

基于MIST试验的花岗岩沥青混合料水损坏敏感性研究

杨永富¹, 宋伟伟², 韦金城¹, 庄传仪³

¹山东省交通科学研究院, 山东 济南

²山东高速集团有限公司环济分公司, 山东 济南

³山东交通学院, 山东 济南

收稿日期: 2022年1月4日; 录用日期: 2022年1月20日; 发布日期: 2022年1月27日

摘要

为评价MIST水损坏敏感性试验分析花岗岩沥青混合料的抗水损坏性能, 基于AC-10沥青混合料和AC-16沥青混合料, 评价6种抗剥落措施的路用性能改善效果。结果表明基于MIST水损坏敏感性试验的评价条件更加苛刻, 更能真实反应不同抗剥落措施对花岗岩沥青混合料在实际应用环境中抗水损坏的能力, 为花岗岩沥青混合料抗水损能力的评价提供有力支撑。

关键词

花岗岩, 沥青混合料, 抗剥落措施, 水损坏敏感性, 抗水损性能

Study on Water Damage Sensitivity of Granite Asphalt Mixture Based on MIST Test

Yongfu Yang¹, Weiwei Song², Jincheng Wei¹, Chuanyi Zhuang³

¹Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

²Shandong Expressway Group Huanji Branch, Jinan Shandong

³Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

Received: Jan. 4th, 2022; accepted: Jan. 20th, 2022; published: Jan. 27th, 2022

Abstract

In order to evaluate the water damage sensitivity of MIST test and analyze the water damage resistance of granite asphalt mixture, the road performance improvement effects of six anti spalling

measures are evaluated based on AC-10 asphalt mixture and AC-16 asphalt mixture. The results show that the evaluation conditions based on MIST water damage sensitivity test are more stringent, which can more truly reflect the water damage resistance of granite asphalt mixture under different anti stripping measures, and provide strong support for the evaluation of water damage resistance of granite asphalt mixture.

Keywords

Granite, Asphalt Mixture, Anti Spalling Measures, Water Damage Sensitivity, Water Loss Resistance

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. 引言

近年来,随着国家对基础设施建设投入的不断加大和大家环保意识的不断增强,应用于沥青混合料的优异碱性集料开采量越来越少,随之价格也在不断攀升,导致路面造价持续上涨。与此同时,我国储量丰富的花岗岩,却因为其与沥青的粘附性较差,存在水稳定性不足等问题,严重制约了花岗岩在沥青路面上的应用与推广,但花岗岩具有力学强度高、耐磨性能好、耐疲劳性强等优点,因此解决花岗岩沥青混合料的抗水损坏性能,对我国公路建设及新旧动能转换有着重大意义和价值。

随着广大道路工作者的不断深入研究,在通常的石灰水预处理集料、石灰粉代替部分矿粉、氨类抗剥落剂等改善花岗岩与沥青的粘附性及沥青混合料的水稳定性的基础上,还研究出了偶联剂、联结剂、青川岩沥青等措施,用以提高花岗岩沥青混合料的抗水损坏能力。本研究基于 MIST 试验,采用 6 种抗剥落措施,分别对花岗岩 AC-10、花岗岩 AC-16 两种沥青混合料的水损坏敏感性进行了研究。

2. 基础沥青混合料设计与试验检测方案

2.1. 原材料

2.1.1. 沥青

基础沥青混合料试验使用的沥青为 70 号 A 级道路石油沥青和成品 SBS 改性沥青,根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》JTG E20-2011 对沥青的相关性能进行检测,试验结果见表 1 和表 2,均满足规范技术要求。

Table 1. Technical index of 70-A road petroleum asphalt

表 1. 70-A 道路石油沥青技术指标

试验项目	针入度 (25°C, 100 g, 5 s) /0.1 mm	针入度指数	软化点 /°C	15°C 延度 /cm	沥青密度 (15°C)/ (g·cm ⁻³)	TFOT		
						残留 25°C 针入度比/%	延度 (10°C)/cm	质量变化 /%
试验结果	66	0.44	46.5	163	0.991	68	12	-0.13
技术要求	60~80	-1.8~+1.0	≥44	≥100	试验结果	≥58	≥4	-0.8~+0.8

Table 2. Technical indexes of finished SBS modified asphalt
表 2. 成品 SBS 改性沥青技术指标

试验项目	针入度 (25℃, 100 g, 5 s)/ 0.1 mm	针入度指 数	软化 点/℃	5℃延度 /cm	TFOT		
					残留 25℃针 入度比/%	延度(5℃)/cm	质量变化/%
试验结果	41	0.32	93	24.3	85	12	-0.071
技术要求	40~60	≥0	≥60	≥20	≥65	≥4	-0.8~+0.8

2.1.2. 集料

花岗岩粗集料规格为 10~20 mm、10~15 mm、5~10 mm 和 3~5 mm，细集料选用机制砂(0~3 mm)，填料选用矿粉和消石灰粉，其技术指标分别见表 3~6。

Table 3. Technical indexes of coarse aggregate
表 3. 粗集料技术指标

指标	检测结果	技术要求
集料压碎值/%	18.8	不大于 26
表观相对密度	3~5	2.712
	5~10	2.642
	10~15	2.621
	10~20	2.630
吸水率/%	1.8	不大于 2.0
对沥青的粘附性	2	不小于 4 级
针片状颗粒含量/%	9	不大于 15
水洗法 < 0.075 mm 颗粒含量/%	0.4	不大于 1
软石含量/%	1.2	不大于 3
磨耗值(洛杉矶法)%	19	不大于 28

Table 4. Technical indexes of fine aggregate
表 4. 细集料技术指标

指标	检测结果	技术要求	试验方法
表观相对密度	2.658	不小于 2.50	T 0328
含泥量(小于 0.075 mm 的含量) %	1	不大于 3	T 0333
砂当量/%	87	不小于 60	T 0334
亚甲基蓝值/(g·kg ⁻¹)	15	不大于 25	T 0349

Table 5. Technical indexes of mineral powder
表 5. 矿粉技术指标

试验项目	表观密度	含水量/%	粒度范围/%		
			<0.6 mm	<0.15 mm	<0.075 mm
试验结果	2.632	0.68	100	95.8	86.4
技术要求	≥2.5	≤1.0	100	90~100	75~100

Table 6. Technical indexes of hydrated lime powder
表 6. 消石灰粉技术指标

指标	技术要求	检测结果
表观密度	≥ 2.5	2.612
粒度范围/%	<0.6 mm	100~100
	<0.15 mm	90~100
	<0.075 mm	85~100
含水量/%	≤ 1	0.4
亲水系数	≤ 1	0.4
塑性指数	≤ 4	2.8
外观	无团粒结块	无团粒结块

由表 3~6 可知, 所选择的集料和填料技术指标均满足现行规范要求。

2.2. 矿料级配

研究以上面层 AC-10 和下面层 AC-16 沥青混合料为基础。AC-10 的设计级配为花岗岩 5~10:3~5:0~3:矿粉 = 44:12:40:4, AC-16 的设计级配为花岗岩 10~16:5~10:3~5:0~3 mm:矿粉 = 22:40:7:27:4, 混合料级配组成见表 7、表 8 和图 1、图 2。

Table 7. AC-10 mineral aggregate gradation
表 7. AC-10 矿料级配表

名称	通过下列筛孔(mm)的质量百分率(%)								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
集料 5~10	100.0	91.4	6.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.1	1.0
集料 3~5	100.0	100.0	80.5	6.7	3.0	2.2	2.0	1.8	1.6
机制砂 0~3	100.0	100.0	100.0	80.8	63.8	50.3	34.5	18.9	8.2
矿粉	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	98.0	85.0	67.7
设计级配	100.0	96.2	56.5	37.7	30.4	24.9	18.5	11.7	6.6
级配中值	100	95	60	44	32	22.5	16	11	6
规范要求	100	90~100	45~67	30~58	20~44	12~32	9~23	6~16	5~8

Table 8. AC-16 mineral aggregate gradation
表 8. AC-16 矿料级配表

筛孔/mm	筛孔通过率(%)					设计级配 (%)	级配中值	规范要求
	碎石	碎石	碎石	碎石	矿粉			
	10~16 mm	5~10 mm	3~5 mm	0~3 mm				
19	100	100	100	100	100	100	100	100
16	55.2	100	100	100	100	97.6	95	90~100
13.2	26.3	100	100	100	100	88.9	84	76~92
9.5	3.9	91.4	100	100	100	69.8	70	60~80
4.75	0.6	6.4	80.5	100	100	41.6	48	34~62
2.36	0.6	1.4	6.7	80.8	100	27.1	34	20~48

Continued

1.18	0.5	1.2	3	63.8	100	19.4	24.5	13~36
0.6	0.5	1.2	2.2	50.3	99.7	14.5	17.5	9~26
0.3	0.5	1.2	2	34.5	98	11.1	12.5	7~18
0.15	0.5	1.1	1.8	18.9	85	8.7	9.5	5~14
0.075	0.4	1	1.6	8.2	67.7	7.1	6	4~8
设计级配	22%	40%	7%	27%	4%	-	-	-

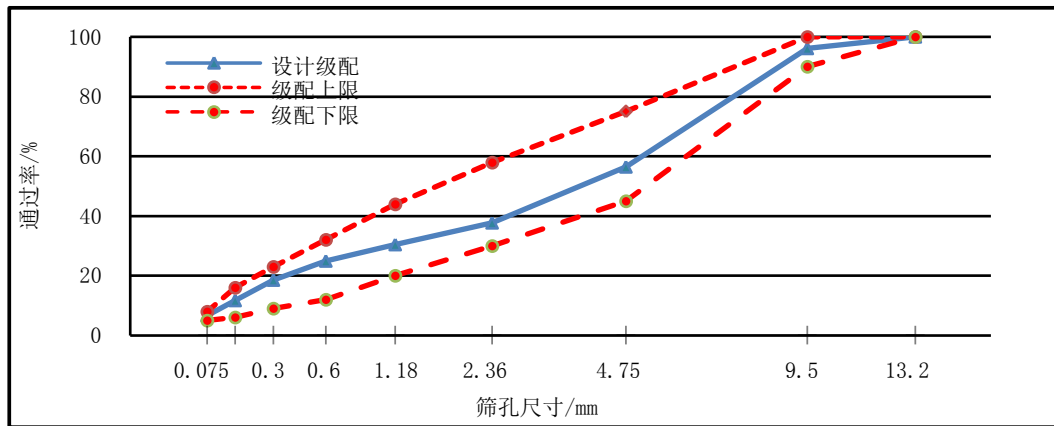


Figure 1. AC-10 mixture grading curve

图 1. AC-10 混合料级配曲线

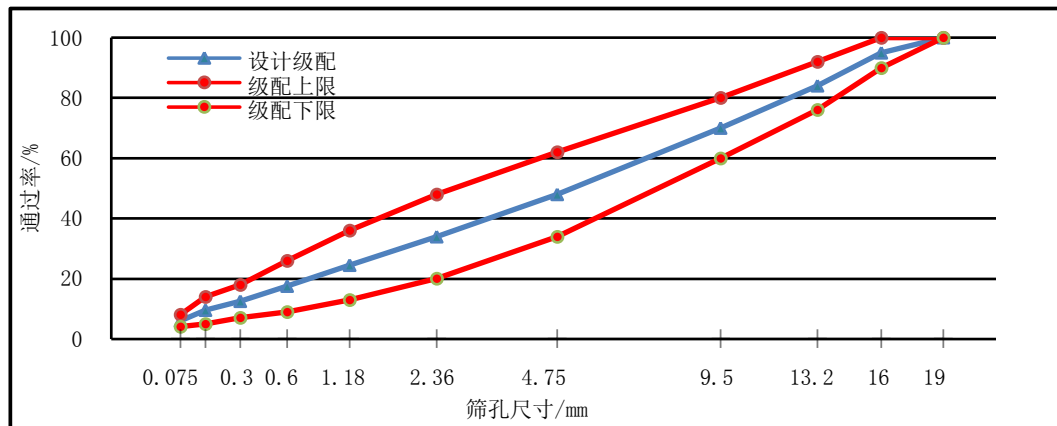


Figure 2. AC-16 mixture grading curve

图 2. AC-16 混合料级配曲线

选取表 7 和表 8 以及图 1 和图 2 确定的沥青混合料分别为 AC-10 和 AC-16 沥青混合料的最优矿料级配，进一步进行最佳油石比的确定。

2.3. 最佳油石比

依据 JTGF40-2004《公路沥青路面施工技术规范》，同时结合研究人员多年工程实践经验，采用马歇尔击实方法分别成型 5 组不同油石比的标准马歇尔试件，结合经验与规范公式计算得到 AC-10 预估油石比为 5.3% [1] [2] [3]，以预估油石比为中值，又选取油石比 4.3%、4.8%、5.3%、5.8%、6.3%；对于混

合料 AC-16, 预估油石比为 4.4%, 按 0.4% 间隔变化, 取 3.6%、4.0%、4.4%、4.8%、5.2%、5.6% 六个不同的油石比。花岗岩沥青混合料 AC-10 和 AC-16 成型的马歇尔试件的体积指标和力学指标试验结果见表 9、表 10 和图 3~6。

Table 9. Test results of AC-10 optimum asphalt aggregate ratio

表 9. AC-10 最佳油石比试验结果

油石比(%)	毛体积 相对密度	空隙率 VV (%)	矿料间隙率 VMA (%)	沥青饱和度 VFA (%)	稳定度 MS (KN)	流值 FL (mm)
4.3	2.287	8.21	15.74	47.87	12.9	2.8
4.8	2.311	6.52	15.30	57.39	15.7	3.5
5.3	2.329	4.25	15.12	71.92	15.4	3.1
5.8	2.380	3.02	13.7	77.8	14.4	4.4
6.3	2.360	2.95	14.90	82.0	13.9	4.3
技术要求		4~6	≥15	65~75	≥8	1.5~4

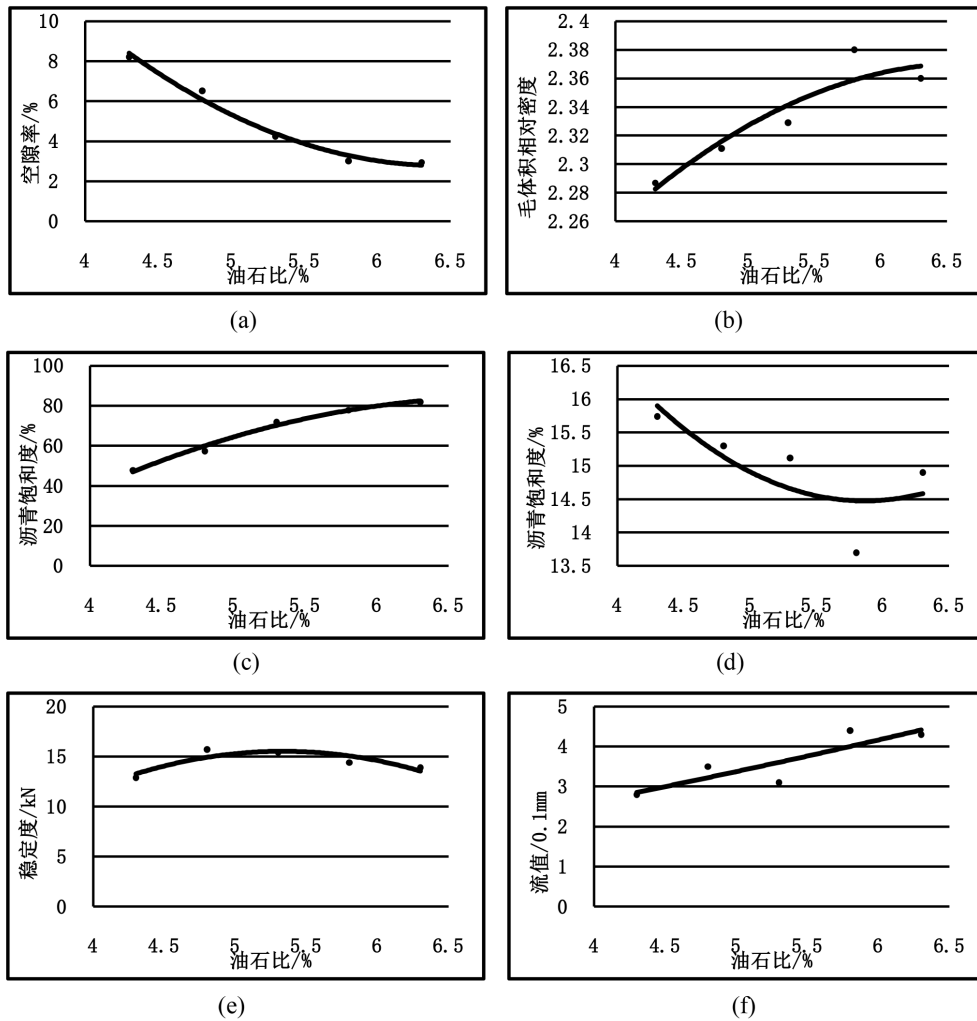


Figure 3. Marshall test results of AC-10 graded mixture with different asphalt content

图 3. AC-10 级配不同沥青用量混合料马歇尔试验结果

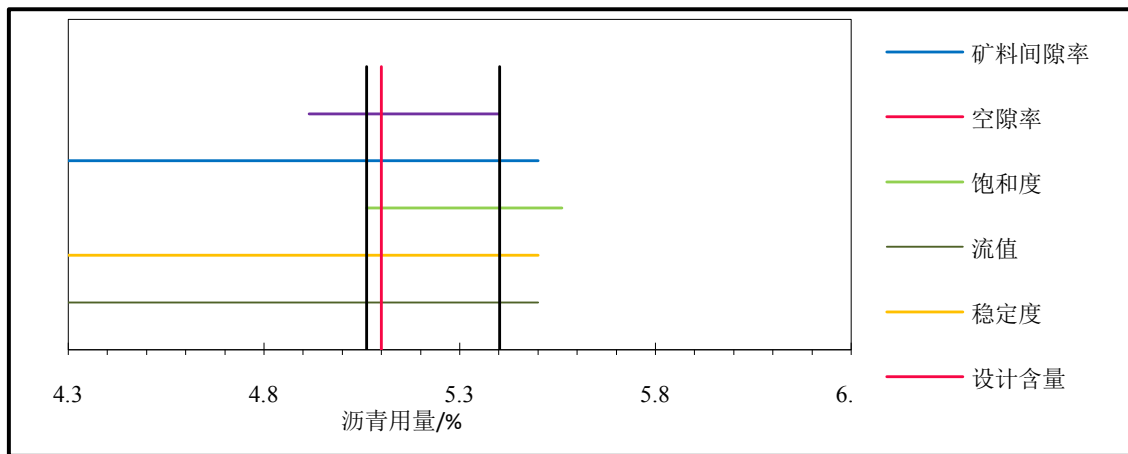
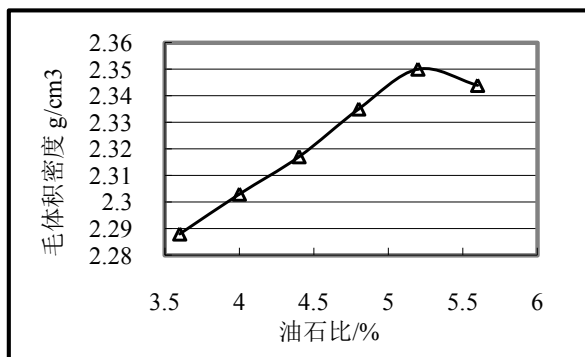


Figure 4. Determination of optimum oil stone ratio
图 4. 最佳油石比的确定

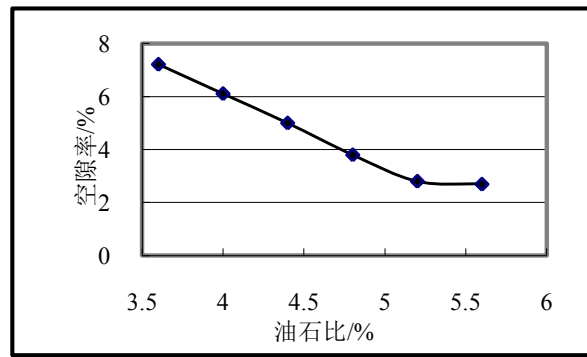
由表 9 及图 4 和图 5 得 $OAC_{min} = 5.1\%$ 、 $OAC_{max} = 5.4\%$ ，由图 3 和图 4 可以看出所选试验的沥青用量范围内，密度和稳定度没有出现峰值，所以取空隙率中值 a_3 作为 OAC_1 ， $OAC_1 = 5.0\%$ ， $OAC_2 = (OAC_{min} + OAC_{max})/2 = 5.2\%$ ， $OAC = (OAC_1 + OAC_2)/2 = 5.1\%$ ，综上分析确定基质沥青下 AC-10 油石比为 5.1%。

Table 10. Test results of AC-16 optimum asphalt aggregate ratio
表 10. AC-16 最佳油石比试验结果

油石比(%)	毛体积 相对密度	空隙率 VV (%)	矿料间隙率 VMA (%)	沥青饱和度 VFA (%)	稳定度 MS (KN)	流值 FL (mm)
3.6	2.288	7.2	15.4	53.2	13.3	2.59
4	2.304	6.1	15.2	59.9	13.92	2.74
4.4	2.315	5.2	15.1	65.6	14.94	2.84
4.8	2.335	3.8	14.7	74.1	15.8	3.24
5.2	2.35	2.8	14.4	80.6	14.64	3.79
5.6	2.344	2.7	15	82	12.97	4.18
技术要求		4~6	≥ 15	65~75	≥ 8	1.5~4



(a)



(b)

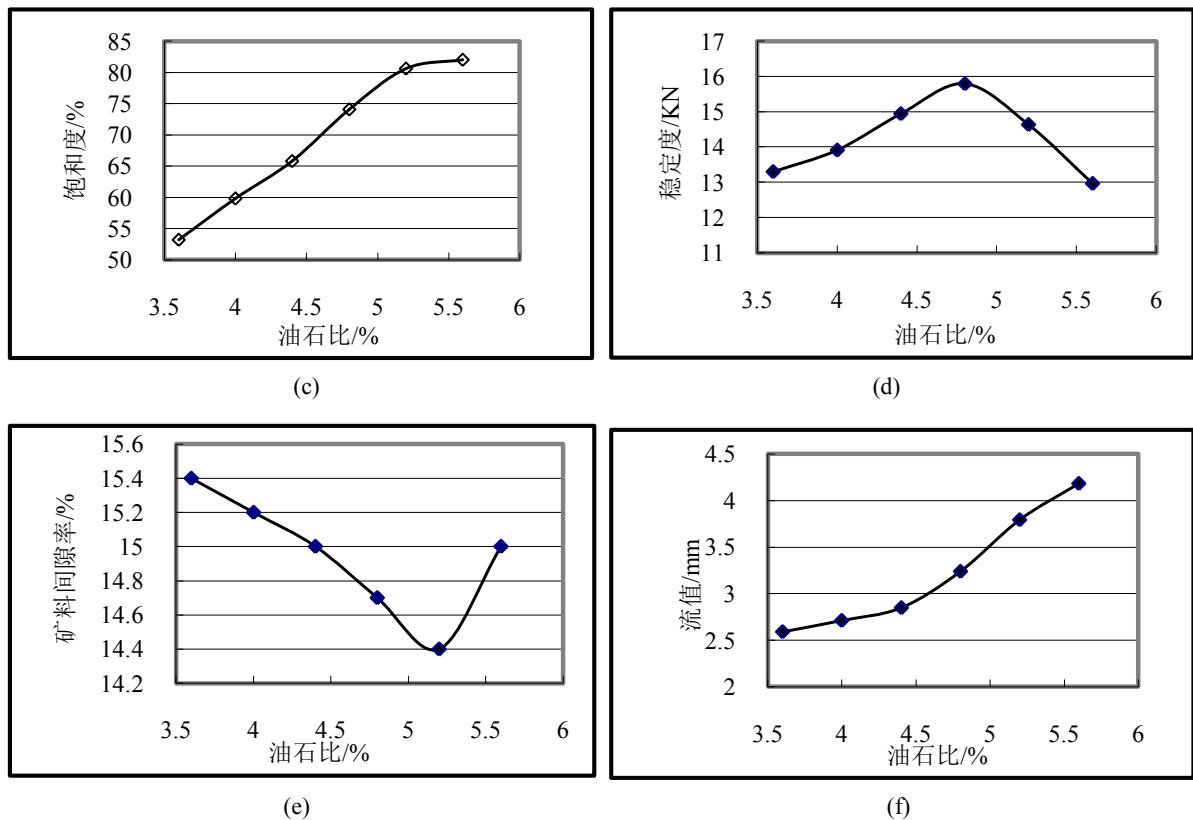


Figure 5. Marshall test results of AC-16 graded mixture with different asphalt content
图 5. AC-16 级配不同沥青用量混合料马歇尔试验结果

由表 10 和图 5 结合密级配沥青混凝土混合料的技术标准得出:

$$OAC_1 = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) / 4 = (5.2 + 4.8 + 4.7 + 4.6) / 4 = 4.8\%$$

$$OAC_2 = (OAC_{\min} + OAC_{\max}) / 2 = (4.4 + 4.9) / 2 = 4.7\%$$

$$\text{最佳油石比 } OAC = (OAC_1 + OAC_2) / 2 = (4.9 + 4.7) / 2 = 4.8\%$$

在试拌过程中发现掺加青川岩沥青后, 花岗岩沥青混合料颜色均匀、发暗、流动性明显减小。因此考虑应避免沥青过少对研究结果产生影响, 因此适当调整最佳油石比为 4.9%。

3. 水损坏敏感性能分析试验

3.1. 抗剥落措施及方案

基于 AC-10 沥青混合料和 AC-16 沥青混合料, 评价 6 种抗剥落措施的路用性能改善效果, 抗剥落措施方案见表 11。其中方案一用消石灰粉替代 3/8 的矿粉, 采用基质沥青; 方案二用消石灰粉替代 3/8 的矿粉, 采用 0.3% 硅烷偶联剂改性沥青; 方案三用消石灰粉替代 3/8 的矿粉, 采用 SBS 改性沥青; 方案四采用基质沥青, 石灰岩矿粉和 0.3% 的潍坊联结剂(直投法, 潍坊联结剂占沥青混合料质量的 0.3%); 方案五采用 5% 岩改沥青和石灰岩矿粉; 方案六采用偶岩复合改性沥青和石灰岩矿粉。

3.2. 试验设备

沥青混合料的水稳定性不仅与温度及循环次数有关, 还与行车动轮载作用下的动水压力及冲刷作用

密切相关[4]，常规的浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验未考虑动力冲刷的作用，本研究选用了水损害敏感性测试仪(见图 6)，测试不同抗剥落措施的花岗岩沥青混合料水损坏敏感性。

Table 11. Anti spalling measures

表 11. 抗剥落措施方案

	沥青	填料
方案 1	70-A	矿粉:消石灰粉 = 4:3
方案 2	0.3%硅烷偶联剂改性沥青	矿粉:消石灰粉 = 4:3
方案 3	SBS 改性沥青	矿粉:消石灰粉 = 4:3
方案 4	70-A (0.3%潍坊联结剂直投法)	矿粉
方案 5	5%岩改沥青	矿粉
方案 6	偶岩复合改性沥青	矿粉



Figure 6. Water damage sensitivity tester MIST

图 6. 水损害敏感性测试仪 MIST

水损害敏感性测试仪是一种在加速条件下测试沥青混合料的抗剥落性能试验装置，测试操作在高于正常温度并在压实沥青混合料内部产生的孔隙水压力条件下进行，这更符合沥青混合料路面在温度、水和交通荷载下的真实环境[5] [6]。发生剥离的必要因素是高空隙率、高温、高应力以及水的存在，水损害敏感性测试仪能够提供以上三种要素，即水、应力和高温，而空隙是混合料的固有属性[7]。常规的水稳定性试验大概需要一周时间，而水损害敏感性测试仪的整个测试过程只需要 4 小时，而且整个过程全自动，节省时间和简化了以前繁琐的步骤。

3.3. 试验步骤

将 AC-10 和 AC-16 所对应的 6 种抗剥落方案按照规范要求成型马歇尔试件，每个方案各成型 5 组试件，分别进行马歇尔稳定度、常规残留稳定度、常规冻融劈裂残留强度比，MIST 残留稳定度、MIST 残留强度比试验。

MIST 实验仪器设置参数为：3500 次循环、140°F (60°C)、40 磅。

3.4. 试验结果分析

按照预先设置好的试验条件，对 6 种方案成型的试件进行稳定度和劈裂强度常规残留稳定度和常规残留强度比及 MIST 试验后的残留稳定度和劈裂强度试验，残留稳定度结果见表 12、表 13 和图 7、图 8；残留强度试验结果见表 14、表 15 和图 9、图 10。

Table 12. AC-10 MIST residual stability results
表 12. AC-10 MIST 残留稳定度结果

方案类别	浸水 0.5 h		浸水 48 h		常规残留稳定度(%)	MIST 后		残留稳定度(%)
	流值 FL (mm)	稳定度 MS (kN)	流值 FL (mm)	稳定度 MS (kN)		流值 FL (mm)	稳定度 MS (kN)	
方案 1	3.4	18.89	4.2	16.03	85	3.0	13.94	74
方案 2	3.8	17.17	4.0	15.51	90	3.6	14.11	82
方案 3	4.9	22.20	4.8	20.47	92	4.4	18.03	80
方案 4	3.3	16.62	3.6	16.58	100	3.4	13.45	81
方案 5	3.6	21.17	3.8	17.9	85	3.6	16.71	79
方案 6	3.9	20.06	4.1	18.88	94	3.8	17.16	86

Table 13. AC-16 MIST residual stability results
表 13. AC-16 MIST 残留稳定度结果

方案类别	浸水 0.5 h		浸水 48 h		常规残留稳定度(%)	MIST 后		残留稳定度(%)
	流值 FL (mm)	稳定度 MS (kN)	流值 FL (mm)	稳定度 MS (kN)		流值 FL (mm)	稳定度 MS (kN)	
方案 1	3.9	15.66	3.6	13.32	85.1	4.0	11.78	75
方案 2	4.4	16.06	4.1	14.32	89.2	4.4	13.22	82
方案 3	4.2	16.46	4.0	14.70	91.5	4.6	13.02	79
方案 4	3.5	14.39	4.1	14.35	99.7	4.6	11.25	78
方案 5	3.6	17.66	3.8	15.70	88.9	4.3	13.34	76
方案 6	3.9	20.06	4.1	18.50	92.2	4.2	17.30	86

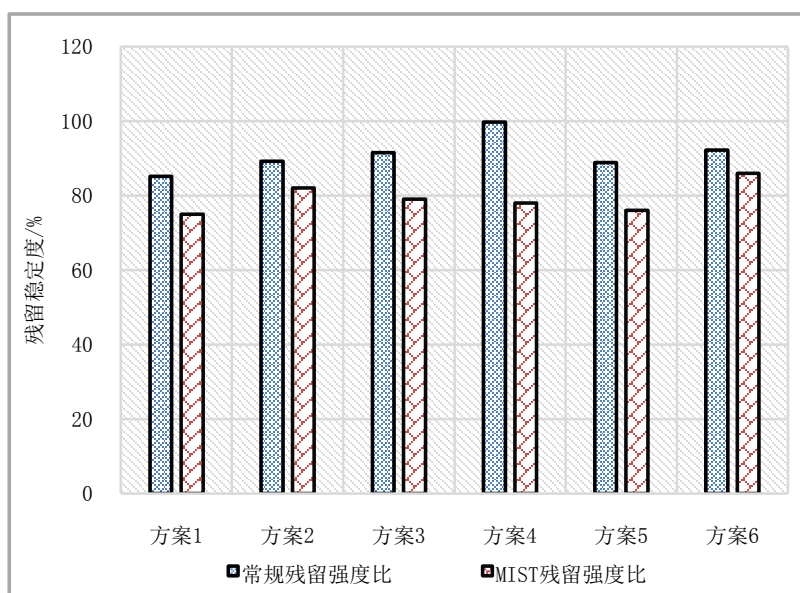


Figure 7. AC-10 MIST residual stability
图 7. AC-10 MIST 残留稳定度

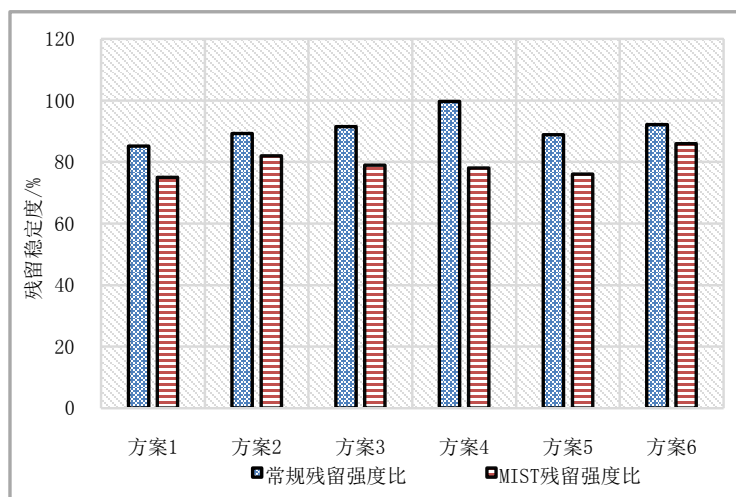


Figure 8. AC-16 MIST residual stability
图 8. AC-16 MIST 残留稳定度

由表 12、表 13 和表 7、表 8 可以看出，经过水损坏敏感性测试仪 3500 次冲刷后各个方案所对应的残留稳定度和常规浸水马歇尔得出残留稳定度规律基本相似，但是残留稳定度较常规浸水马歇尔的残留稳定度值整体有所下降；经过 MIST 后，AC-10 和 AC-16 所对应的各个方案中，只有方案 6 偶岩复合改性沥青混合料在经历 3500 次冲刷后仍旧满足规范大于等于 85% 的要求，而常规的浸水马歇试验 AC-10 和 AC-16 所对应六个方案的残留稳定度都能满足大于等于 85% 的要求，说明水损坏敏感性测试仪较浸水马歇尔的试验条件更为苛刻，能更加真实地模拟行车轮载作用下动水压力对路面的破坏作用[8]。

可以看出经过水损坏敏感性测试仪 3500 次冲刷后 AC-10 和 AC-16 残留稳定性的规律相似。因此以 AC-10 的水损坏敏感性测试仪的试验结果进行分析，与浸水马歇尔试验的试验结果相比，经过水损坏敏感性测试仪 3500 次冲刷后的流值变大、稳定度减小、残留稳定度变小。MIST 后方案 1 (70-A)、方案 2 (0.3%硅烷偶联剂)、方案 3 (SBS 改性沥青)、方案 4 (潍坊联结剂)、方案 5 (5%岩改沥青)、方案 6 (偶岩复合改性沥青)的残留稳定度分别降低了 13.0%、9.2%、11.9%、18.9%、9.4%、9.1%，偶岩复合改性沥青混合料的残留稳定度降低的最小，而且 MIST 后仍旧满足规范要求，潍坊联结剂的残留稳定度降低最大，而且 MIST 后不符合技术标准，说明在更接近真实路面环境时，六种抗剥落措施中偶岩复合改性剂的抗剥落效果最佳。

Table 14. Residual strength ratio of AC-10 MIST splitting test
表 14. AC-10 MIST 劈裂试验的残留强度比

方案	标准劈裂		冻融劈裂后			MIST 后		
	破坏荷载 PT (N)	劈裂强度 RT (MPa)	破坏荷载 PT (N)	劈裂强度 RT (MPa)	劈裂试验的残留强度比 TSR (%)	破坏荷载 PT (N)	劈裂强度 RT (MPa)	劈裂试验的残留强度比 TSR (%)
方案 1	13,002.5	1.28	10,794.8	1.07	83	9594.8	0.95	74
方案 2	11,087.5	1.09	9688.0	0.96	88	9212.4	0.90	82
方案 3	14,417.5	1.43	12,799.0	1.26	88	11,542.8	1.13	79
方案 4	12,830.0	1.26	11,710.0	1.17	92	9376.1	1.00	79
方案 5	13,950.0	1.37	11,830.0	1.16	86	10,438.3	1.03	75
方案 6	15,082.5	1.49	13,420.0	1.33	89	12,496.9	1.24	83

Table 15. Residual strength ratio of AC-16 MIST splitting test
表 15. AC-16 MIST 劈裂试验的残留强度比

方案	标准劈裂		冻融劈裂后			MIST 后		
	破坏荷载 PT (N)	劈裂强度 RT (MPa)	破坏荷载 PT (N)	劈裂强度 RT (MPa)	劈裂试验的 残留强度比 TSR (%)	破坏荷载 PT (N)	劈裂强度 RT (MPa)	劈裂试验的 残留强度比 TSR (%)
方案 1	14,556.7	1.44	12,082.0	1.20	83	10,590.9	1.06	73
方案 2	14,966.7	1.48	13,170.7	1.30	88	12,121.7	1.18	80
方案 3	16,196.7	1.61	13,281.3	1.42	88	1175.4	1.23	77
方案 4	18,353.3	1.84	16,701.5	1.67	91	14,767.4	1.46	80
方案 5	18,850.0	1.88	16,325.1	1.63	87	14,922.5	1.43	76
方案 6	16,106.7	1.61	14,496.0	1.45	90	13,573.9	1.34	83

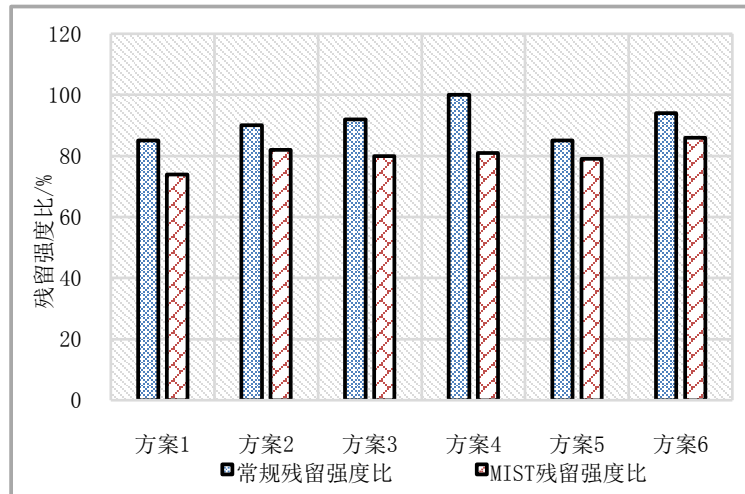


Figure 9. Residual splitting strength ratio of AC-10 MIST
图 9. AC-10 MIST 劈裂残留强度比

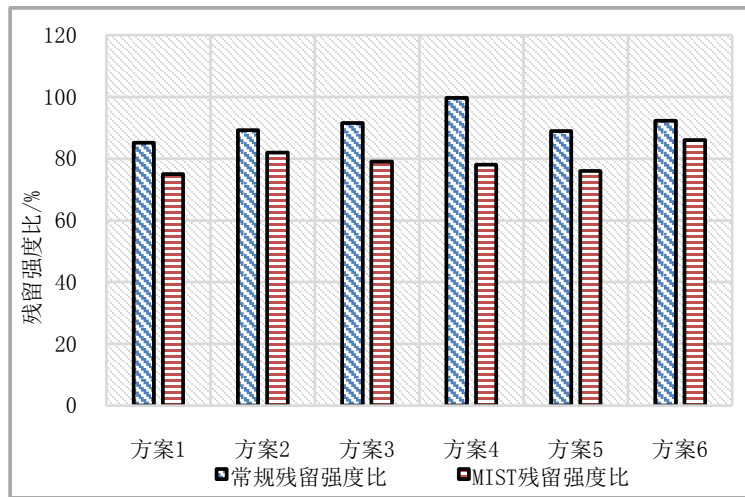


Figure 10. AC-16 MIST splitting residual strength ratio
图 10. AC-16 MIST 劈裂残留强度比

由表 14、表 15 和图 9、图 10 可以看出, 经过水损坏敏感性测试仪 3500 次冲刷后各抗剥落方案对应的劈裂试验的残留强度比和冻融劈裂试验的残留强度比规律相似, 在 AC-10 和 AC-16 所对应的各个方案中仅有方案 2 (硅烷偶联剂)和方案 6 (偶岩复合改性沥青)在经历 3500 次冲刷后仍旧满足规范大于等于 80%的要求, 而冻融劈裂试验 6 种抗剥落方案均满足残留强度比的要求, 这说明对沥青混合料进行水稳定性评价时, 不仅要考虑其冻融作用或浸水作用, 更重要的是考虑在动水压力作用下沥青混合料的水稳定性, 仅考虑冻融或浸水作用的水稳定性评价, 未能真实反映沥青混合料的受水损坏的影响。

4. 小结

本研究通过设计两种级配沥青混合料, 采用 6 种方案对比研究花岗岩沥青混合料的水损坏敏感性, 通过试验研究得出如下结论:

1) 青川岩沥青与硅烷偶联剂复合改性剂具有突出的抗水损坏能力, 两种抗剥落剂的叠加效果既弥补了硅烷偶联剂耐久性差易分解的缺陷, 又弥补了青川岩沥青由于其沥青质成分高脆性大低温抗裂性差的缺点, 而且综合考虑各种路用性能, 偶岩复合改性沥青的改善效果最好, 具有更好的应用前景。

2) 基于 MIST 水损坏敏感性试验的条件更为苛刻, 较传统浸水马歇尔和冻融劈裂试验等混合料水稳定性评价方法更好的模拟花岗岩沥青混合料实际应用条件, 更真实反应各抗剥落措施在实际应用中的效果。

参考文献

- [1] 张文涛. 花岗岩在高温多雨地区沥青路面上面层的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [2] 陈垚宏. 抗剥落剂对酸性集料沥青混合料性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [3] 吕健. 硅烷偶联剂用于酸性集料改性方法及路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [4] 高璋生. 车辙试验动稳定度偏差影响因素研究[J]. 福建建材, 2018(12): 11-12.
- [5] 杨壘金, 邓明伟. 温度对沥青混合料抗车辙性能影响的试验研究[J]. 北方交通, 2019(1): 60-63.
- [6] 戚林玲, 龚建君, 王晓菲, 吴超. 基于抗车辙性能提升的复合高模量沥青混合料研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(2): 9-11.
- [7] 应荣华, 郑健龙, 陈骁. 沥青老化效应的试验研究[J]. 公路交通科技, 2007(6): 20-23+28.
- [8] Fan, S.P., Wang, H., Zhu, H.Z. and Sun, W. (2018) Evaluation of Self-Healing Performance of Asphalt Concrete for Low-Temperature Fracture Using Semicircular Bending Test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30, 9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002426](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002426)