

文章编号:1671-8879(2019)04-0009-08

# 煤直接液化残渣中的四氢呋喃可溶物 对沥青流变性能的影响

季 节<sup>1,2</sup>, 李 辉<sup>1</sup>, 许 鹰<sup>1,2</sup>, 石越峰<sup>3</sup>, 索 智<sup>1,2</sup>

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081)

**摘 要:**为了研究从煤直接液化残渣(direct coal liquefaction residue, DCLR)中萃取得到的四氢呋喃可溶物(tetrahydrofuran soluble, THFS)作为改性剂对沥青流变性能的影响, 选用 SK-90 作为基质沥青, 分别制备了不同掺量(与基质沥青质量比分别为 0%、4%、6%、8%、10%)的 THFS 改性沥青。通过应变扫描, 首先确定沥青的线黏弹范围, 其次在线黏弹范围内通过动态剪切流变(DSR)试验和弯曲蠕变劲度(BBR)试验得到车辙因子、疲劳因子、蠕变速率及蠕变劲度模量等, 最后, 结合 CAM 模型(一种在动态剪切作用下建立的可描述不同沥青材料宽温宽频主曲线的数学模型)物理参数的分析, 对 THFS 改性沥青的流变特性进行综合评价。研究表明:随着 THFS 掺量的提高, THFS 改性沥青的高温稳定性和感温性能越来越好, 但低温性能和疲劳性能受到一定的负面影响;按照时温等效原则, 复合出 THFS 改性沥青在 45 ℃下的复数模量主曲线, 并对其进行 CAM 模型拟合, 拟合判定系数  $R^2$  均在 0.999 以上。利用 CAM 模型中物理参数对 THFS 改性沥青的黏弹特性进行评价, 发现添加 THFS 后降低了沥青的温度敏感性, 使其对路表温度变化的适应性增强。综合考虑 THFS 改性沥青各项性能, 确定 THFS 最佳掺量应控制在 6% 以内。

**关键词:**道路工程; 四氢呋喃可溶物改性沥青; 流变性能; 温度扫描; 频率扫描; CAM 模型

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.04.002

## Rheological properties of asphalt binder modified by tetrahydrofuran soluble extracted from direct coal liquefaction residue

Ji Jie<sup>1,2</sup>, Li Hui<sup>1</sup>, Xu Ying<sup>1,2</sup>, Shi Yue-feng<sup>3</sup>, Suo Zhi<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** To research the rheological properties of tetrahydrofuran soluble (THFS)-extracted from direct coal liquefaction residue (DCLR), as a modified asphalt binder, asphalt binders with different tetrahydrofuran soluble (THFS) content (0%, 4%, 6%, 8% and 10% by weight of SK-90) were prepared. First, the linear viscoelastic range was determined through strain sweep,

收稿日期:2018-12-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51478028, 51778038);北京市百千万人才工程项目;

北京市属高校基本科研业务费专项基金项目(X18259)

作者简介:季 节(1972-),女,河南信阳人,教授,工学博士, E-mail: jijie@bucea.edu.cn.

and then, the test results of rutting factor, fatigue factor, creep rate and creep modulus were obtained within the linear viscoelastic range of the asphalt binder, using a dynamic shear rheometer (DSR) and bending beam rheometer (BBR) test. Finally, the physical parameters of a CAM model were integrated and used, which is a mathematical model for describing the wide temperature and wide frequency domains master curve of different asphalt materials under dynamic shearing, to analyze the rheological properties of the asphalt binder. The results show that with an increase in the THFS content, high temperature stability and temperature susceptibility improve, however, there is a decline in the low-temperature and fatigue performances. According to the time-temperature equivalence principle, a modulus master curve of the THFS modified asphalt was synthesized at 45 °C, and the CAM model was used to fit it, the fitting judgment coefficient  $R^2$  is found to be above 0.999. The viscoelastic properties of the THFS modified asphalt is evaluated using physical parameters in the CAM model. It is found that the temperature sensitivity of the modified asphalt decreases with an increase in THFS content, and it can be better adapted to changes in the pavement temperature. Therefore, the optimal THFS content is recommended to be within 6%, according to its comprehensive properties. 7 tabs, 10 figs, 25 refs.

**Key words:** road engineering; THFS modified asphalt; rheological property; temperature sweep; frequency sweep; CAM model

## 0 引言

中国煤炭资源丰富,但长久以来不合理利用对环境的污染破坏作用也日趋凸显出来。为了实现煤炭环保高效利用,充分合理发挥资源优势,采用煤直接液化工艺是实现煤炭绿色转型的有效技术手段之一,其中,以神华集团新工艺为代表的煤直接液化技术近年来取得快速发展<sup>[1]</sup>。

煤直接液化残渣(direct coal liquefaction residue, DCLR)是煤直接液化技术中不可避免产生的一种副产物,在煤直接液化工艺中通过减压蒸馏法最终得到的残留物即 DCLR 中存在着约 30% 的重质油、25% 的沥青烯类物质和其他未完全反应的杂质。Elliot 等研究表明, DCLR 中存在多稠环芳烃结构,具有较大的极性及热解特性,可开发为道路用沥青改性剂<sup>[2-8]</sup>。王寨霞等评价了将 DCLR 作为高等级路面沥青改性剂的使用效果,发现添加掺量 7% (质量分数,下同) DCLR 的改性沥青与添加 20% 湖沥青的 TLA 改性沥青具有相同的改性效果,其针入度满足 40~55 (0.1 mm) 的等级要求,且随着 DCLR 掺量的增加,软化点逐渐增大,而针入度和延度逐渐降低<sup>[9]</sup>。这主要是由于 DCLR 中沥青质含量较高,提高了沥青的高温性能,但 DCLR 中软组分较少,四氢呋喃不溶物占比高,同时也降低了改性沥青的低温抗裂性。季节等从美国公路战略

研究计划(SHRP)的 PG 体系和针入度分级体系研究不同掺量 DCLR 对沥青宏观性能的影响,指出 DCLR 的加入可以显著提高改性沥青及其混合料的高温性能,且在高温条件下其作用效果要优于 TLA 改性沥青,但也会降低其低温及疲劳特性,同时从微观角度探明了 DCLR 对基质沥青的改性属于物理改性<sup>[10-12]</sup>。何亮发现 DCLR 的不同掺配工艺及混合温度对制备出的改性沥青性能有较大影响,而且经过提纯之后的残渣去除了原 DCLR 中存在的一些无机矿物质,其性能与天然 TLA 沥青更为相似,对延度与软化点的影响更为显著<sup>[13]</sup>。

目前,针对 DCLR 改性沥青的常规路用性能研究已较为系统,但是研究多从传统的针入度分级体系入手来对 DCLR 改性沥青的路用性能进行评价,其测试方法存在过多的依赖性和经验性。季节等通过对不同胶粉掺量的 DCLR 改性沥青胶浆进行流变性相关试验,发现在相同温度条件下,加入的矿粉越多,沥青胶浆的高温稳定性越好,低温和疲劳性能越差<sup>[14]</sup>。尹艳平等通过动态剪切流变(DSR)和弯曲蠕变劲度(BBR)试验发现,SBS 可以改善沥青在不利温度条件下的流变性能<sup>[15]</sup>。Zhang 等利用 DSR 研究了短期和长期老化对苯乙烯-丁二烯(SBR)改性沥青流变性能的影响<sup>[16]</sup>。因此,有必要通过流变性试验对沥青在不同环境温度及动态荷载作用下的黏弹性规律进行分析<sup>[17]</sup>。

综上,本文拟采用四氢呋喃(tetrahydrofuran, THF)为萃取溶剂,利用索氏抽提器萃取得到 DCLR 中的四氢呋喃可溶物(tetrahydrofuran soluble, THFS)来制备改性沥青,以期改善沥青的低温性能,并对不同 THFS 掺量下改性沥青的流变性能进行研究。同时,为了更加准确真实模拟沥青路面所承受的实际复杂环境,全面评价 THFS 改性沥青在宽温宽频范围下的流变行为,本文基于时温等效原理采用 CAM 模型进行复数模量主曲线拟合,利用 CAM 模型中的物理参数来描述 THFS 改性沥青的黏弹特性,并进行频率敏感性分析,研究 THFS 改性沥青性能的变化规律,确定

THFS 最佳掺量,为今后 THFS 改性沥青在道路工程中的合理应用提供理论基础。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

选用基质沥青为 SK-90 沥青,其相关性能及组分见表 1。选用 DCLR 为神华煤直接液化工艺中产生的副产品,以四氢呋喃为萃取剂利用索氏抽提器进行萃取得到 THFS<sup>[18]</sup>,THFS 性能及组分见表 2,其测试方法与技术要求参见《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),并利用 THFS 作为改性剂制备 THFS 改性沥青,见图 1~图 3。

表 1 SK-90 的组分和性能

Tab. 1 Compositions and properties of SK-90

技术指标	针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	延度(10 ℃, 5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm	软化点/℃	SK-90 沥青组分含量			
				饱和分/%	芳香分/%	沥青质/%	胶质/%
试验结果	82	51.5	46.8	11.5	51.4	12.0	25.1
技术要求	80~100	≥20	≥45				

表 2 THFS 的组分和性能

Tab. 2 Compositions and properties of THFS

技术指标	针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	延度(10 ℃, 5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm	软化点/℃	THFS 沥青组分含量			
				饱和分/%	芳香分/%	沥青质/%	胶质/%
试验结果	6	2.6	150	0.3	3.1	65.9	30.7



图 1 煤直接液化残渣

Fig. 1 Direct liquefaction residue of coal

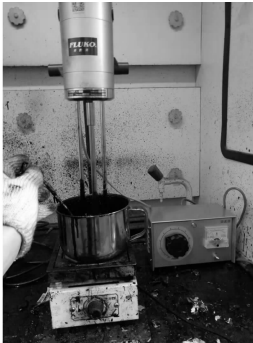


图 3 THFS 改性沥青的制备

Fig. 3 Preparation of THFS modified asphalt

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 应变扫描

沥青属于一种具有非线性应力、应变行为的黏弹性材料,为保证沥青形态结构在较高温度测试时不会被破坏,须确定其线黏弹范围<sup>[19]</sup>。考虑到后续对 THFS 改性沥青高温流变特性的研究,本文通过 AR1500ex 型 DSR 进行应变扫描试验,选定试验频率为 10 rad/s,试验温度为 45 ℃,施加小振幅正弦交变应力<sup>[20]</sup>。

#### 1.2.2 温度扫描

(1) 利用 DSR 对原样和旋转薄膜烘箱老化



图 2 索氏抽提器

Fig. 2 Soxhlet extractor

(RTFOT)阶段不同 THFS 掺量的改性沥青按照 AASHTO 规范进行温度扫描<sup>[21]</sup>,分析不同 THFS 掺量下改性沥青在原样和 RTFOT 阶段车辙因子与温度的关系,以评价沥青的高温流变性。表 3 为选取的试验参数。

表 3 试验参数(RTFOT)  
Tab. 3 Test parameters (RTFOT)

参数	试验 温度/℃	温度 间隔/℃	转子/ mm	厚度/ mm	频率/ (rad·s <sup>-1</sup> )	应变/ %
参数值	46~70	6	25	1	10	1

(2)评价 THFS 改性沥青的中温耐疲劳性能,利用 DSR 对 RTFOT+紫外老化(PAV)阶段后不同 THFS 掺量下改性沥青按照 AASHTO 规范进行温度扫描<sup>[21]</sup>,分析 RTFOT+PAV 阶段后不同 THFS 掺量下改性沥青的疲劳因子与温度的关系。表 4 为选取的试验参数。

表 4 试验参数(RTFOT+PAV)  
Tab. 4 Test parameters (RTFOT+PAV)

参数	试验 温度/℃	温度 间隔/℃	转子/ mm	厚度/ mm	频率/ (rad·s <sup>-1</sup> )
参数值	19~31	3	8	2	10

(3)评价 THFS 改性沥青的低温性能,通过 BBR 对 RTFOT+PAV 阶段后不同 THFS 掺量下改性沥青按照 AASHTO 规范中 TP1 进行试验<sup>[21-22]</sup>,试验温度分别为-6℃、-12℃、-18℃。分析 RTFOT+PAV 阶段后沥青 60 s 的蠕变速率  $m$  及蠕变劲度模量  $S$  随温度的变化。

1.2.3 频率扫描

利用 AR1500ex 型 DSR 对原样阶段不同 THFS 掺量下改性沥青进行动态频率扫描,分析不同温度、不同 THFS 掺量下改性沥青的复数模量  $G^*$  和相位角  $\delta$  随频率变化规律,根据时温等效原理<sup>[23]</sup>,合成某一特定温度下的  $G^*$  值主曲线,利用 CAM 模型进行 THFS 改性沥青频率敏感性研究。表 5 为选取的试验参数。

表 5 频率扫描试验参数  
Tab. 5 Test parameters of frequencies sweep

参数	试验 温度/℃	转子/ mm	厚度/ mm	频率 范围/Hz	应变/%
参数值	30、45、60	25	1	0.1~100	1

2 结果与讨论

2.1 应变扫描

美国 SHRP 中规定,沥青的应变值越大,则  $G^*$  值越小,若  $G^*$  的减小值在其初始值的 10%以内,则

可认为沥青没有超过其线黏弹性范围<sup>[24]</sup>。图 4 为不同 THFS 掺量下改性沥青的 DSR 应变扫描结果。

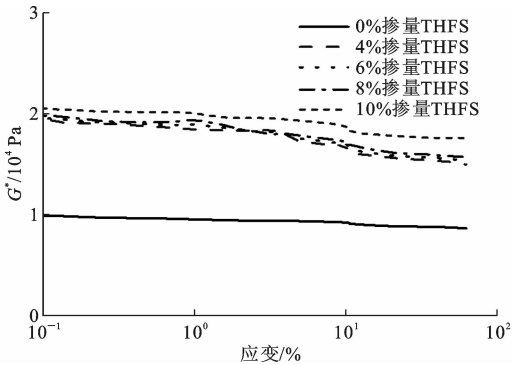


图 4 不同 THFS 掺量下改性沥青应变扫描结果  
Fig. 4 Strain scanning of modified asphalt binders with different THFS contents

由图 4 可知,0%、4%、6%、8%、10% THFS 掺量下沥青的线黏弹范围(应变)分别为 12.71%、3.20%、2.51%、1.99%和 1.59%,且 THFS 掺量越多,沥青的线黏弹性范围就越小。这是由于 THFS 本身沥青质含量高,软组分含量低,随着 THFS 的加入,使得沥青中原有的组分体系平衡被打破,进而表现出线黏弹范围缩小。

2.2 温度扫描

2.2.1 THFS 改性沥青的高温抗变形能力

图 5 为原样和 RTFOT 阶段不同 THFS 掺量下沥青的车辙因子  $G^*/\sin(\delta)$  值随温度的变化。从图 5 可得如下结果。

(1)无论是原样还是 RTFOT 阶段,当温度相同时,THFS 掺量越高, $G^*/\sin(\delta)$  值越大。这是因为 THFS 中存在的高沥青质属于复杂的芳香环物质,且含有多种杂原子,极性很强,即使在高温条件下黏度依然很大,THFS 加入打破了沥青中原有组分比例的动态平衡,使沥青的胶体结构发生改变,因此在路用性能上表现出优越的高温抗变形能力。

(2)比较同一掺量下原样和 RTFOT 阶段的 THFS 沥青发现,经 RTFOT 后,沥青  $G^*/\sin(\delta)$  值明显增大。这是因为经 RTFOT 后 THFS 改性沥青的烷基侧链发生一系列脱氢缩合反应,分子结构中存在的极性官能团之间也会产生缔合作用,进一步加剧了沥青体系中组分的转变,导致沥青体系整体刚度逐渐增大,抗车辙能力得到增强。结合 THFS 改性沥青这一优良特性,可以考虑将 THFS 改性沥青铺设于沥青路面的中面层或下面层。

Black 曲线不受荷载频率变化的影响,仅单独表征  $\delta$  和  $G^*$  的关系,图 6 为不同 THFS 掺量下改

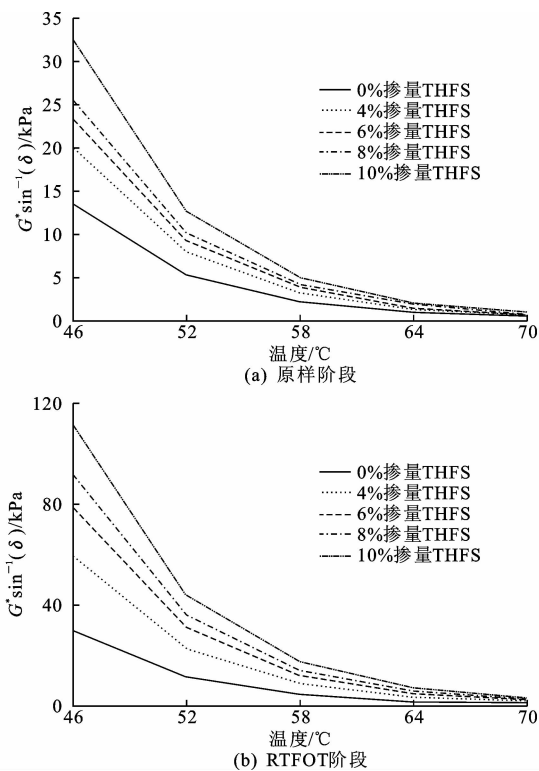


图 5  $G^* \sin^{-1}(\delta)$  值随温度的变化

Fig. 5 Changes of  $G^* \sin^{-1}(\delta)$  with temperature

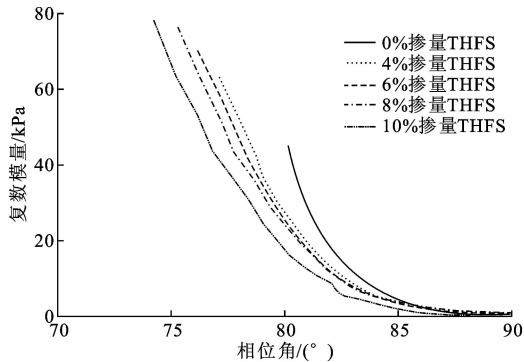


图 6 不同 THFS 掺量下改性沥青的 Black 曲线

Fig. 6 Black curves of modified asphalt binders with different THFS contents

性沥青的 Black 曲线。

由图 6 可得如下结果。

(1) 当  $G^*$  值相等时, THFS 掺量高的改性沥青  $\delta$  值最小, 说明 THFS 的加入使得沥青中的弹性成分增加, 即在承受相同行车荷载作用时, 路面的抗变形能力较强, 可有效防止车辙的发生。随着 THFS 掺量的不断降低, 其  $\delta$  值不断增大,  $G^*$  值不断降低, 说明此时 THFS 改性沥青的贮存模量减小, 损失模量增大, 沥青因为内部摩擦而以热量形式散失的能量增多, 降低了沥青的高温稳定性。

(2) 当  $\delta$  值相同时, 10% THFS 改性沥青拥有最

小的  $G^*$  值, 如果要使 10% THFS 改性沥青与基质沥青  $\delta$  值处于同一水平, 只有升高温度才可以降低  $G^*$  值, 这也说明掺入一定量的 THFS 可以改善沥青的高温稳定性。

### 2.2.2 THFS 改性沥青的中温耐疲劳能力

图 7 为不同 THFS 掺量下沥青  $G^* / \sin(\delta)$  随温度的变化。

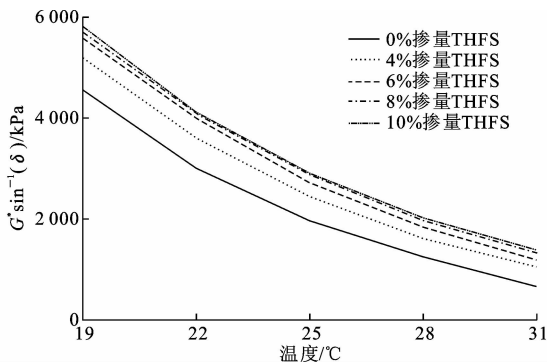


图 7  $G^* \sin^{-1}(\delta)$  值随温度的变化 (THFS 改性沥青)

Fig. 7 Changes of  $G^* \sin^{-1}(\delta)$  with temperature

(THFS modified asphalt)

由图 7 可知: 在同一温度下, 随着 THFS 掺量的增多, 沥青  $G^* / \sin(\delta)$  值逐渐增大。这是由于 THFS 中的软组分含量小, 而沥青质含量高, 使得 THFS 改性沥青整体比较脆硬, 在外界环境及行车荷载反复作用下, 沥青内部由于累积变形摩擦而不断损失能量, 最终产生疲劳开裂。

### 2.2.3 THFS 改性沥青的低温抗开裂性能

图 8 为 RTFOT+PAV 阶段后不同 THFS 掺量下改性沥青  $m$  值及  $S$  值随温度的变化。由图 8 可知: 当温度相同时, 随着 THFS 掺量的增加, 沥青的  $m$  值呈线性下降, 而  $S$  值呈线性上升。这说明沥青难以将其内部的应力在较短的时间内释放, 集中在沥青中的残余应力易导致路面发生低温开裂。同时, THFS 与基质沥青之间发生相互交联作用, 使二者联系更为紧密, 导致改性沥青体系硬度增大, 脆性增加, 降低了其应力松弛能力和低温性能。表 6 为  $m$  值及  $S$  值与 THFS 掺量的线性拟合情况, 可以看出, THFS 掺量越多,  $m$  值及  $S$  值的判定系数  $R^2$  越大, 说明 THFS 的掺量越高对沥青的低温性能影响越大。

故建议在沥青中掺入 THFS 时不宜过多, 同时考虑到 THFS 改性沥青较好的高温性能, 宜将其应用在年均气温偏高的地区, 即按气候分区划分应属于冬冷区 (极端最低温度大于  $-21.5^\circ\text{C}$ ) 或冬温区 (极端最低温度大于  $-9^\circ\text{C}$ ), 当 THFS 掺量达到

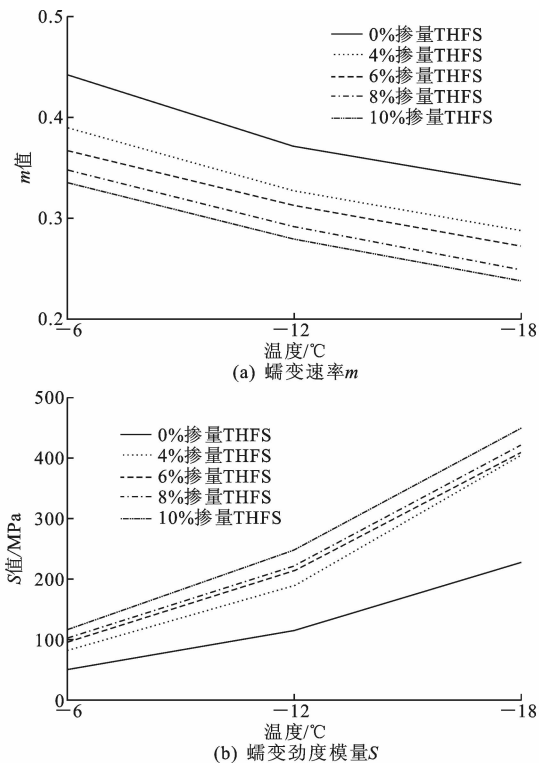


图 8 THFS 改性沥青的  $m$  值和  $S$  值随温度的变化  
Fig. 8 Changes of  $m$  and  $S$  values of THFS modified asphalt with temperature

表 6 THFS 改性沥青的  $m$  值及  $S$  值线性拟合结果

THFS 掺量/%	$m$ 值		$S$ 值	
	拟合公式	判定系数 $R^2$	拟合公式	判定系数 $R^2$
0	$m = 0.009\,07T + 0.49$	0.938 8	$S = -14.72T - 46.63$	0.952 3
4	$m = 0.008\,42T + 0.44$	0.966 2	$S = -26.93T - 98.53$	0.929 2
6	$m = 0.007\,86T + 0.41$	0.987 2	$S = -26.45T - 78.08$	0.960 1
8	$m = 0.008\,20T + 0.39$	0.988 1	$S = -26.52T - 70.42$	0.959 1
10	$m = 0.008\,11T + 0.38$	0.986 1	$S = -27.69T - 61.79$	0.970 7

注:  $T$  为温度。  
6%时对应的 PG 低温等级为  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 已满足在上述地区冬季极端气温下使用要求, 故推荐 THFS 的掺量可控制在 6% 以内, 以发挥出 THFS 改性沥青的最佳路用性能。

2.3 频率扫描

图 9 为不同 THFS 掺量下改性沥青在  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  及  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的  $G^*$  与频率、温度的空间三维

关系。

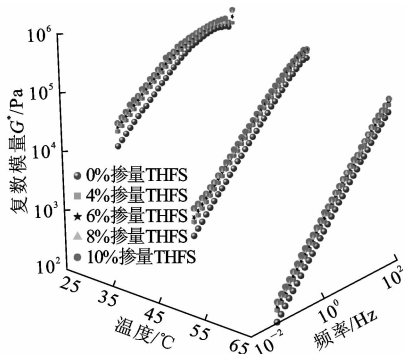


图 9 THFS 改性沥青  $G^*$  与频率、温度的关系  
Fig. 9 Relationships of  $G^*$  of THFS modified asphalt binders with frequency and temperature

由图 9 可知: 在  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  及  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下 THFS 改性沥青的  $G^*$  值均随频率的增大而增大, 这主要因为沥青属于线黏弹性体, 随着频率的提高, 荷载作用在沥青上的时间相对较短且沥青变形较小, 表现出  $G^*$  值增大。

CAM 模型是在 CA 模型基础上的进一步改进, 通过对动态模量主曲线的拟合, 分析 CAM 模型中物理参数的变化规律, 可以更加准确地进行材料流变特性分析及性能评价。

根据时温等效原理, 将  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  及  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下的复数模量曲线进行平移, 得到在宽频域下的复数模量主曲线, 利用 Origin 9.0 对该复数模量主曲线进行 CAM 模型的拟合, 具体计算如下

$$G^* = G_e^* + \frac{G_g^* - G_e^*}{[1 + (f_c/f')^n]^{m_e/n}}$$

式中:  $G_e^*$ 、 $G_g^*$  分别为平衡态和玻璃态复数模量;  $f'$  为试验频率;  $f_c$  为材料发生玻璃态转变的交叉频率, 其值越大说明沥青低温性能越好<sup>[25]</sup>;  $m_e$ 、 $n$  均为形状参数。

选取最大  $R^2$  和最小  $R^2$  的拟合结果为代表, 其拟合结果见图 10 及表 7。其中,  $R_G$  为材料的松弛谱, 即  $G_e^*$  和  $G_g^*$  在对数坐标系中与  $y$  轴相交的截距  $R_G$ , 其值越大对频率的敏感性越小。

由图 10 及表 7 可知: 随着掺入的 THFS 不断增多,  $G_g^*$  值也随之增大。表明在气温很低或者行车荷载频率很高时, 加入 THFS 后沥青拥有较强的抗变形性能。  $f_c$  值不断变小, 说明 THFS 掺量越多, 改性沥青的低温抗裂性受到影响较大, 在冬季气温骤降时易发生开裂。通过对比  $m_e$ 、 $n$ 、 $R_G$  可知, 10% 掺量 THFS 改性沥青的  $m_e$  值和  $n$  值最小, 其  $R_G$  值最大, 松弛谱相对较宽, 说明 THFS 的加入使

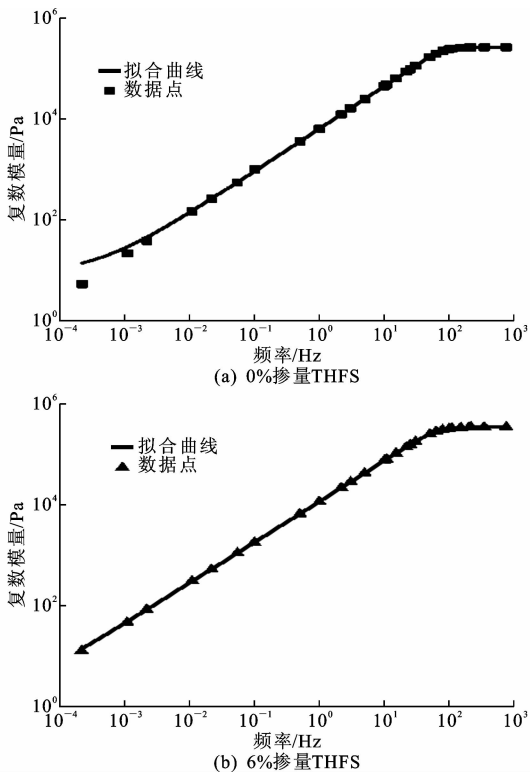


图 10 0%和 6% 掺量 THFS 沥青  $G^*$  主曲线拟合结果  
Fig. 10 Fitting results of  $G^*$  master curves of 0% and 6% THFS contents modified asphalt binders

表 7 CAM 模型参数拟合结果

Tab. 7 Parameters fitting results of CAM model

THFS 掺量/%	$G_R^*/10^5\text{ Pa}$	$f_c/\text{Hz}$	$m_e$	$n$	$R_G$	$R^2$
0	2.63	81.680	0.843	3.808	0.067	0.999 0
4	3.31	67.836	0.833	3.328	0.075	0.999 6
6	3.57	66.571	0.813	2.998	0.082	0.999 9
8	3.88	64.537	0.809	2.549	0.096	0.999 6
10	3.91	58.783	0.806	2.481	0.098	0.999 4

得沥青由弹性体向黏性体的转变逐渐平稳,在一定程度上降低了 THFS 改性沥青对荷载频率的敏感程度。根据时温等效理论,高频荷载对应低温,低频荷载对应高温,则充分说明,通过掺加一定量的 THFS 可以降低沥青路面对外界温度变化的敏感性,保持其良好的路用性能。

3 结 语

(1)THFS 掺量越高,沥青的高温抗变形能力越好,但低温抗开裂和中温抗疲劳性能则受到损伤,这是由于 THFS 中本身的沥青质占主要地位,当将其掺入到沥青中后,打破了原有沥青中的动态平衡,使得整个沥青表现的比较刚硬。故可考虑将 THFS 改性沥青应用在年平均气温偏高的地区,铺设在路

面结构的中、下面层,可以很好地抑制车辙等病害,保持其具有良好的高温稳定性。

(2)THFS 改性沥青的高、低温及疲劳性能受 THFS 掺量的影响很大,如果过量添加 THFS 会导致 THFS 改性沥青的适用性受限。为了更好发挥其改性效果,THFS 掺量不应超过 6%。

(3)利用 CAM 模型分析可知,THFS 掺量越高,沥青的高温抗变形能力越好,但低温抗开裂性能越差,同时,THFS 改性沥青可较好地适应路面温度的变化,具有良好的感温性能。

(4)本文对 THFS 改性沥青的流变性能进行了评价,但仍需要从微观层面对其改性机理进行深入分析,为 THFS 改性沥青大规模生产应用提供指导。

参考文献:

References:

[ 1 ] LIU Zhen-yu,SHI Shi-dong,LI Yong-wang. Coal liquefaction technologies development in China and challenges in chemical reaction engineering[J]. Chemical Engineering Science,2010,65(1):12-17.

[ 2 ] ELLIOT M A. Chemistry of coal utilization (second supplementary volume) [M]. New York: John Wiley & Sons,Inc. ,1981.

[ 3 ] ZHENG Li-zhen,WANG Xiao-hua,ZHANG Tie-shuan, et al. Research progress in utilizations of coal liquefaction residues[C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment. New York:IEEE,2011:1627-1630.

[ 4 ] PATEL P,FIATO R. China and South Africa pursue coal liquefaction [J]. MRS Bulletin, 2012, 37 ( 3 ): 204-205.

[ 5 ] 赖世熠,陈学连,盛 英. 一种用于从煤直接液化残渣中分离沥青烯、前沥青烯和重质油的离子液复合萃取剂:中国,201010614927[P]. 2011-05-04.  
LAI Shi-liu,CHEN Xue-lian,SHENG Ying. An ionic liquid extractant used to separate asphaltenes, asphaltenes and heavy oils from direct coal liquefaction residue:China,201010614927[P]. 2011-05-04.

[ 6 ] ADACHI Y, NAKAMIZ M. Chemical structure of pyridine soluble matter of coal liquefaction residue [J]. Journal of the Japan Institute of Energy,1993,72 (10):930-934.

[ 7 ] SUGANO M,IKEMIZU R,MASHIMO K. Effects of the oxidation pretreatment with hydrogen peroxide on the hydrogenolysis reactivity of the coal liquefaction residue[J]. Fuel Processing Technology,2002,77(1):

- 67-73.
- [8] RATHBONE R F, HOWER J C, DERBYSHIRE F J. The application of fluorescence microscopy to coal-derived characterization [J]. *Fuel*, 1993, 72 (8): 1177-1185.
- [9] 王寨霞, 杨建丽, 刘振宇. 煤直接液化残渣对道路沥青改性作用的初步评价[J]. *燃料化学学报*, 2007, 35 (1): 109-112.
- WANG Zhai-xia, YANG Jian-li, LIU Zhen-yu. Preliminary evaluation of direct coal liquefaction residue modification effect on road asphalt [J]. *Journal Fuel Chemistry and Technology*, 2007, 35 (1): 109-112.
- [10] 季 节, 石越峰, 索 智, 等. DCLR 与 TLA 共混改性沥青的性能对比[J]. *燃料化学学报*, 2015, 43 (9): 1061-1067.
- JI Jie, SHI Yue-feng, SUO Zhi, et al. Comparison on properties of modified asphalt blended with DCLR and TLA [J]. *Journal Fuel Chemistry and Technology*, 2015, 43 (9): 1061-1067.
- [11] JI Jie, ZHAO Yong-shang, XU Shi-fa. Study on properties of the blends with direct coal liquefaction residue and asphalt [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 488: 316-321.
- [12] JI Jie, YAO Hui, YANG Xu, et al. Performance analysis of direct coal liquefaction residue (DCLR) and Trinidad Lake Asphalt (TLA) for the purpose of modifying tradition asphalt [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2016, 41 (10): 3983-3993.
- [13] 何 亮. 煤液化残渣复合改性沥青制备及其性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- HE Liang. Research on preparation and properties of direct coal liquefaction residue modified asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [14] 季 节, 石越峰, 索 智, 等. DCLR 与 TLA 改性沥青胶浆的流变性能对比[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2015, 31 (6): 1041-1048.
- JI Jie, SHI Yue-feng, SUO Zhi, et al. Rheological performance comparison of the DCLR and the TLA modified asphalt mortar [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2015, 31 (6): 1041-1048.
- [15] 尹艳平, 陈华鑫, 宋莉芳, 等. SBS/HON 复合改性沥青流变性能[J]. *北京工业大学学报*, 2017, 43 (9): 1405-1409.
- YIN Yan-ping, CHEN Hua-xin, SONG Li-fang, et al. Rheological properties of SBS/HON composite modified asphalt [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43 (9): 1405-1409.
- [16] ZHANG F, YU J, WU S. Influence of ageing on rheology of SBR/sulfur-modified asphalts [J]. *Polymer Engineering & Science*, 2012, 52 (1): 71-79.
- [17] 樊 亮, 孔祥利, 林江涛, 等. 基于流变测试技术的沥青评价方法研究进展[J]. *材料导报*, 2012, 26 (1): 123-128.
- FAN Liang, KONG Xiang-li, LIN Jiang-tao, et al. Review of asphalt evaluation methods based on rheological measure technology [J]. *Materials Review*, 2012, 26 (1): 123-128.
- [18] 季 节, 石越峰, 索 智, 等. THFS 改性沥青制备工艺的优化设计及性能评价[J]. *北京建筑大学学报*, 2016, 32 (3): 55-60.
- JI Jie, SHI Yue-feng, SUO Zhi, et al. Optimization design of preparation process for THFS modified asphalt binder and its performance evaluation [J]. *Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2016, 32 (3): 55-60.
- [19] 杨 娥. 掺量对 TLA 混合沥青的高温性能影响和应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- YANG E. Research on the content effects on the high temperature performance and application of TLA mixed asphalt [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [20] 何立平. 基于 DMA 方法的橡胶沥青黏弹特性和高温性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- HE Li-ping. Reserch on the viscoelastic characteritistic and high temperature properties based DMA of rubber asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [21] AASHTO TP1—1998, Standard test method for determining flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer BBR 2000 edition [S].
- [22] AASHTO TP5—1998, Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer DSR 2000 edition [S].
- [23] 董炎明, 张海良. 高分子科学简明教材[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- DONG Yan-ming, ZHANG Hai-liang. Simple teaching material for polymer science [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [24] 谭忆秋, 郭 猛, 曹丽萍. 常用改性剂对沥青黏弹特性的影响[J]. *中国公路学报*, 2013, 26 (4): 7-15.
- TAN Yi-qiu, GUO Meng, CAO Li-ping. Effects of common modifiers on viscoelastic properties of asphalt [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26 (4): 7-15.
- [25] ZENG M, BAHIA H U, ZHAI H, et al. Rheological modeling of modified asphalt binders and mixtures (with discussion) [J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2001, 70: 8-35.