

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.06.015

# 岩沥青—硅藻土复合改性沥青微观性能和流变特性研究<sup>\*</sup>

龙翔<sup>1</sup>, 许志东<sup>2</sup>, 杨梅<sup>2</sup>, 李俊<sup>2</sup>, 黄文通<sup>3</sup>

(1.越秀交通基建有限公司, 香港 999077; 2.广州市北二环交通科技有限公司, 广东 广州 510075;

3.东莞理工学院 生态环境与建筑工程学院, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 为评价岩沥青—硅藻土复合改性沥青的使用性能, 采用扫描电镜分析岩沥青和硅藻土的微观结构, 用针入度和针入度指数、软化点和当量软化点、当量脆点分别评价沥青的温度敏感性、高温性能和低温性能, 通过动态剪切温度扫描研究岩沥青—硅藻土复合改性沥青的流变特性。结果表明, 岩沥青—硅藻土复合改性剂能改善沥青的温度敏感性, 增强沥青与集料的黏附性, 提高沥青的热稳定性和高温抗变形能力。

**关键词:** 公路; 岩沥青; 硅藻土; 复合改性沥青; 微观性能; 流变特性

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)06-0079-05

岩沥青是石油在岩石夹缝中经过长达亿万年的沉积、变化, 在热、压力、氧化、触媒、细菌综合作用下生成的沥青类物质<sup>[1-3]</sup>, 其软化点高, 能提高普通沥青的高温稳定性, 改变沥青油分和沥青质的比例, 改善沥青混合料的高温稳定性和抗疲劳性能, 但对沥青混合料低温抗裂性能的改善效果不大<sup>[4-7]</sup>。硅藻土具有独特的高重复性三维多孔结构, 其比表面积大, 吸附能力强, 稳定性好, 将硅藻土加入沥青中, 能提高沥青的软化点和黏度, 降低沥青的针入度, 硅藻土改性沥青具有良好的热稳定性和黏附性<sup>[8-10]</sup>。硅藻土可改善沥青混合料的水稳定性, 但对高温性能的改善效果不大。

朱春风等对硅藻土—玄武岩纤维复合改性沥青进行高低温性能试验, 发现基质沥青中掺入硅藻土和玄武岩纤维后其高温性能和低温性能得到明显改善<sup>[11]</sup>。孙吉书等通过三大指标(针入度、软化点、延度)试验、离析试验和动态剪切流变试验, 发现表面有机化硅藻土—胶粉复合改性沥青的路用性能和贮存稳定性都有所提升<sup>[12]</sup>。汪托、李建科等研究发现硅藻土/岩沥青复合改性沥青的高温稳定性、水稳定性、疲劳性能均有明显改善, 但低温抗裂性能有所降低<sup>[13-14]</sup>。岩沥青或硅藻土能分别改善沥青的某些性能, 但仍存在不足, 如能将两种沥青改性剂复配在

一起, 克服各自单独掺入使用的不足, 将使沥青性能更加突出<sup>[15-17]</sup>。本文在已有研究的基础上, 以不同岩沥青—硅藻土复合改性剂掺量配制改性沥青进行试验研究, 分析其温度敏感性、高温性能、低温性能和流变特性, 为沥青复合改性提供参考。

## 1 复合改性沥青的制备

### 1.1 原材料

基质沥青采用佛山中油高富沥青有限公司生产的 A-70 沥青, 其技术性能见表 1。硅藻土采用云南寻甸地区的硅藻土, 其化学组成见表 2, 烧失量为 5.2%。岩沥青采用北美岩沥青, 其技术性能见表 3。

表 1 A-70 沥青的技术性能

试验项目	技术要求	实测值
25℃针入度/(0.1 mm)	60~80	62
针入度指数	-1.5~1.0	-1.27
软化点/℃	≥46	48
10℃延度/cm	≥15	28
60℃动力黏度/(Pa·s)	≥180	202
质量变化/%	±0.8	-0.02
RTFOT		
25℃残留针入度/%	≥61	72
10℃残留延度/cm	≥6	7

<sup>\*</sup> 基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2021A1515010564); 东莞市社会科技发展重点项目(2020507140155); 东莞理工学院大学生创新创业训练计划项目(202211819074)

表 2 硅藻土的化学组成

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
SiO <sub>2</sub>	85.2	MgO	1.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.6	TiO <sub>2</sub>	0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.3	K <sub>2</sub> O	0.4
CaO	0.6		

表 3 北美岩沥青的技术性能

试验项目	技术要求	实测值
沥青含量(溶剂法)/%	≥80	91
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	>1	1.180
闪点/℃	≥230	298
含水量/%	<1	0.6
灰分/%	<15	8
1.18 mm 筛孔通过率/%	—	100

采用德国 Zeiss 公司生产的 Merlin 扫描电镜(SEM)对 100 目岩沥青和 500 目硅藻土分别进行 1 000 倍扫描观察,扫描结果见图 1、图 2。

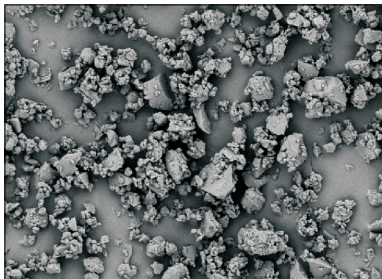


图 1 岩沥青 1 000 倍 SEM 图像

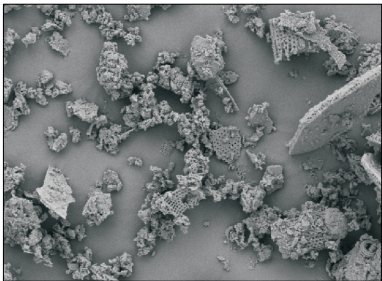


图 2 硅藻土 1 000 倍 SEM 图像

由图 1 可知:岩沥青粉末粒径为 1~20 μm,大小颗粒分布不均匀,大颗粒四处分散,小颗粒团簇一起黏附在较大颗粒上。在高温条件下,岩沥青颗粒受热融化,达到熔融状态并与石油沥青融合,能提高集料的抗剥离能力,改善沥青混合料的水稳定性。

由图 2 可知:硅藻土为多孔结构,孔径大小不

一,空隙率较高,比表面积很大。硅藻土的内、外表面都是由空隙结构形成的活性表面,呈现出优异的附着能力和附着强度。如果硅藻土与石油沥青混合,石油沥青被吸附在硅藻土颗粒的表面,石油沥青中的轻油组分也被吸入硅藻土微腔空隙中,石油沥青和硅藻土之间形成机械锁力,与集料的黏聚力大大提高,能改善沥青混合料的水稳定性。

## 1.2 复合改性沥青制备流程

岩沥青与硅藻土的比例分别为 65%、35%。按该比例分别称量两种改性剂,通过人工混合搅拌均匀,得到岩沥青—硅藻土复合改性剂;将基质沥青预热至 140~150 ℃,加入岩沥青—硅藻土复合改性剂;继续升温至 165~175 ℃,加热过程中持续进行搅拌,搅拌速度为 3 000 r/min,搅拌时间为 40 min,得到岩沥青—硅藻土复合改性沥青。

## 2 复合改性沥青性能分析

### 2.1 水稳定性

岩沥青—硅藻土复合改性沥青与粗集料的黏附性评价结果见表 4。粗集料花岗岩和砂岩产自广东惠州。

表 4 不同类型沥青与粗集料的黏附性

沥青类型	与下列粗集料的黏附性	
	花岗岩	砂岩
A-70 沥青	3 级	3 级
SBS 改性沥青	4 级	4 级
岩沥青—硅藻土复合改性沥青	5 级	5 级

由表 4 可知:岩沥青—硅藻土复合改性沥青与粗集料的黏附性等级为 5 级,高于 SBS 改性沥青与粗集料的黏附性等级,表明岩沥青—硅藻土复合改性剂能提高沥青与集料的黏附能力,有效改善沥青混合料的水稳定性。

### 2.2 感温性

岩沥青—硅藻土复合改性剂掺量(内掺,占沥青质量的百分比)分别为 14%、17%、20%、23%、26%。不同掺量下岩沥青—硅藻土复合改性沥青的针入度和针入度指数分别见图 3、图 4。

由图 3、图 4 可知:岩沥青—硅藻土复合改性沥青的针入度、针入度指数与岩沥青—硅藻土复合改性剂掺量之间存在良好的线性关系,随着复合改性剂掺量的提高,改性沥青的针入度降低、针入度指数

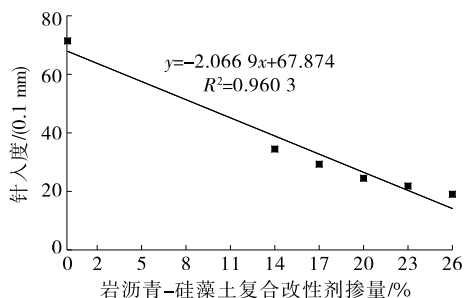


图3 不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的针入度

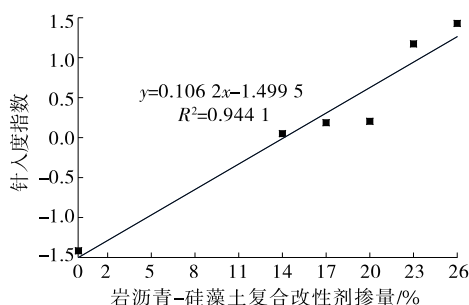


图4 不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的针入度指数

升高,表明岩沥青-硅藻土复合改性剂能降低沥青的温度敏感性,沥青性质更稳定。

### 2.3 高温性能

不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的软化点和当量软化点见图5。

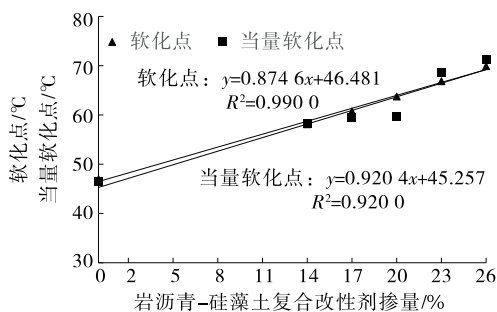


图5 不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的软化点和当量软化点

由图5可知:岩沥青-硅藻土复合改性沥青的软化点、当量软化点与岩沥青-硅藻土复合改性剂掺量之间存在良好的线性关系,随着复合改性剂掺量的提高,改性沥青的软化点和当量软化点均升高,表明岩沥青-硅藻土复合改性剂对沥青的高温稳定性有改善作用,复合改性后沥青的耐热性能提高,抵抗高温变形的能力增强。

### 2.4 低温性能

不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的当量脆点见图6。

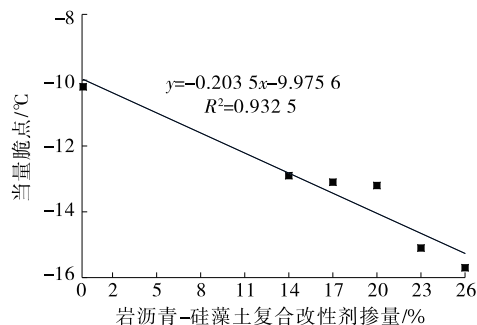


图6 不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的当量脆点

由图6可知:岩沥青-硅藻土复合改性沥青的当量脆点与岩沥青-硅藻土复合改性剂掺量之间存在良好的线性关系,随着复合改性剂掺量的提高,改性沥青的当量脆点提高,表明岩沥青-硅藻土复合改性沥青的耐低温性能在衰减,低温柔性逐渐降低。

### 2.5 流变特性

采用美国TA公司生产的AR-2000剪切流变仪分别对基质沥青和20%、25%岩沥青-硅藻土复合改性剂掺量下改性沥青进行温度扫描试验,测试沥青的 $\tan\delta$  ( $\delta$ 为相位角)和动黏度 $\eta'$ ,这两个指标分别表征沥青的黏性和弹性特征。同时采用车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 评价沥青的高温抗车辙能力,采用疲劳因子 $G^*\sin\delta$ 评价沥青的抗疲劳能力。温度扫描试验温度为 $-10\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,控制应变为5%,荷载频率为10 rad/s。温度扫描结果见图7~10。

动黏度 $\eta'$ 反映由沥青的黏性抵抗造成试验过程中的能量损失,能量损失大小表示材料抵抗变形的能力。在高温条件下,动黏度值越大,用于黏性抵抗损失的能量越多,沥青的抗变形能力越好。因此,

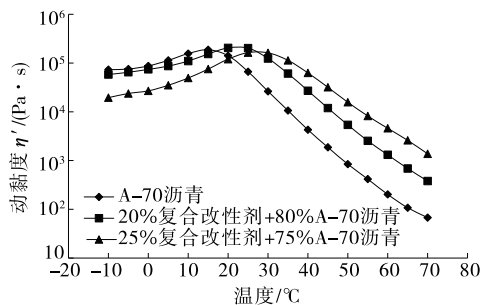


图7 不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的动黏度

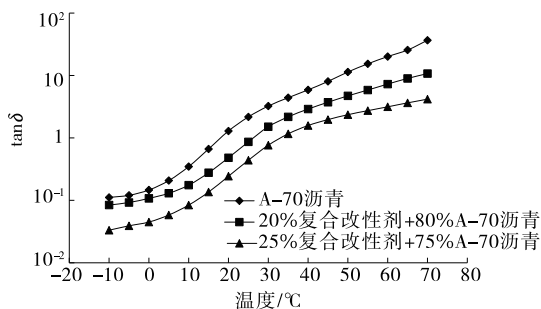


图8 不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的  $\tan\delta$

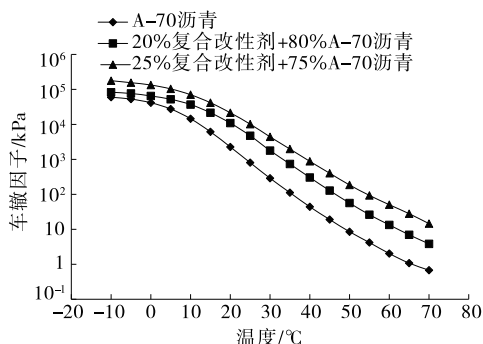


图9 不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的车辙因子

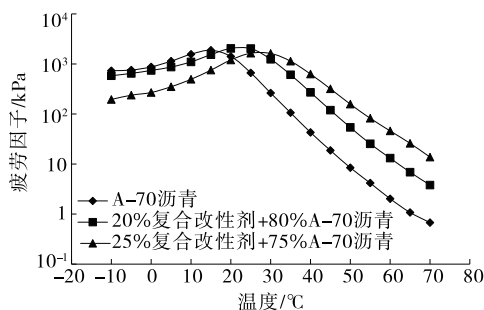


图10 不同改性剂掺量下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的疲劳因子

可用  $\eta'$  评价沥青黏结料的高温性能。由图7可知:高温下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的动黏度远大于A-70基质沥青,说明岩沥青-硅藻土复合改性剂能改善沥青的高温抗变形能力。随着岩沥青-硅藻土复合改性剂掺量的增加,动黏度增大,但增长幅度减小。

由图8可知:随着温度的升高,沥青的  $\tan\delta$  增大,但岩沥青-硅藻土复合改性沥青的增大速率小于A-70基质沥青,表明高温条件下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的弹性损失较小;同一温度下,岩沥青-硅藻土复合改性沥青的  $\tan\delta$  小于A-70基质沥青,表明岩沥青-硅藻土复合改性剂增强了基质

沥青的弹性部分,且随着复合改性剂掺量的增加,弹性增强效果更明显。

由图9可知:随着温度的升高,A-70基质沥青、岩沥青-硅藻土复合改性沥青的车辙因子降低,沥青抵抗车辙的能力降低;各温度下岩沥青-硅藻土复合改性沥青的车辙因子均大于A-70基质沥青;在高温阶段,与A-70基质沥青相比,岩沥青-硅藻土复合改性剂掺量为20%、25%时改性沥青的车辙因子分别提高5倍、20倍,表明岩沥青-硅藻土复合改性剂可增大沥青的车辙因子,改善沥青的抗车辙能力。

由图10可知沥青混合料的疲劳性能在不同温度下有不同的表现:温度 $<20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,岩沥青-硅藻土复合改性沥青的疲劳因子小于A-70基质沥青,相同温度下,岩沥青-硅藻土复合改性沥青的抗疲劳性能得到提高;温度为 $20\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,岩沥青-硅藻土复合改性沥青的疲劳性能与A-70基质沥青相当;温度 $>30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,岩沥青-硅藻土复合改性沥青的疲劳因子大于A-70基质沥青,3种沥青的抗疲劳性能优劣为A-70基质沥青 $>20\%$ 岩沥青-硅藻土复合改性剂+80%A-70基质沥青 $>25\%$ 岩沥青-硅藻土复合改性剂+75%A-70基质沥青。

### 3 结论

(1) 岩沥青-硅藻土复合改性剂能改善沥青与集料的黏附能力,提高沥青的抗剥落能力,改善沥青混合料的水稳定性。

(2) 岩沥青-硅藻土复合改性剂能提高沥青的耐高温性能,降低沥青的温度敏感性,但对沥青低温性能无改善作用。

(3) 岩沥青-硅藻土复合改性沥青具有良好的抗变形能力,抗车辙性能大幅度提高。

(4) 与A-70基质沥青相比,岩沥青-硅藻土复合改性沥青的疲劳性能在不同温度时表现出不一样的特点,须通过沥青混合料疲劳性能评价进行进一步验证。

### 参考文献:

- [1] 李立寒,孙艳娜,王飞.岩沥青对软硬沥青复配混合料的增强作用[J].建筑材料学报,2013,16(6):1087-1091.
- [2] 查旭东,胡锦湘,刘安辉,等.布敦岩沥青材料性质试验分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2017,

- 14(4):10—17.
- [3] 曾梦澜,陈伟,朱艳贵,等.布敦岩沥青湿法工艺掺量对改性沥青混合料性能的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(11):94—101.
- [4] 金鑫,郭乃胜,孙思威,等.伊朗岩沥青改性沥青的微观特性及性能[J].建筑材料学报,2021,24(6):1265—1270.
- [5] LI R X, KARKI P, HAO P W, et al. Rheological and low temperature properties of asphalt composites containing rock asphalts [J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 47—54.
- [6] LV S T, WANG S S, GUO T, et al. Laboratory evaluation on performance of compound-modified asphalt for rock asphalt/styrene-butadiene rubber (SBR) and rock asphalt/nano- $\text{CaCO}_3$  [J]. Applied Sciences, 2018, 8(6): 1009.
- [7] 吴怀睿,叶奋,徐骁龙.布敦岩沥青无机粉粒微观特征及改性机理[J].西南交通大学学报,2019,54(3):556—564.
- [8] YUE Y C, ABDELSALAM M, LUO D, et al. Evaluation of the properties of asphalt mixes modified with diatomite and lignin fiber: A review [J]. Materials, 2019, 12(3): 400.
- [9] 张君韬,赵辉,杜守继,等.季冻区硅藻土改性沥青的高低温性能及抗老化性能[J].材料科学与工程学报,2020,38(5):716—721.
- [10] 马霖.PCF—硅藻土复合改性沥青混合料的路用性能研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [11] 朱春风,刘浩,田伟,等.硅藻土—玄武岩纤维复合改性沥青胶浆性能研究[J].吉林建筑大学学报,2021,38(6):7—11+23.
- [12] 孙吉书,侯坤,王鹏飞.表面有机化硅藻土—胶粉复合改性沥青性能研究[J].热固性树脂,2021,36(5):15—20.
- [13] 汪托,郝培文,常睿.硅藻土/岩沥青复合改性沥青路用性能研究[J].中外公路,2018,38(1):296—301.
- [14] 李建科,赵小洁.岩沥青复合硅藻土改性沥青混合料试验性能研究[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(4):66—68.
- [15] CHENG Y C, YU D, GONG Y F, et al. Laboratory evaluation on performance of eco-friendly basalt fiber and diatomite compound modified asphalt mixture [J]. Materials, 2018, 11(12): 2400.
- [16] HUANG W T, WANG D Y, HE P Y, et al. Rheological characteristics evaluation of bitumen composites containing rock asphalt and diatomite [J]. Applied Sciences, 2019, 9(5): 1023.
- [17] WANG C, WANG H, ZHAO L D, et al. Experimental study on rheological characteristics and performance of high modulus asphalt binder with different modifiers [J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 26—36.

收稿日期:2022—09—30

\*\*\*\*\*

(上接第 78 页)

- [10] 谭海勤.不同类型纤维沥青混合料路用性能研究[J].公路与汽运,2021(3):61—63.
- [11] 孔令坤,李雪萍,冯志强.超黏精薄层罩面沥青混合料性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(4):9—15.
- [12] 颜鑫,郑翔南.稳定型胶粉与 SBS 复合改性沥青及沥青混合料性能研究[J].公路工程,2021,46(2):195—200+233.
- [13] 徐加秋,阳恩慧,罗浩原,等.基于温度应力的温拌沥青胶结料低温力学性能[J].建筑材料学报,2020,23(1):70—76.
- [14] 齐小飞,邹晓翎,阮鹿鸣,等.高 RAP 掺量下热再生混合料水稳定性影响因素研究[J].中外公路,2018,38(2):248—252.
- [15] 张勇,郭志坚,李文凯.复掺纤维 SMA—13 沥青混合料性能研究[J].河南科学,2021,39(8):1284—1288.
- [16] 刘少华,潘宝峰,许斌,等.透水沥青路面表面抗飞散性能提升技术研究[J].中外公路,2021,41(5):57—63.
- [17] 吴传海,杨艺,王旺,等.基于病害特征的湿热地区公路沥青路面破损状况评价研究[J].交通科学与工程,2023,39(4):9—16.
- [18] 朱伟串.复合改性 UTAC—8 薄层罩面在高速公路工程中的应用[J].公路与汽运,2023(4):92—96.

收稿日期:2022—03—25