doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2025.01.010

硅藻土改性生物沥青的黏附性研究

李宁利[1,2]，梁文鑫[1]，栗培龙[2]
（1. 河北工业大学 土木与交通学院，天津 300401；2. 长安大学 道路结构与材料交通运输行业重点实验室，西安 710064）

摘要：为了提升生物沥青与集料的黏附性能、提高生物沥青在工程中的实际应用效果，采用硅藻土对生物沥青进行改性研究。通过三大指标试验和布氏旋转黏度试验对硅藻土改性生物沥青的物理性能进行评价；采用改进水煮法评价硅藻土改性生物沥青与石灰岩的黏附性；基于表面自由能理论，通过躺滴法测定硅藻土改性生物沥青与测试液体的接触角，计算表面能、黏聚功、黏附功与剥落功。结果表明，硅藻土能够改善生物沥青的物理性能，提高软化点并降低了针入度，延度先降低后略微提升；黏度随着硅藻土掺量的增加而增大，但掺量超过17%后，黏度几乎不再增大；水煮试验中的沥青质量损失率在硅藻土掺量为17%时达到最小，与原生物沥青相比下降了36.44%；硅藻土能有效提升生物沥青的表面能、黏附功与黏聚功并降低剥落功；无量纲能量参数(ER)在硅藻土掺量为17%时达到最大。

关键词：道路工程；生物沥青；硅藻土；黏附性；表面自由能；改进水煮法
中图分类号：U414　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-582X(2025)01-098-09

Research on the adhesion of diatomite-modified bio-asphalt

LI Ningli[1,2], *LIANG Wenxin*[1], *LI Peilong*[2]
(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;
2. Key Laboratory of Highway Structure and Materials, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China)

Abstract: To enhance the adhesion of bio-asphalt to aggregates and improve its practical application in engineering, this study investigates the effects of diatomite modification on bio-asphalt. The physical properties of diatomite-modified bio-asphalt are evaluated using standard index tests and rotational viscosity experiments. Adhesion to limestone is evaluated using an improved boiling method, Based on surface free energy, contact angles between the diatomite-modified bio-asphalt and test liquids are measured by the lying drop method, enabling the calculation of surface energy, cohesion work, adhesion work and spalling work. The results show that diatomite improves the physical properties of bio-asphalt, increases the softening point, reducces needle penetration, initially decreases ductility, and then slightly increases. Viscosity increases with diatomite content but stabilizes when the content exceeds 17%. When diatomite content is 17%, the asphalt quality loss during the boiling test is minimized, showing a decrease of 36.44% compared with unmodified bio-asphalt. Additionally, diatomite significantly improves the surface energy, adhesion and cohesion of bio-asphalt, and reduces spalling

收稿日期：2024-02-18
基金项目：长安大学重点科研平台开放基金项目（300102210510）。
Supported by the Open Fund Project of Key Scientific Research Pratform of Chang'an University(30010220510).
作者简介：李宁利（1977—），女，副教授，主要从事绿色环保型沥青材料的研究与开发，（E-mail）lnl808@hebut.edu.cn。
通信作者：栗培龙，男，教授，（E-mail）lipeilong@chd.edu.cn。

work. The dimensionless energy parameter (ER) reaches its peak at a diatomite content of 17%.

Keywords: rood engineering; bio-asphalt; diatomite; adhesion; surface energy; improving the boiling test

随着我国公路网建设的逐渐完善，公路石油沥青消耗量巨大，石油资源的再生周期漫长，且原油加工过程会对环境造成较大污染。所以，寻求石油沥青的可替代材料对于道路建设领域有着重大的意义[1]。生物质油与石油沥青共混得到的生物沥青，相较于传统石油沥青具有可再生、价格低廉、分布广泛等优点[2]。但众多学者研究发现，生物沥青与集料的黏附性较差，限制了生物沥青的进一步应用[3-7]。若能克服这一性能缺陷，就能使生物沥青的实际工程应用得到进一步推广。

目前，研究者也开始着力于改善生物沥青与集料的黏附性能。马明洋[8]在生物沥青中加入了SBS，生物沥青混合料的水稳定性得到显著提升。曹羽[9]在研究蓖麻油（SHB）与玉米油（DC）为来源的生物沥青时，对其运用SBS、胶粉进行复合改性，DC、SHB及复合改性生物沥青在水煮试验中均表现良好。季坤等[10]将生物沥青与TLA湖沥青进行混合改性，改性沥青混合料展现出极佳的水稳定性。冯学茂等[11]在生物沥青中添加了有机化蒙脱土，发现其黏度达到基质沥青的2倍以上，但低温性能会受到影响。综上所述，目前改善生物沥青黏附性的手段存在成本偏高，可能影响生物沥青低温性能的缺点，而硅藻土作为一种无机材料，具有价格低廉、多孔、比表面积大等优点[12-13]，研究表明硅藻土能够提升增强沥青混合料的高温、低温和水稳定性[14-16]，但硅藻土在生物沥青中尚未得到应用。文中拟采用硅藻土作为改性剂，探究不同掺量下硅藻土对生物沥青与集料黏附性的影响。

1　实验部分

1.1　主要原料

1）生物质油：研究所采用的生物质油来源于河北某生物质能源企业，其原料为木屑，常温下为黑色膏状物。

2）石油沥青：70#鑫海石油沥青，技术指标满足《公路沥青路面施工技术规范》（JTGF40—2004）的规定，如表1所示。

表1　70#鑫海沥青物理性能指标

Table 1　Physical performance index of 70# Xinhai asphalt

检测项目	试验结果
25 ℃针入度/(0.1mm)	73.4
软化点/℃	49.6
10 ℃延度/cm	46.0

3）硅藻土：研究采用的硅藻土来源于青岛盛泰硅业有限公司，颜色为灰白色，pH值为5~7，SiO_2≥85%，含有少量的FeO_2、Al_2O_3。

1.2　试样制备

研究中，生物质油掺量为石油沥青质量的10%。首先，将石油沥青放入恒温烘箱内，待石油沥青被加热达到流动态后，将预热至110 ℃的生物质油匀速地加入至石油沥青中，在135 ℃、3 000 r/min的条件下，剪切30 min制备得到生物沥青；再分别以石油沥青质量的11%、13%、15%、17%和19%的硅藻土加入到生物沥青中，继续剪切20 min得到硅藻土改性生物沥青，在制备过程中使用玻璃棒不断搅拌混合。

1.3　试验方法

1.3.1　常规性能试验

对不同掺量硅藻土制备得到的硅藻土改性生物沥青进行25 ℃针入度、软化点与10 ℃延度等基本物理性能指标试验，分别按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG-E20-2011)中T0604、T0606和T0605进行。

1.3.2 布氏旋转黏度试验

采用布洛克菲尔德黏度仪(Brookfield DV-Il+Pro型)对基质沥青、生物沥青(BIO)和硅藻土改性生物沥青在135、145、155、165、175 ℃进行黏度测试,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG-E20-2011)中T0625进行。

1.3.3 改进水煮法试验

传统水煮法试验难以精确掌控,评价指标无法定量且主观影响很大[17]。研究基于传统水煮法试验进行改进,以连续性试验(3、6、9、12、15 min)方法测定硅藻土改性生物沥青与集料在水煮试验中的沥青质量变化情况,并以基质沥青、生物沥青作为对照组。试验采用的集料为石灰岩,每次试验5组,结果取平均值。在石料裹覆沥青后,需放凉冷却至室温并去除多余沥青,同时在水煮过程中用纸片或玻璃棒对剥落沥青进行处理,防止剥落的悬浮沥青对石料重新裹覆,影响试验结果。

按照公式(1)计算得到沥青的质量损失率F(%),参考沥青黏附性分级表评价硅藻土改性生物沥青与集料的黏附性能。沥青黏附分级表,如表2所示。

$$F=\frac{M_3-M_2}{M_3-M_1}\times 100\%\ , \tag{1}$$

式中:M_1为石料初始质量;M_2为石料裹覆沥青冷却后的质量;M_3为水煮试验后石料干燥冷却的质量。

表2 沥青黏附性分级表[18]

Table 2 Classification of asphalt adhesion

F/%	黏附等级	沥青薄膜在集料表面的剥落情况描述
≤5	10	沥青薄膜完好
5~10	9	沥青薄膜完好,边角有极少剥落
10~15	8	沥青薄膜基本完好,部分表面有少量剥落
15~20	7	沥青薄膜部分剥落,集料表面裸露面积为15%~30%
20~30	6	
30~40	5	沥青薄膜大量剥落,集料表面裸露面积为30%~60%
40~50	4	
50~60	3	沥青薄膜大面积剥落,集料表面裸露面积超过60%
60~70	2	
>70	1	沥青薄膜大面积剥落,集料表面裸露面积超过70%

1.3.4 接触角试验

采用躺滴法对沥青表面能参数进行测试。将制备好的硅藻土改性生物沥青用玻璃棒滴到载玻片上,将载玻片放置于加热炉上使沥青加热达到流动态,使沥青在载玻片上形成光滑的平面,在沥青冷却后,放置于干燥无尘的容器中,即可获得接触角试件。

采用DAS30接触角测定仪测定25 ℃下蒸馏水、甲酰胺和乙二醇3种测试液体与沥青的接触角,测试过程如图1和图2所示,3种测试液体的表面能,如表3所示。

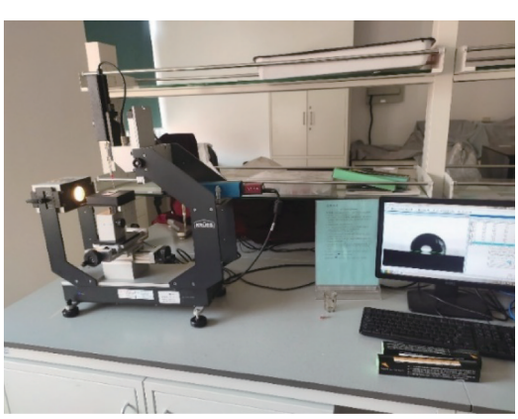


图1 光学接触角仪

Fig. 1 Optical contact angle instrument



图2 接触角测定

Fig. 2 Contact angle determination

表 3　测试液体表面能参数 (25 ℃, mJ/m²)

Table 3　Surface energy of the test liquids(25 ℃, mJ/m²)

测试液体	γ_L	γ_L^d	γ_L^p	γ_L^+	γ_L^-
蒸馏水	72.8	21.8	51.0	25.50	25.5
甲酰胺	58.0	39.0	19.0	2.28	39.6
乙二醇	48.0	29.0	19.0	1.92	47.0

注：γ_L为测试液体的表面自由能；γ_L^d为测试液体的色散分量；γ_L^p为测试液体的极性分量；γ_L^+为测试液体的路易斯酸分量；γ_L^-为测试液体的路易斯碱分量。

2　结果与讨论

2.1　三大指标分析

沥青的针入度、软化点、延度等指标分别对沥青的稠度、高温稳定性与塑性等进行表征。不同掺量的硅藻土对生物沥青三大指标影响结果，如表 4 所示。

表 4　三大指标试验结果

Table 4　Three major indicator test results

沥青类型	25 ℃针入度/0.1mm	软化点/℃	10 ℃延度/cm
BIO	78.0	48.6	40.5
BIO+11%	72.8	50.9	28.4
BIO+13%	72.1	51.5	24.6
BIO+15%	70.8	51.7	22.5
BIO+17%	67.3	52.0	27.0
BIO+19%	65.4	52.1	28.0

针入度能够反映沥青自身的稠度，是我国沥青标号划分的主要依据。结果表明，随着硅藻土掺量的增大，针入度逐步下降。表 1 和表 4 表明，在 11% 的硅藻土掺量下，改性生物沥青针入度已小于基质沥青。

软化点是反映石油沥青高温性能的重要指标，软化点越高，说明沥青的热稳定性能越好。可以看出，随着硅藻土掺量的增加，改性生物沥青的软化点逐渐升高，高温性能得到提升，但增长趋势较为平缓，相较于原生物沥青的软化点提升了 7% 左右。

延度是反映沥青低温性能的重要指标，延度越大，沥青的低温性能越好。结合表 1 和表 4 可以看出，生物质油的掺加使沥青的延度有所下降，硅藻土的加入使延度下降幅度进一步加大，在掺量超过 15% 后，延度略微提升。主要原因是硅藻土的改性过程仅在沥青中进行分散，与聚合物改性剂在沥青中发生交联作用不同，硅藻土在沥青中以微粒的形式存在，延度试验中沥青被拉伸，硅藻土微粒会使沥青产生应力集中，从而导致沥青过早发生断裂[19]。

2.2　布氏旋转黏度结果分析

沥青作为一种黏弹性材料，其黏度对温度十分敏感，是影响沥青胶结料与集料之间黏附性的重要因素之一。沥青自身黏度的增大有利于增强自身与集料之间黏附性，因为沥青黏度越大说明其重质组分含量越多，与集料的化学吸附能力越强，会使集料表面的沥青膜有效厚度增大[20]。不同掺量硅藻土对生物沥青黏度的影响情况，如图 3 所示。由图 3 可知，加入生物质油后，生物沥青的黏度相较于基质沥青有了较大程度的降低，原因是生物油的加入使沥青整体轻质组分占比例提升所致。通过黏度变化可以发现，生物沥青的黏度随着硅藻土掺量的增加而增大，在 135 ℃、145 ℃下，11% 掺量时的硅藻土改性生物沥青的黏度已与基质沥青相近。从黏度增长趋势来看，硅藻土掺量超过 17% 后，黏度几乎不再增大，所以硅藻土掺量不宜超过 17%。

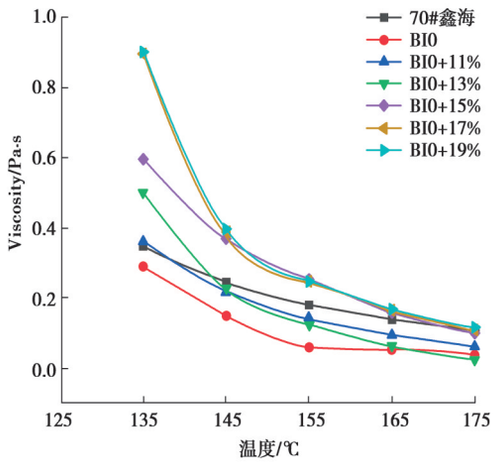


图3 硅藻土掺量对生物沥青黏度的影响

Fig. 3 Influence of the content of diatomite on the viscosity of bio-asphalt

2.3 改进水煮法试验结果分析

各组生物沥青水煮试验结果，如表5所示。

表5 硅藻土改性沥青黏附性水煮试验结果

Table 5 Results of water boiling experiment on adhesion of diatomite modified asphalt

沥青类型	水煮3 min		水煮6 min		水煮9 min		水煮12 min		水煮15 min	
	黏附等级	*F*/%	黏附等级	*F*/%	黏附等级	*F*/%	黏附等级	*F*/%	黏附等级	*F*/%
70#鑫海	10	1.29	9	5.85	7	17.20	5	28.20	4	39.08
BIO	9	5.57	9	9.14	6	23.98	4	40.89	3	57.20
BIO+11%	10	1.15	9	5.70	8	12.00	6	23.60	5	39.50
BIO+13%	10	2.87	10	4.69	8	12.28	6	22.48	5	35.15
BIO+15%	10	1.67	10	2.54	8	10.11	7	18.02	6	26.16
BIO+17%	10	1.90	10	4.37	8	11.36	6	13.21	6	20.76
BIO+19%	10	1.78	10	3.62	8	10.73	6	20.46	6	29.16

由表5可知，水煮时间为3 min时，各组沥青的剥落质量差别不大，黏附等级均为9级及以上。但随着水煮时间的不断加长，质量损失逐渐增多，黏附等级开始降低，BIO与其他各组沥青的差距逐渐被拉大。当水煮时间到达15 min时，BIO+17%的质量损失率相较于BIO降低了36.44%，这表明硅藻土能够显著提升生物沥青与集料的黏附性。各组沥青与集料黏附等级大小排序为17%＞15%≈19%＞13%≈11%≈70#鑫海＞BIO，可以发现当硅藻土的掺量为17%时，生物沥青的质量损失率达到最小；但掺量的继续增大并没有使质量损失率降低，说明硅藻土能够提升生物沥青与集料的黏附性能并存在最佳掺量。

2.4 表面能结果分析

通过测试得到的接触角，计算出不同硅藻土掺量下生物沥青的表面能、极性分量与色散分量。结合杨氏方程计算得到生物沥青的黏聚功 W_{cohesion}、生物沥青与集料的黏附功 W_{as} 与剥落功 W_{asw}，采用无量纲能量参数ER对生物沥青-集料界面体系的水稳定性进行综合全面地评价，ER如公式(2)所示，ER的值越大表示生物沥青-集料体系的抗水损害能力越强。

$$\text{ER}=\frac{W_{\text{as}}-W_{\text{cohesion}}}{W_{\text{asw}}}。\tag{2}$$

2.4.1 表面能及其分量

根据测试得到液体与沥青的接触角与测试液体的表面能参数，可得到各组生物沥青的表面能参数，结果如图4所示。

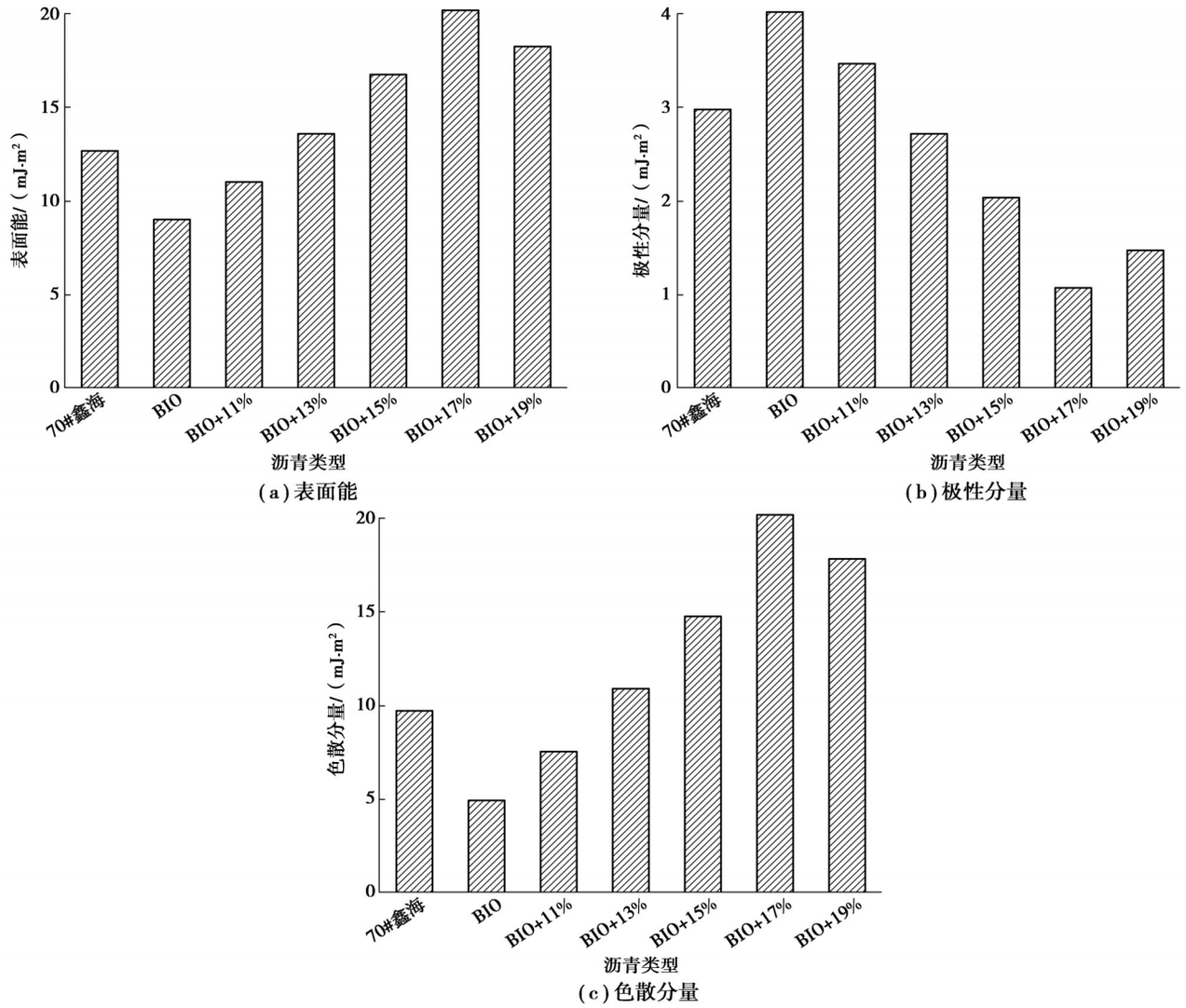


图 4　各组生物沥青表面能参数

Fig. 4　Bio-asphalt surface energy parameters of each group

表面能越大，生成新界面所需要的能量越多；色散分量越大，物理黏附性能越好；极性分量越大，沥青越容易遭到水分浸入，从集料表面剥离。由图 4 可以看出，在加入了生物质油后，生物沥青相较于基质沥青有一定程度的降低，而硅藻土的加入使生物沥青表面能得到提升，掺加了 17% 硅藻土后的表面能相较于基质沥青与生物沥青分别提高了 67.7% 与 137.1%。因此，硅藻土的加入使生物沥青具有更好的抗水损害能力。

2.4.2　*黏聚功、黏附功与剥落功*

沥青黏聚功是指将单位面积的沥青分为 2 个表面的能量，黏聚功越大，沥青抵抗水分的能力越强。由于黏聚功在数值上为表面自由能的 2 倍，黏聚功与表面自由能的变化趋势相同。由图 5 可知，在 17% 掺量时硅藻土改性沥青表现出更强的自聚力，有着较好的抗开裂能力，推测原因是硅藻土具有较大的比表面积，微孔结构也有利于沥青的吸附和湿润，能够提高硅藻土与沥青之间的黏结力。

黏附功是指无水条件下沥青与集料两个表面体系结合成为一个表面体系所释放出的能量，黏附功越大表明体系越稳定，沥青混合料的水稳定性越好。由图 6 可知，基质沥青与石灰岩的黏附功为 121.1 mJ/m^2，而在加入了生物质油后黏附功下降了约 12.2%，表明生物质油对沥青–集料体系的稳定性有削弱作用。硅藻土的加入，使生物沥青的黏附功迅速得到提升，在 17% 掺量时，黏附功达到 138.8 mJ/m^2，相较于基质沥青与生物沥青分别提升了约 14.6% 与 28.6%，硅藻土改性生物沥青与集料表现出较好的黏附性能。原因是硅藻土的微孔结构相当于微毛细管，会产生毛细作用，从而增加了沥青的界面作用力，增强了黏附性能[21]。

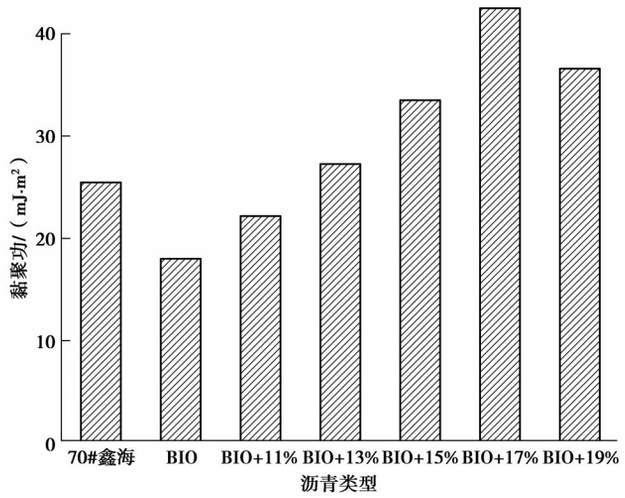


图5 硅藻土改性生物沥青的黏聚功

Fig. 5 Cohesion work of bio-asphalt modified by diatomite

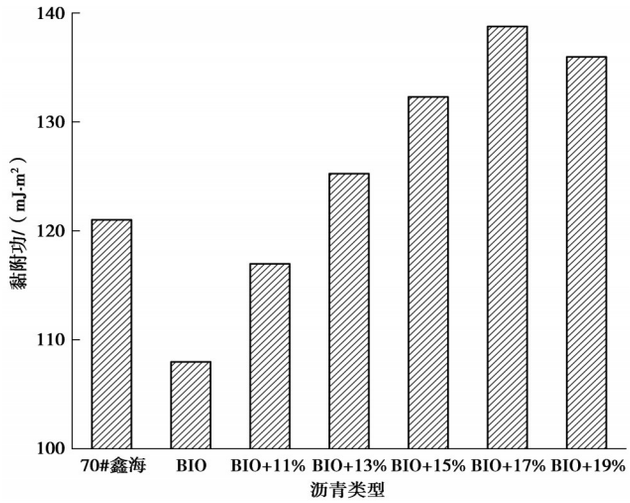


图6 硅藻土改性生物沥青的黏附功

Fig. 6 Adhesion work of bio-asphalt modified by diatomite

剥落功表征的是有水条件下沥青-集料-水3种体系的作用过程，剥落功越大则表明水分更容易替代沥青膜，沥青与集料的黏结效果更差。从图7中可以看出，生物沥青的剥落功随着硅藻土掺量的增加先下降后提高，17%掺量时的剥落功相较于基质沥青与生物沥青下降了约17.1%和27.4%，说明硅藻土降低了生物沥青的水分敏感性。

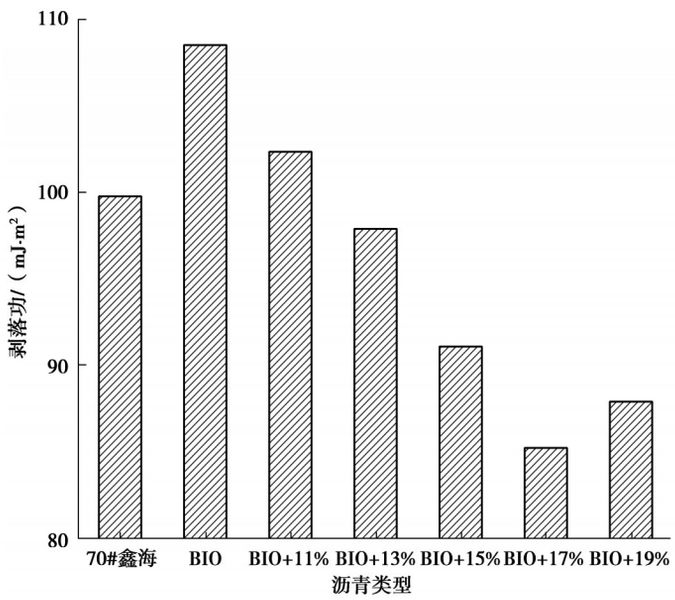


图7 硅藻土改性生物沥青的剥落功

Fig. 7 Spalling work of bio-asphalt modified by diatomite

2.4.3 ER值

以能量参数ER作为体系的综合评价指标，通过公式(2)计算得到的ER值，如图8所示。可以发现，生物沥青的能量参数ER相较于基质沥青降低了15.7%，在硅藻土掺量达到13%时的ER反超基质沥青。随着硅藻土掺量的逐渐增加，ER值在17%掺量时达到最大，而后略微下降，这与黏聚功、黏附功趋势相同。所以，硅藻土掺加量为17%时，能最大程度提升生物沥青-集料-水体系的稳定性，提高生物沥青混合料抵御水损害的能力，延长路面服务寿命。

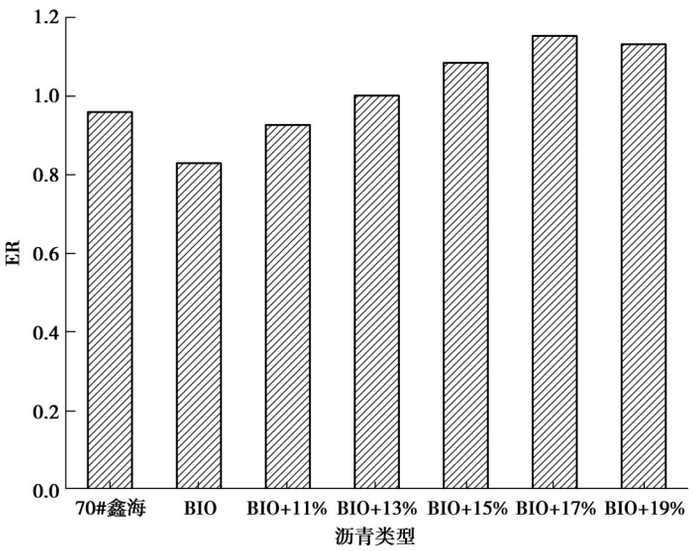


图 8　生物沥青–集料–水体系的 ER 值

Fig. 8　ER values of bio-asphalt-aggregate-water interface system

3　结　论

1)硅藻土能够改善生物沥青的物理性能,改性生物沥青的针入度下降,软化点提升约 7%,而延度先降低后提升。

2)改性生物沥青的黏度随着硅藻土掺量的增加而增大,但在掺量超过 17% 后,黏度几乎不再增大。

3)硅藻土能够提升生物沥青与集料的黏附性,17% 硅藻土掺量时的改进水煮试验中的沥青质量损失率相较于原生物沥青下降了 36.44%。

4)相较于生物沥青,17% 硅藻土掺量时的改性生物沥青的表面能和黏聚功提高了 137.1%,黏附功提高了 28.6%,而剥落功下降了 27.4%,ER 值达到最大。

参考文献

[1] 曾梦澜, 田伟, 朱艳贵, 等 . 蓖麻油生物沥青调和沥青混合料使用性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11): 177-182.
Zeng M L, Tian W, Zhu Y G, et al. Study on performance of castor oil-based bioasphalt blended asphalt mixture[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11): 177-182.(in Chinese)

[2] Zhang Z Q, Fang Y, Yang J H, et al. A comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: their source, composition, preparation and performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2022, 9(2): 151-166.

[3] Dong Z J, Zhou T, Wang H, et al. Performance comparison between different sourced bioasphalts and asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2018,30(5):1470-1489.

[4] Han Z Q, Sha A M, Tong Z, et al. Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and its modification with bio-oil[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 776-789.

[5] 高俊锋, 汪海年, 尤占平, 等 . 路用生物沥青及混合料性能研究[J]. 石油炼制与化工, 2017, 48(10): 46-51.
Gao J F, Wang H N, You Z P, et al. Properties of road bio-binder and its mixture[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2017, 48(10): 46-51.(in Chinese)

[6] Gong M H, Zhu H R, Pauli T, et al. Evaluation of bio-binder modified asphalt's adhesion behavior using sessile drop device and atomic force microscopy[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 42-51.

[7] 刘卫卫, 董祥云 . 生物沥青混合料试验及应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(6): 138-141.
Liu W W, Dong X Y. Research on experiment and application of bioasphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2019, 15(6): 138-141.(in Chinese)

［8］马明洋 . SBS改性生物沥青及其混合料路用性能的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019: 1-62.
Ma M Y. Study on road performance of SBS modified bio-asphalt and its mixture[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019: 1-62. (in Chinese).

［9］曹羽 . 植物沥青复合改性研究及性能评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 1-73.
Cao Y. Study on composite modification of plant asphalt and its performance evaluation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 1-73.(in Chinese).

［10］季坤, 荀建伟 . 生物沥青与TLA复合改性沥青及混合料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(12): 168-172.
Ji K, Xun J W. Study on performance of bio-asphalt and TLA composite modified asphalt and mixture[J]. New Building Materials, 2020, 47(12): 168-172.(in Chinese)

［11］冯学茂, 张宇豪, 韦慧, 等 . 有机化蒙脱土改性生物沥青的流变性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(3): 687-694.
Feng X M, Zhang Y H, Wei H, et al. Research on rheological properties of organic montmorillonite modified bio-asphalt[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3): 687-694.(in Chinese)

［12］Cong P L, Chen S F, Chen H X. Effects of diatomite on the properties of asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 495-499.

［13］University E, Aslan S, Aktas B. Use of diatomite and pumice as stabilizers in stone mastic asphalt mixtures[J]. Revista de La Construcción, 2019, 17(3): 531-541.

［14］孙斌祥, 姜奕, 沈航, 等 . 改性多孔沥青混合料水稳定性与损伤规律[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(3): 120-130.
Sun B X, Jiang Y, Shen H, et al. Moisture stability and damage law of modified porous asphalt mixture[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(3): 120-130.(in Chinese)

［15］Tan Y Q, Zhang L, Zhang X Y. Investigation of low-temperature properties of diatomite-modified asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 787-795.

［16］Mohd Shukry N A, Abdul Hassan N, Abdullah M E, et al. Influence of diatomite filler on rheological properties of porous asphalt mastic[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(4): 428-436.

［17］李昇, 张岩, 焦凯 . 基于表面能理论的改性沥青与集料黏附性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(2): 158-164.
Li S, Zhang Y, Jiao K. Research on adhesion between modified asphalt and aggregate based on surface energy theory[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(2): 158-164.(in Chinese)

［18］张苛, 张争奇 . 沥青与集料黏附性的定量评价[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(6): 810-815.
Zhang K, Zhang Z Q. Quantitative evaluation of the adhesion between asphalt and aggregate[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015, 38(6): 810-815.(in Chinese)

［19］苏蓉 . 硅藻土改性沥青及其混合料路用性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(10): 66-68.
Su R. Study on road performance of diatomite modified asphalt and its mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 12(10): 66-68.(in Chinese)

［20］洪岭岭, 冯国杰, 孙雪阳 . 沥青旋转黏度与黏附性的相关性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(5): 24-31.
Hong L L, Feng G J, Sun X Y. Research on the correlation between asphalt rotational viscosity and adhesion[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2020, 42(5): 24-31.(in Chinese)

［21］张志清, 张兴友, 胡光艳, 等 . 硅藻土改性沥青微观机理分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(9): 943-947.
Zhang Z Q, Zhang X Y, Hu G Y, et al. Microcosmic mechanism analysis of the diatomite-modified asphalt[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(9): 943-947.(in Chinese)

（编辑　陈移峰）