

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.07.057

SBS 改性沥青老化过程性能预测方程研究

江舒扬¹, 祁文洋², 王利俊²

[1.南京城市建设管理集团有限公司, 南京市 210000; 2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 建立 SBS 改性沥青在老化过程中性能衰变的非线性预测方程, 通过薄膜烘箱试验验证了预测方程的可靠性, 基于预测方程分析了 SBS 改性沥青老化过程中性能指标的变化速率。研究表明, 非线性方程 $x(t) = (Lx_0)/[1+(L-1)e^{-t}]$ 可用于预测针入度、软化点、延度在 SBS 改性沥青老化过程中的变化规律; 沥青针入度、软化点、延度的变化速率随老化时间的延长而逐渐下降, 其中延度指标在老化初期的变化速率下降最快; 可通过建立宏观性能指标与红外光谱 a_{1700}/a_{1600} 的关系方程, 进行 SBS 改性沥青老化程度的预测评估。

关键词: 道路工程; SBS 改性沥青; 预测方程; 老化速率; 红外光谱

中图分类号: U416.217

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)07-0241-03

0 引言

SBS 改性沥青老化过程中性能衰变的准确预测与评价是 SBS 改性沥青路面再生决策的依据。在 SBS 改性沥青混合料的施工以及长期使用过程中, 沥青会发生不同程度的热氧老化。我国现行沥青技术标准采用旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)对沥青的抗老化性能进行评价, 评价指标为残留针入度(比)、沥青质量损失、残留延度和软化点增量等^[1-2]。针对 SBS 改性沥青混合料施工及长期使用过程中的性能衰变规律开展研究, 建立其老化过程性能预测方程, 可为 SBS 改性沥青混合料在使用过程中的养护对策选择和养护时机决策提供参考依据。

RTFOT 试验仅能反映沥青的抗短期老化性能, 而不能动态地反映沥青在长期使用过程中不同时刻的老化量和老化速率^[3]。因此, 需对沥青在老化过程中的性能衰变规律进行研究, 以预测沥青的长期抗老化性能。已有研究建立了沥青指标与老化时间的关系, 但未实现 SBS 改性沥青随老化时间性能变化的预测与方程表达。Norman W Garrick^[4]认为沥青黏度与老化时间成指数关系。郑南翔等人^[5]建立沥青老化的非线性微分方程, 并通过紫外线老化试验和旋转薄膜烘箱(RTFOT)试验进行了可靠性验证。然而, 非线性微分方程是否适用于 SBS 改性沥青老化过程中性能衰变的预测还有待研究。

本文建立了 SBS 改性沥青的非线性微分老化方程并求出通解, 通过薄膜烘箱试验(TFOT)验证老化方程的可靠性, 分析了 SBS 改性沥青老化过程中老化速率的变化规律, 探讨了基于微观试验预测评估 SBS 改性沥青老化程度的方法。

1 老化非线性预测方程建立

SBS 改性沥青在实际使用过程中会经受光照、降水、氧气等自然因素作用, 且自然因素是时刻在变化的。用数学模型描述 SBS 改性沥青在老化过程中的性能变化规律时需作如下假定:

(1) 老化条件恒定, 老化过程中没有出现老化条件的变动(自然因素恒定);

(2) SBS 改性沥青性能(针入度、软化点、延度)的变化随时间连续;

(3) SBS 改性沥青性能与老化时间呈非线性关系。

基于以上假定, 建立 SBS 改性沥青老化非线性微分方程如式(1)所示。

$$X'(t) = ax(t) - bx^2(t) \quad (1)$$

式中: $X'(t)$ 为 SBS 改性沥青 t 时刻的性能变化速率; $x(t)$ 为 SBS 改性沥青 t 时刻的性能; a, b 为常数。

令 $a = r, a/b = k$, 则方程(1)为:

$$X'(t) = rx(t)[1 - bx(t)/k] \quad (2)$$

对式(2)进行分离变量求解, 解得方程(1)的通解:

$$x(t) = k/(1 + ce^{-rt}) \quad (3)$$

假设沥青在初始时刻($t=0$)的性能为 x_0 , 则将 $t=0$ 代入式(3), 可求解 C 得:

$$C = (k/x_0) - 1 \quad (4)$$

令 $k = Lx_0$, 并将式(4)代入式(3), 得到:

收稿日期: 2022-08-22

基金项目: 南京市建设行业科技计划项目(KS2123)

作者简介: 江舒扬(1988—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事工程管理工作。

$$x(t)=(Lx_0)/[1+(L-1)e^{-rt}] \quad (5)$$

式(5)即为 SBS 改性沥青老化过程性能衰变预测方程。对于式(5),当 t 趋向于无穷大时, L 为 SBS 改性沥青老化最终时刻的性能与初始时刻性能的比值。 r 是对于给定 L 值时 SBS 改性沥青性能老化过程变化速率的表征值。

2 预测方程的可靠性验证

室内制备 3%与 6%SBS 含量的改性沥青,分别进行 5 h、10 h、15 h 及 24 h 的 TFOT 老化试验,测定不同老化时间后的沥青针入度、10℃延度、软化点,试验结果分别见表 1、表 2。

表 1 不同老化时间 3%SBS 含量改性沥青技术指标

老化时间/h	针入度/0.1 mm	软化点/℃	10℃延度/cm
0	54.9	63.5	49.5
5	46.0	70.0	26.0
10	35.0	71.2	13.1
15	28.3	72.5	8.0
24	26.5	77.2	—

表 2 不同老化时间 6%SBS 含量改性沥青技术指标

老化时间/h	针入度/0.1 mm	软化点/℃	10℃延度/cm
0	44.4	75.5	57.6
5	37.5	78.9	34.8
10	32.5	80.1	21.6
15	23.1	84.5	13.3
24	20.4	85.6	—

以原样 SBS 改性沥青的性能为初始值,以老化 24 h 的 SBS 改性沥青性能为终值,采用 EXCEL 规划求解法分别计算 3%、6%SBS 含量改性沥青老化过程性能衰变的预测方程参数(L, r),得到预测方程,见表 3。

表 3 SBS 改性沥青老化过程性能衰变预测方程

SBS /%	技术指标	参数(L, r)	预测方程
3	针入度 P	$L=0.483, r=0.074$	$P=26.5/(1-0.517e^{-0.074t})$
	软化点 R	$L=1.216, r=0.106$	$R=77.2/(1+0.216e^{-0.106t})$
	10℃延度 D	$L=0.162, r=0.056$	$D=8/(1-0.838e^{-0.056t})$
6	针入度 P'	$L=0.460, r=0.050$	$P'=20.4/(1-0.540e^{-0.074t})$
	软化点 R'	$L=1.134, r=0.096$	$R'=85.6/(1+0.134e^{-0.096t})$
	10℃延度 D'	$L=0.231, r=0.063$	$D'=13.3/(1-0.769e^{-0.063t})$

根据性能预测方程,可计算出不同老化时间的 SBS 改性沥青技术指标值。将 SBS 改性沥青技术指标计算值与试验值绘制为散点图,见图 1、图 2。SBS 改性沥青技术指标计算值与试验值的相关系数见表 4。可以看出通过预测方程计算出的 SBS 改性沥青不同老化时间的技术指标值与试验值具有较好的一致性,其相关系数不小于 0.96。

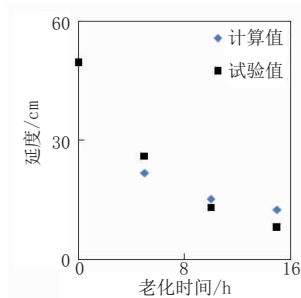
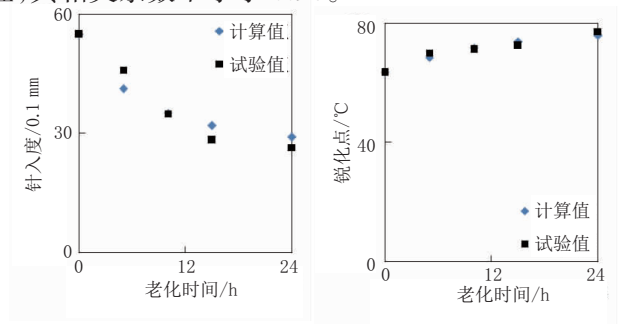


图 1 3%SBS 含量改性沥青老化过程性能计算值与试验值

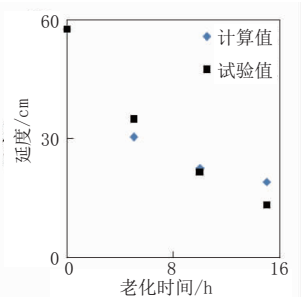
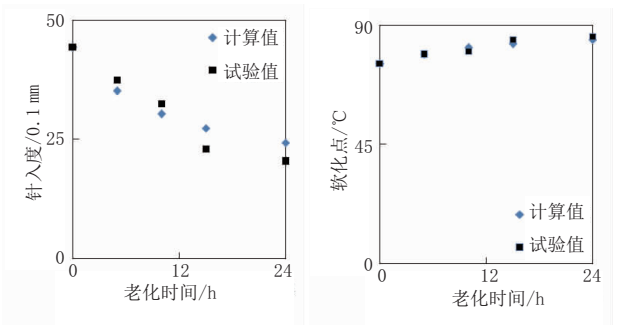


图 2 6%SBS 含量改性沥青老化过程性能计算值与试验值

表 4 预测方程与试验值相关系数

指标	针入度 P	软化点 R	10℃延度 D	针入度 P'	软化点 R'	10℃延度 D'
系数	0.97	0.97	0.98	0.96	0.97	0.98

以上分析表明,SBS 改性沥青老化非线性预测方程具有较高的可靠性,可用以预测 SBS 改性沥青在

老化过程中的性能衰变规律。

3 SBS 改性沥青老化速率分析

SBS 改性沥青老化过程性能衰变预测方程表征了沥青技术指标与老化时间的关系,对式(5)进行求导,可得到沥青在不同时刻的老化速率函数,如式(6)所示。

$$X'(t) = \frac{rLx_0(L-1)e^{-nt}}{(1+(L-1)e^{-nt})^2} \quad (6)$$

将表 3 中的(L,r)代入式(6),可计算得到 SBS 改性沥青技术指标变化速率与老化时间的关系,见图 3。可以看出,SBS 改性沥青针入度、软化点、10℃延度的变化速率在开始时刻最大,随着老化时间的延长,变化速率逐渐下降,最后趋于平衡,其中延度指标的变化速率在老化初始阶段急剧下降。

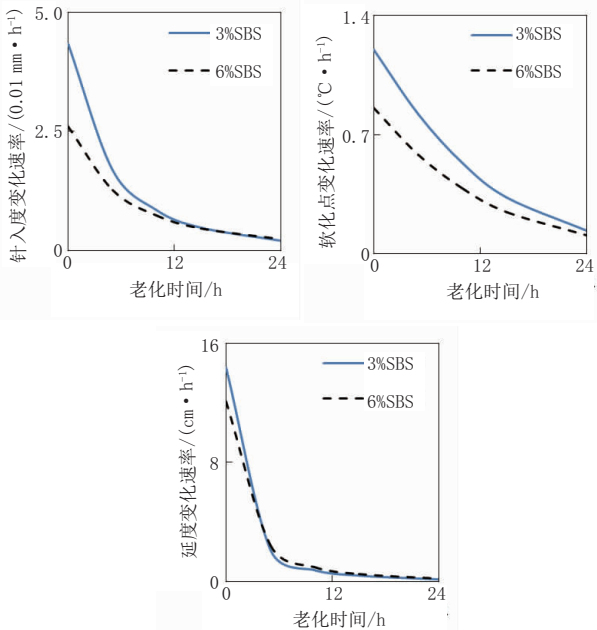


图 3 SBS 改性沥青老化速率

综上,SBS 改性沥青老化非线性预测方程可用以分析老化过程中沥青性能指标的变化速率,在 SBS 改性沥青老化过程中,针入度、软化点、延度指标的变化速率随老化时间的增加而逐渐下降,其中延度指标变化速率在老化初期的下降最快。

4 SBS 改性沥青老化过程微观变化

取少量 RAP 在室外自然环境中分别放置 60 d、120 d,然后分别抽提回收 RAP 中的老化 SBS 改性沥青,并进行红外光谱的测试,未在室外放置的 RAP 计为 0 d。针对不同放置天数的 RAP 进行红外光谱试验。

已有研究表明 SBS 改性沥青在老化过程中发生

吸氧反应,为消除沥青红外光谱试验中的误差,通常采用 1 700 cm⁻¹ 与 1 600 cm⁻¹ 处的吸光度的比值(a₁₇₀₀/a₁₆₀₀)来表征沥青中 C=O 基团的相对含量^[6],进而评价沥青的吸氧程度。

测得的红外光谱 a₁₇₀₀/a₁₆₀₀ 与室外自然放置天数的关系见图 4。分析图 4 可知,随着自然放置天数的增加,a₁₇₀₀/a₁₆₀₀ 呈增大趋势,表明了 RAP 中老化 SBS 改性沥青在自然环境中发生了吸氧老化。这也在一定程度上反映出红外光谱试验用以定量分析 SBS 改性沥青现场老化程度的有效性。

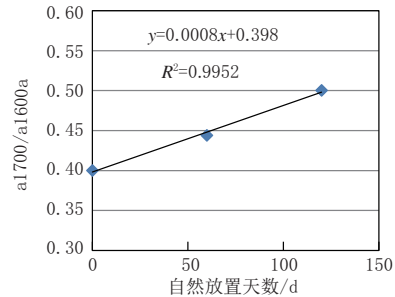


图 4 a₁₇₀₀/a₁₆₀₀ 与放置天数的关系

从图 4 中还可以看出 SBS 改性沥青 a₁₇₀₀/a₁₆₀₀ 与老化时间呈线性正相关关系。对于在役 SBS 改性沥青路面中的老化 SBS 改性沥青进行性能测定,通常需要抽提回收。抽提回收过程中采用三氯乙烯进行老化 SBS 改性沥青的萃取,萃取出的老化 SBS 改性沥青中含有的少量三氯乙烯对其性能的影响较大,使得测试分析结果存在一定误差^[7]。由此,可通过建立 a₁₇₀₀/a₁₆₀₀ 与宏观性能指标的关系,在集料颗粒表明刮取少量沥青胶浆,通过红外光谱快速测定老化 SBS 改性沥青性能,进而根据预测方程评估 SBS 改性沥青老化程度。

5 结 语

(1)基于假定条件及公式推导,建立了 SBS 改性沥青在老化过程中性能衰变的非线性预测方程(公式 5)。式中,L 为 SBS 改性沥青老化最终时刻的性能与初始时刻性能的比值;r 是对于给定 L 值时 SBS 改性沥青性能老化过程变化速率的表征值。

(2)通过室内薄膜烘箱老化试验过程中 SBS 改性沥青针入度、软化点、10℃延度的变化趋势,验证了非线性预测方程用以预测 SBS 改性沥青在老化过程中的性能衰变规律是可靠的。

(3)非线性预测方程可用以分析老化过程中 SBS 改性沥青性能指标的变化速率,其针入度、软化点、延度等性能指标的变化速率随老化时间的增加而逐

(下转第 291 页)

(2)平行于隧道走向的建筑柱基不均匀沉降相对最大值发生在隧道掘进过程中。垂直于隧道走向的建筑柱基不均匀沉降相对最大值则有概率发生在全过程中的每个阶段,但柱基沉降绝对最大值发生在后期固结沉降阶段。

(3)对隧道开挖与建筑物荷载的相互作用进行分析,得到相互影响规律:当地表存在建筑物时,特征点沉降变化趋势与天然地面沉降变化趋势基本保持一致,但是在建筑物荷载的作用下进行隧道开挖施工,应力释放过程变长,后期的固结沉降量也相应增加,导致地表沉降要明显大于天然地表的沉降。

参考文献:

- [1] BURLAND J B, WROTH C P. Settlement of buildings and associated damage. [C]//SOA Review,Conference of Settlement of Structures Cambridge,Pentech Press,London,1974:611-654.
- [2] BURLAND J B, BROMS B B, MELLO V F B D. Behavior of foundations and structures[J]. Proc.inc.conf Soil Mech, 1977(2):495-546.
- [3] BOSCARDIN M D, CORDING E J. Building response to excava-

tion-induced settlement [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(1):1-21.

- [4] 皮亮,蒋树屏.穿越高层建筑大跨隧道施工力学与支护结构研究[J].地下空间与工程学报,2017(5):1303-1310.
- [5] 郭靖,陈健云,余流.隧道对地表临近既有建筑物层间位移影响分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(3):765-772.
- [6] 张自光,仇文革.地铁区间隧道近接建筑施工工程影响分区研究[J].现代隧道技术,2016,53(1):75-82.
- [7] 徐泽民,韩庆华,郑刚,等.地铁隧道下穿历史风貌建筑影响的实测与分析[J].岩土工程学报,2013,35(2):364-374.
- [8] 陈瑜嘉,张自光,杨树桐.地铁隧道近接建筑施工破坏机制分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(s1):198-204.
- [9] 彭立敏,丁祖德,黄娟,等.隧道穿越方式对地表建筑物变形影响的数值分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(1):313-319.
- [10] 吴锋波,金淮,尚彦军,等.城市轨道交通隧道周边建(构)筑沉降预测方法研究[J].岩石力学与工程学报,2013(s2):3535-3544.
- [11] 路平,耿艳,张稳军,等.平行隧道穿越形式对砌体建筑变形的影响研究[J].隧道建设(中英文),2019(1):60-67.
- [12] 张文. 地铁隧道穿越既有市政道路的地层变形规律与控制方法研究[D].山东大学,2017.

~~~~~  
(上接第 243 页)

渐下降,其中延度指标变化速率在老化初期的下降最快。

(4)提出了 SBS 改性沥青老化过程中性能预测方程建立的方法,并初步探究了基于红外光谱微观试验快速测定评估 SBS 改性沥青老化程度的可行性。尚需进一步研究不同类型 SBS 改性沥青老化过程非线性性能预测方程的适用性问题以及老化 SBS 改性沥青红外光谱测试精度及其影响因素问题。

#### 参考文献:

- [1] 张争奇,梁晓莉,李平.沥青老化性能评价方法[J].交通运输工程学报,2005,5(1):1-5.

- [2] 汪双杰,台电仓.改性沥青结合料低温性能评价指标[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(3):25-30.
- [3] 吴传海,袁玉抑,王选仓.重交通道路沥青老化规律及评价方法[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(5):35-39.
- [4] No rman W Garr ick. Nonlinear Differential Equation fo r Modeling Asphalt Ag ing [J],Journal of Materials in Civil Eng ineering, 1995, 7(4):265-268.
- [5] 郑南翔,纪小平,侯月琴.沥青紫外线老化后性能衰减的非线性预测[J].公路交通科技,2009,26(4):33-36,41.
- [6] 王宗贤,阙国和,梁文杰.用微波和红外光谱研究沥青的热老化性质[J].石油沥青,1992(2):1-6.
- [7] 王杰,曾蔚,秦永春,等.SBS 改性沥青回收影响因素及改进措施[J].武汉大学学报(工学版),2019(1):46-50,88.