

文章编号:1671-8879(2015)03-0013-08

Sasobit 再生沥青混合料的设计与性能

徐 东^{1,2}, 章 玮²

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 弗吉尼亚理工大学 土木与环境工程学院, 弗吉尼亚 黑堡 24061)

摘要:为了对温拌再生沥青混合料(WMRA)的路用性能进行评估,设计了回收沥青路面材料(RAP)掺配率分别为 10%、30%、50%的 WMRA 和热拌再生沥青混合料(HMRA),构建了 WMRA 的最佳拌和温度、击实成型温度与新集料加热温度的确定方法,并按照规定的温度制作 Marshall 试件,通过进行 Marshall 试验、车辙试验、低温弯曲试验、残留稳定度试验和冻融劈裂试验,评估了 HMRA 和 WMRA 的 Marshall 指标和路用性能。研究表明:当 RAP 掺配比例较小时,WMRA 和 HMRA 的空隙率非常接近,得出 Sasobit 的降温幅度在 15 ℃左右;随着 RAP 比例的提高,WMRA 和 HMRA 的新集料加热温度逐渐提高,沥青老化程度增加,进而导致混合料性能发生变化,致使空隙率(VV)和动稳定度(DS)增大,低温弯曲应变降低;Sasobit 温拌剂的掺入,能降低新集料的加热温度,减弱沥青老化,进而降低混合料 VV,使低温性能有所提升,同时 Sasobit 材料本身又能提高沥青低温粘度,进而提高了混合料的高温性能;通过路用性能试验,所有 WMRA 的高温性能和水稳定性均满足中国规范要求,部分混合料的低温性能稍低于规范要求。

关键词:道路工程;回收沥青路面材料;温拌再生沥青混合料;Sasobit;混合料温度
中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Design and performance of Sasobit warm mixed reclaimed asphalt mixture

XU Dong^{1,2}, ZHANG Wei²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Civil and Environmental Engineering Department, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg 24061, Virginia, USA)

Abstract: In order to evaluate road performance of warm mixed reclaimed asphalt (WMRA), asphalt mixtures using different content (10%, 30%, 50%) of RAP (recycled asphalt pavement) were selected, and WMRA and Hot mixed reclaimed asphalt mixture (HMRA) were designed consequently. Besides, the methods to determine the optimal mixed temperature and compaction temperature of WMRA as well as the heating temperature of new aggregates were proposed. Then the WMRA mixtures were made into Marshall specimens to perform the following tests, including Marshall test, rutting test, low temperature bending test, residual stability test and freeze-thaw splitting test. Finally, Marshall indicators and pavement performance of HMRA and

收稿日期:2014-10-20

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2008 318 000 29)

作者简介:徐 东(1984-),男,山东烟台人,工学博士研究生,E-mail:feskio2007@hotmail.com。

WMRA were evaluated. The results show that when the RAP content is low, the VV between WMRA and HMRA is very close, indicating that cooling temperature of Sasobit is 15 °C; With the increase of RAP content, heating temperatures of virgin aggregate for WMRA and HMRA are gradually rising and asphalt aging degree also increases, leading to performance changes of mixture as follows: both VV and DS increases, and low temperature bending strain decreases; with Sasobit mixed into mixture, the heating temperature of the virgin aggregates and the asphalt aging degree can be reduced. Besides, the VV of mixture is also reduced and the low temperature performance is improved, At the same time, Sasobit itself can improve the low temperature viscosity of asphalt and also improve the high temperature performance; high temperature performance and water stability performance of all WMRA meet Chinese specification requirements, and low temperature performance of partial mixture is slightly lower than the specification requirements. 10 tabs, 7 figs, 13 refs.

Key words: road engineering; RAP; warm mixed reclaimed asphalt mixture; Sasobit; mixing temperature

0 引言

路面再生技术能实现废旧沥青路面材料(RAP)的循环再生利用,作为一种绿色交通技术而被广泛应用^[1]。目前,国际上已形成了一套较完整的设计、评价和施工方法,并达到规范化程度,但仍有一些技术问题需要解决。考虑到沥青的二次老化,热拌再生沥青混合料(HMRA)中RAP的掺配比例受到严格限制^[2],而沥青混合料的温拌技术能够在相对较低的温度下进行拌和与碾压,较热拌沥青混合料低 30 °C~50 °C^[3]。因此,将温拌与再生技术相结合,制备温拌再生沥青混合料(warm mixed reclaimed asphalt mixture, WMRA),实现优势互补,不仅能大幅提高RAP的使用比例,而且能实现在较低温度下的拌和与压实,从而达到RAP循环利用和节能减排的双重目的。Hurley等对Sasobit在沥青温拌技术中的使用状况进行了诸多评价^[3];Wayne对温拌再生路面进行了相关研究^[4];孙吉书等通过分析温拌剂Sasobit掺入量对沥青黏度的影响,确定了混合料的拌和温度,并研究了不同RAP掺量时WMRA的各项路用性能指标^[5];李振等研究了基于Sasobit温拌剂的WRAM压实特性随压实温度和RAP掺量的变化规律^[6];纪小平等通过复合粘温曲线对再生混合料的拌和温度进行研究,建立了基于热传导的新集料加热温度计算式^[7];季节等对SMA热拌及温拌再生沥青混合料不同RAP掺量条件下进行了具体路用性能的分析^[8];张镇等对Evotherm温拌再生混合料各项性能指标进行了相关系列的研究^[9]。关于温拌再生技术,国内

外研究还处于起步阶段,各项技术评价标准尚不健全。为此,本文着重在温拌再生的拌和温度、击实成型温度和新集料加热温度的计算方法方面,以再生沥青达到70#为目标,对RAP掺配率分别为10%、30%、50%的再生混合料的新沥青和再生剂的掺配方案进行了具体确定;并由此提出了WMRA的最佳拌和温度、击实成型温度与新集料加热温度的计算方法,分别确定了5种HMRA和5种WMRA的试件制作温度;最后分别评估了HMRA和WMRA的Marshall指标和路用性能。

1 原材料和级配设计

采用离心式抽提法检测RAP中的沥青用量 $P_{ob}=4.70\%$,并分离出旧集料,技术性质见表1。采用阿普森法回收RAP中的沥青,技术指标见下页表2。新沥青为克拉玛依90#和110#基质沥青,技术指标见表2。试验用新集料为玄武岩粗集料、石灰岩细集料,填料为石灰石矿粉,技术指标如下页表3~表5所示。

表1 回收集料的技术性质

Tab. 1 Technical indexes of recycled aggregate

| 表现相对密度 | | 针片状含量/% |
|----------|----------|---------|
| ≥4.75 mm | <4.75 mm | |
| 2.652 | 2.582 | 12.5 |

选用Sasobit温拌剂^[3]。Sasobit是一种合成直链脂肪族碳氢混合物,具有降低沥青的高温粘度但又提高低温粘度的重要性质,不仅能降低混合料的施工温度,还可以提高混合料的抗车辙能力。其掺量一般为沥青质量的3%。采用深圳海川公司

表2 沥青技术性质

Tab. 2 Technical indexes of asphalts

| 沥青类型 | 针入度(25℃,100g, 5s)/0.1mm | 延度(5cm/min, 15℃)/cm | 动力粘度 (60℃)/(Pa·s) | 软化点/℃ | 密度(15℃)/ (g·cm ⁻³) |
|-----------|----------------------------|------------------------|----------------------|-------|-----------------------------------|
| 回收沥青 | 21.2 | 3.4 | 11 977.0 | 67.6 | 1.081 |
| 90# 基质沥青 | 87.8 | >150.0 | 200.8 | 45.1 | 0.987 |
| 110# 基质沥青 | 113.4 | >150.0 | 176.5 | 40.7 | 1.012 |

表3 粗集料技术性质

Tab. 3 Technical indexes of coarse aggregates

| 压碎值/% | 磨耗值/% | 表现相对密度 | | | 吸水率/% | | |
|-------|-------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| | | 10~20mm | 10~15mm | 5~10mm | 10~20mm | 10~15mm | 5~10mm |
| 17.24 | 17.58 | 2.701 | 2.698 | 2.701 | 1.25 | 1.72 | 2.04 |

表4 细集料技术性能

Tab. 4 Technical performance of fine aggregate

| 表现相对密度 | 砂当量/% | 坚固性/% | 棱角性/s |
|--------|-------|-------|-------|
| 2.718 | 71.5 | 7.3 | 47.1 |

表5 矿粉技术性能

Tab. 5 Technical performance of filler

| 相对视密度 | 塑性指数/% | 亲水系数 | 含水量/% | 粒度范围/% | | |
|-------|--------|------|-------|--------|---------|----------|
| | | | | <0.6mm | <0.15mm | <0.075mm |
| 2.727 | 3.4 | 0.7 | 0.1 | 99.9 | 88.1 | 80.9 |

生产的A型再生剂。

为考察RAP掺配率对再生混合料的影响,分别设计RAP掺配率为10%、30%、50%的AC-20型

级配,编号为R1、R3、R5。将粗、细集料筛分成单粒级再进行回配,可将掺配不同RAP比例的矿质混合料级配设计成同一级配(表6)。

表6 再生混合料的级配

Tab. 6 Design gradation of reclaimed mixtures

| 筛孔尺寸/mm | 26.5 | 19 | 16 | 13.2 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 通过率/% | 100 | 98.1 | 87.9 | 75.2 | 55.8 | 37.3 | 29.2 | 23.9 | 19.6 | 13.0 | 8.0 | 6.1 |

2 新沥青和再生剂的掺配方案

合理预估新旧沥青掺配后的再生沥青技术性能是否能满足目标沥青的要求,并判断是否需要添加专用再生剂是进行再生沥青混合料设计的关键。可采用如下方法。

(1)预估再生沥青混合料的最佳沥青用量 P_{mb}

根据RAP的掺配率、工程材料特性、气候特点、交通量等条件,结合当地的工程经验进行估计。若缺乏相关资料,可按式(1)估计

$$P_{mb} = 0.035a + 0.045b + Kc + F \quad (1)$$

式中: P_{mb} 为再生沥青混合料的预估沥青用量(%); K 为集料系数,当0.075mm筛通过率为6%~10%时, $K=0.18$,当0.075mm筛通过率小于等于5%时, $K=0.20$; a 为2.36mm以上集料的比例(%); b 为0.075~2.36mm间的集料比例(%); c 为0.075mm以下集料的比例(%); F 为集料吸水率常

数, F 为0~2.0,取决于集料的吸水率。

(2)计算新旧沥青比

按式(2)和式(3)计算新旧沥青比为

$$\frac{x_n}{x_o} = \frac{P_{mb} - P_{ob}P_i}{P_{ob}P_i} \quad (2)$$

$$x_n + x_o = 1 \quad (3)$$

式中: x_n 、 x_o 分别为新沥青和旧沥青占再生沥青质量的比例; P_{ob} 为RAP中的沥青用量(%); P_i 为RAP的掺配率(%)。

(3)预估再生沥青的标号。

在中国采用针入度分级体系,因此采用针入度预估再生沥青的标号,即^[10]

$$\ln(P_m) = x_n^{a_n} \ln(P_n) + x_o^{a_o} \ln(P_o) \quad (4)$$

式中: P_m 、 P_n 、 P_o 分别为再生沥青、新沥青和旧沥青的针入度(0.1mm); a_n 为粘度偏离指数,再生剂时取1.2,新沥青时取1.02。

(4)判断是否需要添加专用再生剂

判断再生沥青的针入度 P_m 是否满足目标标号的要求,如果不满足则需要添加专用再生剂。例如,再生沥青的标号为 70,则针入度的要求范围为 60~80(0.1 mm),如果 $P_m < 60$ 或 > 80 ,则可判断需要添加专用再生剂。

(5) 计算再生剂掺配比例

将新、旧沥青视为新沥青,再按式(4)计算确定需要的再生剂比例,以满足再生沥青的针入度达到目标标号。

按照以上方法,分别预估再生沥青用量、新旧沥青比和再生沥青针入度,结果见表 7。由表 7 可知,当 RAP 掺配率为 10% 时,90# 沥青满足要求,而 110# 沥青不满足,采用 90# 沥青再生。当 RAP 为 30% 时,90# 基质沥青再生后的沥青不满足要求,需掺入 4% 再生剂;110# 沥青满足要求,但针入度偏低,考虑采用掺入 2% 再生剂。RAP 掺配率为 50% 时,采用 90# 和 110# 基质沥青再生的沥青都不满足要求,需掺入 7% 和 5% 的再生剂。将以上满足要求的 5 种混合料分别编号为 1、2、3、4、5,并进行后续的研究。

3 掺 Sasobit 再生混合料的拌和与成型

在中国,Marshall 设计方法仍是混合料的主要设计方法,规定采用 Marshall 击实仪成型试件,要

求双面击实 75 次。混合料的拌和温度与试件击实成型温度根据沥青标号的不同而选取,见表 8^[11]。

对于掺 3% Sasobit 的 WMRA,其结合料为由新沥青、回收沥青和 Sasobit 改性剂复合而成的再生沥青,因此混合料的理论最佳拌和温度与击实成型温度应由再生沥青的粘温曲线确定,粘度为 $(170 \sim 280) \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 所对应的温度即为 WMRA 的最佳拌和与击实成型温度。另外,当采用间歇式拌和楼生产时,RAP 的预热温度通常为 110 °C,需通过新集料的热传导而达到目标拌和温度。因此,RAP 的掺配比例、含水率等都会影响所需的新集料加热温度,需要确定不同 RAP 掺配比例时的新集料加热温度。合理确定拌和温度与新集料的加热温度是 WMRA 成型的关键。

参考相关研究成果,提出 WMRA 拌和温度、新集料加热温度的确定方法如下所述。

(1) WMRA 拌和与击实成型温度的确定。由表 8 可知,对于选定的 5 种再生方案,再生沥青的针入度基本接近 70,因此可选定拌和温度为 145 °C~165 °C、击实成型温度为 135 °C~155 °C。

(2) WMRA 最佳拌和与击实成型温度的确定。任何一种温拌剂,都有基本稳定的降温幅度 ΔT ,确定

表 7 再生方案

Tab. 7 Reclaimed scheme

| 级配类型 | 预估沥青用量 $P_{mb}/\%$ | x_n/x_o | 再生沥青针入度 $P_m/0.1 \text{ mm}$ | | 是否满足 70# 沥青要求 | 是否接受 | 编号 |
|------|--------------------|-----------|------------------------------|------|---------------|------|--------------|
| | | | 90# | 74.2 | | | |
| R1 | 4.62 | 0.90/0.10 | 90# | 74.2 | 是 | 是 | R1-1 |
| | | | 110# | 93.4 | 否 | 否 | |
| R3 | 4.62 | 0.69/0.31 | 90# | 54.4 | 否 | 否 | R3-1 R3-2 |
| | | | 110# | 64.9 | 是 | 否 | |
| | | | 90# + 4% 再生剂 | 71.4 | 是 | 是 | |
| | | | 110# + 2% 再生剂 | 70.8 | 是 | 是 | |
| R5 | 4.62 | 0.49/0.51 | 90# | 40.4 | 否 | 否 | R5-1 R5-2 |
| | | | 110# | 45.8 | 否 | 否 | |
| | | | 90# + 7% 再生剂 | 71.6 | 是 | 是 | |
| | | | 110# + 5% 再生剂 | 69.4 | 是 | 是 | |

表 8 热拌普通沥青混合料试件的制作温度

Tab. 8 Relevant temperature for HMA Specimen

| 施工工序 | 石油沥青的标号 | | | | |
|--------------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 50# | 70# | 90# | 110# | 130# |
| 沥青加热温度/°C | 160~170 | 155~165 | 150~160 | 145~155 | 140~150 |
| 矿料加热温度 | 集料加热温度比沥青温度高 10 °C~30 °C (填料不加热) | | | | |
| 沥青混合料拌和温度/°C | 150~170 | 145~165 | 140~160 | 135~155 | 130~150 |
| 试件击实成型温度/°C | 140~160 | 135~155 | 130~150 | 125~145 | 120~140 |

WMRA 的最佳拌和温度 $T_{wm} = T_1 - \Delta T$, 击实成型温度 $T_{wc} = T_2 - \Delta T$ 。

(3) 新集料加热温度的确定。RAP 因新集料的热量传导而达到目标拌和温度, RAP 掺配比例越大意味着需要更高的新集料加热温度, 新集料的加热温度计算式为^[9]

$$T_a = T_{wm} + \frac{C_R P_R (T_{wm} - T_R) + C_f P_f (T_{wm} - T_f)}{(0.0078r + 0.504)C_a P_a} \quad (5)$$

式中: T_a 为新集料的加热温度($^{\circ}\text{C}$); P_a 、 P_R 、 P_f 分别为新集料、RAP、矿粉的质量分数(%); C_a 、 C_R 、 C_f 分别为新集料、RAP、矿粉的比热容($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$); T_R 、 T_f 分别为 RAP、矿粉的初始温度($^{\circ}\text{C}$); r 为 RAP 的掺配比例(%).

按照上述方法, 确定本文成型 WMRA 试件的新集料加热温度、混合料拌和与击实成型温度, 步骤如下所述。

(1) 按表 8, 确定再生沥青混合料的拌和与击实成型温度为 155°C 和 145°C 。

(2) Sasobit 的降温幅度 ΔT 为 $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ ^[12], 本文将 Sasobit 的降温幅度 ΔT 取 15°C , 则 WMRA 的拌和与击实成型温度为 140°C 和 130°C 。

(3) 结合目标拌和温度, 采用式(5)计算新集料的加热温度。

最终确定的温度结果如表 9 所示, 按照表 9 中的温度进行新集料的加热、混合料的拌和与成型。

表 9 混合料的拌和与击实成型温度、新集料加热温度

Tab. 9 Mixing and compaction temperature of mixtures and heating temperature of new aggregate

| 混合料类型 | 编号 | 拌和温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 击实成型温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 集料加热温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|-------|--------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| HMRA | R1-1-H | 155 | 145 | 178 |
| | R3-1-H | 155 | 145 | 198 |
| | R3-2-H | 155 | 145 | 198 |
| | R5-1-H | 155 | 145 | 228 |
| | R5-2-H | 155 | 145 | 228 |
| WMRA | R1-1-W | 140 | 130 | 158 |
| | R3-1-W | 140 | 130 | 171 |
| | R3-2-W | 140 | 130 | 171 |
| | R5-1-W | 140 | 130 | 191 |
| | R5-2-W | 140 | 130 | 191 |

4 Marshall 指标及路用性能评估

按照确定的拌和温度、击实成型温度和新集料加热温度, 进行混合料的拌和与成型, 测试 Marshall 指标, 并进行路用性能试验。

4.1 Marshall 指标

按预估的沥青用量 $P_{mb} = 4.64\%$ 成型 Marshall 试件, 测试试件的相对毛体积密度(γ), 并计算空隙率(VV)、矿料间隙率(VMA)和沥青饱和度(VFA), 结果见表 10。由表 10 可知: ①当 RAP 比例为 10% 时, 集料加热温度较低, HRAM 和 WRAM 的 VV 分别为 3.9% 和 3.8% , 说明两者具有一致的密实度, 表面 Sasobit 的降温幅度在 15°C 左右; ②随着 RAP 比例的增加, HRAM 和 WRAM 的 VV 均增加, 且 HRAM 的 VV 的增加幅度较大, 这是因为随着新集料加热温度的提高, 沥青老化趋于严重, 使得沥青的流动性大大降低, 影响混合料的和易性; ③当 RAP 比例相同时, HRAM 的 VV 高于 WRAM, 这是因为 HRAM 要求的集料加热温度过高, 导致沥青老化, 进而影响了混合料的和易性。

表 10 混合料的体积参数

Tab. 10 Volume parameters of mixtures

| 混合料编号 | 集料加热温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 相对最大理论密度 | γ | VV/% | VMA/% | VFA/% |
|--------|----------------------------|----------|----------|------|-------|-------|
| R1-1-H | 178 | 2.4973 | 2.399 | 3.9 | 13.3 | 70.5 |
| R3-1-H | 198 | 2.4899 | 2.380 | 4.4 | 13.7 | 67.7 |
| R3-2-H | 198 | 2.4899 | 2.375 | 4.6 | 13.8 | 66.7 |
| R5-1-H | 228 | 2.4841 | 2.337 | 5.9 | 15.1 | 60.6 |
| R5-2-H | 228 | 2.4841 | 2.345 | 5.6 | 14.8 | 62.1 |
| R1-1-W | 158 | 2.4973 | 2.402 | 3.8 | 13.2 | 71.0 |
| R3-1-W | 171 | 2.4899 | 2.391 | 4.0 | 13.3 | 70.0 |
| R3-2-W | 171 | 2.4899 | 2.397 | 3.7 | 13.0 | 71.5 |
| R5-1-W | 191 | 2.4841 | 2.377 | 4.3 | 13.6 | 68.4 |
| R5-2-W | 191 | 2.4841 | 2.380 | 4.2 | 13.5 | 68.9 |

4.2 HRMA 与 WRMA 的路用性能评估

对上述 HMRA 与 WMRA 具体 10 种混合料分别进行车辙试验、低温弯曲试验、残留稳定度试验和冻融劈裂试验, 对比评价高温性能、低温性能和水稳定性。

4.2.1 车辙试验

在中国, 采用轮辙试验机 Loaded Wheel Testers (LWTs) 测试混合料的高温性能, 试验温度为 60°C 、轮压为 0.7MPa 、试验时间为 60min 、加载速率为 $42\text{次}/\text{min}$, 并采用动稳定度评价为^[13]

$$I_{DS} = \frac{(t_2 - t_1)}{d_2 - d_1} NC_1 C_2 \quad (6)$$

式中: I_{DS} 为 DS 的计算参数; DS 为沥青混合料的动稳定度(次/mm); d_1 为对应时间 t_1 (45min) 的变形量(mm); d_2 为对应时间 t_2 (60min) 的变形量(mm); N 为试验轮往返碾压速度, 通常为 $42\text{次}/\text{min}$; C_1 、 C_2 分

别为试验机类型系数和试件系数,分别取 1.0。分别对 HRAM 和 WRAM 的 10 种混合料进行车辙试验,60 min 的变形 D_{60} 和 DS 如图 1、图 2 所示。

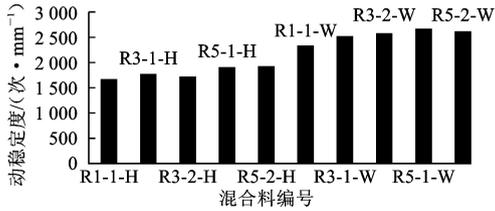


图 1 混合料动稳定度试验结果

Fig. 1 Dynamic stability results of mixtures

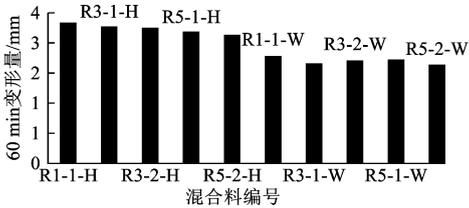


图 2 混合料 60 min 变形试验结果

Fig. 2 Deformation test results of mixtures in 60 min

由图 1、图 2 可得如下结论。

(1)随着 RAP 比例的升高, HMRA 与 WMRA 的 DS 均略微增加,在再生沥青标号一致的情况下,该现象由沥青的老化引起,沥青老化后轻质油挥发,沥青质含量随之增大,使得沥青的粘度随着 RAP 比例的增加而增大。

(2) HMRA 与 WMRA 的 DS 均值分别为 1 779.3、2 529.4 次/mm, WMRA 的 DS 较 HRAM 提高了 29.7%,说明 Sasobit 提高了沥青的低温粘度,进而提高了混合料的高温性能,可见温拌再生沥青混合料具有较高的抗车辙能力,高温稳定性好。

(3)所有混合料的 DS 都大于 1 000 次/mm,满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求。

4.2.2 低温弯曲试验

低温性能是指沥青混合料在低温条件下抵抗低温收缩裂缝的能力。可采用低温弯曲试验的弯拉强度 R_B 、弯曲破坏应变 ϵ_B 和劲度模量 S_B 评价,按照式(7)~式(9)计算

$$R_B = \frac{3LP_B}{2b_L h^2} \quad (7)$$

$$\epsilon_B = \frac{6hd}{L^2} \quad (8)$$

$$S_B = \frac{R_B}{\epsilon_B} \quad (9)$$

式中: b_L 为跨中断面试件的宽度(mm); h 为跨中断面试件的高度(mm); L 为试件的跨度(mm); P_B 为

试件破坏时的最大荷载(N); d 为试件破坏时的跨中挠度(mm); R_B 为小梁试件破坏时的弯拉强度(MPa); ϵ_B 为小梁试件破坏时的弯曲破坏应变; S_B 为小梁试件的弯曲劲度模量(MPa)。

采用 MTS 试验机系统进行混合料的低温性能试验,试验温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、加载速率为 50 mm/min。试验过程中当小梁的弯拉强度 R_B 达到最大时认为试件已经破坏。根据试样尺寸可求得小梁破坏时的弯拉强度 R_B 、弯曲破坏应变 ϵ_B 和劲度模量 S_B , HRAM 和 WRAM 的 10 种混合料试验结果如图 3~图 5 所示。

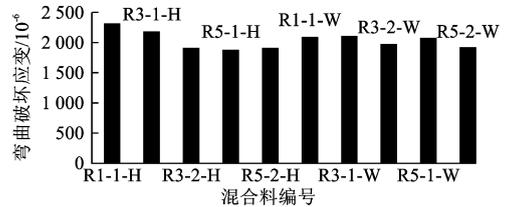


图 3 弯曲破坏应变试验结果

Fig. 3 Bending strain

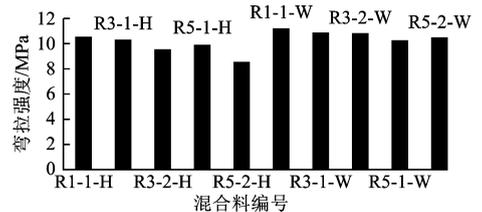


图 4 弯拉强度试验结果

Fig. 4 Flexural strength

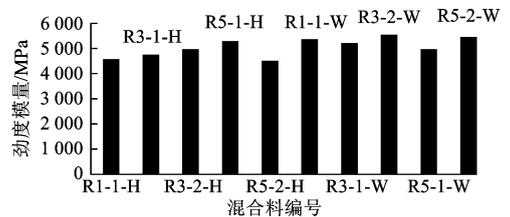


图 5 劲度模量试验结果

Fig. 5 Flexural modulus

由图 3~图 5 可得如下结论。

(1)随着 RAP 掺加比例的升高, HMRA 与 WMRA 的最大弯曲破坏应变均逐渐减小,弯拉强度略微增加。这主要由于废旧沥青的老化,致使新、旧沥青混合后的沥青延度降低,这与 RAP 添加比例成正比,随着 RAP 掺量的增加, HMRA 与 WMRA 的最大弯曲破坏应变均逐渐减小。这表明 HMRA 与 WMRA 的低温抗裂性能均随着 RAP 掺量的增加而降低。

(2) HMRA 与 WMRA 的弯拉强度均值分别为

9.72 MPa 和 10.71 MPa,说明 Sasobit 提高了混合料的弯拉强度。

(3) 相同 RAP 掺加比例情况下,WMRA 中 Sasobit 温拌剂的掺入,相比 HMRA,能降低新集料的加热温度,减弱沥青老化,进而能降低混合料的 VV,WMRA 的低温性能因此相应有一定提高,但未改变 HRMA 与 WRMA 的低温抗裂性能随着 RAP 掺量的增加而降低的规律。

(4) WMRA 中温拌剂 Sasobit 属于石蜡基材料,材料本身对再生混合料的低温性能有少量损伤。

4.2.3 水稳定性

沥青混合料的水稳定性是指在水分作用下抵抗集料脱落和混合料松散的能力。规范^[13]采用残留稳定度和冻融劈裂强度比(TSR)评价,两者越大表示水稳定性越好。对 HMRA 与 WMRA 的 10 种混合料进行水稳定性试验,结果如图 6、图 7 所示。

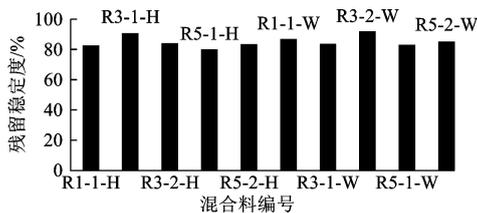


图 6 残留稳定度试验结果

Fig. 6 Residual stability degree

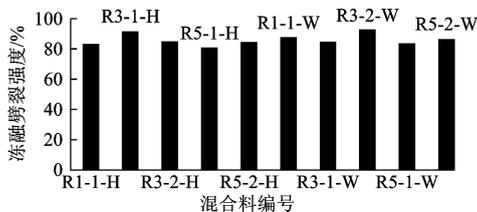


图 7 冻融劈裂强度试验结果

Fig. 7 Freeze-thaw strength ratio

由图 6、图 7 可知:①随着 RAP 掺加比例的升高,HMRA 与 WMRA 的残留稳定度和冻融劈裂强度没有显著的变化规律,但所有沥青混合料都能满足残留稳定度大于等于 80% 和冻融劈裂强度大于等于 75% 的要求;②在相同 RAP 掺量下,HMRA 与 WMRA 的残留稳定度相当,WMRA 的冻融劈裂强度比 HMRA 略高,HMRA 与 WMRA 的水稳性能基本接近。

5 结语

(1) 提出了 HMRA 和 WMRA 的拌和温度、击实成型温度和新集料加热温度的计算方法。

(2) 当 RAP 掺配比例较小时,WMRA 和 HM-

RA 的空隙率非常接近,得出 Sasobit 的降温幅度在 15℃ 左右。

(3) 随着 RAP 比例的提高,WMRA 和 HMRA 的新集料加热温度逐渐提高,沥青老化程度增加,进而导致混合料的性能发生变化,空隙率和动稳定度增大,低温弯曲应变降低。

(4) Sasobit 温拌剂的掺入,一方面能降低新集料的加热温度,减弱沥青老化,进而能降低混合料的空隙率,并提高低温性能;另一方面,Sasobit 本身能提高沥青的低温粘度,进而能提高混合料的高温性能;另外,Sasobit 属于石蜡基材料,对混合料的低温性能有损伤。

(5) 所有的 WMRA 的高温性能和水稳定性均满足中国规范要求,部分混合料的低温性能稍低于规范要求。

参考文献:

References:

- [1] Zhu J Q, Wu S P, Zhong J J, et al. Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29(4): 466-475.
- [2] 徐世法,徐立庭,郑伟,等.热再生沥青混合料新技术及其发展展望[J].筑路机械与施工机械化,2013, 30(6): 39-43.
XU Shi-fa, XU Li-ting, ZHENG Wei, et al. Development and outlook of technology of hot recycling of reclaimed asphalt pavement [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(6): 39-43. (in Chinese)
- [3] Hurley G C, Prowell B D. Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt[R]. Auburn: Auburn University, 2005.
- [4] Wayne J. Warm mix asphalt pavement[J]. Technology of the Future Asphalt Magazine Fall, 2004, 22(3): 12-16.
- [5] 孙吉书,肖田,杨春风,等.温拌再生沥青混合料的路用性能研究[J].重庆交通大学学报,2011, 30(2): 250-253.
SUN Ji-shu, XIAO Tian, YANG Chun-feng, et al. On properties of warm mix recycled asphalt mixture in highway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2011, 30(2): 250-253. (in Chinese)
- [6] 李振,徐世法,罗晓辉,等.温拌再生沥青混合料压实特性评价[J].北京建筑工程学院学报,2010, 26(1): 14-19.

- LI Zhen, XU Shi-fa, LUO Xiao-hui, et al. Evaluation of compaction characteristics of warm-recycled asphalt mixture[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2010, 26(1): 14-19. (in Chinese)
- [7] 纪小平, 郑南翔, 杨党旗, 等. 基于复合粘温曲线的热再生沥青混合料拌和温度研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 16-22.
- JI Xiao-ping, ZHENG Nan-xiang, YANG Dang-qi, et al. Research on mixing temperature of hot-recycled asphalt mixture based on composite curve of viscosity temperature [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 16-22. (in Chinese)
- [8] 季节, 徐世法. SMA 温拌再生沥青混合料性能试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(5): 28-33.
- JI Jie, XU Shi-fa. Experimental research on performance of warm-recycled mixture asphalt with SMA[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(5): 28-33. (in Chinese)
- [9] 张镇, 刘黎萍, 汤文. Evotherm 温拌沥青混合料性能研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(4): 438-441.
- ZHANG Zhen, LIU Li-ping, TANG Wen. Research on performance of Evotherm warm mix asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(4): 438-441. (in Chinese)
- [10] 郑南翔, 侯月琴, 纪小平. 老化沥青再生性能的预估分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(3): 6-10.
- ZHENG Nan-xiang, HOU Yue-qin, JI Xiao-ping. Prediction analysis of recycled performance of aged asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3): 6-10. (in Chinese)
- [11] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S]. JTG F40—2004, Technical specification for construction of highway asphalt pavements[S]. (in Chinese)
- [12] 张久鹏, 裴建中, 徐丽, 等. 温拌 SBS 沥青混合料旋转压实特性[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(1): 1-6.
- ZHANG Jiu-peng, PEI Jian-zhong, XU Li, et al. Gyrotory compaction characteristic of SBS warm mixed asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 1-6. (in Chinese)
- [13] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. JTG E20—2011, Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. (in Chinese).

(上接第 12 页)

- 辙关键因素的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(1): 58-61.
- WU Rui-lin, SHI Li-wan, YU Hai-yang, et al. Total thickness rutting research on key influencing factors of asphalt pavement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(1): 58-61. (in Chinese)
- [4] 关宏信, 张起森. 全厚式沥青面层车辙控制标准探讨[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 124-129.
- GUAN Hong-xin, ZHANG Qi-sen. Rut control standard for asphalt surface total-thickness samples[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(9): 124-129. (in Chinese)
- [5] 关宏信, 张起森. 考虑温度梯度沥青路面面层全厚式车辙试验[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 143-147.
- GUAN Hong-xin, ZHANG Qi-sen. Total-thickness laboratory rut tests for asphalt surface course under temperature gradient [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(6): 143-147. (in Chinese)
- [6] 鲁正兰. 沥青路面车辙预估方法的研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- LU Zheng-lan. Research on asphalt pavement rutting prediction method[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [7] Liu P F, Wang D W, Oeser M. Application of semi-analytical finite element method coupled with infinite element for analysis of asphalt pavement structural response[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2015, 2(1): 48-58.
- [8] 苏凯. 沥青路面车辙产生机理及预估方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- SU Kai. Study on rutting mechanism and prediction method[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [9] 张久鹏. 基于粘弹性损伤理论的沥青路面车辙研究[D]. 南京: 东南大学, 2008.
- ZHANG Jiu-peng. Research on rutting of asphalt pavement based on viscoelastic-damage mechanics theory[D]. Nanjing: Dongnan University, 2008. (in Chinese)
- [10] 刘建勋, 聂满意, 王选仓, 等. 沥青玛蹄脂碎石混合料高温抗车辙性能试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(2): 45-47.
- LIU Jian-xun, NIE Man-yi, WANG Xuan-cang, et al. Experimental study on high-temperature rutting resistance performance of SMA[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(2): 45-47. (in Chinese)
- [11] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- LIAO Gong-yun, HUANG Xiao-ming. Application of ABAQUS finite element software in highway engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008. (in Chinese)