

# 胶粉/抗车辙剂复合改性沥青混合料路用性能研究

胡泳涛, 姜韶威

中交一公局集团有限公司, 北京

收稿日期: 2024年3月28日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

车辙是道路工程中常见的病害, 车辙发展严重影响行车安全与行车舒适性, 为改善路面的抗车辙性能, 本文采用不同掺量的胶粉与抗车辙剂作为环保改性剂制备了两组改性沥青混合料, 通过车辙试验、马歇尔稳定度试验及三点弯曲低温小梁试验等进行了路用性能实验研究。试验结果表明: 与基质沥青和SBS改性沥青使用相比, 利用复合改性剂制备的多相复合改性沥青混合料的高、低温性能及水稳定性较都有了明显的改善。

## 关键词

胶粉, 抗车辙剂, 复合改性, 沥青混合料

## Research on the Road Performance of Modified Asphalt Mixtures with Gel Powder/Anti-Rutting Agent Composite Modification

Yongtao Hu, Shaowei Jiang

China First Highway Engineering Co., LTD., Beijing

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Rutting is a common disease in road engineering, rutting development seriously affects driving

safety and driving comfort, in order to improve the rutting performance of the pavement, this paper adopts different dosages of rubber powder and anti-rutting agents as an environmentally friendly modifier prepared two groups of modified asphalt mixtures, rutting test, Marshall stability test and three-point bending low-temperature trabeculae test and other road performance experimental research. The test results show that compared with the use of matrix asphalt and SBS modified asphalt, the use of composite modifiers prepared by the multiphase composite modified asphalt mixture of high and low temperature performance and water stability are significantly improved.

## Keywords

Gel Powder, Anti-Rutting Agent, Composite Modification, Asphalt Mixture

Copyright © 2024 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

沥青混合料是沥青路面的主要铺筑材料, 占我国高速公路路面类型的 95% 以上。路面直接承受车轮荷载和各种自然因素, 如日照、温度、空气、雨水等的作用, 其性能和状态都会发生变化, 从而影响路面的使用性能和使用寿命[1]。在车辆行驶过程中, 沥青路面承受循环荷载会产生累积变形行程车辙, 车辙是沥青路面常见的道路病害。采用抗车辙剂或复合其他改善型改性剂制备改性沥青混合料可以有效预防车辙的产生, 使沥青路面高温稳定性得到提高, 同时不影响其低温稳定性和水稳定性, 从而减少或延缓车辙病害的发生[2]。添加改性剂可以保证沥青路面长期保持良好的使用状态, 国内外对此做了大量研究, 高彦杰[3]采用两种抗车辙剂复合的方式制备改性沥青混合料, 研究发现复合抗车辙剂对沥青混合料水稳定性的改善幅度较小, 高温、低温性能改善效果较好。金燕云[4]研究了不同掺量抗车辙剂下沥青混合料的物理参数, 在最佳抗车辙剂掺量下, 沥青混凝土高温性能、低温性能及抗渗性能均提升。吕磊[5]等对烯烃复分解催化胶粉改性沥青性能进行了研究, 烯烃复分解对胶粉改性沥青的高温性能影响不显著, 但提高了胶粉改性沥青的低温抗裂性能, 同时对其抗疲劳性能、抗老化性和抗水损性能提升显著。田伯科[6]等研究了高掺量胶粉/SBS 复合改性沥青及混合料的性能, 发现高掺量胶粉/SBS 复合改性沥青混合料有优异的高温抗车辙、低温抗开裂和水稳定性。

为充分发挥胶粉及抗车辙剂各自的优势, 本文中首先选取 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂做目标配合比设计, 确定多相复合改性沥青混合料的制备方法。然后再做进一步的 11% 胶粉 + 0.25% 抗车辙剂和 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂做复合改性沥青混合料性能研究。

## 2. 试验材料和配合比设计

### 2.1. 试验材料

1) 沥青。研究中采用采用的沥青为实验室制备的橡胶沥青, 它是将一定量废旧胶粉加入熔融的基质沥青中搅拌均匀并放入烘箱保温, 然后用电炉加热并高速剪切制得。橡胶沥青的物理性能指标见表 1。

2) 集料。采用的三档集料是石灰岩 10~20 mm、5~10 mm 作为粗集料、0~5 mm 作为细集料, 填料为矿粉。集料的物理性能指标见表 2。

3) 添加剂。添加剂为抗车辙剂和胶粉, 两者组成复合改性剂。抗车辙剂的物理性能指标见表 3。

**Table 1.** Rubber asphalt test index**表 1.** 橡胶沥青试验指标

试验项目	单位	试验结果	技术要求	试验规程
180℃旋转粘度	Pa·s	3.0	2.0~5.0	T0625
针入度	0.1 mm	55.9	30~60	T0604
软化点(环球法) 不小于	℃	61	60	T0606
弹性恢复不小于	%	65.0	60	T0662
延度(5℃) 不小于	cm	6.2	5	T0605

**Table 2.** Aggregate performance test index**表 2.** 集料性能试验指标

检验项目	检验结果	技术要求	试验规程
压碎值, %	19.3	≤28	T0316
洛杉矶磨耗值, %	15.4	≤30	T0317
针片状颗粒含量, %	4.75~9.5 mm	≤20	T0312
	≥9.5 mm	≤15	
与沥青的粘附性等级	4	≥4	T0616
软弱颗粒含量, %	1.7	≤5	T0320

**Table 3.** Test index of physical properties of anti-rutting agent**表 3.** 抗车辙剂物理性能试验指标

指标	单位	技术要求	试验方法	结果
外观	/	颗粒状, 均匀、饱满、无结块	/	满足
单个颗粒质量	g	≤0.03	JT/T860.1	0.023
密度	g/cm <sup>3</sup>	≤1.0	GB/T 1033	0.946
熔融指数	g/10min	≥1.0	GB/T 3682	1.3
灰分含量	%	≤5	JTG E20	3.3

4) 基质沥青与 SBS 改性沥青。基质沥青与 SBS 改性沥青用于沥青混合料路用性能的对比分析。

## 2.2. 配合比设计

1) 级配设计。级配采用 AC-20 型沥青混合料进行试验研究级配设计依据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004), 在选择集料结构时, 首先调试选出粗、中、细三个级配。三个调试级配配合比见下表 4。设定沥青用量 4.1%, 抗车辙剂添加量为 0.3%, 制备沥青混合料进行实验, 集料的级配曲线及合成级配体积指标如图 1、表 5 所示。

依据实验数据可以得出, 级配二的 AV、VMA、VFA 以及稳定度、流值均满足规范要求, 且更接近设计要求, 因此选取级配 2 作为设计级配。

2) 最佳沥青用量优选。采用 3.1%、3.6%、4.1%、4.6%、5.1% 五个沥青用量进行马歇尔试验, 试验结果见表 6。计算得到的最佳沥青用量为 4.11%, 取整得 4.1%。

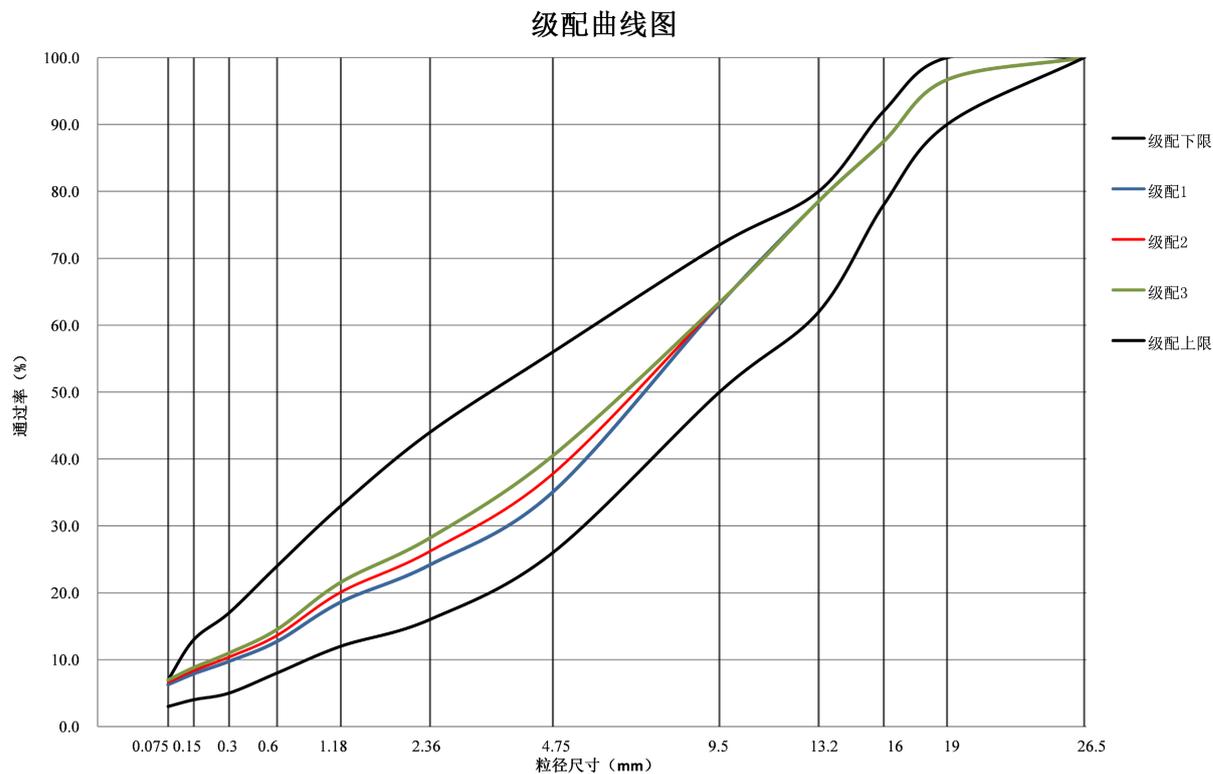


Figure 1. Gradation curves

图 1. 级配曲线图

Table 4. Mix ratio composition

表 4. 配合比组成

	石灰岩 10~20 mm	石灰岩 5~10 mm	石灰岩 0~5 mm	矿粉
级配 1	45	21	31	3
级配 2	45	18	34	3
级配 3	45	15	37	3

Table 5. Volume index table for the three synthetic gradations

表 5. 三种合成级配的体积指标表

级配	合成级配 1	合成级配 2	合成级配 3	规范要求
沥青用量, %		4.1		/
试件毛体积相对密度, g/cm <sup>3</sup>	2.405	2.419	2.442	实测
最大相对理论密度, g/cm <sup>3</sup>	2.523	2.530	2.536	实测
空隙率 AV, %	5.0	4.4	3.1	3~6
矿料间隙率 VMA, %	14.2	13.6	12.9	≥13.5
沥青饱和度 VFA, %	63.7	67.9	73.8	65~75
稳定度, KN	11.65	12.6	10.32	≥8
流值, mm	2.5	3.3	3.7	1.5~4

**Table 6.** Summary of AC-20 Marshall test results**表 6.** AC-20 马歇尔试验结果汇总

沥青用量	3.1	3.6	4.1	4.6	5.1	技术要求
最大理论密度	2.568	2.549	2.530	2.511	2.493	/
空隙率, %	6.3	5.3	4.4	3.4	2.5	3~6
矿料空隙率, %	13.23	13.50	13.62	13.81	14.11	≥13.5%
饱和度, %	52.1	60.3	67.9	75.7	82.4	65~75
稳定度, kN	10.1	11.9	12.6	12.6	11.5	≥8.0
流值(mm)	2.2	2.8	3.3	3.7	4.1	1.5~4

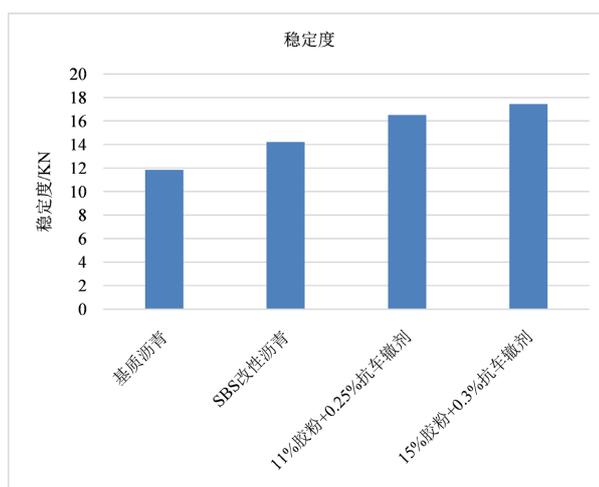
### 3. 沥青混合料性能研究

按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)规定, 对该沥青混合料进行高温性能、低温性能和水稳定性检验。按照 4.1%最佳沥青含量成型马歇尔试件, 抗车辙沥青混合料的马歇尔试件制备与其他常见沥青混合料试件的制备基本相似, 主要区别在于在集料拌和完成后, 需要额外进行 15 秒的干拌步骤以添加抗车辙剂。试件制备完成后静置冷却 24 小时, 对沥青混合料试件进行马歇尔稳定度和动稳定度测试, 动稳定度测试用于评估沥青混合料的抗车辙能力。另外, 还需要进行浸水残留稳定度和冻融劈裂强度测试, 以评估混合料的水稳定性。测定劈裂强度以及三点弯曲低温小梁试验来评价混合料的低温稳定性。下面对抗车辙改性沥青混合料进行综合路用性能测试, 并对 11%胶粉 + 0.25%抗车辙剂和 15%胶粉 + 0.3%抗车辙剂两组多相复合改性沥青混合料的高、低温性能及水稳定性较基质沥青和 SBS 改性沥青做对比。

#### 3.1. 高温稳定性

##### 3.1.1. 马歇尔稳定度

采用马歇尔稳定度试验测试 11%胶粉 + 0.25%抗车辙剂和 15%胶粉 + 0.3%抗车辙剂两组抗车辙改性沥青混合料马歇尔试件在高温条件(60℃)下的稳定度, 首先测试基质沥青和 SBS 改性沥青混合料试件的稳定度作为基准值, 与多相复合改性沥青混合料进行比较, 评价多相复合改性沥青混合料的高温性能。试验结果如图 2 所示。

**Figure 2.** Stability of multiphase composite modified asphalt mixture**图 2.** 多相复合改性沥青混合料的稳定度

稳定度是评价沥青混合料高温稳定性性能的指标, 稳定度值越高, 高温稳定性越好。从图 2 中可以看出两组复合改性沥青混合料的稳定度远高于基质沥青混合料及 SBS 改性沥青混合料, 说明复合改性沥青混合料的高温稳定性较 SBS 改性沥青混合料更优异。

### 3.1.2. 动稳定度

目前, 车辙试验是测评沥青混合料高温性能的重要方法。车辙试验是由一定负荷的轮子在限定的温度和一定时间内在沥青混合料试件的同一轨道上反复碾压形成深深浅浅的辙槽, 通过辙槽深度及每 1 mm 辙槽深度需碾压的次数即动稳定度来评估在限定温度下沥青混合料抗塑性流动变形的能力。

动稳定度计算公式为:

$$DS = \frac{N(t_2 - t_1)}{d_2 - d_1} C_1 C_2 \quad (1)$$

式中: N 为试验轮往返速度, 设为 42 次/min;  $d_1$ 、 $d_2$  分别为时间  $t_1$  (45 min)、 $t_2$  (60 min) 的变形量(mm);  $C_1$  为试验机类型修正系数;  $C_2$  为试件系数。

动稳定度常用来反映沥青混合料的高温稳定性。采用车辙试验测试沥青混合料板在高温(60℃)反复轮碾作用下车辙深度的发展规律, 作为评价沥青混合料抗高温变形的指标。用基质沥青和 SBS 改性沥青混合料试件的动稳定度作为基准值, 测试添加 11% 胶粉 + 0.25% 抗车辙剂和添加 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂两组抗车辙改性沥青混合料马歇尔试件在高温条件(60℃)下的动稳定度。具体实验操作方法参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》。四组沥青混合料的位移曲线图及动稳定度值如图 3、图 4 所示。

从图 4 可以看出试验后复合改性沥青混合料车辙深度较基质沥青减小一半而且 15% 橡胶粉 + 0.3% 抗车辙剂的动稳定度最高能够达到 11636, 是 SBS 改性沥青混合料的动稳定度 5526 的两倍, 是基质沥青动稳定度 1526 的 7.5 倍, 而且混合料的车辙深度较另一组更小, 说明复合改性沥青混合料抗高温车辙性能较强而且 15% 橡胶粉 + 0.3% 抗车辙剂的混合料更优。这也表明复合改性沥青高温抗车辙性能优异。

## 3.2. 水稳定性

### 3.2.1. 浸水残留稳定度

通过浸水马歇尔稳定度试验检验 11% 胶粉 + 0.25% 抗车辙剂和 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂两组抗车辙改性沥青混合料马歇尔试件在受水损害时抵抗剥落的能力进而检验配合比设计的可行性。为了便于评

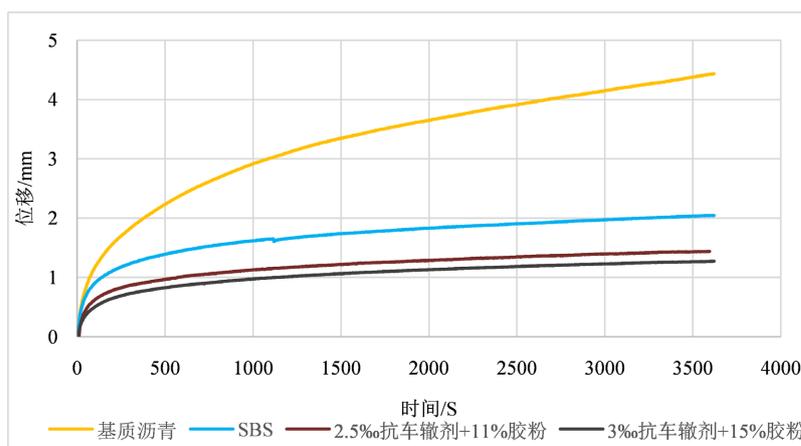


Figure 3. Displacement curve

图 3. 位移曲线图

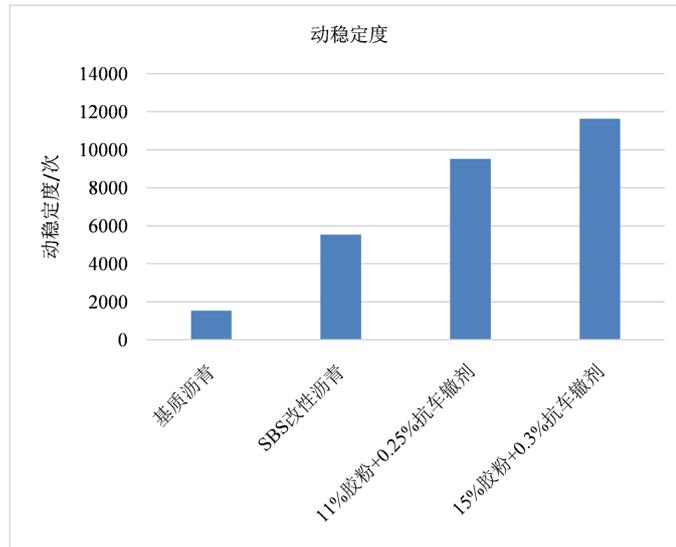


Figure 4. Dynamic stability diagram

图 4. 动稳定度图

价改性沥青混合料的抵抗水损害的能力, 试验中测试了基质沥青和 SBS 改性沥青混合料试件的浸水稳定度作为基准值, 与复合改性沥青混合料进行比较。公式(2)为浸水马歇尔残留稳定度按计算公式。

$$MS_0 = \frac{MS_1}{MS} \quad (2)$$

式中:  $MS$ 、 $MS_2$  分别为试件浸水 35 min、48 h 后的稳定度(kN)。

具体实验操作方法参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(T0709-2011)。试验结果见图 5。

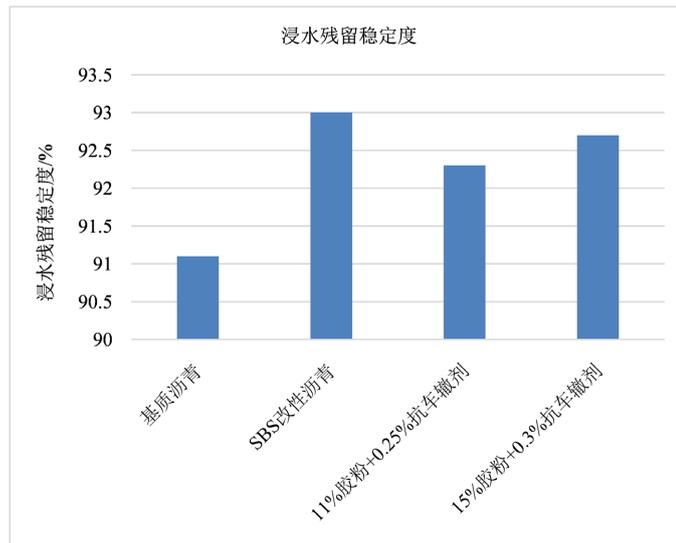


Figure 5. Immersion residual stability diagram

图 5. 浸水残留稳定度图

从图 4 中可以看出两组复合改性沥青混合料的浸水残留稳定度分别为 92.3%与 92.7%, 与基质沥青混

合料相比有较大改善, 较 SBS 改性沥青混合料的值偏低但是接近。说明复合改性沥青混合料受水损害时抵抗剥落的能力明显提高。加 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂混合料的浸水残留稳定度较 11% 胶粉 + 0.25% 抗车辙剂混合料的要高 0.4%, 说明 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂混合料的水稳定性更好。

### 3.2.2. 冻融劈裂强度

冻融劈裂试验用于检验沥青混合料的抗水损坏能力, 特点是比一般的浸水稳定度条件更严格。在规定的条件下进行冻融循环, 同样以基质沥青和 SBS 改性沥青混合料试件的劈裂强度作为基准值, 来测试 11% 胶粉 + 0.25% 抗车辙剂和 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂两组抗车辙改性沥青混合料抗水损坏能力。试件的以冻融劈裂抗拉强度比 TSR 作为评价指标, 其计算公式见式(3)

$$TSR = \frac{RT_2}{RT_1} \times 100 \quad (3)$$

式中:  $RT_1$ ,  $RT_2$  分别为未进行冻融循环和经受冻融循环试件的劈裂抗拉强度(MPa)。

测定混合料试件在受到水损害前后劈裂破坏的强度比, 以评价沥青混合料的水稳定性。具体实验操作方法参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(T0709-2000)。试验结果如下图 6 所示。

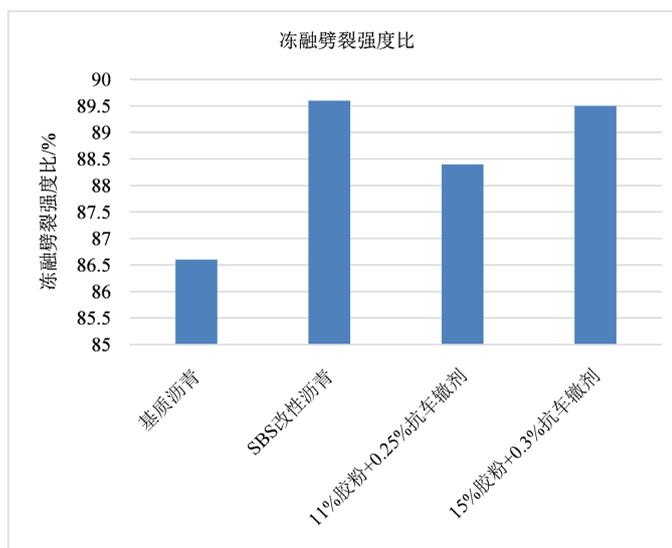


Figure 6. Tensile strength ratio of freeze-thaw splitting of different types of mixtures

图 6. 不同类型混合料冻融劈裂抗拉强度比

从冻融劈裂强度比图可以看出两组抗车辙混合料劈裂强度较基质沥青有较大提升, 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂沥青混合料组合与 SBS 改性沥青混合料相近, 11% 胶粉 + 0.25% 抗车辙剂沥青混合料组合较基质沥青有较大的提升, 但效果不如 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂沥青混合料组合显著。说明 15% 胶粉 + 0.3% 抗车辙剂抗车辙混合料抗极端条件水损害能力有更大改善, 与 SBS 改性沥青混合料接近。

## 3.3. 低温抗裂性

### 3.3.1. 劈裂强度

劈裂强度用于测定沥青混合料在规定温度和加载速率时劈裂破坏或处于弹性阶段时的力学性质, 可为沥青路面结构设计选择沥青混合料力学设计参数提供参考, 也可评价沥青混合料低温抗裂性能。这里

用于评价沥青混合料低温抗裂性能。采用试验温度 15℃, 加载速率为 50 mm/min。以基质沥青和 SBS 改性沥青混合料试件的劈裂强度作为基准值, 测试 11%胶粉 + 0.25%抗车辙剂和 15%胶粉 + 0.3%抗车辙剂两组抗车辙改性沥青混合料马歇尔试件在低温条件(15℃)下的低温抗裂性。试验结果如图 7 所示。

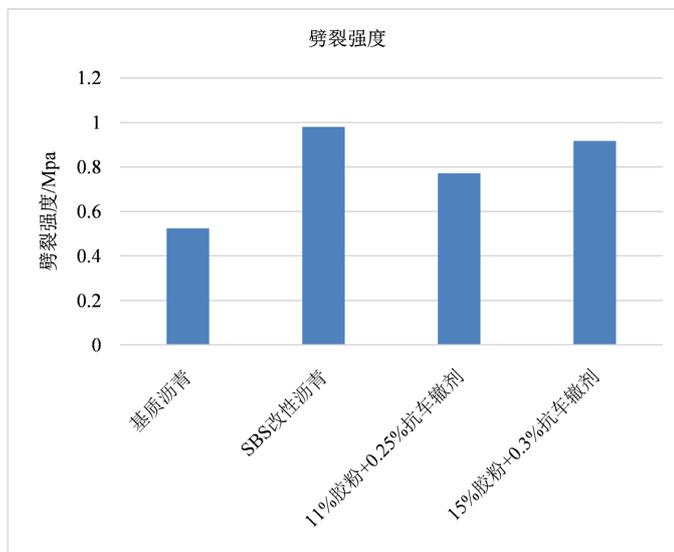


Figure 7. Splitting strength of different types of mixtures  
图 7. 不同类型混合料的劈裂强度

荷载图可以看出两组抗车辙混合料劈裂强度较基质沥青分别提升了 1.48 和 1.76 倍, 且与 SBS 改性沥青混合料的劈裂强度 0.98 相近。说明抗车辙混合料低温性能较基质沥青混合料有较大改善, 其低温抗裂性与 SBS 改性沥青混合料接近。

### 3.3.2. 三点弯曲低温小梁试验

采用万能试验机测试沥青混合料小梁低温条件下(-10℃)的弯拉应变和蠕变劲度模量, 通过与 SBS 改性沥青混合料进行比较, 评价多相复合改性沥青混合料的低温抗开裂性能。具体实验操作方法参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(T0728-2000)。

将图 8 中曲线的切线延长与横坐标的交线为挠度曲线的开始位置, 荷载最大值对应的挠度坐标为最终止值, 终止值与初始值的差即为挠度大小。根据挠度及试件的高度、跨径即可得到最大弯拉应变公式如(4)式所示。

$$\varepsilon(t) = \frac{6hd(t)}{L^2} \quad (4)$$

式中  $\varepsilon(t)$  为试件梁的弯拉应变;  $h$  为跨中断面试件的高度, m;  $L$  为试件的跨径, m;  $d(t)$  为试件加载过程中承受的荷载, N;

曲线挠度越大代表低温抗开裂能力越强, 图 8 及图 9 中可以看出 SBS 改性沥青混合料达到荷载最大值时挠度最大, 表明其低温抗开裂性能较好, 15%胶粉 + 3%抗车辙剂组合的复合改性沥青组较基质沥青组挠度较大提高, 改性效果显著。从最大荷载值的比较可以看出 15%胶粉 + 3%抗车辙剂组合的复合改性沥青混合料与 SBS 改性沥青混合料的最大荷载相近, 与基质沥青相比有较大提高, 表明其承受低温开裂的能力得到较大提升。

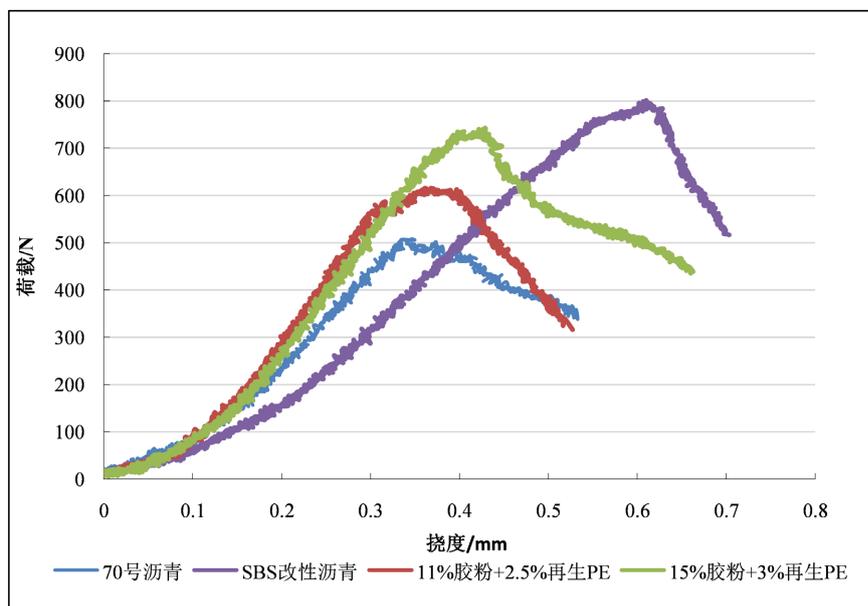


Figure 8. Low temperature trabecular test load-deflection curve

图 8. 低温小梁试验荷载 - 挠度曲线图

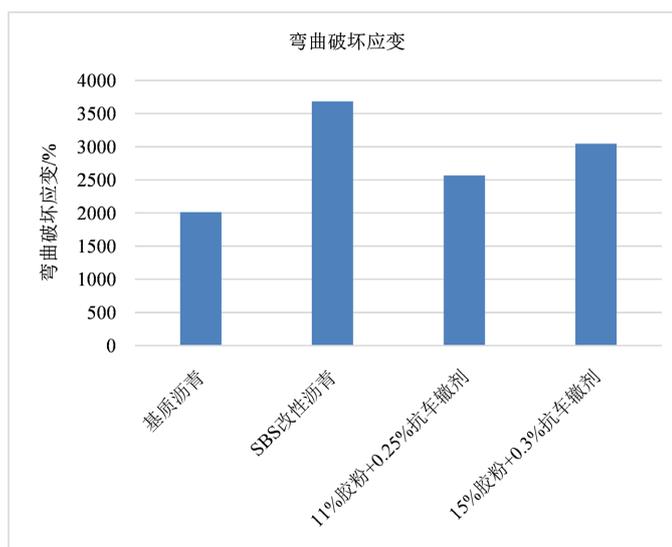


Figure 9. Low temperature trabecular test bending failure strain

图 9. 低温小梁试验弯曲破坏应变

#### 4. 结论

1) 通过以上抗车辙路面材料的室内沥青和混合料的全面试验研究, 综合分析得 11%胶粉 + 0.25%抗车辙剂和 15%胶粉 + 0.3%抗车辙剂两组抗车辙改性沥青混合料的各项评价高温、低温和抗水损害性能指标, 15%胶粉 + 0.3%抗车辙剂沥青混合料具有优异的综合路用性能。

2) 掺加抗车辙剂的复合改性沥青混合料与 SBS 改性沥青混合料、基质沥青混合料相比, 复合改性沥青混合料的高温性能有大幅提高, 超过 SBS 改性沥青; 其低温性能较基质沥青混合料有较大改善, 但比 SBS 改性沥青混合料低温性能稍差; 抗水损害能力与 SBS 改性沥青混合料相当。

## 参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
- [2] 张金喜, 高林峰, 董子震. 沥青路面多功能养护维修材料和技术发展现状综述[J]. 市政技术, 2023, 41(10): 80-93.  
<https://doi.org/10.19922/j.1009-7767.2023.10.080>
- [3] 高彦杰. 抗车辙剂改性沥青混合料路用性能试验[J]. 交通世界, 2016(2): 85-87+11.  
<https://doi.org/10.16248/j.cnki.11-3723/u.2016.02.098>
- [4] 金燕云. 抗车辙剂对沥青混凝土路用性能影响分析[J]. 江西建材, 2023(11): 26-28+32.
- [5] 吕磊, 赵辰, 李蕊, 等. 烯烃复分解催化胶粉改性沥青制备工艺与性能评价[J]. 中国公路学报, 2023, 36(12): 143-154.
- [6] 田伯科, 赵薇, 李永明, 等. 高掺量胶粉/SBS 改性沥青及其混合料的路用性能[J]. 山西建筑, 2024, 50(5): 104-108.