

# 煤矸石制备丝光沸石分子筛及吸附性能研究

余德飞<sup>1</sup>, 张瑞瑞<sup>2</sup>, 王梓坤<sup>2</sup>, 杨廷荣<sup>2</sup>, 成 岳<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>乐平市祥林科技有限公司, 江西 乐平

<sup>2</sup>景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院, 江西 景德镇

收稿日期: 2025年11月30日; 录用日期: 2025年12月23日; 发布日期: 2025年12月29日

## 摘要

以处理过的煤矸石为硅源、铝源, 按照 $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Na}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O} = 30:2:9:180$ 的摩尔配比, 采用静态水热晶化法放入反应釜中在180°C下晶化80 h后, 将获得的样品离心并洗涤至中性, 过滤干燥, 对产物的物理化学特性进行了表征XRD的结果表明合成出了丝光沸石分子筛, 扫描电镜图谱也出现了相似的丝光沸石板状结晶, 并且有较高的结晶度。吸附结果表明, 亚甲基蓝浓度为3 mg/L、丝光沸石投加量为1 g/L、反应时间为120 min、pH为10, 对亚甲基蓝的脱色率为86.7%, 吸附量为4.9 mg/g。

## 关键词

煤矸石, 水热合成, 丝光沸石分子筛, 吸附效果

# Study on Preparation of Mordenite Molecular Sieve from Coal Gangue and Its Adsorption Properties

Defei Yu<sup>1</sup>, Ruirui Zhang<sup>2</sup>, Zikun Wang<sup>2</sup>, Tingrong Yang<sup>2</sup>, Yue Cheng<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Leping Xianglin Technology Co., Ltd., Leping Jiangxi

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen Jiangxi

Received: November 30, 2025; accepted: December 23, 2025; published: December 29, 2025

## Abstract

Using processed coal gangue as the silicon and aluminum sources, the static hydrothermal crystallization method was employed in a reactor at 180°C for 80 hours with a molar ratio of  $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Na}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O} = 30:2:9:180$ . The samples obtained were centrifuged, washed to neutrality, filtered, and dried. The

\*通讯作者。

**文章引用:** 余德飞, 张瑞瑞, 王梓坤, 杨廷荣, 成岳. 煤矸石制备丝光沸石分子筛及吸附性能研究[J]. 材料化学前沿, 2026, 14(1): 28-35. DOI: 10.12677/amc.2026.141004

physical and chemical characteristics of the product were characterized. XRD results confirmed the synthesis of mordenite molecular sieve, and scanning electron microscopy images revealed similar plate-like faujasite crystals with high crystallinity. Adsorption results showed that at a methylene blue concentration of 3 mg/L, mordenite dosage of 1 g/L, reaction time of 120 min, and pH of 10, the decolorization rate of methylene blue reached 86.7%, with an adsorption capacity of 4.9 mg/g.

## Keywords

Coal Gangue, Hydrothermal Synthesis, Mordenite Molecular Sieve, Adsorption Effect

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

煤矸石是在采煤和洗煤过程中产生的一种固体废弃物。它的主要成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$ , 还含有  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{SO}_2$  以及不同含量的微量稀有元素[1]-[3]。煤矸石可以综合利用, 不但能改善矿区环境, 还可以节约资源, 减少土地占用, 促进矿区资源的可持续发展[4] [5]。

沸石分子筛是一类具有多孔构造的无机材料, 具有独特的分子筛结构, 酸性好, 热稳定性好, 比例可调, 用途广泛[6] [7]。为了实现准确的化学合成、气体组成以及吸附分离, 沸石制成的材料的改良和应用方面也一直是化学领域的热门话题[8] [9]。丝光沸石分子筛是含有铝和二氧化硅的分子筛。丝光沸石的内部通道结构较为特殊, 一方面, 八元环对于大多数物质来说都太小不足以通过, 所以丝光沸石一般被认为是一维结构的沸石, 在催化应用方面一定程度上会限制传质。另一方面, 由于丝光沸石分子筛内部孔道相互贯通且大小均匀, 同时由于其还具有耐酸碱、水热稳定性高等特点, 因此被广泛应用于催化裂化、脱蜡降凝、甲醇氧化等石油化工领域, 此外, 在精细化工、建材和环保等领域也具有广阔的应用前景[10]。

目前工业上制备沸石分子筛使用的原材料主要是纯的化学试剂, 成本高, 工艺复杂, 因此, 寻找廉价易得的合成原料已成为沸石分子筛大规模工业化发展的主要阻力。利用煤矸石合成沸石分子筛, 即可变废为宝, 解决了煤矸石的危害问题, 又降低了沸石分子筛的生产成本, 尤其是可以对废水废气进行治理, 达到以废治废、节约资源、改善环境、提高经济效益[11]。

本研究采用水热晶化法, 利用煤矸石合成丝光沸石分子筛, 并对其理化性质进行了表征和吸附性能研究, 煤矸石在资源化利用方面提供有益的依据。

## 2. 实验内容

### 2.1. 实验用原料和试剂

本课题所用煤矸石来自河南省固始县, 编号为 GS。如表 1 所示, 固始煤矸石的化学成分主要为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 二者之和就占 73.65%, 还有些少量的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  等, 还含有极少量的金属元素, 如钛、锶、铜、锆等。实验用药品见表 2。

### 2.2. 实验仪器

实验设备见表 3。

**Table 1.** Chemical composition analysis of coal gangue (%)  
**表 1. 煤矸石化学成分分析(w/%)**

| 名称 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO              | MgO  | K <sub>2</sub> O               | Na <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
|----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|--------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|
| 含量 | 47.46            | 26.19                          | 1.24                           | 0.08             | 0.69 | 1.90                           | 0.25              | 0.40            | 0.05                          |
| 名称 | TiO <sub>2</sub> | NiO                            | CuO                            | ZrO <sub>2</sub> | SrO  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CeO <sub>2</sub>  | I.L             | $\Sigma$                      |
| 含量 | 1.09             | 0.01                           | 0.01                           | 0.03             | 0.01 | 0.03                           | 0.03              | 20.52           | 99.99                         |

**Table 2.** Chemical reagents used in the experiment  
**表 2. 实验用药品**

| 药品   | 化学式  | 纯度        | 生产厂商         |
|------|--|-----------|--------------|
| 硅溶胶  | SiO <sub>2</sub>                                   | 25%       | 上海久亿化学试剂有限公司 |
| 氢氧化钠 | NaOH   | 化学纯(C.P.) | 上海久亿化学试剂有限公司 |
| 盐酸   | HCl  | 分析纯(A.R.) | 国药集团化学试剂有限公司 |
| 亚甲基蓝 | C <sub>16</sub> H <sub>18</sub> N <sub>3</sub> ClS | 分析纯       |              |

**Table 3.** Experimental equipment  
**表 3. 实验设备**

| 仪器           | 型号           | 生产厂商           |
|--------------|--------------|----------------|
| 恒温磁力搅拌器      | SZCL         | 巩义市义华仪器有限公司    |
| 台式高速离心机      | TG16-WS      | 长沙湘仪离心机仪器有限公司  |
| 电子分析天平       | JA2003N      | 上海精密科学仪器有限公司   |
| 电热干燥箱        | 101-1        | 江苏东合县电器厂       |
| pH/电导计       | 990 型        | 江苏江环分析仪器有限公司   |
| 水浴恒温振荡器      | SHA-B        | 常州荣华仪器制造有限公司   |
| 循环水式真空泵      | SHB-3        | 郑州杜甫仪器厂        |
| 艾柯实验室超纯水机    | Exceed-cd-08 | 成都唐氏康宁科技发展有限公司 |
| X-Ray 仪      | D8-ADVANCE   | 德国 Bruker 公司   |
| X 荧光光谱仪      | Axios mAX 型  | 荷兰帕纳科公司        |
| 扫描电镜         | KYKY-EM3900M | 中国科学院仪器中心      |
| 紫外 - 可见分光光度计 | UV754N       | 上海佑科仪器仪表有限公司   |

除了上述列举的仪器外，还有：250 mL 不锈钢反应釜(1 个)、搅拌子、小烧杯、量筒、漏斗、锥形瓶、聚四氟乙烯坩埚、研钵(1 个)、移液管(25 mL)、量筒、碱式滴定管等。

### 2.3. 分子筛制备实验步骤

首先用球磨机将煤矸石原料粉碎，随后在 550℃下焙烧，再用 1 mol/L 盐酸处理除去多余的铝，使其硅铝比从原来的 4.45 提高到 12~16，烘干备用。

称取 10 g 经预处理的煤矸石，采用 SiO<sub>2</sub>:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Na<sub>2</sub>O:H<sub>2</sub>O = 30:2:9:180 的摩尔配比合成丝光沸石分子筛[12]。依据配方称量对应质量的 NaOH、硅溶胶和去离子水。经混合后放置于搅拌器中搅拌过夜老化 12 h。再装入 250 mL 反应釜中，在 180℃下晶化 80 h，晶化完毕，将产物分离、洗涤、干燥，取出自然冷却后于研钵中研磨装袋备用。

## 2.4. 吸附实验

亚甲基蓝标准溶液的配制：分别用 5 个容量瓶配制 0.5 mg/L、1 mg/L、2 mg/L、3 mg/L、4 mg/L、5 mg/L 的亚甲基蓝标准溶液。用分光光度计对溶液在亚甲基蓝最大吸收波长(665.00 nm)下测定亚甲基蓝水标准溶液的吸光度，并绘制标准工作曲线为  $A = 0.199C + 0.0129$ ,  $R^2 = 0.9961$ 。

取 6 个相同的锥形瓶均放入 100 mL 亚甲基蓝溶液，调节不同的吸附剂浓度、吸附时间、pH 值和吸附剂的用量等，得到不同条件下对吸附亚甲基蓝的效果，由于浓度和吸光度呈现正比关系，所以亚甲基蓝的脱色率的计算公式：

$$T = \left( (A_0 - A) \div A_0 \right) \times 100\%$$

其中  $A$  为吸附之前亚甲基蓝溶液的吸光度， $A_0$  为吸附之后亚甲基蓝溶液的吸光度。

吸附量计算公式：

$$q = \frac{(C_0 - C) \times V}{M}$$

其中  $C_0$  为吸附前亚甲基蓝的浓度(mg/L)， $C$  为吸附后亚甲基蓝的浓度(mg/L)， $V$  为溶液体积(mL)， $M$  为分子筛用量(mg)， $q$  为吸附量(mg/g)。

## 3. 结果分析与讨论

### 3.1. XRD 和 SEM 分析

合成的沸石分子筛的 XRD 谱图和 SEM 如图 1 所示。由图 1(a)可以发现，样品的衍射峰除去峰值较低的峰外，有一个尤其尖锐，与丝光沸石分子筛的特征峰( $2\theta$ ( $^{\circ}$ ) = 9.30、18.82、20.82、24.15、25.52、27.80、31.05、32.90、35.50, PDF 卡 38-0238)十分匹配[13]，可以认为合成的样品纯度较高，结晶度较好。由图 1(b)可知，合成的丝光沸石分子筛样品呈板状形貌，符合标准的丝光沸石分子筛外形，说明合成的丝光沸石具有相对较高的结晶度[14]。

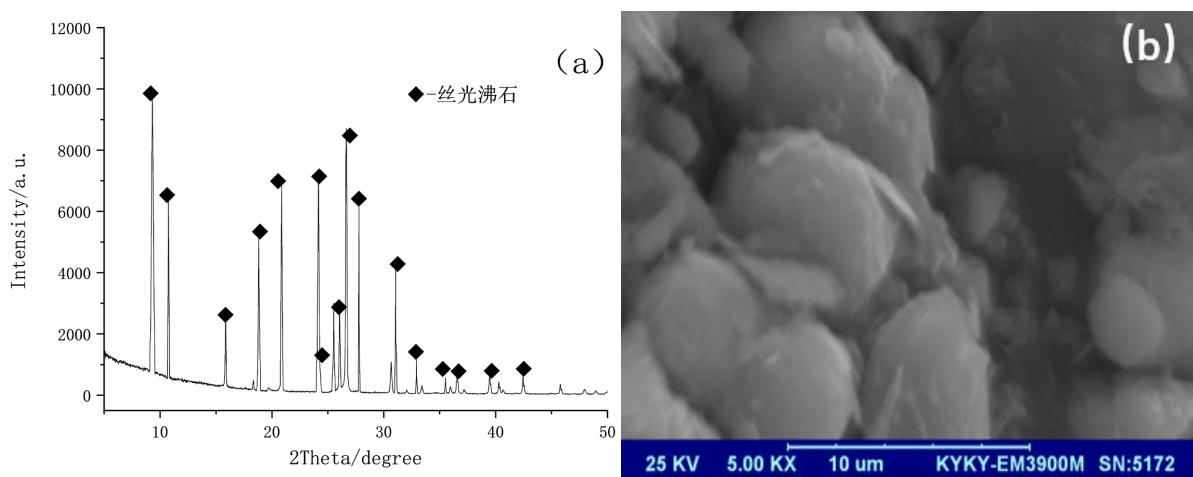


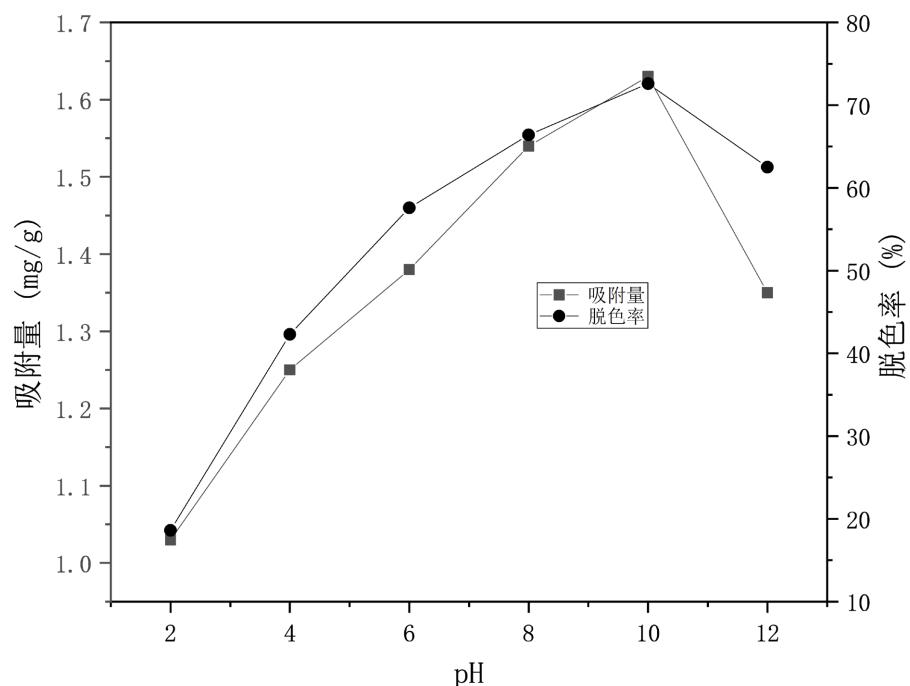
Figure 1. XRD (a) and SEM (b) patterns of mordenite molecular sieve

图 1. 丝光沸石分子筛的 XRD (a) 和 SEM (b)

### 3.2. 不同 pH 对吸附效果的影响

固定丝光沸石分子筛的用量 1 g/L，亚甲基蓝的浓度为 5 mg/L，吸附时间 120 min，不同的 pH 值对

丝光沸石分子筛吸附亚甲基蓝的影响结果见图 2。由图 2 可知在弱碱性条件下，分子筛对亚甲基蓝的吸附效果较好。pH 为 10 时，丝光沸石分子筛对亚甲基蓝的吸附效果最好，脱色率高达 74.2%。在酸性条件下，吸附量明显下降，可能是由于分子筛在酸性条件下活性大大降低，在 pH 为 2 时，脱色率只有 18.6%；当 pH 大于 10 时，脱色率亦明显降低，原因可能是分子筛在 pH 为 10 左右活性最好，一旦 pH 不为 10，吸附效果便会减弱，但碱性条件依旧比酸性条件更适合分子筛的活性。故可以得出分子筛吸附亚甲基蓝的最佳 pH 为 10。



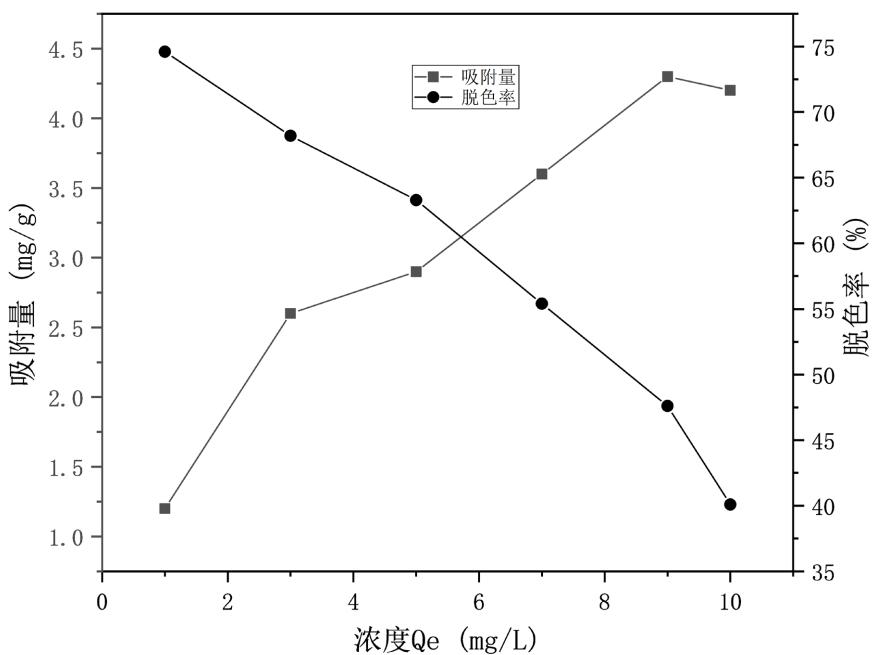
**Figure 2.** Effect of pH on the adsorption of methylene blue by mordenite molecular sieve  
**图 2.** pH 对丝光沸石分子筛吸附亚甲基蓝的影响

### 3.3. 不同亚甲基蓝的浓度对吸附效果的影响

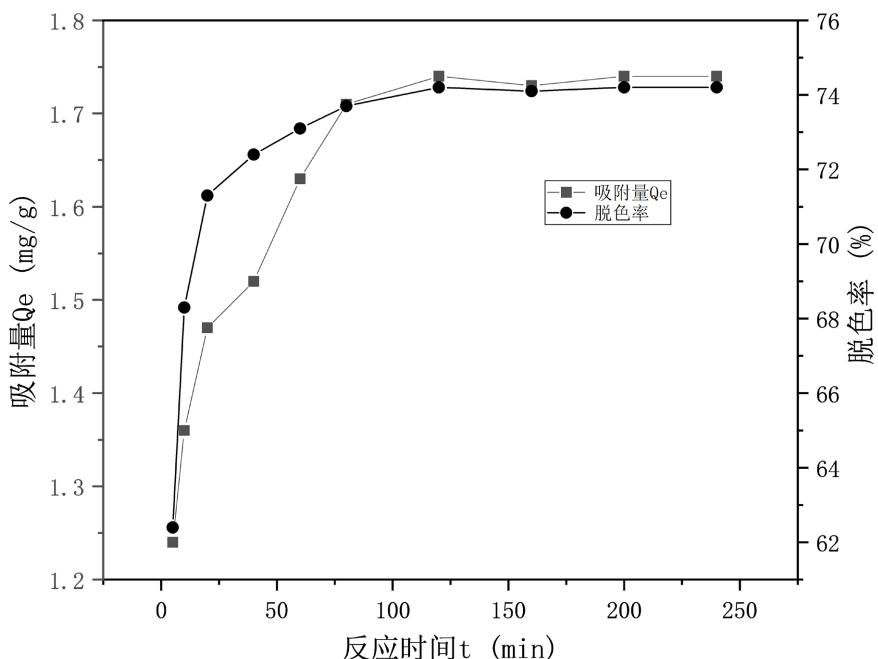
固定 pH 均为 10，放入 1 g/L 的分子筛，吸附时间为 120 min，不同亚甲基蓝浓度对分子筛吸附效果的影响结果见图 3。由图 3 可知随着溶液中亚甲基蓝含量的增加，脱色率降低，这是由于分子筛自身可以吸附亚甲基蓝，但也只能在一定范围内，而当吸附超过极限值时，分子筛内部的孔洞和表面均吸附达到饱和，不能够吸附更多的亚甲基蓝，因此脱色率一直在下降；吸附量随着浓度增加而增加，表示着浓度升高分子筛对亚甲基蓝的吸附量成正比，当浓度为 3 mg/L 时，脱色率和吸附量都较高，可以认为 3 mg/L 的亚甲基蓝浓度为分子筛吸附的最佳浓度。

### 3.4. 反应时间对吸附性能的影响

室温下于锥形瓶中放入 100 mL 5 mg/L 的亚甲基蓝溶液，并使其 pH 为 10，放入一定量的分子筛，吸附时间为 120 min，检测反应时间对分子筛吸附性能的影响。由图 4 可知随着反应时间的增加，脱色率增大，当反应时间增加到 120 min 时，脱色率达到最大 74.2% 并基本保持不变，这是因为当反应时间增加到脱色率不变时，丝光沸石分子筛对亚甲基蓝的吸附也已达到饱和，可以认为当分子筛吸附已达饱和后，反应时间对分子筛吸附性能基本无影响。故可以认为分子筛吸附亚甲基蓝的最佳反应时间为 120 min。



**Figure 3.** Effect of methylene blue concentration on adsorption efficiency  
**图 3.** 亚甲基蓝的浓度对吸附效果的影响

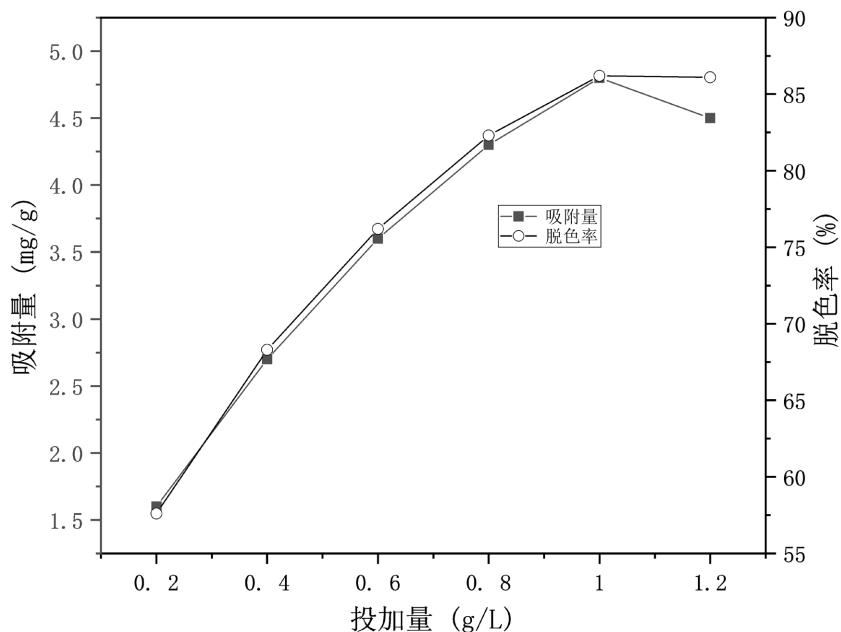


**Figure 4.** Effect of reaction time on adsorption performance  
**图 4.** 反应时间对吸附性能的影响

### 3.5. 分子筛用量对吸附性能的影响

固定 pH 为 10, 反应时间均设定为 120 min, 亚甲基蓝浓度 5 mg/L, 不同分子筛用量对分子筛吸附效果的影响结果见图 5。由图 5 可知在一定范围内随着分子筛用量的增加, 脱色率增大, 当投加的分子筛用

量达到 1 g/L 时, 这是由于吸附剂投加量增加会使溶液中分子筛浓度增加, 能吸附更多亚甲基蓝; 而当用量超过 1 g/L 时, 脱色率反而下降了, 这是由于在 1 g/L 时吸附已达饱和, 用量再增加只会使得分子筛比表面积减小, 从而超过最大吸附量时脱色率不增反降。吸附量随着分子筛用量的增加逐渐增加, 表明分子筛增加, 其吸附亚甲基蓝的量也增加, 并在投加 1 g/L 时吸附达到最大。因此实验得出最好的用量是向 100 mL 浓度为 3 mg/L 的亚甲基蓝溶液中放入 1 g/L 丝光沸石分子筛吸附效果最佳, 此时脱色率为 86.2%, 吸附量为 4.8 mg/g。这个结果高于文献[15] [16]报导的结果。



**Figure 5.** Effect of dosage of mordenite molecular sieve on adsorption performance  
**图 5.** 丝光沸石分子筛用量对吸附性能的影响

将所得最佳实验条件进行重复实验进行验证, 即在亚甲基蓝浓度为 3 mg/L、分子筛投加量为 1 g/L、反应时间为 120 min、pH 为 10 的条件下测定分子筛吸附亚甲基蓝的脱色率为 86.7%, 吸附量为 4.9 mg/g, 与上述实验结果基本吻合, 故可以认为合成得到的分子筛吸附亚甲基蓝的最佳条件有效。

#### 4. 结论

(1) 以预处理过的煤矸石为硅源、铝源在水热体系中合成了丝光沸石, 并对产物的物理化学特性进行了表征, 按照  $30\text{SiO}_2\text{:}2\text{Al}_2\text{O}_3\text{:}9\text{Na}_2\text{O}\text{:}180\text{H}_2\text{O}$  的摩尔配比, 老化 12 h, 于恒温保温箱中加热至 180°C 后保温 80 h, XRD 结果表明合成的丝光沸石特征峰与文献中的特征峰相吻合, 表明合成的分子筛具有较高的结晶度。

(2) 室温下分子筛吸附亚甲基蓝的最佳条件: 亚甲基蓝浓度为 3 mg/L、分子筛浓度为 1 g/L、反应时间为 120 min、pH 为 10, 此时亚甲基蓝的脱色率及吸附量均达到最高, 脱色率为 86.7%, 吸附量为 4.9 mg/g。

#### 参考文献

- [1] 邱峰. 某伊利石矿合成丝光沸石分子筛的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
- [2] 李昆, 程宏飞. 沸石分子筛的合成及应用研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2019(3): 1-6+19.

- [3] 张博超, 杜飞, 童辉, 龙雪颖. 煤矸石基沸石分子筛的制备及其对废水中  $\text{Cu}^{2+}$  吸附性能研究[J]. 化工新型材料, 2025, 53(6): 214-218.
- [4] 王蕊. 形貌可控的丝光沸石分子筛的合成与表征[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2016.
- [5] Fu, P., Yang, S., Bao, X., Wang, H. and Yang, Z. (2024) Reductive Decomplexation of Cu(II)-Complexes from Copper Wastewater by Zero-Valent Aluminum Material. *Chemical Engineering Journal*, **479**, Article 147705. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.147705>
- [6] Wu, H., Shen, J. and Liu, Y. (2024) Experimental Research on Influence of Curing Environment on Mechanical Properties of Coal Gangue Cementation. *Science and Engineering of Composite Materials*, **31**, Article 2024007. <https://doi.org/10.1515/secm-2024-0007>
- [7] 孔鹊. 不同形貌丝光沸石的合成与表征[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [8] 万琼, 孙永庆, 张新艳, 黎璇, 鞠恺. 煤矸石基沸石分子筛在水处理中的研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(9): 1-6.
- [9] 张博超, 张洲朋, 赵文豪, 童辉, 龙雪颖. 利用煤矸石合成沸石分子筛的应用进展[J]. 煤炭技术, 2023, 42(11): 252-255.
- [10] 张耀文, 王智华, 刘丹. 丝光沸石分子筛合成的专利综述[J]. 中国科技信息, 2019(5): 15-16.
- [11] 祁晓岚, 刘希尧. 丝光沸石合成与表征的研究进展[J]. 分子催化, 2002(4): 312-319.
- [12] 丝光沸石的合成及其性质研究报告[J]. 上海化工, 1974(2): 14-17.
- [13] Li, S., Wu, H., van de Poll, R.C.J., Joosten, R.R.M., Kosinov, N. and Hensen, E.J.M. (2022) Synthesis of Nanocrystalline Mordenite Zeolite with Improved Performance in Benzene Alkylation and N-Paraffins Hydroconversion. *ChemCatChem*, **14**, e202101852. <https://doi.org/10.1002/cctc.202101852>
- [14] 冯芳霞, 窦涛, 石岩峻, 萧墉壮, 钟炳. 用天然矿物煤矸石合成丝光沸石[J]. 石油学报(石油加工), 1999(1): 78-81.
- [15] Sohrabnezhad, S. and Pourahmad, A. (2010) Comparison Absorption of New Methylene Blue Dye in Zeolite and Nano-crystal Zeolite. *Desalination*, **256**, 84-89. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.02.009>
- [16] Zanjanchi, M.A. and Sohrabnejad, S. (2003) Intercalation of Methylene Blue into Mordenites: Role of Zeolite Acidity. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, **46**, 43-49. <https://doi.org/10.1023/a:1025699425668>