

## 不同热氧老化强度对沥青及其再生性能的影响

张恒龙<sup>1,2†</sup>, 赵彬<sup>1</sup>, 徐国庆<sup>1</sup>, 朱崇政<sup>1</sup>, 吴超凡<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南省建筑固废资源化利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410205)

**摘要:**为了探究热氧老化强度对沥青性能的影响,对沥青进行了不同次数的旋转薄膜烘箱老化实验(RTFOT)和不同次数 RTFOT+压力老化箱老化(PAV)实验,分别测试了老化前后沥青样品的常规物理性能和动态剪切流变性能。为了使不同热氧老化强度下的沥青性能能够恢复到基质沥青水平,采用了黏度调合法来确定再生剂掺量。实验结果表明:不同热氧老化强度下的沥青其物理性能存在较大的差异;动态剪切流变实验发现,达到一定老化强度后沥青复数模量的增量明显减少,且最终沥青复数模量趋近于一个稳定值。通过物理性能和流变性能均能发现:对于长炼 70# 沥青,3 次 RTFOT 的老化强度与 1 次 RTFOT+ PAV 的老化强度相当。通过黏度调合法选取再生剂掺量时,发现各老化再生沥青的沥青复数模量均能恢复到基质沥青的水平,针入度略低于基质沥青,延度都有明显的提高,且软化点都高于基质沥青;同时,中低温下相位角能恢复到基质沥青的水平,但高温下却无法恢复到原基质沥青的水平。

**关键词:**道路工程;沥青;热氧老化;再生;黏度调合法;流变性能

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## Effects of Thermal Oxidative Aging Intensity on Asphalt and Its Recycling Properties

ZHANG Henglong<sup>1,2†</sup>, ZHAO Bin<sup>1</sup>, XU Guoqing<sup>1</sup>, ZHU Chongzheng<sup>1</sup>, WU Chaofan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology  
of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Construction Solid Wastes Recycling, Changsha 410205, China )

**Abstract:** To explore the effect of thermal oxidative aging intensity on the properties of asphalt, different times of the rotating thin film oven test (RTFOT) and RTFOT + pressure aging vessel (PAV) aging tests were applied to asphalt. The conventional physical properties and dynamic shear rheological properties of asphalt samples were tested before and after aging. Additionally, the viscosity harmonic method was used to determine the amount of rejuvenating agent in order to restore the asphalt performance under different thermal oxidative aging to the matrix asphalt. The test results show that the physical properties of asphalt are significantly changed after different thermal oxidative ag-

\* 收稿日期:2018-02-02

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51678232), National Natural Science Foundation of China(51678232);湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ3015), Natural Science Foundation of Hunan Province (2017JJ3015);湖南省交通科技进步与创新计划项目(201805), Transportation Science and Technology Development and Innovation Project of Hunan Province(201805);长沙市科技计划项目(KC1703038, KQ1706018), Key Project of Science and Technology Plan of Changsha(KC1703038, KQ1706018)

**作者简介:**张恒龙(1985—),男,湖北巴东人,湖南大学副教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: hlzhang@hnu.edu.cn

ing intensity. The dynamic shear rheological test results exhibit that the increase ratio of asphalt complex modulus ( $G^*$ ) decreases obviously after the certain aging degree, and finally, the  $G^*$  approaches a stable value. It is found through physical and rheological properties that, for Changlian 70# asphalt, 3 times RTFOT aging intensity is equal to the RTFOT + PAV aging intensity. In addition, through viscosity harmonic method selecting rejuvenating agent dosage, it can be found that the recycling asphalt's  $G^*$  can restore to the level of matrix asphalt, the penetration is slightly lower than the matrix asphalt, but the ductility is improved obviously. Additionally, the softening point is higher than that of matrix asphalt. At the same time, the phase angle ( $\delta$ ) at low temperature can be restored to the level of matrix asphalt, but it cannot be restored to the level of the matrix asphalt at high temperature.

**Key words:** road engineering; asphalt; oxidative aging; recycling; viscosity harmonic method; rheological properties

沥青作为一种优良的路面胶结材料已得到了广泛的应用.但作为有机材料,沥青在拌和、运输、铺筑、使用过程中不可避免发生性能的衰退,这种现象称为沥青的老化<sup>[1]</sup>.热氧老化是沥青最主要的老化方式<sup>[2-3]</sup>,沥青在铺筑前及铺筑后的使用过程中都会发生热氧老化<sup>[4]</sup>,热氧老化的剧烈程度直接影响着沥青混合料的路用性能.

沥青的热氧老化可分为短期热氧老化和长期热氧老化两种方式.短期热氧老化主要是沥青混合料在拌和、运输和铺筑的过程中发生的老化,实验室一般用薄膜烘箱老化(TFOT)或旋转薄膜烘箱老化(RTFOT)来模拟.长期热氧老化主要是沥青材料在实际服役过程中受环境因素和车辆荷载的影响产生的老化,一般用压力老化(PAV)来进行模拟.但是实际工程应用表明,影响热氧老化的因素很多,对于短期热氧老化,因为运输时间的长短,拌和条件的差异甚至包括铺筑水平的高低,所以规范规定的标准短期热氧老化实验条件(163℃,5h或者163℃,85min)并不能完全代表所有工况下沥青的短期热氧老化强度;而对于长期热氧老化,PAV采用90℃、100℃或者110℃温度条件下,2.1MPa压力作用下老化20h来模拟,1次PAV相当于沥青服役5~10年产生的热氧老化.虽然PAV推荐了3种不同条件下的老化来模拟长期老化,但是其采用的2.1MPa压力和20h的老化时间的条件与实际服役过程中沥青材料受到的老化条件有较大的差异,其合理性也值得商榷.栗培龙<sup>[5]</sup>对比研究了不同RTFOT老化时间下沥青的性质与实际路面沥青的性质;Huang等<sup>[6]</sup>研究了不同温度条件下RTFOT老化对沥青性能的影响,尽管都证明了规范规定的标准短期

热氧老化实验条件不能完全代替所有情况下的沥青短期热氧老化的水平,但却没有定量说明短期热氧老化强度与沥青老化行为的对应关系<sup>[7]</sup>,局限地研究了标准实验与实际老化程度的拟合关系.对于长期热氧老化的研究,王衡等<sup>[8]</sup>认为实验室采用高温高压老化与路面实际长期热氧老化是不相同的.Churchill等<sup>[9]</sup>认为进行不同温度的延时RTFOT实验可以评价沥青结合料的长期老化性能.路畅等<sup>[10]</sup>研究了分别在5h、15h、25h和35h下进行RTFOT老化来模拟长期热氧老化后的沥青,比较了不同长期热氧老化程度下沥青的性能,但没有论证是否可以通过改变短期热氧实验方法来模拟长期热氧老化.虽然标准化实验RTFOT和RTFOT+PAV并不能完整地表示出沥青性质与老化强度之间的关系,但可以利用定量的方法,改变RTFOT的次数将热氧老化过程按其老化强度划分各个等级(1次RTFOT、2次RTFOT、3次RTFOT代表3种短期热氧老化的强度等级),研究不同等级下沥青的性能,最终得出不同老化程度与沥青性能的对对应关系.同时,沥青的流变性能参数 $G^*$ (沥青复数模量)和 $\delta$ (相位角)分别代表沥青的劲度以及弹性和粘性成分的比例<sup>[11]</sup>,通过分析 $G^*$ 和 $\delta$ ,可以很好地分析沥青性能的变化.Ghavibazoo等<sup>[12]</sup>和Qin等<sup>[13]</sup>的研究表明,流变学性质可以很好地表征老化前后沥青性能的变化.

沥青老化后组分发生改变,轻组分减少,重组分增多,使得沥青的胶体结构发生变化,从而影响沥青的路用性能.应龙华等<sup>[14]</sup>认为沥青粘度增加的主要原因是沥青质含量的增加,所以沥青再生就是通过降低沥青的粘度来降低沥青中重组分的比例,即在老化沥青中添加轻组分成分,或加入新沥青使

调配后的再生沥青达到适当的粘度和需要的路用性能<sup>[15]</sup>。现阶段,国内外学者对沥青的再生做了许多研究,这些研究主要着眼于再生剂材料的研发<sup>[16-19]</sup>及再生剂与沥青作用的机理上<sup>[20-23]</sup>。也有学者对如何准确确定再生剂掺量的问题做了很多研究,刘军等<sup>[24]</sup>利用复合添加剂再生沥青,并用数学回归模型对复合添加剂含量进行优化。周志刚等<sup>[25]</sup>通过对再生剂和旧沥青组分的分析,提出了修正拟合公式来确定再生剂掺量。

本文的主要目的是研究不同热氧老化强度下沥青的物理流变性能,同时通过不同次数 RTFOT 和 PAV 的组合,探明不同的热氧老化强度对沥青性能的影响规律。另外利用 Arrhenius 黏度复合模型<sup>[26-28]</sup>确定再生剂的掺量,对不同热氧老化条件下的沥青进行再生,研究了黏度调和掺加再生剂的方法用于恢复不同老化程度沥青性能的可行性,指导沥青路面的预防性养护和重建工作。

## 1 实验材料

### 1.1 沥青原材料

本文沥青采用长炼 70# 沥青,其性能指标见表 1。

表 1 基质沥青常规性能

Tab.1 Conventional properties of matrix asphalt

沥青	针入度 /dmm	软化点温 度/°C	135 °C黏 度/(Pa·s)	10 °C延 度/cm	15 °C延 度/cm
长炼 70# 基质沥青	77.3	46.7	0.38	30.9	>150

### 1.2 再生剂

再生剂采用润强 RA101 型再生剂,其性能指标见表 2。

表 2 再生剂性能

Tab.2 Properties of rejuvenating agent

再生剂	闪点 温度 /°C	饱和 分含 量/%	60 °C 黏度 /(Pa·s)	薄膜烘箱 老化前后 黏度比	薄膜烘箱老 化前后质 量变化/%
润强 RA101 型再生剂	≥200	≤30	1.31	≤30	≤4, ≥-4

## 2 实验室试验

### 2.1 沥青多次短期热氧老化

本文采用 RTFOT 来模拟沥青短期热氧老化过

程。按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的 T0610,沥青 1 次短期热氧老化即先将(35±0.5) g 基质沥青倒入盛样瓶中,再将盛样瓶放入(163±0.5) °C 的旋转薄膜箱中,通入流速为(4 000 ±200) mL/min 的空气,老化时间控制为 85 min。沥青 2 次短期热氧老化是沥青在进行过 1 次 RTFOT 后,将盛样瓶连同沥青取出放置于室温下,冷却 2 h 待沥青温度完全达到室温后,再进行 1 次 RTFOT。沥青 3 次短期热氧老化是沥青在进行过 2 次 RTFOT 后,将盛样瓶连同沥青取出放置于室温下,冷却 2 h 待沥青温度完全达到室温后,再进行 1 次 RTFOT。通过不同次数的短期热氧老化实验来定量表示沥青短期热氧老化的强度。

### 2.2 沥青长期热氧老化

本文采用 PAV 来模拟沥青的长期热氧老化过程,按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的 T0630,对多次短期热氧老化后的沥青进行长期热氧老化。试验条件:20 h,100 °C,压强 2.1 MPa。

### 2.3 多次短期热氧老化沥青的再生

黏度作为沥青重要的性质之一,其变化反映了沥青质在沥青中胶溶度的变化<sup>[29]</sup>,所以沥青的黏度能间接地反映沥青的其他性能。故本文采用黏度调和法选取再生剂的掺量。按照 JTG F41—2008《公路沥青路面再生技术规范》中所给的黏度调和公式(1)初选出再生剂掺量。

$$\lg \lg \eta_{\text{mix}} = (1 - \alpha) \lg \lg \eta_{\text{old}} + \alpha \lg \lg \eta_{\text{new}} \quad (1)$$

式中: $\eta_{\text{mix}}$  为混合后沥青 60 °C 黏度(Pa·s); $\eta_{\text{old}}$  为混合前旧沥青 60 °C 黏度(Pa·s); $\eta_{\text{new}}$  为混合前新沥青或再生剂 60 °C 黏度(Pa·s); $\alpha$  为新沥青或再生剂的掺量。

通过式(1)计算得出 1 次短期热氧老化、2 次短期热氧老化、3 次短期热氧老化沥青再生剂初选掺量分别为 9.3%、19.1%、22.3%。依据初选再生剂掺量,再进行实验(以初选掺量上下浮动的方法)实测出与基质沥青 135 °C 黏度 0.35 Pa·s 大致相等的掺量,并以此掺量作为再生剂的最佳掺量,通过表 3、表 4 和表 5,可以得出 1 次短期热氧老化、2 次短期热氧老化、3 次短期热氧老化沥青再生剂的最佳掺量分别为 13%、19%、24%。

表3 1次 RTFOT 老化沥青再生剂掺量和 135 °C黏度

Tab.3 1 time RTFOT aging asphalt's rejuvenating dosage and 135 °C viscosity

再生剂掺量/%	1次 RTFOT 老化再生后沥青 135 °C黏度/(Pa·s)
10	0.38
11	0.36
13	0.35
14	0.34

表4 2次 RTFOT 老化沥青再生剂掺量和 135 °C黏度

Tab.4 2 time RTFOT aging asphalt's rejuvenating dosage and 135 °C viscosity

再生剂掺量/%	2次 RTFOT 老化再生后沥青 135 °C黏度/(Pa·s)
18	0.35
19	0.34
20	0.33
21	0.31

表5 3次 RTFOT 老化沥青再生剂掺量和 135 °C黏度

Tab.5 3 time RTFOT aging asphalt's rejuvenating dosage and 135 °C viscosity

再生剂掺量/%	3次 RTFOT 老化再生后沥青 135 °C黏度/(Pa·s)
22	0.37
23	0.37
24	0.35
25	0.34

## 2.4 长期热氧老化后沥青的再生

对多次短期热氧老化后的沥青进行 PAV 老化,同样采用公式(1)初选长期热氧老化后沥青再生剂的掺量,可得1次 RTFOT+PAV 老化、2次 RTFOT+PAV 老化、3次 RTFOT+PAV 老化后初选再生剂掺量分别为:22.8%、31.4%、40.7%。最终通过实验得出三者最优再生剂的掺量分别为:24%、32%、43%(详见表6、表7和表8)。

表6 1次 RTFOT+PAV 老化沥青再生剂掺量和 135 °C黏度

Tab.6 1 time RTFOT + PAV aging asphalt's rejuvenating dosage and 135 °C viscosity

再生剂掺量/%	1次 RTFOT+PAV 老化再生后沥青 135 °C黏度/(Pa·s)
23	0.37
24	0.36
25	0.33
26	0.32

表7 2次 RTFOT+PAV 老化沥青

再生剂掺量和 135 °C黏度

Tab.7 2 time RTFOT + PAV aging asphalt's rejuvenating dosage and 135 °C viscosity

再生剂掺量/%	2次 RTFOT+PAV 老化再生后沥青 135 °C黏度/(Pa·s)
31	0.37
32	0.35
32	0.33
34	0.32

表8 3次 RTFOT+PAV 老化沥青

再生剂掺量和 135 °C黏度

Tab.8 3 time RTFOT + PAV aging asphalt's rejuvenating dosage and 135 °C viscosity

再生剂掺量/%	3次 RTFOT+PAV 老化再生后沥青 135 °C黏度/(Pa·s)
41	0.39
42	0.38
43	0.35
44	0.32

## 2.5 沥青性能测试

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的 T0604、T0605、T0606 和 T0625 分别对沥青试样的针入度(25 °C)、延度(10 °C、15 °C)、软化点和布氏旋转黏度(135 °C)进行测试。用动态剪切流变仪进行动态剪切流变实验(DSR)对沥青的流变性能进行测试,DSR 测试温度扫描区间为 30~90 °C。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 多次短期热氧老化及长期热氧老化后沥青的常规性能

多次短期热氧老化及长期热氧老化后沥青的常规性能指标如表9所示。通过表9可以看出,随着短期热氧老化次数的增加,沥青的针入度降低、软化点上升、黏度增加、延度降低,说明了随着短期热氧老化强度的增加,沥青的老化程度逐渐增加。多次短期热氧老化和长期老化配合的作用下,随着短期热氧老化次数的增加,沥青的老化程度也逐渐增加。另外可以看到3次 RTFOT 后沥青的性能指标与1次 RTFOT+PAV 后沥青的各项性能指标非常接近,可以认为对于长炼 70# 沥青,可通过3次 RTFOT 来代替1次 RTFOT+PAV。

表 9 不同老化程度下沥青的常规性能

Tab.9 The conventional properties of asphalt under different aging conditions

样本	针入度 /dmm	软化点 /°C	黏度 /(Pa·s)	10 °C延度 /cm	15 °C延度 /cm
基质沥青	77.3	46.6	0.35	30.9	150
1 次 RTFOT 老化后沥青	38.6	54.4	0.62	6.55	18.35
2 次 RTFOT 老化后沥青	31.4	57.5	0.85	1.0	8.25
3 次 RTFOT 老化后沥青	23.8	61.1	1.15	0.4	4.1
1 次 RTFOT 老化+PAV 老化后沥青	22.1	62.0	1.14	0.6	4.9
2 次 RTFOT 老化+PAV 老化后沥青	18.7	65.4	1.33	0.55	4.25
3 次 RTFOT 老化+PAV 老化后沥青	14.7	68.5	2.03	0.55	0.65

### 3.2 多次短期热氧老化及长期热氧老化后沥青的流变性能

图 1 截取了沥青动态剪切流变实验 40 ~ 80 °C 温度扫描区段.由图 1 可以看出,随着沥青短期热氧老化次数的增加,沥青的复数模量  $G^*$  增加,相位角  $\delta$  下降,说明随着短期热氧老化程度越深沥青的老化程度越严重.另外,可以发现 1 次 RTFOT 后沥青相较于基质沥青复数模量  $G^*$  的增量远大于 2 次 RTFOT 相较于 1 次 RTFOT 后复数模量  $G^*$  的增量.而且 2 次 RTFOT、3 次 RTFOT 后沥青再进行 PAV 后的复数模量  $G^*$  曲线基本重合.这是因为随着老化强度的增加,沥青中重组分含量不断增加,使得沥青抵抗剪切变形的能力增强,同时由于老化强度的增加,沥青中轻组分逐渐减少,使得沥青由轻组分转变成重组分的数量也在降低,所以随着老化强度的增加复数模量  $G^*$  的增量逐渐减小.当老化达到一定强度时,轻组分大部分都已转化,重组分含量趋近于最大值,此时沥青抵抗剪切变形的能力也随之趋近于最大值,说明沥青热氧老化后性能存在最终平衡值<sup>[27]</sup>.对于长炼 70# 沥青,当老化强度高于 2 次 RTFOT+PAV 老化强度时,复数模量  $G^*$  达到最终平衡值.另外,还发现 3 次 RTFOT 老化沥青其复数模量  $G^*$  和相位角  $\delta$  的数值与 1 次 RTFOT+PAV 老化沥青的数值相近.这同样表明对于长炼 70# 沥青,进行 3 次 RTFOT 的老化强度与 1 次 RTFOT+PAV 的老化强度十分相近,这与物理性能实验

得出的结论相同.可以认为 RTFOT 实验的热氧老化模式与 PAV 实验的热氧老化模式相同,且 3 次 RTFOT 实验的老化强度可以代表最为极端条件下的短期热氧老化强度,证明 3 次 RTFOT 为较高强度短期热氧老化的假定成立.

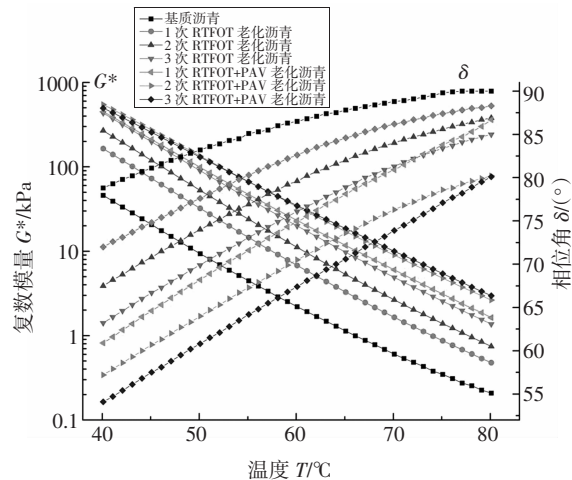


图 1 多次短期热氧老化及长期热氧老化后沥青的流变性能

Fig.1 The rheological properties of bitumen after short-term and long-term thermal oxidative aging

### 3.3 多次短期热氧老化及长期热氧老化再生后沥青的常规性能

多次短期热氧老化及长期热氧老化沥青再生后的常规性能指标如表 10 所示.

表 10 不同老化程度沥青再生后的常规性能指标

Tab.10 The conventional properties of recycling asphalt under different aging conditions

样本	针入度 /dmm	软化点 温度/°C	黏度 /(Pa·s)	10 °C延度 /cm	15 °C延度 /cm
基质沥青	77.3	46.6	0.35	30.9	>150
1 次 RTFOT 老化+13% 再生剂沥青	71.4	50.1	0.35	121	>150
2 次 RTFOT 老化+19% 再生剂沥青	73.6	49.1	0.34	187.5	>150
3 次 RTFOT 老化+23% 再生剂沥青	74.6	50.8	0.35	189	>150
1 次 RTFOT+ PAV 老化+24% 再生剂沥青	74.1	48.3	0.36	166	>150
2 次 RTFOT+ PAV 老化+32% 再生剂沥青	75.5	49.0	0.35	140.5	>150
3 次 RTFOT+ PAV 老化+43% 再生剂沥青	74.2	48.6	0.35	111.5	>150

由表 10 可以看出,随着短期热氧老化次数的增加,沥青再生所需要再生剂的掺量也显著提高.对比 1 次 RTFOT、2 次 RTFOT 和 3 次 RTFOT 再进行 PAV 老化前后最优再生剂掺量变化,可以发现 1 次 RTFOT 再进行 PAV 前后再生剂掺量相差 11%,2 次 RTFOT 再进行 PAV 前后再生剂掺量相差 13%,3 次 RTFOT 再进行 PAV 前后再生剂掺量相差 20%,说明同样是进行一次 PAV,短期热氧老化次数越多,再进行 PAV 老化,PAV 老化后的沥青较之 PAV 老化前的沥青,其老化程度增加的幅度更大.同时可以看出,所有再生后沥青的针入度均没有恢复到基质沥青的水平,但却都达到了长炼 70# 沥青针入度的规范规定要求;所有再生后的沥青软化点均高于基质沥青,说明在保证再生沥青与基质沥青黏度相同的条件下,润强 RA101 型再生剂并不能完全使老化沥青的软化点到达预期的要求,并且偏差无法被忽视,特别是 3 次 RTFOT 老化+23%再生剂沥青,其软化点高于基质沥青软化点 4℃;但对于延度,润强 RA101 型再生剂在保证黏度完全恢复的前提下,能够使得沥青的延度得到巨大的提升,各种再生沥青 15℃延度均大于 150 cm,而在 10℃延度上,再生后沥青的延度得到大大的提升,再生后沥青 10℃延度均大于 100 cm,而基质沥青 10℃延度却只有 30.9 cm.综上可以看出,通过黏度调和法选取再生剂的方法可将针入度和延度还原到原来水平甚至有所提高,但软化点却无法还原到基质沥青的水平且偏差无法被忽视.

### 3.4 多次短期热氧老化及长期热氧老化沥青再生后的流变性能

图 2 截取了沥青动态剪切流变实验 40~80℃温度扫描区段.由图 2 可知,各种老化强度再生后的沥青复数模量  $G^*$  与原基质沥青的复数模量  $G^*$  基本一致.但对比不同程度老化再生沥青相位角变化可知,再生后的沥青在常温下相位角  $\delta$  基本恢复到了原基质沥青的水平;但在高温区段特别是 70~80℃区段内,再生后沥青的相位角未恢复原基质沥青的水平,说明在高温时,再生沥青中的重组分比例较之于基质沥青还是偏多,其流动和变形的能力也弱于基质沥青,这也与沥青物理性能中得到的结论(再生后沥青的软化点无法恢复到基质沥青水平)吻合.

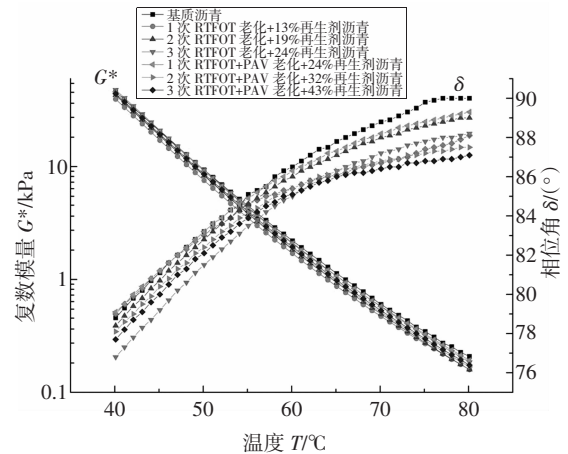


图 2 多次短期热氧老化及长期热氧老化沥青再生后的流变性能

Fig.2 The rheological properties of rejuvenated bitumen after short-term and long-term thermal oxidative aging

## 4 结论

1) 对长炼 70# 沥青进行 3 次 RTFOT 的老化强度与 1 次 RTFOT+PAV 的老化强度十分相近,可以认为 RTFOT 实验的热氧老化模式与 PAV 实验的热氧老化模式相同,实验室中可以通过改变 RTFOT+PAV 中 RTFOT 实验次数来控制沥青长期热氧老化的强度,且 3 次 RTFOT 实验的老化强度可以代表最为极端条件下的短期热氧老化强度.

2) 随着热氧老化强度的增加,沥青复数模量  $G^*$  的增量逐渐减小,当老化达到一定程度时,复数模量  $G^*$  趋于一个稳定值,对于长炼 70# 沥青,当老化强度高于 2 次 RTFOT+PAV 老化时,复数模量  $G^*$  达到最终平衡值,说明在老化强度达到 2 次 RTFOT+PAV 强度时沥青内部重组分已基本饱和.

3) 利用黏度调和法添加再生剂的老化沥青,通过黏度调和法选取再生剂的方法可将针入度和延度还原到原来水平甚至更高,其复数模量  $G^*$  基本恢复到原基质沥青的水平,但高温性能软化点和相位角  $\delta$  无法恢复到原基质沥青的水平.

## 参考文献

- [1] ZHANG H L, YU J Y, FENG Z G, *et al.* Effect of aging on the morphology of bitumen by atomic force microscopy [J]. *Journal of Microscopy*, 2012, 246(1):11—19.
- [2] MORIAN N, HAJJ E Y, GLOVER C J, *et al.* Oxidative aging of asphalt binders in hot mix asphalt mixtures [J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2207:107—116.
- [3] DEHOUCHE N, KACI M, MOKHTAR K A. Influence of thermo-oxidative aging on chemical composition and physical properties of polymer modified bitumens [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 26:350—356.

- [4] 刘芳,夏红山,艾军,等.基于氧化动态模型的沥青热氧老化性能预测[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(1):136—141.  
LIU F, XIA H S, AI J, *et al.* Prediction of asphalt thermal oxidative aging performance based on oxidation dynamic mode [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45 (1):136—141. (In Chinese)
- [5] 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,2007:40—41.  
LI P L. Study on the aging behavior and mechanism of paving asphalt [D]. Xi'an: College of Highway, Chang'an University, 2007: 40—41. (In Chinese)
- [6] 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.
- [7] 徐培俊,刘建飞,丛培良,等.基于室内模拟老化试验对沥青性能的研究[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(2):94—98.  
XU P J, LIU J F, CONG P L, *et al.* Research on asphalt performance based on the experiment of indoor simulating aging test [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, 35 (2):94—98. (In Chinese)
- [8] 王衡,王海.沥青混合料老化机理分析[J].山西建筑,2005,31(9):120—121.  
WANG H, WANG H. Analysis of aging mechanism of asphalt mixtures [J]. Shanxi Architecture, 2005, 31 (9): 120—121. (In Chinese)
- [9] CHURCHILL E V, AMIRKHANIAN S N, BURATI-JR J L. HP-GPC characterization of asphalt aging and selected properties [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1995, 7(1):41—49.
- [10] 路畅,黄晓明.沥青室内模拟老化性能研究[J].石油沥青,2009,23(4):14—18.  
LU C, HUANG X M. Study on laboratory simulation ageing property of asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2009, 23 (4): 14—18. (In Chinese)
- [11] 汪海年,高俊峰,赵欣,等.基于DSR和RV的生物沥青结合料流变特性研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(6):26—33.  
WANG H N, GAO J F, ZHAO X, *et al.* Rheological properties on bio-binder on DSR and RV [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(6):26—33. (In Chinese)
- [12] GHAVIBAZOO A, ABDELRAHMAN M. Effect of crumb rubber modification on short term aging susceptibility of asphalt binder [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 1996, 7(4):297—304.
- [13] QIN Q, SCHABRON J F, BOYSEN R B, *et al.* Field aging effect on chemistry and rheology of asphalt binders and rheological predictions for field aging [J]. Fuel, 2014, 121:86—94.
- [14] 应龙华,郑建龙,陈骁.沥青老化效应的试验研究[J].公路交通科技,2007,24(6):20—23.  
YING L H, ZHEN J L, CHEN X. Tests of the asphalt aging effect [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(6):20—23. (In Chinese)
- [15] 吕伟民.沥青再生原理与再生剂的技术要求[J].石油沥青,2007,21(6):1—6.  
LÜ W M. Recycling principle of asphalt and technical requirement of recycling agent [J]. Petroleum Asphalt, 2007, 21 (6): 1—6. (In Chinese)
- [16] 丁湛,栗培龙,刘建,等.用废橡胶制备沥青再生剂试验[J].安全与环境学报,2008,8(1):65—69.  
DING Z, LI P L, LIU J, *et al.* Experimental study on using waste rubber as the asphalt-recycling agent [J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(1):65—69. (In Chinese)
- [17] 王晓华.沥青路面再生剂研制及性能分析[J].公路交通科技,2006,23(9):166—168.  
WANG X H. Development and properties analysis of asphalt recycling agent [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(9):166—168. (In Chinese)
- [18] 江臣,黄晓明.高等级公路沥青路面再生剂的研制[J].江苏交通科技,2001,5:8—10.  
JIANG C, HUANG X M. The development of high grade highway asphalt pavement reagent [J]. Jiangsu Traffic Science and Technology, 2001, 5:8—10. (In Chinese)
- [19] SUN B, ZHOU X X. Diffusion and rheological properties of asphalt modified by bio-oil regenerant derived from waste wood [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(2):1—8.
- [20] TAHER B M, HASSAN B. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: a systematic review [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114(1):805—816.
- [21] 聂忆华,刘苹,周志刚,等.再生剂对沥青再生机理的影响研究[J].公路工程,2012,37:65—68.  
NIE Y H, LIU P, ZHOU Z G, *et al.* Research on asphalt recycling mechanism based on different recycling agents [J]. Highway Engineering, 2012, 37:65—68. (In Chinese)
- [22] 王歌.基于活化技术的高掺量橡胶沥青性能[D].重庆:重庆大学土木工程学院,2013:32—34.  
WANG G. The performance of high content asphalt rubber based on activation technique [D]. Chongqing: College of Civil Engineering, Chongqing University, 2013:32—34. (In Chinese)
- [23] 耿久光.沥青老化机理及再生技术研究[D].西安:长安大学公路学院,2009:87—92.  
GENG J G. Study on aging mechanism and recycling technique of asphalt [D]. Xi'an: College of Highway, Chang'an University, 2009:87—92. (In Chinese)
- [24] 刘军,杨彦海,李和平,等.利用复合添加剂再生沥青[J].公路,2004(1):99—101.  
LIU J, YANG Y H, LI H P, *et al.* Asphalt recycled by combined additives [J]. Highway, 2004(1):99—101. (In Chinese)
- [25] 周志刚,杨银培,张清平,等.再生剂对旧沥青的再生行为[J].交通运输工程学报,2011,11(6):10—16.  
ZHOU Z G, YANG Y P, ZHANG Q P, *et al.* Recycling behavior of recycling agent on aged asphalt [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6):10—16. (In Chinese)
- [26] 丁湛,栗培龙.再生沥青的黏度复合模型研究[J].新型建筑材料,2008,5:60—65.  
DING Z, LI P L. Research on viscosity composite model of recycling asphalt [J]. New Building Materials, 2008, 5:60—65. (In Chinese)
- [27] 栗培龙,马莉霞,冯振刚,等.基于Arrhenius方程的老化沥青流变特性[J].长安大学学报(自然科学版),2017,37(5):1—7.  
LI P L, MA L X, FENG Z G, *et al.* Rheological properties of aged asphalt based on Arrhenius equation [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(5):1—7. (In Chinese)
- [28] 高明,肖斌,廖克俭,等.彩色沥青老化性能研究[J].科学技术与工程,2005,5(7):401—405.  
GAO M, XIAO B, LIAO K J, *et al.* Study on the aging behavior of colored paving asphalt [J]. Science Technology and Engineer, 2005, 5(7):401—405. (In Chinese)
- [29] 胡建荣.沥青老化预估方程研究[J].公路工程,2013,38(1):103—105.  
HU J R. Research on nonlinear prediction of asphalt aging [J]. Highway Engineering, 2013, 38(1):103—105. (In Chinese)