

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.016

基于灰关联的 SBS 改性沥青低温流变性能评价指标研究

魏晋, 田鹏江

(上海市政工程设计研究总院集团 第十市政设计院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对目前 SBS 改性沥青低温流变性能评价指标不明确的问题, 采用灰色关联分析方法, 以弯曲蠕变劲度试验的蠕变劲度 S 、蠕变速率 m 、低温连续分级温度 T_C 、 ΔT_C 、 m/S 值、松弛时间 λ 、耗散能比 $W_d(t)/W_s(t)$ 等 SBS 改性沥青低温流变性能评价指标作为比较序列, 以沥青混合料低温弯曲试验的最大弯拉应变 ϵ_{11} 作为参考序列, 研究聚合物改性沥青的低温黏弹特性评价指标。结果表明, 采用单一考虑低温变形能力或应力松弛能力的评价指标评价聚合物改性沥青的低温性能存在一定矛盾, 须采用综合考虑模量与松弛能力的指标评价 SBS 改性沥青的低温黏弹特性; 采用单一蠕变速率或蠕变劲度评价指标出现矛盾时, 优先采用蠕变速率 m 进行评价; 建议用流变学手段评价 SBS 改性沥青的低温性能时优先选用蠕变速率 m 、低温连续分级温度 T_C 和 m/S 值; 利用 ΔT_C 可以判别聚合物改性沥青的低温行为是由蠕变劲度 S 主导还是由蠕变速率 m 主导, 研究中应引起重视。

关键词: 公路; SBS 改性沥青; 低温流变性能; 评价指标; 灰色关联分析

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0081-05

低温开裂是沥青路面主要损坏类型之一^[1-2], 不仅影响路面的整体性、连续性与行车舒适性, 还会导致路基软化、路面承载力下降, 并加速沥青路面破坏。沥青路面的低温开裂与沥青结合料的低温性能有较大关系^[3]。沥青结合料低温性能评价指标主要有低温延度、低温针入度、蠕变劲度 S 、蠕变速率 m 、Performance Grade (PG) 分级、耗散能比、松弛时间、 m/S 值等^[4]。谭忆秋等对橡胶沥青的低温性能评价指标进行比选, 认为工程中宜优先采用 m/S 值评价橡胶沥青的低温性能, 科学研究中优先选用综合考虑沥青模量和松弛能力的评价指标 S_A ^[5]。董文龙等的研究表明蠕变速率很大程度上影响 SBS 改性沥青的低温性能, 建议采用 m/S 值评价 SBS 改性沥青的低温性能^[6]。耿韩等认为蠕变劲度不能准确评价高模量沥青的低温性能, 建议采用单边切口弯曲梁试验的断裂能作为高模量沥青的低温评价指标^[7]。颜可珍等认为玻璃态转变温度和低温流变指标可以较好地评价聚合物改性沥青的低温性能^[8]。黄卫东等的研究表明低温延度不适宜用来评价基质沥青和 SBS 改性沥青的低温性能^[9]。徐加秋等认为低温连续分级温度可以更精确地评价温拌改性沥青的低温性能^[10]。综上, 采用弯曲蠕变劲度

试验得到的低温黏弹特性评价指标可以较准确地反映沥青结合料的低温性能, 但具体采用何种评价指标目前尚未有统一的结论。鉴于中国大多数高速公路采用 SBS 改性沥青, 本文以 4 种不同掺量的 SBS 改性沥青为研究对象, 采用低温流变性能评价指标, 基于灰关联分析方法研究评价 SBS 改性沥青低温流变性能的关键指标。

1 试验方案

1.1 试验材料

采用 SK-70 作为基质沥青, 添加线形 SBS 改性剂制备 SBS 改性沥青, 改性剂掺量为 3%、4%、5%、6% (按质量分数计)。制备方法如下: 将基质沥青加热至熔融状态, 然后将改性剂加入其中, 在 165 °C 温度下, 先以 2 000 r/min 低速剪切 20 min, 再以 4 500 r/min 高速剪切 30 min, 剪切完成后在 170 °C 烘箱中保温发育 10 min。3%、4%、5%、6% 掺量 SBS 改性沥青分别以 3% SBS、4% SBS、5% SBS、6% SBS 表示。不同沥青的基本性能见表 1。

沥青混合料采用 AC-13 级配 (见表 2), 沥青用量为 4.8%。粗集料采用闪长岩, 细集料采用石灰岩, 矿粉由石灰岩研磨而成。

表1 沥青的技术性质

沥青类型	针入度(25℃, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	软化点/℃	延度(5℃)/cm
SK-70	75.2	47.4	8.1
3% SBS	63.5	60.1	35.6
4% SBS	60.2	71.9	71.6
5% SBS	55.8	87.5	88.3
6% SBS	52.1	89.6	90.2

表2 AC-13 沥青混合料的级配

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
16.000	100.0	1.180	21.4
13.200	97.1	0.600	18.6
9.500	75.3	0.300	12.8
4.750	44.1	0.150	9.9
2.360	25.5	0.075	6.8

1.2 试验方法

依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对 SBS 改性沥青进行弯曲蠕变劲度试验,采用双支撑中点加载模式,两个支撑点之间的距离约 102 mm。小梁长 127 mm,厚 6.35 mm,宽 12.70 mm。试验时施加 980 mN 的恒定荷载,加载时间 240 s。试验温度为 -12℃、-18℃、-24℃。

通过低温弯曲试验测试沥青混合料的低温性能,试验温度为 -10℃,加载速率为 50 mm/min。小梁长 250 mm,宽 30 mm,高 35 mm,试验时跨径 200 mm。试验采用微机控制电子万能试验机。

2 试验结果与分析

2.1 弯曲蠕变劲度试验结果与分析

2.1.1 蠕变劲度和蠕变速率

4 种不同掺量 SBS 改性沥青的蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 分别见图 1、图 2。

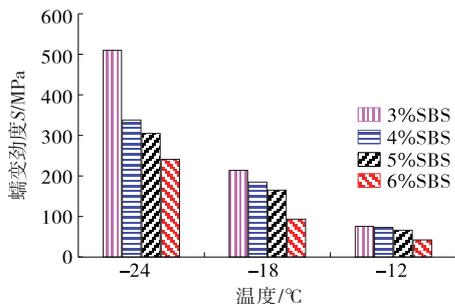


图1 不同掺量 SBS 改性沥青的蠕变劲度

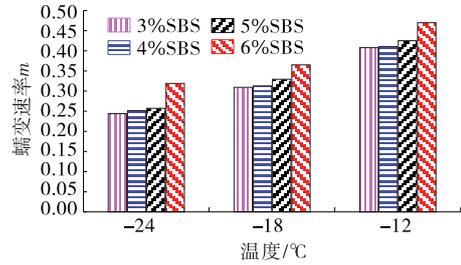


图2 不同掺量 SBS 改性沥青的蠕变速率

由图 1、图 2 可知:温度降低,SBS 改性沥青的蠕变劲度增大,蠕变速率减小,低温抗裂性能变差;在不同低温条件下,4 种 SBS 改性沥青的蠕变劲度和蠕变速率没有明显的规律,且蠕变劲度和蠕变速率作为评价指标在相同温度条件下评价改性沥青并不同步。美国战略公路研究计划(SHRP)以加载 60 s 时的蠕变劲度 $S \leq 300$ MPa、蠕变速率 $m \geq 0.30$ 来评价沥青材料的低温性能。根据图 1、图 2,试验温度为 -24℃ 时 4 种 SBS 改性沥青的 S 和 m 超过 SHRP 的要求,但在 -18℃ 温度条件下 4 种 SBS 改性沥青的 S 和 m 符合要求。因此,选择 -18℃ 温度条件下弯曲蠕变劲度试验指标研究 SBS 改性沥青的低温性能。在 -18℃ 温度条件下,4 种 SBS 改性沥青的蠕变劲度大小排序为 3% SBS > 4% SBS > 5% SBS > 6% SBS, m 值大小排序为 6% SBS > 5% SBS > 4% SBS > 3% SBS,6% SBS 改性沥青的低温性能最好,3% SBS 改性沥青的低温性能最差。

2.1.2 低温连续分级温度

SHRP 采用低温 PG 分级指标评价沥青的低温性能,但有关研究表明低温 PG 分级指标只能区分不同分级温度下沥青的低温性能,而无法有效比较同一分级温度下沥青的低温性能,采用低温 PG 分级指标评价沥青的低温性能存在一定局限^[11]。ASTM D 7643—2010《Standard Practice for Determining the Continuous Grading Temperatures and Continuous Grades for PG Graded Asphalt Binders》以 $S = 300$ MPa、 $m = 0.30$ 进行插值,并计算 S 和 m 的分级温度差,采用两者中较大者作为低温连续分级温度 T_c ,评价沥青的低温性能^[12]。 T_c 插值计算方法见式(1)、式(2)。4 种 SBS 改性沥青的 T_c 见图 3。

$$T_c = T_1 + \frac{\lg P_s - \lg P_1}{\lg P_2 - \lg P_1} (T_2 - T_1) \quad (1)$$

式中: T_c 为 S 分级温度(℃); T_1 、 T_2 为试验计算温度(℃), T_2 比 T_1 高 6℃; $P_s = 300$ MPa; P_1 、 P_2 为

T_1 、 T_2 对应的 S 值。

$$T_c = T_1 + \frac{P_s - P_1}{P_2 - P_1} (T_2 - T_1) \quad (2)$$

式中: T_c 为 m 分级温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_1 、 T_2 为试验计算温度 ($^{\circ}\text{C}$), T_2 比 T_1 高 6°C ; $P_s = 0.30$; P_1 、 P_2 为 T_1 、 T_2 对应的 m 值。

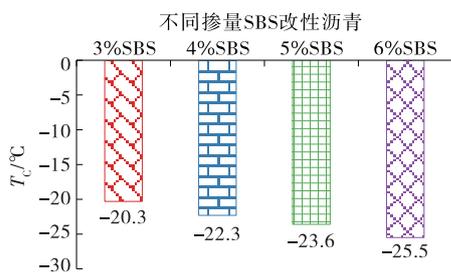


图3 不同掺量SBS改性沥青的低温连续分级温度

从图3可以看出:4种SBS改性沥青的 T_c 高低排序为 3% SBS > 4% SBS > 5% SBS > 6% SBS, 6% SBS 改性沥青的低温连续分级温度最低, 具有较好的低温性能。

2.1.3 ΔT_c

ΔT_c 是反映沥青在低温状态下劲度和应力消除能力之间平衡程度的参数^[13], ΔT_c 为正值说明沥青的低温行为主要受 S 控制, ΔT_c 为负值说明沥青的低温行为主要受 m 控制, ΔT_c 绝对值大小表示沥青受 S 或 m 控制的程度。类似于低温连续分级温度, 计算 ΔT_c 时以 $S = 300 \text{ MPa}$ 、 $m = 0.30$ 通过内插法确定, 计算方法见式(3)~(5)。4种SBS改性沥青的 ΔT_c 见图4。

$$T_{c,s} = T_1 + \frac{(T_1 - T_2)(\lg 300 - \lg S_1)}{\lg S_1 - \lg S_2} - 10 \quad (3)$$

$$T_{c,m} = T_1 + \frac{(T_1 - T_2)(0.30 - m_1)}{m_1 - m_2} - 10 \quad (4)$$

式中: S_1 、 S_2 分别为 T_1 、 T_2 时刻的蠕变劲度 (MPa); m_1 、 m_2 分别为 T_1 、 T_2 时刻的蠕变速率; T_1 、 T_2 为计算温度 ($^{\circ}\text{C}$), T_2 比 T_1 高。

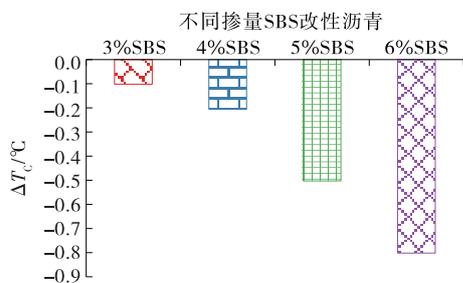


图4 不同掺量SBS改性沥青的 ΔT_c

$$\Delta T_c = T_{c,s} - T_{c,m} \quad (5)$$

从图4可以看出:SBS改性沥青的低温行为主要受 m 控制, 且 6% SBS 改性沥青在低温状态下的应力释放能力较弱。

2.1.4 m/S 值

相关研究表明, 可以用 m 和 S 的比值表征沥青的低温性能, 比值越大, 沥青材料的低温性能越好^[14]。图5为不同低温条件下4种SBS改性沥青的 m/S 值。

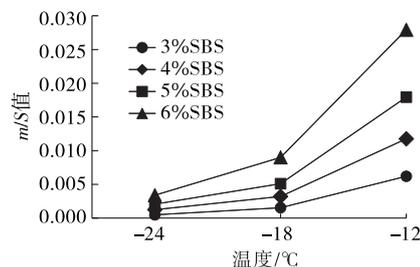


图5 不同掺量SBS改性沥青的 m/S 值

从图5可以看出:不同低温条件下,4种SBS改性沥青的 m/S 值大小排序为 6% SBS > 5% SBS > 4% SBS > 3% SBS, 6% SBS 改性沥青具有较好的低温性能; $-24 \sim -18^{\circ}\text{C}$ 时4种SBS改性沥青的 m/S 值增大速率小于 $-18 \sim -12^{\circ}\text{C}$ 时的增大速率, 这是由于温度升高, 沥青内部分子运动能量增大, 沥青中分子链段的运动较活跃, 导致沥青的分子结构活动增强。

2.1.5 松弛时间和耗散能比

聚合物改性沥青是典型的黏弹性材料, 可以用 Burgers 模型描述聚合物改性沥青的黏弹特性。Burgers 模型是由 Kelvin 模型和 Maxwell 模型通过串联得到的四元件黏弹本构模型, 其数学表达式为^[15]:

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-E_2/\eta_2 t}) \right] \quad (6)$$

式中: ϵ 为应变; σ_0 为施加的应力 (MPa); E_1 为瞬时弹性模量; η_1 为瞬时黏性系数; t 为应力作用时间 (s); E_2 为施加应力后发生的缓慢变形; η_2 为施加的应力撤除后形变没有马上消失的黏性指标。

利用 Burgers 模型对4种SBS改性沥青的弯曲蠕变劲度试验结果进行非线性拟合, 根据拟合参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 按式(7)、式(8)计算4种SBS改性沥青的松弛时间 λ 和耗散能比 $W_d(t)/W_s(t)$ ^[15-16]。

$$\lambda = \frac{\eta_1}{E_1} \quad (7)$$

$$W_d(t)/W_s(t) = \frac{t/\eta_1 + [1/(2E_2)](1 - e^{-2E_2/\eta_2 t})}{1/E_1 + [1/(2E_2)](1 - 2e^{-E_2/\eta_2 t} + e^{-2E_2/\eta_2 t})} \quad (8)$$

松弛时间反映沥青结合料经受的应力随时间的变化,松弛时间越长,对沥青结合料快速消散应力越不利^[16]。4种SBS改性沥青的松弛时间见图6。从图6可以看出:温度变化过程中,4种SBS改性沥青的松弛时间大小排序为3%SBS>4%SBS>5%SBS>6%SBS,6%SBS改性沥青的松弛时间最小,低温性能最好;温度降低,SBS改性沥青的松弛时间增大,这是因为温度降低,沥青弹性增大,黏性减小,能量消耗速率减小,应力变化的时间增大,松弛时间增大。

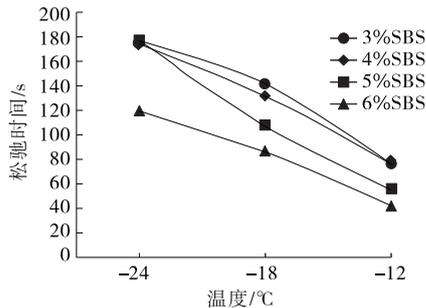


图6 不同温度下不同掺量SBS改性沥青的松弛时间

耗散能比反映沥青结合料的松弛能力,其值越大,沥青结合料的低温抗裂性能越好^[16]。4种SBS改性沥青的耗散能比见图7。从图7可以看出:温度变化过程中,4种SBS改性沥青的耗散能比大小排序为6%SBS>5%SBS>4%SBS>3%SBS,6%SBS改性沥青的低温性能最好,与松弛时间的评价结果一致;温度降低,沥青的耗散能比降低,说明沥青中的耗散能减小,储存能增大,低温抗裂性能变差;-18~-12℃时4种SBS改性沥青的耗散能比减小程度较大,-24~-18℃时减小程度较小,说明随着温度的降低,沥青的弹性比例明显增大,但当温度下降到一定程度时,沥青接近于弹性体。

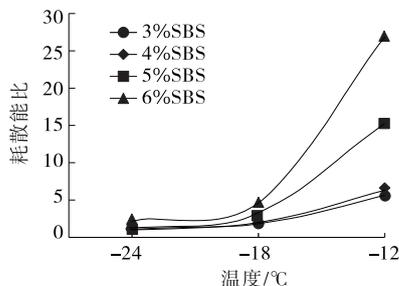


图7 不同温度下不同掺量SBS改性沥青的耗散能比

2.2 低温弯曲试验结果与分析

采用低温弯曲试验中试件破坏时的最大弯拉应变 ϵ_B 评价沥青混合料的低温性能。 ϵ_B 表示沥青混合料在低温状态下的极限抗变形能力,其值越大,沥青混合料的低温抗裂性能越好。4种SBS改性沥青混合料的低温弯曲试验结果见表3。

表3 SBS改性沥青混合料的低温弯曲试验结果

不同掺量SBS改性沥青混合料	最大弯拉应变 $\epsilon_B/\mu\epsilon$	不同掺量SBS改性沥青混合料	最大弯拉应变 $\epsilon_B/\mu\epsilon$
3%SBS	3 381.5	5%SBS	3 517.2
4%SBS	3 489.8	6%SBS	3 986.3

从表3可以看出:4种SBS改性沥青混合料的低温抗裂性能大小排序为6%SBS>5%SBS>4%SBS>3%SBS,6%SBS改性沥青混合料的低温抗裂性能最好,3%SBS改性沥青混合料的低温抗裂性能最差。

3 灰色关联分析

以-18℃温度条件下SBS改性沥青的低温黏弹特性评价指标 S 、 m 、 T_c 、 ΔT_c 、 m/S 值、 λ 、 $W_d(t)/W_s(t)$ 作为比较序列,沥青混合料低温弯曲试验的最大弯拉应变 ϵ_B 作为参考序列进行灰色关联分析。先对参考序列和比较序列按式(9)、式(10)进行无量纲化处理,然后分别按式(11)、式(12)计算比较序列与参考序列的关联系数和关联度,比较序列的关联度越大,则比较序列与参考序列的关联性越强。各指标灰色关联度计算结果见表4。

$$Y_0 = \left\{ \frac{X_0(1)}{\bar{X}_0}, \frac{X_0(2)}{\bar{X}_0}, \dots, \frac{X_0(n)}{\bar{X}_0} \right\} \quad (9)$$

$$Y_i = \left\{ \frac{X_i(1)}{\bar{X}_i}, \frac{X_i(2)}{\bar{X}_i}, \dots, \frac{X_i(n)}{\bar{X}_i} \right\} \quad (10)$$

式中: X_0 为参考序列,令 $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\}$; $\bar{X}_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_0(k)$; X_i 为比较序列,令

$$X_i = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}; \bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_i(k).$$

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i(\Delta_i(\min)) + 0.5 \max_i(\Delta_i(\max))}{|x_0(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i(\Delta_i(\max))} \quad (11)$$

式中: $\xi_i(k)$ 为灰色关联系数; $\min_i(\Delta_i(\min))$ 为矩阵

的最小值; $\max_i(\Delta_i(\max))$ 为矩阵的最大值; $x_0(k)$ 为参考序列; $x_i(k)$ 为比较序列。

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \quad (12)$$

式中: r_i 为关联度; N 为样本总数。

表4 低温黏弹特性评价指标的灰色关联度

评价指标	灰色关联度
蠕变劲度 S	0.849 5
蠕变速率 m	0.952 6
低温连续分级温度 T_c	0.952 4
ΔT_c	0.653 9
m/S 值	0.901 6
耗散能比 $W_d(t)/W_s(t)$	0.719 1
松弛时间 λ	0.832 4

从表4可以看出:SBS改性沥青混合料低温黏弹特性评价指标与低温弯曲试验最大弯拉应变的灰色关联度大小排序为 $m > T_c > m/S$ 值 $> S > \lambda > W_d(t)/W_s(t) > \Delta T_c$,蠕变速率 m 、 T_c 和 m/S 值的灰色关联度均大于 0.9 且相近,蠕变劲度和松弛时间的灰色关联度相近,而耗散能比和 ΔT_c 的灰色关联度较小。因此,当采用单一的蠕变速率或蠕变劲度评价聚合物改性沥青低温性能出现矛盾时,优先采用蠕变速率;采用 Burgers 模型计算的耗散能比和松弛时间可在一定程度上反映 SBS 改性沥青的低温性能,相比耗散能比,松弛时间更适合评价 SBS 改性沥青的低温性能; ΔT_c 与低温弯曲试验最大弯拉应变的灰色关联度最小,相比其他 6 种低温黏弹特性指标, ΔT_c 并不适宜用来评价 SBS 改性沥青的低温特性,但它能反映聚合物改性沥青的低温行为是受 S 控制还是受 m 控制,具有一定意义。建议优先选用蠕变速率、低温连续分级温度 T_c 和 m/S 值评价聚合物改性沥青的低温黏弹特性。

4 结论

(1) 以蠕变劲度 S 、蠕变速率 m 、低温连续分级温度 T_c 、 ΔT_c 、 m/S 值、松弛时间 λ 和耗散能比 $W_d(t)/W_s(t)$ 作为聚合物改性沥青低温黏弹特性的评价指标,就低温黏弹特性而言,SBS 掺量越高,SBS 改性沥青的低温性能越好。

(2) 蠕变劲度 S 、蠕变速率 m 、低温连续分级温度 T_c 、 ΔT_c 、 m/S 值、松弛时间 λ 和耗散能比 $W_d(t)/W_s(t)$ 与沥青混合料低温弯曲试验最大弯拉

应变 ϵ_B 的灰色关联度大小排序为 $m > T_c > m/S$ 值 $> S > \lambda > W_d(t)/W_s(t) > \Delta T_c$,当采用单一蠕变速率或蠕变劲度评价聚合物改性沥青的低温性能出现矛盾时,优先采用蠕变速率;建议采用流变学手段评价聚合物改性沥青的低温性能时优先选用蠕变速率、低温连续分级温度 T_c 和 m/S 值作为评价指标。

(3) ΔT_c 不适宜用来评价 SBS 改性沥青的黏弹特性,但它能判别聚合物改性沥青的低温行为是受蠕变劲度主导还是受蠕变速率主导,研究中应引起重视。

参考文献:

- [1] 张家伟,黄卫东,吕泉,等.TB胶粉复合SBS改性沥青及混合料的低温性能[J].建筑材料学报,2021,24(1):131-136+152.
- [2] 袁东东,蒋玮,肖晶晶,等.热氧老化作用对高黏改性沥青黏弹特性的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(6):1-11.
- [3] PIRMOHAMMAD S, AYATOLLAHI M R. Asphalt concrete resistance against fracture at low temperatures under different modes of loading[J].Cold Regions Science and Technology,2015,110:149-159.
- [4] 宋云连,张扬,吕鹏.基于分数阶黏弹性模型的温拌改性沥青低温性能[J].复合材料学报,2018,35(8):2140-2148.
- [5] 谭忆秋,符永康,纪伦,等.橡胶沥青低温评价指标[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):66-70.
- [6] 董文龙,关维阳,黄卫东.不同老化状态下SBS改性沥青的低温性能分析[J].建筑材料学报,2018,21(2):268-274.
- [7] 耿韩,李立寒,张磊,等.高模量沥青低温抗裂性能的评价指标[J].建筑材料学报,2018,21(1):98-103.
- [8] 颜可珍,王道理.聚合物改性沥青低温性能指标研究[J].建筑材料学报,2020,23(2):479-484.
- [9] 黄卫东,傅星恺,李彦伟,等.SBS类改性沥青低温性能评价及指标相关性分析[J].建筑材料学报,2017,20(3):456-463.
- [10] 徐加秋,阳恩慧,王世法,等.Sasobit温拌沥青的低温性能评价指标研究[J].公路交通科技,2020,37(2):8-14+39.
- [11] CHRISTENSEN D, MENSCHING D, ROWE G, et al.Past, present, and future of asphalt binder rheological parameters [C]//Synopsis of 2017 Technical Session 307 at the 96th Annual Meeting of the Transportation Research Board,2019.

(下转第91页)

5 结论

在加速加载足尺试验 0~120 万次的条件下,对京沪高速公路淮江段改扩建工程旧路芯样的沥青面层进行重复荷载蠕变试验和半圆弯曲试验,对芯样的基层进行回弹模量试验、无侧限抗压强度试验、劈裂强度试验,得到以下结论:

(1) 随加载次数的增加,相对于加载前,旧路沥青面层材料的蠕变次数呈现下降趋势,蠕变次数指数则有增有减。相同加载次数下对加铺层、上面层、中面层、下面层分别取芯,同一结构层的半圆弯曲试验应变能释放速率波动明显。

(2) 随着加载次数的增加,旧路上基层的回弹模量总体呈现上升趋势,下基层的回弹模量总体处于稳定状态;旧路基层的无侧限抗压强度出现一定波动,加载 80 万次时无侧限抗压强度达到最高,120 万次时出现下降;旧路基层的劈裂强度出现一定波动。

(3) 经过 120 万次的加速加载足尺试验,该高速公路改扩建工程旧路沥青面层的高温性能与抗裂性能及基层的力学性能总体处于稳定状态,扩建后的试验车道在低荷载情况下能满足路用性能要求。

参考文献:

- [1] 廖朝华,王家强.多车道高速公路改扩建工程路面分车道设计探讨[J].中外公路,2009,29(2):241-246.
- [2] 雷春鸣.湖南省高速公路改扩建工程初探[J].公路与汽运,2013(1):211-213.

- [3] 刘鹏举.基于高速公路沥青加铺层结构设计方案的研究[J].科技资讯,2011(14):86.
- [4] 蔡宏亮.足尺沥青路面加速加载试验数据的采集与分析[J].北方交通,2015(12):77-79.
- [5] 黄民伟.基于路面加速加载系统的冷再生混合料生产配合比研究[J].公路与汽运,2019(1):81-84+87.
- [6] 田泽峰.MLS 足尺沥青路面加速加载试验[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [7] 陈少幸,张肖宁,孟书涛,等.基于 ALF 加速加载试验的沥青层疲劳损伤[J].公路交通科技,2012,29(1):18-22.
- [8] 田泽峰.高速公路沥青路面典型结构加速加载试验研究[J].北方交通,2014(11):57-61.
- [9] 周丹,马泽欣,刘黎萍,等.基于足尺加速加载试验的现役沥青路面疲劳特性研究[J].公路交通科技,2020,37(1):17-24.
- [10] 吕松涛,陈杰.基于加速加载试验的沥青混合料刚度衰变规律研究[J].公路交通科技,2016,33(5):1-6+13.
- [11] 赵永成.高抗剪强度级配碎石基层沥青路面加速加载试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(2):113-116.
- [12] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [13] 交通部公路科学研究院.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S].北京:人民交通出版社,2009.

收稿日期:2022-06-09

(上接第 85 页)

- [12] American Society for Testing and Materials. Standard practice for determining the continuous grading temperatures and continuous grades for PG graded asphalt binders: ASTM D 7643—2010[S]. American Society for Testing and Materials, 2010.
- [13] LIN P, HUANG W D, TANG N P, et al. Understanding the low temperature properties of Terminal Blend hybrid asphalt through chemical and thermal analysis methods[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 543-552.
- [14] 王岚,王子豪,李超.基于黏弹性理论的多聚磷酸改性

- 沥青低温性能[J].复合材料学报,2017,34(2):322-328.
- [15] 邢明亮,孙岳,谢超,等.基于灰熵法的 SMA-5 混合料级配组成范围研究[J].公路,2017,62(11):225-230.
- [16] JIANG W, YUAN D, TONG Z, et al. Aging effects on rheological properties of high viscosity modified asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition), 2023, 10(2): 304-319.

收稿日期:2023-01-13