

引用格式: 禰炜安, 彭佳慧, 张茂霖, 等. 蔗渣纤维乳化沥青吸附机制[J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(10): 1219-1227.

XUAN W A, PENG J H, ZHANG M L, et al. Emulsified asphalt adsorption mechanism research of bagasse fiber[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(10): 1219-1227. (in Chinese)

## 蔗渣纤维乳化沥青吸附机制

禰炜安<sup>1,2,3</sup>, 彭佳慧<sup>1,4</sup>, 张茂霖<sup>1,4</sup>, 杨宗昊<sup>1,4</sup>, 阳恩慧<sup>1,4</sup>, 邱延峻<sup>1,4</sup>

(1. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031; 2. 广西交投集团有限公司, 南宁 530007;

3. 广西道路结构与材料重点实验室, 南宁 530007; 4. 道路工程四川省重点实验室, 成都 610031)

**摘要:** 为了探索蔗渣纤维与沥青吸附机制的问题, 通过 BET (Brunauer-Emmet-Teller, BET) 比表面积检测法、挂篮吸附实验以及棒状薄层色谱-氢火焰离子探测实验 (thin-layer chromatography with flame ionization detection, TLC-FID), 研究改性前后蔗渣纤维的孔隙结构特性、改性蔗渣纤维对沥青组分的吸附性能的影响, 以及不同改性蔗渣纤维掺量对吸附过程的影响, 并结合吸附动力学模型进行理论验证分析吸附机理。实验结果表明: 蔗渣纤维具有大孔与狭缝孔结构, 改性后蔗渣纤维的表面积略有增加, 总孔体积、微孔面积与体积增加幅度较大, 分别达到 241%、170% 和 276%; 达到吸附平衡后, 饱和分质量分数降低 5.77%、芳香分质量分数增加 20.75%、胶质质量分数降低 29.37%, 以及沥青质质量分数降低 5.66%, 说明改性蔗渣纤维最易吸附的沥青组分为胶质; 随着改性蔗渣纤维掺量的增加, 吸附率从 15.25% 增加至 34.16%, 而单位平衡吸附量从 4.827 减小至 2.162; 实验采用准一级、准二级吸附动力学模型, 其中准二级动力学模型拟合效果更好, 模型预测单位平衡吸附量  $q_e$  (3.247) 更接近实验测得的  $q_e$  (3.098); 胶质的吸附过程是由外向内的, 驱动力不足以及吸附点位的数量影响使得吸附达到平衡。

**关键词:** 蔗渣纤维; 纤维改性; BET 比表面积检测法; 棒状薄层色谱; 沥青四组分; 吸附动力学模型

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2024)10-1219-09

doi: 10.11936/bjtxb2023050027

## Emulsified Asphalt Adsorption Mechanism Research of Bagasse Fiber

XUAN Weian<sup>1,2,3</sup>, PENG Jiahui<sup>1,4</sup>, ZHANG Maolin<sup>1,4</sup>, YANG Zonghao<sup>1,4</sup>, YANG Enhui<sup>1,4</sup>, QIU Yanjun<sup>1,4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China;

3. Guangxi Key Lab of Road Structure and Materials, Nanning 530007, China;

4. Highway Engineering Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To explore the adsorption mechanism of bagasse fiber and asphalt, Bruner-Emmet-Teller (BET) specific surface area detection method, basket adsorption test and rod-like thin-layer chromatography with flame ionization were used for detection (TLC-FID), the pore structure characteristics of bagasse fiber before and after modification, the easier adsorption of certain components in asphalt by modified bagasse fiber, and the influence of different modified bagasse fiber content on the adsorption process are studied, and the adsorption mechanism is analyzed by theoretical verification

收稿日期: 2023-05-20; 修回日期: 2023-06-24

基金项目: 南宁市优秀青年科技创新创业人才培养资助项目 (RC20200203); 中央引导地方科技发展资金资助项目 (桂科 ZY21195043)

作者简介: 禰炜安 (1988—), 男, 高级工程师, 主要从事道路材料研发与技术咨询方面的研究, E-mail: 525321269@qq.com

通信作者: 彭佳慧 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事路面材料方面的研究, E-mail: jiahui\_p@163.com

combined with adsorption kinetics model. Results show that the surface area of bagasse fiber increases slightly after modification, and the total pore volume, micropore area and volume increase significantly, reaching 241%, 170% and 276%, respectively. After reaching the adsorption equilibrium, the saturated mass fraction decreases by 5.77%, the aromatic mass fraction increases by 20.75%, the gum mass fraction decrease by 29.37%, and the asphaltene mass fraction decreases by 5.66%. With the increase of the content of modified bagasse fiber, the adsorption rate increases from 15.25% to 34.16% and the unit equilibrium adsorption decreases from 4.827 to 2.162. The quasi-first-order and quasi-second-order adsorption kinetic models were used in the experiment. The quasi-second-order kinetic model has better fitting effect, and the unit equilibrium adsorption quantity  $q_e$  (3.247) predicted by the model is closer to the unit equilibrium adsorption quantity  $q_e$  (3.098) measured by the experiment. The adsorption process of colloid is from the outside to the inside, the insufficient driving force and the number of adsorption sites allows the adsorption to reach a balance.

**Key words:** bagasse fiber; fiber modification; BET specific surface area deflection method; thin-layer chromatography with flame ionization detection (TLC-FID); four components of asphalt; adsorption kinetics model

道路工程中,沥青路面日益普遍,逐渐替代水泥路面,然而在荷载以及自然条件耦合作用下,路面易产生松散、车辙、坑槽等病害,致使路面性能降低,使用寿命达不到设计使用年限<sup>[1]</sup>。已有研究表明,纤维能有效提高沥青胶浆<sup>[2]</sup>及混合料的综合性能<sup>[3]</sup>。纤维在混合料中起到加筋和增韧、阻止裂缝的发展、抵抗车辙变形、减少疲劳破坏等延长路面使用寿命的作用。其中,植物纤维具有体积小、质量轻、强度高、刚性好、耐高温等特点<sup>[4]</sup>,能提高混合料在低温时的抗拉能力和路面的高温性能。

甘蔗经过制糖工艺后会产出蔗糖、蔗渣等,蔗渣与蔗糖的产出比约在 2:1 ~ 3:1。但蔗渣数量庞大,利用率极低,仅有少部分应用于燃烧发电、造纸等行业。蔗渣发电技术效率高但产能低,且蔗渣燃烧产生的有害气体会污染大气;蔗渣造纸技术尚不成熟,目前难以高效处理蔗渣。因此探索既能减轻污染又能产生新价值的蔗渣处理方式成为研究热点。陈开群等<sup>[5]</sup>从微观方面着手,以 2 种不同粒径的木质素纤维做对比,研究纤维掺量和温度对沥青胶浆黏度的影响,发现蔗渣纤维能提高沥青胶浆的黏度。刘卫东等<sup>[6]</sup>用 NaOH 对蔗渣纤维进行改性,以吸油性和耐热性为关键指标,研究其路用性能。在其他纤维的应用中,Amornsakchai 等<sup>[7]</sup>将甲基丙烯酸甲酯和丙烯酸接枝到聚乙烯纤维表面,通过拔出实验评价 2 种改性纤维的黏附性,结果表明,丙烯酸改性纤维具有更好的黏附性。张海伟等<sup>[8]</sup>对复合纤维组成进行优化,按正交设计方案复配 9 种复合纤维,探究复合纤维的最佳掺量配比。结果表明,复合纤维

改性兼具各单纤维改性的优势,其混合料路用性能更加均衡。李祖仲等<sup>[9]</sup>通过扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM)、傅里叶变换红外光谱仪 (fourier transform infrared spectrometer, FTIR) 等试验研究化学改性蔗渣纤维沥青混合料的微观结构、组成和性质。结果表明,改性后纤维的吸油率和耐热性均有所提高,且混合料的路用性能略小于木质素纤维沥青混合料。Yu 等<sup>[10]</sup>将改性竹纤维加到沥青混合料中,结果表明,改性竹纤维的加入有效提高了沥青混合料的稳定性和抗拉强度,改性竹纤维与沥青基体之间形成较强的黏结性能。现如今对植物纤维的研究大多从制备工艺和路用性能入手,而对于纤维与沥青的吸附机理研究较少。

基于上述分析,本文利用蔗渣经过除杂、破碎后得到蔗渣纤维,研究改性前后其与乳化沥青的吸附性能与机理,并利用吸附动力学进行理论验证,为纤维沥青混合料的路用性能研究和蔗渣纤维的推广与利用提供研究和参考依据。

## 1 原材料

### 1.1 沥青

乳化沥青相比普通沥青具有施工便利、节约能源、易于拌和等优点。因此,笔者以乳化沥青为研究对象,采用拌合型 SBS 改性乳化沥青进行实验,该沥青由绵阳 SBS 改性乳化沥青公司提供,常温下为液态、呈棕褐色、无沉淀,其主要性能如表 1 所示。

### 1.2 蔗渣纤维

本文所用蔗渣纤维由广西交科集团有限公司提

供, 常温下呈现灰白色, 其基本性能如表 2 所示。

表 1 实验用 SBS 改性乳化沥青基本性能

Table 1 Basic properties of emulsified asphalt modified by SBS

项目	实测值	试验方法
破乳速度	中裂	T0658
粒子电荷	阳离子( + )	T0653
筛上剩余量(1.18 mm 筛)/%	0.04	T0652
蒸发残留物质量分数/%	61	T0651
蒸发残留物针入度(25℃)/cm	5.6	T0604
蒸发残留物延度(5℃)/cm	32	T0605
与粗集料的黏附性(裹覆面积)	≥2/3	T0654
与粗、细粒式集料拌和实验	均匀	T0659
常温储存稳定性/%	0.6(1 d)	T0655
	1.6(5 d)	T0655

表 2 蔗渣纤维基本性能

Table 2 Basic properties of bagasse fibre

项目	实测值	技术要求
0.850 mm 筛通过率/%	94.0	
0.425 mm 筛通过率/%	66.0	
0.106 mm 筛通过率/%	1.1	
pH	6.8	7.5 ± 1.0
吸油率/倍	6.46	≥5
热失重(210℃)/%	7.76	≤6%

由表 2 可知, 蔗渣纤维的吸油率较小, 耐热性较差, 对纤维沥青复合材料的性能提升较小, 故采用化学改性的方法, 提高蔗渣纤维的基本性能。

本化学试剂选用 NaOH, 以 NaOH 质量分数、反应温度和时间作为影响因素, 蔗渣纤维在沥青中的主要作用是吸附沥青, 且纤维应用于沥青混合料时温度低于 210℃, 热失重变化不大, 影响较小, 故以吸油率为指标, 采用三因素三水平的正交实验确定蔗渣纤维最佳化学改性方式, 浸泡完成后, 使用自来水冲洗蔗渣纤维, 直至纤维的 pH 调整至 7.5 ± 1.0。改性后最终结果如表 3 所示。

表 3 改性蔗渣纤维基本性能

Table 3 Basic properties of modified bagasse fiber

项目	实测值	技术要求
0.850 mm 筛通过率/%	94.2	
0.425 mm 筛通过率/%	75.0	
0.106 mm 筛通过率/%	1.2	
pH	7.5	7.5 ± 1.0
吸油率/倍	8.96	≥5
热失重(210℃)/%	1.65	≤6%

## 2 吸附理论

吸附是不同物质之间的一种吸着现象, 具有吸着能力的物质称作吸附剂, 被吸着的物质称作吸附质, 吸附剂提供吸着吸附质的位置称为吸附点位, 根据吸附过程中是否产生新物质将吸附分为物理吸附与化学吸附<sup>[11]</sup>。物理吸附是通过物质间形成范德华力结合在一起, 这种分子间作用力微弱, 物质结合并不紧密, 在外部条件变化下容易发生逆转, 导致物质间的分离; 化学吸附是吸附质与吸附剂之间发生化学反应, 产生新物质或者形成化学键将其紧密结合在一起, 这种吸附效果很强, 一般不会发生逆转<sup>[12-13]</sup>, 吸附示意图 1。

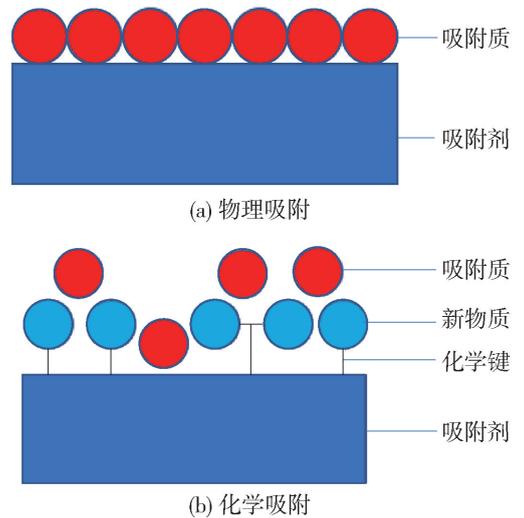


图 1 物理吸附与化学吸附示意

Fig. 1 Schematic diagram of physical adsorption and chemical adsorption

## 3 吸附实验

### 3.1 吸附实验材料

对于沥青组划分方式, 采用国际上通用的四组分划分方法, 即将沥青看作饱和分、芳香分、胶质以及沥青质四组分<sup>[14]</sup>。将沥青划分为四组分后, 便于研究各组分对蔗渣纤维的吸附特性。本文选择上述介绍的 SBS 改性乳化沥青, 采用低温蒸发法制备乳化沥青蒸发残留物<sup>[15]</sup>。

### 3.2 吸附实验仪器

吸附实验中, 数显恒温电热套由天津赛得利斯实验分析制造有限公司提供, 电子天平由深圳市恒志福科技有限公司提供, 挂篮采用 50 μm 筛网, 由河北省衡水市安平县环正滤筒厂提供。

### 3.3 实验方法

1) BET( Brunauer-Emmet-Teller, BET)比表面积检测法

本文采用全自动比表面积及孔径分析仪 ASAP2460,利用  $N_2$  吸脱附等温线计算纤维改性前后的比表面积以及孔隙体积、微孔个数等参数,并通过 BET 比表面积检测法,分析计算得到纤维的比表面积。在实验开始前,样品需要在  $150\text{ }^\circ\text{C}$  下脱气 5 h,通过高温将纤维内部水分完全去除,充分暴露出纤维的孔隙。

2) 棒状薄层色谱-氢火焰离子探测实验

本文使用棒状薄层色谱-氢火焰离子探测仪(thin-layer chromatography with flame ionization detection, TLC-FID)分析蔗渣纤维吸附的沥青组分。

TLC-FID 检测根据沥青中各组分的极性不同,利用不同的展开剂将沥青各组分在色谱棒上分离,通过氢火焰将各组分离子化,从而产生强弱不等的电流,组分质量分数越高,对应形成的峰面积越大,因此可以实现定量监测<sup>[16]</sup>,如图 2(b)所示<sup>[17]</sup>。本文采用 SBS 改性乳化沥青蒸发残留物进行吸附测试。吸附实验步骤为:

**步骤 1** 将装有 400 mL 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS)改性乳化沥青蒸发残留物的烧杯放入油浴锅中加热至流动状态。

**步骤 2** 打开磁力搅拌器,设置转速为  $150\text{ r/min}$ ,然后称取适量改性或未改性蔗渣纤维,倒入孔隙为  $50\text{ }\mu\text{m}$  挂篮中,将装纤维的挂篮放入步骤 1 所述烧杯中直到吸附平衡。

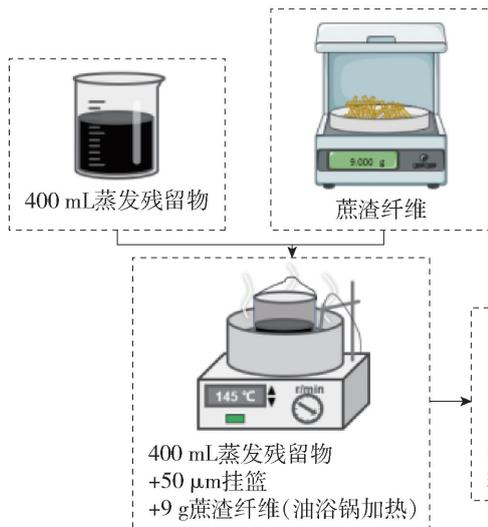
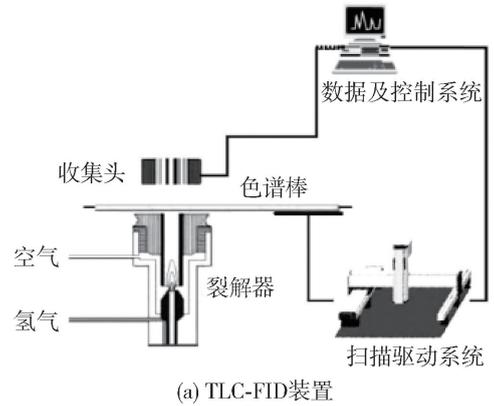
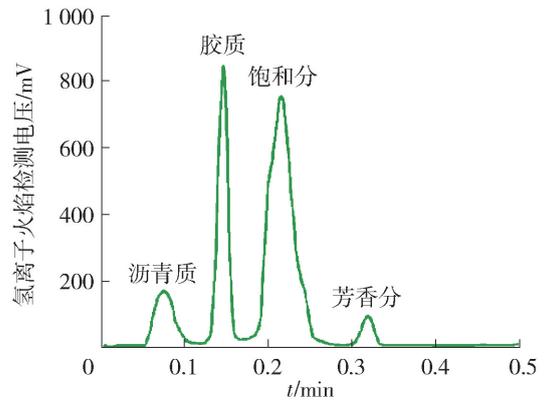


图3 蔗渣纤维吸附沥青实验步骤

Fig. 3 Bagasse fiber adsorption asphalt test procedure



(a) TLC-FID装置



(b) 沥青组分的 TLC-FID 信号

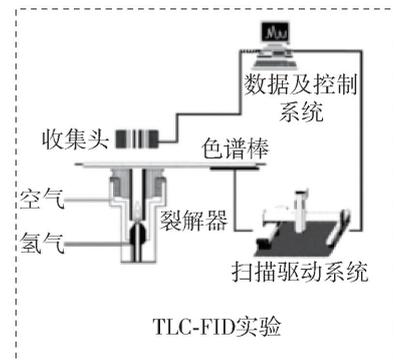
图2 沥青四组分的 TLC-FID 测试实验

Fig. 2 TLC-FID test of four components of asphalt

**步骤 3** 将装有纤维的挂篮移除,对烧杯中剩余的沥青进行 TLC-FID 试验,计算出各组分的质量分数,如图 3 所示。

### 3.4 吸附实验方法原理

为比较改性前后蔗渣纤维吸附能力以及沥青四组分中哪些组分更容易被吸附,吸附时控制蔗渣纤



TLC-FID实验

维质量均为9 g。

纤维吸附沥青的性能可以用平衡吸附量  $q_e$  来评价,  $q_e$  越大, 表明吸附能力越强, 计算公式为<sup>[18]</sup>

$$q_e = \frac{(\rho_0 - \rho_e) \times V}{m} \quad (1)$$

式中:  $q_e$  为单位质量蔗渣纤维在吸附平衡时吸附沥青组分的质量比值;  $\rho_0$  为初始沥青组分的质量浓度, g/L;  $\rho_e$  为平衡时沥青组分的质量浓度, g/L;  $V$  为沥青的体积, L;  $m$  为干燥蔗渣纤维的质量, g。纤维吸附沥青组分的吸附率  $X$  计算公式为

$$X = \frac{\rho_0 - \rho_e}{\rho_0} \times 100\% \quad (2)$$

研究还需要测量单位质量纤维在任意时刻吸附沥青组分的质量比值  $q_t$ , 计算公式为

$$q_t = \frac{(\rho_0 - \rho_t) \times V}{m} \quad (3)$$

式中  $\rho_t$  为  $t$  时刻沥青组分的质量浓度, g/L。

## 4 吸附模型与规律

### 4.1 吸附模型

通过吸附动力学模型将吸附剂对吸附质的吸附量与吸附时间的关系进行拟合, 从而研究其吸附机理。笔者采用以下2种模型进行实验。

准一级动力学模型假定吸附剂吸附吸附质的过程是物理吸附, 其吸附速率主要受到吸附剂表面活性点位以及数量的影响, 其数学表达式为

$$\ln(q_e - q_t) = -k_1 t + \ln q_e \quad (4)$$

式中:  $k_1$  为准一级动力学模型的吸附速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $t$  为吸附时间, min。

其中  $k_1$  是通过  $\ln(q_e - q_t)$  与  $t$  进行线性回归分析得到, 其结果中的截距可以用来计算  $q_e$ , 从而预测单位吸附剂在吸附平衡时对吸附质的吸附量。

准二级动力学模型假定吸附剂与吸附质之间发生了电子交换或离子交换过程, 产生化学吸附, 其数学表达式为

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (5)$$

有研究表明, 能够用准二级动力学进行拟合时, 说明吸附过程中可能发生了化学反应或者吸附质的浓度与吸附剂表面的吸附点位数量处于一个量级水平<sup>[19]</sup>, 且准二级动力学模型应用最为广泛。

其中  $k_2$  是根据  $t/q_t$  与  $t$  的线性回归分析得到, 其结果中的截距可以计算预测吸附平衡量。

### 4.2 蔗渣纤维孔隙结构分析

利用蔗渣纤维的  $N_2$  等温吸脱附曲线中相对压力 ( $p/p_0$ ) 为 0.05 ~ 0.35 的一段曲线, 通过 BET 比表面积检测法计算得出蔗渣纤维的表面特征参数。改性前后蔗渣纤维  $N_2$  吸脱附曲线如图 4 所示, 蔗渣纤维的表面特征参数如表 4 所示。

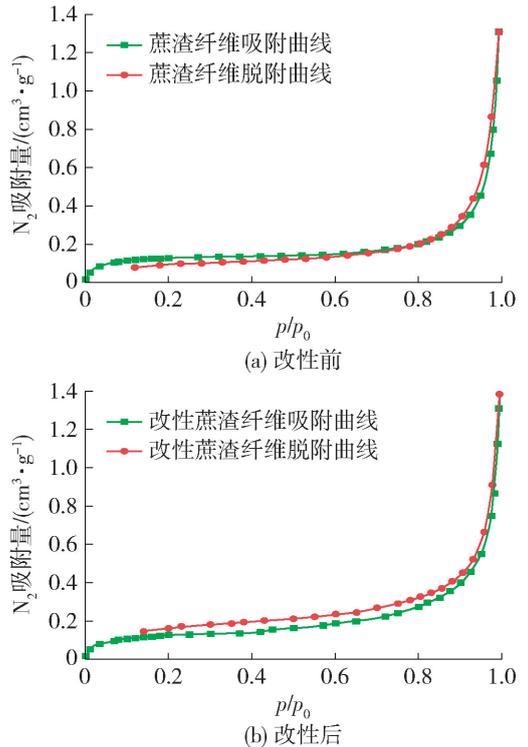


图4 蔗渣纤维改性前后吸脱附曲线

Fig. 4 Adsorption and desorption curves of bagasse fiber before and after modification

从图 4 可以看出, 改性前后蔗渣纤维均在相对压力 ( $p/p_0$ ) 为 0 ~ 0.8 的范围内,  $N_2$  吸附曲线较为平缓, 增加趋势缓慢; 在相对压力 ( $p/p_0$ ) 超过 0.8 时, 呈现增速快、吸附量急剧增加趋势。在低压端, 蔗渣纤维吸脱附等温线更加靠近水平轴 (斜率更小), 说明蔗渣纤维与  $N_2$  的结合能力弱, 改性蔗渣纤维吸脱附等温线更靠近竖轴 (斜率更大), 表明改性蔗渣纤维吸附  $N_2$  的能力更强, 化学改性有助于提升蔗渣纤维的吸附能力。

蔗渣纤维的改性会影响其吸脱附等温线的整体形态, 显示出典型无孔或大孔吸附剂的物理吸附过程, 说明蔗渣纤维材料存在较大的孔径结构。同时, 改性前后蔗渣纤维的脱附等温线与吸附等温线不重合, 说明蔗渣纤维中也存在由片状粒子堆积形成的狭缝孔结构, 改性后吸脱附曲线的滞后环更加明显, 表明改性后蔗渣纤维的狭缝孔结构更多。

表4 蔗渣纤维表面参数

Table 4 Surface parameters of bagasse fiber

蔗渣纤维	BET 比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	Langmuir 比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	t-Plot 微孔比面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	t-Plot 外表比面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	总孔体积/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	微孔体积/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔径/ nm
改性前	0.456 6	0.895 9	0.070 9	0.385 7	$3.825 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-5}$	18.89 57
改性后	0.464 1	0.693 1	0.191 7	0.272 4	$1.303 \times 10^{-3}$	$7.9 \times 10^{-5}$	17.454

从表4可以看出,改性后蔗渣纤维的表面积略有增加,总孔体积、微孔面积与体积增加幅度较大,分别达到241%、170%和276%。分析认为,蔗渣纤维经NaOH处理后,蔗渣纤维表面杂质、果胶小分子以及部分木质素与半纤维素均被溶解,导致纤维中出现更多的孔隙,增大了纤维的表面积,同时强碱的作用导致部分结构坍塌从而使表面积增大幅度较小。

通过计算得出蔗渣纤维总孔体积为 $1.303 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{g}$ 。BET比表面积检测法分析证明蔗渣纤维存在孔隙结构,NaOH改性增大纤维的孔隙体积,能提供更多吸附点位来吸附沥青组分。

#### 4.3 改性蔗渣纤维吸附沥青组分分析

按照3.3实验步骤开展挂篮吸附实验,控制温度为 $145 \text{ }^\circ\text{C}$ ,为了保证改性蔗渣纤维能够达到吸附平衡,将吸附时间设置为60 min。SBS改性乳化沥青蒸发残留物的四组分质量分数如表5所示。

表5 SBS改性乳化沥青蒸发残留物的四组分质量分数  
Table 5 Content of four components of SBS modified emulsified asphalt evaporative residue %

改性蔗渣纤维	$w$ (饱和分)	$w$ (芳香分)	$w$ (胶质)	$w$ (沥青质)
吸附前	5.20	42.12	23.02	29.66
吸附后	4.90	50.86	16.26	27.98

从图5可以看出,改性蔗渣纤维吸附后,蒸发残留物的四组分质量分数变化明显,分别为饱和分质量分数降低5.77%、芳香分质量分数增加20.75%、胶质质量分数降低29.37%以及沥青质质量分数降低5.66%,这表明改性蔗渣纤维更容易吸附的组分是胶质。

分析认为,温度控制在 $145 \text{ }^\circ\text{C}$ 是为了防止沥青老化,从而改变原有的四组分质量分数。热力学认为在这个温度下,沥青由固体转变为熔融状态,此时饱和分和芳香分属于液相,胶质属于熔融状态,饱和分和芳香分流动性更强。蔗渣纤维的吸附点位较难

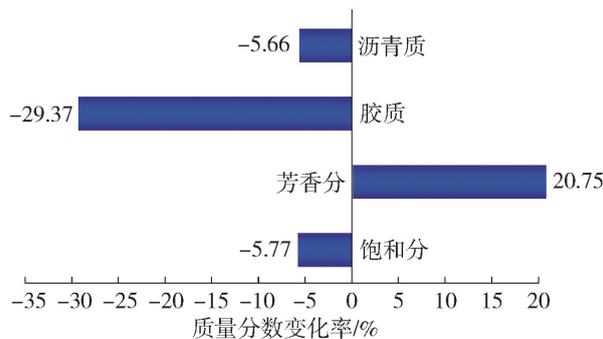


图5 蔗渣纤维改性前后吸附质量分数变化率

Fig. 5 Change rate of adsorption mass fraction of bagasse fiber before and after modification

吸附液相分子,而胶质大分子在此温度下是介于固相与液相之间的一种状态,既有一定的流动性,又能够很好地与蔗渣纤维的吸附点位相结合。

#### 4.4 改性蔗渣纤维掺量对吸附的影响分析

由于改性蔗渣纤维在高温下更易吸附胶质,以胶质为吸附质,探究改性蔗渣纤维掺量对吸附的影响,实验中蒸发残留物质量为412.5 g,体积为400 mL,计算可知,SBS改性乳化沥青蒸发残留物的胶质的质量浓度在吸附前后分别为237.39、167.68 g/L。

实验中改性蔗渣纤维掺量分别为3、6、9、12、15 g。根据式(1)(2)分别计算 $q_e$ 与 $X$ ,实验结果如表6所示。

表6 改性蔗渣纤维掺量对吸附胶质的影响

Table 6 Effect of modified bagasse fiber content on adsorbed gum

改性蔗渣纤维掺量/g	$q_e$	$X/\%$
3	4.827	15.25
6	3.757	23.74
9	3.098	29.37
12	2.645	33.42
15	2.162	34.16

从图6可以看出,随着改性蔗渣纤维掺量的增

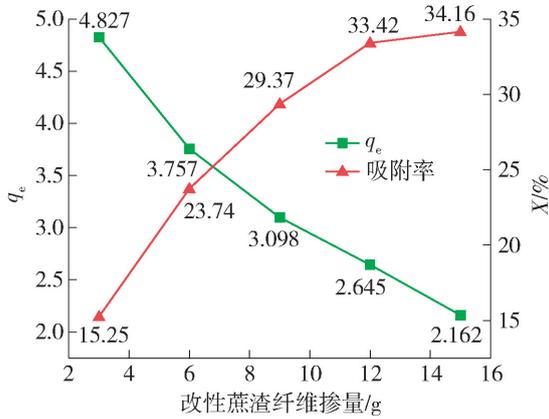


图6 改性蔗渣纤维掺量对吸附的影响  
Fig. 6 Effect of modified bagasse fiber content on adsorption

加,  $q_e$  从 4.827 逐渐减小至 2.162, 减小幅度达到 55.21%, 且减小的幅度逐渐降低;  $X$  从 15.25% 逐渐增大至 34.16%, 增大幅度达到 124%, 且增大的幅度逐渐减小。分析认为, 在纤维掺量较少时, 纤维的吸附点位能够被充分利用, 但沥青中胶质的质量分数较多, 被吸附的质量较少, 所以  $q_e$  较大而吸附率较小; 随着纤维掺量的增加, 纤维的吸附点位越来越多, 能够吸附胶质的质量也随之增大, 但沥青中的胶质质量分数一定, 导致吸附点位没有被充分利用, 所以  $q_e$  逐渐减小而  $X$  增大。

4.5 吸附动力学模型分析

吸附实验中, 改性蔗渣纤维用量为 9 g, 任意吸附时间下, 胶质的质量浓度如表 7 所示, 根据式 (3), 相应的改性蔗渣纤维单位质量吸附量  $q_t$  如表 8 所示。

表7 任意吸附时间下胶质的质量浓度

Table 7 Concentration of gum at any adsorption time

$t/\text{min}$	0	5	10	20	40	60
胶质的质量浓度/( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	237.39	194.06	179.86	171.83	169.94	167.68

表8 不同吸附时间的  $q_t$

Table 8  $q_t$  for any adsorption time

$t/\text{min}$	0	5	10	20	40	60
$q_t$	0	1.926	2.557	2.914	2.998	3.098

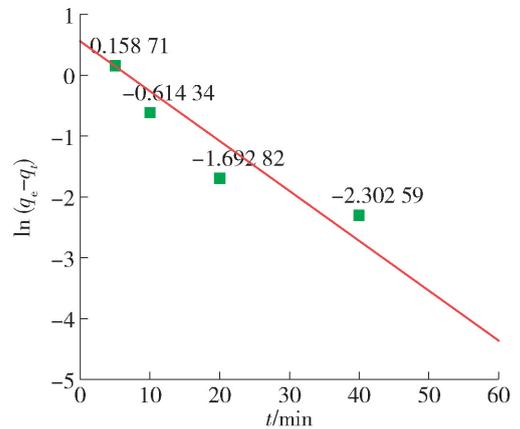
通过线性拟合, 得到准一级吸附动力学模型为  $\ln(0.559 - q_t) = -0.082t + 0.559$  与准二级吸附动力学模型  $t/q_t = 0.308t + 0.896$ , 相关参数如表 9 所示。

表9 吸附动力学模型

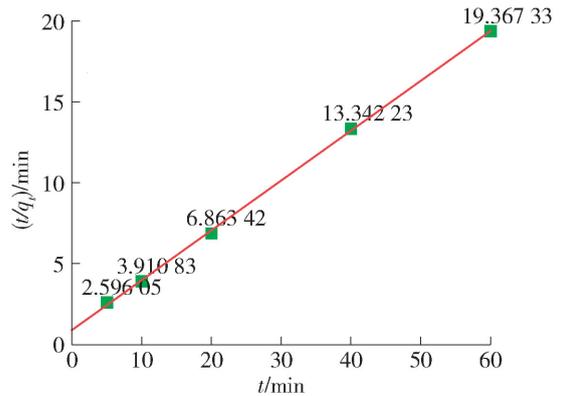
Table 9 Adsorption kinetics model

项目	$q_e$	$k$	$R^2$	$k$ 的显著性
实验值	3.098			
准一级	1.749	0.082	0.869	0.021
准二级	3.247	0.106	0.999	0

如图 7 所示, 一般而言, 在线性拟合中, 斜率  $k$  的显著性小于 0.05, 表明自变量与因变量间线性相关, 且拟合优度  $R^2$  越接近 1, 代表模型拟合效果越好。从表 9 可以看出, 准一级与准二级吸附动力学模型  $k$  的显著性均低于 0.05, 表明二者均是正确的线性拟合模型。但准二级的  $R^2$  (0.999) 高于准一级的  $R^2$  (0.869), 且准二级模型  $q_e$  (3.247) 比准一级模型  $q_e$  (1.749) 更接近吸附实验得到的  $q_e$  (3.098), 表明准二级吸附动力学模型的拟合效果更好, 同时也



(a) 准一级



(b) 准二级

■ 试验数据散点 — 线性拟合直线

图7 吸附动力学模型拟合

Fig. 7 Adsorption kinetics model fitting

说明胶质的质量浓度与纤维的吸附点位数量处于同一量级,改性蔗渣纤维能够吸附胶质,从而证明其具有吸附沥青的能力。

#### 4.6 吸附机理分析

经分析,在整个吸附过程中,温度升高导致沥青流动性增加,液膜在纤维表面进行扩散,而质量浓度较高的胶质突破液膜的包裹需要克服的液膜阻力较小,易与纤维外表面的吸附点位结合,当外表面吸附点位逐渐饱和时,胶质随着液膜从改性蔗渣纤维外表面向内部孔隙扩散,胶质在液膜中的质量浓度差也会推动整个吸附过程,最终与内部吸附点位结合,这一过程被称之为颗粒内扩散过程。整个吸附过程由于胶质的质量分数一定,随着胶质被逐渐吸附,胶质质量浓度下降导致驱动力降低,胶质被吸附的量逐渐减小直至达到吸附平衡,这与表 8、9 数据趋势相吻合。改性蔗渣纤维吸附胶质机理如图 8 所示。

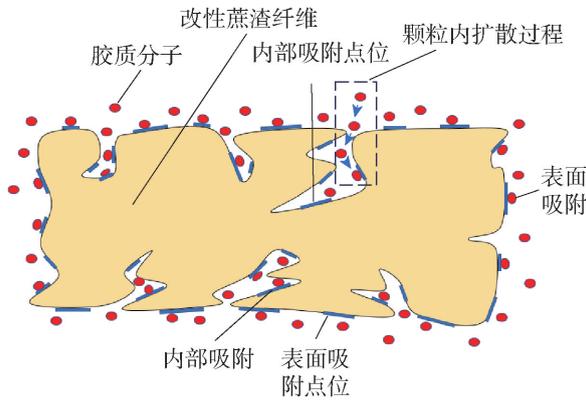


图 8 改性蔗渣纤维吸附机理

Fig. 8 Modified bagasse fiber adsorption mechanism

## 5 结论

1) 通过 BET 比表面积检测法实验中  $N_2$  吸附脱附曲线得知,蔗渣纤维中存在大孔结构和狭缝孔结构,且化学改性增大了蔗渣纤维的比表面积、孔隙体积与面积,有利于提高蔗渣纤维吸附能力。

2) 挂篮吸附实验中,胶质质量分数降幅最大,达到 29.37%,说明改性蔗渣纤维更易吸附沥青中的胶质组分;以胶质为吸附质,随着改性蔗渣纤维掺量的增加, $q_e$  从 4.827 逐渐减小至 2.162,减小幅度达到 55.21%,且减小的幅度逐渐降低; $X$  从 15.25% 逐渐增大至 34.16%,增大幅度达到 124%,且增大的幅度逐渐减小。

3) 吸附动力学模型拟合表明准二级比准一级模型有着更高的  $R^2$ ,更接近实验值的平衡吸附量  $q_e$ ,这说明准二级吸附动力学模型更符合改性蔗渣

纤维吸附胶质的过程,也说明改性蔗渣纤维有吸附沥青的能力。

4) 通过吸附机理图可以看出胶质被吸附的过程是一个由外而内的过程,胶质先被纤维外表面的吸附点位吸附,随后向纤维内部扩散,随着胶质质量浓度的降低,驱动力不足以及吸附点位逐渐饱和导致吸附效果减弱,最终达到吸附平衡。

#### 参考文献:

- [1] 陈飞, 张林艳, 李先延, 等. 天然纤维沥青混合料研究与应用进展[J]. 应用化工, 2022, 51(5): 1472-1479. CHEN F, ZHANG L Y, LI X Y, et al. Research and application progress of natural fiber asphalt mixture[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(5): 1472-1479. (in Chinese)
- [2] 夏超明, 蒋康, 吴超凡, 等. 速生草植物纤维及其沥青胶浆的热性能研究[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 183-188. XIA C M, JIANG K, WU C F, et al. Study on thermal property of fast growing grass fiber and its asphalt mortar[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 183-188. (in Chinese)
- [3] LONG A X, SUN X J, ZHANG G L, et al. Study on fracture performance and failure mechanism of hydraulic basalt fiber asphalt concrete by considering temperature effect [J/OL]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 125: 103895[2024-05-21]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844223001581>.
- [4] 高旭, 席蓓, 马婧, 等. 天然植物纤维复合材料的研究进展[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 60-65. GAO X, XI B, MA J, et al. Research progress of natural plant fiber composites materials [J]. Journal of Northwestern Minzu University (Natural Science), 2021, 42(4): 60-65. (in Chinese)
- [5] 陈开群, 禡炜安, 李祖仲, 等. 蔗渣纤维沥青胶结料黏度特性及其混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 278-283. CHEN K Q, XUAN W A, LI Z Z, et al. Study on viscosity characteristics of bagasse fibers asphalt binder and pavement performance of bagasse fiber asphalt binder[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(3): 278-283. (in Chinese)
- [6] 刘卫东, 张洪刚, 熊剑平, 等. NaOH 改性蔗渣纤维及其沥青胶浆性能研究[J]. 公路, 2023, 68(1): 294-301.

- LIU W D, ZHANG H G, XIONG J P, et al. Research on properties of naoh modified bagasse fiber and asphalt mortar [ J ]. Highway, 2023, 68 ( 1 ): 294-301. ( in Chinese )
- [ 7 ] AMORNSAKCHAI T, PATTARACHINDANUWONG S. Surface grafting of polyethylene fiber for improved adhesion to acrylic resin [ J ]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, 29(1): 149-158.
- [ 8 ] 张海伟, 郝培文, 梁建军, 等. 复合纤维组成优化及其混合料性能评价 [ J ]. 北京工业大学学报, 2016, 42(2): 261-268.
- ZHANG H W, HAO P W, LIANG J J, et al. Mix design and performance assessment of asphalt concretes with hybrid fibers [ J ]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(2): 261-268. ( in Chinese )
- [ 9 ] 李祖仲, 李梦园, 刘卫东, 等. 蔗渣纤维表面改性及其沥青混合料路用性能 [ J/OL ]. 吉林大学学报(工学版) (2022-11-07) [ 2023-05-01 ]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=0uJvuxkiqRtwjmRJeJX9EEjMn4o50hfVVOzUJcEofSj8g7xbiMa0-pUvA9ZiGQqurTJths97aDe\\_ODFqGnQgUeaYXrMzumP-nne40mfWMhwyYzAm1pJOp-EzjeyRUMo85WRCCdfDGMY=&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=0uJvuxkiqRtwjmRJeJX9EEjMn4o50hfVVOzUJcEofSj8g7xbiMa0-pUvA9ZiGQqurTJths97aDe_ODFqGnQgUeaYXrMzumP-nne40mfWMhwyYzAm1pJOp-EzjeyRUMo85WRCCdfDGMY=&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- LI Z Z, LI M Y, LIU W D, et al. Study on surface modification of bagasse fibers and road performances of asphalt mixture [ J/OL ]. Journal of Jilin University ( Engineering and Technology Edition ) ( 2022-11-07 ) [ 2023-05-01 ]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=0uJvuxkiqRtwjmRJeJX9EEjMn4o50hfVVOzUJcEofSj8g7xbiMa0-pUvA9ZiGQqurTJths97aDe\\_ODFqGnQgUeaYXrMzumP-nne40mfWMhwyYzAm1pJOp-EzjeyRUMo85WRCCdfDGMY=&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=0uJvuxkiqRtwjmRJeJX9EEjMn4o50hfVVOzUJcEofSj8g7xbiMa0-pUvA9ZiGQqurTJths97aDe_ODFqGnQgUeaYXrMzumP-nne40mfWMhwyYzAm1pJOp-EzjeyRUMo85WRCCdfDGMY=&uniplatform=NZKPT&language=CHS). ( in Chinese )
- [ 10 ] YU D M, JIA A M, FENG C, et al. Preparation and mechanical properties of asphalt mixtures reinforced by modified bamboo fibers [ J/OL ]. Construction and Building Materials, 2021, 286: 122984. [ 2024-05-21 ]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821007443>.
- [ 11 ] ALAM S, REHMAN N, AMIN N U, et al. Adsorption of methylene blue onto acacia modesta carbon: kinetic and thermodynamic study [ J ]. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 2019, 233(7): 1019-1033.
- [ 12 ] 哈尔祺, 樊增禄, 李庆, 等. Zr-有机骨架材料对水中重铬酸根的物理吸附性能 [ J ]. 纺织高校基础科学学报, 2019, 32(3): 237-243.
- HA E Q, FAN Z L, LI Q, et al. Physical adsorption properties of Zr-organic framework material for dichromate in water [ J ]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2019, 32(3): 237-243. ( in Chinese )
- [ 13 ] SARKAR A, PAUL B. The global menace of arsenic and its conventional remediation-A critical review [ J ]. Chemosphere, 2016, 158: 37-49.
- [ 14 ] 冯振刚, 张建宾, 李新军, 等. 棒状薄层色谱-氢火焰离子探测器检测老化沥青的四组分 [ J ]. 色谱, 2015, 33(2): 195-200.
- FENG Z G, ZHANG J B, LI X J, et al. Determination of the four generic fractions of aged bitumen by thin-layer chromatography with flame ionization detection [ J ]. Chinese Journal of Chromatography, 2015, 33(2): 195-200. ( in Chinese )
- [ 15 ] 孙杨. 冷再生用乳化沥青蒸发残留物流变性能研究 [ D ]. 郑州: 郑州大学, 2020: 10-12.
- SUN Y. Study on rheological properties of evaporated residue of emulsified asphalt for cold recycling [ D ]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020: 10-12. ( in Chinese )
- [ 16 ] 杨猛, 张生娟, 康徐伟, 等. 棒状薄层色谱法在煤焦油组成分析中的应用 [ J ]. 炼油与化工, 2021, 32(6): 70-72.
- YANG M, ZHANG S J, KANG X W, et al. Application of rod thin layer chromatography in composition analysis of coal tar [ J ]. Refining and Chemical Industry, 2021, 32(6): 70-72. ( in Chinese )
- [ 17 ] 陈梓宁. 玉米秸秆纤维沥青吸附机制及其 SMA 路用性能研究 [ D ]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 34.
- CHEN Z N. Asphalt adsorption mechanism of corn stalk fiber and road performance research of corn stalk fiber sma [ D ]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 34. ( in Chinese )
- [ 18 ] 陈程. 几种不同植物基活性炭的制备与特性研究 [ D ]. 南京: 南京大学, 2019: 39.
- CHEN C. Study of activated carbon prepared from different plant wastes [ D ]. Nanjing: Nanjing University, 2019: 39. ( in Chinese )
- [ 19 ] 邹文强, 舒庆, 许宝泉. 螺旋藻对稀土铈离子的吸附特性研究 [ J ]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 674-683.
- ZOU W Q, SHU Q, XU B Q. Adsorption characteristics of spirulina to rare earth erbium ions [ J ]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 674-683. ( in Chinese )