

沥青老化行为的灰色突变研究

刘圣洁

长安大学公路学院, 西安 710064

摘要 沥青在储存、运输和使用过程中,由于环境作用会产生静态硬化和氧化硬化,使沥青的物理性质和流变特性发生改变,影响沥青的性能和沥青路面的使用性能及耐久性。为了研究老化前后沥青的性质变化规律,分析沥青的老化行为及抗老化性能,对克拉玛依 90# 沥青进行了旋转薄膜烘箱试验(RTFOT),并采用针入度、延度、软化点、黏度等指标研究了沥青的性质与老化时的关系。利用灰色系统理论和突变理论考查了沥青老化过程中性能指标的变化规律,在利用试验数据的基础上,应用突变理论中的尖点突变模型,建立了沥青老化的灰色尖点突变评价体系,并得出了沥青性能与老化时间的突变势函数,从突变理论的角度分析了不同时间沥青老化的性能变化规律。结果表明,克拉玛依 90# 沥青的老化过程存在突变现象,表明突变理论对沥青的老化规律进行分析是可行的,能够较为精确地预测沥青的老化规律。突变理论的分析表明,沥青老化后的性能突变与内部沥青组分老化反应之间存在滞后现象。为路面具有更长的服务寿命,应采取适当措施延长沥青老化突变时间。

关键词 道路工程;沥青;老化行为;灰色突变

中图分类号 U414.3,U416.2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.007

Gray Catastrophe of Asphalt Aging Behavior

LIU Shengjie

Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract The changes due to evaporation, oxidation, and polymerization in the internal structure of asphalt and other reactions could change the nature of asphalt and the performance of asphalt mixture, and have influence on the life and durability of the pavement during the storage, transport, mixing, construction, and long-term use of asphalt. In order to study the influences of aging on asphalt performance, the regulation of material physics property change was analyzed. The RTFOT experiment was applied to study on the performance attenuation of 90# asphalt based on the indexes of penetration, ductility, softening point, and viscosity. According to the principle of evaluating system stability with the variable tendency of its compatibility, the catastrophic potential function between asphalt performance and aging time was built based on the test data, and then the destabilization of asphalt aging was predicted by the grey-cusp-catastrophic destabilization prediction model. The research results are shown as follows: the catastrophe of asphalt exists in the aging process; and hysteresis phenomenon exists between catastrophe and aging actions. It is indicated that the catastrophe theory on the asphalt aging is feasible, and is able to predict the rule of asphalt aging more accurately. In order to make the asphalt pavement have the longer services life, the measures should be taken to extend the occurring time of catastrophe.

Keywords road engineering; asphalt; aging behavior; gray catastrophe

0 引言

沥青是一种复杂的高分子混合材料,其老化过程是沥青组分复杂的物理反应和化学反应。沥青中各组分的化学结构的变化,引起了沥青质与软沥青质溶解度参数的变化,导致相容性的降低,胶体结构受到破坏,在性能指标上反映为沥青的软化点升高、针入度下降、黏度升高及延度降低^[1-4],进而

导致沥青混合料路用性能的衰减。

沥青的成分较为复杂,导致研究沥青老化后其内部结构发生何种变化是十分困难的。国内外多采用旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)和压力老化箱(PAV)模拟自然环境,利用强制老化的措施对沥青老化的性能进行评价。但此种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老化过程中

收稿日期:2012-02-10;修回日期:2012-07-17

基金项目:西部交通建设科技项目(200831800029)

作者简介:刘圣洁,博士研究生,研究方向为路基路面工程,电子信箱:lsjwork@126.com

的变化^[5-7]。

沥青老化过程必然具有特定的功能和内在的有序规律,只是其内在规律并未充分外露。故在对沥青老化过程进行分析时,可将其视为灰色系统,利用灰色系统理论对原始数据处理,从而得到较为清晰的老化规律^[8]。

在沥青老化过程中,由于试验时间的间断性,其数据可能会比较离散及发生随机震荡。常规的数据处理方法往往仅是考虑数据的整体分布趋势,而忽略某些数据点跳跃突变的信息,这导致在进行建模预测时有可能产生很大的误差,不能真实地反映观测序列的变化趋势,需要采取一定的处理方法对随机震荡型的数据列进行处理^[9-10]。因此本文在灰色系统理论的基础上,同时采用突变理论的方法对数据进行处理。

本研究为了研究沥青在热氧环境下的老化规律,利用旋转薄膜烘箱试验的老化方法,分别对克拉玛依 90# 沥青进行 0,30,85,180,270,360,450min 的老化,分析沥青的针入度、软化点、60℃黏度和 15℃延度的衰减。利用灰色突变理论,建立沥青老化的灰色-突变理论预测模型,对老化性能的状态突变进行分析预测,为定量和定性分析沥青的老化规律提供科学依据。

1 基于灰色突变理论模型的建立

在利用灰色突变理论进行建模时,本文仅以针入度指标为例进行研究,其他指标的建模方法类似。

设沥青在等间隔老化时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 内,测得针入度分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。可得原始数据序列为

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

在建模过程中,利用灰色系统理论对原始数据序列进行累加生成处理,本文仅进行一次累加生成(1-AGO),生成数列

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

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

由于一次累加生成后的模型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)按 Taylor 公式展开,有

$$\hat{x}^{(1)}(t) = x^{(1)}(0) + \frac{\partial x}{\partial t} \bigg|_{t=0} t + \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \bigg|_{t=0} \frac{t^2}{2} + \dots + \frac{\partial^n x}{\partial t^n} \bigg|_{t=0} \frac{t^n}{n!} \quad (3)$$

对于一定趋势规律的数据序列过程,当其 Taylor 公式截到第 5 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,

$$a_j = \frac{\partial^j x}{\partial t^j} \bigg|_{t=0}$$

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

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

式(6)中 c 是一个对突变分析无意义的常数项,

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

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

式(6)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 $V'(T) = 0$,可得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

$$\Delta = 8u^3 + 27v^2$$

根据突变理论的判定法可对以下结果进行沥青老化后针入度性能突变的状态判定。

$\Delta > 0$ 时,为稳定状态,表示沥青的针入度指标在对应的时间内性能变化保持平稳。

$\Delta = 0$ 时,为临界状态,表示沥青的针入度指标在对应的时刻处于临界状态。

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

根据突变理论,当沥青老化系统处于不稳定状态时,分叉集的右支($v > 0$)仅是数学意义上的突变,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 3 个零根,当 $u < 0$ 时,平衡曲面的方程根为

$$T_1 = 2\left(-\frac{u}{6}\right)^{\frac{1}{2}} \quad T_2 = T_3 = -\left(-\frac{u}{6}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

系统在跨越交叉集时状态发生了突变,突变的间隔为

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 3\left(-\frac{u}{6}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

其对应于沥青老化突变的前后时间为

$$\Delta t = \sqrt{3}(-a)^{\frac{1}{2}}(4b_4)^{-\frac{1}{4}} \quad (10)$$



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的性能的突变提供预测。

2 结果与讨论

从克拉玛依 90# 沥青老化试验的结果可以看出,不同老化时间下的沥青性能指标见表 1。利用本文灰色突变模型计算得到的数据如表 2 所示。

表 1 不同老化时间的沥青性能指标
Table 1 Physic parameters of asphalt with different aging times

老化时间 /min	针入度 /0.1mm	软化点 /℃	黏度(60℃) /(Pa·s)	延度(15℃) /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

表 2 灰色突变理论计算值
Table 2 Calculated values through gray catastrophe theory

类型	针入度 /0.1mm	软化点 /℃	黏度(60℃) /(Pa·s)	延度(15℃) /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

本文采用的旋转薄膜烘箱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的拌合中的实际情况,从试验结果可以知,随着老化时间的延长,沥青的针入度、延度不断衰减,软化点和 60℃黏度不断增大,这表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。

由灰色突变模型的计算结果可知,沥青的 4 项性能指标发生突变的临界时间点主要在 150min 之内,其中,针入度和延度指标在 50min 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。

以延度的衰减趋势为例,在老化开始时刻,延度的性能即出现明显的衰减,在老化 50min 左右时衰减呈现加速趋势,表明,此时沥青老化处于不稳定状态,而通过灰色突变理论计算也表明,此时为延度变化趋势临界点。在老化 200min 左右时,延度的衰减趋势逐渐趋于平缓,说明沥青性能在经

过老化前期剧烈衰减后,在老化后期逐渐趋于稳定,对应灰色突变分析的突变时间点。这表明,利用灰色-突变理论可以很好地对沥青老化的规律进行研究,从离散的数据中发掘出隐含的变化规律。

从沥青老化的机制上可知,沥青组分在老化作用下发生复杂的反应是沥青性能指标衰减的内在机制,而沥青性能指标的衰减规律也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,由于挥发和吸氧聚合的反应,沥青的化学组分在某一时刻发生了轻微的变化,虽然此时不能从性能指标上明显的反映,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。如沥青芳香分吸氧反应开始时,沥青的性能会有轻微的变化,但直到吸氧过程反应到一定程度时才会离散型的数据上显示出突变,这说明对于沥青的老化反应而言,由于其内部组分的复杂反应,老化的内部变化反映到观测指标上存在滞后效应。本文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。

旋转薄膜烘箱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,在旋转薄膜老化试验中,对于克拉玛依 90# 沥青,其针入度和延度的临界突变时刻均较短,表明沥青在老化开始一段时间后,其性能既存在突变趋势。这要求沥青在拌合过程时,针对特定的沥青,根据老化试验的结果,为了保证沥青与集料的胶结性能,拌合时间和热储存时间应该控制在一定范围之内。

计算结果同时发现,沥青各项指标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。

沥青老化后结构组分的改变与沥青的性质、老化方式、老化时间等有关,不同的沥青其老化后内部发生的反应及老化的程度都不尽相同。本文仅对克拉玛依 90# 沥青进行了分析,对于其他的沥青,由于来源不同,抗老化性质不同,其在一定的老化时间内可能衰减较平缓未发生突变,也可能仅有某些性能发生突变。因此,可以利用本方法对沥青的老化性能是否突变进行判断,并根据突变判断进而采取后续的有针对性防治措施。

3 结论

(1) 对于沥青老化过程而言,虽然其老化后内部结构的变化研究尚不充分,但其性能指标必然具有特定的功能和内

在的有序规律。故对沥青老化过程进行分析时,将其视为灰色系统,建立灰色突变模型进行分析研究。

(2) 灰色突变理论计算克拉玛依 90# 沥青的老化时间在最长不超过 150min 时其性能指标均已处临界状态,这表明沥青的性能在沥青老化前期变化很剧烈,其老化过程并非平稳的衰减过程,而是具有潜在的跳跃性和突变性。不同的性能指标处于临界时间和发生突变的时间并不一致,也表明各性能指标对老化程度的敏感性是并不相同的。

(3) 灰色突变理论计算结果表明老化过程中其性能突变与老化反应之间存在滞后现象。沥青的性能由开始的剧烈衰减在发生突变后逐渐趋于平缓。

(4) 为了避免沥青的老化程度,施工中应控制沥青混合料的拌合时间和热储存时间,而对于沥青路面而言。其老化在拌合时期已经发生,应该采取适当措施延长沥青突变的前后时间差,使路面能够获得更长的服务寿命。

参考文献 (References)

- [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): 125.
Zhang Zhengqi, Liang Xiaoli, Li Ping. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005, 5(1): 125.
- [2] 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.
Wang Dongjie, Ge Zhesheng, Huang Xiaoming, et al. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2003, 20(3): 15-18.
- [3] 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.

- Zhou Anna, Zhu Jing. *Journal of Anhui University of Technology*, 2001, 18(4):347-350.
- [4] Brown A B, Sparks J W, Larsen O. Rate of change of softening point, penetration, and ductility of asphalt in bituminous pavement [J]. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1957 (26): 66-81.
- [5] 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.
Ji Xiaoping, Hou Yueqin, Zheng Nanxiang. *Journal of Changan University: Natural Science Edition*, 2009, 29(4): 13-15, 38.
- [6] 马涛, 黄晓明, 张久鹏. 基于材料复合理论的老化沥青再生规律[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(3): 520-524.
Ma Tao, Huang Xiaoming, Zhang Jiupeng. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2008, 38(3): 520-524.
- [7] 袁德明, 康蕾, 廖克俭, 等. 两种道路沥青老化动力学研究的比较[J]. 化学工业与工程, 2008, 25(1): 44-47.
Yuan Deming, Kang Lei, Liao Kejian, et al. *Chemical Industry and Engineering*, 2008, 25(1): 44-47.
- [8] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1986.
Deng Julong. *Grey prediction and decision* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1986.
- [9] 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.
Zhao Zhengyue, Xiang Chenglong. *Environmental Monitoring In China*, 2002, 18(4): 59-60.
- [10] 许建聪. 隧道围岩-初支系统灰色突变失稳预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1181-1197.
Xu Jiancong. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1181-1197.

(责任编辑 岳臣)

·学术动态·

“2013 国际动力工程会议”征文



由中国动力工程学会(CSPE)主办、华中科技大学承办的“2013 国际动力工程会议”将于 2013 年 10 月 23—27 日在武汉召开。

征稿范围:(1) 燃料、燃烧、污染物控制;(2) 蒸汽发电机;(3) 换热器、冷却系统;(4) 汽轮机、发电机、辅机;(5) 电厂运行和维护;(6) 电厂可靠性、实用性和可维护性;(7) 电厂系统、结构、组件和材料问题;(8) 联合循环;(9) 先进能源系统;(10) 可再生能源:风能,太阳能,地热能等;(11) 热工水力学、CFD;(12) 核电厂设计、许可和建设;(13) 电厂性能测试及软件;(14) 其他与动力工程相关内容。

摘要提交日期:2012 年 12 月 31 日

论文提交日期:2013 年 3 月 30 日

联系电话:027-87542418

电子邮箱:icope2013@126.com

大会网站:www.icope-2013.org/