

文章编号:1671-8879(2008)06-0011-05

## 基于粘度和延度变化的沥青抗老化性能评价方法

栗培龙<sup>1</sup>, 张争奇<sup>1</sup>, 王秉纲<sup>1</sup>, 丁 湛<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**针对当前道路沥青的抗老化性能评价方法的不足,研究了 5 种道路沥青老化过程中的粘度和延度的变化规律,提出了基于 135 ℃粘度和 15 ℃延度的沥青抗老化性能评价方法,并建立了评价沥青抗老化性能的老化度和抗老化系数指标。研究表明:该评价方法及指标可以区分不同沥青在整个老化过程中的抗老化性能,评价指标中老化度可以评价不同老化时间的老化程度,有助于预测沥青路面在老化作用下出现开裂病害的时间;抗老化系数体现了沥青本身的抗老化性能,为沥青的选择提供了依据。

**关键词:**道路工程;沥青;抗老化性能;评价方法;老化度;抗老化系数

**中图分类号:**U414.4 **文献标志码:**A

### Evaluation on anti-aging performance of asphalt based on changes of viscosity and ductility

LI Pei-long<sup>1</sup>, ZHANG Zheng-qi<sup>1</sup>, WANG Bing-gang<sup>1</sup>, DING Zhan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Environmental Science and

Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The current evaluation methods of asphalt anti-aging performance have some deficiencies. So variation characteristics of viscosity and ductility during aging process are studied, and then a new evaluation method is developed, and the aging degree and anti-aging indices are advanced. The analysis results indicate that the evaluation method and parameters can be used to delimit aging performance of different asphalts. The aging degree can be used to evaluate the aging level of asphalt with aging time, which can predict the emerging time of cracks at pavement because of asphalt aging. The anti-aging indices can reflect the anti-aging performance of asphalt, they can offer a reference for choosing asphalt in project. 6 tabs, 3 figs, 9 refs.

**Key words:** road engineering; asphalt; anti-aging performance; evaluation method; aging degree; anti-aging index

## 0 引 言

沥青老化是指沥青在生产、施工及路面使用过

程中,在环境因素(热、氧气、阳光、紫外线)等作用下物理化学性质劣化的过程。因此沥青老化的速率直接关系到路面的使用寿命,这是影响沥青路面耐久

收稿日期:2007-12-18

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200631881221)

作者简介:栗培龙(1980-),男,江苏邳州人,工学博士研究生,E-mail:li\_peilong@sohu.com。

性的主要因素<sup>[1-2]</sup>。现行沥青技术标准中采用薄膜烘箱(旋转)试验评定道路沥青的耐老化特征,以老化前后沥青的质量损失、软化点增加量、针入度比、残留延度等指标来表征沥青的耐老化性能<sup>[3-4]</sup>。这些指标能在一定程度上反映沥青的抗老化性能,但沥青抵抗短期老化和长期老化的性能并不完全一致。因此,这些指标的变化仅仅体现沥青短期老化性能的优劣,无法反映路面沥青使用过程中的长期性能衰变特性。由于沥青的粘度变化与老化时间之间有较好的函数关系,因此有许多利用粘度来评价沥青老化程度的方法<sup>[5]</sup>。许多研究者还提出了评价沥青老化性能的方法,如反相气液色谱技术、羰基指数法、吸氧量法和凝胶渗析法等,从微观的角度对沥青在老化过程中性质或组分的变化进行评价。以上评价方法都只针对沥青的指标变化来评价,而没有与沥青的使用性能结合起来。此外,沥青老化后最明显的变化是低温性能急剧衰减,而高温性能逐渐增强。因此,评价沥青的抗老化性能应重点关注其低温性能的衰减。本文在研究沥青老化的粘度和延度变化规律的基础上,结合沥青路面的使用性能,提出沥青的抗老化性能评价方法。

1 试验材料及老化方法

试验采用兰炼 AH-90(LAL)、埃索 AH-90(ESSO)、克拉玛依 AH-70(KLM)、中海 AH-90(ZHH)、韩国 SK-110(SK)5 种沥青,使用 RTFOT(旋转薄膜烘箱)老化方法,分别进行 85、180、360、480 min 的老化试验,然后测定 125 ℃、135 ℃、145 ℃的 Brookfield 旋转粘度和 15 ℃延度的测试,考察沥青老化过程中性能的变化规律。原样沥青基本性能指标如表 1 所示。

表 1 沥青基本性能指标

沥青种类	LAL	ESSO	KLM	ZHH	SK
软化点/℃	46.2	46.3	50.6	47.3	47.4
延度(5 cm/min, 15 ℃)/cm	86.6	>150.0	>150.0	>150.0	>150.0
针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	91	96	69	81	118
旋转粘度(135 ℃)/(Pa·s)	0.368	0.348	0.668	0.346	0.369

2 老化试验结果分析

2.1 粘度分析

沥青老化实际上是发生了化学反应,其中伴随着化学键的断裂、重组以及聚合的过程,必然会引起粘度的变化。考察沥青老化后粘度的变化,对研究沥青的老化行为具有重要意义。Brookfield 粘度计

(ASTM D4402)方法具有操作方便、灵敏度高、重现性好的特点,可以较为精确地反映沥青老化程度的变化。

由图 1 可以看出,随着老化时间的延长,5 种沥青的 125 ℃、135 ℃、145 ℃粘度均有较为显著的增加,但不同沥青的粘度增幅不同。不同温度条件下的粘度与 RTFOT 老化时间均能较好地符合线性模型或指数模型关系(表 2,见下页)。由相关系数可以看出:125 ℃粘度与老化时间的指数模型相关性更好;而 135 ℃和 145 ℃粘度与老化时间的线性模型相关性更好。李海军等人<sup>[6]</sup>也得出沥青 135 ℃粘度与老化时间的关系可以表示为线性关系的结论。由此可见,温度越低,粘度与老化时间的关系越接近指数关系;温度越高,它们越接近线性关系,135 ℃以上的粘度与时间的关系可以用线性关系来描述。

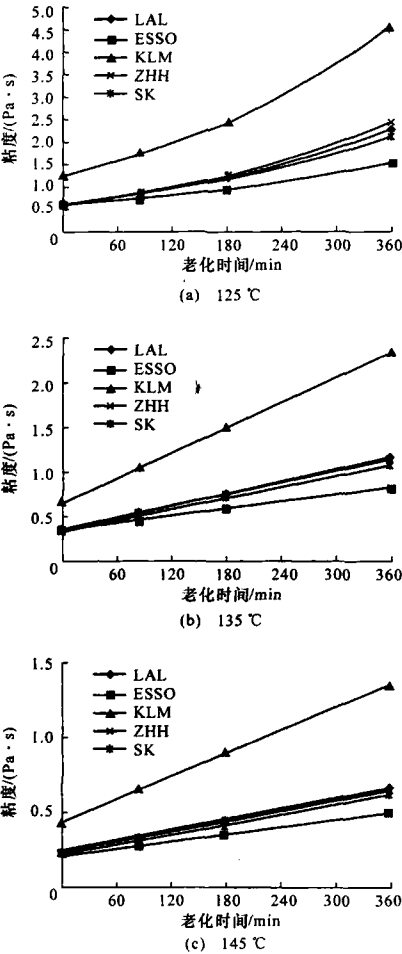


图 1 粘度与 RTFOT 老化时间的关系曲线

表 2 3 种温度下粘度与 RTFOT 老化时间  $t$  的回归关系模型

温度/ ℃	沥青 种类	粘度 $\eta$ 与 RTFOT 老化时间 $t$ 的关系			
		线性关系	$R^2$	指数关系	$R^2$
125	LAL	$\eta=0.0047t+0.5255$	0.9863	$\eta=0.6324e^{0.0036t}$	0.9935
	ESSO	$\eta=0.0027t+0.5272$	0.9928	$\eta=0.5756e^{0.0027t}$	0.9962
	KLM	$\eta=0.0094t+1.0167$	0.9837	$\eta=1.2362e^{0.0037t}$	0.9940
	ZHH	$\eta=0.0053t+0.4588$	0.9774	$\eta=0.5940e^{0.0040t}$	0.9954
	SK	$\eta=0.0042t+0.5305$	0.9870	$\eta=0.6215e^{0.0034t}$	0.9944
135	LAL	$\eta=0.0023t+0.3450$	0.9964	$\eta=0.3880e^{0.0032t}$	0.9873
	ESSO	$\eta=0.0014t+0.3289$	0.9913	$\eta=0.3527e^{0.0025t}$	0.9988
	KLM	$\eta=0.0047t+0.6463$	0.9979	$\eta=0.7310e^{0.0034t}$	0.9755
	ZHH	$\eta=0.0023t+0.3322$	0.9987	$\eta=0.3722e^{0.0033t}$	0.9789
	SK	$\eta=0.0021t+0.3418$	0.9910	$\eta=0.3822e^{0.0033t}$	0.9951
145	LAL	$\eta=0.0012t+0.2245$	0.9969	$\eta=0.2457e^{0.0029t}$	0.9901
	ESSO	$\eta=0.0008t+0.2070$	0.9956	$\eta=0.2192e^{0.0023t}$	0.9943
	KLM	$\eta=0.0025t+0.4238$	0.9996	$\eta=0.4606e^{0.0031t}$	0.9608
	ZHH	$\eta=0.0012t+0.2154$	0.9987	$\eta=0.2354e^{0.0029t}$	0.9841
	SK	$\eta=0.0011t+0.2253$	0.9986	$\eta=0.2419e^{0.0027t}$	0.9868

注:  $R$  为相关系数。

2.2 延度变化分析

延度反映沥青的延伸性和柔韧性,同一温度下的延度越大,沥青的柔韧性越好。在 5 种原样沥青中,只有 LAL 的延度小于 150 cm,而其他 4 种沥青均大于 150 cm。由图 2 可知,经过 85 min 的 RT-FOT 老化后,除 ESSO 的延度值仍然大于 150 cm 外,其他 4 种沥青的延度值均有大幅衰减,ZHH 为 82.5 cm,SK、KLM 和 LAL 降到 50 cm 以下,而 LAL 仅为 24.1 cm;当继续老化至 180 min 后,5 种沥青的延度值又有大幅衰减,其中 ESSO 的延度已不足 30 cm;以后继续老化的过程中,延度继续衰减,但速率越来越慢,不同沥青的延度差别越来越小,直至趋于接近;5 种沥青经 480 min 老化后,延度值均降到 5 cm 以下。总体而言,5 种沥青的延度老化初期衰减速率很快,以后越来越缓慢。延度与老化时间都呈较好的乘幂衰减关系,相关系数  $R^2$  达 0.95 以上,如表 3 所示。

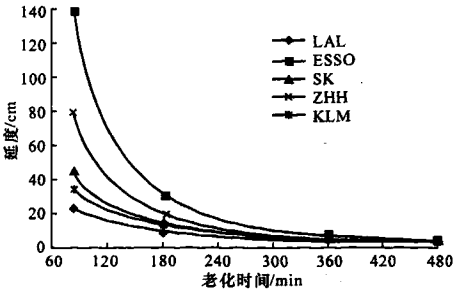


图 2 延度与 RTFOT 老化时间关系曲线

表 3 5 种沥青 15℃ 延度  $D$  与 RTFOT 老化时间  $t$  的关系

沥青种类	数学模型	$R^2$
LAL	$D=3653.1t^{-1.1396}$	0.9739
ESSO	$D=10^6t^{-2.0063}$	0.9746
SK	$D=25580t^{-1.4423}$	0.9633
ZHH	$D=339492t^{-1.684}$	0.9975
KLM	$D=7952.3t^{-1.2307}$	0.9844

3 抗老化性能的评价方法

引起沥青路面病害的原因非常复杂,往往是多种因素综合作用的结果。如沥青路面低温开裂的影响因素除有材料、环境和路面结构外,其中沥青老化也是一个重要因素。诺丁汉大学 Airey 研究认为:路面在正常修建的情况下,影响沥青路面耐久性的主要因素是老化和水损害<sup>[7]</sup>。而沥青老化过程中生成极性含氧基团,从某种程度上加剧了水损害<sup>[8-9]</sup>。天津市建设局对市内沥青路面的纵向裂缝、横向裂缝及网裂缝进行了调查研究,认为老化是路面开裂的主要原因。沥青老化后使高温性能提高,但低温性能和疲劳性能急剧下降,主要表现在沥青劲度增大,延度衰减。一般认为,随着路面沥青的老化,沥青混合料变形能力逐渐降低,进而发生开裂。可以认为,由于沥青材料抗老化性能的差异,即使在交通环境相当的条件下,使用设计良好的沥青混合料铺筑的路面耐久性也会有较大的区别。

延度是衡量沥青低温性能的重要指标,对沥青混合料的性能有很大的影响。沥青路面在使用过程

中,当沥青的延度值衰减到某一值时,将不能满足路面需要的低温变形能力,在荷载等作用下容易出现病害。但目前还没有公认的沥青路面出现低温开裂的延度值。本文认为,当沥青的 15℃ 延度下降到约 5 cm 时,路面容易发生开裂。因此,15℃ 延度为 5 cm 时,视为临界开裂病害老化状态。

由以上分析可知,沥青老化过程中 135℃ 粘度和 15℃ 延度与老化时间分别符合线性和乘幂关系

$$\eta_t = kt + \eta_0 \quad (1)$$

式中: $\eta_t$  为  $t$  时刻下的粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $t$  为老化时间 (min);  $\eta_0$  为初始粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $k$  为常数。

$$D_t = At^\alpha \quad (2)$$

式中: $D_t$  为  $t$  时刻下的延度 (cm);  $A$ 、 $\alpha$  均为材料常数。

由式(2)可以求得沥青延度衰减为 5 cm 时的临界病害老化状态对应的老化时间  $t_c$ ,再由式(1)可求得每种沥青在临界老化状态时间下对应的临界粘度  $\eta_c$ ,由此可得每种沥青老化过程中,从基质沥青到临界老化状态的粘度区间  $[\eta_0, \eta_c]$ 。定义不同老化状态的沥青老化度  $d_t$  为

$$d_t = \frac{\eta_t - \eta_0}{\eta_c - \eta_0} \times 100 \quad (3)$$

沥青老化度是指沥青某种老化状态下的老化程度与可能开始出现开裂病害的老化程度相比的比值。不同老化状态的老化度与老化时间呈线性关系,斜率越大,老化速率越大,由此可得到沥青抗老化系数为

$$\varphi = \frac{1}{K} \quad (4)$$

式中: $\varphi$  为沥青的抗老化系数; $K$  为老化度与老化时间关系曲线的斜率。抗老化系数体现了沥青抗老化性能, $K$  值越小,抗老化系数越大,则沥青的抗老化性能越强。

## 4 沥青抗老化性能评价结果分析

### 4.1 老化度分析

5 种沥青老化过程中的临界老化时间、粘度区间见表 4;将不同老化状态下的粘度代入式(3),可以计算与不同老化时间对应的老化度(表 5)。

表 4 5 种沥青的临界粘度与粘度区间

沥青种类	临界老化时间/min	临界粘度/(Pa·s)	粘度区间/(Pa·s)
LAL	325.8	1.094	0.368~1.094
ESSO	438.7	0.959	0.348~0.959
SK	372.9	1.139	0.369~1.139
ZHH	367.0	1.160	0.346~1.160
KLM	399.4	2.514	0.668~2.514

表 5 5 种沥青粘度区间及 RTFOT 不同老化时间的老化度

沥青种类	对应老化时间(min)的沥青老化度		
	85	180	360
LAL	21.3	51.4	112.9
ESSO	14.7	34.0	81.3
SK	18.1	34.3	96.4
ZHH	20.5	47.5	99.7
KLM	20.7	35.7	92.0

由表 5 可知,不同沥青经相同的老化时间的老化度有相当大的差异,《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052—2000)中用 RTOFT(85 min)模拟沥青施工过程中的老化,也就是说经拌和施工后 LAL 老化度已达到 21.8,而 ESSO 老化度仅为 15.4;RTOFT 老化 360 min 老化后,LAL 老化度已超过 100,即在这种老化状态下可能已经出现开裂,而 ESSO 老化度仅为 81.3,远没有达到出现开裂的老化程度。由此可以直观地看出,ESSO 沥青具有较强的耐老化能力。

研究表明,RTOFT 老化效果与路面野外老化之间具有较好的对应性,RTFOT 老化 360 min 基本相当于实际路面使用 6 年的老化程度,即相当于路面铺筑后实际使用 6 年的老化程度。若按此推算,在实际路面使用环境下,结构设计良好的用 LAL 沥青铺筑的路面,使用 5.3 年就会发生开裂;而 ESSO 沥青路面可以使用至 7.5 年才出现开裂;用 SK 和 ZHH 铺筑路面约使用 6 年出现开裂;用 KLM 铺筑的路面可以使用 6.5 年出现开裂。如能在可能出现开裂的使用年限之前及时进行预防性养护,延缓路面老化进程,则可以大幅延长路面的使用年限。可见,进行沥青抗老化性能评价可以更好地掌握沥青性能在老化过程中的衰变规律,预测可能出现病害的时间,为路面养护提供支持。

### 4.2 抗老化系数分析

由表 6 回归数学模型及  $R^2$  可知,老化度与老化时间呈较严格的线性关系,这进一步验证了上述抗老化系数定义的合理性。5 种沥青不同老化状态的老化度与老化时间关系曲线如图 3 所示(见下页)。

由表 6 中 5 种沥青的抗老化系数可知,不同沥

表 6 5 种沥青的抗老化系数

沥青种类	老化度 $d_t$ 与老化时间的关系	$R^2$	抗老化系数 $\varphi$
LAL	$d_t = 0.334 2 t - 7.760 8$	0.999 6	2.99
ESSO	$d_t = 0.244 9 t - 7.682 1$	0.996 2	4.08
SK	$d_t = 0.292 6 t - 11.360 0$	0.977 7	3.42
ZHH	$d_t = 0.288 3 t - 4.154 5$	1.000 0	3.47
KLM	$d_t = 0.266 3 t - 6.005 5$	0.978 8	3.76

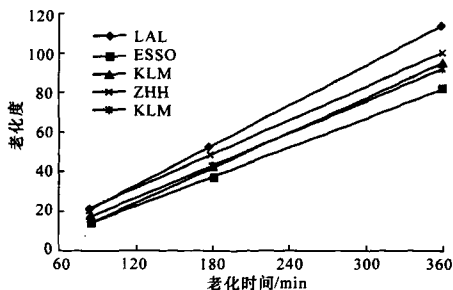


图3 老化度与老化时间的关系曲线

青的抗老化性能存在较大的差异, ESSO 抗老化系数大于 4, 而 LAL 抗老化系数小于 3。就抗老化性能而言, ESSO 最好, KLM 次之, SK 和 ZHH 相当, LAL 最差。因此, 在选取沥青材料时不能只考虑初始性能的优劣, 沥青的抗老化耐久性也非常重要。可以参照此方法评价沥青抗老化性能, 尽量选取抗老化系数较大的沥青。

## 5 结 语

(1) 提出的基于粘度和延度变化的沥青抗老化性能评价方法, 考虑了沥青使用过程中低温性能随老化过程的动态衰减, 克服了以往评价方法仅考虑老化后的指标而与使用性能割裂的缺点, 试验及计算十分简便。

(2) 由老化度和抗老化系数体现的不同沥青的抗老化性能存在较大差异。考察沥青不同老化时间的老化度, 可以更好地掌握沥青性能在老化过程中的衰变规律, 预测可能出现病害的时间, 为路面养护提供支持。

(3) 抗老化系数直观地反映沥青的抗老化性能, 在沥青材料的选择过程中, 应尽量选择抗老化系数较大的沥青。

### 参考文献:

#### References:

- [1] Huang S C, Tia M, Ruth B E. Laboratory aging methods for simulation of field aging of asphalts[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1996, 8(3): 141-152.
- [2] Kliewer J E, Zeng H Y, Vinson T S. Aging and low-temperature cracking of asphalt concrete mixture [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1996, 10 (3): 134-148.
- [3] 董瑞琨, 孙立军. 考虑老化的沥青结合料低温感温性指标[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 34-39.  
DONG Rui-kun, SUN Li-jun. Low temperature susceptibility indexes of asphalt binder with different aging degree[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 34-39.
- [4] 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.  
ZHANG Zheng-qi, LIANG Xiao-li, LI Ping. Evaluation method of asphalt aging properties[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5 (1): 1-5.
- [5] 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 Dong-jie, GE Zhe-sheng, HUANG Xiao-ming, et al. Study on aging-resistant index of asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(3): 15-18.
- [6] 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.  
LI Hai-jun, HUANG Xiao-ming, ZENG Fan-qi. Analysis and evaluation of aging behavior of road asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(4): 5-8.
- [7] Airey G D. State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2003, 4 (3): 165-176.
- [8] 栗培龙. 道路沥青老化行为与机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [9] 王鹏, 曾凡奇, 黄晓明. 沥青高温性能指标的灰色关联度分析[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 32-36.  
WANG Peng, ZENG Fan-qi, HUANG Xiao-ming. Grey relation degree analysis of high-temperature performance indexes of asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 32-36.