

文章编号: 1002-0268 (2006) 09-0010-05

SBS 物理改性沥青与化学改性沥青性能对比研究

肖 鹏 , 马爱群

(扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 国内外对 SBS 物理改性沥青和化学改性沥青性能对比还未有深入研究。为此, 对 SBS 物理改性沥青和化学改性沥青的性能采用常规与非常规 (美国 SHRP) 的试验方法进行了较为系统地研究, 进而对物理改性沥青和化学改性沥青的感温性能、高温稳定性、低温抗裂性以及抗老化性能进行了对比分析。同时, 通过沥青混合料的试验, 对两种改性沥青的路用性能进行比较, 并且结合实际工程铺筑试验路对室内试验的结果进行验证。结果表明, SBS 化学改性沥青的性能更为优越, 是一种值得推广的路用材料。

关键词: SBS; 物理改性; 化学改性; 混合料; 性能; 试验路

中图分类号: U414.75

文献标识码: A

Comparison Research on Performance of SBS Physically Modified Asphalt and SBS Chemically Modified Asphalt

XIAO Peng, MA Ai-qun

(Science Technology and Engineering College of Yangzhou University, Jiangsu Yangzhou 225009, China)

Abstract: The comparison research was made on performance of SBS physical modified asphalt and SBS chemical modified asphalt. Normal and special (SHRP) test methods were adopted to study the performance of SBS physically modified asphalt and chemically modified asphalt systematically, including temperature susceptibility, high temperature stability, low temperature crack resistance and anti-aging property. Then the road use performance comparison of the asphalt mixtures was studied by the mixture test. Furthermore it validated the test results by building test road. It is concluded that the performance of SBS chemically modified asphalt is better and worthy to extend its road use.

Key words: SBS; physically modified; chemically modified; mixture; performance; test road

0 引言

目前, 国内外对于聚合物改性沥青研究较多的是 SBS 改性沥青。SBS 改性沥青可以分为物理改性和化学改性两类^[1,2]。所谓物理改性就是将沥青与 SBS 在高温状态下混融, 通过高速剪切将 SBS 分散在沥青当中; 而化学改性就是在物理改性的基础上加入化学稳定剂来制得更为稳定的改性沥青。

然而对于 SBS 物理和化学改性沥青及混合料的

技术性能如何, 国内外还没有进行综合对比评价, 而且对于这两种改性技术, 尤其是用化学改性方法铺筑的路面的使用性能也没有深入研究^[3,4]。鉴于此, 笔者通过大量试验及试验路的研究对物理和化学改性沥青及混合料的性能进行了深入的探求。

1 试验的原材料及改性机理

1.1 试验的原材料

基质沥青: 采用日本加德士 AH-70, 4 组分分别

收稿日期: 2005-05-27

基金项目: 江苏省交通厅科研计划资助项目(02y029)

作者简介: 肖鹏 (1961-), 男, 江苏靖江人, 教授, 工学博士, 从事道路工程研究. (xp8833@yzu.edu.cn)

为: 饱和分 15.43%、芳香分 48.56%、胶质 30.65%、沥青质 5.36%。

改性剂: SB\$ 韩国 LG 501p), 掺量为 3%、4%、5%、6%。

引发剂: 由镇江美仑公司提供。

集料: 结合试验路采用镇江茅迪石灰岩, 级配 AK-13A。

矿粉: 采用镇江高资矿粉。

1.2 改性机理

物理改性: 将沥青和 SBS 高温混融, 运用 FLUKO(FA25 型) 高速剪切仪高速剪切, 加热温度为 170 , 剪切速率为 10 000 r/min, 剪切时间为 30 min。物理改性时, SBS 聚合物经高速剪切后与沥青形成连续网状结构, 沥青与聚合物形成微观混合相容状态。聚合物链因吸收沥青中烃类组分发生溶胀, 因此聚合物变成伸长溶胀的网状连续相, 沥青则成为分立的球状体, 它们之间仅仅是物理分散的作用^[9]。

化学改性: 将沥青和 SBS 高温混融, 运用 FLUKO(FA25 型) 高速剪切仪剪切约 20 min, 加入引发剂再剪切 10 min。化学改性, 加入稳定剂之后由于 SBS 的聚丁二烯段的双键或双键邻位的亚甲基非常活泼, 在稳定剂的作用下, 会与沥青中的杂原子及活性基团发生反应, 使沥青接枝到 SBS 上, 生成 SBS 沥青接枝物。接枝物在 SBS 相和沥青相间充当表面活性剂, 降低 SBS 和沥青间的表面张力和体系的 Gibbs 自由能, 促进 SBS 和沥青更好地相容, 有利于 SBS 改性沥青形成更加稳定的体系^[9]。

从改性的机理上来看, 物理改性沥青中 SBS 与沥青之间只是机械的分散和包裹, 并未发生化学反应, 两者之间不容易形成稳定的体系, 稳定性差; 相比较而言, 化学改性沥青生成了活性高的接枝物, 使得沥青与 SBS 形成稳定的空间网络结构。因此化学改性沥青的性能是优于物理改性沥青的。

2 沥青性能试验

2.1 沥青常规性能测试及比较分析

采用日本加德士沥青与拟定的不同掺量的 SBS, 制得物理改性沥青与化学改性沥青, 测试它们的各项常规指标, 通过整理列于表 1 当中, 部分性能指标与 SBS 掺量的关系见图 1。

2.1.1 物理和化学改性沥青感温性能的比较

沥青的感温性能一般用针入度指数 PI 来描述。沥青的 PI 值越大, 表明其温度敏感性越低。由图 1

表 1 沥青常规性能指标

Tab.1 Basic properties of the bitumen

| 性能指标 | 加德士 | +3%SBS | | +4%SBS | | +5%SBS | | +6%SBS | | |
|------------------------------|-------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| | | 物理 | 化学 | 物理 | 化学 | 物理 | 化学 | 物理 | 化学 | |
| 针入度/ 0.1 mm | 15 | 23.0 | 22.1 | 22.1 | 21.8 | 21.3 | 20.0 | 20.2 | 20.0 | 20.1 |
| | 25 | 69.7 | 64.5 | 64.3 | 60.2 | 58.2 | 50.6 | 50.3 | 48.0 | 45.8 |
| | 30 | 120.3 | 101.5 | 99.8 | 95.7 | 92.4 | 89.3 | 85.2 | 80.6 | 78.6 |
| PI 值 | | -1.07 | -0.70 | -0.64 | -0.48 | -0.42 | -0.46 | -0.22 | 0 | 0.017 |
| T ₈₀₀ / | | 47.4 | 49.90 | 50.21 | 51.33 | 51.92 | 52.5 | 53.69 | 55.19 | 55.4 |
| T ₁₂ / | | -12.4 | -13.6 | -13.8 | -14.3 | -14.3 | -13.3 | -14.52 | -15.4 | -15.5 |
| 软化点/ 5 延度/cm | | 46.5 | 49.9 | 50.6 | 51.7 | 56.8 | 87.0 | 89.3 | >100 | >100 |
| 质量损失/% | | -- | 19.9 | 20.2 | 25.6 | 26.4 | 31.8 | 37.2 | 38.9 | 39.8 |
| RTFOT 残 留 163 , 75min) | 针入 度比/% | 52 | 68 | 70 | 73 | 76 | 82 | 86 | 90.2 | 92.9 |
| | 5 延 度/cm | -- | 8.6 | 10.8 | 16.1 | 16.3 | 18.3 | 20 | 20.8 | 22 |

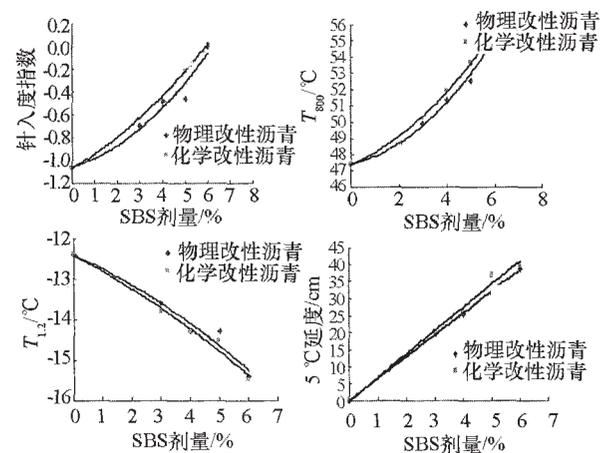


图 1 改性沥青的性能指标与剂量关系

Fig.1 The relationship between the dozes of modifier and modified asphalt

的关系曲线可以看出, 日本加德士 AH-70# 沥青掺入不同剂量的 SBS 后, 无论是物理还是化学改性沥青其感温性指标 PI 值均呈递增趋势, 满足我国针入度指标>30 地区的要求 (> -1.0)。但是我们可以明显地看出无论在哪个剂量级别上, 化学改性沥青的 PI 值总是大于物理改性沥青。这就说明化学改性沥青的感温性能比物理改性沥青好, 沥青性能受温度变化的影响小, 温度敏感性低。

2.1.2 物理和化学改性沥青高温稳定性能的比较

我国对于沥青高温性能的评价指标主要有: 软化点和当量软化点。从图 1 中 T₈₀₀ 的回归曲线可以看出, 改性剂 SBS 的掺入, 两种改性沥青的当量软化点和软化点都在随着剂量的上升而上升。化学改性沥青的指标值都大于物理改性沥青的。说明对于

相同剂量的 SBS 改性沥青而言，化学改性沥青的高温稳定性能强于物理改性沥青。

2.1.3 物理和化学改性沥青低温抗裂性能的比较

沥青低温抗裂性能的评价指标主要有：当量脆点 T_{12} 及 5 延度。从图 1 的 T_{12} 及 5 回归曲线可知，当量脆点 T_{12} 随 SBS 改性剂量的增大逐渐降低，同时其低温延度呈现不断上升的趋势，表明低温抗裂性得到明显改善。通过比较可以发现在同一个剂量上物理改性沥青的效果明显劣于化学改性沥青。

2.1.4 物理和化学改性沥青抗老化性的比较

本文采用旋转薄膜加热试验(RTFOT)来评价沥青改性前后的抗老化性能。试验结果见表 1。从试验结

果可以看出,沥青掺加 SBS 改性后,质量损失都在不断减小,针入度比不断增大,而且可以看出低温延度还可以保持一个较高的值,表明 SBS 的掺入改善了沥青的抗老化性能。比较而言化学改性沥青的效果要好些。

2.2 相关的美国 SHRP 试验性能测试及比较分析

基于前面的研究，我们认为 5%掺量的 SBS 无论从性能还是从经济上都是比较好的。因此，对于 SHRP 评价的试验仅采用 5%用量的 SBS 来比较。

(1) 将两种改性沥青的原样和 RTFOT 老化后的沥青在不同试验温度下进行动态剪切流变试验 (DSR)，表 2 列出了 DSR 试验的相关数据。将数据用柱状图的形式表现出来，见图 2。

表 2 沥青动态剪切流变试验结果 (DSR)

Tab.2 DSR test results of modified asphalts

| 温度/ | 沥青类型 | G^* | sin | G^*/sin | 温度/ | 沥青类型 | G^* | sin | G^*/sin | | |
|-----|------|----------|--------|-----------|-----------|------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 58 | | 9 367.66 | 72.998 | 0.956 295 | 9 795.789 | 58 | | 13 797.50 | 71.759 | 0.889 225 | 15 516.32 |
| 64 | | 4 502.46 | 75.730 | 0.969 145 | 4 645.807 | 64 | 物理 | 7 554.97 | 62.776 | 0.894 123 | 8 449.587 |
| 70 | 物理改性 | 2 297.62 | 76.838 | 0.973 73 | 2 359.607 | 70 | 改性 | 4 090.16 | 75.760 | 0.969 274 | 4 219.819 |
| 76 | | 1 250.70 | 77.129 | 0.974 874 | 1 282.935 | 76 | RTFOT | 2 041.01 | 78.824 | 0.981 036 | 2 080.463 |
| 82 | | 720.02 | 76.815 | 0.973 639 | 739.514 6 | 82 | | 1 071.44 | 80.561 | 0.986 461 | 1 086.146 |
| 58 | | 9 959.05 | 63.184 | 0.892 46 | 11 159.1 | 58 | | 16 983.10 | 67.717 | 0.925 322 | 18 353.71 |
| 64 | | 5 229.62 | 64.957 | 0.905 99 | 5 772.269 | 64 | 化学 | 8 289.35 | 71.759 | 0.949 748 | 8 727.994 |
| 70 | 化学改性 | 2 939.50 | 65.772 | 0.911 92 | 3 223.42 | 70 | 改性 | 4 228.90 | 64.409 | 0.901 9 | 4 688.877 |
| 76 | | 1 716.67 | 66.010 | 0.913 616 | 1 878.983 | 76 | RTFOT | 2 494.27 | 65.850 | 0.912 477 | 2 733.514 |
| 82 | | 1 058.50 | 66.146 | 0.914 579 | 1 157.363 | 82 | | 1 448.03 | 67.770 | 0.925 673 | 1 564.3 |

注：表中 G^* 与 G^*/sin 单位均为 Pa。

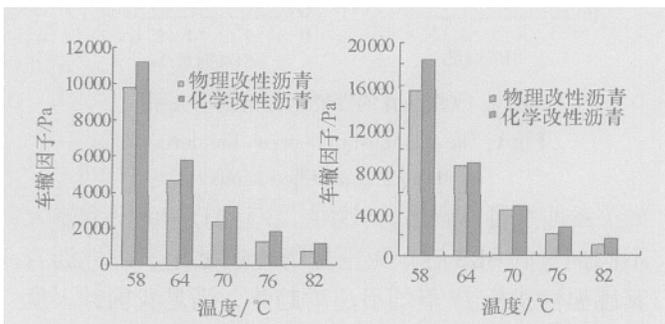


图 2 改性沥青原样与 RTFOT 老化后的车辙因子

Fig.2 The G^*/sin of modified asphalt and aged modified asphalt

图 2 中可以直观看出，对于两种改性沥青的车辙因子 G^*/sin 的值都是随着温度的升高而下降，能够满足 SHRP 规范的要求。同一种温度下，无论是原样沥青还是薄膜老化后沥青的 G^*/sin 值，SBS 化学改性沥青都大于物理 SBS 改性沥青，一般前者是后者的 1.2~1.4 倍。这就说明 SBS 化学改性沥青的抵抗永久变形的能力更强。

(2) 将两种改性沥青的小梁分别在 -6、-12、-18 低温下,进行弯曲梁流变试验 (BBR),结果见表 3。

沥青弯曲梁流变试验是用来评价沥青低温流变性能。SHRP 认为蠕变劲度越小，相应的 m 值越大，沥青的低温开裂的可能性会随之减小。试验数据中，同一温度下 SBS 物理改性沥青的蠕变温度较 SBS 化学改性沥青大，而 m 值却比化学改性沥青小。也就是说，化学改性沥青的低温性能要比物理改性沥青好。

表 3 沥青弯曲梁流变试验结果 (BBR)

Tab.3 BBR test results of modified asphalt

| 性能指标 | 沥青类型 | -6 | -12 | -18 |
|----------|------|-------|-------|-------|
| 蠕变劲度/MPa | 物理改性 | 97.5 | 162 | 320 |
| | 化学改性 | 86.2 | 128 | 280 |
| 斜率 m 值 | 物理改性 | 0.368 | 0.318 | 0.261 |
| | 化学改性 | 0.408 | 0.324 | 0.283 |

3 沥青混合料性能比较分析

3.1 沥青混合料常规性能测试及比较分析

本文结合工程实践，采用 AK-13A 的矿料来配置沥青混合料，进行了沥青混合料的马歇尔稳定度、

浸水马歇尔稳定度、沥青混合料车辙动稳定度、劈裂强度、抗压模量等的对比试验研究。试验结果分列于表 4~表 6。

表 4 马歇尔试验性能试验结果

Tab.4 Test results of Marshall stability

| 性能 | 马歇尔 试件(基质) | 马歇尔 试件(物理) | 马歇尔 试件(化学) |
|-----------|---------------|---------------|---------------|
| 空隙率/% | 4.8 | 4.8 | 4.6 |
| 沥青饱和度/% | 70.0 | 70.8 | 71.2 |
| 稳定度/kN | 11.81 | 14.03 | 18.67 |
| 流值/0.1 mm | 38.7 | 37.4 | 36.7 |

表 5 浸水马歇尔试验性能试验结果

Tab.5 Test results of retain Marshall stability

| 性能 | 马歇尔 试件(基质) | 马歇尔 试件(物理) | 马歇尔 试件(化学) |
|----------|---------------|---------------|---------------|
| 空隙率/% | 4.6 | 4.7 | 4.5 |
| 沥青饱和度/% | 72.0 | 72.4 | 73.3 |
| 稳定度/kN | 9.42 | 12.53 | 17.29 |
| 流值/0.1mm | 61.2 | 52.7 | 48.6 |
| 残留稳定度 | 79 | 89 | 93 |

表 6 车辙试验性能试验结果

Tab.6 Test results of rut-resisting performance

| 性能 | 车辙试件(基质) | 车辙试件(物理) | 车辙试件(化学) |
|----------------------------|----------|----------|----------|
| 45 min 变形/mm | 2.24 | 1.82 | 1.48 |
| 60 min 变形/mm | 2.62 | 2.05 | 1.64 |
| 动稳定度/(次·mm ⁻¹) | 1 750 | 2 739 | 3 938 |

3.1.1 马歇尔试验

马歇尔试验用来判断沥青混合料的高温性能,是一种很简便的方法。表 4 中可以看到,经过改性后的沥青制得的马歇尔试件,稳定度较基质沥青要大,流值要小。这就说明其高温性能要比基质沥青好。其中,化学改性沥青混合料性能更为优越。

3.1.2 浸水马歇尔试验

从表 5 中可知,改性沥青混合料的浸水马歇尔稳定度都有不同程度的提高,残留稳定度也有所提高,都达到了 80%以上,且都满足规范要求(非改性沥青为 75%,改性沥青为 80%)。残留稳定度的提高表明改性沥青混合料抗水损害的能力增强。显然化学改性沥青混合料性能好得多。

3.1.3 车辙试验

从表 6 明显可以看出,各个试件的动稳定度有如下关系:化学改性沥青混合料>物理改性沥青混合料>基质沥青混合料,且满足相应的规范要求。其中,化学改性沥青混合料动稳定度为物理改性沥青混合料的 1.44 倍,化学改性沥青混合料抵抗高温车辙的

能力要比物理改性沥青混合料强的多。

3.2 沥青混合料的美国 SHRP 试验及比较分析

3.2.1 冻融劈裂试验

旋转压实成型试件,每组平行试件 3 个,进行冻融劈裂试验,结果见表 7。

表 7 冻融劈裂试验结果

Tab.7 Test results of freeze-thaw cleavage test

| 类别 | 未冻融循环试件劈裂抗拉强度 | | | 冻融循环后试件劈裂抗拉强度 | | | 冻融劈裂强度比/% |
|----|---------------|----------|---------|---------------|----------|---------|-----------|
| | 最大荷载/kN | 劈裂强度/MPa | 平均值/MPa | 最大荷载/kN | 劈裂强度/MPa | 平均值/MPa | |
| | 物理 | 7.16 | 0.709 | 0.718 | 6.89 | 0.682 | |
| 化学 | 7.84 | 0.776 | 0.759 | 5.36 | 0.531 | 0.623 | 87.4 |
| | 7.06 | 0.669 | 0.759 | 6.63 | 0.656 | 0.666 | |
| | 7.44 | 0.737 | 0.759 | 6.73 | 0.666 | 0.663 | |
| | 8.78 | 0.810 | | 7.15 | 0.708 | | |

从表 7 可以看出,化学改性沥青混合料的劈裂抗拉强度和冻融劈裂强度比都优于物理改性沥青混合料。也就是说化学改性沥青混合料的水稳定性比较好。

3.2.2 APA 车辙试验

对物理和化学改性沥青混合料成型试件,按要求进行 APA 车辙试验^[7]。试验温度 60℃,碾压次数 8 000 次,碾压的速度 50 次/min,橡胶管压力 0.7 MPa,碾压轮压力 450 kN。试验结果见表 8。美国 SHRP 规范的 APA 车辙试验最能真实反映沥青混合料的高温抗车辙性能,其结果与实际路面的永久变形有良好的相关性^[8]。在 APA 加载初始阶段,车辙的深度迅速增加,这段车辙变形可能是沥青混合料的进一步压实所造成的。随着碾压次数的增加,车辙深度继续增加。在碾压次数大于 2 000 次以上时,车辙深度随碾压次数的增加几乎呈线性递增的趋势。可以认为大于 2 000 次以上的变形为沥青混合料的塑性变形。因此,用 2 000 次到 8 000 次之间的车辙深度更能准确地评价改性沥青的高温抗变形能力。

车辙深度与碾压次数的关系曲线可以回归为幂形式,

$$D=aN^b, \quad (1)$$

式中, D 为车辙深度; N 为碾压次数; a, b 为回归系数。

显然,回归系数 a, b 的值越大,车辙深度也就越大,而系数 b 对车辙的影响比系数 a 更为显著。通过回归发现物理改性沥青混合料的 b 值为 0.335 8,而化学改性沥青混合料的 b 值仅为 0.311 8。在相同

表 8 APA 车辙试验回归结果
Tab.8 Regressive results of the APA rutting test

| 车辙深度/mm | 碾压次数/次 | | | | | | | | | | 回归方程 |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| | 500 | 1 000 | 1 500 | 2 000 | 3 000 | 4 000 | 5 000 | 6 000 | 7 000 | 8 000 | |
| 物理改性 | 0.947 | 1.145 | 1.288 | 1.395 | 1.582 | 1.763 | 1.912 | 2.033 | 2.115 | 2.202 | $D = 0.109N^{0.3358}$ |
| 化学改性 | 0.625 | 0.798 | 0.904 | 1.004 | 1.189 | 1.263 | 1.343 | 1.456 | 1.519 | 1.549 | $D = 0.954N^{0.3118}$ |

的碾压次数下,物理改性沥青混合料的车辙明显大于化学改性沥青混合料,可见化学改性沥青混合料抗车辙能力明显优于物理改性沥青混合料。

4 试验路的验证

根据以上试验结果,2004年7月在淮江公路扬州段养护改善工程中铺筑了1km的试验路。其中物理改性沥青路面和化学改性沥青路面各为500m。施工中严格控制好原材料的质量,以及改性沥青混合料的组成设计、拌和、运输、摊铺、碾压等各个环节,组织管理到位,确保了工程质量。

目前我们对于试验路的检测分为3个阶段:第1阶段为2004年夏季施工结束后,对有关项目进行现场检测;第2阶段2004年冬季,对试验路进行了现场检测,主要测试冬季低温对沥青混合料路用性能的影响;第3阶段是2005年春季,考虑温差及水的作用对沥青混合料路用性能影响。相关检测结果见表9。

表 9 试验路现场检测结果
Tab.9 Test results of paving road

| 测试阶段 | 芯样密度/ (g·cm ⁻³) | 压实 度/% | 构造深 度/mm | 摩擦系 数/BPN | 弯沉/ 0.01mm | 平整 度/mm | 渗水系数/ (mL·min ⁻¹) |
|------|--------------------------------|-----------|-------------|--------------|---------------|------------|----------------------------------|
| 1 | 物理 | 2.356 | 97.3 | 0.78 | 50 | 23.72 | 0.24 |
| | 化学 | 2.359 | 97.4 | 0.75 | 48 | 24.20 | 0.25 |
| 2 | 物理 | 2.358 | 97.4 | 0.76 | 49 | 23.76 | 0.26 |
| | 化学 | 2.361 | 97.5 | 0.73 | 48 | 24.22 | 0.27 |
| 3 | 物理 | 2.380 | 98.3 | 0.73 | 47 | 23.74 | 0.26 |
| | 化学 | 2.381 | 98.3 | 0.72 | 46 | 24.21 | 0.28 |
| 规范值 | - | 96 | 0.55 | 45 | 40 | - | 0 |

通过现场测试可以看出,两种改性沥青混合料芯样密度和压实度是随荷载作用时间增加而增加,这是混凝土路面在使用过程中进一步压实的效果。但相比而言,化学改性沥青混合料的这两项指标增长速率比物理改性沥青混合料缓慢。在一定程度上说明前者比后者有较好的抗车辙性能和良好的水稳定性能。

根据测试的结果,随着车辆荷载作用时间的增长,路面的构造深度有所降低,表现在摩擦系数上,

其值也有所降低。但摩擦系数降低幅度不如构造深度大,可能与冬季的低温和春季受潮有关。从化学改性沥青混合料构造深度降低比物理改性沥青混合料缓慢这点来看,前者比后者路用性能稍好一些。

总的说来,经过一年多的考验,目前路况良好。化学改性沥青混合料的路用性能优于物理改性沥青混合料路用性能。由于铺筑时间不长,我们将继续跟踪研究试验路的情况,对比SBS物理改性沥青和SBS化学改性沥青实际路用性能的差异。

5 结语

(1) 加德士沥青经SBS改性后,无论物理改性还是化学改性,其沥青性能都得到很大的提高;

(2) 从改性机理的分析上可以看出,SBS化学改性沥青较SBS物理改性沥青稳定。

(3) 从试验结果可以看出,SBS化学改性沥青的感温性能、高低温性能和抗老化性能都强于SBS物理改性沥青;SBS化学改性沥青混合料的高温抗车辙、低温抗开裂和抗水损害性能均好于SBS物理改性沥青混合料。

(4) 利用美国SHRP试验方法得到的试验结果与常规试验结果的结论是比较一致的。

参考文献:

- [1] 熊萍,郝培文,高传明.SBS聚合物改性沥青技术性能[J].长安大学学报(自然科学版),2005,25(1):10-14.
- [2] 沈金安.改性沥青与SMA路面[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [3] 熊萍,郝培文.SBS改性沥青存储稳定性试验方法和评价指标的研究[J].中国公路学报,2005,18(1):1-6.
- [4] 孙大权,吕伟民.反应性SBS改性沥青热存储稳定性研究[J].中国公路学报,2002,15(4):1-3.
- [5] 郭淑华.聚合物改性沥青的相容性及稳定性[J].石油沥青,2000,14(2):6-7.
- [6] 吉永海.SBS改性沥青的相容性和稳定性机理[J].石油学报,2002,18(3):23-29.
- [7] HICKS. Validation of SHRP binder specification through mix testing[J]. AAPT, 1993, 62(2):20-25.
- [8] AASHTO-FHWA-NAPA. Report on European Asphalt study Tour. Washington[S].