

文章编号:1671-6833(2013)01-0031-04

## 基于灰色突变理论的沥青老化行为分析

张红梅<sup>1</sup>, 边开磊<sup>2</sup>, 刘圣洁<sup>3</sup>, 徐 东<sup>3</sup>

(1. 青岛理工大学(临沂) 土建工程系, 山东 临沂 273400; 2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065001; 3. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为了研究沥青热氧老化的时间规律, 利用室内旋转薄膜(RTFOT)试验, 根据系统工程科学理论和非线性科学的灰色突变理论模型, 对不同老化程度的沥青性能指标值进行灰色生成处理, 建立沥青老化的灰色尖点突变模型, 对沥青热氧老化的规律进行分析. 结果表明, 沥青的老化过程存在突变现象, 且其性能突变与老化反应之间存在滞后现象, 沥青混合料拌合和热储存时间应保证小于 50 min, 沥青路面应采取适当措施延长老化突变时间, 使路面具有更长的服务寿命.

**关键词:** 道路工程; 沥青老化; 旋转薄膜烘箱老化; 老化规律; 灰色突变

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.01.008

### 0 引言

沥青老化从性能上反映为沥青软化点升高、针入度下降、黏度升高及延度降低<sup>[1-2]</sup>. 为了在短期内得到沥青的老化规律, 目前多利用强制老化来对沥青老化的性能进行评价, 但现有的室内试验方法只能评价短期内的沥青老化, 而不能动态地描述沥青在使用过程不同时期的老化程度<sup>[3-6]</sup>.

目前关于沥青性能随沥青老化时间的规律研究较多<sup>[7-9]</sup>, 许多学者尝试利用非线性方法对沥青老化规律进行建模预测, 并取得很好的效果<sup>[3-10]</sup>. 但另有研究表明, 对时间序列, 当构建模型时, 虽然有时拟合精度较理想, 但数据可能存在着摆动和跃迁现象, 可能产生预测结果严重偏离实际情况的可能<sup>[11]</sup>.

笔者结合沥青的室内老化试验, 分析不同老化时间后, 沥青的针入度、软化点、黏度和延度的衰减规律, 并利用灰色突变理论, 对老化性能的状态突变进行分析预测, 为定性和定量三维分析沥青老化提供参考依据.

### 1 灰色突变理论

灰色系统理论是研究少数据、贫信息不确定

性的方法, 以“部分信息已知, 部分信息未知”的小样本、贫信息等不确定性系统为研究对象. 但是对于某特定的系统而言, 其必然具有特定的功能和内在的有序的规律, 只是其内在规律并未充分外露, 虽然从观测数据上看, 有些是杂乱无规则的数据列, 但对于灰色系统而言, 通过对原始数据处理生成序列, 从生成序列可以得到规律性较强的生成函数<sup>[12]</sup>.

突变尖点理论适用于统计数据序列呈现一定趋势规律的情况. 但如果数据序列为随机震荡型, 仅利用尖点突变模型对数据进行建模预测有可能产生误差. 故笔者分析时, 采用灰色系统理论和尖点突变理论相结合, 这样既能对数据序列的潜在规律进行建模预测, 也考虑到了数据可能存在的突变, 跳跃信息, 使得预测的结果得到提高<sup>[13]</sup>.

### 2 试验方案

室内老化模拟试验可以较为精确地控制试验条件, 人为加速沥青老化过程, 是目前评价沥青老化的常用手段. 国内外学者经过大量的试验研究, 认为热氧老化是沥青老化的最主要因素<sup>[14-15]</sup>.

笔者研究沥青老化规律时, 利用旋转薄膜烘箱(RTFOT)的老化方法, 对克拉玛依 90#沥青进行 0, 30, 85, 180, 270, 360, 450 min 的老化, 然后

收稿日期: 2012-09-20; 修订日期: 2012-11-20

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200831800029)

作者简介: 张红梅(1986-), 女, 山东烟台人, 青岛理工大学助教, 主要从事路面材料研究, E-mail: 302587545@qq.com.

进行相关的试验.

### 3 灰色突变建模过程

笔者首先以沥青老化不同程度后针入度指标为例进行建模. 在对原始数据建模前, 经过等间隔化处理, 得到新的老化时间与针入度. 设沥青在老化  $t_1, t_2, t_3 \cdots t_n$  测得针入度为  $x_1, x_2, x_3, \cdots x_n$ . 可得原始数据序列为

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \cdots, x^{(0)}(n)), (n \geq 2). \quad (1)$$

在建模过程中, 对原始数据序列进行累加生成处理, 进行一次累加生成(1-AGO) 后数列为:

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \cdots, x^{(1)}(n)), n \geq 2;$$

$$x^{(1)}(k) = \sum_{j=0}^k x^{(0)}(j), (k \leq m). \quad (2)$$

由于一次累加生成后的指数形式不符合突变理论的建模需要, 考虑到任何单变量函数均可以采用 Taylor 展开, 将式(2) 进行展开:

$$\hat{x}^{(1)}(t) = x^{(1)}(0) + \frac{\partial x}{\partial t} \Big|_{t=0} t + \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \Big|_{t=0} t^2 + \cdots + \frac{\partial^n x}{\partial t^n} \Big|_{t=0} t^n. \quad (3)$$

对于一定趋势规律的数据序列过程, 当其 Taylor 公式截取到第五项时, 其计算精度即可保证, 从而可得:

$$x = \sum_{j=0}^4 a_j t^j, \quad (4)$$

其中,  $a_j = \frac{\partial^j x}{\partial t^j} \Big|_{t=0}.$

令  $t = T - q, q = \frac{a_3}{4a_4}$  对上式作变量代换, 可得

尖点突变的一般形式:

$$X = b_4 T^4 + b_2 T^2 + b_1 T + b_0. \quad (5)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q^4 & -q^3 & q^2 & -q & 1 \\ -4q^3 & 3q^2 & -2q & 1 & 0 \\ 6q^2 & -3q & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix}.$$

再将式(5) 进一步变换为

$$V(T) = T^4 + uT^2 + vT + c. \quad (6)$$

上式中  $c$  是一个对突变分析无意义的常数项.

$$u = \begin{cases} \frac{b_2}{\sqrt{b_4}}, & b_4 > 0 \\ -\frac{b_2}{\sqrt{-b_4}}, & b_4 < 0 \end{cases};$$

$$v = \begin{cases} \frac{b_1}{\sqrt[4]{b_4}}, & b_4 > 0 \\ -\frac{b_1}{\sqrt[4]{-b_4}}, & b_4 < 0 \end{cases};$$

$$T = \begin{cases} (t+q) \cdot \sqrt[4]{b_4}, & b_4 > 0 \\ (t+q) \cdot \sqrt[4]{-b_4}, & b_4 < 0 \end{cases}.$$

(6) 式即为突变理论中的尖点突变模型, 以  $u, v$  为控制变量,  $T$  为状态变量.

由突变理论可知, 对于突变函数模型的势函数  $V(T)$ , 其所有的临界点构成了平衡曲面, 令  $V'(T) = 0$ , 即可得到沥青老化系统的平衡曲面方程:

$$4T^3 + 2uz + v = 0. \quad (7)$$

则由  $V'(T) = 0$  和  $V''(T) = 0$  消去  $T$  后可得沥青老化后针入度交叉集方程为

$$\Delta = 8u^3 + 27v^2. \quad (8)$$

由突变理论的判定法可以对沥青老化后针入度性能的突变状态判定:

当  $\Delta > 0$  时, 为稳定状态, 表示沥青的针入度性能变化保持平稳;

当  $\Delta = 0$  时, 为临界状态, 表示沥青的针入度在对应的时刻处于临界状态;

当  $\Delta < 0, V(T)'' = 12T^2 + 2u < 0$  时, 为不稳定状态, 表示沥青的针入度性能在对应的时刻发生了突变.

根据突变理论, 当沥青老化处于不稳定状态时, 分叉集的右支 ( $v > 0$ ) 仅是数学意义上的突变, 而状态函数  $V(T)$  并未发生变化. 因此, 在利用突变理论分析时, 重点对其左支  $v < 0$  研究, 此时, 当  $u = 0$  时, 平衡曲面方程有三个零根, 当  $u < 0$  时, 平衡曲面的方程根为

$$T_1 = 2 \left( -\frac{u}{6} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (9)$$

$$T_2 = T_3 = - \left( -\frac{u}{6} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

系统在跨越交叉集时状态发生了突变, 突变的间隔为:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 3 \left( -\frac{u}{6} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

其对应于沥青老化突变的前后时间为

$$\Delta t = \sqrt{3}(-a)^{\frac{1}{2}}(4b_4)^{-\frac{1}{4}}. \tag{12}$$

因此,根据灰色突变理论,对原始数据进行生成处理后,通过判定沥青老化系统的临界时间,然后计算沥青发生突变的前后时间差,即可得出自沥青老化开始至老化性能发生突变的历时,从而为沥青在老化过程中的性能突变提供预测.

同理,根据上述计算过程分析沥青老化后软化点、黏度和延度的突变规律进行分析.

4 结果分析

从老化试验可以看出,随着 RFTOT 老化时间的延长,克拉玛依 90#沥青的针入度,延度不断衰减,软化点和旋转黏度不断增大,这说明随着老化程度的加深,沥青逐渐变硬、发脆,性能发生了衰减.不同老化时间下的沥青性能指标见表 1.

表 1 不同老化时间的沥青性能指标  
Tab.1 The Performance index of asphalt  
based on different aging times

老化 时间/min	针入度/ 0.1 mm	软化点/ ℃	60 ℃黏度/ (Pa·s)	15 ℃延度/ cm
0	87.8	45.1	200.8	161.3
30	76.7	49.7	304.3	135.0
85	60.3	53.4	488.8	117.0
180	51.9	57.7	935.5	24.1
270	44.7	60.8	1457.3	14.9
360	39.4	63.8	1812.2	8.6
450	35.3	66.4	2154.8	6.3

利用本文灰色突变模型计算得到的数据如表 2 所示.

表 2 灰色突变理论计算值  
Tab.1 The values based on gray-catastrophic theory

时间点	针入度/ 0.1 mm	软化点/ ℃	60 ℃黏度/ (Pa·s)	15℃延 度/cm
临界时间点	44	98	152.3	53.6
突变时间差	132	296	457	161
突变时间	176	394	609.3	214.6

笔者采用的旋转薄膜(RTFOT)试验中沥青膜的厚度约为 5~10 μm,能够很好地模拟沥青混合料拌合中的实际情况,从计算结果可以得知,沥青的 4 项性能指标发生突变的临界时间点主要在 150 min 之内,其中针入度和延度指标在 50 min 之内即到临界时间.这说明沥青性能变化在老化开始一段时间后已经不是平稳的过程,而是具有潜在的摆动性和跃迁性.

从老化指标的数据规律上也可以看出,在各

指标对应的临界时间范围内,性能指标的数值变化趋势非常明显,说明沥青性能在老化前期经过剧烈的衰减后,在老化后期逐渐趋于稳定,此时正好对应灰色突变分析的突变时间.这表明,利用灰色突变理论可以很好地从离散的数据中发掘出隐含的变化规律.

沥青的黏度和软化点在一定程度上可以表征沥青的高温性能,试验结果发现老化对沥青的黏度和软化点影响比较大,但其发生突变的时间比较迟,与沥青的针入度和延度老、突变点对比发现老化对沥青的低温性能影响更大.

沥青的热氧老化本质上是沥青中的轻质油分受热挥发,饱和分和芳香分高温吸氧发生氧化聚合反应,胶质中含极性官能团的组分通过分子间的聚合与缩合作用转变为沥青质.即在老化过程中,沥青组分大致是按芳香分—胶质—沥青质的转化,老化作用使得沥青的化学组分转移,沥青的性能也发生了变化.

沥青组分在老化作用下发生复杂的反应是沥青性能衰减的内在原因,而沥青性能指标数据的衰减规律是沥青组分发生内在反应的宏观表现.故沥青在老化过程中,沥青的化学组分在某一时刻发生了轻微的变化,虽然此时性能指标没有明显的反应,但对于整个沥青老化的过程而言,这一轻微的变化对沥青后续的性能指标却有着很大的影响,且其影响的程度在后续的某时刻才表现出来,本研究灰色突变理论计算也证明这一点,当沥青老化的各性能指标已经判定处于临界状态时,距离其发生突变存在着时间差.

室内旋转薄膜(RTFOT)试验沥青膜的厚度约为 5~10 μm,与沥青混合料中沥青裹敷集料形成的沥青膜厚度相近,对沥青混合料拌合过程中的老化模拟效果很好.从灰色突变理论计算的结果可知,在室内旋转薄膜老化试验中,针入度和延度的临界突变时刻均不超过 54 min,表明沥青在老化 50 min 左右时,其性能有潜在的突变趋势.由于针入度和延度可以在一定程度上表征沥青的低温性能和感温性能,从试验结果可以看出,沥青的低温和感温性能在老化后发生衰减,且衰减在老化 50 min 时发生了突变.这要求沥青在拌合过程时,为了保证沥青与集料的低温性能和感温性能,拌合时间和热储存时间应该控制在 50 min 之内.

计算结果同时发现,沥青各项指标的处于临界状态的时间以及发生突变的前后时间差并不相同,针入度和延度的前后时间差明显小于软化点

和黏度,这主要是由于沥青发生老化,轻质组分挥发,沥青逐渐趋于重质,变硬发脆,使得针入度和延度的衰减较黏度和软化点明显,从不同指标具有不同的前后时间差可以得知,沥青的各指标对沥青的老化敏感程度不一致。

## 5 结论

(1)沥青性能在沥青老化前期变化剧烈,由灰色突变理论计算沥青的老化时间在最长不超过 150 min 时其性能指标均已处于临界状态,表明此段时间内沥青的性能变化具有潜在的跳跃性和突变性。

(2)临界状态到突变发生存在着前后时间差,表明老化过程中沥青性能的变化存在着滞后性。

(3)沥青混合料拌合过程中,为了减少沥青的老化作用,应控制拌合和热储存的时间不超过 50 min。

(4)不同的性能指标达到临界的时间和突变的时间不一致,表明各指标对老化程度的敏感性不同。

## 参考文献:

- [1] 李海军,黄晓明,曾凡奇.道路沥青老化性状分析及评价[J].公路交通科技,2005,22(4):5-8.
- [2] 王芳,袁万杰,陈忠达.沥青老化性能评价指标研究[J].公路交通技术,2005(2):57-58,99.
- [3] 纪小平,侯月琴,郑南翔.沥青热氧老化的非线性预测[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(4):13-15,38.
- [4] 金鸣林,杨俊和,史美仁.道路沥青老化机理分析[J].上海应用技术学院报,2001,1(1):14-17.
- [5] 谭忆秋,王佳妮,冯中良,等.沥青结合料紫外老化机理[J].中国公路学报,2008,21(1):19-24.
- [6] 周安娜,朱静.道路沥青老化过程中沥青组成与分子量分布的变化[J].安徽工业大学学报,2001,18(4):347-350.
- [7] 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.
- [8] 汪东杰,葛折圣,黄晓明,等.沥青抗老化指标探讨[J].公路交通科技,2003,20(3):15-18.
- [9] BROWN A B, SPARKS J W, LARSEN O. Rate of change of softening point, penetration, and ductility of asphalt in bituminous pavement [J]. Assoc of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 1957,26: 66-81.
- [10] GARRICK N M. Nonlinear differential equation for modeling asphalt aging [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1995, 7(4): 265-268.
- [11] 赵正跃,项成龙.突变理论在环境预测中的应用[J].中国环境监测,2002,18(4):59-60.
- [12] 邓聚龙.灰色预测与决策[M].武汉:华中理工大学出版社,1988.
- [13] 许建聪.隧道围岩-初支系统灰色突变失稳预测模型研究[J].岩土力学与工程学报,2008,27(6):1181-1197.
- [14] 丁国靖,范耀华,刘国祥.道路沥青吸氧老化性能的研究(一)与户外自然老化的关系[J].石油炼制与化工,1991(6):54-58.
- [15] HUANG S C, MANG T, RUTH B E. Laboratory aging methods for simulation of field aging of asphalts [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1996, 8(3):147-152.

## Analysis of the Aging Behavior of Asphalt Based on Gray and Catastrophic Theories

ZHANG Hong-mei<sup>1</sup>, BIAN Kai-lei<sup>2</sup>, LIU Sheng-jie<sup>3</sup>, XU Dong<sup>3</sup>

(1. Civil Engineering Department, Qingdao Technology University, Linyi 273400, China; 2. China Petroleum Pipeline Engineering Company Limited, Langfang 065001, China; 3. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to forecast the time regularity of the asphalt thermal and oxygen aging, the RTFOT experiment was applied, according to the principle of evaluating system stability with the variable tendency of its compatibility, the destabilization of asphalt aging was predicted with the grey-cusp-catastrophic destabilization prediction model. The research results show that the catastrophe exists in the aging process, and hysteresis phenomenon exists between catastrophe and aging actions. For the asphalt mixture, the heating time should not exceed 50 min, and to make the asphalt pavement have the long services life, the measures should be taken to extend the catastrophic happened time.

**Key words:** road engineering; asphalt aging; RTFOT; aging rule; gray-catastrophic