

## 生物沥青、岩沥青及复合改性沥青常规性能 与流变性能的相关性

曾梦澜<sup>†</sup>,夏颖林,祝文强,周杰  
(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘要:**为探讨生物沥青改性沥青和岩沥青改性沥青及其复合改性沥青常规性能和流变性能的相关性,对不同掺量的3种改性沥青进行常规使用性能和流变性能试验,并从高温性能、低温性能、可使用温度范围和感温性能等方面进行相关性分析.试验结果与分析表明:3种改性沥青的软化点和当量软化点之间相关性较好,且当量软化点与高温连续分级温度呈显著线性相关;生物沥青改性沥青的当量脆点与低温连续分级温度呈线性相关,另外两种改性沥青则为复杂抛物线关系,应结合两种性能指标综合评价沥青低温性能;3种改性沥青的当量软化点与当量脆点之差和高低温连续分级温度之差之间呈显著线性相关,对沥青可使用温度范围的评价具有一致性;3种改性沥青的针入度指数和复数模量指数之间相关性较好,对感温性能的评价具有一致性.可以通过常规性能指标来合理预估流变性能.

**关键词:**生物沥青;岩沥青;使用性能;相关性

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Correlation between Conventional Performance and Rheological Performance of Bio-asphalt, Rock Asphalt and Composite Modified Asphalt

ZENG Menglan<sup>†</sup>, XIA Yinglin, ZHU Wenqiang, ZHOU Jie  
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to explore the correlation of the evaluation index between the conventional and rheological performance of bio-asphalt modified asphalt, rock asphalt modifier asphalt and its composite modified asphalt binder, the conventional and rheological properties of three kinds of modified asphalts were tested. The correlation analysis was conducted from the aspects of high temperature property, low temperature property, service temperature range and temperature susceptibility. The test results and analyses indicate that the correlation between the softening point and the equivalent softening point of the three kinds of modified asphalt is conspicuous, and the equivalent softening point has a significant linear correlation with the high continuous grading temperature. The linear correlation between the bio-asphalt modified asphalt's equivalent breaking point and low continuous grading temperature of bio-asphalt modified asphalt is prominent, while the other two kinds of modified asphalts show complex parabola relation. It is necessary to evaluate the low temperature performance of asphalt comprehensively by combining these

\* 收稿日期:2018-08-01

基金项目:湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201110), Advance and Innovation Project in Science and Technology of Department of Transportation of Hunan Province (201110)

作者简介:曾梦澜(1954—),男,湖南汉寿人,湖南大学教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: menglanzeng@hnu.edu.cn

two indexes. The difference between the equivalent softening point and equivalent breaking point has a significant linear correlation with that between high continuous grading temperature minus and low continuous grading temperature, and the evaluation of service temperature range of asphalt is consistent. The correlation between penetration index and complex modulus index of three kinds of modified asphalts is noteworthy, and the evaluation of temperature susceptibility performance is consistent. The rheological performance can be estimated reasonably through the conventional performance index.

**Key words:** bio-asphalt; rock asphalt; performance; correlation

在我国沥青路面的发展进程中,通过不断自我摸索和吸收借鉴国外性能分级标准,形成了以针入度为分级标准的评价体系,并综合考虑了道路实际工作中气候分区情况和沥青对温度的敏感程度<sup>[1]</sup>.然而,作为经验型评价体系,存在以下缺陷:1)未考虑长期老化,试验温度区间狭窄,与实际道路工作环境不符;2)试验结果离散性较大,精度不高;3)同一针入度等级的沥青在使用性能方面可能存在巨大差异;4)大部分经验指标物理意义模糊,难以与沥青具体使用性能明确相关<sup>[2-4]</sup>.另一方面,基于沥青流变性能提出的 PG (Performance Grade) 性能分级体系则具有切合沥青实际工作环境、精度高、各指标与使用性能直接相关的优点,但试验仪器价格高,实际推广难度较大.

沥青的常规性能与流变性能均为材料性能,二者之间应存在某一联系.若可用沥青常规性能来预估流变性能,则能在节省大量人力物力的同时,通过结合两种指标提升沥青评价的准确性.但沥青为粘弹性材料,流变性能相当复杂,其变形兼有弹性体瞬时响应的可恢复变形和粘性流体耗散能量的永久变形<sup>[5]</sup>.此外,受沥青品种、制备工艺、内部结构等多种因素影响,难以建立完全统一的常规性能与流变性能的相关性.

生物沥青为新型绿色可再生材料,具有来源广泛、原材料储备丰富、环保可再生和价格低廉等显著优势.采用其替代石油沥青能缓解石油资源逐步枯竭的趋势,同时降低道路成本,但掺入过量的生物沥青会显著降低沥青高温性能<sup>[6]</sup>.如何推广使用生物沥青受到越来越多国内外学者的关注.岩沥青为天然沥青,常作为改性剂掺入基质沥青中,改性技术较为成熟,能显著提高沥青高温性能、水稳性能和抗老化性能,国内外均已有的研究应用<sup>[7]</sup>.在生物沥青改性沥青中掺入岩沥青能提升沥青高温性能,降低生物沥

青的不利影响,从而大幅提高生物沥青掺量.

本研究通过对给定的生物沥青、岩沥青及复合改性沥青进行常规使用性能试验和流变性能试验,从高温性能、低温性能、可使用温度范围和感温性能等方面综合探讨了3种改性沥青的常规使用性能指标和流变性能指标的相关性,为建立沥青常规性能与流变性能统一关系提供参考依据,并为应用生物沥青、岩沥青及复合改性沥青奠定基础.

## 1 试验材料

### 1.1 原材料

本研究中生物沥青为蓖麻油生物沥青,由蓖麻子提炼蓖麻油后剩余脚料加工而成,在常温下呈固态,色泽暗淡,外观与普通沥青相似.岩沥青为产于欧洲巴尔干半岛的天然岩沥青,经破碎处理后呈黑色颗粒状.生物沥青和岩沥青的技术指标分别见表1和表2.

表1 生物沥青技术标准

Tab.1 Technical properties of bio-asphalt

技术指标	三氯乙烯溶解度/%	15℃密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	闪点/℃
试验结果	87.49	0.99	240

表2 岩沥青技术指标

Tab.2 Technical properties of rock asphalt %

技术指标	三氯乙烯溶解度	灰分	含水率	粒度范围		
				4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
技术要求	—	≤15	≤2	100	95~100	>80
试验结果	80.2	9.6	0.42	100	100	86

其中,生物沥青改性沥青采用50号基质沥青,岩沥青改性沥青和复合改性沥青采用70号基质沥

青. 两种基质沥青的技术标准<sup>[8]</sup>见表 3.

表 3 基质沥青技术标准

Tab.3 Technical properties of matrix asphalt

技术指标	25 °C 针入度 /(0.1 mm)	针入度 指数 PI	软化点 /°C	15 °C延 度/cm	闪点 /°C	溶解度 /%	15 °C密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
50 号 基质 沥青	43.7	-0.66	52.8	>100	270	99.6	1.040
70 号 基质 沥青	71.8	-1.3	46.3	>100	260	99.9	1.014

## 1.2 改性沥青的制备

将一定比例的生物沥青直接掺入到 50 号基质沥青中, 在 105 °C 条件下以 1 500 r/min 转速搅拌均匀后, 即可制得生物沥青占沥青总量分别为 0%、5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 的生物沥青改性沥青. 将岩沥青与 70 号基质沥青按比例混合并在烘箱中发育一段时间后, 在 150~160 °C 条件下以 3 000 r/min 转速剪切均匀后, 即可制得岩沥青占沥青总量分别为 0%、5%、10%、15%、20% 和 25% 的岩沥青改性沥青. 复合改性沥青则是先将岩沥青掺入到 70 号基质沥青中, 在 160 °C 条件下搅拌均匀并剪切发育后, 再掺入生物沥青在 145 °C 的条件下以 1 500 r/min 转速剪切均匀后制得.

针入度作为我国现行规范中沥青性能评价的核心指标, 可以直观反映沥青粘稠度的大小<sup>[9]</sup>, 故通过保证不同掺量的复合改性沥青 25 °C 针入度基本一致, 即复合改性沥青标号不变, 从而确定复合改性剂掺量分别为 0%、10%、20%、30%、40% 和 50% 的复合改性沥青中生物沥青和岩沥青各自所占比例. 掺配比例见表 4.

另外, 按与改性沥青相同的制备工序对基质沥青进行处理, 获得对比用零掺量试样.

表 4 不同掺量下岩沥青与生物沥青比例

Tab.4 The result of penetration tests of bio-asphalt and rock composite modified asphalt

复合改性剂 掺量/%	岩沥青:生物 沥青(质量分数)	25 °C针入度 /(0.1 mm)
0	—	62.1
10	1:9(0.111)	64.5
20	4:16(0.25)	61.0
30	8:22(0.363)	63.2
40	12:28(0.428)	63.6
50	17:33(0.515)	60.6

## 2 实验室试验与性能指标

### 2.1 改性沥青的性能试验

根据 JTG E20—2011 《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》, 分别进行沥青针入度、软化点、弯曲蠕变劲度和流变性质试验<sup>[8]</sup>. 按照试验规程 T0604—2011 进行针入度试验; 按照试验规程 T0606—2011 进行软化点试验; 按照试验规程 T06027—2011 进行弯曲蠕变劲度试验; 按照试验规程 T06028—2011 进行流变性质试验.

### 2.2 常规性能指标

由于我国沥青蜡含量普遍偏高, 软化点难以准确评价沥青高温性能, 故采用当量软化点  $T_{800}$  和当量脆点  $T_{1.2}$  作为常规性能指标.  $T_{800}$  为针入度外延至 800(0.1 mm) 时所对应的温度,  $T_{1.2}$  则为针入度外延至 1.2(0.1 mm) 时所对应的温度.

另外, 根据不同温度下沥青的针入度值, 按式(1)和式(2)回归计算得到 PI 值.

$$PI = \frac{20 - 50A_{\lg pen}}{1 + 50A_{\lg pen}} \quad (1)$$

$$\lg P = K + A_{\lg pen} \times T \quad (2)$$

式中:  $T$  为针入度试验温度, °C;  $\lg P$  为针入度的对数;  $K$  为回归方程常数项  $a$ ;  $A_{\lg pen}$  为回归方程常数项  $b$ .

### 2.3 流变性能指标

基于沥青流变性能提出的沥青 PG 性能分级体系以高温连续分级温度 HT 和低温连续分级温度 LT 来直观反映沥青在道路合理服务的温度上限值和下限值<sup>[10-11]</sup>. 其中, 按式(3)计算 RTFO 老化前后沥青的车辙因子  $G^*/\sin \delta$  所对应的分级温度, 取温度较低值作为 HT; 按式(3)和式(4)分别计算在低温弯曲梁流变试验中, PAV 老化后沥青的蠕变劲度  $S$  和劲度变化率  $m$  值各自对应的分级温度, 取温度较高值作为 LT<sup>[12-13]</sup>.

$$T_C = T_1 + \left( \frac{\lg P_S - \lg P_1}{\lg P_2 - \lg P_1} \right) (T_2 - T_1) \quad (3)$$

$$T_C = T_1 + \left( \frac{P_S - P_1}{P_2 - P_1} \right) (T_2 - T_1) \quad (4)$$

式中:  $T_C$  为连续分级温度, °C;  $T_1$ 、 $T_2$  为试验温度, 且  $T_2$  比  $T_1$  高 6 °C;  $P_S$ , 原状沥青  $P_S = 1.0$ , RTFO 老化沥青  $P_S = 2.2$ ,  $S$  对应的  $P_S = 300$ ,  $m$  对应的  $P_S = 0.3$ ;  $P_1$ 、 $P_2$  分别为试验温度  $T_1$ 、 $T_2$  所对应的不同指标值.

### 3 试验结果分析

#### 3.1 高温性能相关性分析

软化点和当量软化点  $T_{800}$  是我国沥青高温性能评价的重要指标. 对 3 种改性沥青的软化点与  $T_{800}$  分别进行相关性分析, 如图 1 所示. 生物沥青改性沥青和岩沥青改性沥青的软化点与当量软化点均呈明显的正相关, 线性相关系数  $R^2$  分别达到了 0.993 9 和 0.982 6. 复合改性沥青的相关性相对较低, 相关系数  $R^2$  为 0.759 2, 这主要是由于复合改性剂的掺量较大, 软化点的增长速度略大于  $T_{800}$  的增长速度, 软化点和  $T_{800}$  准确度不够, 不适用于高掺量的改性沥青.

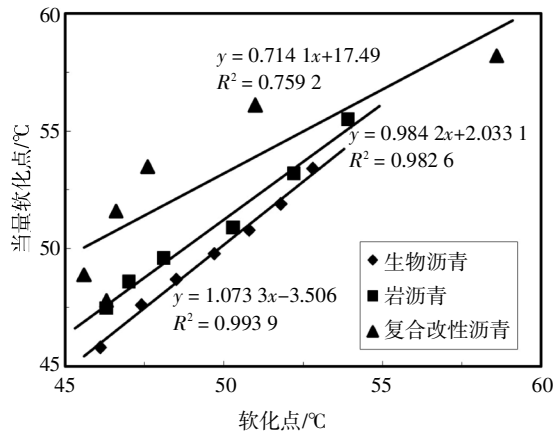


图 1 软化点与当量软化点的关系

Fig.1 Comparison between softening point and equivalent softening point

通常软化点越高的沥青, 当量软化点和 PG 高温连续分级温度也越高, 高温性能越好. 对 3 种改性沥青的当量软化点  $T_{800}$  和 PG 高温连续分级温度 HT 进行相关性分析, 如图 2 所示. 3 种改性沥青的 HT 均随着  $T_{800}$  的增大而有不同幅度的提升, 生物沥青、岩沥青和复合改性沥青的  $T_{800}$  与 HT 的相关系数  $R^2$  分别高达 0.995 1、0.987 6 和 0.960 7, 这表明 3 种改性沥青的常规试验指标  $T_{800}$  与流变性能指标 HT 呈显著线性相关. 另外, 软化点与  $T_{800}$  也具有一定的相关性, 表明软化点、 $T_{800}$  和 HT 对 3 种改性沥青高温性能的评价基本一致, 可以通过软化点和  $T_{800}$  来合理预估 PG 高温连续分级温度 HT.

#### 3.2 低温性能相关性分析

我国目前通常采用延度指标并结合当量脆点  $T_{1.2}$  对沥青的低温性能进行分析. 由于生物沥青和岩

沥青均含较多杂质, 在沥青拉伸过程中易造成应力集中, 影响延度试验结果<sup>[14-15]</sup>, 故本研究采用当量脆点  $T_{1.2}$  与 PG 低温连续分级温度 LT 进行相关性分析. 当量脆点  $T_{1.2}$  和 LT 的相关性分析见图 3.

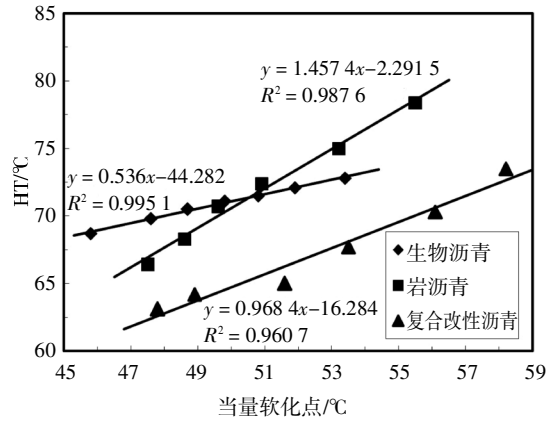


图 2 当量软化点与 HT 的关系

Fig.2 Comparison between equivalent softening point and HT

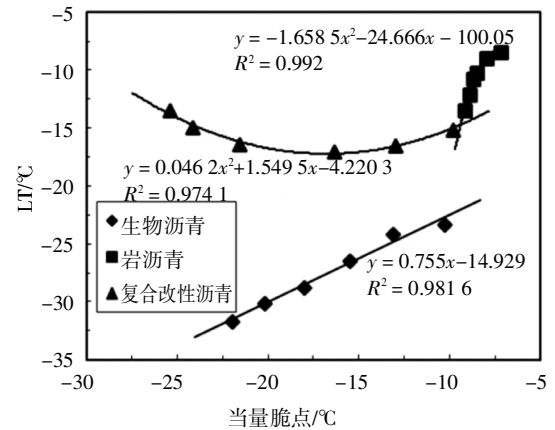


图 3 当量脆点与 LT 的关系

Fig.3 Comparison between equivalent breaking point and LT

由图 3 可知, 随着当量脆点  $T_{1.2}$  的增大, 生物沥青改性沥青和岩沥青改性沥青的 PG 低温连续分级温度 LT 均有不同幅度的增大, 复合改性沥青则呈先减小后增大的趋势. 其中, 生物沥青改性沥青的  $T_{1.2}$  与 LT 之间呈线性相关, 相关系数  $R^2$  为 0.981 6, 岩沥青改性沥青和复合改性沥青的  $T_{1.2}$  与 LT 则呈二次相关, 相关系数  $R^2$  分别为 0.992 和 0.974 1. 表明  $T_{1.2}$  和 LT 对生物沥青改性沥青低温性能的评价具有一致性, 可以通过当量脆点  $T_{1.2}$  来预估生物沥青改性沥青的 PG 低温连续分级温度 LT. 而岩沥青改性沥青的  $T_{1.2}$  变化速度大于 LT 的变化速度, 复合改性沥青的  $T_{1.2}$  与 LT 则为更复杂的抛物线关系, 难以建立统一的线性模型. 对岩沥青改性沥青和复合

改性沥青的低温性能,应结合常规性能和流变性能指标,并参考沥青混合料相关试验结果来综合评价。

### 3.3 可使用温度范围相关性分析

沥青当量软化点  $T_{800}$  与当量脆点  $T_{1.2}$  之差  $T_{800}-T_{1.2}$  与 PG 高低温连续分级温度之差 HT-LT 类似,均表示沥青的可使用温度范围,即实际道路中沥青能正常工作的温度的上下限差值。对 3 种改性沥青的温差  $T_{800}-T_{1.2}$  与 HT-LT 进行相关性分析,结果如图 4 所示。由图 4 可知,3 种改性沥青的温差  $T_{800}-T_{1.2}$  与 HT-LT 呈正相关,温差 HT-LT 随着  $T_{800}-T_{1.2}$  的增大而增大。生物沥青、岩沥青和复合改性沥青的温差  $T_{800}-T_{1.2}$  与 HT-LT 拟合后的线性相关系数  $R^2$  分别高达 0.976 1、0.977 7 和 0.978 9。表明尽管 3 种改性沥青的  $T_{1.2}$  与 LT 的相关性较复杂,但常规指标温差  $T_{800}-T_{1.2}$  与流变指标温差 HT-LT 相关性显著,均为线性相关模型,二者在表征沥青可使用温度范围上基本一致。

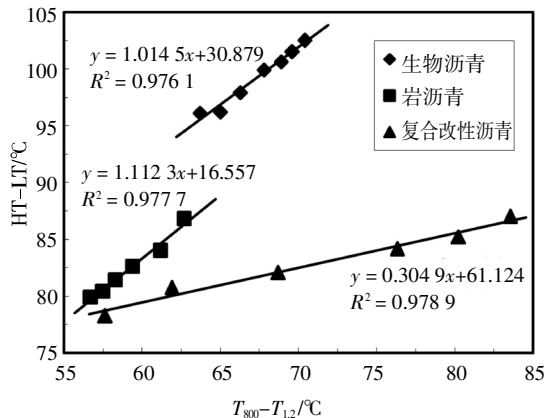


图 4  $T_{800}-T_{1.2}$  与 HT-LT 的关系

Fig.4 Comparison between  $T_{800}-T_{1.2}$  and HT-LT

### 3.4 感温性能相关性分析

我国现行规范中采用针入度指数 PI 值作为沥青温度敏感程度的评价指标,但 PI 值易受针入度试验精度的影响,且对有较宽使用温度范围的改性沥青则准确度不够。PG 性能分级评价体系则采用复数剪切模量指数 GTS 值<sup>[6]</sup>,GTS 值按式(5)由复数剪切模量  $G^*$  与温度相关性计算得到。

$$\lg \lg(G^*) = GTS \times \lg T + C \quad (5)$$

式中: $G^*$  为复数剪切模量,Pa; $T$  为试验温度(绝对温度),K; $C$  为常数;GTS 为复数模量指数。

复数剪切模量  $G^*$  精度高,是沥青材料内在力学性质的定量指标,因而得到的 GTS 值精确,更能合理评价改性沥青的感温性能。通常 PI 值越大的沥青,GTS 值也越大,感温性能越好。对 PI 值和 GTS

值进行相关性分析,结果见图 5。

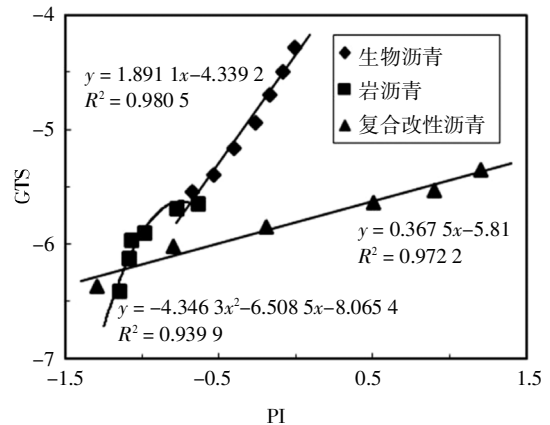


图 5 PI 与 GTS 的关系

Fig.5 Comparison between PI and GTS

由图 5 可知,3 种改性沥青的 PI 值和 GTS 值呈正相关,GTS 值随着 PI 值的增大而增大。生物沥青改性沥青和复合改性沥青的 PI 值和 GTS 值为线性相关,相关系数  $R^2$  分别为 0.980 5 和 0.972 2,岩沥青改性沥青则呈二次相关,PI 值增大速度略大于 GTS 值增大速度,相关系数  $R^2$  为 0.939 9。表明沥青常规试验指标 PI 值和流变性能指标 GTS 值对 3 种改性沥青感温性能的评价具有一致性。

## 4 结论

本研究分别以生物沥青、岩沥青及其复合改性沥青作为改性剂,制备了不同掺量的 3 种改性沥青。采用不同试验评价体系测试了高温性能、低温性能、可使用温度范围和感温性能,分析确立了 3 种改性沥青的常规性能与流变性能的相关性。结论如下:

1) 3 种改性沥青各常规性能与流变性能的回归方程均不一样,表明难以建立完全统一的回归方程。但对于同一品种的沥青,其常规性能与流变性能存在显著相关性。

2) 软化点、当量软化点  $T_{800}$  和 PG 高温连续分级温度 HT 对 3 种改性沥青高温性能的评价基本一致,可以通过常规性能指标软化点和  $T_{800}$  来预估流变指标 PG 高温连续分级温度 HT。

3) 生物沥青改性沥青的当量脆点  $T_{1.2}$  和 PG 低温连续分级温度 LT 呈显著线性相关,但岩沥青改性沥青和复合改性沥青为二次相关。表明  $T_{1.2}$  和 LT 相关性较复杂,对低温性能评价不完全一致,应结合两种指标并参考混合料相关试验来综合评价沥青低

温性能。

4)3种沥青的当量软化点与当量脆点之差和PG高低温连续分级温度之差之间线性拟合较好,采用针入度常规评价体系和流变评价体系均能合理描述3种改性沥青的可使用温度范围。

5)3种改性沥青的针入度指数PI值和复数剪切模量指数GTS值之间相关性较好,常规指标和流变指标对沥青感温性能的评价基本一致。

## 参考文献

- [1] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,2001:29—60.  
SHEN J A. Performance of asphalt and asphalt mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2001: 29—60. (In Chinese)
- [2] LI X L, SHAN L Y, TAN Y Q. Analysis of different indices for high- and low-temperature properties of asphalt binder [J]. Construction and Building Materials, 2015, 83: 70—76.
- [3] 周庆华, 沙爱民. 沥青高温流变评价指标对比[J]. 交通运输工程学报, 2008, 27(1): 30—35.  
ZHOU Q H, SHA A M. Comparison of high-temperature rheological evaluation indices for bitumen [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 27(1): 30—35. (In Chinese)
- [4] 高建立. 沥青指标的分析与评价及新指标的研究[D]. 南京:东南大学交通学院, 2005: 4—11.  
GAO J L. Analysis and evaluation of bitumen index and new additive index [D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2005: 4—11. (In Chinese)
- [5] 王骁. 纳米蒙脱土改性沥青及其混合料的流变特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学材料科学与工程学院, 2010: 4—9.  
WANG X. Research on the rheological characteristics of nano montmorillonite modified bitumen and its mixtures [D]. Wuhan: School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, 2010: 4—9. (In Chinese)
- [6] ZENG M L, PAN H Z, ZHAO Y, *et al.* Evaluation of asphalt binder containing castor oil-based bioasphalt using conventional tests[J]. Construction and Building Materials, 2016, 126: 537—543.
- [7] 曾梦澜, 赵宇, 潘浩志, 等. 欧洲岩沥青改性沥青结合料使用性能试验研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2016, 43(5): 125—130.  
ZENG M L, ZHAO Y, PAN H Z, *et al.* An experimental study on performance of european rock asphalt modified asphalt binder[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(5): 125—130. (In Chinese)
- [8] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004: 8—31.  
JTG F40—2004 Technical specifications for construction of highway asphalt pavements[S]. Beijing: China Communications Press, 2004: 8—31. (In Chinese)
- [9] 陈俊, 黄晓明. 沥青粘度和稠度本质及其关系研究[J]. 石油沥青, 2007, 21(4): 40—44.  
CHEN J, HUANG X M. Study on hypostasis and relationship of asphalt viscosity and consistency [J]. Petroleum Asphalt, 2007, 21(4): 40—44. (In Chinese)
- [10] YANG X, YOU Z P. High temperature performance evaluation of bio-oil modified asphalt binders using the DSR and MSCR tests [J]. Construction and Building Materials, 2015, 76: 380—387.
- [11] 汪海年, 高俊锋, 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 based on DSR and RV[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(6): 26—33. (In Chinese)
- [12] ASTM D7643—10 Standard practice for determining the continuous grading temperatures and continuous grades for pg graded asphalt binders [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010: 1—5.
- [13] ASTM D6373—15 Standard specification for performance graded asphalt binder [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015: 1—5.
- [14] 曾梦澜, 朱桃, 胡圣魁, 等. 布敦岩沥青改性沥青 Superpave 使用性能研究 [J]. 湘潭大学学报 (自然科学版), 2014, 36(2): 30—35.  
ZENG M L, ZHU T, HU S K, *et al.* Evaluating Superpave performance of buton rock asphalt modified asphalt binder[J]. Journal of Xiangtan University (Natural Sciences), 2014, 36(2): 30—35. (In Chinese)
- [15] GAO J F, WANG H N, YOU Z P, *et al.* Research on properties of bio-asphalt binders based on time and frequency sweep test [J]. Construction and Building Materials, 2018, 160: 786—793.
- [16] 于新, 孙文浩, 罗怡琳, 等. 橡胶沥青温度敏感性评价方法研究 [J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 266—270.  
YU X, SUN W H, LUO Y L, *et al.* Research on the evaluation index of temperature sensitivity of CRMA[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 266—270. (In Chinese)