

双极性 MgO 纳米棒的制备、表征及其在原糖回溶糖浆脱色的应用

蔡全龙¹, 程昊^{1,2*}, 唐婷范¹, 张文康¹, 卫政涛¹, 李利军^{1,2}

(1. 广西科技大学 生物与化学工程学院, 广西糖资源绿色加工重点实验室, 广西 柳州 545006;
2. 蔗糖产业省部共建协同创新中心, 广西 南宁 530004)

摘要: 该试验以 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 和 MgO 为原料, 制备碱式 $MgCl_2$ 纳米棒, 将其作为前驱物, 采用沉淀转化法制备 $Mg(OH)_2$ 纳米棒, 通过热分解法制备 MgO 纳米棒。通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)仪、傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)仪表征分析得出产物是直径为 150~250 nm、长度为 6~10 μm 的单晶 MgO 纳米棒, 为棒状纳米级。以脱色率为评价指标, 分别考察 MgO 纳米棒用量、脱色温度、脱色时间和 pH 值 4 个因素对原糖回溶糖浆脱色率的影响, 得出最佳条件为 MgO 纳米棒用量 0.03 g、脱色温度 60 $^{\circ}C$ 、脱色时间 110 min、pH 5.0。该 MgO 纳米棒对原糖回溶糖浆溶液的脱色率达到 (91.92 \pm 1.70)%。空白试验证明 MgO 纳米棒对原糖回溶糖浆的脱色率明显高于市售 MgO 的脱色率[(17.93 \pm 2.04)%]。该 MgO 纳米棒对原糖回溶糖浆溶液中色素的吸附试验表明, MgO 纳米棒吸附动力学符合准一级动力学模型, 吸附行为符合 Langmuir 等温吸附模型, 为单分子层吸附。

关键词: 双极性 MgO 纳米棒; 原糖回溶糖浆; 脱色性能; 动力学模型; 吸附

Preparation and Characterization of Bipolar MgO Nanorods and Its Application in Decolorization of Raw Sugar-Redissolved Syrup

CAI Quanlong¹, CHENG Hao^{1,2*}, TANG Tingfan¹, ZHANG Wenkang¹,
WEI Zhengtao¹, LI Lijun^{1,2}

(1. College of Biological and Chemical Engineering, Guangxi Key Laboratory of Green Processing of Sugar Resources, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 2. Provincial-Ministerial Collaborative Innovation Center for Sugar Industry, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: In this experiment, alkaline $MgCl_2$ nanorods were prepared from $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ and MgO , which were used as precursors to prepare $Mg(OH)_2$ nanorods by precipitation transformation and MgO nanorods by thermal decomposition. The products were subjected to analysis by using a scanning electron microscope (SEM), an X-ray diffraction (XRD) instrument, and a Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR). The products were obtained as single-crystal MgO nanorods with a diameter of 150–250 nm and a length of 6–10 μm , exhibiting rod-like nanoscale morphology. The decolorization rate was employed as the evaluation index to investigate the effects of four factors, namely MgO nanorod dosage, decolorization temperature, decolorization time, and pH on the decolorization rate of raw sugar-redissolved syrup. The optimal conditions were found to be a MgO nanorod dosage of 0.03 g, a decolorization temperature of 60 $^{\circ}C$, a decolorization time of 110 min, and a pH of 5.0. The MgO nanorods demonstrated a decolorization rate of (91.92 \pm 1.70)% for the raw sugar-redissolved syrup. The results of the blank test demonstrated that the decolorization rate of MgO nanorods on the raw sugar-redissolved syrup was markedly superior to that of the commercially available MgO , which exhibited a decolorization rate of (17.93 \pm 2.04)%. The adsorption test of this MgO nanorod material on

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(2022GXNSFAA035490); 广西自然科学基金重点项目(2019GXNSFDA245025); 广西糖资源绿色加工重点实验室主任基金项目(GXTZYR202202)

作者简介: 蔡全龙(2000—), 男(汉), 本科, 研究方向: 应用化学。

*通信作者: 程昊(1980—), 男(汉), 副研究员, 硕士, 研究方向: 制糖科学与工程及应用化学。

pigments in raw sugar-redissolved syrup demonstrated that the adsorption kinetics of the MgO nanorods exhibited conformity with the quasi-primary kinetics model. Furthermore, the adsorption behaviors demonstrated conformity with the Langmuir isothermal adsorption model, indicating mono-molecular layer adsorption.

Key words: bipolar MgO nanorods; raw sugar - redissolved syrup; decolorization performance; kinetics model; adsorption

引文格式:

蔡全龙,程昊,唐婷范,等. 双极性 MgO 纳米棒的制备、表征及其在原糖回溶糖浆脱色的应用[J]. 食品研究与开发, 2025,46(3):125-131.

CAI Quanlong, CHENG Hao, TANG Tingfan, et al. Preparation and Characterization of Bipolar MgO Nanorods and Its Application in Decolorization of Raw Sugar-Redissolved Syrup[J]. Food Research and Development, 2025,46(3): 125-131.

蔗糖是我国最重要的农产品,高质量发展关系着我国食糖的供给安全。目前,甘蔗制糖工艺是我国主要的制糖工艺,在甘蔗制糖过程中,澄清是关键的一环。甘蔗汁具有蔗糖、还原糖、蛋白质、各种氨基酸和有机酸等成分^[1-2]。当其还原糖的 pH 值大于 7.0 时会发生分解,并且氨基酸和还原糖还会发生反应,产生有色物质,导致脱色率低以至于不能彻底解决糖汁色值较高问题。

常见糖汁澄清方法有亚硫酸法、石灰法和碳酸法等^[3]。亚硫酸法以二氧化硫为澄清剂,石灰法以石灰为澄清剂,操作简单、工艺成本较低;碳酸法以二氧化碳和石灰为澄清剂,缺点是必须控制 pH 值和石灰用量^[4]。基于此,研究者提出了利用多孔材料作为吸附剂,取代碳酸法和亚硫酸法中的吸附剂。目前用于糖汁脱色的吸附剂主要有活性炭、大孔树脂、碳酸钙、硫化物等。虽然上述材料解决了碳酸法和亚硫酸法引起的浪费问题和对环境的危害问题,但是其脱色率较低,不适合工业大规模使用^[4-5]。研究发现采用氧化镁-亚硫酸法对糖汁进行脱色,当反应时间为 10 min 时,脱色率为 81.71%^[6]。

MgO 纳米棒是一种新型的功能性精细无机材料,在消防、环保和复合材料中有应用价值。然而基于 MgO 纳米棒用于糖汁脱色还仍是空白,研究开发一种新型的脱色效率高、制备简便的吸附剂一直处于探索前进的方向。

本研究采用 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 和 MgO 制备碱式 $MgCl_2$ 纳米棒,再以碱式 $MgCl_2$ 纳米棒作为前驱物,利用沉淀转化法合成 $Mg(OH)_2$ 纳米棒。最后通过采用前驱物热分解法分解 $Mg(OH)_2$ 纳米棒,从而得到 MgO 纳米棒。通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)仪和傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)仪对 MgO 纳米棒及其前驱物进行表征。研究 MgO 纳米棒对原糖回溶糖浆的脱色性能,并探索其最

佳的条件,以期为更加绿色高效的制糖提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

原糖回溶糖浆(食用级):广西崇左东亚糖业有限公司;六水合氯化镁(分析纯):广东省化学试剂工程技术研究中心;氧化镁、无水乙醇(均为分析纯):成都市科隆化学品有限公司;氢氧化钠、盐酸(均为分析纯):西陇科学股份有限公司;异丙醇(分析纯):广东光华科技股份有限公司。试验用水均为去离子水。

1.2 仪器与设备

集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101S):巩义市予华仪器有限责任公司;1 200 °C箱式炉(M1210):河南成仪设备科技有限公司;台式高速离心机(TG16-WS):济南爱来宝仪器设备有限公司;pH 计(PHS-3C):上海霄盛仪器制造有限公司;小型离子溅射仪(SBC-12):北京中科科仪股份有限公司;阿贝折射仪(WAJ-2S):上海平轩科学仪器有限公司;紫外-可见分光光度计(UV-2000):上海精密仪器仪表有限公司;X 射线衍射仪(D8 ADVANCE)、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)仪(Bruker Invenio R):布鲁克(北京)科技有限公司;扫描电子显微镜(Phenom ProX):复纳科学仪器(上海)有限公司。

1.3 MgO 纳米棒的合成

将 40.66 g $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 溶于 50.00 mL 溶剂(35.71 mL 无水乙醇,14.29 mL 超纯水)中,得 4.000 mol/L $MgCl_2$ 溶液。于 50 °C 下加热,并加入 0.564 2 g MgO,反应 3 min 后停止加热,室温陈化 48 h,抽滤。用去离子水、异丙醇各洗涤 3 次,去除 Cl^- 。最后将上述样品于 80 °C 下干燥 3 h,得碱式 $MgCl_2$ 纳米棒,研磨备用。

将研磨后的碱式 $MgCl_2$ 纳米棒于 60 °C 下,加入 60.00 mL 无水乙醇中,加入 2.000 mol/L NaOH(NaOH 与碱式 $MgCl_2$ 物质的量比为 2:1),反应 1 h。室温陈化 14 h,得 $Mg(OH)_2$,抽滤。用去离子水、无水乙醇洗涤

各3次,去除附着在 $Mg(OH)_2$ 上的 Cl^- 和 Na^+ 等。最后将 $Mg(OH)_2$ 于 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥3h,得 $Mg(OH)_2$ 纳米棒,研磨备用。

将研磨后的 $Mg(OH)_2$ 纳米棒于 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 下煅烧1h,升温速率为 $3\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,得 MgO 纳米棒,置于自封袋中保存。

1.4 MgO 纳米棒及其前驱物的表征

利用扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱(FT-IR)仪和X射线衍射仪对制备出的 MgO 纳米棒及其前驱物进行分析表征。

1.5 脱色试验

1.5.1 MgO 纳米棒用量对脱色率的影响

分别取原糖回溶糖浆溶液各 50.0 mL ,在脱色温度 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 、脱色时间 120 min 、 $pH5.0$ 条件下,考察 MgO 纳米棒用量(0.01 、 0.02 、 0.03 、 0.04 、 0.05 、 0.06 g)对脱色率的影响。

1.5.2 脱色温度对脱色率的影响

分别取原糖回溶糖浆溶液各 50.0 mL ,在 MgO 纳米棒用量 0.03 g 、脱色时间为 120 min 、 $pH5.0$ 条件下,考察脱色温度(15 、 30 、 45 、 60 、 75 、 $90\text{ }^\circ\text{C}$)对脱色率的影响。

1.5.3 脱色时间对脱色率的影响

分别取原糖回溶糖浆溶液各 50.0 mL ,在 MgO 纳米棒用量 0.03 g 、脱色温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $pH5.0$ 条件下,考察脱色时间(30 、 50 、 70 、 90 、 110 、 130 min)对脱色率的影响。

1.5.4 pH 值对脱色率的影响

分别取原糖回溶糖浆溶液各 50.0 mL ,在 MgO 纳米棒用量 0.03 g 、脱色温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、脱色时间 110 min 条件下,考察pH值(4.0 、 5.0 、 6.0 、 7.0 、 8.0 、 9.0)对脱色率的影响。

1.6 吸附动力学

分别取原糖回溶糖浆溶液各 50.0 mL ,在 MgO 纳米棒用量 0.03 g 、脱色温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $pH5.0$ 条件下,考察脱色时间(15 、 25 、 40 、 55 、 70 、 85 min)对吸附量的影响。

1.7 吸附等温线

分别取原糖回溶糖浆溶液各 50.0 mL ,在脱色温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 、脱色时间 150 min 、 $pH5.0$ 条件下,考察不同 MgO 纳米棒用量(0.01 、 0.02 、 0.03 、 0.04 、 0.05 g)对吸附量的影响。

1.8 色值和脱色率测定

将脱色后的糖液离心($5000\text{ r}/\text{min}$, 5 min),取上清液,调节pH值至 7.0 左右,用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔膜过滤,收集滤液并测试其在 560 nm 处的吸光度(A),采用阿贝折射仪测量其折光率。根据公式计算脱色前后溶液的色值(U_{560})和脱色率(D)^[1,4]。

色值和脱色率可直接表明原糖回溶糖浆的脱色效

果。脱色后溶液的颜色越浅说明脱色后溶液的色值越低,脱色率越高。色值和脱色率计算公式如下。

$$U_{560} = \frac{A_{560}}{b \times \rho} \times 1000$$

$$D = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \times 100$$

式中: U_{560} 为原糖回溶糖浆脱色后的色值; A_{560} 为在 560 nm 处溶液的吸光度; b 为比色皿的厚度, cm ; ρ 为样液溶质的浓度, g/mL ; D 为脱色率, $\%$; U_1 为脱色前的色值; U_2 为脱色后的色值。

1.9 MgO 纳米棒吸附量的测定

吸附量计算公式如下^[1,4]。

$$q = \frac{1 - C}{m}$$

式中: q 为从初始色值降为最终色值时单位 MgO 纳米棒的吸附量; C 为色素的残留浓度,以 U_2/U_1 表示, U_1 为脱色前的色值, U_2 为脱色后的色值; m 为 MgO 纳米棒的用量, g 。

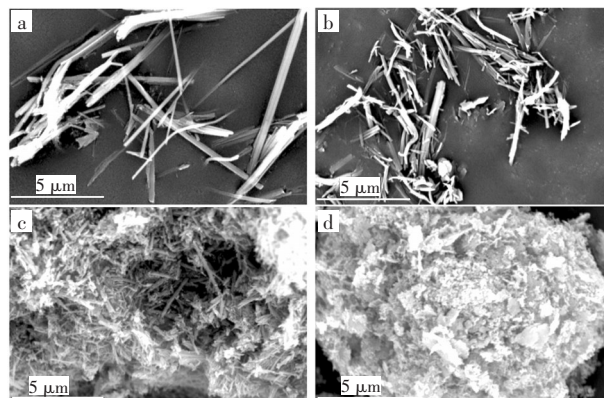
1.10 数据处理

试验数据均为3次重复试验的平均值,运用Origin 2022软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 形貌表征

碱式 $MgCl_2$ 纳米棒、 $Mg(OH)_2$ 纳米棒、 MgO 纳米棒和市售 MgO 的SEM表征结果见图1。



a. 碱式 $MgCl_2$ 纳米棒;b. $Mg(OH)_2$ 纳米棒;c. MgO 纳米棒;
d. 市售 MgO 。

图1 SEM表征结果

Fig.1 SEM characterization results

由图1a可知,碱式 $MgCl_2$ 纳米棒为棒状结构,直径约 100 nm ,表面光滑,不规则交叉在一起,且棒粗细不同。由图1b可知, $Mg(OH)_2$ 纳米棒直径为 $100\sim 200\text{ nm}$ 、长度约 $6\text{ }\mu\text{m}$,与图1a相比,长度较短。由图1c可知,部分纳米棒出现断裂,平均长度变短,表面较粗糙,许多 MgO 纳米棒堆叠在一起,原因可能是对 $Mg(OH)_2$ 纳米

棒的研磨不充分,导致少量的块状 $Mg(OH)_2$ 纳米棒烧结,形成的 MgO 纳米棒会堆积,表面较粗糙可能是制备过程中引入杂质引起的,直径为 $150\sim 250\text{ nm}$ 、长度为 $6\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 。由图 1d 可知,市售 MgO 是由许多不规则颗粒堆叠而成,与制备的 MgO 纳米棒相比,无规则外形,散乱堆积,因而不具备 MgO 纳米棒的特性^[7-8]。

2.2 基团表征

MgO 纳米棒的 FT-IR 图见图 2。

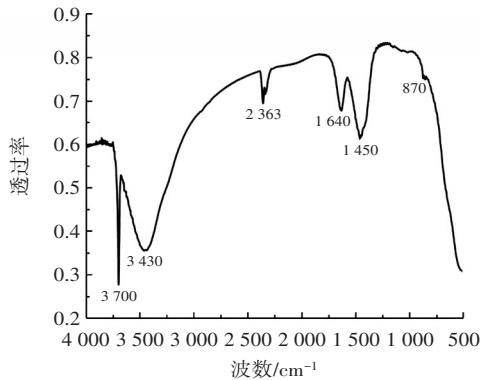


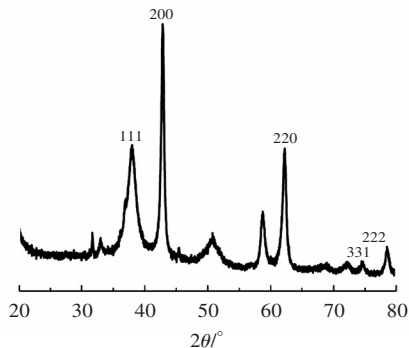
图 2 MgO 纳米棒的 FT-IR 图

Fig.2 FT-IR spectrum of MgO nanorods

由图 2 可知,位于 870 cm^{-1} 处的特征峰是 MgO 特征振动峰^[9]。位于 3430 cm^{-1} 左右处存在一个宽峰和位于 1640 cm^{-1} 左右的峰,分别是由于水分子中的 $-OH$ 伸缩振动和弯曲振动峰^[10]。位于 1450 cm^{-1} 左右的吸收峰是 CO_3^{2-} 特征峰,原因可能是在烧结过程中, MgO 纳米棒和空气中的二氧化碳反应可能生成 $MgCO_3$ 所致^[11]。位于 3700 cm^{-1} 左右出现一个尖锐的 $-OH$ 基团吸收峰,原因可能是 $Mg(OH)_2$ 纳米棒在烧结过程中没有完全转化为 MgO 纳米棒,残留部分 $Mg(OH)_2$ 纳米棒在 MgO 纳米棒中,XRD 也验证了这一点。此外,位于 2363 cm^{-1} 左右的吸收峰是由 CO_2 引起的,原因可能是大气中的 CO_2 所致^[12-13]。

2.3 晶体结构分析

MgO 纳米棒的 XRD 图见图 3。



图中数值为氧化镁的衍射峰。

图 3 MgO 纳米棒的 XRD 图

Fig.3 XRD pattern of MgO nanorods

由图 3 可知, MgO 纳米棒在 37.0° 、 43.0° 、 62.4° 、 74.8° 、 78.7° 处分别出现特征峰,其衍射峰位置与 MgO 标准衍射图(JCPDS no.43-1022)一致。说明样品主要成分为 MgO ,且纯度较高。标准图上的氧化镁的 111、200、220 衍射峰均存在,其中强度尖锐的衍射峰是方镁石特征峰,另外,还有 4 个强度较小的杂峰,与 $Mg(OH)_2$ 标准衍射图(JCPDS no.86-0441)一致。这些杂峰的存在是由于样品中含有少量的 $Mg(OH)_2$ ^[14]。

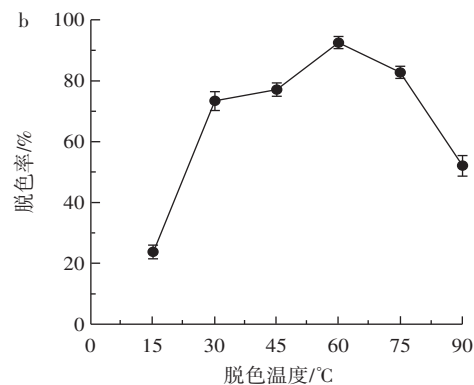
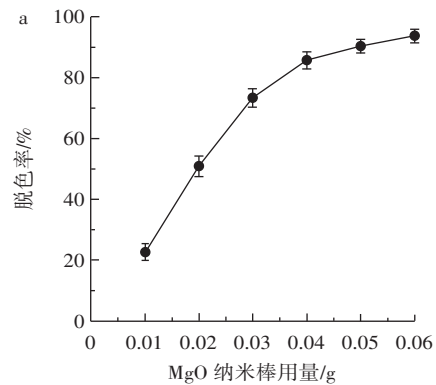
2.4 MgO 纳米棒与市售 MgO 的脱色试验对比

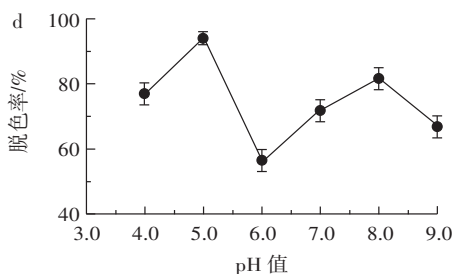
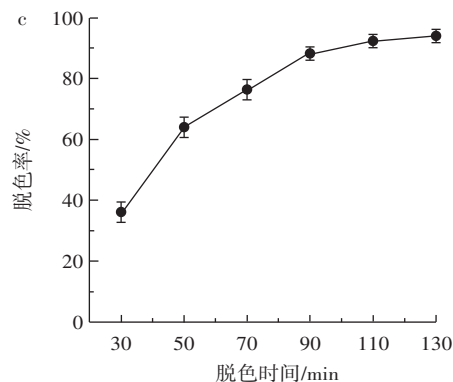
市售 MgO 的脱色率仅为 $(17.93\pm 2.04)\%$,而 MgO 纳米棒的脱色率为 $(73.40\pm 3.14)\%$ 。在脱色条件一致、市售 MgO 用量多于 MgO 纳米棒的条件下, MgO 纳米棒的脱色效果明显优于市售的 MgO 。原因可能是与市售 MgO 相比, MgO 纳米棒具有很大的比表面积,可吸收较多的杂质和色素,同时, MgO 纳米棒是棒状结构,相互交叉堆叠,可形成孔道结构,从而增强其吸附性能;另外, MgO 纳米棒的活性较高,对色素、杂质等进行吸附,能达到良好的脱色效果^[15-16]。

2.5 脱色试验分析

MgO 纳米棒用量、脱色温度、脱色时间、pH 值对脱色率的影响见图 4。

由图 4a 可知,随 MgO 纳米棒用量增大,脱色率逐渐升高,原因可能是 MgO 纳米棒用量逐渐增加,其比表面积也逐渐增大,提供的吸附色素位点增多^[17]。当 MgO 纳米棒用量达 0.03 g 时,脱色率为 $(73.36\pm 3.18)\%$,但是随 MgO 纳米棒用量继续增大,脱色率达 $(92.75\pm$





a. MgO 纳米棒用量; b. 脱色温度; c. 脱色时间; d. pH 值。

图4 单因素对脱色率的影响

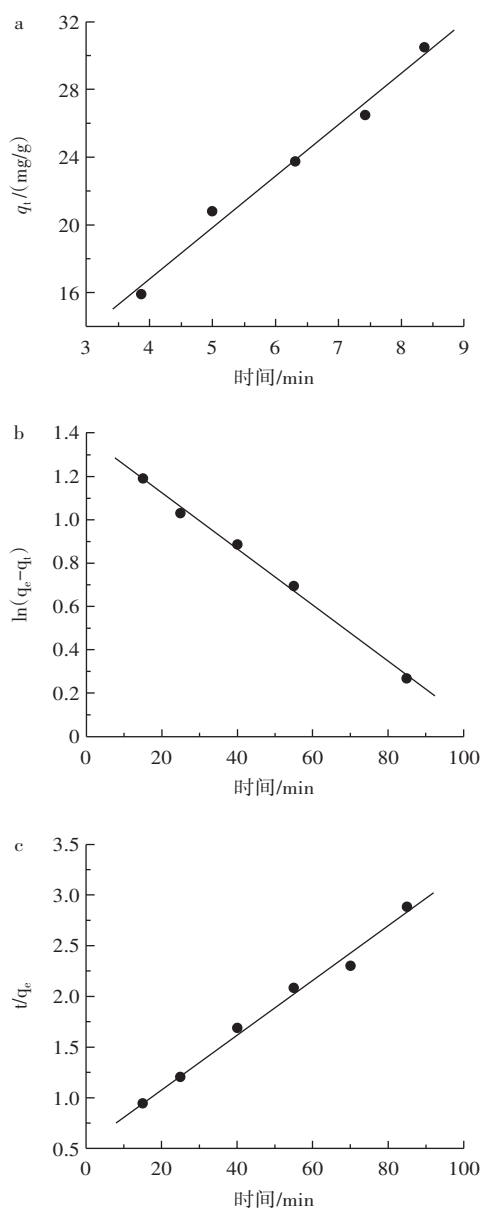
Fig.4 Effect of a single factor on decolorization rate

1.94)%, 升高幅度较小, 原因可能是可被吸附的色素在逐渐减少, 所以, 脱色率升高速率比较缓慢。因此, 从降低成本考虑, 试验选择 MgO 纳米棒用量 0.03 g 为最佳。由图 4b 可知, 随着脱色温度升高, 脱色率先呈上升后降低, 当脱色温度在 60 °C 时, 脱色率为 (91.92±1.70)%, 原因可能是随着脱色温度升高, MgO 纳米棒的活性逐渐提高, 对色素吸附能力增强。当脱色温度继续升高, MgO 纳米棒会部分分解, 吸附效果减弱, 吸附色素和杂质间的热运动剧烈, 从 MgO 纳米棒中脱附出来, 原糖回溶糖浆溶液中的不显色物质逐渐显色, 脱色率下降^[18]。因此, MgO 纳米棒最佳脱色温度为 60 °C。由图 4c 可知, 随着脱色时间延长, 脱色率升高。当脱色时间为 110 min 时, 脱色率为 (91.92±1.70)%, 继续延长到 130 min 时, 脱色率为 (92.98±2.17)%, 升高幅度很小, 说明最佳脱色时间为 110 min, 此时吸附已达饱和。因此, 选择最佳脱色时间为 110 min。由图 4d 可知, 随 pH 值升高, MgO 纳米棒的脱色效果呈波动趋势, 在 pH 值为 5.0 时, 脱色率为 (91.92±1.70)%; 在 pH 值为 8.0 时, 脱色率为 (81.23±3.55)%。偏酸性和偏碱性 MgO 纳米棒的糖汁脱色效果有差异, 但变化不大。在酸性很强情况下, 部分 MgO 会被溶解形成 Mg²⁺, pH 值为 4.0 时, 脱色率较低, 为 (76.49±3.00)%。在 pH 值从 6.0 增大到 8.0 时, 脱色率逐渐增大, 原因可能是在弱酸性 pH 值为 6.0, 脱色率最低, 原因可能是表面带电荷的 MgO 纳米棒通过静电引力和原糖回溶糖浆溶中带负电的胶体及色素分子结合而达到脱色效果^[19]。

在碱性很强情况下, OH⁻浓度增大, 会附着在 MgO 纳米棒表面, 降低 MgO 纳米棒吸附位点, 如 pH 值为 9.0 时, 脱色率降低, 为 (66.97±3.35)%, 分别在弱酸性和弱碱性环境下均具有良好的脱色效果, 说明 MgO 纳米棒耐酸耐碱性较强^[20-22]。因此, 选择最佳 pH 值为 5.0。因此, 当 MgO 纳米棒用量为 0.03 g、脱色温度为 60 °C、脱色时间为 110 min、pH 值为 5.0 时, MgO 纳米棒的脱色效果最好。

2.6 动力学模型拟合结果

粒内扩散吸附模型、准一级动力学吸附、准二级动力学吸附的结果见图 5, 动力学模型的拟合参数见表 1。



a. 粒内扩散吸附模型; b. 准一级动力学吸附; c. 准二级动力学吸附。

图5 动力学模型拟合结果

Fig.5 Kinetics model fitting results

表1 动力学模型拟合参数

Table 1 Fitting parameters of kinetics model

模型	k	R^2	方程
粒内扩散吸附	3.028 2	0.992 5	$y=3.028 2x+4.713 4$
准一级动力学吸附	-0.012 9	0.998 0	$y=-0.012 9x+1.381 9$
准二级动力学吸附	0.026 7	0.994 8	$y=0.026 7x+0.556 3$

由图5、表1可知,相关系数 k 分别为3.028 2、-0.012 9、0.026 7, R^2 分别为0.992 5、0.998 0和0.994 8,准一级动力学模拟拟合的相关系数 R^2 值更接近于1,表明准一级动力学吸附模型可以更好地描述MgO纳米棒对原糖回溶糖浆溶液中色素和杂质的吸附过程。但这3个方程的拟合结果 R^2 值接近,所以这3个动力学模型都可以表示MgO纳米棒对原糖回溶糖浆溶液中色素和杂质的吸附过程,最优的是准一级动力学吸附模型^[20]。

2.7 等温吸附拟合结果

Langmuir等温吸附和Freundlich等温吸附的结果见图6,动力学模型拟合参数结果见表2。

采用一级动力学吸附模型,对MgO纳米棒的原糖回溶糖浆溶液中吸附过程进行拟合。由图6(a)、表2可知,使用Langmuir等温吸附模型线性拟合得到相关

表2 动力学模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of kinetics model

模型	k	R^2	方程
Langmuir等温吸附	0.022 9	0.996 2	$y=0.022 9x+0.001 6$
Freundlich等温吸附	0.271 5	0.985 8	$y=0.271 5x+1.643 7$

系数 k 为0.022 9, R^2 为0.996 2。由图6(b)、表2可知,使用Freundlich等温吸附模型线性拟合得到相关系数 k 为0.271 5, R^2 为0.985 8,Langmuir等温吸附更适用于描述MgO纳米棒的原糖回溶糖浆溶液吸附过程,且MgO纳米棒的吸附属于单分子层吸附^[23-24]。

3 结论

双极性MgO纳米棒对原糖回溶糖浆溶液具有优良的脱色效果。在MgO纳米棒用量为0.03 g、脱色温度为60℃、脱色时间为110 min、pH值为5.0时,MgO纳米棒对原糖回溶糖浆溶液的脱色率为(91.92±1.70)%。MgO纳米棒呈棒状结构,红外光谱和XRD确定其组分为MgO。MgO纳米棒对原糖回溶糖浆溶液色素的吸附过程符合准一级动力学吸附和Langmuir等温吸附。以上结果表明,MgO纳米棒对原糖回溶糖浆脱色性能良好,且绿色环保,双极性MgO纳米棒在原糖回溶糖浆溶液脱色领域具有很好的发展前景。

参考文献:

- 田鑫莉,张文康,李利军,等.硅酸镁-石灰乳法对原糖回溶糖浆脱色性能的研究[J].食品工业,2022,43(9):51-55.
TIAN Xinli, ZHANG Wenkang, LI Lijun, et al. Study on the decolorization performance of raw sugar re-dissolved syrup by magnesium silicate-lime milk method[J]. The Food Industry, 2022, 43(9): 51-55.
- LU C, BAO Y W, HUANG J Y. Fouling in membrane filtration for juice processing[J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 42: 76-85.
- 程昊,孙黎明,唐婷范.球形多孔硅酸镁制备及其糖汁脱色应用[J].食品工业科技,2021,42(5):18-25.
CHENG Hao, SUN Liming, TANG Tingfan. Preparation of spherical porous magnesium silicate and its application in decolorization of sugar juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 18-25.
- CHAKRABORTY S, UPPALURI R, DAS C. Combinatorial optimality of membrane morphology and feedstock during microfiltration of bottle gourd juice[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 63: 102382.
- 唐婷范,任逸,朱家庆,等.氢氧化镁对蔗糖溶液中单宁酸的吸附性能研究[J].中国调味品,2022,47(8):46-50.
TANG Tingfan, REN Yi, ZHU Jiaqing, et al. Study on adsorption properties of magnesium hydroxide on tannic acid in sucrose solution[J]. China Condiment, 2022, 47(8): 46-50.
- 张跃彬,邓军,胡朝晖.“十三五”我国蔗糖产业现状及“十四五”发展趋势[J].中国糖料,2022,44(1):71-76.
ZHANG Yuebin, DENG Jun, HU Zhaohui. The 13th five-year plan of cane sugar industry in China and development trend of the 14th

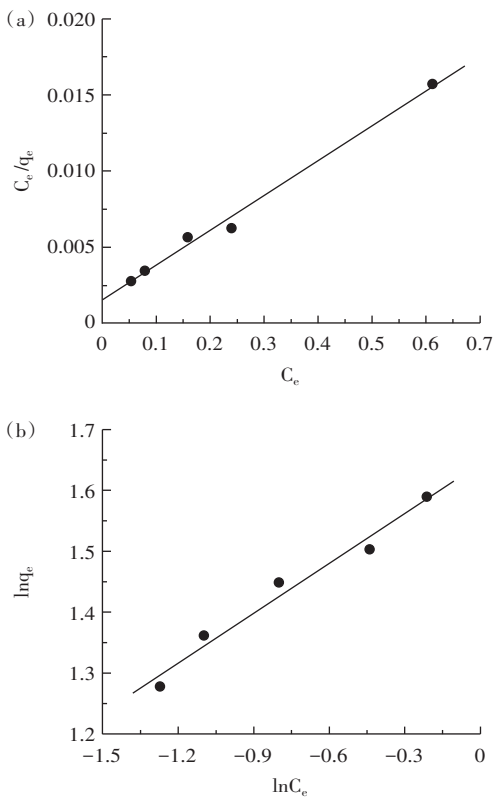


图6 等温吸附拟合结果

Fig.6 Isothermal adsorption fitting results

- five-year plan[J]. Sugar Crops of China, 2022, 44(1): 71-76.
- [7] SHI C R, RACKEMANN D W, MOGHADDAM L, et al. Ceramic membrane filtration of factory sugarcane juice: Effect of pretreatment on permeate flux, juice quality and fouling[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 243: 101-113.
- [8] 程昊, 孙黎明, 唐婷范, 等. 多孔硅酸镁的表征及其对糖汁中没食子酸的吸附[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 8-13.
CHENG Hao, SUN Liming, TANG Tingfan, et al. Characterization of porous magnesium silicate and adsorption of gallic acid in sugar juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(9): 8-13.
- [9] 张文康, 梁燕艺, 刘瑶, 等. CdS/g-C₃N₄ 复合材料的制备及其光催化性能研究[J]. 广西科技大学学报, 2018, 29(4): 66-73.
ZHANG Wenkang, LIANG Yanyi, LIU Yao, et al. Study on the preparation and photocatalytic performance of CdS/g-C₃N₄ composite catalyst[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2018, 29(4): 66-73.
- [10] LI W, LING G Q, LEI F H, et al. Ceramic membrane fouling and cleaning during ultrafiltration of limed sugarcane juice[J]. Separation and Purification Technology, 2018, 190: 9-24.
- [11] 黄承都, 艾硕, 黄永春, 等. 壳聚糖/蒙脱土复合糖用澄清剂的制备工艺及优化[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(4): 35-41.
HUANG Chengdu, AI Shuo, HUANG Yongchun, et al. Preparation technology and optimization of chitosan/montmorillonite composite as sugarcane clarifying agent[J]. China Food Additives, 2020, 31(4): 35-41.
- [12] 赵春燕. 多孔硅酸镁的制备及吸附性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
ZHAO Chunyan. Preparation and adsorption properties of porous magnesium silicate[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [13] EMANI S, UPPALURI R, PURKAIT M K. Preparation and characterization of low cost ceramic membranes for mosambi juice clarification[J]. Desalination, 2013, 317: 32-40.
- [14] 李紫薇, 欧阳艳, 腊萍, 等. 棉籽壳木聚糖提取液的脱色工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(5): 60-65.
LI Ziwei, OUYANG Yan, LA Ping, et al. Study on decolorization of cottonseed hull xylan[J]. Food Research and Development, 2013, 34(5): 60-65.
- [15] DE OLIVEIRA R C, DOCÊ R C, DE BARROS S T D. Clarification of passion fruit juice by microfiltration: Analyses of operating parameters, study of membrane fouling and juice quality[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(2): 432-439.
- [16] 冯淑娟, 李利军, 夏兆博, 等. 多孔氧化镁的制备及其对糖汁的吸附性能研究[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(8): 121-127.
FENG Shujuan, LI Lijun, XIA Zhaobo, et al. Preparation of porous magnesium oxide and its clarification performance in sugar juice industry[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(8): 121-127.
- [17] NANDI B K, UPPALURI R, PURKAIT M K. Identification of optimal membrane morphological parameters during microfiltration of mosambi juice using low cost ceramic membranes[J]. LWT - Food Science and Technology, 2011, 44(1): 214-223.
- [18] 黄承都, 黄永春, 刘斌, 等. 维生素 C 改性膨润土的制备及其在蔗汁脱色中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(3): 125-131.
HUANG Chengdu, HUANG Yongchun, LIU Bin, et al. Vitamin C modified bentonite preparation and its application in sugar cane juice decolorization[J]. China Food Additives, 2020, 31(3): 125-131.
- [19] 张文康. CdSe_xS_{1-x}/ZnS 核/壳量子点的制备、表面修饰及光电性能研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2020.
ZHANG Wenkang. Preparation, Surface modification and photoelectric properties of CdSe_xS_{1-x}/ZnS nuclear/shell quantum dots[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2020.
- [20] JEGATHEESAN V, PHONG D D, SHU L, et al. Performance of ceramic micro- and ultrafiltration membranes treating limed and partially clarified sugar cane juice[J]. Journal of Membrane Science, 2009, 327(1/2): 69-77.
- [21] 都风华, 刘楠楠. 响应面分析法优化芋头多糖的脱色工艺[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(16): 115-120.
DU Fenghua, LIU Nannan. Optimization of decolorization technology of taro polysaccharides by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2018, 39(16): 115-120.
- [22] VLADISAVLJEVIĆ G T, VUKOSAVLJEVIĆ P, BUKVIĆ B. Permeate flux and fouling resistance in ultrafiltration of depectinized apple juice using ceramic membranes[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 60(3): 241-247.
- [23] MONDOR M, GIRARD B, MORESOLI C. Modeling flux behavior for membrane filtration of apple juice[J]. Food Research International, 2000, 33(7): 539-548.
- [24] 赵孝先, 高玲, 杨文, 等. 响应面法优化香菇多糖脱色工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(11): 99-103.
ZHAO Xiaoxian, GAO Ling, YANG Wen, et al. Optimization of decolorization of lentinan using response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2016, 37(11): 99-103.