

# 复合改性沥青混合料CMA-ARHM13路用性能研究

邱颖峰<sup>1,2</sup>

(1.上海市市政规划设计研究院有限公司,上海市 200092; 2.上海城市路域生态工程技术研究中心,上海市 201108)

**摘要:** 针对传统SBS-SMA13沥青混合料在抗疲劳性、低温抗裂性及存储稳定性等方面的不足,研究提出了一种基于复合改性与间断半开级配设计的增强增韧型沥青混合料CMA-ARHM13。相关试验研究表明,CMA-ARHM13通过材料与结构协同设计,与SBS-SMA13相比在低温抗裂与抗疲劳性能方面具有显著优势,且高温与抗水损害性能亦能满足规范要求,可适用于复杂气候路段,特别是低温环境地区。相关研究为功能性上面层混合料设计提供了新的方案。

**关键词:** ARHM-13; CMA复合改性; 上面层; 沥青混合料

**中图分类号:** U414; TU997

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2025)11-0297-04

## Research on Pavement Performance of Composite Modified Asphalt Mixture CMA-ARHM13

QIU Yingfeng<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Municipal Planning and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Road Domain Ecological Engineering Technology Research Center, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** In response to the shortcomings of traditional SBS-SMA13 asphalt mixture in fatigue resistance, low-temperature crack resistance and storage stability, an enhanced and toughened asphalt mixture CMA-ARHM13 based on the composite modification and discontinuous semi-open gradation design is studied and proposed. The related experimental researches demonstrate that CMA-ARHM13, through the synergistic design of material and structure, has the significant advantages over SBS-SMA13 in low-temperature crack resistance and fatigue resistance, and its high-temperature performance and moisture damage resistance also meet the specification requirements, which is suitable for the road sections with the complex climatic conditions, particularly in low-temperature environments. The research provides a novel solution for the design of functional surface-layer asphalt mixtures.

**Keywords:** ARHM-13; CMA composite modification; surface layer; asphalt mixture

## 0 引言

传统SBS-SMA13沥青混合料因其优异的高温稳定性和抗水损害性,在南方道路上面层中得到了广泛应用。然而,SBS的单一改性剂体系也使之存在一定局限性。例如,王晓东等<sup>[1]</sup>指出其在储存过程中因改性剂与沥青相容性不足而易引发离析问题;王岚等<sup>[2]</sup>指出传统SBS改性沥青在长期循环荷载作用下易产生疲劳裂纹,难以满足复杂气候条件和道路长期服役需求。在此背景下,基于复合改性与半开级配设计技术的增强增韧型沥青混合料CMA-

ARHM13应运而生。CMA-ARHM13的核心机理是:一方面通过不同性质弹性体的化学键合与物理缠结协同作用实现沥青的复合改性,从而提升结合料的综合性能;一方面通过间断半开级配设计,形成“粗骨料嵌挤+细料填充”的双重结构,在保持混合料骨架稳定性的同时提高沥青胶浆的含量,从而增强混合料的柔韧性与抗裂能力。

## 1 原材料试验

粗集料采用片麻岩,细集料采用机制砂,填料采用矿粉。

粗集料、细集料、填料的级配结果和性能试验结果见表1、表2。

## 2 改性剂的选择

复合改性沥青(CMA)与SBS改性沥青的核心差

收稿日期: 2025-04-07

基金项目: 基于“无废”理念的沥青路面快速结构修复及高品质再生利用关键技术研究(CTKY-ZDZX-2023-003)

作者简介: 邱颖峰(1977—),男,博士,高级工程师,从事检测及研究工作。

表1 粗集料、细集料和填料的级配结果

| 类型  | 规格/mm   | 通过率/% |       |         |        |         |         |         |        |        |         |          |
|-----|---------|-------|-------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|----------|
|     |         | 19 mm | 16 mm | 13.2 mm | 9.5 mm | 4.75 mm | 2.36 mm | 1.18 mm | 0.6 mm | 0.3 mm | 0.15 mm | 0.075 mm |
| 粗集料 | 10 ~ 15 | 93.8  | 69.9  | 42.0    | 4.2    | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7    | 0.7    | 0.7     | 0.7      |
|     | 5 ~ 10  |       |       | 100     | 94.4   | 6.1     | 0.6     | 0.6     | 0.6    | 0.6    | 0.6     | 0.5      |
|     | 3 ~ 6   |       |       | 0       | 100    | 94.0    | 3.6     | 2.1     | 1.7    | 1.5    | 1.4     | 1.4      |
| 细集料 | 0 ~ 3   |       |       |         | 100    | 99.9    | 91.7    | 65.9    | 41.4   | 21.5   | 13.4    | 11.4     |
| 填料  |         |       |       |         |        |         |         |         | 100    | 100    | 99.3    | 93.3     |

表2 粗集料、细集料及填料性能试验结果

| 技术指标        | 技术要求   | 试验结果       |           |          |          |       |
|-------------|--------|------------|-----------|----------|----------|-------|
|             |        | 10 ~ 15 mm | 5 ~ 10 mm | 3 ~ 6 mm | 0 ~ 3 mm | 填料    |
| 表观相对密度      | ≥2.500 | 2.656      | 2.643     | 2.618    | 2.733    | 2.795 |
| 毛体积相对密度     | ≥2.500 | 2.628      | 2.608     | 2.562    | 2.591    |       |
| 吸水率/%       | ≤2.0   | 0.42       | 0.54      | 0.68     | 1.73     |       |
| 含泥量/%       |        | 0.4        | 0.6       | 0.6      | 10.8     |       |
| 针片状含量/%     |        | 9.2        | 13.8      |          |          |       |
| 砂当量/%       | ≥60    |            |           |          | 65       |       |
| 坚固性/%       | ≤12    |            |           |          | 4        |       |
| 棱角性(流动时间)/s | ≥30    |            |           |          | 38       |       |
| 亲水系数        | <1     |            |           |          |          | 0.4   |
| 塑性指数        | ≤4     |            |           |          |          | 2.5   |

异在于改性剂的配方<sup>[3-4]</sup>。前者采用弹性体A(主要成分为SEBS)与弹性体B(主要成分为TPO)的复合使用,掺量可达10%~15%。为实现高低温、抗裂性及储存稳定性的平衡,关键在于弹性体A与B比例的控制<sup>[5-6]</sup>。为此,选择5组配比(组号1~5,分别表示A/B为100/0、71/29、47/53、29/71、0/100)进行相关指标的对比试验,试验结果见图1至图4。

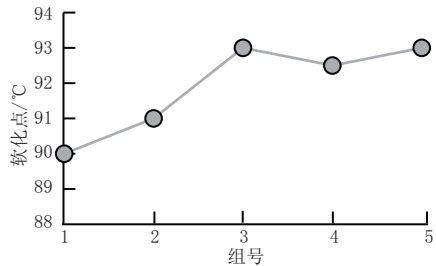


图1 各组软化点试验结果

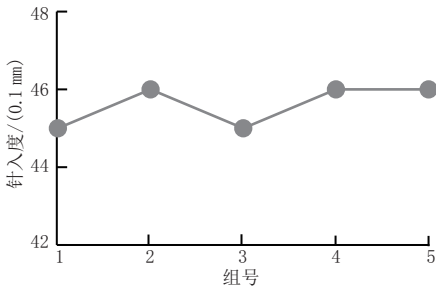


图2 各组针入度试验结果

由试验结果可知:弹性体A、B比例的变化对针入度和软化点的影响较小,所有比例下其指标均可满足要求;对135℃黏度影响较大,当A/B低于29/71

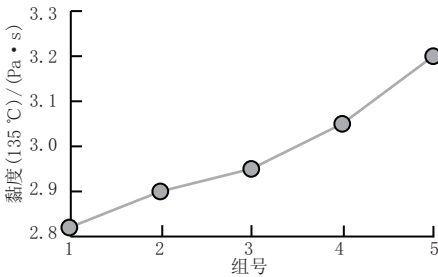


图3 各组黏度(135℃)试验结果

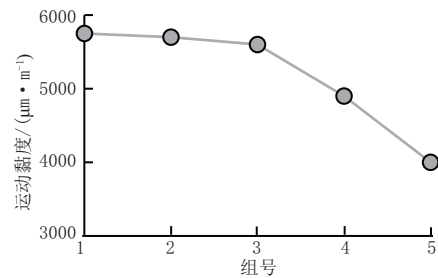


图4 各组低温小梁弯曲试验结果

时将超过限值要求;对低温性能也有显著影响,当A/B超过47/53时,低温应变下降速率显著加快。综合各性能的平衡需求,弹性体A、B的比例确定为A/B=47/53。

3 沥青的性能对比验证

为系统对比CMA改性沥青(掺量10.5%,弹性体A/B=47/53)与SBS改性沥青(掺量5%)的性能差异,对两者进行相关常规指标试验<sup>[7-10]</sup>。另外,为重点考核沥青在高温和重载条件下的抗永久变形能力,补

充了DSR 试验,并以改进型车辙因子  $G^*/\sin 3\delta$  指标进行评价(见图5)。所有试验结果见表3。

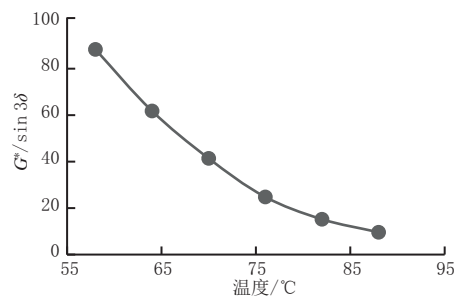


图5 改进型车辙因子  $G^*/\sin 3\delta$  试验结果

由试验结果可知,CMA 改性沥青与SBS 改性沥青相比,具有以下特点:160 °C的改进型车辙因子为78.9 kPa,显著高于SBS 的42.8 kPa,表明其在高温重载下的抗变形能力更强;5 °C延度为40 cm,SBS 为28 cm,表明其低温抗裂性能更好;热储存稳定性时的离析温差低0.4 °C,表明其存储稳定性更佳;软化点和黏度(135 °C)略高于SBS,表明其对施工温度的控制要求更高。

表4 SMA-13 及 ARHM-13 级配范围要求及合成级配结果

| 矿料规格         | 质量比/%  |        | 通过率/% |         |        |         |         |         |        |         |         |          |
|--------------|--------|--------|-------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|----------|
|              | SMA13  | ARHM13 | 16 mm | 13.2 mm | 9.5 mm | 4.75 mm | 2.36 mm | 1.18 mm | 0.6 mm | 0.30 mm | 0.15 mm | 0.075 mm |
| 碎石(10~16 mm) | 37     | 36     | 100   | 86.3    | 14.2   | 0.4     | 0.4     | 0.4     | 0.4    | 0.4     | 0.4     | 0.2      |
| 碎石(5~10 mm)  | 39     | 38     | 100   | 100     | 98.4   | 8.1     | 0.4     | 0.2     | 0.2    | 0.2     | 0.2     | 0.2      |
| 石屑(0~3 mm)   | 14     | 19     | 100   | 100     | 100    | 100     | 77.6    | 60      | 42.5   | 29.6    | 22.3    | 13.8     |
| 矿粉           | 10     | 7      | 100   | 100     | 100    | 100     | 100     | 100     | 100    | 99.8    | 98.6    | 76.5     |
| 级配范围         | SMA13  |        | 100   | 90~100  | 50~75  | 20~34   | 15~26   | 14~24   | 12~20  | 10~16   | 9~15    | 8~12     |
|              | ARHM13 |        | 100   | 95~100  | 62~71  | 25~35   | 20~28   | 15~23   | 12~19  | 10~15   | 8~12    | 6~10     |
| 合成级配         | SMA13  |        | 100   | 94.9    | 67.6   | 27.3    | 21.2    | 18.6    | 16.2   | 14.4    | 13.2    | 9.7      |
|              | ARHM13 |        | 100   | 95.1    | 68.5   | 29.2    | 22.0    | 18.6    | 15.3   | 12.8    | 11.4    | 8.1      |

由表4可知,ARHM13 与SMA13 级配相比,相同点在于两者均采用粗集料骨架结构和高矿粉含量来增强其高温抗车辙能力及密实性,且均依赖沥青胶浆黏结力与骨架嵌挤协同作用提升性能。不同点在于ARHM13 为间断半开级配,细集料范围更宽(2.36 mm 通过率12%~25%),可容纳更多沥青胶浆以优化抗疲劳和抗反射裂缝能力,适用于温差大、裂缝敏感路段;而SMA13 为间断密级配,细集料范围较窄(2.36 mm 通过率15%~20%),侧重密实性和抗水损害,依赖改性沥青的高黏性和纤维的强化作用来实现高温稳定性,更适合高温多雨地区。

5 混合料性能验证对比

为了验证 ARHM13 与 SMA13 路用性能的差异性,对两者的高低温、抗水损、抗疲劳等性能进行了

表3 CMA 与 SBS 改性沥青试验结果

| 试验项目                            | 技术要求  | 试验结果     |          |
|---------------------------------|-------|----------|----------|
|                                 |       | SBS 改性沥青 | CMA 改性沥青 |
| 针入度(25 °C,100 g,5 s)/(0.1 mm)   | 30~60 | 51       | 45       |
| 延度(5 cm/min,5 °C)/cm            | ≥20   | 28       | 40.0     |
| 软化点(环球法)/°C                     | ≥85   | 90.0     | 93.0     |
| 黏度(135 °C)/(Pa·s)               | ≤3    | 2.75     | 2.95     |
| 闪点/°C                           | ≥280  | 305      | 305      |
| 溶解度(三氯乙烯)/%                     | ≥99   | 99.8     | 99.7     |
| 弹性恢复(25 °C)/%                   | ≥80   | 90       | 98       |
| 热储存稳定性/°C                       | ≤2.5  | 2.4      | 2.0      |
| 改进型车辙因子 $G^*/\sin 3\delta$ /kPa | ≥30   | 42.8     | 78.9     |
| 质量损失/经 RTFOT 老化后                | ±0.6  | -0.10    | -0.03    |
| 25 °C 针入度比/%                    | ≥65   | 74.9     | 88.9     |
| 延度(5 cm/min,5 °C)/cm            | ≥15   | 18       | 20       |

4 级配设计与结构特性对比

研究采用的 ARHM13、SMA13 级配的具体合成级配结果及相应级配范围要求见表4。

相关试验(其中SMA13 添加5.66% 的SBS 改性沥青和0.4% 的木质素纤维;ARHM13 添加5.81% 的CMA 改性沥青,无纤维),试验结果见表5。

由表5 可知,ARHM13 与SMA13 相比,其路用性能具有以下特征:低温抗裂性能、抗疲劳性能具有较显著优势(SCB 断裂能和疲劳寿命次数显著高于SMA13),表明其更能胜任低温环境;高温稳定性与SMA13 相差不大,均可满足规范要求;抗水损害性能较SMA13 略低,原因可能是复合改性沥青的高黏度胶浆与集料黏结较弱所导致。

6 结 语

沥青混合料CMA-ARHM13 通过弹性体A、B 复合改性,平衡了其高低温性能与存储稳定性,胶浆黏度得以优化,保障了施工可控性,且无需添加纤维而

表 5 SMA13 与 ARHM13 路用性能试验

| 试验项目               | 试验方法标准      | 试验指标                                     | 试验结果   |        |
|--------------------|-------------|------------------------------------------|--------|--------|
|                    |             |                                          | SMA13  | ARHM13 |
| 低温抗裂性(小梁弯曲试验)      | T0715—2011  | 破坏应变/( $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ) | 2 850  | 3 124  |
|                    |             | 劲度模量/MPa                                 | 3 401  | 3 679  |
| 低温抗裂性(SCB 抗弯拉应力试验) | AASHTOTP105 | 峰值力/kN                                   | 10.03  | 7.98   |
|                    |             | 峰值变形/mm                                  | 1.31   | 2.25   |
|                    |             | 断裂能/( $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ )     | 2 631  | 6 411  |
| 抗水损害性(冻融劈裂试验)      | T0729—2000  | 冻融劈裂比/%                                  | 83.7   | 79.8   |
| 高温稳定性(车辙试验)        | T0719—2011  | 动稳定度/(次 $\cdot\text{mm}^{-1}$ )          | 5 891  | 6 533  |
| 抗疲劳性能(小梁四点弯曲试验)    | T0739—2011  | 疲劳寿命 $N_{\text{f50}}$ /次                 | 26 270 | 89 810 |

简化了拌合工艺;通过改性沥青的高黏弹性与宽级配协同作用,显著增强了其低温抗裂性能(断裂能 6 411 J/m<sup>2</sup>)和抗疲劳性能(疲劳寿命 89 810 次),较传统 SMA13 提升近 3 倍,可满足复杂环境下的长期服役需求;高温稳定性与 SMA13 基本一致,但抗水损害性略低于 SMA13。

总体而言,CMA-ARHM13 为复杂环境下的路面上面层混合料设计提供了一种新的解决方案。

参考文献:

[1] 王晓东,马松林.复合改性沥青储存稳定性研究[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(9):1325-1330.

[2] 王岚,刘伟.橡塑复合改性沥青的性能研究[J].公路交通科技,2020,37(5):45-52.

[3] 李华,陈建国.间断级配沥青混合料设计方法与应用[J].建筑材料学报,2018,21(3):112-118.

[4] 张肖宁,王端宜.沥青与沥青混合料试验规程及解释[M].北京:人民交通出版社,2011.

[5] 周志刚,张金喜.高黏度改性沥青及其混合料性能研究[J].中国公路学报,2019,32(7):89-96.

[6] 黄晓明,赵永利.沥青混合料低温抗裂性能评价方法[J].东南大学学报,2015,45(2):234-240.

[7] EN 12697-24. Bituminous mixtures-Test methods-Part 24: Resistance to fatigue[S]. Brussels: CEN, 2012.

[8] AASHTO. Standard Method of Test for Determining the Fracture Potential of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend Test (SCB) (TP 105)[S]. Washington, D.C.: AASHTO, 2013.

[9] 交通运输部公路科学研究院.橡胶沥青及混合料设计施工技术指南[M].北京:人民交通出版社,2016.

[10] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].