

泡沫沥青衰变方程与发泡特性评价

李峰^{1,2}, 黄颂昌², 徐剑²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 交通运输部 公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 目前常用膨胀率和半衰期指标来评价沥青的发泡特性, 由于缺乏明确的数值评价标准, 有时难以判断最佳发泡参数. 比较了现有的4种衰变方程, 选定了泡沫沥青衰变方程的基本形式, 应用微分方法推导出实际最大膨胀率的通式, 由泡沫沥青衰变的边界条件修正得到标准衰变方程, 从能量角度出发定义了泡沫能量指标, 通过积分给出了计算公式. 对实际工程所用4种沥青的发泡试验数据进行分析, 泡沫能量指标物理意义明确, 量化了沥青的发泡特性, 既可确定沥青的最佳发泡参数, 又可评价不同沥青的发泡特性.

关键词: 道路工程; 泡沫沥青; 膨胀率; 半衰期; 衰变方程; 泡沫能量; 发泡特性

中图分类号: U 414

文献标识码: A

Foamed Bitumen Decay Equation and Bitumen Foaming Characteristics Evaluation

LI Feng^{1,2}, HUANG Songchang², XU Jian²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: The expansion ratio and the half-life are usually utilized to evaluate the characteristics of foamed bitumen at present, but it's hard to determine the optimum foaming parameters due to lack of definite numerical evaluation criteria. Therefore, an index is developed in this study to solve the problem. One of the existing decay equations is chosen as the basic form of the foamed bitumen decay equation. Then the general equation is derived by differential for the actual maximum expansion ratio, and a general decay equation is obtained with corrected boundary conditions of foamed bitumen decay. The foam energy index is defined from the view of energy, and the index formula is derived by integral. The foaming test data of four kinds of bitumen used in actual works are analyzed. The result shows that the foam energy index quantifies the bitumen foaming characteristics with a

clear physical meaning, and it can be used to determine the optimum foaming parameters and evaluate the characteristics of different foamed bitumen.

Key words: road engineering; foamed bitumen; expansion ratio; half-life; decay equation; foam energy; foaming characteristics

沥青的发泡特性是影响泡沫沥青混合料性能和冷再生工程应用成败的关键因素. 目前, 沥青的发泡特性评价主要采用膨胀率(R_m)和半衰期($\tau_{1/2}$)指标. 试验室测试沥青发泡特性主要通过变化发泡参数(发泡温度、用水量)研究膨胀率和半衰期的变化规律, 以期找到最佳的发泡效果^[1]. 通常情况下, 膨胀率和半衰期是一对相互矛盾的评价指标, 单独选取较大的膨胀率或者较长的半衰期, 都不能达到满意的效果. 为了得到两者均适合工程应用的数值, 需要寻找两者的平衡点, 即膨胀率和半衰期均处于工程应用的允许范围. 然而, 满足工程应用要求的发泡参数往往不是唯一的, 由于没有明确的数值评价标准, 在某些情况下难以判断最佳发泡参数^[2].

1 泡沫沥青衰变方程

1.1 方程选择的原则

泡沫沥青的衰变方程描述了泡沫沥青体积衰变的全过程, 是进行沥青发泡特性评价指标研究的理论基础. 作为一个标准的(通用的)泡沫沥青衰变方程, 应满足: ①能够正确反映泡沫沥青衰变的全过程, 满足边界条件要求. ②方程形式简单, 参数具有明确的物理含义. ③方程的通用性和可移植性好, 能够为进一步研究奠定基础.

1.2 衰变方程的选择

收稿日期: 2010-04-17

基金项目: 国家国际科技合作项目(2010DFB83490); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目

第一作者: 李峰(1979—), 男, 博士生, 主要研究方向为沥青路面维修养护技术. E-mail: f.li@rioh.cn

国内外一些学者对泡沫沥青衰变方程进行了研究.

栗关裔^[3]通过数码摄像机拍摄某种沥青发泡过程,读出不同泡沫沥青体积膨胀倍数对应的时刻,以这些数据为根据进行拟合,得到给定发泡条件下的方程为 $R(t) = 241.05 t^{-1.2019}$, 相关系数达 0.971 6. 方程的通式为 $R(t) = at^{-b}$, a, b 为回归系数.

曹翠星等人^[4]对 2 种进口沥青,标号分别为 AH-70 和 AH-90 的发泡试验结果进行回归,得 AH-70 和 AH-90 衰变方程分别为: $R(t) = (a + bt)c^t + d$, a, b, c, d 为回归系数,相关系数达 0.967 4; $R(t) = R_0 + \alpha \exp\left(-\frac{t}{\beta}\right)$, α, β 为回归系数,相关系数达 0.963 9.

Jenkins^[5]根据试验结果指出泡沫沥青衰变曲线与放射性元素衰变曲线极为相似,并给出了泡沫沥青衰变方程为: $R(t) = R_m \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t\right)$, 实测结果与理论曲线相关系数达 0.927 0.

上述泡沫沥青衰变方程的相关系数都很高,不能作为评判方程优劣的依据.

栗关裔采用了幂函数形式,方程形式简单,但参数 a 和 b 只是回归所得系数,没有任何物理意义.采用这种方程形式,对于任何沥青或发泡试验条件的变化,均需要采集发泡过程的多组数据重新进行回归,这是十分复杂的工作,方程的通用性很差.

曹翠星等人采用 2 个回归公式分别拟合 2 种标号不同的进口沥青.除了存在和栗关裔方程同样的问题外,方程形式过于复杂且不统一,假如需要对其他标号沥青(如 AH-110 或者是 AH-70 与 AH-90 的调和沥青)进行研究,那么就没有可以选择的方程形式,方程的通用性极差.

Jenkins 给出的方程实质上是一个一级动力学反应方程,参数 R_m 和 $\tau_{1/2}$ 分别表征膨胀率和半衰期,物理意义明确.方程的通用性和可移植性好,对于给定条件的发泡试验只需测定其膨胀率和半衰期即可得到衰变方程.该方程满足泡沫沥青衰变方程的选择原则,因此本文采用该方程进行后续研究.

2 衰变方程的修正

2.1 实际最大膨胀率

Jenkins^[5]在研究沥青发泡过程时指出,在测量

膨胀率之前,泡沫沥青就已经衰落了,这样导致测量的最大膨胀率 R_m 不等于实际膨胀率 R_a .采用微分方法可以得到 R_a 的通式,具体假设条件和求解过程如下.

沥青发泡是一个边发泡边喷射的过程,假定沥青体积为 1,测得膨胀率为 R_m ,喷射瞬间泡沫沥青的膨胀率为 R_a ,喷射速率保持不变.如图 1 所示,将喷射过程(时间 $0 \rightarrow t_s$)分割为 n 等分,在任意 $\frac{i-1}{n}t_s \rightarrow \frac{i}{n}t_s$ 时间段内,喷射出的泡沫沥青体积为 $R_a \frac{1}{n}$,到喷射结束的 t_s 时刻,体积衰变为 $R_a \frac{1}{n} \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \frac{n-i}{n} t_s\right)$,则喷射结束 t_s 时刻的体积为

$$R_m = \frac{R_a}{n} \left[\exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \frac{n-1}{n} t_s\right) + \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \frac{n-2}{n} t_s\right) + \dots + \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \frac{1}{n} t_s\right) + 1 \right]$$

上式右边是一个等比数列, $q = \exp\left(\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \frac{1}{n} t_s\right)$,

且 $q \neq 1$,由等比数列求和公式得

$$R_m = \frac{R_a}{n} \frac{\exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \frac{n-1}{n} t_s\right) - \exp\left(\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \frac{1}{n} t_s\right)}{1 - \exp\left(\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \frac{1}{n} t_s\right)}$$

当 $n \rightarrow +\infty$ 时,有 $R_m = R_a \left[\exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t_s\right) - \right.$

$$\left. \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{1 - \exp\left(\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t_s \frac{1}{n}\right)} \right], \text{应用洛必达法则求 } \frac{0}{0} \text{ 型}$$

的极限,分子分母分别求导得

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{n}}{1 - \exp\left(\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t_s \frac{1}{n}\right)} = \frac{1}{n^2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\exp\left(\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t_s \frac{1}{n}\right) \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t_s \frac{1}{n^2}} = -\frac{\tau_{1/2}}{\ln 2} \frac{1}{t_s}$$

从而得

$$R_m = R_a \frac{\tau_{1/2}}{\ln 2} \frac{1}{t_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t_s\right) \right]$$

得 R_a 的通式为

$$R_a = R_m \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t_s / \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t_s\right) \right] \quad (1)$$

式中: R_m 和 $\tau_{1/2}$ 由发泡试验测得. Wirtgen WLB-10 发泡试验沥青用量一般为 500 g, 喷射速率在 $100 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 如果发泡试验没有记录喷射时间 t_s , 那么可取 $t_s = 5 \text{ s}$.

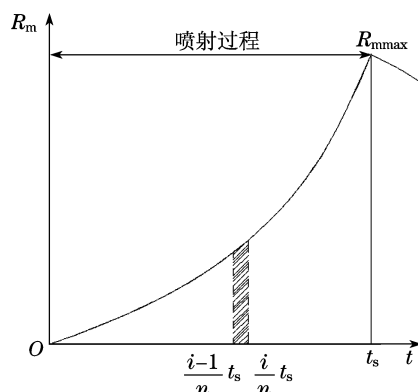


图1 沥青发泡过程

Fig.1 Bitumen foaming

2.2 标准衰变方程

把泡沫沥青和沥青视为两种不同物质, 实际上泡沫沥青衰变与放射性元素衰变类似: 当时间趋于无穷大时, 放射性元素衰变为两种或多种新元素, 放射性元素本身质量趋于零; 当时间趋于无穷大时, 泡沫沥青衰变为沥青和水, 泡沫沥青的体积趋于零. 因此, 泡沫沥青的标准衰变方程与放射性元素衰变方程类似, 沥青的实际最大膨胀率为 R_a , 半衰期 $\tau_{1/2}$ 是一个与初始状态无关的常数, 即发泡试验测得半衰期就是泡沫沥青的半衰期. 由此可建立如下标准衰变方程:

$$R(t) = R_a \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t\right) \quad t \in [0, +\infty) \quad (2)$$

方程满足边界条件: $R(0) = R_a, R(+\infty) = 0$.

3 泡沫能量

能量是影响泡沫沥青物理性能的重要因素. 通过发泡过程, 泡沫沥青储存了原来热沥青的部分热能(这部分能量定义为泡沫能量), 从而减少了拌和集料所需作的功. 泡沫沥青衰变既是“泡沫”的体积衰变过程, 也是“泡沫”的能量衰变过程. 定义泡沫能量 E 为泡沫沥青体积与衰变时间之积, $E = A_1 + A_2$, 即曲线与坐标轴所围的面积(见图2).

分别计算 A_1 和 A_2 是比较复杂的, 但是可以从定义出发计算泡沫能量, 即任意时刻喷出的泡沫沥青都经历时间 $0 \rightarrow +\infty$, 体积 $R_a \rightarrow 0$ 的过程, 则

$$E = \int_0^{+\infty} R(t) dt = \int_0^{+\infty} \left[R_a \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} t\right) \right] dt = \frac{R_a \tau_{1/2}}{\ln 2} \quad (3)$$

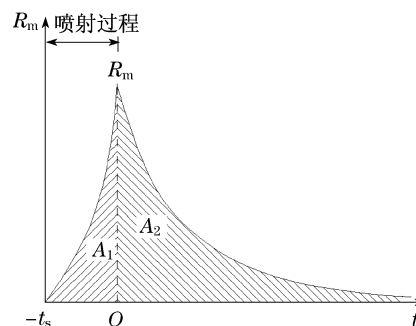


图2 泡沫能量

Fig.2 Foam energy

4 发泡特性评价

4.1 发泡试验数据

以实际冷再生工程的4种沥青发泡试验数据为例, 对比说明现行发泡参数确定方法存在的问题和泡沫能量指标的优势. 表1中的沥青发泡数据 $\tau_{1/2}$ 和 R_m 为多次平行试验结果的平均值, R_a 和 E 分别由式(1)和式(3)求得, 取 $t_s = 5 \text{ s}$. 根据我国沥青路面再生规范^[6]要求, 限定膨胀率和半衰期的最小容许值($R_m \geq 10, \tau_{1/2} \geq 8 \text{ s}$).

4.2 膨胀率和半衰期

采用膨胀率和半衰期指标对试验结果进行分析.

(1) A 沥青在 $165 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量为 2.5% 工况时, $R_m = 18, \tau_{1/2} = 17 \text{ s}$, 膨胀率和半衰期指标均高于其它工况. 因此, A 沥青的最佳发泡参数取 $165 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量为 2.5% 工况.

(2) B 沥青发泡试验结果, 摒弃不满足规范要求的工况后, 剩下 $160 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量分别为 2.5%, 3.0% 和 $170 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量分别为 3.0%, 3.5%, 4.0% 这 5 种工况, 其中 $170 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量为 3.0% 工况的膨胀率和半衰期均高于其余 4 种工况, 因此, B 沥青的最佳发泡参数可取 $170 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量为 3.0% 工况.

(3) C 沥青, 5 个工况均满足要求. 首先摒弃某一指标接近下限的 $170 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量为 1.5% 和 3.5% 工况. $170 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量为 2.5% 工况膨胀率和半衰期均大于 $170 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量为 3.0% 工况, 因此 $170 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量为 3.0% 工况也可摒弃. 剩下 $170 \text{ }^\circ\text{C}$, 用水量为 2.0%, 2.5% 工况的膨胀率和半衰期各有优劣, 难以

判断. 不过, 这2种工况用水量仅差0.5%, 可以取其中一个工况或平均值, 对工程应用影响不大.

表1 沥青发泡试验数据

Tab.1 Bitumen foaming test data

| 沥青种类 | 发泡温度/℃ | 用水量/% | $\tau_{1/2}/s$ | R_m | R_a | E | E_{max} | | |
|------|--------|-------|----------------|-------|-------|------|-----------|-----|-----|
| A | 155 | 1.5 | 14.0 | 16.0 | 18.1 | 365 | 488 | | |
| | | 2.0 | 10.0 | 13.5 | 16.0 | 230 | | | |
| | | 2.5 | 14.5 | 16.0 | 18.0 | 376 | | | |
| | 165 | 1.5 | 11.5 | 14.0 | 16.2 | 269 | | | |
| | | 2.0 | 13.0 | 17.5 | 19.9 | 374 | | | |
| | | 2.5 | 17.0 | 18.0 | 19.9 | 488 | | | |
| B | 160 | 1.5 | 27.5 | 8.0 | 8.5 | 338 | 496 | | |
| | | 2.5 | 19.0 | 10.0 | 10.9 | 300 | | | |
| | | 3.0 | 19.0 | 10.0 | 10.9 | 300 | | | |
| | 170 | 1.5 | 10.0 | 8.0 | 9.5 | 137 | | | |
| | | 2.0 | 35.0 | 9.0 | 9.5 | 477 | | | |
| | | 2.5 | 48.5 | 9.0 | 9.3 | 653 | | | |
| | | 3.0 | 29.5 | 11.0 | 11.7 | 496 | | | |
| | C | 170 | 3.5 | 20.0 | 11.0 | 12.0 | | 346 | 676 |
| | | | 4.0 | 18.0 | 11.0 | 12.1 | | 314 | |
| | | | 1.5 | 30.5 | 13.5 | 14.3 | | 628 | |
| 2.0 | | | 25.0 | 17.5 | 18.7 | 676 | | | |
| 2.5 | | | 20.5 | 20.5 | 22.3 | 659 | | | |
| 3.0 | | | 18.5 | 18.0 | 19.7 | 527 | | | |
| 3.5 | | | 11.0 | 24.0 | 28.0 | 444 | | | |
| D | 155 | 1.5 | 35.5 | 18.0 | 18.9 | 968 | 1358 | | |
| | | 2.0 | 34.5 | 24.0 | 25.2 | 1256 | | | |
| | | 2.5 | 25.0 | 30.0 | 32.1 | 1159 | | | |
| | | 3.0 | 21.0 | 35.0 | 38.0 | 1150 | | | |
| | | 3.5 | 23.0 | 38.0 | 40.9 | 1358 | | | |
| | | 4.0 | 9.0 | 40.0 | 48.2 | 626 | | | |
| | 165 | 1.5 | 30.0 | 18.0 | 19.1 | 825 | | | |
| | | 2.0 | 19.5 | 28.0 | 30.6 | 860 | | | |
| | | 2.5 | 16.0 | 31.0 | 34.5 | 796 | | | |

(4) D 沥青, 可以看出 155 °C 工况发泡效果优于 165 °C 工况, 首先摒弃 165 °C 工况数据. 在 155 °C 工况时, 6 种用水量均满足规范要求, 且随着用水量的递增, 膨胀率相应递增, 半衰期大致满足递减规律. 用水量在较大范围内 (2.0%~3.5%) 变化, 膨胀率和半衰期各有优劣, 难以取舍.

4.3 泡沫能量指标

表 1 中, 满足再生规范最小容许值前提下的 A, B, C 和 D 这 4 种沥青 E_{max} 分别为 488, 496, 676 和 1358, 对应工况分别为 165 °C, 2.5% 用水量, 170 °C, 3.0% 用水量, 170 °C, 2.0% 用水量和 155 °C, 3.5% 用水量. 与前述经验法相比, 采用泡沫能量指标判断 A, B 沥青的最佳工况与经验法一致, 且可以方便地指出 C, D 沥青的最佳工况.

通过泡沫能量指标, 可定量评价沥青的发泡特

性, 从而可以比较不同沥青的发泡特性, 为工程应用选择最适合的沥青提供数值依据. 表 1 中, 可以判断 4 种沥青的发泡特性为 $D > C > B > A$.

5 结语

(1) 沥青发泡特性评价是进行泡沫沥青混合料设计的基础, 再生规范中的发泡参数确定方法适用性较差, 采用膨胀率和半衰期指标进行经验性判断, 有时无法作出唯一性的结论.

(2) 根据衰变方程选择原则确定了泡沫沥青衰变方程的基本形式, 推导出实际最大膨胀率的通式, 由泡沫沥青衰变的边界条件修正得泡沫沥青衰变的标准方程, 定义了泡沫能量指标, 并给出了计算公式.

(3) 泡沫能量指标联系了膨胀率和半衰期指标, 形式简单, 计算方便, 物理意义明确, 量化了沥青的发泡特性, 可以方便地确定沥青的最佳发泡参数, 还可以定量评价不同沥青的发泡特性.

参考文献:

- [1] 拾方治. 沥青路面泡沫沥青再生基层的研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2006.
SHI Fangzhi. Research on foamed bitumen recycling base of asphalt pavement[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2006.
- [2] 王安麟, 程海鹰, 慈健, 等. 沥青发泡质量控制的参数化模型[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(5): 558.
WANG Anlin, CHENG Haiying, CI Jian, et al. Quality control equation of asphalt foam and parameterization[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(5): 558.
- [3] 栗关裔. 泡沫沥青冷再生技术的应用研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2008.
LI Guanyi. Application research of cold recycling technology using foamed asphalt[D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2008.
- [4] 曹翠星, 何桂平, 邱欣. 两种进口沥青衰变方程的比较和机理分析[J]. 中国公路学报, 2005, 18(3): 32.
CAO Cuixing, HE Guiping, QIU Xin. Comparison and mechanism analysis of decay functions of two types of imported bitumens[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 32.
- [5] Jenkins K. Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen[D]. Stellenbosch: University of Stellenbosch. Department of Civil Engineering, 2000.
- [6] 黄颂昌, 徐剑, 董平如, 等. JTG F41—2008 公路沥青路面再生技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
HUANG Songchang, XU Jian, DONG Pingru, et al. JTG F41—2008 Technical specifications for highway asphalt pavement recycling[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.