

# 基于灰色理论的沥青紫外线老化后车辙因子预测

廖隽

(山西省交通科学研究院, 山西 太原 030006)

**摘要:** 通过数学公式对灰色理论模型进行推导, 采用 7 d 紫外线老化车辙因子数据建立紫外线老化车辙因子灰色理论模型, 通过精度检验, 该模型适用于紫外线老化车辙因子预测; 运用该模型对第 8、9、10 d 紫外线老化车辙因子进行预测, 结果表明紫外线老化下的车辙因子与车辙因子老化指数都呈指数增长。

**关键词:** 公路; 废胶粉改性沥青; 紫外线老化; 车辙因子; 灰色理论模型

**中图分类号:** U418.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2018)03-0109-03

老化性能是沥青的重要性能之一, 老化性能不好可能给沥青路面带来一定危害, 使沥青路面寿命大大降低。一般使用旋转薄膜烘箱法(RTFOT)、压力罐加速老化法(PAV)、紫外线老化法研究沥青的老化性能, 其中 RTFOT 主要针对施工过程中的短期老化; PAV 模拟路面使用过程中沥青氧化过程的长期老化, 在 RTFOT 后进行, 条件较苛刻; 紫外线老化法模拟路面使用过程中光对沥青的老化作用, 在 RTFOT 后进行。该文选用紫外线老化法, 对废胶粉改性沥青进行不同阶段的紫外线老化试验, 根据试验数据建立灰色理论预测模型对沥青紫外线老化后的车辙因子进行预测。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

采用东莞泰和沥青有限公司生产的 70<sup>#</sup> 基质沥青, 其性能测试结果见表 1。改性剂采用 30 目(粒径约 0.6 mm)废旧轮胎橡胶粉(简称废胶粉), 掺量为 18%(质量分数)。采用高速剪切机制备废胶粉改性沥青进行紫外线老化下车辙因子研究。

表 1 70<sup>#</sup> 基质沥青的性能

检测项目	试验值	要求值
25 °C 针入度/(0.1 mm)	68	60~80
软化点/°C	48.5	≥47
15 °C 延度/cm	>100	≥100
RTFOT 质量损失/%	0.08	±0.8
老化后 残留针入度比/%	66.3	≥63
10 °C 残留延度/cm	6.7	≥6

### 1.2 试验方法

采用紫外线老化仪对废胶粉改性沥青进行加速

老化试验, 研究不同紫外线老化时间下废胶粉改性沥青的老化性能。考虑到沥青在与矿料高温拌和时会发生热氧老化, 热氧老化是沥青老化的一个重要阶段, 先进行 RTFOT 试验。将经过 RTFOT 老化后的样品置于 6 个盛样皿中, 每个盛样皿里约 20 g 沥青, 保证沥青膜厚度为 1 mm 左右。这是因为紫外线对于沥青的老化只发生在沥青表面 1 mm 厚度内。再将盛样皿置于紫外线老化箱中, 使盛样皿正好处于紫外线灯的正下方。为了防止热老化, 紫外线老化箱内的温度设为 30 °C。试验时严格控制老化时间, 每天在紫外线灯光下照射 16 h, 间隔 8 h。

采用 MCR301 型动态剪切流变试验仪对经过紫外线老化的沥青样品进行温度扫描, 采取应变控制模式, 应变值控制在 10%, 试验频率为 10 rad/s。选用直径 25 mm 的转动轴, 转动轴板至底板的间距为 1 mm。每种紫外线老化时间对应的沥青样品设置 3 个平行试样, 通过试验得到沥青在 52、58、64、70 °C 下的复数模量和相位角, 由此计算得到沥青的车辙因子。

## 2 灰色理论模型

### 2.1 GM(1,1) 灰色理论模型的建立

设车辙因子的原始数列为  $\{x^{(0)}\} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)\}$ , 对应的时间分别为  $\{t\} = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ , 按式(1)对原始数列进行累加, 得到式(2)。

$$x^{(1)}(k) = \sum_{n=1}^k x^{(0)}(n) \quad (1)$$

$$\{x^{(1)}(k)\} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (2)$$

令  $Y^1 = \{x^{(1)}(k)\}$ ,  $K = K + A$  ( $A$  为常数), 则:

$$Y^1: x^{(0)}(k) + ay^{(1)}(k) = u \quad (3)$$

$$y^{(1)}(k) = 1/2[y^{(1)}(k) + y^{(1)}(k)] \quad (4)$$

$G(1,1)$  原始方程为:

$$\frac{dx^1}{dt} + ax^t = u$$

式中:  $a$  为灰色系数;  $u$  为灰色作用量。

利用矩阵确定参数  $a, u$ , 得:

$$[a, u]^T = (CC^T)^{-1} C^T Z_n \quad (5)$$

$$Z_n = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (6)$$

计算得:

$$\tilde{x}^{(1)}(k+1) = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (7)$$

将  $k = 1, 2, 3, \dots, n-1$  代入式(7), 得:

$$\tilde{x}^{(0)}(k) = \tilde{x}^{(1)}(k) - \tilde{x}^{(1)}(k-1) \quad (8)$$

$$\text{令 } P = \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right], Q = \frac{u}{a}, \text{ 得车辙因子预}$$

测公式为:

$$\tilde{x}^{(1)}(k+1) = Pe^{-ak} + Q \quad (9)$$

$$t = \frac{n \ln[A(1-a^z)/\lg Z]}{a} + t_0 \quad (10)$$

式中:  $n$  为时间间隔;  $A$  为  $G(1,1)$  模型系数;  $a$  为增长系数;  $t_0$  为原始数据第一个时间点。

## 2.2 灰色理论模型精度检测

定义残留值  $\epsilon$  为原始车辙因子与实际车辙因子之差, 即:

$$\epsilon = x^{(0)}(k) - \tilde{x}^{(0)}(k) \quad (11)$$

利用小误差概率  $P$  与后验差比  $C$  判断  $G(1,1)$  灰色理论模型的误差精度, 其中  $P$  按式(12)计算,  $C = S_1/S_2$  ( $S_1$  为原始方差;  $S_2$  为预测方差)。灰色理论模型的精度等级见表 2。

$$P = \{|\epsilon(k) - \bar{\epsilon}| < 0.6745 S_1\} \quad (12)$$

式中:  $\bar{\epsilon}$  为  $\epsilon$  的均值。

## 3 车辙因子灰色预测模型

将 RTFOT 后的沥青置于室温紫外线老化仪下

表 2 灰色理论模型的精度等级

精度等级	小误差概率 $P$	后验差比 $C$	预测精度状况
一级	$>0.95$	$<0.35$	好
二级	$>0.80$	$<0.45$	合格
三级	$>0.70$	$<0.50$	较为合格
四级	$\leq 0.70$	$\geq 0.65$	不合格

老化  $t_0$  时间, 再进行动态剪切流变试验, 得到车辙因子  $x^{(0)}(k)$  (见表 3):

$$x^{(0)}(k) = \{x^{(0)}(0), x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4), x^{(0)}(5), x^{(0)}(6), x^{(0)}(7)\} = \{5.326, 7.846, 9.457, 11.879, 14.569, 15.697, 16.645, 18.499\} \quad (13)$$

表 3 紫外线老化后车辙因子

$t_0/d$	不同温度( $^{\circ}\text{C}$ )下的车辙因子/kPa			
	52	58	64	70
0	5.326	2.179	0.968	0.464
1	7.846	3.489	1.568	0.798
2	9.457	5.781	2.149	1.497
3	11.879	7.658	3.579	1.946
4	14.569	9.981	5.149	2.897
5	15.697	11.282	6.146	3.782
6	16.645	12.121	7.056	4.288
7	18.499	13.246	7.980	5.179

将式(13)代入式(2), 得:

$$C = \begin{bmatrix} -9.457 + 7.846/2 & 1 \\ -11.879 + 14.569/2 & 1 \\ \dots & \dots \\ -18.499 + 16.645/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Z_7 = \{5.326, 7.846, 9.457, 11.879, 14.569, 15.697, 16.645, 18.499\} \quad (15)$$

求得灰色系数如下:  $P = 6.425$ ;  $a = 0.169$ ;  $Q = 0.016$ 。

52  $^{\circ}\text{C}$  下紫外线老化车辙因子灰色预测模型为:

$$\tilde{x}^{(1)}(k+1) = 6.425e^{-0.169k} + 0.016$$

该模型的灰色关联检测结果为  $P = 0.958$ ,  $C = 0.31$ , 预测等级为好。

同理可得 58、64、70  $^{\circ}\text{C}$  下紫外线老化后车辙因子预测模型(见表 4)。

由表 3、表 4 可知: 废胶粉改性沥青在紫外线老化后, 车辙因子变大, 且老化时间越长, 车辙因子越大。这是因为紫外线老化过程会使部分烃类有机物散失或分解, 部分聚合有机物变性, 轻质油分减少,

表 4 紫外线老化车辙因子预测模型

温度/℃	预测模型	<i>P</i>	<i>C</i>
52	$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 6.425e^{-0.169k} + 0.016$	0.958	0.31
58	$\hat{x}^{(2)}(k+1) = 2.271e^{-0.251k} + 0.113$	0.966	0.29
64	$\hat{x}^{(3)}(k+1) = 1.182e^{-0.307k} + 0.075$	0.972	0.28
70	$\hat{x}^{(4)}(k+1) = 0.612e^{-0.339k} + 0.013$	0.980	0.26

沥青质地变硬,剪切流变仪转子所受到的剪切摩阻力变大,导致剪切复数模量变大、车辙因子变大。紫外线老化车辙因子衰变灰色理论模型的预测等级为好,能预测废胶粉车辙因子在紫外线老化不同时间下的衰变过程。

4 紫外线老化车辙因子预测

运用上述紫外线老化后车辙因子灰色预测模型对紫外线老化第 8、9、10 d 的车辙因子进行预测,结果见表 5、表 6。

表 5 紫外线老化下车辙因子预测结果

<i>t<sub>0</sub></i> /d	不同温度(℃)下的车辙因子/kPa			
	52	58	64	70
8	20.970	13.158	10.135	6.565
9	24.830	16.912	13.776	9.214
10	29.401	21.736	18.726	12.931

表 6 紫外线老化下车辙因子老化指数

<i>t<sub>0</sub></i> /d	不同温度(℃)下的车辙因子老化指数			
	52	58	64	70
8	3.937	6.039	10.470	14.148
9	4.662	7.761	14.232	19.857
10	5.520	9.975	19.345	27.869

从表 5 可看出:同一温度条件下,随着紫外线老化时间的增加,车辙因子不断增加;在同样紫外线老化时间下,随着温度的升高,车辙因子呈减小趋势。

从表 6 可看出:在同样温度下,车辙因子老化指数随着紫外线老化时间的增长而增大;在同一紫外线老化时间下,老化指数随着温度的增高而增大,说明试验温度越高,紫外线老化后的车辙因子与老化前的差值越大。紫外线老化下车辙因子和车辙因子老化指数均呈指数增长,说明紫外线老化时间越长,紫外线对废胶粉改性沥青老化的影响越大。

5 结论

(1) 灰色理论数学模型适用于紫外线老化后的

车辙因子预测。

(2) 紫外线老化下的车辙因子与车辙因子老化指数都呈指数增长,说明紫外线老化时间越长,紫外线对废胶粉改性沥青老化的影响越大。实际工程中,在废胶粉改性沥青路面使用一定年限时,需对其进行处理,防止出现指数型老化现象。

参考文献:

[1] 张耀锋.动态灰色理论模型在路基沉降预测中的应用[J].公路,2010(2).

[2] 罗毅.基于灰色理论与广义回归神经网络的客运量预测模型研究[D].成都:西南交通大学,2007.

[3] 李波,姜敏,曹贵,等.温拌沥青混合料温度变化的灰色预测模型[J].武汉理工大学学报,2011,33(8).

[4] 徐鸥明,韩森,李洪军.克拉玛依 AH90 及其 SBS 改性沥青紫外线老化研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2007,31(1).

[5] Z Xie,J hen.Effect of weathering on rubberized porous European mixture[J].Journal of Materials in Civil Engineering,2016,28(8).

[6] 叶奋,孙大权,黄彭,等.沥青强紫外线光老化性能分析[J].中国公路学报,2006,19(6).

[7] Z Xie,J Shen.Effect of cross-linking gent on the properties of asphalt rubber[J].Construction & Building Materials,2014,67.

[8] 刘秀菊,郑彦军.基于灰色理论的沥青混凝土路面使用性能多指标预测方法研究[J].公路,2012(4).

[9] 李瑞超,梁成浩,姚竟迪,等.应用灰色系统理论预测沥青涂层在土壤模拟液中的寿命[J].表面技术,2016(2).

[10] 周志刚,孙宁,杨文灿,等.老化 SBS 改性沥青再生性能预估模型研究[J].公路与汽运,2017(6).

[11] 栗培龙.道路沥青老化行为与机理研究[D].西安:长安大学,2007.

[12] 张鹏,张坤,张春海.基于 MA—GM(1,1)的高速公路沥青路面使用性能预测[J].公路与汽运,2017(4).

[13] 王海龙.宁夏高等级公路沥青路面使用性能评价与预测研究[D].西安:长安大学,2012.

[14] 宋蓝,陈吉明,湛文涛.沥青路面使用性能的灰色预测研究[J].公路与汽运,2014(3).

[15] 谷静娜.基于灰色模型的路面车辙变形预测方法[J].交通世界:建养机械,2015(25).

[16] 张琛,汪海年,王宠惠.基于组合模型的沥青路面车辙预测[J].北京工业大学学报,2016,42(8).

[17] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].