properties of Oxidized Modified Activated Carbon Fiber Adsorbent[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 139-146.

good application prospects in long-term storage microenvironment.

KEY WORDS: H₂O₂; activated carbon fiber; SO₂; NO_x; adsorption; humid and hot marine climate

武器装备、电子元器件等贮存周期长、使用次数少的产品在海洋环境长期贮存过程中,易受二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)等酸性气体和水蒸气协同作用而产生腐蚀性破坏。目前,国内主要通过降低产品贮存微环境湿度来减少酸性气体的腐蚀性破坏,此时武器装备、电子元器件会长期处于相对湿度低于10%的环境中,会造成某些产品的干裂、脆化、粉化、静电等,严重影响其质量和使用性能。因此,亟待研究长贮微环境中常温条件下SO₂、NO_x等酸性气体吸附技术。当前关于长贮微环境中酸性气体的吸附及应用技术研究较少,但是在工业尾气等领域,SO₂、NO_x的吸附技术已得到广泛应用,开发了湿法、干法、半干法脱硫等成熟技术。干法脱硫所使用的材料包括活性炭、活性炭纤维、分子筛等吸附材料,其中活性炭纤维(ACF)具有较大比表面积、丰富微孔的特点而广泛应用于环保领域^[1-3]。因此,长贮微环境中常温条件下吸附技术也是以干法脱硫方法为基础开展相关研究的。

普通活性炭纤维具有吸附容量小、吸附速率低等缺点,难以满足贮存周期长、使用次数少的产品对SO₂、NO_x等酸性气体控制需求,故需对其进行改性。目前改性方法主要有金属盐及金属氧化物负载、酸碱处理、高温热处理、氧化改性等。金属及金属氧化物负载将金属离子引入到活性炭纤维中,长期贮存会有产生电化学腐蚀的风险。此外,金属元素负载活性炭纤维吸附性能提高的原因是金属元素的催化氧化作用,易受使用环境的影响。酸碱改性在制备过程中很容易造成废液排放问题。高温热处理对仪器和操作要求较高,改性成本高。以上关于改性活性炭纤维对SO₂、NO_x吸附性能的研究,应用对象多是着眼于烟气吸附^[4-7]。本文采用浸渍法制备了不同浓度H₂O₂氧化改性活性炭纤维,探究了改性前后活性炭纤维微观结构和表面物理化学性能变化,考察常温条件下氧化改性活性炭纤维对SO₂、NO_x吸附行为的变化,并在湿热海洋气候条件下以防护包装为应用对象,验证该材料在实际应用中的控制效果,为武器装备、电子元器件等产品贮存环境腐蚀气氛控制提供数据支撑。

1 试验

1.1 活性炭纤维氧化改性

将购于江苏苏通碳纤维有限公司的未改性的活性炭纤维裁剪成50 mm×50 mm×50 mm的正方体,将其于100℃沸水中煮0.5 h,然后在100℃的

DZF-6030A真空干燥箱中干燥24 h,等到自然冷却后,装袋密封备用,记作ACF-0。配制质量分数分别为10%、20%、30%的双氧水溶液500 mL,用JM-A10002电子天平称取3份25 g的ACF-0放入溶液中,25℃条件下浸渍24 h。浸渍过滤后,在100℃真空干燥箱内干燥10 h,待其自然冷却后,密封备用。ACF-H₂O₂改性条件见表1。

表1 ACF-H₂O₂改性条件
Tab.1 Modification conditions of ACF-H₂O₂

样品名称	浸渍温度/℃	浸渍时间/h	H ₂ O ₂ 质量分数/%
ACF-H ₂ O ₂ -1	25	24	10
ACF-H ₂ O ₂ -2	25	24	20
ACF-H ₂ O ₂ -3	25	24	30

1.2 测试与表征

1.2.1 结构及表面化学性质表征

采用IS5红外光谱仪分析样品表面官能团的变化情况。采用X'Pert³ Powder X射线衍射仪进行扫描,扫描范围为5°~90°,扫描速度为5(°)/min。采用ESCALAB 250Xi X射线光电子能谱仪对改性前后活性炭纤维的表面化学成分进行分析。采用ASAP2460全自动比表面积及孔隙度分析仪表征改性前后活性炭纤维结构的变化。采用Quanta400feg扫描电子显微镜观察改性前后活性炭纤维表面形貌变化。

1.2.2 吸附性能表征

ACF吸附脱除SO₂、NO₂、NO试验装置如图1所示。试验过程:设置SO₂/NO₂/NO的质量浓度约1 000 mg/L,测试并记录初始浓度为C₁,关闭气阀;调节使反应容器内气压、温度、湿度分别为标准大气压、25℃、40%;打开气阀,测量出口气体浓度,每分钟记录一次气氛浓度C₁, C₂, ..., C_n;当出口腐蚀气氛浓度与入口相同时,测试停止。

1.2.3 吸附容量计算^[8-10]

活性炭纤维对不同种类腐蚀气氛吸附容量计算公式见式(1)。

$$q = \sum_{i=1}^n \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{CQMt}{V_m \times M_{ACF}} \quad (1)$$

式中:q为气体吸附容量,mg/g;C为吸附气体的实时浓度,mg/L;Q为气体流量,mL/min;M为吸附气体相对分子质量,g/mol;V_m为标准状态摩尔体积,V_m=22.4 mL/mol;M_{ACF}为活性炭纤维质量,g;t为吸附时间,min。



图1 活性炭纤维吸附 SO_2 、 NO_2 、 NO 试验装置
Fig.1 Experimental device of activated carbon fiber adsorbing SO_2 , NO_2 , and NO

2 结果和讨论

2.1 氧化改性 ACF 红外光谱分析

ACF-0 和 ACF- H_2O_2 的红外光谱如图 2 所示。可以看出,二者在 $3\,450\sim 3\,500\text{ cm}^{-1}$ 间出现明显的醇类或酚类的 —OH 伸缩振动吸收峰,在 $1\,630\sim 1\,700\text{ cm}^{-1}$ 均出现羧基或羰基的 C=O 伸缩振动吸收峰,在 $1\,386\text{ cm}^{-1}$ 附近出现羧基的 C—O 伸缩振动吸收峰。ACF-0 和 ACF- H_2O_2 在 $1\,073\text{ cm}^{-1}$ 左右出现醇类、酚类的 C—O 伸缩振动吸收峰。 H_2O_2 的引入未对 ACF 官能团产生较大的影响^[11]。

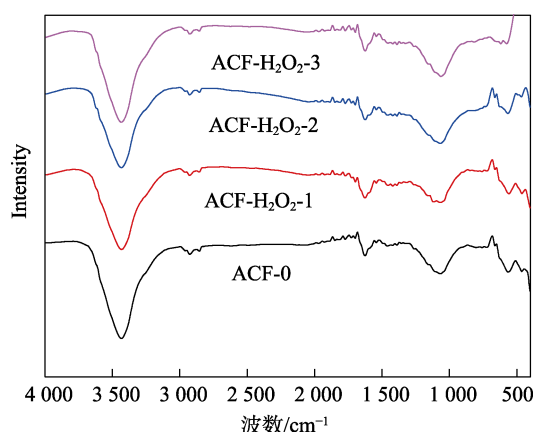


图2 氧化改性 ACF 红外图谱
Fig.2 Infrared spectrum of oxidation modified ACF

2.2 氧化改性 ACF XRD 分析

ACF-0 及 ACF- H_2O_2 XRD 谱图如图 3 所示。二者在衍射角 2θ 约为 23° 、 43° 附近分别出现一个较宽的衍射峰,分别对应于活性炭纤维材料的(100)和(002)晶

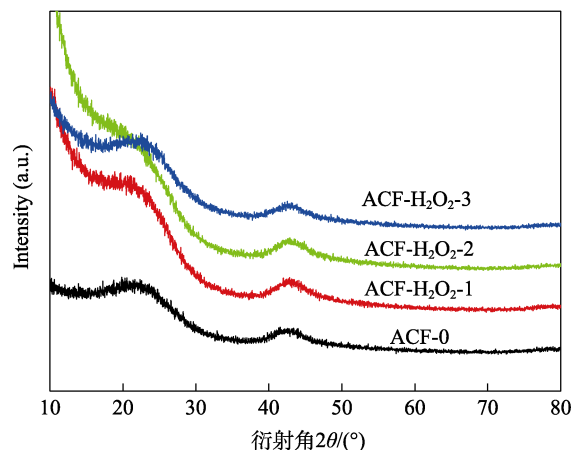


图3 氧化改性 ACF XRD 图谱
Fig.3 XRD pattern of Oxidation modified ACF

面,说明材料具有石墨层无序堆积的晶型结构^[12-13]。

2.3 氧化改性 ACF XPS 分析

ACF- H_2O_2 的 XPS 图谱如图 4 所示。由全谱分析可知, H_2O_2 改性前后,ACF、ACF- H_2O_2 中都含有 C、N、O 等 3 种元素。为进一步分析吸附后官能团变化,以 ACF- H_2O_2 -3 为例,通过分峰拟合得到图 5、表 2、表 3。

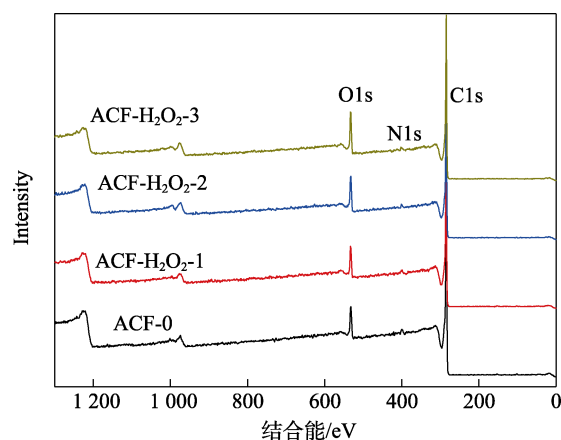


图4 氧化改性 ACF XPS 图谱
Fig.4 XPS spectrum of oxidation modified ACF

由图 5 可知,ACF- H_2O_2 -3 的 C—C 结合能为 284.80 eV 、羟基(C—O)的结合能为 285.18 eV 、羰基(C=O)的结合能为 286.51 eV 、羧基(COOH)的结合能为 288.50 eV 、震激伴峰($\pi\text{—}\pi^*$)的结合能为 291.01 eV 。吡啶官能团的结合能为 398.57 eV ,吡咯的结合能为 400.12 eV ,四元环氮的结合能为 401.33 eV , —NO 的结合能为 403.31 eV , —NO_2 的结合能为 406.43 eV , —NO_3 结合能为 407.61 eV 。由表 2 可知, C—O 、 C=O 减少, COOH 增多,这是因为 C—O 、 C=O 被氧化成 COOH 。表 3 中 —NO_3 的增多也是因为 —NO 、 —NO_2 被氧化的缘故^[14-16]。

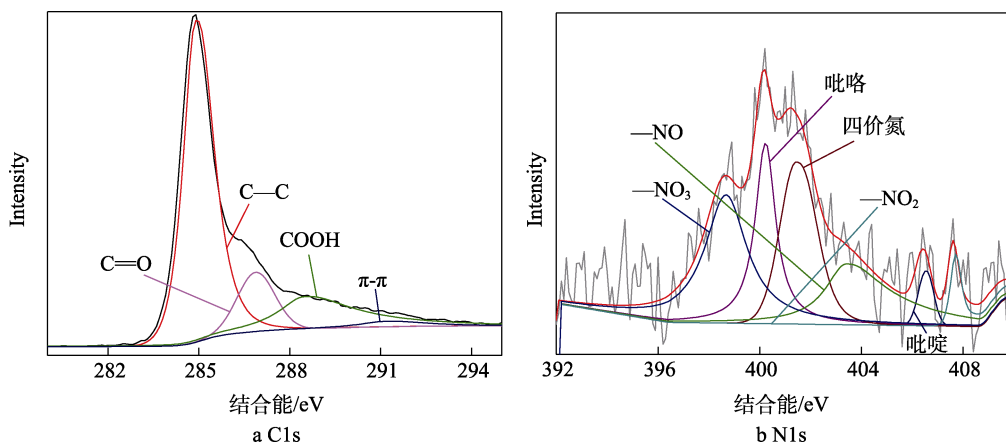


图5 ACF-H₂O₂-3 分峰拟合
Fig.5 Peak fitting results of ACF-H₂O₂-3

表2 ACF-H₂O₂-3 表面含氧官能团含量

Tab.2 Content of oxygen-containing functional groups on the surface of ACF-H₂O₂-3

官能团	C—C	C—O	C=O	COOH	$\pi-\pi^*$	%
ACF-0	46.50	12.74	27.35	6.46	6.95	
ACF-H ₂ O ₂ -3	65.04	0	13.54	18.91	2.51	

表3 ACF-H₂O₂-3 表面含氮官能团含量

Tab.3 Content of nitrogen-containing functional groups on the surface of ACF-H₂O₂-3

官能团	吡啶	吡咯	四元环氮	—NO	—NO ₂	—NO ₃	%
ACF-0	30.42	32.22	20.02	17.34	0	0	
ACF-H ₂ O ₂ -3	28.74	20.42	23.51	19.11	3.17	5.05	

2.4 氧化改性 ACF BET 分析

双氧水改性活性炭纤维 N₂ 吸附脱附曲线如图 6 所示。对比 IUPAC 的吸附等温线可以看出, ACF-H₂O₂ 符合 I 型, ACF-0 的吸附等温线在最上方对 N₂ 的吸附量最多。在相对压力较低时, 吸附作用主要来自微孔, 吸附质在微孔中吸附限于单层或准

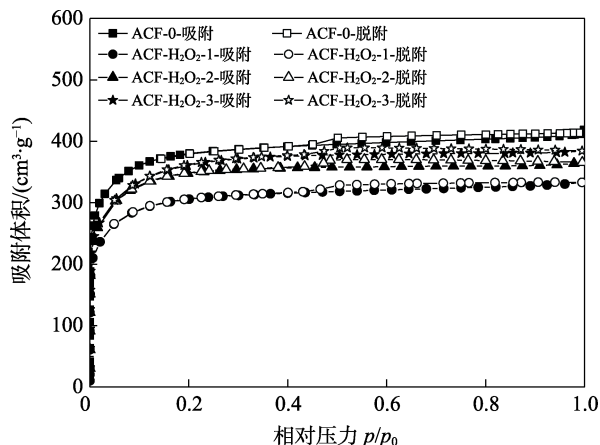


图6 氧化改性 ACF 氮气吸附脱附曲线
Fig.6 Nitrogen adsorption and desorption curve of oxidation modified ACF

单层吸附, 而且吸附很快达到饱和, 符合朗缪尔定律。当相对压力逐渐升高, 起吸附作用的主要是较大的微孔结构。同时发现, 当相对压力增加到一定程度时, 样品出现了明显的滞后回环, 这说明样品中具有介孔或大孔^[17-19]。

为更好反映样品的孔隙结构, 基于 BET 模型、t-plot 法、密度函数理论正则化方法、BJH 模型计算和分析样品的比表面积、微孔孔容及孔径分布, 结果见图 7、表 4。从图 7、表 4 可以看出, 经双氧水浸渍改性后, 活性炭纤维比表面积减小, 随着双氧水浓度的增加, 比表面积反而增加。比表面积的减小主要是由于双氧水的改性造成了部分微孔结构的塌陷, 而之后比表面积的增加则是因为双氧水浓度的增加, 活性炭纤维表面孔壁被刻蚀程度越多, 形成的微孔或中孔越多^[20-22]。

2.5 氧化改性 ACF SEM 表征

ACF-0 和 ACF-H₂O₂ 的 SEM 形貌如图 8 所示。由图 8 可知, 改性前后的 ACF 均呈现清晰、交错纵横的条状纤维结构, 表面形成了大量凹槽。由图 8a 可以发现, ACF-0 纤维丝管径较粗、比较光滑。对比图 8b~d 发现, 双氧水改性后, 纤维丝表面呈毛絮状。

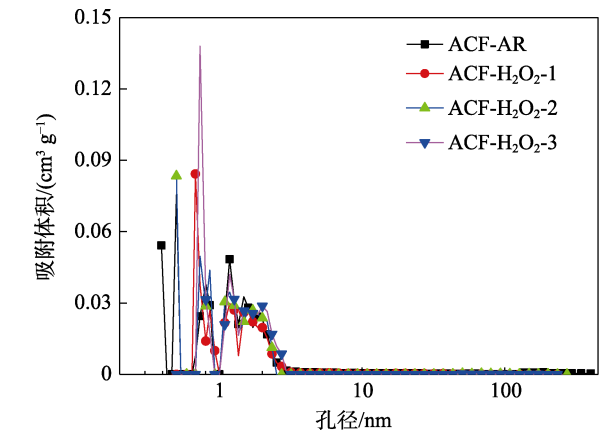


图 7 氧化改性 ACF 孔径分布
Fig.7 Pore size distribution of oxidation modified ACF

表 4 ACF-H ₂ O ₂ 基本结构参数 Tab.4 Basic structural parameters of ACF-H ₂ O ₂			
样品	$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	$V_{\text{t}}/(\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1})$	$D_{\text{pore}}/\text{nm}$
ACF-0	1 452	0.57	1.76
ACF-H ₂ O ₂ -1	1 061	0.33	1.94
ACF-H ₂ O ₂ -2	1 211	0.38	1.87
ACF-H ₂ O ₂ -3	1 366	0.34	1.87

这是因为双氧水会与活性炭纤维表面官能团发生氧化还原反应, 使其表面形成缺陷^[23-24]。

2.6 吸附性能

基于式(1)对 ACF-0 和 ACF-H₂O₂ 对 SO₂、NO₂、NO 的吸附容量进行计算, 吸附容量随时间变化情况如图 9 所示。改性活性炭纤维对腐蚀气氛的吸附速率随吸附时间的增加而逐渐减小, 说明前期改性活性炭纤维快速吸附, 后期趋于稳定。在吸附的初始阶段, 吸附剂上的空余吸附位数目较多, 此时吸附速率的大小与空余吸附位的数目成正比, 所以初期吸附速率较大。另外, 初期吸附剂内微孔与吸附柱自由空间之间存在较大的气氛浓度差, 较大的浓度差加速了气体分子扩散到基质中的吸附过程。随着吸附量增加, 可用空余吸附位点数目和气氛浓度梯度都减小, 且吸附相与气相之间的互斥作用加剧, 所以后期吸附速率趋近于 0^[25]。

从图 9 可以看出, 采用双氧水改性 ACF 对其吸附性能有显著的提升效果。随着双氧水浓度(质量分数分为 0%、10%、20%、30%)的提高, 对 SO₂ 的饱

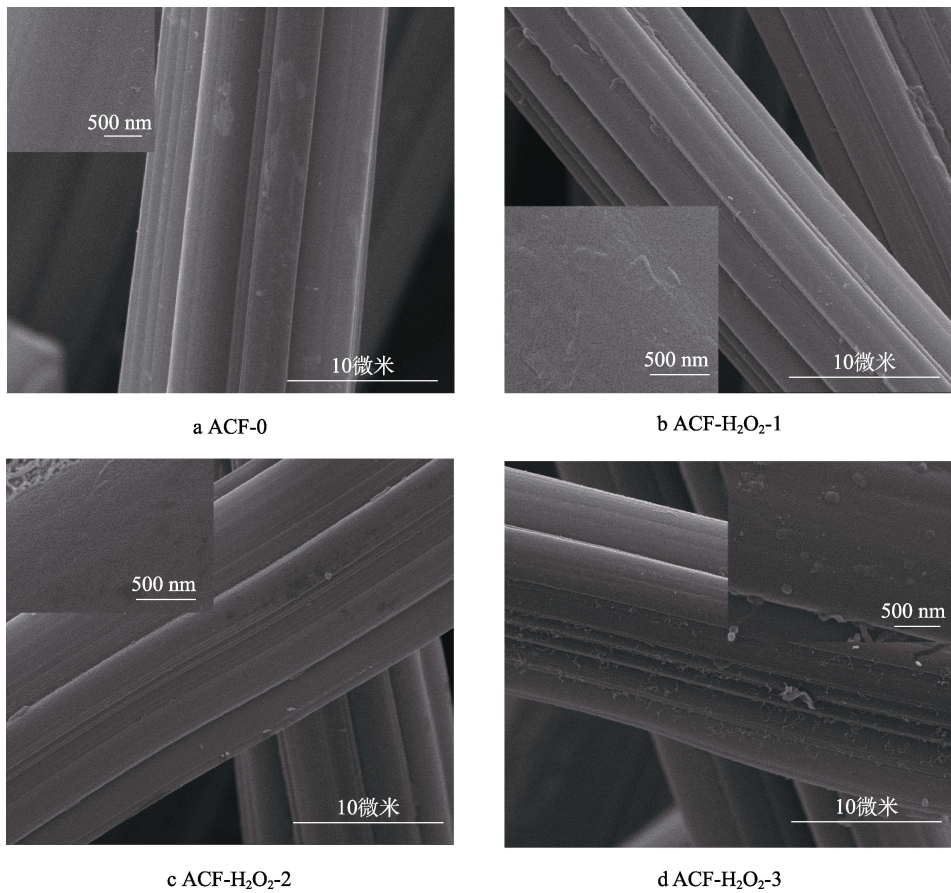


图 8 氧化改性 ACF 的 SEM 形貌
Fig.8 SEM image of oxidation modified ACF

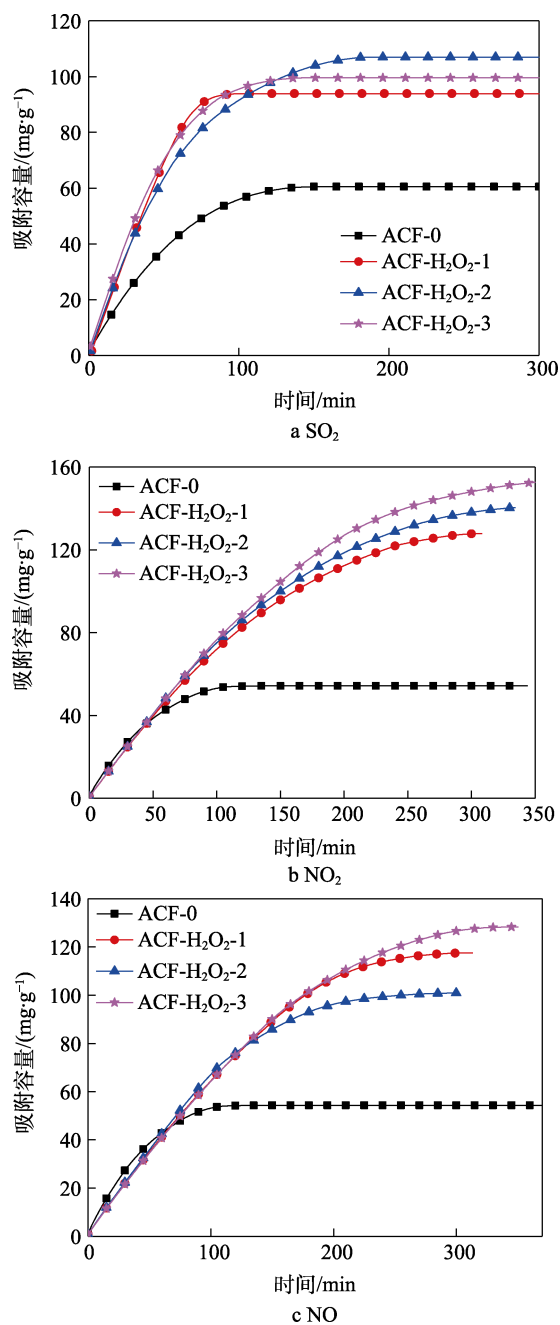


图9 氧化改性 ACF 吸附曲线

Fig.9 Adsorption curve of oxidation modified ACF

和吸附容量分别为 60、93、107、100 mg/g, 对 NO_2 的饱和吸附容量分别为 54、128、140、153 mg/g, 对 NO 的饱和吸附容量分别为 54、118、101、128 mg/g。通过对比可知, ACF- H_2O_2 -2 对 SO_2 的饱和吸附量最高, ACF- H_2O_2 -3 对 NO_2 、 NO 的饱和吸附量最高。综合比较, ACF- H_2O_2 -3 的吸附性能最优, 因此拟将其应用到防护包装中验证吸附效果。ACF 对 SO_2 、 NO_2 、 NO 的吸附既受表面孔隙结构的影响, 也受表面官能团化学吸附的影响。双氧水的引入降低了 ACF 的比表面积, 但是增加了微孔的数量, 二者决定了 ACF 的物理吸附能力。ACF 的化学吸附量则与其表面官能团(活性位点)有关, 含氧官能团中的 COOH 、 $\text{O}=\text{C}-\text{O}$ 是提高 ACF 对 SO_2 、 NO_x 吸附能力的重要因素, 而吡啶官能团的较强碱性对酸性具有较强的吸附聚合能力^[16,26]。由 2.3 节可知, 氧化改性后 ACF 表面 COOH 明显增多, 吡啶官能团有些许减少, 物理化学吸附综合作用提高了 ACF 的吸附性能。

氧化改性 ACF 吸附 SO_2 、 NO_x 的机理如图 10 所示。在氧气和水蒸气存在情况下, 活性碳纤维既作吸附剂, 又作催化剂。 SO_2/NO_x 、 H_2O 、 O_2 被吸附到 ACF 表面活性位上, O_2 在活性位点上被离解为 O , SO_2/NO_x 与 O 发生氧化还原反应, 生成 SO_3 、 NO_2 , 再与 H_2O 反应生成 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ 。其中, 活性位主要指 ACF 表面含氧官能团、含氮官能团^[26-27]。

2.7 长贮微环境腐蚀气氛控制效果验证

以长贮于湿热海洋气候的防护包装为应用对象, 对比 3 个月不含和含 100 g ACF- H_2O_2 -3 的防护包装内部的气氛浓度。气氛测试装置如图 11a 所示, 微环境腐蚀气氛浓度变化规律如图 11b 所示。针对 SO_2 、 NO_x 等腐蚀气氛, 未采用 ACF 的包装箱(传统微环境), 内部 SO_2 的质量浓度为 0.18 mg/L, NO_2 为 2.56 mg/L, NO 在 2.11~7.67 mg/L。在微环境中采用 ACF- H_2O_2 -3 后, 微环境内部腐蚀气氛被吸附, 除 3 月份 NO 质量浓度为 2.6 mg/L 外, 其他时间内气氛浓度为 0。

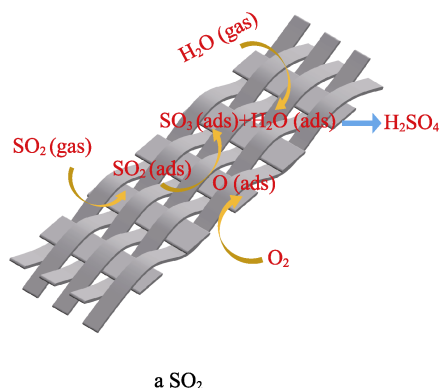
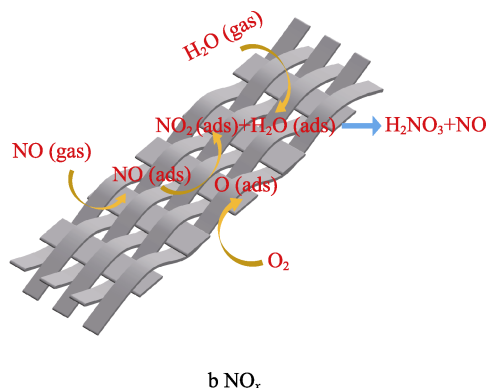
a SO_2 b NO_x

图10 氧化改性 ACF 吸附机理

Fig.10 Adsorption mechanism of oxidation modified ACF

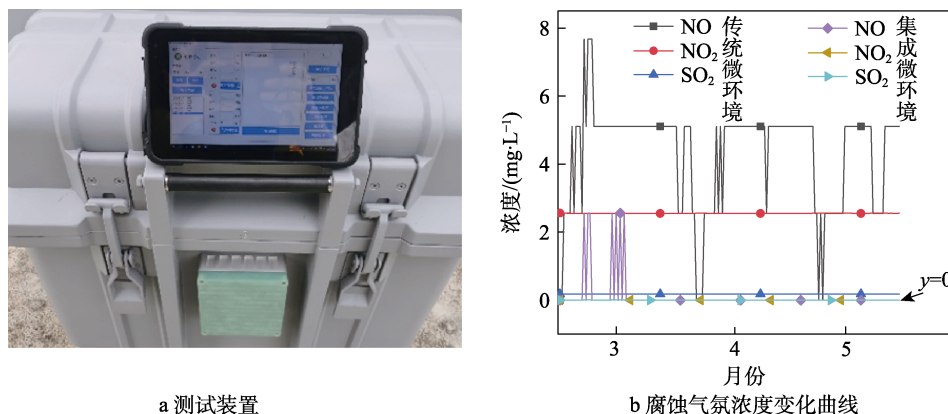


图11 微环境腐蚀气氛吸收/吸附技术控制效果

Fig.11 Control effect of corrosive atmosphere absorption/adsorption technology in microenvironment: a) testing device; b) change curve of corrosive atmosphere concentration

3 结论

本文以活性炭纤维为载体,采用浸渍法氧化改性活性炭纤维,通过对改性活性炭纤维的性能进行测试分析,得出如下结论:

1) ACF 双氧水质量分数从 0%到 10%,比表面积减小;从 10%到 30%,表面积增大。氧化改性后,ACF 表面呈毛絮状,表面含氧官能团 COOH 增多,含氮吡啶官能团减少。

2) 随着双氧水质量分数从 0%提高到 30%,对 SO₂ 的饱和吸附容量分别为 60、93、107、100 mg/g,对 NO₂ 的饱和吸附容量为 54、128、140、153 mg/g,对 NO 的饱和吸附容量为 54、118、101、128 mg/g。通过对比 ACF-H₂O₂-2 对 SO₂ 饱和吸附量最高,ACF-H₂O₂-3 对 NO₂、NO 的饱和吸附量最高,综合比较下来,ACF-H₂O₂-3 吸附性能最优。

3) 未采用 ACF 微环境内部腐蚀气氛浓度不为 0,在微环境中采用 ACF-H₂O₂-3 后,微环境内部腐蚀气氛被吸附,除 3 月份 NO 的质量浓度为 2.6 mg/L,其他时间内均为 0,因此在武器装备领域具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] WANG Ze-an, JIN Hu, WANG Kun, et al. A Two-Step Method for the Integrated Removal of HCL, SO₂ and NO at Low Temperature Using Viscose-Based Activated Carbon Fibers Modified by Nitric Acid[J]. Fuel, 2019, 239: 272-281.
- [2] ABDULRASHEED A A, JALIL A A, TRIWAHYONO S, et al. Surface Modification of Activated Carbon for Adsorption of SO₂ and NO_x: A Review of Existing and Emerging Technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 94: 1067-1085.
- [3] YANG Shu, WANG Dong-li, LIU Hui, et al. Highly Sta-

ble Activated Carbon Composite Material to Selectively Capture Gas-Phase Elemental Mercury from Smelting Flue Gas: Copper Polysulfide Modification[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 358: 1235-1242.

- [4] 纪国洋, 张帅, 孙恩呈, 等. 不同改性 ACF 负载 TiO₂ 复合材料去除甲苯性能研究[J]. 油气田环境保护, 2023, 33(2): 32-39.
JI Guo-yang, ZHANG Shuai, SUN En-cheng, et al. Study on Toluene Removal Performance of Different Modified ACF Loaded TiO₂ Composites[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2023, 33(2): 32-39.
- [5] 王杨, 王铎宇, 王欣. 硝酸改性沙柳纤维状活性炭的制备及其吸附性能研究[J]. 林产工业, 2023, 60(3): 8-14.
WANG Yang, WANG Duo-yu, WANG Xin. Study on Preparation of Salix Fibrous Activated Carbon Modified by HNO₃ and Its Adsorption Effect[J]. China Forest Products Industry, 2023, 60(3): 8-14.
- [6] 黄建雨. 改性 ACF 的制备及其吸附 SO₂ 的研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2017.
HUANG Jian-yu. Study on Preparation of Modified ACF and Its Adsorption of SO₂[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2017.
- [7] 都亚茹. 改性活性炭纤维吸附氮氧化物的实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
DU Ya-ru. Experimental Study on Adsorption of Nitrogen Oxides by Modified Activated Carbon Fiber[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [8] 雷冰漫. 多孔碳材料制备及甲苯吸附性能研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2020.
LEI Bing-man. Preparation of Porous Carbon Materials and Study on Toluene Adsorption Performance[D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2020.
- [9] 郑维重. 典型吸附剂及改性活性炭脱除高浓度硫化氢的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
ZHENG Wei-chong. Study on Removal of High Concentration Hydrogen Sulfide by Typical Adsorbents and Modified Activated Carbon[D]. Wuhan: Huazhong Uni-

- versity of Science and Technology, 2017.
- [10] 王晓明. 改性 ACF 低温脱除 NO 实验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2008.
WANG Xiao-ming. Experimental Study on Removal of NO by Modified ACF at Low Temperature[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2008.
- [11] ZHOU Ke, MA Wei-wu, ZENG Zheng, et al. Experimental and DFT Study on the Adsorption of VOCs on Activated Carbon/Metal Oxides Composites[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 372: 1122-1133.
- [12] 郭冲, 葛元宇, 王玉萍, 等. 活性炭纤维的甲醛吸附性能研究[J]. 棉纺织技术, 2021, 49(3): 36-41.
GUO Chong, GE Yuan-yu, WANG Yu-ping, et al. Study on Formaldehyde Adsorption Property of Activated Carbon Fiber[J]. Cotton Textile Technology, 2021, 49(3): 36-41.
- [13] 余琦, 刘伟军, 田中训, 等. 含氮官能团种类对活性炭纤维吸附催化 SO₂ 的影响[J]. 原子与分子物理学报, 2022, 39(1): 49-55.
YU Qi, LIU Wei-jun, TIAN Zhong-xun, et al. Effects of the Types of Nitrogen-Containing Functional Groups on the Adsorption and Catalytic of SO₂ by Activated Carbon Fibers[J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2022, 39(1): 49-55.
- [14] YAN Yong-gui, MAO Zhong-jian, LUO Jin-jing, et al. Simultaneous Removal of SO₂, NO_x and Hg⁰ by O₃ Oxidation Integrated with Bio-Charcoal Adsorption[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2020, 48(12): 1452-1460.
- [15] YUE Yang, WANG Yan-xiang, QU Ce, et al. Modification of Polyacrylonitrile-Based Activated Carbon Fibers and Their P-Nitrophenol Adsorption and Degradation Properties[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105390.
- [16] 姜婷. 复合纳米活性碳纤维的制备与吸附动力学研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
LOU Ting. Study on Preparation and Adsorption Kinetics of Composite Nano-Activated Carbon Fiber[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013.
- [17] 李秉正, 吴慧媛, 杨颖超, 等. Fe(NO₃)₃ 处理的活性炭毡对苯酚的吸附行为[J]. 太原科技大学学报, 2020, 41(5): 401-406.
LI Bing-zheng, WU Hui-yuan, YANG Ying-chao, et al. Adsorption of Phenol from Water Onto Fe(NO₃)₃-Treated Activated Carbon Felts[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2020, 41(5): 401-406.
- [18] 于馨凝, 林国鑫, 刘少俊, 等. 针对 SO₂ 脱除的煤基活性炭结构及表面优化调控[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1593-1600.
YU Xin-ning, LIN Guo-xin, LIU Shao-jun, et al. Optimization of the Structural and Surface Characteristics of Activated Carbon for SO₂ Removal[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1593-1600.
- [19] 杨欢, 宋阳曦, 徐淑权, 等. 氯化钙改性硅胶吸湿材料的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2022, 43(15): 216-225.
YANG Huan, SONG Yang-xi, XU Shu-quan, et al. Preparation and Properties of Calcium Chloride Modified Silica Gel Hygroscopic Materials[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(15): 216-225.
- [20] 卓享好. 二氧化碳在页岩上的吸附动力学及驱替页岩气的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
ZHUO Ting-yu. Study on Adsorption Kinetics of Carbon Dioxide on Shale and Displacement of Shale Gas[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [21] (日)近藤精一, (日)石川达雄, (日)安部郁夫. 吸附科学[M]. 李国希译. 北京: 化学工业出版社, 2006.
SEIICHI K, TATSUO I, IKUO A. Adsorption Science[M]. LI Guo-xi Translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [22] 刘少俊. 活性炭及其负载金属氧化物脱除 SO₂ 的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
LIU Shao-jun. Basic Research on SO₂ Removal by Activated Carbon and Its Supported Metal Oxides[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [23] 陈明燕, 陈洁, 刘宇程, 等. 负载金属改性活性炭纤维的脱硫性能[J]. 化工环保, 2018, 38(6): 728-732.
CHEN Ming-yan, CHEN Jie, LIU Yu-cheng, et al. Desulfurization Performance of Activated Carbon Fibers Modified by Supported Metal[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2018, 38(6): 728-732.
- [24] LI Bing, MA Chun-yuan. Study on the Mechanism of SO₂ Removal by Activated Carbon[J]. Energy Procedia, 2018, 153: 471-477.
- [25] 秦洁, 常薇, 杜燕萍, 等. 磁性椰壳活性炭的制备与吸附性能[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(5): 7-11.
QIN Jie, CHANG Wei, DU Yan-ping, et al. Preparation and Adsorption Property of Magnetic Coconut Shell Activated Carbon[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2021, 35(5): 7-11.
- [26] 杨辉, 刘豪, 周康, 等. 活性炭纤维吸附脱除 NO 过程中 NO 氧化路径分析[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(8): 1002-1008.
YANG Hui, LIU Hao, ZHOU Kang, et al. Oxidation Path Analysis of NO in the Adsorption and Removal Process Using Activated Carbon Fibers[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(8): 1002-1008.
- [27] 刘鹤年. 活性炭纤维及改性活性炭纤维对常温下 NO 的催化氧化研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
LIU He-nian. Study on Catalytic Oxidation of NO by Activated Carbon Fiber and Modified Activated Carbon Fiber at Room Temperature[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

责任编辑: 刘世忠