

文章编号:1671-6833(2008)01-0119-05

道路沥青热氧老化模拟试验研究

栗培龙¹, 张争奇¹, 王秉纲¹, 丁 湛²

(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 710064)

摘 要: 沥青材料的抗老化性能是沥青路面耐久性的关键影响因素, 室内模拟老化试验是研究沥青抗老化性能的重要方法。为了对比不同试验方法的老化效果, 对 5 种沥青进行了延时旋转薄膜烘箱老化 (RTFOT)、压力老化 (PAV) 以及自行设计的 60 ℃ 烘箱老化试验, 并与自然老化路面的回收沥青指标进行了对比分析。结果表明, 上述 3 种老化试验方法的老化效果之间有很好的对应性和等效性, 都能较好地反应实际路面沥青的长期老化行为; 虽然不同方法的老化温度和氧浓度存在差异, 但其老化机理都是氧化反应, 并无本质区别, 认为 RTFOT 老化试验可以作为模拟沥青长期老化的试验方法。

关键词: 道路沥青; 热氧老化; 旋转薄膜烘箱老化; 压力老化; 模拟

中图分类号: U 414 **文献标识码:** A

0 引言

沥青抗老化性能的优劣直接关系到沥青路面的耐久性^[1]。室内老化模拟试验可以较为精确的控制试验条件, 加速老化进程, 是评价沥青老化特性的常用手段。国内外学者^[1-8]已进行大量的沥青模拟老化试验研究, 认为热氧老化是沥青老化的最主要因素。文献[1]采用旋转薄膜烘箱老化试验 (RTFOT) 研究沥青的老化行为。文献[2-4]分别进行了 RTFOT 和压力老化试验 (PAV) 试验, 探讨了沥青的短期和长期老化性能, 以及路用性能的流变特性; 文献[5-6]利用 PAV 试验研究了老化对沥青黏弹性的影响。但以往的研究局限于分析同一种方法老化后沥青性能的衰变特性, 没有得到不同方法老化效果的对应关系, 也没有研究室内模拟老化与实际路面自然老化之间的关系, 因此进行条件各异的热氧老化模拟试验, 探讨它们之间以及与路面实际老化之间的等效关系, 对于掌握沥青老化规律, 评价沥青路面的耐久性都具有重要意义。

为了较为真实地模拟路面沥青的老化状态, 文献[7]在路面温度分析的基础上提出了 60 ℃ 烘箱老化试验方法^[8]。笔者选择 5 种具有代表性的沥青进行不同时间的 RTFOT 老化、PAV 老化及

60 ℃ 烘箱老化试验, 比较不同老化方式的老化效果, 并结合实际路面抽提回收的沥青指标进行模拟老化与路面实际老化的效果对比分析, 探讨不同老化方法的老化条件及机理差异。

1 试验方案

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 种沥青进行相关老化试验。其原样沥青基本指标如表 1 所示。

表 1 沥青基本性能指标

Tab. 1 Basic properties of asphalts					
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	>150	>150	>150
针入度 (25 ℃) /0.1mm	91	96	69	81	118
旋转黏度 (135 ℃)/(Pa·s)	0.368	0.348	0.668	0.346	0.369

1.1 RTFOT 老化试验

本试验采用 RTFOT 老化方法, 分别对 5 种沥青进行 85 min、180 min、360 min 的老化 (分别简记为 R85 min、R180 min、R360 min), 然后进行相

收稿日期: 2007-09-21; 修订日期: 2007-12-31

基金项目: 西部交通建设科技项目 (2006-318-812-21)

作者简介: 栗培龙 (1980-), 男, 江苏邳州人, 长安大学博士研究生, 主要从事路面结构与材料方面的研究, E-mail: li_peilong@sohu.com.

关指标测试,考察沥青性质的变化。

1.2 PAV 老化试验

将经短期老化(R85 min)后的沥青样品放入 PAV 中,在 2.1 MPa 的压力下老化 20 h 来模拟路面沥青使用 5~10 年的老化性能。笔者为了将 RTFOT 老化与 PAV 老化效果进行对比,分别将上述 5 种沥青 RTFOT 老化 85 min 后的残留物进行了 PAV 老化(简记为 R+P)。

1.3 60 ℃ 通风烘箱老化

调查表明,夏炎热气候地区夏季路面温度在 60 ℃ 左右,而 RTFOT 和 PAV 老化试验的温度均远高于沥青路面实际所能达到的温度,为了较为真实地模拟沥青路面在夏季高温天气的热氧老化,将经过 RTFOT 短期老化后的沥青 75 g 样品装入 450 cm² 的浅盘中,置于 60 ℃ 强制通风烘箱中,分别老化 5 d、10 d、15 d、20 d 模拟沥青路面夏季高温环境对沥青的老化(分别简记为 R+O5d、R+O10d、R+O15d、R+O20d)。

1.4 路面沥青回收抽提试验

选取西安市不同使用年限的几条代表性路段铣刨沥青混合料,采用规范^[9]中旋转蒸发器法抽提回收沥青,并进行了相关指标测试,分别与上述 3 种模拟老化方法进行比较。

2 试验结果分析

2.1 PAV 与 RTFOT 老化效果比较

5 种沥青的 PAV 老化与 RTFOT 老化后的指标变化如图 1 所示。由图 1 可知:

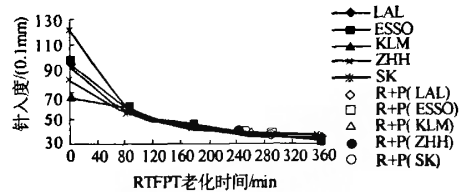
(1)随着 RTFOT 老化时间的延长,不同沥青的指标变化趋势一致,其中针入度、延度不断衰减,软化点、旋转黏度及低温劲度不断增大,即沥青逐渐变硬、变脆,低温性能衰减。尽管不同种类和标号的原样沥青的针入度和延度值差别很大,但随着老化程度的加深,差异逐渐减小直至趋于相同;黏度接近线性增加,但由于抗老化性能的差异,增加速率差别较大。

(2)R+P 老化后的各项指标均处于 R240~R300 min 的老化区间,与 R270 min 老化较为接近,只有针入度指标相对分散,这可能与测试方法本身误差较大有一定关系。由两种方法老化后沥青指标之间的关系可以得出,R+P 模拟沥青路面长期老化的效果大约相当于 R270 min 的效果,两种老化方法有较好的等效性。

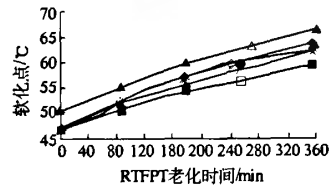
2.2 60 ℃ 烘箱老化与 RTFOT 老化效果比较

沥青在实际路面环境下的老化行为关系到路

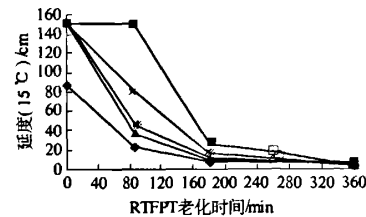
面的耐久性。实际路面温度远低于 RTFOT 和 PAV 的老化温度,氧化反应较为缓慢。60 ℃ 烘箱老化与 RTFOT 老化效果对比见表 2。



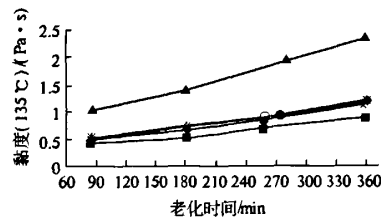
(a) 针入度对应关系



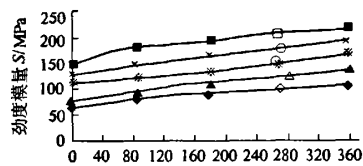
(b) 软化点对应关系



(c) 延度对应关系



(d) 黏度对应关系



(e) 劲度模量对应关系

图 1 沥青 PAV 老化与 RTFOT 老化的指标对应关系
Fig. 1 corresponding relationship of properties of asphalts after PAV aging and RTFOT aging

由表 2 可知,两种沥青先经 R85 min 老化,再进行 60 ℃ 烘箱老化的过程中沥青老化程度继续加深,但速率缓慢,R+O10 d 的老化程度介于 R85 min 和 R180 min 之间;R+O20 d 老化的各项指标均与 R180 min 老化较为接近,但稍弱于 R180 min 的老化效果。如果考虑除去前期共有的

R85 min 老化,20 d 的 60 ℃烘箱老化大约相当于 R90 min 的老化效果,二者也有较好的等效性。

2.3 模拟老化与路面实际老化的关系

由以上分析可知,随着老化时间的延长,RT-FOT 老化后各项指标均表现出非常好的规律性。而且模拟沥青路面长期老化的 R + P 效果与 R270 min 大体相当;20 d 60 ℃烘箱老化大约相当

于 R90 min 的老化。但由于路面服务期内的老化是热、氧、光、水、荷载等综合环境因素作用的结果,并与路面空隙率有密切关系,所以,当前的任何老化方法均不能完全准确地模拟路面实际过程中的老化,只能考虑最主要的因素,尽可能真实地进行模拟。在此将 3 种热氧化老化与实际路面老化的效果进行对比,见表 3。

表 2 60 ℃烘箱老化与 RTFOT 老化效果比较

Tab. 2 aging effect comparison of oven aging at 60 ℃ and RTFOT

测试指标	沥青	原样	R85 min	R + O10d	R180 min	R + O20d	R360 min
针入度 (25℃)/0.1 cm	LAL	82	56	50	44	45	35
	ESSO	96	60	54	46	47	31
软化点/℃	LAL	46.2	52.3	56.1	57.6	57.2	64.1
	ESSO	46.3	50.5	53.2	54.2	54.2	59.6
延度/cm	LAL ^①	86.6	24.1	10.0	8.9	8.5	4.7
	ESSO ^②	49.5	9.4	4.8	3.2	3.8	6.5
旋转黏度 (135℃)/(Pa·s)	LAL	0.368	0.523	0.656	0.741	0.682	1.188
	ESSO	0.348	0.438	0.515	0.556	0.539	0.845
劲度模量 S /MPa	LAL	59.9	80.4	84.5	90.6	88.3	106
	ESSO	148	183	188	196	194	218

注:①15 ℃,②10 ℃。

表 3 沥青模拟老化与路面抽提回收沥青指标比较

Tab. 3 asphalt properties comparison of aging simulation and reclaiming from aged pavement

沥青来源	路面抽提回收				模拟老化				
	北大街	张家堡 北广场	西影路	枣园东 西路	R360 min	R + P	R180 min	R + O20d	R85 min
服务时间/年	7	6	3	2					
软化点/℃	66.5	65.8	58.6	57.6	64.1	60.5	57.6	57.2	52.3
针入度 (25℃)/0.1 mm	29	35	48	54	35	40	44	45	56
延度(5 cm/min, 15℃)/cm	4.8	5.3	8.8	9.5	4.7	5.5	8.8	8.5	24.1
黏度/(Pa·s)	1.731	1.595	1.029	0.615	1.188	0.967	0.741	0.682	0.523
劲度模量 S (-12℃)/MPa	142	112	86.2	79.5	106	98.9	90.6	88.3	80.4

(1)经 R180 min 老化的软化点与实际使用 2 年相同,而针入度远小于 2 年回收样品测试结果,延度与使用 3 年的相同,黏度比 2 年的稍大,但远低于 3 年的,-12 ℃劲度模量大体与 3 年相当,综合考虑各项指标,R180 min 老化约相当于路面实际使用 2~3 年后的老化程度。

(2)R360 min 老化的软化点略小于实际使用 6 年的路面回收沥青软化点,针入度与之相同,两者的延度与低温劲度较为接近,但黏度与实际回收沥青差别较大,这可能由于回收沥青中的矿粉无法彻底除净导致黏度偏大的缘故。总体而言,R360 min 的老化基本相当于实际路面使用 6 年的老化程度。

综上所述,如果 R180 min 和 R360 min 的老化中除去模拟施工过程的 R85 min 老化,即大约 R90 min 相当于 2~3 年路面服务期的老化,R270 min 相当于 6 年路面服务期的老化,两者具有较好的一致性。由前文 RTFOT 与 PAV 老化效果的关系可知,R + P 约相当于 R270 min 的老化程度。参照以上分析,单纯 PAV 老化约等效为 R185 min 的老化,大体为 4~5 年的实际路面老化效果。

(3)单纯 20 d 60 ℃烘箱老化大约相当于 R90 min 的老化,即约为 2~3 年路面服务期的老化程度。以西安地区为例,1 年约有 2 个月的夏季高温天气,如果以每天 3 h 达到路面老化的高温计算,沥青路面每年大约累计经历 180 h 的高温

老化. 20 d(480 h)的 60 ℃烘箱老化相当于 2~3 年路面服务期的老化,与前文分析一致.

3 老化条件及机理对比分析

RTFOT、PAV 及 60 ℃烘箱老化的本质都是沥青发生了氧化反应,沥青分子缔合成极性大分子,从而引起胶体结构及性能的改变. 在恒定的温度下,反应速率与反应物浓度成正比;温度对反应速率的影响,主要体现在对速率常数的影响上,可以用 Arrhenius 方程式表示

$$k = Ae^{-E_a/RT} \quad (1)$$

式中: k 为速率常数, s^{-1} ; A 为指数前因子; E_a 为活化能, $kJ \cdot mol^{-1}$; R 为物理量常数, $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$; T 为反应温度, K .

可见,温度和氧气浓度是影响沥青老化进程的两个最主要因素,温度越高、氧浓度越大,氧化反应速率越大,即老化速率越快,在此氧浓度以压力体现. RTFOT 在 163 ℃条件下,常压吹入热空气老化,温度较高,氧浓度较小;PAV 是 90~110 ℃温度下,空气压力 2.1 MPa 下进行老化,温度较低,氧浓度较大;而 60 ℃烘箱老化的温度和氧浓度都最低,因此老化进程最慢.

由以上试验结果可知,夏季高温环境(60 ℃)就能够激发沥青的氧化反应,可见 RTFOT 和 PAV 的试验温度均高于沥青氧化的激发温度,RTFOT、PAV 这两种老化方法均是通过提高老化温度或反应物浓度来加快老化进程的手段. 研究认为^[2],沥青在高温下只是加快了老化速度,机理与野外老化并无明显不同. 但在 RTFOT 老化过程中,沥青是在较高温度而且开放的体系中进行的,存在较大的轻组分挥发;而 PAV 是在加压、密闭的环境下进行的,基本不存在轻组分挥发. 由表 4 可以看出, LAL 沥青经 RTFOT 老化 85 min、180 min

逐渐增大,这说明较高温度的 RTFOT 老化过程中轻组分的挥发主要集中在初期,随着易挥发组分的逐渐减少,后期的挥发非常微弱,老化主要表现为吸氧反应. 因此,先经过 R85 min 老化后再进行 PAV 或 60 ℃烘箱老化与延时 RTFOT 老化在机理上并无明显差别.

4 3 种热氧老化模拟方法比较

由试验结果和分析可知,RTFOT、PAV 与 60 ℃烘箱老化均能较好的模拟沥青路面实际使用过程中的老化. 但压力老化仪 PAV 要收集 RTFOT 短期老化的残留物,在 2.1 MPa 的压力下老化 20 h,存在操作复杂,条件苛刻,时间较长,仪器不普及等缺点. 60 ℃烘箱老化虽然设备简单,但试验周期较长,给试验研究带来较大的困难.

延时 RTFOT 老化具有操作简单,试验周期较短,方便快捷,数据重现性好等优点,对于缺少长期老化设备的单位可以用延时 RTFOT 代替 PAV 或者直接进行沥青长期老化性能试验. 结合以上研究,笔者认为采用 RTFOT 可以模拟沥青使用过程中的老化,其中 R85 min 可模拟拌和过程中的老化, R180 min 约相当于路面使用 2~3 年的老化, R360 min 约相当于路面使用 5~6 年的老化.

5 结论

(1) 可以采用 RTFOT 老化模拟试验方法进行沥青长期老化性试验. RTFOT、PAV、60 ℃烘箱老化 3 种老化方式的老化效果之间具有较好的对应性, PAV(RTFOT 残留物)模拟沥青路面长期老化的效果大约相当于 RTFOT 老化 270 min 的效果;先经 RTFOT(85 min)老化,再经过 20 d 的 60 ℃烘箱老化后各项指标均与 RTFOT 180 min 接近.

(2) 3 种模拟老化与实际路面老化效果之间也有很好的对应性,其中 R180 min 老化约相当于路面铺筑后实际使用 2~3 年后的老化程度, R360 min 的老化基本相当于实际路面使用 6 年的老化程度; R+P 大体相当于 4~5 年的实际路面老化效果. 20 d 60 ℃薄膜烘箱老化大约相当于 2~3 年路面服务期的老化.

(3) RTFOT、PAV 及 60 ℃烘箱老化的本质都是沥青发生了氧化反应. RTFOT、PAV 这两种老化方法均是通过提高老化温度或反应物浓度来加快老化进程的手段,反应机理并无明显区别.

表 4 RTFOT 老化过程中沥青质量变化

Tab. 4 weight change during RTFOT aging

沥青种类	老化时间/min	质量变化/%
LAL	85	-0.53
	180	-0.54
	360	-0.52
ESSO	85	-0.42
	180	-0.23
	360	-0.17

和 360 min 后的质量变化相差不大;而 ESSO 沥青前 85 min 的老化质量损失最大,继续老化质量又

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 袁迎捷,张争奇,胡长顺. Superpave 沥青规范对改性沥青适用性[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):9-11.
- [5] 田小革,郑建龙,张起森. 老化对沥青结合料黏弹性的影响[J]. 交通运输工程学报,2004,4(1):3-6.
- [6] 郑健龙,吕松涛,田小革. 沥青混合料黏弹性参数及其应用[J]. 郑州大学学报:工学版,2004,25(4):8-11.
- [7] 栗培龙. 道路沥青老化行为与机理研究[D]. 西安:长安大学公路学院,2007.
- [8] 交通部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. JTJ 052-2000,北京:人民交通出版社,2000.

Experimental Research on Thermo-oxidative Aging for Simulation of Pavement Asphalt Aging

LI Pei-long¹, ZHANG Zheng-qi¹, WANG Bing-gang¹, DING Zhan²

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

Abstract: Resistance to aging performance of asphalt materials is a key factor influencing the durability of asphalt pavement. Laboratory aging simulation test is an important method of studying resistance to aging performance of asphalt. To compare aging effects of different tests, five kinds of asphalt were aged by rolling thin film oven test (RTFOT), pressure aging vessel (PAV) aging test and oven aging at 60°C. Data from three simulation aging methods are compared, and then result from simulation aging tests and the data of recovered aged asphalt from field pavement are analyzed. The results and analysis indicate that there are correspondence and equivalence among those aging simulation tests, which can all reflect long-term aging behavior of asphalt in field pavement. Though aging conditions such as temperature and oxygen concentration are different, their aging mechanisms are the same, i.e. oxidation reaction. We believe that retardation time RTFOT is a good test of asphalt aging simulation for long-term performance.

Key words: road asphalt; thermo-oxidative aging; RTFOT; PAV; simulation