

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.12.002

改性再生沥青混合料配合比设计及性能验证

罗代松^{1,2}, 田春林², 郭猛³, 谭忆秋¹

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 交通运输部科学研究院, 北京 100029;
3. 北京工业大学, 北京 100124)

摘要: 废旧沥青混合料因其服役层位和服役年限的不同常常存在空间与时间上的性质多变性, 导致再生沥青混合料的配合比设计变得复杂。废旧沥青混合料的评价方法与标准是再生的基础, 再生沥青混合料的使用性能是判别再生技术成功与否的关键, 而合理的设计方法的制定是提高再生沥青混合料路用性能的关键, 路用性能的评价方法以及配合比的设计直接影响到再生效果及其推广应用。针对该问题, 首先分析了改性再生沥青混合料的总体设计原则, 测试了原材料的基本性能, 选取不同旧料掺量分别进行了配合比设计, 然后通过改进的组合式车载试验测试了改性再生沥青混合料的高温性能, 最后通过对其水敏感性和低温性能进行的试验验证等对改性再生沥青混合料的使用性能进行了全面的评价。研究表明: 随着回收沥青混合料添加量的增大, 单层车辙试验和改进的组合式车辙试验均呈现出动稳定度增大的趋势, 说明改性再生沥青混合料的高温抗变形能力增强。改性再生沥青混合料的冻融劈裂强度比随着回收旧料的增加逐渐降低, 说明回收旧料会破坏改性沥青混合料的水稳定性。20%和25%旧料用量的改性再生沥青混合料均具有较好的抗低温性能, 但20%用量有着更为优异的性能。再生剂可以明显改善改性再生沥青混合料的水稳定性。

关键词: 道路工程; 配合比设计; 组合式车辙试验; 改性再生沥青混合料; 高温抗车辙; 低温抗开裂; 水稳定性

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2018) 12-0007-07

Mix Design and Performance Verification of Modified Recycled Asphalt Mixture

LUO Dai-song^{1,2}, TIAN Chun-lin², GUO Meng³, TAN Yi-qi¹

(1. Harbin University of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China; 2. China Academy of Transportation Science, Beijing 100029, China; 3. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Due to the difference of service thickness and time of waste asphalt mixture, the property usually changes a lot in space and time. This could make the mix design of asphalt mixture containing recycled asphalt pavement (RAP) more complicated. The evaluation method and criterion for waste asphalt mixture is the foundation of regeneration, and the performance of recycled asphalt mixture is the key to the success of judging regeneration technology, the reasonable design method is the key to improve the road performance of recycled asphalt mixture, and the evaluation method of road performance and the mix design directly affect the regeneration effect and its popularization and application. In view of these, first, the general design principle of modified recycled asphalt mixture is analyzed, the basic properties of raw materials are tested, and several RAP contents are selected for mix design. Then, the modified combined vehicle rutting test is conducted to evaluate the high-temperature performance of the modified recycled asphalt mixture. At last, the performance of the modified recycled asphalt mixture is evaluated comprehensively through the experimental verification of its moisture sensitivity and low temperature performance. The result shows that (1) with the increase of RAP content, both monolayer rutting test and modified combined rutting test show increasing of

收稿日期: 2018-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51808016)

作者简介: 罗代松 (1971-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 高级工程师. (luodaisong1@163.com)

dynamic stability, indicating that high-temperature deformation resistance of the modified recycled asphalt mixture is improved; (2) meanwhile, its freeze-thaw splitting strength ratio is reduced, which demonstrates that the moisture sensitivity will be degraded by the RAP; (3) the modified recycled asphalt mixtures with both 20% and 25% RAP have good low-temperature resistance performance, and that of the mixtures with 20% RAP is better; (4) the recycling agent can significantly improve the moisture sensitivity of the modified recycled asphalt mixture.

Key words: road engineering; mix design; combined rutting test; modified recycled asphalt mixture; high-temperature rutting resistance; low-temperature deformation resistance; moisture sensitivity

0 引言

我国已建成高等级公路90%以上为沥青路面,它在服役过程中遭受荷载、环境等多重作用,性能会逐步退化,当退化到一定程度,就需要进行维护,其中大、中修的主要方式还是铣刨摊铺,这样将产生大量的废旧沥青混合料,如果将这些废料闲置堆放,不仅浪费资源,而且造成严重的环境污染。沥青路面废旧料的再生利用有利于节省工程投资,节约能源,保护环境,具有显著的经济效益、社会效益和环境效益^[1-3]。

目前,沥青路面再生利用方式主要包括厂拌热再生、现场热再生、厂拌冷再生和现场冷再生,其中厂拌热再生是最为常用的一种再生方式。通过铣刨回收后,首先对级配进行配合比调整设计,然后添加新沥青和新集料,有需要还需添加再生剂,再重新拌和生成再生沥青混合料。通常这种厂拌热再生的性能容易得到保障^[4-6]。同时,它还具有材料质量可控性好、适用规模化生产等优点,成为各国沥青路面废旧沥青混合料的主要再生方式^[7-8]。

废旧沥青混合料的评价方法与标准是再生的基础,合适的废旧料的选择可以增加废旧料的掺配比例,提高厂拌热再生沥青混合料的路用性能^[9]。再生沥青混合料的使用性能是判别再生技术成功与否的关键,而合理的设计方法的制定是提高再生沥青混合料路用性能的关键,路用性能的评价方法以及配合比的设计直接影响到再生效果及其推广应用。合理的施工工艺是保证再生效果、提高再生效率的有效途径,同时,规范高含量厂拌热再生技术参数也是保证施工质量的关键^[10-12]。

林翔等人研究了再生沥青混合料配合比设计影响因素,发现在再生沥青混合料的配合比设计中可以容许再生沥青混合料原材料产生一定的差异性,只要再生沥青混合料的差异控制在一定的范围之内,再生沥青混合料的性能仍可以满足要求^[13]。杨丽英等人通过沥青路面旧料分析和再生沥青混合料配合

比设计,确定了温、热再生沥青混合料的配合比,发现温拌再生沥青混合料的疲劳性能虽然不及热拌沥青混合料,但明显优于热再生沥青混合料,尤其是在高应变水平下,温拌再生沥青混合料的疲劳作用次数可达到热再生混合料的1.5倍^[14]。郭乃胜等人对添加两种化学温拌剂和热再生沥青混合料的耐久性进行了对比,发现短期老化后温拌再生沥青混合料的抗拉强度比未老化时增加,而长期老化后温拌再生沥青混合料的拉强度比值显著降低;温拌再生沥青混合料的耐久性优于热拌再生沥青混合料^[15]。季节等人研究发现温拌再生沥青混合料的高温性能和低温抗裂性能优于热拌再生沥青混合料,但其抗疲劳性能低于热拌再生沥青混合料,水稳定性能与热拌再生沥青混合料基本保持一致^[16]。Cao等人通过半圆弯曲试验研究了再生沥青混合料在中温条件下的疲劳开裂特性,研究发现临界应变能释放率可以很好地将室内加速加载试验结果关联到实际路面性能^[17]。Xiao等人研究了橡胶粉尺寸和类型对再生沥青混合料性能的影响,发现橡胶粉可以提高矿料间隙率并改善抗车辙性能,胶粉颗粒粒径增大可以提高改性沥青混合料的疲劳寿命^[18]。目前,国内外关于再生沥青混合料配合比设计和性能验证的研究大部分是针对基质沥青展开,而对于改性沥青的适用性有待于进一步研究。

基于以上原因,本研究首先分析了改性再生沥青混合料的总体设计原则,然后研究了废旧沥青混合料及新添加沥青与集料的基本性能,基于此进一步进行了配合比试验,最后对改性再生沥青混合料的高温稳定性、低温稳定性和水稳定性进行了试验验证。

1 原材料性质

1.1 回收沥青混合料的性质

对回收沥青混合料进行试验测试,其中,回收沥青混合料中旧沥青含量和集料级配通过燃烧法测得,旧沥青含量为4.95%,具体试验结果如表1所示。

表 1 回收沥青混合料中沥青含量及集料级配

Tab. 1 Asphalt content in recycled asphalt mixture and aggregate gradation

筛孔/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	98.3	87.2	57.2	36.3	26.3	19.9	12.5	9.3	6.7

然后, 对抽提所得沥青以及添加 9% 再生剂再生后的 3 大沥青指标的测定, 试验结果如表 2 所示。9% 的掺量为供应方建议值, 后续再生沥青混合料中再生剂的掺量也为沥青含量的 9%。

表 2 回收沥青混合料中旧沥青再生前后的三大指标

Tab. 2 Three indexes of old asphalt in recycled asphalt mixture before and after recycling

	测试项目	结果	测试方法
再生前	针入度 (100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm)	45	T0604
	软化点 TR&B/°C	59.6	T 0606
	5 °C 延度/cm	7.7	T 0605
再生后	针入度 (100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm)	70	T0604
	软化点 TR&B/°C	55	T 0606
	5 °C 延度/cm	19	T 0605

表 3 粗集料基本性能检测结果

Tab. 3 Test result of basic performance of coarse aggregate

项目	试验结果			技术要求	试验方法
	5 ~ 10 mm	10 ~ 20 mm	10 ~ 25 mm		
石料压碎值/%	—	14	—	≤28	T0316
洛杉矶磨耗损失/%	—	21.8	—	≤30	T0317
表观相对密度	2.803	2.808	2.827	≥2.50	T0304
吸水率/%	0.8	0.6	0.5	≤2.0 或 3.0	T0304
针片状颗粒含量/%	>9.5 mm	—	10.5	≤12 或 15	T0312
	<9.5 mm	11.0	—	≤18 或 20	
水洗法 <0.075 mm 颗粒含量/%	0.9	0.3	0.3	≤1	T0310
对沥青的黏附性	—	5 级	—	≥4 级	T0616

从表 3 中可以看出, 新添加的粗集料的基本技术性能可以满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004) 的规范要求, 因此可以在实际工程中使用。

(2) 细集料

本研究所选择机制砂为新添加的细集料, 其基本性能测试结果如表 4 所示。

表 4 机制砂性能检测结果

Tab. 4 Test result of performance of machine-made sand

指标	试验结果	技术要求	试验方法
表观相对密度	2.803	≥2.50	T0328
砂当量/%	74	≥60	T0334

由表 2 可以看出, 旧沥青经过再生后, 其针入度值升高约 70%, 软化点下降 4.6 °C, 延度值增大了接近 2.5 倍。这是由于沥青经过老化之后, 轻质组分降低, 极性组分增多所导致的^[9]。

1.2 新石料性质

除了充分利用旧料, 还要加入一定量的新料, 由于调整混合料级配及改善性能, 本次试验对各规格新集料的性能进行了检测, 结果如表 3 ~ 表 5 所示。

(1) 粗集料

本研究新添加的粗集料是石灰岩, 分为 10 ~ 25, 10 ~ 20, 5 ~ 10 mm 这 3 档, 其性能检测结果如表 3 所示。

从表 4 中可以看出, 本研究所选用的机制砂各项性能参数均满足《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40—2004 的规范要求, 因此可以在实际工程中使用。

(3) 填料

用于沥青混合料的矿粉必须采用石灰岩或岩浆岩中的强基性岩石等憎水性石料经磨细得到的矿粉。矿粉应干燥、洁净, 能自由地从矿粉仓流出。对本研究所选取的矿粉进行了相关质量指标测试, 其结果见表 5。

由表 5 中可以看出, 矿粉的各项技术指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40—2004 的技术要求, 可以在工程中使用。

表5 矿粉性能检测结果

Tab. 5 Test result of performance of mineral powder

项目	技术要求	试验结果	试验方法
表观密度/($g \cdot cm^{-3}$)	≥ 2.50	2.646	T0352
含水量/%	≤ 1	0.3	T0332
<0.6 mm/%	100	100	—
粒度范围 <0.15 mm/%	90~100	95.9	—
<0.075 mm/%	75~100	83.5	—
外观	无团粒结块	无团粒结块	—
亲水系数	<1	0.8	T0353
塑性指数	<4	3.1	T0354
加热安定性	实测记录	无颜色变化	T0355

1.3 新沥青基本性能

通常情况下,回收旧沥青混合料由于沥青老化而性能不能得到保障,尤其是低温性能和疲劳性能较差。为了提高再生沥青混合料的路用性能,本研究选择了新添加一定剂量的改性沥青,其基本性能参数如表6所示。

表6 SBS改性沥青性能检测结果

Tab. 6 Test result of performance of SBS modified asphalt

项目	技术要求	试验结果	试验方法
针入度(100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm)	60~80	71	T0604
软化点 TR&B/°C	>55	77.5	T0606
弹性恢复 25 °C/%	>65	89.7	T0662
5 °C 延度/cm	>30	30.7	T0605
沥青旋转薄膜烘箱试验 TFOT			
质量变化 \leq /%	± 1.0	-0.12	T0610
25 °C 针入度比/%	>60	91.0	T0604
5 °C 延度/cm	>20	22.5	T0605

由表6可见,本研究所选用的改性沥青各项指标参数均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的规范要求,因此可以在实际工程中使用。

2 配合比设计

2.1 级配设计

为了对回收旧料的再生利用进行更加全面系统的研究,分别选取了旧料添加量为20%,25%和30%,这3个比例进行配合比设计研究,其合成级配及级配曲线如图1所示。

2.2 最佳油石比

根据规范要求,按照0.5%为油石比的间隔变化,选择了5个不同的油石比,进而开展马歇尔设计,试件采用马歇尔击实仪双面击实75次方式成型,然后进行性能参数的测定,具体试验结果如表7所示。

本研究选择了3个回收旧料掺量用以研究旧料掺量对再生沥青混合料性能的影响,具体试验结果

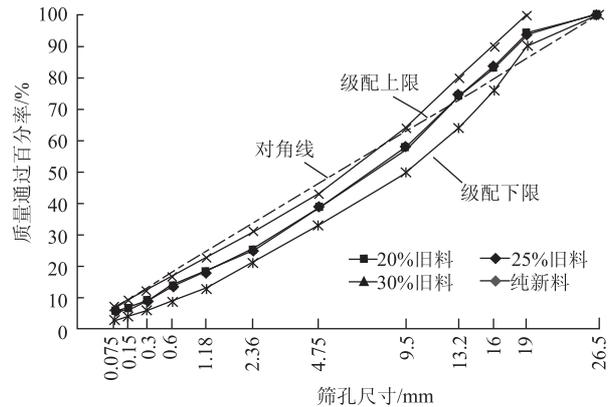


图1 改性再生沥青混合料集料级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of modified recycled asphalt mixture aggregate

如表7所示。

表7 改性再生沥青混合料马歇尔试验结果

Tab. 7 Marshall test result of modified recycled asphalt mixture

旧料用 量/%	油石 比/%	理论最 大相对 密度	毛体积 相对 密度	孔隙 率/%	VMA/ %	VFA/ %	稳定度/ kN (0.1 mm)	流值/ (0.1 mm)
20	4.3	2.588	2.487	3.90	14.0	72.1	13.33	37
25	4.2	2.593	2.488	4.05	13.9	70.8	11.11	36
25 (不加 再生剂)	4.4	2.585	2.479	4.10	14.4	71.4	13.00	38
30	4.3	2.589	2.488	3.90	14.0	72.0	11.07	37

从表7中可以看出,不添加再生剂时,由于旧料没有得到有效软化,旧沥青中可充当再生混合料黏结剂的沥青比例较少,而以黑石状态存在的旧沥青比例较大,较小地发挥出了旧料的残余性能,一定程度上浪费了旧料的性能,同时也增大了油石比。从旧料用量的影响来看,旧料掺量越多,稳定度值越低,但其他物理指标相近。

3 改性再生沥青混合料性能验证

3.1 高温稳定性

为了全方位地检测改性再生沥青混合料的使用性能,本研究分别针对高温稳定性、低温稳定性和水稳定性进行了试验分析,其中高温性能选择的是车辙试验,具体试验结果如表8所示。

表8 改性再生沥青混合料车辙试验结果

Tab. 8 Rutting test result of modified recycled asphalt mixture

检验项目	20% 纯新料	25%	30%	技术要求	试验方法
动稳定度(60 °C) /(次·mm ⁻¹)	8 400	6 500	9 850	10 500	>2 800 T0719

从表 8 中可以看出, 随着回收旧料添加量的增加, 改性再生沥青混合料的动稳定度值逐渐增加, 说明增加 RAP 掺量可以改善改性再生沥青混合料的高温稳定性。但是在提高 RAP 掺量的同时, 也要注意低温性能和水稳定性是否有所衰减。表 8 也表明全部样品高温性能均满足规范中的技术要求。

组合车辙试验作为抗车辙沥青混合料结构层组合优化确定后的最终验证试验, 是在国内 T0719 车辙试验的基础上进行二次开发, 主要研究抗车辙沥青混合料路面整体抗变形能力和层间黏结性能。

为了进一步验证改性再生混合料的高温性能, 本次试验又进行了改进车辙试验。改进车辙试验主要是根据道路实际结构情况, 采用单层结构或组合结构, 并结合道路实际交通及气候条件, 调整车辙试验的胎压及温度, 从而在最不利的条件下进行车辙试验。因为本研究材料选取了改性沥青, 并添加了废旧沥青混合料, 整体材料的模量相对会更高一些, 因此此处改进复合车辙板试验的条件选择更加苛刻一些。其目的为: 在尽量模拟道路实际条件下, 考虑道路使用状况的最不利条件, 并在此条件下进行车辙评价, 以确保道路具有良好的高温稳定性。

为了提高废旧沥青混合料再生比例, 将车辙试验温度提高到 70 °C, 将压强从标准的 0.7 MPa 提高到 1.0 MPa。并根据上面层和中面层类型进行组合车辙试验, 以 5 cm AC - 20 再生旧料作为中面层, 4 cm SMA - 13 作为上面层, SMA - 13 胶结料为 SBS 改性沥青。组合车辙试验板的成型方式为首先按照常规车辙试验板的方式成型下面层, 先在一个方向碾压 2 个往返 (4 次), 再抬起碾压轮, 将试件调转方向, 再加相同荷载碾压 12 个往返 (24 次); 待成型好的下面层冷却至室温后, 安装上面层的模具, 加入 SMA - 13 沥青混合料, 然后将整体放在成型机上, 再一次进行车辙板的成型, 试验步骤同前。单层车辙试验结果和组合车辙试验结果如表 9 和表 10 所示。

表 9 改性再生沥青混合料不同温度下车辙试验结果 (单层)

条件	检验项目	20%	25%
60 °C,	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	8 400	9 580
0.7 MPa	车辙深度/mm	1.86	1.78
70 °C,	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	6 718	6 940
1.0 MPa	车辙深度/mm	2.85	2.49

从表 9 中可以看出, 在 70 °C 和 1.0 MPa 条件下, 旧料掺量越多, 改性再生沥青混合料的动稳定

度值越大, 车辙深度越小, 这与 60 °C 和 0.7 MPa 条件下得到的结论相一致。在相同 RAP 掺量情况下, 温度越高、压强越大, 动稳定度值越小、车辙深度越深。如何确定最佳的试验温度和轮胎压强是需要进一步全面考虑的工作。

表 10 改性再生沥青混合料 70 °C 车辙试验结果 (组合)

条件	检验项目	20% 用量 5 cm AC - 20 + 4 cm SMA - 13	25% 用量 5 cm AC - 20 + 4 cm SMA - 13
70 °C,	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	3 095	3 306
1.0 MPa	车辙深度/mm	3.04	2.95

对比表 9 和表 10 可以看出, 在 70 °C 条件下, 组合形式的车辙试验相比于单层车辙试验, 动稳定度值更小, 车辙深度更大, 这是由于试件的总厚度变厚, 可压缩变形的体量更大所致。表 10 也可以说明, 当 RAP 用量增加时, 动稳定度值增加, 车辙深度降低, 这与单层车辙试验所得结论相符。

3.2 低温性能

低温破坏应变和极限强度在一定程度上可以表征沥青混合料在温度降低过程中适应温度应力变化的能力, 低温破坏应变越大, 说明沥青混合料在低温下抗开裂的能力越强, 因此, 通过这个试验可以分析备选材料的低温抗裂性能, 为设计路面材料结构提供有力支持。

小梁弯曲试验是规范规定的试验方法, 采用 -10 °C, 加载速率 50 mm/min 条件下测定弯曲沥青破坏应变和破坏应变能。作为再生混合料的性能, 由于含有一定量的旧沥青, 其低温性能更是改性再生混合料的一个很重要的性能指标, 对旧料用量为 20% 和 25% 的改性再生混合料进行低温弯曲试验, 结果如表 11 所示。

表 11 改性再生沥青混合料低温弯曲试验结果

检验项目	20%	25%	技术要求
低温极限应变/ $\mu\epsilon$	2 632	2 588	>2 500

从表 11 中可以看出, 25% RAP 含量的改性再生沥青混合料的低温弯曲极限应变值要比 20% RAP 含量的低, 说明低温抗开裂性能较差。对于本研究所选取的 20% 和 25% 两个 RAP 掺量下的再生沥青混合料而言, 低温极限应变均满足规范技术要求。

3.3 水稳定性

从上述研究可以看出, 随着 RAP 掺量的增加,

改性再生沥青混合料的高温抗变形能力增强,但是低温抗开裂性能降低,本部分将针对另一重要性能水稳定性展开研究。改性再生沥青混合料水稳定性检验结果见表12。

表12 再生沥青混合料抗水损害性能试验结果

Tab. 12 Water damage resistance test result of recycled asphalt mixture

检验项目	RAP 掺量					技术要求	试验方法
	20%	纯新料	25%	25% (不加再生剂)	30%		
残留稳定度/%	95.4	92.6	93.2	70.6	98.5	>85	T0709
冻融劈裂强度比/%	87.6	88.4	83.8	74.6	77.2	>80	T0729

从表12中可以看出,随着RAP掺量的增加,改性再生沥青混合料的冻融劈裂强度比逐渐降低,说明增加RAP掺量会降低改性再生沥青混合料的抗水损害性能。但是RAP掺量对改性再生沥青混合料的残留稳定度的影响并无统一规律。表12也可以说明,在相同RAP掺量(25%)条件下,再生剂会明显改善改性再生沥青混合料的水稳定性,其在残留稳定度和冻融劈裂强度比方面均有了明显的增高。对于本研究而言,RAP掺量最大达到25%的情况下,抗水损害性能满足规范要求。

4 结论

本研究首先对各种原材料进行了性能检测与评价,然后选取不同旧料掺量进行了配合比设计,最后通过高温性能试验、低温性能试验和水稳定性试验对改性再生沥青混合料的使用性能进行了全面的评价,提出改进组合式车辙试验,对改性再生沥青混合料的抗车辙性能进行了深入研究。主要结论如下。

(1) 再生旧料沥青老化,再生沥青混合料抗高温变形能力较普通沥青混合料强;改性随着再生旧料添加量的比例按照20%,25%,30%依次升高,改性再生沥青混合料的动稳定度也逐步提高。

(2) 改性再生沥青混合料的水稳定性随着再生旧料添加量的升高而降低,尤其是冻融劈裂性能。旧料20%和25%用量的改性再生混合料均具有较好的抗低温性能,20%用量的再生混合料抗低温性能高于25%用量的改性再生混合料。

(3) 在相同旧料添加量(25%)条件下,添加再生剂会降低再生沥青混合料的最佳油石比,改善

水稳定性,但对改性再生沥青混合料的高温稳定性影响不大。

(4) 验证了改进车辙试验的可行性,并证明了改性再生混合料具有较好的抗高温性能,可以保证路面结构的整体稳定。

参考文献:

References:

- [1] 陈静云. 沥青路面再生方法的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
CHEN Jing-yun. Experimental Study on Recycling Methods of Asphalt Pavements [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [2] 耿九光. 沥青老化机理及再生技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009.
GENG Jiu-guang. Study on Aging Mechanism and Recycling Technique of Asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [3] 张清平. 沥青路面现场热再生技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
ZHANG Qing-ping. Research on Hot In-place Recycling Technology of Asphalt Pavement [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2011.
- [4] 王冲, 徐世法, 季节, 等. 再生SBS改性沥青混合料再度老化性能的研究 [J]. 北京建筑工程学院学报, 2006, 22(3): 20-23.
WANG Chong, XU Shi-fa, JI Jie, et al. Evaluation on the Durability of Recycled SBS Asphalt Mixture [J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2006, 22(3): 20-23.
- [5] 甘新立. 再生SBS改性沥青及混合料的性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
GAN Xin-li. Study on Properties of Recycled SBS Modified Asphalt and Mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [6] 何嘉俊. SBS改性沥青老化机理及再生应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
HE Jia-jun. Research on Aging Mechanism and Regeneration of SBS Modified Asphalt [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [7] 王玉杰. 再生SBS改性沥青混合料配合比设计及路用性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
WANG Yu-jie. Study on Proportion Design and Road Performance of Recycled SBS Modified Asphalt Mixture [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [8] 张继森. 热再生SBS改性沥青混合料设计方法与使用性能 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
ZHANG Ji-sen. Design Method and Performance of Hot

- Recycling SBS Modified Asphalt Mixture [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [9] GUO M, MOTAMED A, TAN Y Q, et al. Investigating the Interaction between Asphalt Binder and Fresh and Simulated RAP Aggregate [J]. *Materials & Design*, 2016, 105: 25–33.
- [10] 刘金玲. 沥青及沥青混合料就地热再生工艺研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
LIU Jin-ling. Study on Hot In-place Recycling Technology of Asphalt and Asphalt Mixture [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [11] 马涛, 王真, 赵永利, 等. 沥青路面就地热再生拌和分散性评价方法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43 (12): 128–131.
MA Tao, WANG Zhen, ZHAO Yong-li, et al. Evaluation of Dispersive Performance of Asphalt Mixture during Mixing of Hot In-place Recycling [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43 (12): 128–131.
- [12] 周志刚, 孙宁, 杨文灿, 等. 厂拌热再生 SBS 改性沥青优化设计方法研究 [J]. *公路交通科技*, 2017, 34 (11): 15–22.
ZHOU Zhi-gang, SUN Ning, YANG Wen-can, et al. Study on Optimum Design Method of Central Plant Hot Recycling of SBS Modified Asphalt [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34 (11): 15–22.
- [13] 林翔, 张金喜, 苗英豪, 等. 再生沥青混合料配合比设计影响因素试验研究 [J]. *公路交通科技*, 2011, 28 (2): 14–19.
LING Xiang, ZHANG Jin-xi, MIAO Ying-hao, et al. Experimental Study on Factors Affecting Recycled Asphalt Mixture Proportion Design [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28 (2): 14–19.
- [14] 杨丽英, 谭忆秋, 董雨明, 等. 温拌再生沥青混合料的疲劳性能 [J]. *公路交通科技*, 2012, 29 (10): 7–10.
YANG Li-ying, TAN Yi-qiu, DONG Yu-ming, et al. Fatigue Performance of Warm Recycled Asphalt Mixture [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012, 29 (10): 7–10.
- [15] 郭乃胜, 尤占平, 赵颖华, 等. 温拌再生沥青混合料耐久性能 [J]. *中国公路学报*, 2014, 27 (8): 17–22.
GUO Nai-sheng, YOU Zhan-ping, ZHAO Ying-hua, et al. Durability of Warm Mix Asphalt Containing Recycled Asphalt Mixtures [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27 (8): 17–22.
- [16] 季节, 索智, 许鹰, 等. 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, SUO Zhi, XU Ying, et al. Experimental Research on Performance of Warm-recycled Mixture Asphalt with SMA [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26 (5): 28–33.
- [17] CAO Wei, MOHAMMAD L N, ELSEIFI M, et al. Fatigue Performance Prediction of Asphalt Pavement Based on Semicircular Bending Test at Intermediate Temperature [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30 (9): 04018219.
- [18] XIAO F, AMIRKHANDIAN S N, SHEN J, et al. Influences of Crumb Rubber Size and Type on Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23 (2): 1028–1034.
-
- (上接第 6 页)
- ZENG Bao-guo. Study on Road Performance of Polyurethane Modified Asphalt Mixture [J]. *Hunan Communications Science and Technology*, 2017, 43 (1): 70–72.
- [14] 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].
- [15] 靳明洋. 环氧沥青在长寿命路面中的应用研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
JIN Ming-yang. Application of Epoxy Asphalt in Long-life Pavement [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.
- [16] ZHANG H Y, WU X W, CAO D W, et al. Effect of Linear Low Density-polyethylene Grafted with Maleic Anhydride (LLDPE-g-MAH) on Properties of High Density-polyethylene/Styrene-butadiene-styrene (HDPE/SBS) Modified Asphalt [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47 (5): 192–198.
- [17] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].
JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [18] 罗东. 聚酯多元醇的合成及湿固化聚氨酯胶粘剂的制备 [D]. 上海: 东华大学, 2010.
LUO Dong. Synthesis of Polyester Polyols and the Preparation of Moisture-curable Polyurethane Adhesive [D]. Shanghai: Donghua University, 2010.