

# 温拌再生沥青混合料的温度控制方法及路用性能

侯月琴<sup>1</sup>, 许 辉<sup>2</sup>, 纪小平<sup>1</sup>

(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. 甘肃省公路管理局, 甘肃 兰州 730030)

**摘 要:**为解决温拌再生沥青混合料(WMRA)设计与施工过程中的温度控制问题,提出了掺入 Sasobit 的 WMRA 的拌和与成型温度、新集料加热温度的确定方法,对 WMRA 和热拌再生沥青混合料(HMRA)进行 Marshall 试验、浸水车辙试验、低温弯曲试验和水稳定性试验,对比分析 WMRA 和 HMRA 的空隙率(VV)和路用性能。研究表明:提出的方法能够准确计算 WMRA 的拌和温度、成型温度和新集料加热温度;当再生利用废旧沥青路面材料(RAP)掺配比例较小且降低 13 ℃成型时,WMRA 与 HMRA 具有接近的空隙率,说明 Sasobit 的降温幅度约为 13 ℃,能提高 RAP 的掺配比例近 10.3%;与 HMRA 相比,WMRA 具有更优的高温稳定性,具有相近的低温弯曲应变、残留稳定度和冻融劈裂强度比;WMRA 和 HMRA 高温稳定性和低温抗弯拉强度均随着 RAP 比例的提高而增加,而低温弯曲应变、残留稳定度和冻融劈裂强度比均随着 RAP 比例的提高而降低。

**关键词:**道路工程;沥青混合料;温拌;再生;温度控制;路用性能

**中图分类号:**U414.75

**文献标志码:**A

## Temperature control method and road performance of warm mixed reclaimed asphalt mixture

HOU Yue-qin<sup>1</sup>, XU Hui<sup>2</sup>, JI Xiao-ping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Gansu Province Administration Bureau of Highway, Lanzhou 730030, Gansu, China)

**Abstract:** This paper is aimed to solve the temperature control problem of warm mixed reclaimed asphalt mixture (WMRA) in the process of design and construction. A method was proposed for determining the mixing and compaction temperature of WMRA blending with Sasobit, and also for heating temperature of the new aggregates. The laboratory experiments including Marshall test, soaking rutting test, low temperature bending test and water stability test were utilized for analyzing the air void (VV) and road performance. The results show that the mixing and compaction temperature and heating temperature of new aggregates can be accurately determined by the proposed method for WMRA. The VV of WMRA compacted at the temperature lower than 13 ℃ is approaching to HMRA when the proportion of RAP is much smaller, which indicates the Sasobit can reduce compaction temperature by 13 ℃, and significantly improve the blending ratio of RAP by 10.3%. WMRA has better high-temperature stability than HMRA, and the low-temperature bending strain, residual stability degrees and TSR are approximately equal between WMRA

and HMRA. The high-temperature stability and low-temperature flexural tensile strength of WMRA and HMRA increase as the RAP increases, but the low-temperature bending strain, residual stability degree and TSR decrease. 9 tabs, 7 figs, 12 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt mixture; warm-mixed; reclaim; temperature control; road performance

0 引言

路面再生技术是一种绿色交通技术,它能循环再生利用废旧沥青路面材料(Recycled Asphalt Pavement, RAP) [1-3]。目前,国际上已形成了一套完整的再生混合料设计、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,如提高 RAP 的掺配比例和降低回收沥青的二次老化。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[4-5]。而温拌沥青混合料(WMA)能在相对较低的温度下进行拌和与施工,一般情况下比普通热拌沥青混合料(HMA)可以降低施工温度 20 ℃~30 ℃,且具有与 HMA 相当的施工和易性与路用性能[6-7]。因此,将温拌与再生技术相结合,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[8-9]。温拌再生沥青混合料(WMRA)是一种新型的环保型材料,国内外仍处于探索阶段。

为此,本文通过室内试验和理论分析,展开 WMRA 成型温度确定和路用性能的研究,为 WMRA 设计与施工过程的温度控制提供参考,推广 WMRA 的应用。

1 原材料和级配设计

RAP 由二级公路面层铣刨得到,为基质沥青混合料。对 RAP 进行抽提筛分,并采用阿布森法回收抽提液中的老化沥青,检测 RAP 中旧集料、回收沥青的技术性质,结果见表 1、表 2。

采用玄武岩粗集料和石灰岩机制砂,经检测技

表 1 回收集料的技术性质

表观相对密度		针片状质量分数/%	压碎值/%	与沥青的粘附性
≥4.75 mm	<4.75 mm			
2.652	2.582	12.5	20.5	4

表 2 沥青技术性质

Tab. 2 Technical indexes of asphalts

沥青种类	25 ℃针入度/0.1 mm	15 ℃延度/cm	软化点/℃	15 ℃密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
回收沥青	21.2	3.4	67.6	1.081
KLMY90 <sup>#</sup>	87.8	161.3	45.1	0.987

术指标满足中国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG P40—2004)的相关要求[10]。为了精确设计级配,将集料筛分成单一粒径,各粒级的密度和吸水率如表 3 所示。

表 3 不同粒径集料的密度

Tab. 3 Densities of aggregates with different sizes

粒径/mm	表观相对密度	毛体积相对密度	吸水率/%
16.00~19.00	2.786	2.724	0.42
13.20~16.00	2.775	2.713	0.48
9.50~13.20	2.798	2.747	0.64
4.75~9.50	2.762	2.701	0.85
2.36~4.75	2.711	2.688	0.77
1.18~2.36	2.703	2.675	0.89
0.60~1.18	2.727	2.691	0.93
0.30~0.60	2.814	2.755	1.17
0.15~0.30	2.868	2.832	0.99

选用 Sasobit 温拌剂,它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和提高低温粘度的重要性质,因此它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% [11]。

新沥青为克拉玛依 90 号基质沥青(KLMY 90<sup>#</sup>),技术指标见表 2。采用布氏旋转粘度计测试 KLMY90<sup>#</sup>,回收沥青和掺 3% Sasobit 的改性 KLMY90<sup>#</sup> 沥青(称为 Sasobit 改性沥青)在不同温度下的粘度,结果见表 4。

表 4 沥青粘度

Tab. 4 Viscosities of asphalts

沥青类型	不同温度(℃)下的沥青粘度/(MPa·s)				
	120	135	150	165	180
新沥青	1 005.7	422.1	245.1	154.7	85.7
回收沥青	23 830.0	7 763.3	3 833.0	2 181.3	849.9
掺 3% Sasobit	742.8	271.5	123.4	78.7	47.9

选用 AC-16 型混合料,RAP 掺配比例分别为 10%、30%和 50%。将粗、细集料筛分成单粒级再进行回配,可将掺不同 RAP 比例的矿质混合料设计成同一级配,如下页表 5、表 6 所示。采用马歇尔仪成型试件,经确定掺 30% RAP 再生混合料的最佳油石比为 4.8%。考虑到沥青老化对最佳沥青用量的影响较小,文中掺不同 RAP 比例的再生混合料的油石比统一采用 4.8%。

表 5 旧集料的级配  
Tab. 5 Gradation of recycled aggregate

筛孔尺寸/mm	19	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	97.0	93.4	83.6	62.3	42.7	32.0	26.3	17.9	10.5	5.5

表 6 再生混合料的设计级配  
Tab. 6 Design gradation of reclaimed mixtures

筛孔尺寸/mm	19	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	97.5	87.4	66.4	44.5	32.3	23.4	18.2	13.0	9.7	6.3

2 WMRA 拌和与成型温度的确定方法

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,因其最佳拌和与成型温度应由再生沥青的粘温曲线确定,粘度分别为 170、280 MPa·s 所对应的温度即为 WMRA 的最佳拌和与成型温度。另外,当采用间歇式拌和生产 WMRA 时,RAP 的预热温度通常为 110℃,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。

参考相关研究成果,提出 WMRA 拌和与成型温度、新集料加热温度的确定方法。

Steps 1: WMRA 拌和与成型温度的确定。WMRA 的最佳拌和与成型温度由再生沥青的复合粘温曲线确定。对于由新沥青、回收沥青和 Sasobit 改性剂复合而成的再生沥青,可以看成由 Sasobit 改性沥青和回收沥青复合而成,复合粘温曲线见式(1)。采用式(1)计算粘度为(170±20) MPa·s、(280±30) MPa·s 所对应的温度为 WMRA 的最佳拌和温度  $T_m$  与成型温度  $T_c$ 。

$$\lg[\lg(\eta_m)] = x[a_0 - b_0 \lg(273 + T)] + (1 - x)[a_s - b_s \lg(273 + T)] \quad (1)$$

式中: $\eta_m$  为再生沥青的粘度(MPa·s); $T$  为温度(℃); $a_0$ 、 $b_0$  为回收沥青的粘温参数; $a_s$ 、 $b_s$  为 Sasobit 改性沥青的粘温参数; $x$  为回收沥青占再生沥青质量的比例。

Step 2: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,采用式(2)计算新集料的加热温度。

$$T_a = T_m + \frac{C_R P_R (T_w - T_R) + C_f P_f (T_w - T_f)}{(0.0078r + 0.504)C_a P_a} \quad (2)$$

式中: $T_a$  为新集料的加热温度(℃); $P_a$ 、 $P_R$ 、 $P_f$  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(kJ/(kg·℃)); $T_R$ 、 $T_f$  分别为 RAP、矿粉的初始温度(℃); $r$  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、混合料拌和与成型温度,叙述如下。

(1)根据沥青粘度测试结果,确定新沥青、Sasobit 改性沥青、回收沥青的粘温曲线,采用双对数形式,如式(3)~式(5)<sup>[12]</sup>。

$$\lg[\lg(\eta_n)] = 8.237 - 2.9921\lg(273 + T) \quad (3)$$

$$\lg[\lg(\eta_s)] = 10.11 - 3.7251\lg(273 + T) \quad (4)$$

$$\lg[\lg(\eta_o)] = 7.619 - 2.6901\lg(273 + T) \quad (5)$$

式中: $\eta_n$ 、 $\eta_s$ 、 $\eta_o$  分别为新沥青、Sasobit 改性沥青、回收沥青的粘度。

(2)当 RAP 掺配比例分别为 10%、30%和 50%时,再生混合料中 Sasobit 改性沥青(或新沥青)与旧沥青的比例分别为:0.9:0.1、0.71:0.29、0.51:0.49。结合式(1)、式(3)和式(4),进一步推导再生沥青的复合粘温曲线,如表 7 所示。

表 7 再生沥青的粘温曲线  
Tab. 7 Viscosity-temperature curves of reclaimed asphalt

混合料类型	粘温参数		粘温曲线
	$a$	$b$	
WMRA-0	10.110	3.725	$\lg[\lg(\eta)] = 10.11 - 3.725\lg(273 + T)$
WMRA-10	9.866	3.624	$\lg[\lg(\eta)] = 9.866 - 3.624\lg(273 + T)$
WMRA-30	9.380	3.421	$\lg[\lg(\eta)] = 9.380 - 3.421\lg(273 + T)$
WMRA-50	8.889	3.218	$\lg[\lg(\eta)] = 8.889 - 3.218\lg(273 + T)$
HMRA-0	8.237	2.992	$\lg[\lg(\eta)] = 8.237 - 2.992\lg(273 + T)$
HMRA-10	8.177	2.962	$\lg[\lg(\eta)] = 8.177 - 2.962\lg(273 + T)$
HMRA-30	8.056	2.903	$\lg[\lg(\eta)] = 8.056 - 2.903\lg(273 + T)$
HMRA-50	7.934	2.844	$\lg[\lg(\eta)] = 7.934 - 2.844\lg(273 + T)$

(3)根据复合粘温曲线计算粘度分别为 170、280 MPa·s 所对应的温度,得到 WMRA 和 HMRA 的拌和与成型温度。

(4)结合目标拌和温度,根据式(2)计算新集料的加热温度。

最终确定的温度结果见下页表 8,由结果可知:  
(1)WMRA 的拌和温度较 HMRA 的降低

14 ℃~16 ℃、成型温度降低 12 ℃~14 ℃；

(2)为降低沥青的二次老化,一般要求新集料的加热温度不超过 220 ℃,进一步计算可确定当不掺加温拌剂时 RAP 的最大掺配比例为 21.9%,掺 Sasobit 时 RAP 的最大掺配比例则可提高到 32.2%,提高幅度达 10.3%。

表 8 混合料的拌和与成型温度、新集料加热温度

Tab. 8 Mixing and compaction temperatures of mixtures and heating temperatures of new aggregates

混合料类型	拌和温度/℃	成型温度/℃	集料加热温度/℃
WMRA-0	144	134	156
WMRA-10	150	140	171
WMRA-30	163	151	212
WMRA-50	178	165	285
HMRA-0	160	147	173
HMRA-10	166	152	192
HMRA-30	178	164	239
HMRA-50	192	177	319

3 WMRA 的体积参数分析

按照确定的新集料加热温度、混合料的拌和温度与成型温度成型 Marshall 试件,测试试件的相对毛体积密度( $\gamma$ ),并计算混合料的空隙率(VV)、矿料间隙率(VMA)和沥青饱和度(VFA),结果见表 9。重点分析空隙率的变化规律,如图 1 所示。分析结果如下所述。

(1)当 RAP 掺配比例为 0 和 10%时,WMRA 和 HMRA 的 VV 差值均为 0.2%,两者接近,说明 WMRA 在低约 13 ℃下成型能获得与 HMRA 一致的密实度,Sasobit 的降温幅度在 13 ℃左右,与通过粘温曲线确定的降温幅度一致。

(2)当 RAP 比例为 30%和 50%时,WMRA 和 HMRA 的 VV 差距逐渐拉大,达到 0.5%和 0.7%。这是因为成型 HMRA 时的新集料温度较高,引起了沥青老化,导致混合料和易性变差且难以密实。

表 9 混合料的体积参数

Tab. 9 Volume parameters of mixtures

混合料类型	相对最大理论密度	$\gamma$	VV/%	VMA/%	VFA/%
WMRA-0	2.561	2.468	3.6	12.4	70.1
WMRA-10	2.552	2.455	3.8	12.5	69.6
WMRA-30	2.483	2.381	4.1	14.6	72.1
WMRA-50	2.458	2.333	5.0	15.9	68.0
HMRA-0	2.561	2.463	3.8	12.6	69.6
HMRA-10	2.552	2.450	4.0	12.7	68.4
HMRA-30	2.483	2.369	4.6	15.1	69.5
HMRA-50	2.458	2.314	5.7	16.4	65.4

(3)随着 RAP 比例的提高,WMRA 和 HMRA 的 VV 都逐渐增大;当 RAP 比例相同时,HMRA 的 VV 高于 WMRA,这都是由新集料加热温度过高导致沥青老化引起的。

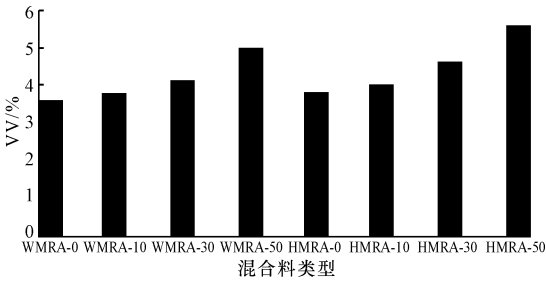


图 1 不同混合料的空隙率  
Fig. 1 VV of asphalt mixtures

4 WMRA 的路用性能

分别对上述 8 种混合料进行浸水车辙试验、低温弯曲试验、残留稳定度和冻融劈裂试验,考察 WMRA 的高温性能、低温性能和水稳定性。

高温稳定性是指沥青混合料在夏季高温条件下抵抗交通荷载挤压和推移的能力,中国规范采用 60 ℃车辙试验的动稳定度(Dynamic Stability,简称 DS)评价。为了全面评价沥青混合料的高温稳定性,本文将试验条件改为在 60 ℃的水浴中,进行浸水车辙试验,以充分模拟夏季高温多雨的路面车辙。浸水车辙试验结果如图 2 所示。

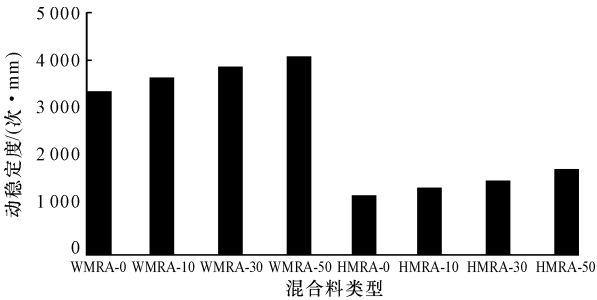


图 2 浸水车辙试验结果  
Fig. 2 Test results of soaking rutting

由图 2 可得以下结论。

(1)WMRA 的 DS 均值是 HMRA 的 2.54 倍,说明 Sasobit 虽然降低了沥青的高温粘度,但也提高了沥青的低温粘度和混合料的高温性能。

(2)随着 RAP 比例的提高,WMRA 和 HMRA 的 DS 逐渐提高,掺 50%RAP 的混合料比不掺配 RAP 的混合料提高了 18.0%和 29.5%,说明 RAP 比例对高温性能影响显著。随着 RAP 比例的提高,回收沥青在再生沥青的比例逐渐提高,导致再生

沥青的粘度逐渐提高,进而提高了高温性能。

采用 UTM-25 伺服试验机系统测试混合料的低温性能,试验温度  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、加载速率  $50\text{ mm/min}$ 。试验过程中当小梁的弯拉强度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弯拉强度、弯拉应变和弯曲劲度模量,结果如图 3~图 5 所示。

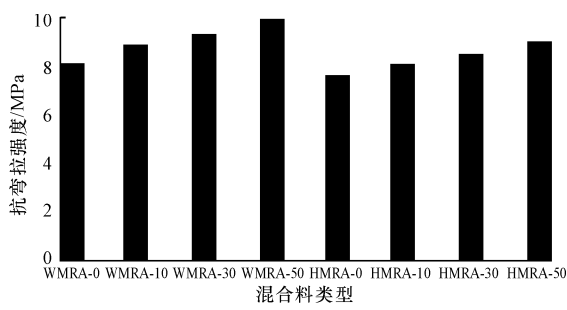


图 3 弯拉强度试验结果

Fig. 3 Test results of flexural tensile strength

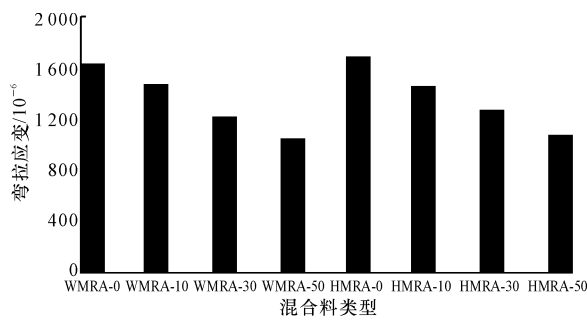


图 4 弯曲应变试验结果

Fig. 4 Test results of bending strain

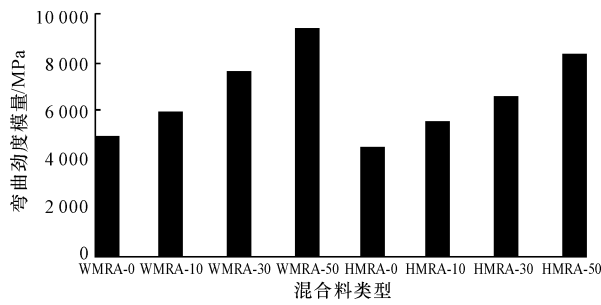


图 5 弯曲劲度模量试验结果

Fig. 5 Test results of bending stiff modulus

从图 3~图 5 可以得出如下结论。

(1)WMRA 的抗弯拉强度的均值较 HMRA 高 8.9%,说明 Sasobit 提高了混合料在低温条件下抵抗荷载破坏的能力;WMRA 和 HMRA 的抗弯拉强度随着 RAP 比例的增加而提高,说明抗弯拉强度与沥青粘度有一定的关系。

(2)WMRA 的弯拉应变的均值较 HMRA 低 2.0%,说明 Sasobit 降低了混合料在低温条件下抵抗变形的能力,但影响不是很大;WMRA 和 HM-

RA 的破坏弯曲应变均随着 RAP 比例的提高而降低,50%RAP 的混合料比不掺配 RAP 的混合料降低了 54.3%和 57.4%,说明 RAP 比例对弯曲应变影响显著。

混合料的水稳定性采用浸水马歇尔残留稳定度及冻融劈裂强度比(TSR)来评价。残留稳定度即为马歇尔试件放入( $60\pm 1$ )  $^{\circ}\text{C}$  的恒温水箱中浸泡 48 h 后所得的稳定度值,TSR 即为经受冻融循环后马歇尔试件的劈裂强度与未经受冻融循环的强度比。试验结果如图 6、图 7 所示。

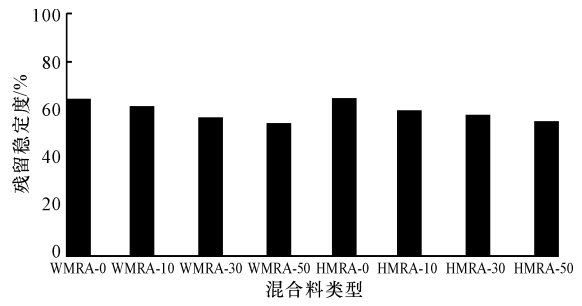


图 6 残留稳定度试验结果

Fig. 6 Test results of residual stability

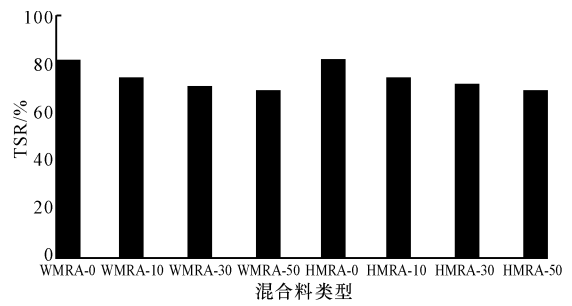


图 7 TSR 试验结果

Fig. 7 Test results of TSR

由图 6、图 7 可得如下结论。

(1)WMRA 和 HMRA 的残留稳定度的均值分别为 77.9%和 77.8%,TSR 均值分别为 73.5%和 74.0%,说明 2 种混合料的水稳定性接近。

(2)WMRA 和 HMRA 的残留稳定度和 TSR 均随着 RAP 比例的提高而降低。掺 50%RAP 的 WMRA 较不掺 RAP 的残留稳定度和 TSR 分别降低了 18.0%和 14.5%,掺 50%RAP 的 HMRA 较不掺 RAP 的残留稳定度和 TSR 分别降低 16.8%和 15.0%。

## 5 结 语

(1)提出的方法能准确地计算掺不同比例 RAP 的 WMRA 的拌和温度、成型温度和新集料加热温度。

(2) Sasobit 的降温度幅度达 13 ℃ 左右, 大幅提高了 RAP 的掺配比例。

(3) 随着 RAP 比例的提高, WMRA 和 HMRA 的 VV 都逐渐增大, 且 HMRA 的 VV 高于 WMRA, 这是由新集料加热温度逐渐导致沥青老化引起的。

(4) 比起 HMRA, WMRA 具有更优的高温稳定性, 具有相近的低温性能和水稳定性。

(5) WMRA 和 HMRA 的高温稳定性和低温抗弯拉强度随着 RAP 比例的提高而增加, 而低温弯曲应变、残留稳定性和 TSR 均随着 RAP 比例的提高而降低。

(6) WMRA 的疲劳等长期性能需要进一步展开研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] Zhu J Q, Wu S P, Zhang J J, et al. Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29(3): 466-475.
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 杨毅文, 马涛, 卞国剑, 等. 老化沥青热再生有效再生率检测方法[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(3): 418-422.  
YANG Yi-wen, MA Tao, BIAN Guo-jian, et al. Proposed testing procedure for estimation of effective recycling ratio of aged asphalt in hot recycling technical conditions[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3): 418-422. (in Chinese)
- [5] Hurley G C, Prowell B D. Evaluation of Sasobit for

use in warm mix asphalt NCAT Report 05-06[R]. Washington DC: National Center for Asphalt Technology, 2005.

- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] 郭鹏, 唐伯明, 成志强, 等. 温拌再生沥青混合料压实特性[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(7): 42-45, 66.  
GUO Peng, TANG Bo-ming, CHENG Zhi-qiang, et al. Characterization of warm mix reclaimed asphalt pavement compaction[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(7): 42-45, 66. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 侯月琴, 郑南翔, 李栓. 掺 Sasobit 的沥青及混合料性能研究[J]. 中外公路, 2010, 30(5): 287-291.  
HOU Yue-qin, ZHENG Nan-xiang, LI Shuan. Study on performance of asphalt and warm mx asphalt with sasobit[J]. China and Foreign Road, 2010, 30(5): 287-291. (in Chinese)
- [12] 纪小平, 孙云龙. Sasobit 温拌沥青混合料的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(14): 75-78.  
JI Xiao-ping, SUN Yun-long. Experimental research of warm mix asphalt with Sasobit[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(14): 75-78. (in Chinese)

