

文章编号:1671-8879(2015)03-0046-07

# 特立尼达湖沥青中沥青材料特性

李 平, 高建平, 查旭东, 赵 翹, 成帅龙

(长沙理工大学 特殊环境道路工程湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:**近年来特立尼达湖沥青(TLA)的应用日趋广泛,但对其作用机理的研究涉及较少。采用分离抽提方法得到 TLA 中沥青类部分(ETLA),利用扫描电镜、组分、红外光谱、热分析和动态剪切流变仪(DSR)试验,研究其微观组成和使用性能。研究表明:ETLA 沥青质含量远超过 2 种基质沥青,芳香分和饱和分含量正相反;ETLA 热吸收峰明显小于基质沥青,热重数据也显示其热稳定性要优于基质沥青;ETLA 抗车辙能力远强于 2 种基质沥青,随角速度  $\omega$  增加优势更明显, $G^*/\sin(\delta)$  随温度的升高呈幂函数形式减小;ETLA 对温度的敏感性也最强,而剪应力  $\tau$  的影响程度较小。

**关键词:**道路工程;特立尼达湖沥青;微观性质;高温性能

中图分类号:U415.522

文献标志码:A

## Research on the character of asphalt material of TLA

LI Ping, GAO Jian-ping, ZHA Xu-dong, ZHAO Qiao, CHENG Shuai-long

(Key Laboratory of Special Environment Road Engineering of Hunan Province,

Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:** Trinidad Lake asphalt (TLA) was widely used in recent years, but few researches have been done on its mechanism. The ETLA was obtained by extraction method, and the microscopic character and performance were studied by scanning electron microscopy, components, infrared spectroscopy, thermal analysis and DSR test. The results show that asphalt content of ETLA is far more than two kinds of base asphalt, but the content of aromatics and saturated is opposite. Heat absorption peak of ETLA is significantly less than base asphalt, and the thermal stability is also better. It is found that the rutting resistance of ETLA is better than two kinds of base asphalt, and the advantage is more obvious with the increasing of  $\omega$ . Meanwhile the value of  $G^*/\sin(\delta)$  is decreased in accordance with power function with temperature increasing; ETLA has the strongest sensitivity to temperature, but the influence of  $\tau$  is small on the  $G^*/\sin(\delta)$ . 7 tabs, 11 figs, 12 refs.

**Key words:** road engineering; Trinidad lake asphalt; microscopic character; high temperature performance

收稿日期:2014-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51078045);特殊环境道路工程湖南省重点实验室重点项目(kfj130401);

广西道路结构与材料重点实验室培育基地开放课题(2013gxjgclkf-002);

长安大学道路结构与材料交通行业重点实验室开放基金项目(2014G1502011)

作者简介:李 平(1978-),男,山东潍坊人,副教授,工学博士,E-mail:lipingchd@126.com。

## 0 引言

特立尼达湖沥青(Trinidad lake asphalt, TLA)产自委内瑞拉附近的特立尼达湖,是一种天然沥青,也是良好的沥青改性剂,将其掺入沥青后,能有效改善高温性能、抗老化性能等<sup>[1]</sup>。由于成分的类型性,其添加不存在离析,且不需要复杂的加工,简单搅拌即可完成。故已大量应用于桥面铺装、沥青路面、机场道面等工程施工中,近年来在中国得到较多使用和研究。

Yilmaz 等对比了 TLA、伊朗天然沥青、美国天然沥青和 SBS 对沥青的改性效果,发现 60% 掺量的 TLA 能使得沥青具有最显著的劲度、抗疲劳强度和抗拉伸强度<sup>[2]</sup>;张洋等对比了基质沥青、SBS 改性沥青和橡胶沥青中掺加 TLA 的效果,发现其对橡胶沥青的适用性更好,性能超过了单独 5% SBS 改性沥青,同时在性价比上也具有优势<sup>[3]</sup>;杨娥等对 TLA 改性沥青进行了频率扫描试验,计算了宽温宽频范围时的动态剪切模量主曲线,发现随掺量增加,模量对其敏感性逐渐降低<sup>[4]</sup>;Maharaj 等研究了废胶粉对 TLA 改性沥青的影响,发现废胶粉的添加使得沥青模量增大,但在掺量为 5% 时达到平台期,同时相位角也会增大,但掺量超过 2% 时反而开始下降<sup>[5]</sup>;Maharaj 还初步分析了 TLA 中灰分和沥青材料的性质,发现其沥青质含量远高于普通沥青,官能团的组成也具有独特性,且类似于高岭石的灰分,对沥青改性也起到了重要作用<sup>[6]</sup>;莫石秀通过燃烧法获取 TLA 中灰分,测试发现其具有较小的粒径和较大的比表面积,同时存在灰分沉淀的可能,因而不宜采用常规指标进行分析<sup>[7]</sup>;王娜测试了 TLA 中沥青质材料的组分,以及灰分的比表面积,分析了灰分的粘附效果<sup>[8]</sup>;查旭东等从 TLA 中萃取了灰分,发现灰分对基质沥青的增劲效果明显优于普通矿粉,并分析了粉胶比和温度对灰分胶浆性能的影响<sup>[9]</sup>。

现有研究多着眼于 TLA 应用方法,包括沥青性能、混合料设计及施工等,对于 TLA 改性机理的研究相对较少,尤其对占据近 70% 的 TLA 中沥青材料(ETLA)的研究鲜有涉及,而如此大的比重,势必是 TLA 使用效果的主要影响因素,对其进行深入研究,将有助于把握其改性机理,并为使用提供理论基础。为此,本文采用离心机分离抽提的方法<sup>[10]</sup>,萃取 ETLA,对其微观组成和使用性能进行系统研究。

## 1 试样制备

TLA 中含有大约 30% 的灰分,如何将其有效剔

除,获得 ETLA 是本文研究的前提。为此,采用三氯乙烯溶解 TLA,利用离心机实现 ETLA 与灰分的分离,在 4 000 r/min 下作用 25 min 为一个分离周期,连续进行 3 次分离,再将分离的溶液用旋转蒸发器将沥青溶液分离得到沥青和三氯乙烯。通过试验测定其灰分含量大约为 1.3%,基本满足试验要求。

根据现有成果,ETLA 组成与基质沥青有较大的相似性,同时 TLA 多直接掺入基质沥青,故本文选用了 ESSO 和 TPK 的 70 号沥青,以便与 ETLA 性质进行对比,也可探究 TLA 改性机理,2 种沥青技术指标检测符合规范要求。

## 2 TLA 中沥青材料微观性质研究

### 2.1 扫描电镜

为宏观对比不同沥青试样的区别,选择了 TLA、ETLA 和 ESSO 分布进行了扫描电镜试验,获取的沥青试样微观表面形态照片,如图 1 所示。

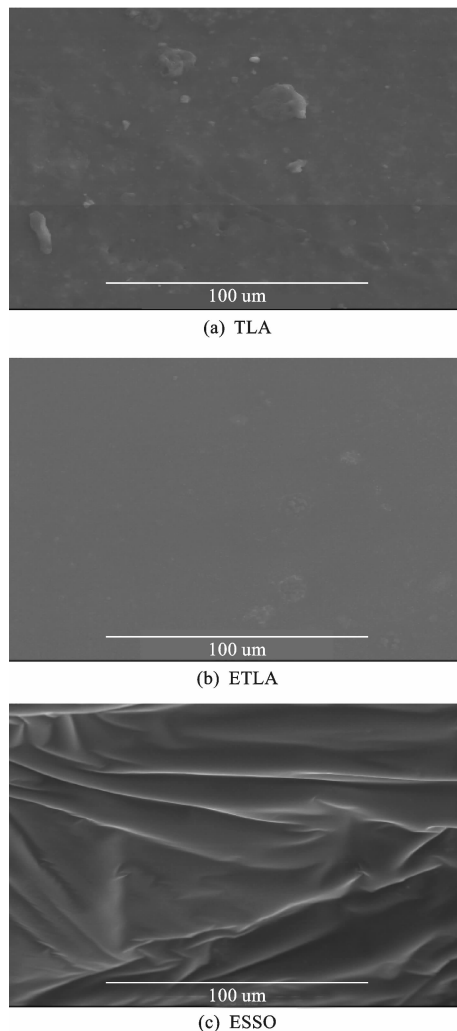


图1 沥青扫描电镜图像(500倍)

Fig.1 SEM picture of asphalt(500 times)

由图 1 可知:①TLA 中由于含有大量灰分,故试样表面明显呈凹凸不平状,且可直观看到大量灰分均匀分布,同时灰分粒径也有较大区别;②ETLA 的表面较为光滑,但可直观看到仍有少量灰分颗粒残余,含量很少,且粒径与 TLA 中灰分相比较小,但与 TLA 中灰分不同的是,此处残留的灰分分布并不均匀,这应是提纯过程中离心力作用的结果;③ESSO 沥青中由于没有其他矿质材料,故其表面光滑、细腻、界面清晰,至于其表面的褶皱,应是试样制备过程中受到的影响。

2.2 组分试验

沥青是石油中质量最重的部分,也是相对分子质量最大,组成及结构最为复杂的部分。只能根据沥青在不同有机溶剂中的选择性溶解或在不同吸附剂上的选择性吸附,将沥青分离为几个化学性质比较接近而又与其胶体结构性性质、流变学性质和路用性质有一定联系的几个组,称之为组分<sup>[11-12]</sup>,各沥青四组分含量如表 1 所示。

表 1 各沥青四组分含量  
Tab.1 Component of asphalts

组 分	ETLA	TPK	ESSO
沥青质 As/%	33.96	11.32	9.51
饱和分 S/%	11.41	20.13	19.90
芳香分 At/%	21.84	44.01	39.50
胶质 R/%	29.89	24.54	31.09
灰分/%	1.20	0	0
沥青质+胶质/%	64.85	35.86	40.60
饱和分+芳香分/%	35.25	64.14	59.40

(1)TPK 和 ESSO 这 2 种基质沥青的组分是有区别的,除芳香分外,3 种组分的含量均有不同。为便于对比,采用硬质组分(沥青质+胶质)和软质沥青(芳香分+饱和分)来进行分析。可知 TPK 沥青的硬质组分含量低于 ESSO,而硬质组分的增多,势必造成沥青整体凝胶状态的增强,也就表现为宏观粘度和稠度增大了,这与 2 种沥青软化点和粘度测试结果是一致的(表 2)。

表 2 基质沥青技术指标  
Tab.2 Technical index of asphalt

指 标	TPK	ESSO
当量软化点/℃	50.6	48.5
软化点/℃	51.2	47.2
粘度(135 ℃)/(Pa·s)	0.37	0.32

(2)ETLA 与常规的基质沥青组分间有明显差异,尤其是其沥青质含量远高于普通沥青,可达到 3 倍以上,同时芳香分也较基质沥青含量降低约一半。

而从硬质组分与软质组分上分析,ETLA 硬质组分含量比基质沥青高约 20%。由此可知,ETLA 势必具有更高的粘度,更强的抗老化能力。

2.3 红外光谱试验

红外光谱(IR)试验是基于不同物质对不同波长红外辐射吸收程度不同的特点来确定材料组成。试验时,当不同波长的红外辐射依次照射试样时,由于部分辐射能被样品选择吸收而减弱,故形成红外吸收光谱。试验时采用甲苯作为溶剂,为提高试验精度,测试时应注意几点事项:加热制备好的试样使甲苯彻底挥发;把吸收池放入仪器中测试,结束后需对结果进行修正。测试得到的各沥青试样红外光谱图见图 2~下页图 5。由图 4、图 5 可得出如下结论。

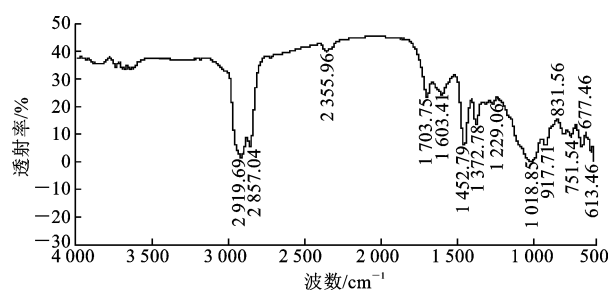


图 2 TLA 红外光谱  
Fig. 2 IR of TLA

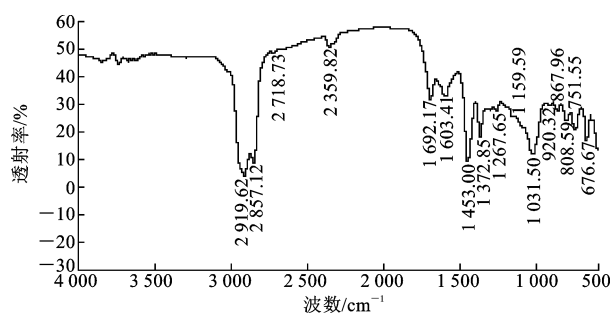


图 3 ETLA 红外光谱  
Fig. 3 IR of ETLA

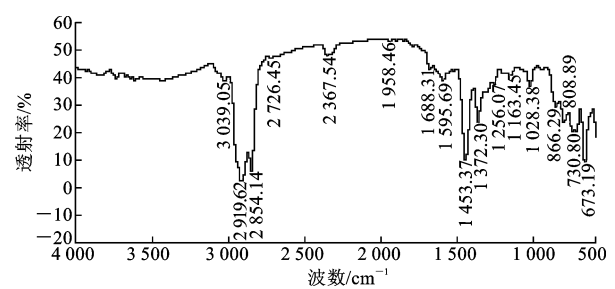


图 4 ESSO 红外光谱  
Fig. 4 IR of ESSO

(1)TLA 和 ETLA 的峰数量小于对比的 ESSO 沥青和 TPK 沥青,峰数量的多少从侧面反映了

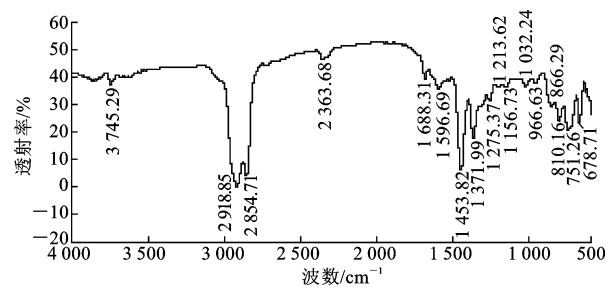


图 5 TPK 红外光谱

Fig. 5 IR of TPK

TLA 以及 ETLA 官能团的多少,这个特点较好地解释了它们宏观性能出现差别的原因。对于 TLA 和 ETLA 的差别主要体现在在  $1\,018\text{ cm}^{-1}$  波峰附近,此处波峰较宽,这主要与 TLA 中含灰分有关,因为灰分中含有大量 Si—O 键。这与  $\text{SiO}_2$  的红外光谱相对应,可以说主要由于二者的灰分含量差距巨大引起的。

(2)TLA 与 ESSO 沥青和 TPK 沥青在官能团上的差别主要体现在部分含—P,—N 等的官能团,因此具有较强的抗老化性能,而且 TLA 的吸收峰比较少,这说明其形成年代久远,各个官能团之间的反应较为充分,而 2 种基质沥青吸收峰比较多,主要因其为化工沥青,各个官能团之间反应不充分,不饱和和键较多。

### 2.4 热分析试验

对不同沥青试样进行了差示扫描量热(DSC)和热重(TG)分析,通过温度与材料物理性质的关系分析,研究沥青材料组成特征,测试结果见图 6~图 8。

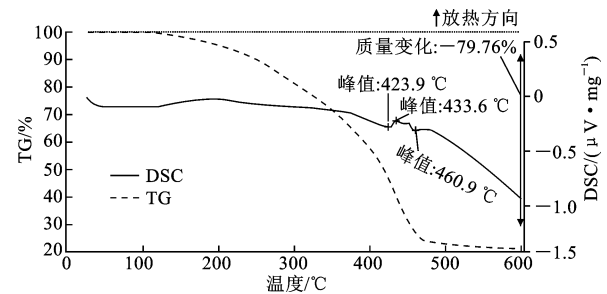


图 6 ETLA 热分析结果

Fig. 6 DSC result of ETLA

(1)当温度升到  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  之后,2 种基质沥青内部发生了明显的热交换,可分为 2 个吸热阶段和 2 个放热阶段。在第 1 个吸热阶段( $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),主要是沥青中的油、蜡以及多环芳烃发生缩聚反应,形成相对分子质量更大的稠环芳烃,同时伴随小分子析出,引起较大的热量吸收;在第 2 个吸热阶段( $480\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),发生许多复杂的分解和缩聚反

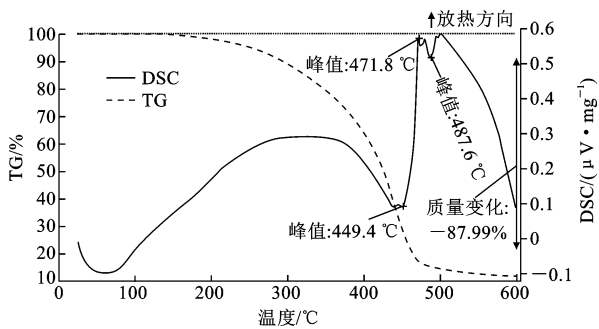


图 7 TPK 热分析结果

Fig. 7 DSC result of TPK

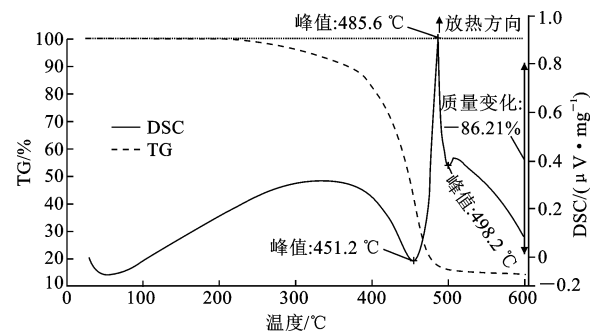


图 8 ESSO 热分析结果

Fig. 8 DSC result of ESSO

应,是芳香烃高聚物缩聚分子叠合造成的热交换。第 1 个放热阶段( $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),主要是沥青的物理状态变化引起的;在第 2 个放热阶段( $450\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 480\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),主要是由于沥青各个成分急剧发生化学变化生成新物质放热所致。

(2)ETLA 对热的敏感性较低,说明其化学性稳定。其吸热放热主要集中在  $424\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $461\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近,有 2 个较小的吸热阶段,而且温度变化比较小。对于  $436\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近有个较小的放热阶段。

(3)4 种沥青的热重(TG)曲线线型相似,不像 DSC 曲线那样差别大。为定量分析曲线信息,采用图 9 方式计算该曲线不同特征点温度:A 为起始分解温度;B 为外推起始温度;C 为外推终止温度;D 为到达最大失重点的温度。一般来说,C 温度高、失

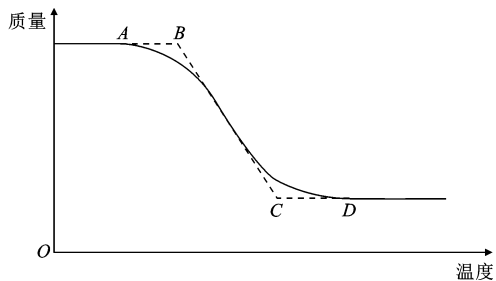


图 9 热重曲线

Fig. 9 TG curve

重百分比小的物质的热稳定性较好。计算结果见表 3。可以发现 ETLA 热稳定性优于 2 种基质沥青,尤其是起始分解温度和质量变化 2 个指标。

表 3 沥青热重曲线数据  
Tab. 3 Information of TG curve of asphalt

沥青类型	A/℃	B/℃	C/℃	D/℃	质量变化/%
ETLA	135	310	485	565	79.76
ESSO	150	310	465	570	86.21
TPK	155	310	470	580	87.99

3 TLA 中沥青材料高温性能

鉴于使用 TLA 的主要目的是改善沥青高温性能,同时制备 ETLA 过程繁琐,试样质量少,故本文仅利用动态剪切流变仪(DSR)测试了沥青高温抗变形能力,同时为系统把握沥青材料高温性能,改变测试时的角速度、温度和剪应力,分别研究不同因素下沥青性能的变化规律。

3.1 标准模式下沥青高温性能

按照 Superpave 规范要求,在 10 rad/s 时对不同沥青试样进行 DSR 试验,结果见表 4。

表 4 64 ℃ 时沥青 DSR 试验结果  
Tab. 4 DSR result of asphalt in 64 ℃

沥青类型	抗车辙因子 $G^*/\sin(\delta)/\text{kPa}$	相位角 $\delta/(\text{°})$
TLA	850.00	68.1
ETLA	85.50	72.6
TPK	2.85	77.2
ESSO	1.73	87.8

由表 4 可得出如下结论。

(1)不同沥青的高温性能差异明显。ETLA 的  $G^*/\sin(\delta)$  远大于 2 种基质沥青,差距可达到近 30 倍,因而基质沥青中掺入类似组成的 ETLA,必然会有效改善其高温抗变形能力。同时 TLA 的  $G^*/\sin(\delta)$  更明显大于 ETLA,这是由于大量灰分存在的缘故,通过体积增强和吸附吸收作用,进一步增强了 ETLA 的高温性能。2 种基质沥青的  $G^*/\sin(\delta)$  也存在较大差异,其中 TPK 沥青  $G^*/\sin(\delta)$  较 ESSO 沥青高 65%,该规律与表 2 中常规指标的结果是一致的,但  $G^*/\sin(\delta)$  的差异程度要大于常规指标。

(2)不同沥青的粘弹性质也不相同。4 种沥青  $\delta$  的排序为  $\delta_{\text{ESSO}} > \delta_{\text{TPK}} > \delta_{\text{ETLA}} > \delta_{\text{TLA}}$ ,由于  $\delta$  表示沥青在某一下弹性与粘性部分的比例,其值越大,则弹性部分占据的比例就越小,故 ETLA 不仅整体抗变形能力要强于基质沥青,其抗力中可恢复变形的弹性部分比例也要大于基质沥青。同时 ESSO 沥青

的  $\delta$  也要远大于 TPK。

3.2 沥青高温性能对角速度的敏感性

角速度  $\omega$  对 DSR 测试结果有显著影响,其可简单视为车速的影响,因而 Superpave 规范中对于慢速交通等特殊交通形式,相应调整了沥青 PG 分级的要求,这也从侧面证明了  $\omega$  影响的显著性。为此调整 4 个  $\omega$  范围,进行了 DSR 试验,结果见表 5。

表 5 不同  $\omega$  时沥青 DSR 试验结果  
Tab. 5 DSR result of asphalt in different  $\omega$

参数	不同 $\omega(\text{rad/s})$ 的抗车辙因子 $G^*/\sin(\delta)/\text{kPa}$				不同 $\omega(\text{rad/s})$ 的相位角 $\delta/(\text{°})$			
	1.00	2.86	6.43	10.00	1.00	2.86	6.43	10.00
ETLA	12.30	30.50	60.70	88.20	79.30	76.20	74.00	72.80
TPK	0.33	0.89	1.86	2.76	86.00	82.20	79.30	78.10
ESSO	0.17	0.49	1.11	1.71	89.80	89.30	88.60	88.00

由表 5 可得出如下结论。

(1)随着  $\omega$  的减小,各沥青  $G^*/\sin(\delta)$  均减小,而  $\delta$  增大。这是由于  $\omega$  的减小,可视为车辆速度的降低,必然造成对沥青变形作用程度的加重,也就体现为宏观上  $G^*/\sin(\delta)$  的减小,以及沥青变形中弹性成分的降低。

(2)3 种沥青的  $G^*/\sin(\delta)$  与  $\omega$  间呈良好的线性关系(图 10),即均随  $\omega$  增大而线性增加。同时不同沥青  $G^*/\sin(\delta)$  对  $\omega$  的敏感程度不同,其中 ETLA 对  $\omega$  的变化最为敏感,而 ESSO 的敏感性最低。鉴于不同沥青的  $G^*/\sin(\delta)$  与  $\omega$  敏感程度的不同,可知目前 Superpave 规范中限定相同的车速调整幅度是不适宜的。而沥青的  $\delta$  与  $\omega$  则呈对数关系(下页图 11),虽然 ETLA 对  $\omega$  的敏感程度强于 2 种基质沥青,但三者的区别并不大。

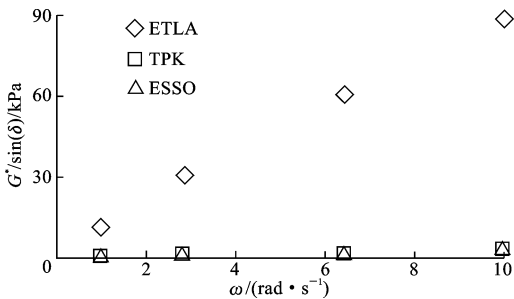


图 10 沥青  $G^*/\sin(\delta)$  与  $\omega$  的关系  
Fig. 10 Relationship of  $G^*/\sin(\delta)$  and  $\omega$

3.3 沥青高温性能对温度敏感性

温度对沥青性能有显著影响,为此,变化 3 种测试温度,分析温度对沥青高温性能的作用程度,测试数据见下页表 6。

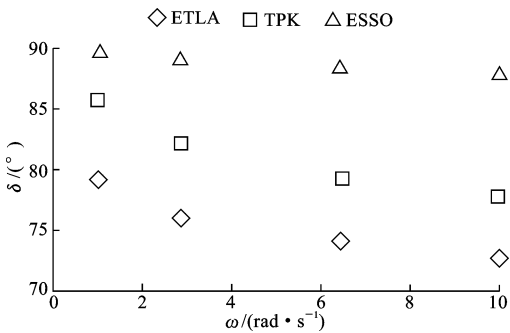


图 11 沥青  $\delta$  与  $\omega$  的关系  
Fig. 11 Relationship of  $\delta$  and  $\omega$   
表 6 不同温度时沥青的  $G^*/\sin(\delta)$

温度/℃	64	70	74
ETLA/kPa	84.20	40.70	18.60
TPK/kPa	2.85	1.42	1.09
ESSO/kPa	1.73	0.90	0.56

随着测试温度的升高,沥青  $G^*/\sin(\delta)$  下降,高温性能降低。这是由于温度升高后,软沥青组分的溶解和分散能力增强,沥青溶胶程度得以提升的缘故。

各沥青  $G^*/\sin(\delta)$  与温度间可用幂函数回归,相关系数均超过 0.98。即在本试验涉及的温度范围内,初始阶段  $G^*/\sin(\delta)$  随温度升高迅速下降,之后下降趋势逐渐减缓。且 3 种沥青相比,ETLA 的  $G^*/\sin(\delta)$  对温度最敏感,而 ESSO 相对敏感度最低。

3.4 沥青高温性能对剪应力敏感性

剪应力  $\tau$  是 DSR 测试中可调的参数之一,对该指标的考虑,可简单与路面强度或车辆荷载建立联系,因而研究不同  $\tau$  时沥青高温性能的变化是有重要意义的,为此测试了不同  $\tau$  时沥青的  $G^*/\sin(\delta)$ , 结果见表 7。

表 7 不同  $\tau$  时沥青的  $G^*/\sin(\delta)$   
Tab. 7  $G^*/\sin(\delta)$  of asphalt in different  $\tau$  kPa

$\tau$	0.03	0.12	0.48	1.92
ETLA	88.20	85.50	84.20	83.80
TPK	2.87	2.85	2.83	2.76
ESSO	1.77	1.73	1.73	1.71

随着  $\tau$  的增加,各沥青  $G^*/\sin(\delta)$  均呈下降趋势,但变化幅度相对  $\omega$  和温度要小得多。且  $G^*/\sin(\delta)$  与  $\tau$  间也可用幂函数回归,即在测试范围内, $\tau$  增加初期  $G^*/\sin(\delta)$  下降幅度较为明显,之后  $G^*/\sin(\delta)$  的变化则明显趋缓,同时 ETLA 的  $G^*/\sin(\delta)$  对  $\tau$  的敏感程度也要强于 2 种基质沥青。

4 结 语

(1)由扫描电镜照片发现,采用本文方法得到的 ETLA 中仍含有少量灰分,且分布并不均匀。ETLA 中沥青质含量远超过 2 种对比基质沥青,芳香分含量正相反,同时 2 种基质沥青的组分也有较大区别。

(2)红外光谱试验表明 ETLA 中的官能团稍少于基质沥青,而热分析试验发现 ETLA 的热吸收峰明显小于基质沥青,同时热重数据也显示其热稳定性要优于基质沥青。

(3)DSR 试验显示 ETLA 高温性能是 2 种基质沥青的近 30 倍。各沥青  $G^*/\sin(\delta)$  随  $\omega$  增加而线性增大,且 ETLA 对  $\omega$  的敏感程度明显强于 2 种基质沥青。同时  $G^*/\sin(\delta)$  随温度的升高呈幂函数形式减小,即升温初期的下降程度更明显,且 ETLA 对温度的敏感性也最强。 $\tau$  的增加虽能减小  $G^*/\sin(\delta)$ , 但影响程度较小。

参考文献:  
References:

[ 1 ] Ackbarali D S, Maharaj R. The viscoelastic properties of trinidad lake asphalt-used engine oil blends[J]. International Journal of Applied Chemistry, 2011, 7(1): 1-8.

[ 2 ] Yilmaz M S, Celoglu E M. Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44(3): 533-540.

[ 3 ] 张 洋, 卢志超. 湖沥青改性沥青对混合料的适应性研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2012(10): 47-49.

ZHANG Yang, LU Zhi-chao. Research on adaptability of TLA on asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Applied Technology, 2012(10): 47-49. (in Chinese)

[ 4 ] 杨 娥, 张肖宁. TLA 改性沥青的动态剪切模量及主曲线分析[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(2): 45-48.

YANG E, ZHANG Xiao-ning. Research on TLA modified asphalt dynamic shear modulus and its master curves[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(2): 45-48. (in Chinese)

[ 5 ] Maharaj R, George S A, Russell S, et al. The influence of recycled tyre rubber on the rheological properties of Trinidad lake asphalt and Refinery bitumen[J]. In-

- ternational Journal of Applied Chemistry, 2009, 5(3): 181-191.
- [6] Maharaj R. A comparison of the composition and rheology of Trinidad lake asphalt and Trinidad petroleum bitumen[J]. International Journal of Applied Chemistry, 2009, 5(3): 169-179.
- [7] 莫石秀. 湖沥青改性沥青作用机理及混合料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- MO Shi-xiu. Study on Trinidad lake asphalt modified asphalt action mechanism and mixture performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [8] 王娜. TLA 天然沥青的改性机理及其应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- WANG Na. The research of TLA on modified mechanism and application[J]. Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [9] 查旭东, 王彬, 季文广. TLA 灰分对沥青胶浆高温性能的影响[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(4): 1-5.
- ZHA Xu-dong, WANG Bin, JI Wen-guang. Influence of fill of TLA on high temperature performance of asphalt mortar[J]. Journal of Transportation Science & Engineering, 2009, 25(4): 1-5. (in Chinese)
- [10] Hirato T, Murayamma M, Sasaki H. Development of high stability hot mix asphalt concrete with hybrid binder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6): 424-431.
- [11] 郭寅川, 申爱琴, 张金荣, 等. 沥青路面粘层材料性能的试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(6): 16-20.
- GUO Yin-chuan, SHEN Ai-qin, ZHANG Jin-rong, et al. Experimental research of tack coat materials' performance on asphalt pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(6): 16-20. (in Chinese)
- [12] 陈璟, 袁万杰, 郝培文. 微观指标对沥青热稳定性能的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(1): 12-15, 25.
- CHEN Jing, YUAN Wan-jie, HAO Pei-wen. Influence of microcosmic index on thermal stability performance of asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(1): 12-15, 25. (in Chinese)
- (上接第 39 页)
- [5] 郭红兵, 陈拴发. 沥青路面热-荷载耦合应力数值分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 32(2): 15-19.
- GUO Hong-bing, CHEN Shuan-fa. Numerical analysis of the temperature-load coupling stress for asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 32(2): 15-19. (in Chinese)
- [6] 安建国. 大粒径沥青混合料配合比设计及施工工艺监控[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(12): 70-74.
- AN Jian-guo. Design of mix proportion for large stone asphalt mixture and supervision construction technology[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(12): 70-74. (in Chinese)
- [7] 郭红兵. 大粒径沥青碎石缓解层沥青路面结构分析[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- GUO Hong-bing. Study on structural analysis for large stone asphalt mixes of asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [8] 付其林. 开级配大粒径沥青碎石组成设计参数与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- FU Qi-lin. Research on composition design parameters and method of open-graded large stone asphalt mixes [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [9] 郭红兵, 陈拴发. OLSM 沥青路面反射裂缝扩展路径的数值模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(7): 72-76.
- GUO Hong-bing, CHEN Shuan-fa. Numerical simulation of the reflective crack propagation path for open-graded large stone asphalt mixes[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(7): 72-76. (in Chinese)
- [10] 裴建中, 常明丰, 陈拴发, 等. 沥青混合料间接拉伸试验的数值模拟[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(5): 6-10.
- PEI Jian-zhong, CHANG Ming-feng, CHEN Shuan-fa, et al. Numerical simulation of indirect tensile test for asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(5): 6-10. (in Chinese)
- [11] 常明丰. 多孔沥青路面微观力学特性与空隙衰变行为研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- CHANG Ming-feng. Study on the micromechanical characteristic and void reduction behavior for porous asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [12] 常明丰. 基于颗粒物质力学的沥青混合料细观特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- CHANG Ming-feng. Study on mesoscopic characteristic of asphalt mixture based on particulate matter mechanics [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [13] 郭红兵. 设置开级配大粒径沥青碎石裂缝缓解层的沥青路面抗裂机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- GUO Hong-bing. Research on anti-cracking mechanism of open-graded large stone asphalt mixes of asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [14] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.