

# 基于岩沥青与硅烷偶联剂复合改性的 沥青性能研究

张文虎<sup>1</sup>, 杨永富<sup>2</sup>, 牛生锋<sup>1</sup>, 刘占斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山东省路桥集团有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东省交通科学研究院, 山东 济南

收稿日期: 2022年1月18日; 录用日期: 2022年2月7日; 发布日期: 2022年2月16日

## 摘要

研究通过在基质沥青中加入岩沥青、硅烷偶联剂对沥青进行改性, 并对70-A道路石油沥青、0.3%硅烷偶联剂改性沥青、5%岩改沥青、偶岩复合改性沥青(0.3%硅烷偶联剂 + 5%青川岩沥青复合改性沥青)的常规性能指标、流变性能指标及其与花岗岩沥青的黏附性能进行试验, 分析了几种沥青的高低温性能及其应用于花岗岩沥青混合料的可行性。结果表明, 偶岩复合改性沥青可以有效改善沥青的高温性能和低温性能及其与花岗岩集料的黏附性能。

## 关键词

偶岩复合改性沥青, 岩沥青, 硅烷偶联剂, 流变性能, 黏附性

# Study on Properties of Asphalt Based on Composite Modification of Rock Asphalt and Silane Coupling Agent

Wenhu Zhang<sup>1</sup>, Yongfu Yang<sup>2</sup>, Shengfeng Niu<sup>1</sup>, Zhanbin Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shandong Highway Bridge Group, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

Received: Jan. 18<sup>th</sup>, 2022; accepted: Feb. 7<sup>th</sup>, 2022; published: Feb. 16<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The asphalt was modified by adding rock asphalt and silane coupling agent into the base asphalt,

文章引用: 张文虎, 杨永富, 牛生锋, 刘占斌. 基于岩沥青与硅烷偶联剂复合改性的沥青性能研究[J]. 材料科学, 2022, 12(2): 69-78. DOI: 10.12677/ms.2022.122007

and the conventional performance indexes of 70-a road petroleum asphalt, 0.3% silane coupling agent modified asphalt, 5% rock modified asphalt and even rock composite modified asphalt (0.3% silane coupling agent + 5% Qingchuanyan asphalt composite modified asphalt) were studied. The rheological property index and its adhesion to granite asphalt are tested, and the high and low temperature properties of several asphalt and the feasibility of applying them to granite asphalt mixture are analyzed. The results show that the dual rock composite modified asphalt can effectively improve the high-temperature and low-temperature properties of asphalt and its adhesion to granite aggregate.

## Keywords

Dual Rock Composite Modified Asphalt, Rock Asphalt, Silane Coupling Agent, Rheological Properties, Adhesion

Copyright © 2022 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

硅烷偶联剂作为沥青抗剥落剂的一种，加入硅烷偶联剂的沥青具有较好的水稳定性能，这种改善效果的耐久性有待提升。而采用岩沥青改性的沥青由于其含氮量的提升，明显改善了沥青与集料的黏附性能，且高温性能和耐久性均较好，但由于岩沥青的脆性，使其改性的沥青的低温性能较差。美国联邦公路局指出岩沥青和硅烷偶联剂混合使用产生叠加效应，会产生互补效果[1]。为验证硅烷偶联剂和岩沥青复合使用对沥青的改善程度，研究通过青川岩沥青和硅烷偶联剂配制复合改性沥青，并对 70-A 道路石油沥青、0.3%硅烷偶联剂改性沥青、5%岩改沥青及偶岩复合改性沥青(0.3%硅烷偶联剂 + 5%青川岩沥青复合改性沥青)进行对比研究，通过常规沥青性能试验、SHRP 沥青流变性能试验及其与花岗岩集料的黏附性试验，对比研究各种方案改性沥青性能，分析偶岩复合改性沥青较单一改性方案改性沥青的改善效果。

## 2. 试验方法

### 2.1. 原材料

#### 1) 基质沥青

研究采用齐鲁石化生产的 70-A 道路石油沥青，根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)测定了沥青的相关性能指标，如针入度(25℃)、延度(10℃和 15℃)、软化点、密度(15℃)和短期老化后的指标；各项性能指标的检测结果显示见表 1。

Table 1. Technical indexes of base asphalt

表 1. 基质沥青技术指标

指标	单位	检测结果	技术要求	试验方法
针入度(25℃, 5 s, 100 g)	0.1 mm	72	60~80	T0604
针入度指数 PI	/	-0.81	-1.5~+1.0	T0604
软化点(R & B)	℃	47.5	≤46	T0606

Continued

10℃延度	cm	38	≤20	T0605
15℃延度	cm	>150	≤100	T0605
蜡含量(蒸馏法)	%	5.0	≥2.2	T0615
闪点	℃	290	≤260	T0611
溶解度	%	99.8	≤99.5	T0607
密度(15℃)	g/cm <sup>3</sup>	1.031	实测记录	0603
TFOT 后				
质量变化	%	-0.1	≥±0.8	T0609
残留针入度比	%	70	≤61	T0609
残留延度(10℃)	cm	17	≤6	T0604
残留延度(15℃)	cm	49.9	≤15	T0604

## 2) 岩沥青

岩沥青是一种天然沥青，黑色固体，与基质沥青有相似的成分，且掺配到基质沥青中属于石油基与石油基的混溶。岩沥青本身的软化点较高，经过青川岩沥青改性后的沥青中的沥青质增加，有利于提高沥青的高温性能。依据山东省地方标准《岩沥青路用技术要求》(DB37/T-25-2014)的要求进行了青川岩沥青性能检测，青川岩沥青的性能指标见表 2。

**Table 2.** Technical performance of qingchuanyan asphalt

**表 2.** 青川岩沥青技术性能

指标	单位	检测结果	试验方法
产品外观	—	黑褐色	目测
灰分	%	9.6	按照 JTG E20 中 T0614
密度(25℃)	g/cm <sup>3</sup>	1.201	按照 JTG E20 中 T0603
含水量	%	1.03	按照 JTG E20 中 T0612

## 3) 硅烷偶联剂

选用山东淄博生产的硅烷偶联剂，规格型号为 KH-550，呈碱性，为棕黄色透明液体，分子量为 220，密度为 0.942g/cm<sup>3</sup>，沸点为 215℃，可溶于有机溶剂，但丙酮、四氯化碳不宜作为稀释剂，在水中水解，呈碱性，聚合形成硅氧烷，与沥青有较好的相容性，对提高沥青和集料的粘附性起到了重要的作用。

## 2.2. 沥青改性方案

项目为对比分析硅烷偶联剂与岩沥青双重作用对基质沥青性能的影响，分别选用基质沥青和 3 种改性沥青方案[2]，包括 0.3%硅烷偶联剂改性沥青、5%岩沥青改性沥青、0.3%硅烷偶联剂 + 5%岩沥青复合改性沥青(以下简称偶岩复合改性沥青)。

## 2.3. 试验方法

研究对 4 种方案沥青分别进行了针入度、软化点、延度、135℃布氏粘度、沥青流变性质试验(DSR)、沥青弯曲蠕变劲度试验(BBR)及与花岗岩集料的黏附性，并对试验结果进行分析。

沥青动态剪切流变试验(DSR)是参照美国 AASHTO T 315-09 的试验方法, 结合国内多年来的使用情况设计的用以评价沥青的高温性能和疲劳性能的方法, 所采用仪器为动态剪切流变仪, 主要对原样沥青和不同老化程度的沥青进行动态剪切试验, 以获得沥青的车辙因子( $G^*/\sin\delta$ )和疲劳因子( $G^*\sin\delta$ ), 用以评价沥青的高温性能和疲劳性能[3]。试验结果要求见表 3。

**Table 3.** Requirements for dynamic shear rheological test results  
**表 3.** 动态剪切流变试验结果要求

检测指标	单位	技术要求
$G^*/\sin\delta$	kPa	$\geq 1.0$
RTFOT 后 $G^*/\sin\delta$	kPa	$\geq 2.2$
PAV 后 $G^*\sin\delta$	kPa	$\leq 5000$

沥青弯曲蠕变劲度试验(BBR)是参考 ASTM D 6648-01 和 AASHTO T 313-09 的方法, 结合国内使用情况制订的一种测试沥青低温流变性质的试验方法, 主要测定沥青的动态剪切模量和相位角[4], 用以评价沥青抵抗低温收缩开裂的性能, 一般要求在最低路面设计温度以上  $10^\circ\text{C}$  时, 60 秒对应的蠕变劲度  $S \leq 300$  kPa, 蠕变速率  $m \geq 0.3$  [5]。

### 3. 试验结果

#### 3.1. 沥青常规性能

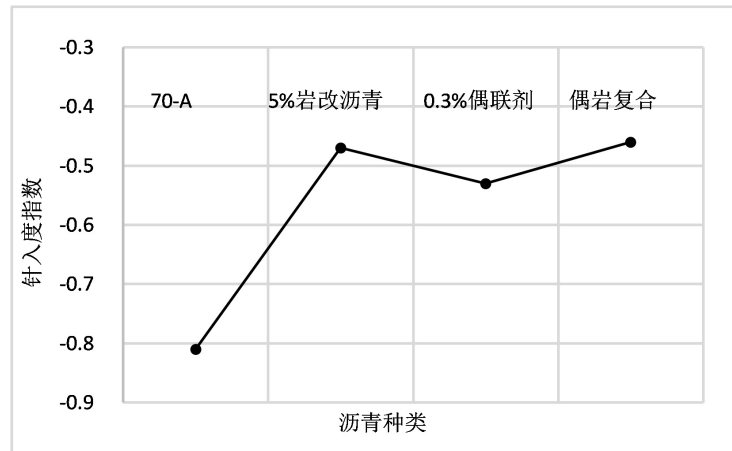
根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)对 70-A、0.3%硅烷偶联剂改性沥青、5%岩改沥青及偶岩复合改性沥青进行沥青相关试验, 试验结果见表 4。

**Table 4.** Routine performance test results of asphalt of various schemes  
**表 4.** 各种方案沥青常规性能试验结果

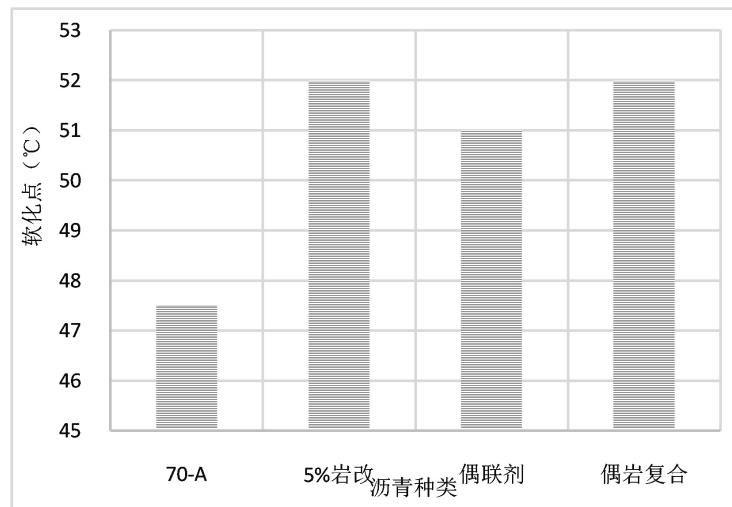
指标	70-A	5%岩改	0.3%硅烷偶联剂	偶岩复合改性沥青	
15℃针入度(0.1 mm)	24	20	25	22	
25℃针入度(0.1 mm)	72	52	70	54	
30℃针入度(0.1 mm)	113	89	111	99	
针入度指数	-0.81	-0.47	-0.53	-0.46	
软化点( $^\circ\text{C}$ )	47.5	52	51	52	
延度(cm)	10℃	38	10	40	20
	15℃	>100	32	>100	>100
135℃布氏粘度(Pa·s)	0.3	0.91	0.5	0.7	

由表 4 可以看出, 各种改性沥青的针入度较基质沥青减小, 说明改性沥青的抗变形能力有所提高; 偶岩复合改性沥青的延度比基质沥青的小却比 5%岩改沥青的大, 说明偶岩复合改性沥青中硅烷偶联剂弥补了青川岩沥青低温差的缺点。

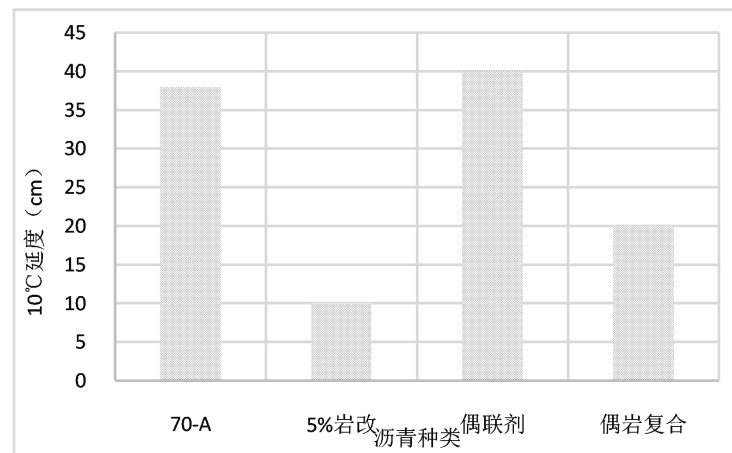
由图 1 可以看出, 基质沥青的针入度指数最小, 温度敏感性最差; 岩改沥青与硅烷偶联剂改性沥青的温度敏感性比基质沥青增大, 温度敏感性降低。



**Figure 1.** Penetration index of each modified asphalt  
**图 1.** 各改性沥青针入度指数



**Figure 2.** Softening point of each modified asphalt  
**图 2.** 各改性沥青软化点



**Figure 3.** ductility at 10°C  
**图 3.** 10°C延度

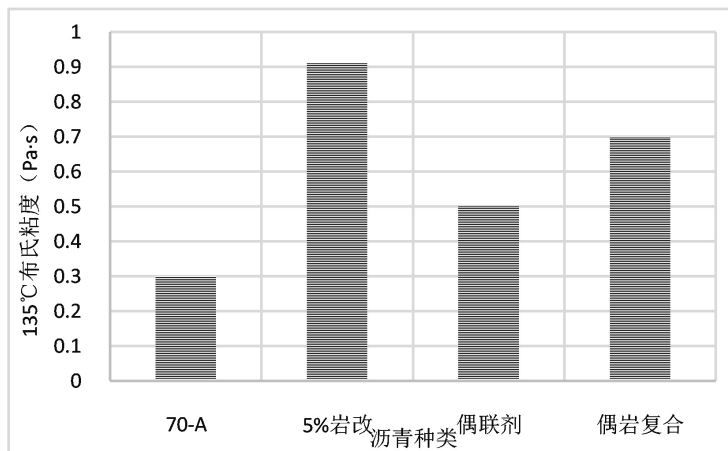


Figure 4. Brinell viscosity at 135°C

图 4. 135°C布氏粘度

由图 2 可以看出软化点性能优劣的排序: 岩改沥青 > 偶岩复合改性沥青 > 偶联剂改性沥青 > 基质沥青。

由图 3 可以看出, 偶岩复合改性沥青的延度介于硅烷偶联剂和岩改沥青之间, 说明硅烷偶联剂的介入改善了岩沥青低温性能差的缺点。

由图 4 得出各种沥青的 135°C 布氏粘度均小于 3 Pa·s, 而且岩改沥青、硅烷偶联剂改性沥青及偶岩复合改性沥青的布氏粘度又远大于基质沥青, 说明它们不仅有较高的高温性能, 而且有较高的粘度和良好的施工和易性。综合上述性能指标, 偶岩复合改性沥青的性能最优。

### 3.2. 沥青流变性能试验结果

#### 3.2.1. 沥青动态剪切模量

根据 AASHTOT315-06 对 70-A 道路石油沥青、0.3%硅烷偶联剂改性沥青、5%岩改沥青及偶岩复合改性沥青进行动态剪切流变试验和弯曲蠕变劲度试验, 试验结果分别见表 5 所示。

Table 5. DSR test results of asphalt

表 5. 沥青 DSR 试验结果

指标	70-A	5%青川岩沥青	0.3%硅烷偶联剂	偶岩复合改性沥青
G*(KPa)	64°C	1.629	2.489	2.742
	70°C	0.786	1.146	1.263
	76°C	-	0.576	0.626
	82°C	-	-	-
δ(°)	64°C	87.07	86.36	86.05
	70°C	88.1	87.55	87.21
	76°C	-	88.37	88.06
	82°C	-	-	-
G*/sinδ (KPa)	64°C	1.631	2.494	2.749
	70°C	0.787	1.147	1.264
	76°C	-	0.577	0.626
	82°C	-	-	-
PG 高温等级(°C)	64	70	70	70

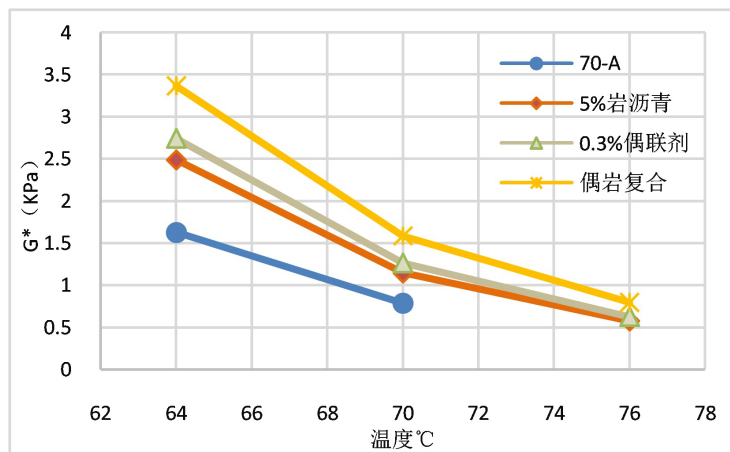


Figure 5. Complex modulus of each modified asphalt  
图 5. 各改性沥青复数模量

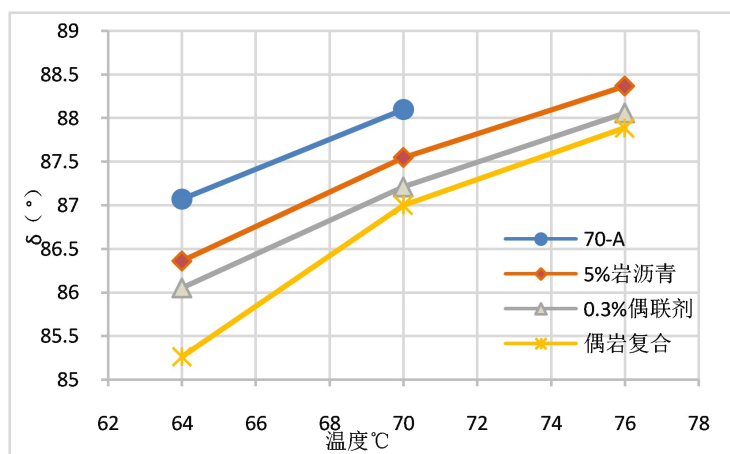


Figure 6. Phase angle of each asphalt  
图 6. 各沥青相位角

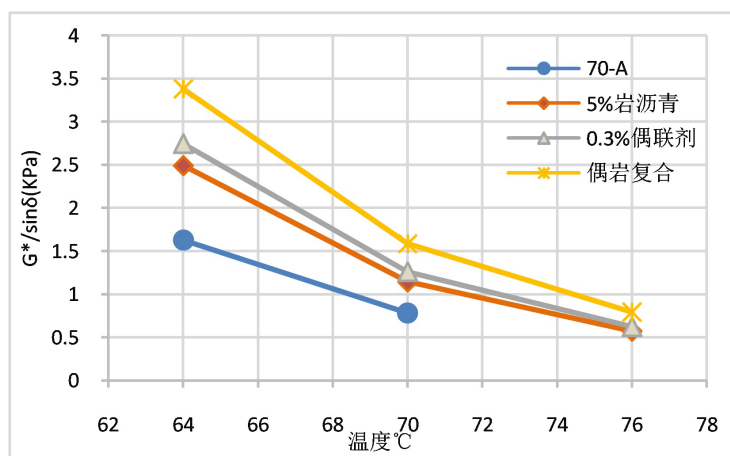


Figure 7. Rutting factors of modified asphalt  
图 7. 各改性沥青车辙因子

由表 5、图 5 和图 6 可以看出，在同一温度下，与基质沥青相比较，5%岩改沥青、0.3%硅烷偶联剂

改性沥青、偶岩复合改性沥青的复数模量  $G^*$  逐渐增大, 说明改性沥青具有较强的抗变形能力, 其中偶岩复合改性沥青比硅烷偶联剂改性沥青和岩改沥青的复数模量都高, 说明岩沥青和硅烷偶联剂复合叠加产生正效应;

同一温度下, 改性沥青的相位角较小, 说明该温度下基质沥青改性后表现出较强的弹性, 在相同的承载力条件下, 相位角越小, 越不容易发生塑性变形, 抗车辙能力越高。

由图 7 得出, 4 种沥青随温度增加车辙因子都呈现递减的趋势, 各种改性沥青的  $G^*/\sin\delta$  车辙因子均比基质沥青的大, 说明上述几种抗剥落措施均具有较强的高温性能。复数模量和车辙因子排序为: 偶岩复合改性沥青 > 0.3%硅烷偶联剂改性沥青 > 5%岩改沥青 > 基质沥青。

### 3.2.2. 低温弯曲流变试验

根据 AASHTOT313-09 对 70-A 道路石油沥青、0.3%硅烷偶联剂改性沥青、5%岩改沥青及偶岩复合改性沥青进行低温弯曲流变试验, 试验结果分别见表 6 及图 8、图 9 所示。

Table 6. Low temperature bending rheological (BBR) test results

表 6. 低温弯曲流变(BBR)试验结果

指标	70-A	5%岩改	0.3%硅烷偶联剂	偶岩复合改性沥青
S(MPa)	-18℃	356	420	370
	-12℃	154	226.5	206.5
	-6℃	79.5	93.7	83.7
	0℃	35.9	43.7	41.7
m	-18℃	0.248	0.224	0.244
	-12℃	0.328	0.320	0.330
	-6℃	0.382	0.370	0.380
	0℃	0.438	0.432	0.439
PG 低温等级(℃)	22	22	22	22

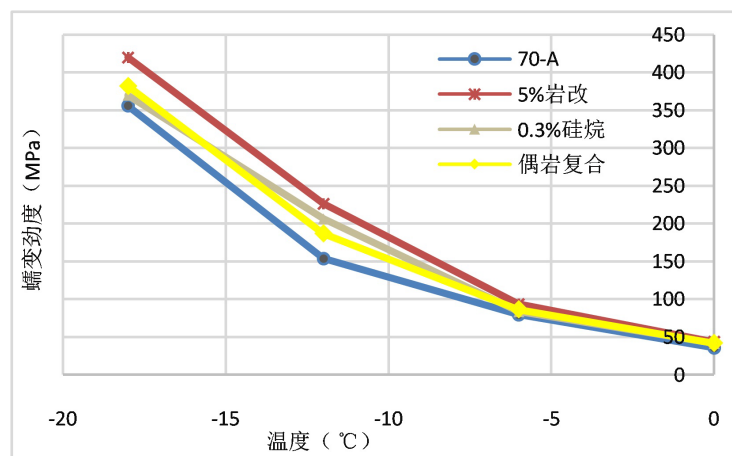


Figure 8. Creep stiffness of each modified asphalt

图 8. 各改性沥青的蠕变劲度



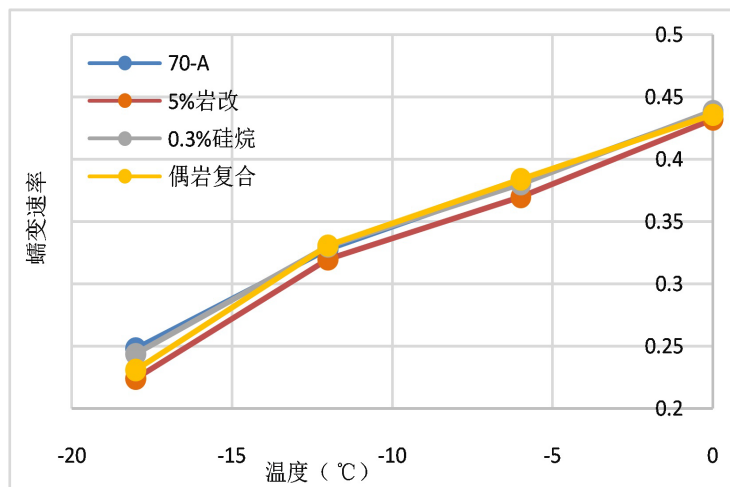


Figure 9. Creep rate of each modified asphalt  
图 9. 各改性沥青的蠕变速率

由表 6、图 8 及图 9 可以得出，相同温度条件下，基质沥青的蠕变劲度最小，岩改沥青的蠕变劲度最大，说明青川岩沥青使基质沥青的脆性加大；蠕变劲度的排序为硅烷偶联剂改性沥青 < 偶岩复合改性沥青 < 岩改沥青，说明硅烷偶联剂的加入弥补了青川岩沥青的低温抗裂性差的缺点。偶岩复合改性沥青中由于硅烷偶联剂的加入使其低温流变性比岩改沥青有所提高。

### 3.3. 不同类型沥青与花岗岩集料的黏附性

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)对 70-A、0.3%硅烷偶联剂改性沥青、5%岩改沥青、偶岩复合改性沥青采用延时水浸法进行沥青与集料黏附性试验，对比分析其抗剥落性能[6][7][8]。试验结果见表 7 和图 10。

Table 7. Adhesion test results of asphalt and aggregate  
表 7. 沥青与集料黏附性试验结果

水浸时间(h)	70-A		5%岩改沥青		0.3%硅烷偶联剂		偶岩复合改性沥青	
	剥落面积(%)	黏附等级	剥落面积(%)	黏附等级	剥落面积(%)	黏附等级	剥落面积(%)	黏附等级
0.5	30	三	0	五	0	五	0	五
1	45	二	0	五	0	五	0	五
1.5	62	一	8	四	4	四	0	五

通过表 7 和图 10 可以得出，随着水浸时间的延长，各沥青的剥落面积逐渐增加，花岗岩集料与沥青的黏附性有所降低，其中 70-A 基质沥青浸水 0.5 h 时与沥青的黏附性为 3 级，不满足规范要求，而且随着水浸时间的增加黏附等级逐渐降低说明基质沥青的较软，耐久性较差[7]；5%岩改沥青、0.3%硅烷偶联剂浸水 1 h 时黏附性等级为 5 级，而浸水 1.5 h 后均降为 4 级，而偶岩复合改性沥青在经过 1.5 h 浸水后与花岗岩的黏附性仍可达到 5 级，说明偶岩复合改性沥青发挥了岩沥青与硅烷偶联剂的双重效果，与花岗岩集料黏附性能优异，可以达到了多雨潮湿地区对沥青黏附性等级的要求。

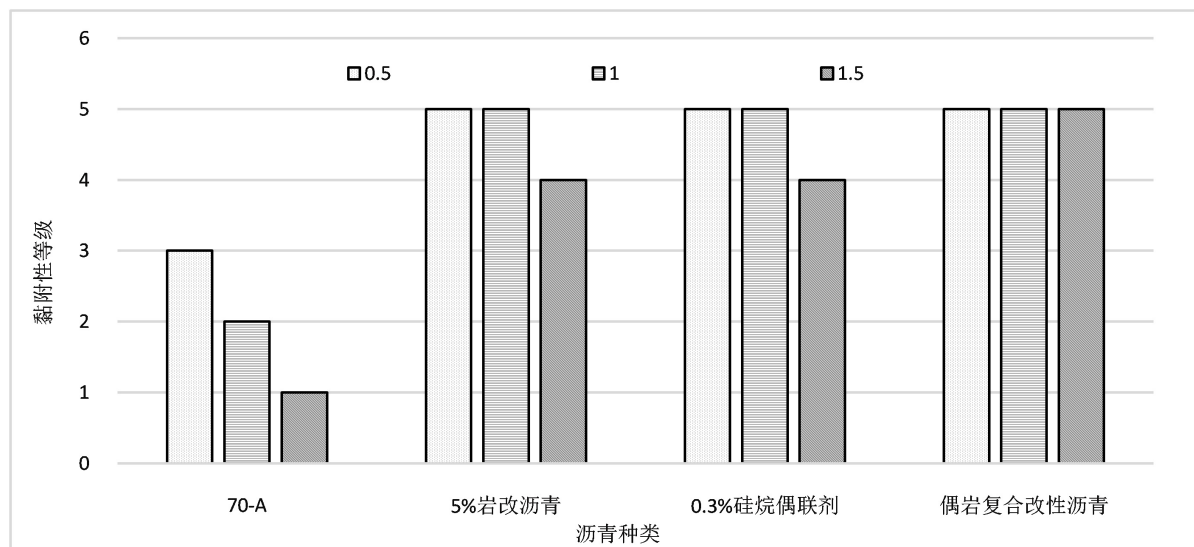


Figure 10. Adhesion grade of each modified asphalt cloth  
图 10. 各改性沥青布的黏附性等级

#### 4. 小结

通过对 70-A 道路石油沥青、0.3%硅烷偶联剂改性沥青、5%岩改沥青及偶岩复合改性沥青的常规性能、流变性能及其与花岗岩集料的黏附性能研究，可以得出以下结论：

1) 偶岩复合改性沥青不仅具有较高的的高温性能，温度敏感性较低，且具有较高的粘度和良好的施工和易性。

2) 偶岩复合改性沥青不仅具有较高的的高温抗车辙能力，还具有一定的低温抗裂性。沥青的流变性能较真实的体现出路面设计时需求的性能，高低温性能与常规试验发展规律一致[9]，流变性能在温度梯度变化中性能增减速率较直观，综合多种改性沥青的常规指标与流变性能指标，偶岩复合改性沥青体现了较好的高低温性能。

3) 偶岩复合改性沥青与花岗岩具有较优异的黏附性能，有利于花岗岩在沥青路面中的推广应用。

#### 参考文献

- [1] 孔珍珍, 张亚曼, 张爱勤. 花岗岩矿粉填料对沥青混凝土水稳性的影响[J]. 中外公路, 2014, 34(5): 287-290.
- [2] 黄文通. 北美岩沥青及其混合料特性研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [3] 孔祥利. 岩沥青改性 70#沥青混凝土应用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [4] 高畅, 冯德成. 花岗岩沥青混合料的路用性能研究[J]. 公路, 2008(10): 161-166.
- [5] 魏颖. 改性沥青及其流变学性能研究[J]. 福建交通科技, 2018(4): 18-20+55.
- [6] 郭娟, 王立辉. 高 RAP 掺量热再生沥青混合料动态流变性能研究[J]. 公路, 2018, 63(9): 242-248.
- [7] Liu, Z.H., Li, X., Wang, L. and Kang, R.L. (2017) Performance of Granite Asphalt Mixture Modified by Silane Coupling Agent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **216**, Article No. 012029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/216/1/012029>
- [8] 王富强, 阳利君, 莫晶疆. 提高花岗岩沥青混合料水稳定性试验研究[J]. 公路, 2020, 65(11): 328-330.
- [9] 金吉海, 陈松, 韩凌, 李福起. 硬质沥青高温流变性能及常规性能研究[J]. 石化技术与应用, 2018, 36(1): 14-16.