

HMB 高模量天然改性沥青混合料动态模量研究*

Study on Dynamic Modulus of HMB High Modulus Natural Modified Asphalt Mixture

彭楠峰¹, 蔡燕霞^{2,3,4}, 高颖¹, 杨杰^{2,3,4}, 李冷雪⁵

- (1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中路高科(北京)公路技术有限公司, 北京 100088;
3. 公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心, 北京 100088;
4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 5. 中建路桥集团有限公司, 河北 石家庄 056000)

摘要: 为探究高模量天然改性沥青混合料的动态模量及其主曲线的变化规律, 以高模量天然沥青(HMB)为沥青胶结料, 制备 EME20、AC20 两种不同级配的沥青混合料, 使用 SPT 简单性能仪, 在不同温度和频率下对两种不同级配沥青混合料的动态模量进行检测, 分析了温度和频率对沥青混合料动态模量的影响; 基于时温等效原理, 通过非线性最小二乘法拟合得到高模量沥青混合料的主曲线方程。结果表明: 在同一温度下, 沥青混合料动态模量随荷载频率的增加而提高, 在同一频率下, 沥青混合料的动态模量随着温度的升高而降低; 通过试验测得两种不同级配沥青混合料的动态模量, 再应用所得动态模量数据拟合出动态模量主曲线, 算出不同温度下的移位因子, 得出的动态模量主曲线方程, 对其不同温度下的动态模量进行分析, 预测分析出 EME-20 级配沥青混合料的高低温性能要优于 AC-20 级配沥青混合料。

关键词: 高模量沥青混合料; HMB 沥青; 油石比设计; SPT 试验; 动态模量主曲线

中图分类号: U416 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2023)06-0093-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.015

PENG Nanfeng¹, CAI Yanxia^{2,3,4}, GAO Ying¹, YANG Jie^{2,3,4}, LI Lengxue⁵

(1. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Beijing Zhonglu Gaoke Highway Technology Co., Ltd., Beijing 10088, China;

3. Reserch and Development Center of Transport Industry of New Materials Technologies Application for Highway Construction and Maintenance, Beijing 10088, China;

4. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 10088, China;

5. China Construction Road and Bridge Group Co., Ltd., Handan 056000, China)

Abstract: In order to explore the dynamic modulus of natural modified asphalt mixture with high modulus of HMB and the change law of its main curve, HMB was used as asphalt binder to prepare EME20 and AC20 asphalt mixture with different levels of composition. SPT simple performance instrument was used to detect the dynamic modulus of two kinds of asphalt mixture with different levels of composition at different temperatures and frequencies. The influence of temperature and frequency on dynamic modulus of asphalt mixture is

* 基金项目: 国家自然科学基金(E080703)。

作者简介: 彭楠峰(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事道路工程材料研究。

收稿日期: 2023-08-31

材料科学

analyzed. Based on the time-temperature equivalence principle, the principal curve equation of high modulus asphalt mixture is obtained by nonlinear least square fitting. The results show that the dynamic modulus of asphalt mixture increases with the increase of load frequency at the same temperature, and decreases with the increase of temperature at the same frequency. The dynamic modulus of two kinds of asphalt mixture at different levels is measured by test, and then the dynamic modulus data is applied to fit the dynamic modulus master curve, and the shift factor at different temperatures is calculated. The dynamic modulus master curve equation is obtained, and the dynamic modulus at different temperatures is analyzed. It is predicted that the high and low temperature performance of EME-20 graded asphalt mixture is better than that of AC-20 graded asphalt mixture.

Keywords: high modulus asphalt mixture; HMB asphalt; whetstone ratio design; SPT tests; principal curve of dynamic modulus

0 引言

随着我国经济的发展,城市交通量也随之增加,交通渠化程度的提高和高温天气的影响,路面的车辙病害日益严重,成为了沥青路面最严重的早期病害之一。车辙病害影响了路面的平整度,降低了沥青路面的整体强度和抗滑能力,对车辆的行车安全也有一定程度的影响^[1]。由此可见,车辙问题已经成为了道路工程中亟待解决的问题。在国内外的路面材料研究领域中,高模量沥青混合料作为一种新型材料,受到了广泛的关注。其设计理念是通过提高沥青混合料的模量,来减少路面因受车辆荷载所产生的塑性变形,提高路面的高温稳定性,改善其性能,延长路面的使用寿命^[2]。

沥青路面受到不同因素的影响,其实际受力状态和材料性质等都与静态体系有明显不同^[3]。动态模作为一种动态性能参数,可以有效的反映沥青路面的动态力学特性,准确的评价沥青路面的真实服役状态^[4]。因此,关于动态模量的研究对沥青路面的设计和评价就显得尤为重要。目前,国内外学者对动态模量做了大量的研究^[5-9]。但不同的沥青和混合料有着不同的动态参数和动力特性,HMB高模量天然沥青^[10]作为一种新型材料,目前对其混合料的动态模量和主曲线的研究较少,对于高模量沥青混合料的动态模量主曲线和移位因子需进一步研究确定。

法国是最早开始研究高模量沥青混合料的国家,其高模量沥青混合料的设计技术已逐渐成熟,为世界各国竞相研究。且公路沥青路面的早期破坏形式的永久变形通常发生在中面层,因此对中

面层级配动态模量的研究也是十分必要的。故本文选择了法标 EME-20 级对比中标 AC-20 级配的沥青混合料,采用 SPT 简单性能仪,在不同的试验条件下对两种不同级配的沥青混合料进行动态模量试验,再选用西格摩德(Sigmoidal)函数,通过非线性最小二乘法拟合得到了参考温度下的动态模量主曲线,基于时温等效原理,算出动态模量主曲线的移位因子,求得不同温度下的动态模量主曲线方程。对比分析了法标 EME 级配与中标 AC 级配的沥青混合料动态模量的大小与变化规律,为 HMB 高模量沥青混合料的设计提供参考。

1 原材料性质

1.1 沥青

本文选用沥青由西安某沥青有限公司研发的 HMB 高模量天然沥青,其组成包含天然沥青、软沥青、道路石油沥青、偶联剂、降黏剂、交联剂和聚合物改性剂等,且天然沥青占比较高,为总质量的 7% 左右,沥青具体性能指标如下表所示。

表 1 HMB 成品天然沥青性能指标
Table 1 Performance indexes of HMB finished natural asphalt

测试项目	高模量	技术要求
软化点/℃	82.5	≥60
25℃延度/cm	46	≥25
25℃针入度/0.1mm	29	20~35
闪点/℃	290	≥260
175℃布氏黏度/Pa·s	0.9	≤3
15℃密度/(g/cm ³)	1.259	实测
25℃弹性恢复/%	88	≥60
灰分/%	21.5	≤25
质量变化/%	-0.367	≤0.5
25℃残留延度/cm	26	≥10
25℃针入度比/%	79.3	≥65
离析/℃	0	≤2.5

1.2 集料

1.2.1 粗集料

本文选用粗集料来自北京公路高科交通试验场,产地为河北三河,其具体的性能指标如下表所示,粗集料的各项性能指标都满足规范要求。

表 2 粗集料性能指标

Table 2 Performance indexes of coarse aggregate

技术指标	试验结果	技术要求
石料压碎值/%	17.8	≤28
洛杉矶磨耗值/%	18.1	≤30
针片状颗粒含量/%	6.2	≤15
软石含量/%	2.6	≤5
表观相对密度	2.843	≥2.5
吸水率/%	0.51	≤3.0

1.2.2 细集料

细集料具体性能指标如下,细集料的各项性能指标都满足规范要求。

表 3 细集料性能指标

Table 3 Performance indexes of fine aggregate

指标	试验结果	技术要求
砂当量	67	≥60
亚甲蓝值	6.3	≤25
棱角性	31	≥30
表观相对密度	2.72	≥2.5

1.3 矿粉

矿粉技术指标如下所示,矿粉的各项性能都满足规范要求。

表 4 矿粉性能指标

Table 4 Performance indexes of mineral powder

指标	试验结果	技术要求
表观相对密度 $1/m^3$	2.734	≥2.5
<0.6 mm	99.6	100
粒度范围%		
<0.15 mm	98.1	90-100
<0.075 mm	91.8	75-100
含水量%	0.5	≤1
外观	无团粒结块	无团粒结块
亲水系数%	0.7	<1
加热安定性	颜色无变化	实测记录

2 配合比设计

2.1 级配设计

法国高模量沥青混合料的设计方法为四水平法,采用丰度系数来确定最低沥青用量。其高模量沥青混合料设计方法虽然是一套完整的设计规范体系,但由于试验设备操作的复杂、繁琐,试验周期较长,因此其设计方法并不适合在国内大

规模推广。针对我国现状,采用马歇尔设计方法才是我国沥青混合料设计方法的首选。本文选用法标 EME 级配对高模量沥青混合料进行设计,对比我国 AC 级配,研究两种不同级配对动态模量大小及其变化规律的影响。EME-20 和 AC-20 的级配曲线如图 1 所示。

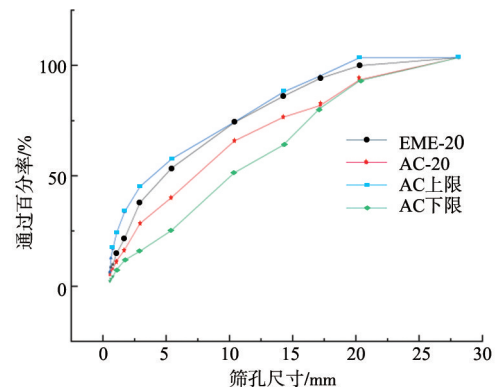


图 1 EME-20 和 AC-20 级配曲线图

Fig. 1 Diagram of EME-20 and AC-20 grades

由图 1 可见,法国高模量沥青混合料的矿料级配 EME-20 对比我国的 AC-20 级配来说,整体上偏细,2.36 mm 以上的筛孔通过率较高,EME-20 级配与 AC-20 级配的筛孔通过率在 4.75 mm 处相差最大,达到了 15%。AC-20 级配满足我国规范的级配要求,法标 EME-20 级配中筛孔尺寸与我国规范不同,利用内插法,将筛孔改为国内规范控制大小。经验证,其级配满足法标规范要求。

2.2 油石比设计

根据以往工程经验,选定 4.6%、5.1%、5.6%、6.1%、6.6% 共 5 个油石比成型马歇尔试件,具体马歇尔试验结果如下表所示。根据 JTG F40-2004 《公路沥青路面施工技术规范》^[11] 可确定级配 EME-20 和级配 AC-20 的最佳油石比,由计算可知,EME-20 级配的最佳油石比为 5.6%,AC-20 级配的最佳油石比为 5.5%。计算过程如下,最佳油石比计算结果如表 5 所示。

由各项马歇尔数据指标,求出平均值 OAC_1 ,计算方法如式 (1) 所示。

$$OAC_1 = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) / 4 \quad (1)$$

式中: a_1 为毛体积密度最大值; a_2 为马歇尔稳定度最大值; a_3 为目标空隙率; a_4 为沥青饱和度范围

材料科学

中值。

规范要求的技术指标确定沥青的用量范围, 取其均值为 OAC_2 , 计算方法如式 (2) 所示。

$$OAC_2 = (OAC_{min} + OAC_{max})/2 \quad (2)$$

式中: OAC_{min} 为沥青用量最小值; OAC_{max} 为沥青用量最大值。

最后确定沥青用量 OAC , 计算方法如式 (3) 所示。

$$OAC = (OAC_1 + OAC_2)/2 \quad (3)$$

表 5 最佳油石比计算结果
Table 5 Calculation results of optimum oilstone ratio

级配类型	OAC_1	OAC_2	OAC
EME-20	5.7	5.5	5.6
AC-20	5.5	5.5	5.5

表 6 EME-20 马歇尔试验结果
Table 6 EME-20 Marshall test results

油石比 /%	毛体积密度 / (g/cm^3)	VV/%	MS/kN	FL/0.1 mm	VMA/%	VFA/%
4.6	2.482	4.8	19.95	3.6	11.9	60.0
5.1	2.507	3.4	20.37	3.8	11.5	70.8
5.6	2.527	2.1	21.42	3.8	11.2	81.6
6.1	2.521	1.8	20.76	3.7	11.8	84.7
6.6	2.515	1.6	19.24	4.3	12.5	87.2

表 7 AC-20 马歇尔试验结果
Table 7 AC-20 Marshall test results

油石比 /%	毛体积密度 / (g/cm^3)	VV/%	MS/kN	FL/0.1 mm	VMA/%	VFA/%
4.6	2.470	5.4	19.13	3.3	12.7	57.9
5.1	2.488	4.3	20.55	3.6	12.5	65.9
5.6	2.508	3.0	19.11	3.9	12.2	75.4
6.1	2.501	2.8	18.12	3.9	12.8	78.3
6.6	2.493	2.6	16.24	4.4	13.5	80.6

2.3 试件成型

按马歇尔试验的结果制备高模量沥青混合料, 采用旋转压实的方法成型尺寸为 $150\text{ mm} \times 170\text{ mm}$ 的圆柱体试件, 成型完成后, 利用钻芯机钻取尺寸为 $100\text{ mm} \times 170\text{ mm}$ 的圆柱体试件, 再用切割机切割成 $100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的标准圆柱体试件。芯样尺寸要求: 试件高 (150 ± 2.5) mm, 试件直径 (100 ± 2) mm, 不符合要求的芯样要予以舍去。

3 动态模量

3.1 动态模量试验

动态模量参照 JTG E20-2011 《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行试验^[12], 用 SPT 简

单性能仪进行试验, 本文选取试验温度分别为 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50\text{ }^\circ\text{C}$, 并在每个试验温度下选取 0.1 Hz 、 0.2 Hz 、 0.5 Hz 、 1 Hz 、 2 Hz 、 5 Hz 、 10 Hz 、 20 Hz 、 25 Hz 这 9 种不同的加载频率。

对试件施加的荷载为偏移正弦波或半正矢波的轴向压应力, 在设定温度下, 由高频至低频进行试验, 试验之前要进行加载预处理, 任意两个试验频率间试验间隔推荐为 2 min , 间隔时间可适当延长, 但不宜超过 30 min 。试验采集最后 5 个波形的荷载及变形曲线。

沥青混合料的动态模量按 (4) 式计算:

$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: $|E^*|$ 为沥青混合料的动态模量, σ 为轴向应力幅值, ε 为轴向应变幅值。

3.2 动态模量数据及分析

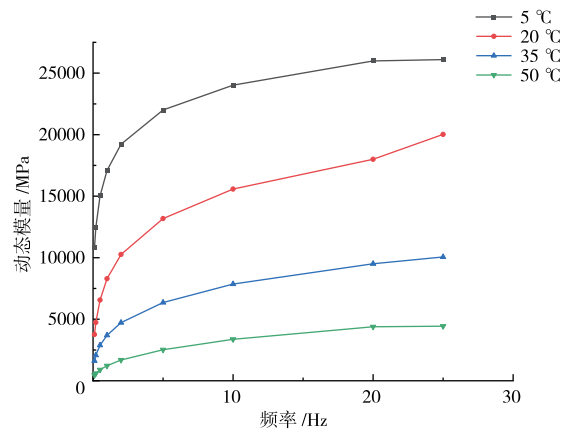


图 2 EME-20 动态模量试验数据
Fig. 2 EME-20 Dynamic modulus test data

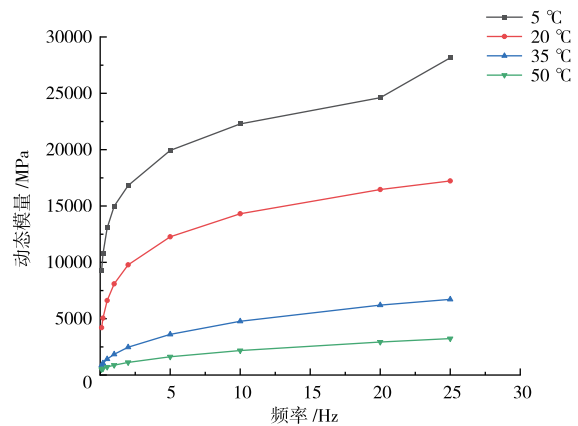


图 3 AC-20 动态模量试验数据
Fig. 3 AC-20 dynamic modulus test data

EME-20 和 AC-20 两种级配沥青混合料的动态模量动态模量变化规律如图 2 和图 3 所示, 在不同的温度和频率下, 这两种不同级配的沥青混合料有着相似的变化规律。温度和频率为其动态模量的主要影响因素。温度的升高和频率的降低都会使动态模量减小, 同样, 温度的降低和频率的升高也会使动态模量增大。出现此现象是因为, 沥青混合料中的沥青为感温性材料, 当温度升高时, 沥青的黏度降低, 导致了沥青与集料间的黏结力下降, 其抵抗变形的能力也逐渐减弱, 因此动态模量也随之降低。当频率升高时, 荷载的作用时间降低, 由于沥青混合料的黏弹性, 导致了混合料的应变反映会滞后, 在荷载作用时间很短的情况下, 就会出现应变偏小的情况, 也就间接提高了沥青混合料的动态模量。

4 动态模量主曲线

4.1 动态模量主曲线

沥青混合料作为典型的黏弹性材料, 其性质受温度和频率的影响显著。受设备和条件的影响, 在测定沥青混合料性质时, 我们不可能无限延长观测时间或提高试验温度, 即使能延长或提高, 也会因为各种因素影响其试验数据的准确性。而且室内试验测得的动态模量数据是间断的, 但环境的变化却是连续的, 因此, 我们需要一条连续的曲线来有效的模拟实际情况的动态模量数据。

我们可以在参考温度下做不同频率的部分试验, 用最小二乘法拟合得到动态模量主曲线, 再通过时温等效原理, 把不同温度和频率下的沥青混合料动态模量, 通过动态模量主曲线进行平移

得到。我们把参考温度下的光滑曲线称为主曲线。

4.2 动态模量主曲线确定

通过试验测得两种不同级配沥青混合料在参考温度下的动态模量, 采用非线性最小二乘法拟合得到参考温度下的动态模量主曲线, 形成西格摩德 (Sigmoidal) 函数, 根据时温等效原理, 求出不同温度下的移位因子, 最终确定沥青混合料的动态模量主曲线。Sigmoidal 函数如式 (5) 所示:

$$\lg |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot \lg f_r}} \quad (5)$$

式中: $|E^*|$ 为沥青混合料动态模量; f_r 为在基准温度下的荷载频率; δ 为动态模量最小值的对数; $\delta + \alpha$ 为动态模量最大值的对数; β , γ 为描述西格摩德 (Sigmoidal) 函数形状的参数。

主曲线移位因子 $\alpha(T)$ 由 (6) 式所求得, 其表示了缩减频率和时间温度移位因子的关系。

$$\lg f_r = \lg f + \lg \alpha(T) \quad (6)$$

式中: f 为试件加载频率; $\alpha(T)$ 为移位因子, 是温度 T 的函数, 可用 (7) 式估计

$$\lg \alpha(T) = aT^2 + bT + c \quad (7)$$

本文选取参考温度为 20 °C, 利用 Excel 中规划求解功能对试验数据进行非线性最小二乘法拟合得到动态模量主曲线函数参数 δ 、 α 、 β 和 γ , 再根据式 (5) 所求得的主曲线预测值, 与试验数据的差值的平方最小作为约束条件, 可以求得参数 a 、 b 、 c 的值, 再将 a 、 b 、 c 的值代入式 (7) 可以得到不同温度下的移位因子 $\lg \alpha(T)$, 经验算, 级配 EME-20 和级配 AC-20 的拟合度分别为 $R^2 = 0.993$ 和 $R^2 = 0.991$, 拟合程度优异。

表 8 Sigmoidal 函数拟合参数和温度移位因子
Table 8 Sigmoidal function fitting parameters and temperature shift factors

类型	δ	α	β	γ	a	b	c	移位因子 $\lg \alpha(T)$		
								5 °C	35 °C	50 °C
EME-20	2.4274	2.2622	-0.6531	-0.6271	-0.0003	-0.0620	1.4968	1.1791	-1.0464	-2.3646
AC-20	2.7405	1.8775	-0.4959	-0.6225	0.0005	-0.1264	1.7647	1.1445	-2.0751	-3.3624

拟合而成 EME-20 级配和 AC-20 级配的沥青混合料动态模量主曲线方程可由表 7 中函数拟合参数带入 (5) 式中求得, 不同温度下的主曲线方程可由表 7 中移位因子, 求得其缩减频率, 再带

入 (5) 式求得。EME-20 级配沥青混合料主曲线方程见式 (8), AC-20 级配沥青混合料主曲线方程见式 (9)。

材料科学

$$\lg |E^*| = 2.4274 + \frac{2.2622}{1 + e^{-0.6531 - 0.6271 \lg f}} \quad (8)$$

$$\lg |E^*| = 2.7405 + \frac{1.8775}{1 + e^{-0.4959 - 0.6225 \lg f}} \quad (9)$$

由式(8)、(9)可知,当频率较低时 EME-20 级配模量较高,当频率较高时 AC-20 级配的动态模量较高。基于时温等效原理可知,当沥青混合料处于高温状态时,EME-20 级配沥青混合料的动态模量较高,其抵抗变形的能力较高,因此其高温抗车辙性能优于 AC-20 级配;当温度较低时,EME-20 级配沥青混合料的动态模量较低,变形能力要优于 AC-20 级配沥青混合料,不易发生低温病害,因此其低温性能也优于 AC-20 级配沥青混合料。

5 结论

本文选用 EME-20、AC-20 两种不同级配沥青混合料,制备动态模量试件,用 SPT 简单性能仪,测得试件的动态模量数据,在参考温度下,用最小二乘法拟合动态模量主曲线,再基于时温等效原理,求出不同温度下的移位因子,得出动态模量的主曲线方程。通过试验研究得到以下结论。

(1) 沥青混合料的动态模量与温度和频率有关,随着温度的升高,试件的动态模量逐渐提高;随着频率的升高,试件的动态模量也逐渐提高。当频率在低频范围内升高时,动态模量的变化速率较快,当频率升高时,动态模量的变化速率逐渐降低。

(2) 对比传统密级配 AC-20 来说,法标级配 EME-20 的动态模量要高于 AC-20,在 35℃ 时差距最大,级配 AC-20 比级配 EME-20 混合料的动态模量要低 30%~50%。对比不同频率来说,两种

级配混合料动态模量在高频时的差距要比低频时更为明显。

(3) 经计算而得的动态模量主曲线方程可以用来预测出未经试验测量的动态模量数值,对比对两种级配沥青混合料动态模量数据预测 EME-20 级配沥青混合料的高低温性能要优于 AC-20 级配的沥青混合料。

参 考 文 献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述. 2020 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (10): 1-66. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001.
- [2] 王朝辉, 舒诚, 韩冰, 等. 高模量沥青混凝土研究进展 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2020, 40 (1): 1-15. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.01.001.
- [3] 张君. 沥青混合料动态模量多因素影响研究 [D]. 重庆交通大学, 2020. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2020.000395.
- [4] 尤远见. 沥青混合料动态模量的研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.
- [5] CHANG K G, MEEGODA J N. Micromechanical simulation of hot mix asphalt [J]. Journal of Material in Civil Engineering, 1997, 12 (5)
- [6] M. W. WITCZAK, O. A. FONSECA. Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures [J]. Transportation Research Record, 1996, 1540 (1).
- [7] 袁森. 沥青混合料动态模量的主曲线与细观仿真实验 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [8] 周庆华, 沙爱民. 高模量沥青混凝土动态模量及主曲线研究 [J]. 现代交通技术, 2011, 8 (2): 9-12.
- [9] 薛羽, 栗培龙, 高朋, 等. 沥青混合料动态模量主曲线方法对比分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2020, 45 (1): 1-9.
- [10] 曾赞, 张俊搏, 张玲, 等. 一种可存储的高模量天然沥青胶结料制备及应用方法: CN107118578B [P]. 2018-4-6
- [11] 公路沥青路面施工技术规范, JTG F40-2004 [S].
- [12] 公路工程沥青及沥青混合料试验规程, JTG E20-2011 [S].