

橡胶粉和 SBS 复合改性沥青抗车辙因子非线性模型

季学文¹, 许志扬², 石鹏程², 沈菊男^{2*}

(1. 苏州科技大学 江苏省生态道路技术产业化中心, 江苏 苏州 215000; 2. 苏州混凝土水泥制品研究院有限公司
江苏省高耐久性混凝土工程技术研究中心, 江苏 苏州 215000)

摘要:改性沥青的目的之一就是提高沥青的高温抗车辙性能。该文研究了橡胶粉和 SBS 双改性沥青抗车辙性能指标——抗车辙因子的主要影响因素及其非线性预测模型。采用动态剪切流变仪对采用两种沥青, 不同的 SBS 和橡胶粉掺量制备下的双改性沥青, 在 4 个不同温度(70 ℃、76 ℃、82 ℃、88 ℃)下测试沥青的抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$, 并建立抗车辙因子的非线性模型。结果表明:复合改性沥青的改性剂掺量因子与改性剂掺量呈指数方程关系, 流变仪试验温度因子与温度亦呈指数方程关系。

关键词:动态剪切流变; 非线性模型; 复合改性; 阿伦尼乌斯公式; 1st0pt

中图分类号: U414

文献标志码: A

沥青是一种黏弹性材料, 温度升高时, 沥青由弹性向黏塑性转化, 抗变形性能大幅下降, 沥青路面容易产生车辙损害^[1-3], 所以提高和检测沥青高温性能尤为重要。20 世纪 90 年代以来, 美国 Superpave 沥青结合料规范得到推广运用, 定义 $G^*/\sin\delta$ 为抗车辙因子, 作为判定沥青高温抗车辙性能的关键指标。

国内外研究者对基质沥青进行改性, 做了大量研究, 特别是 SBS 和橡胶粉改性沥青。研究成果为橡胶粉和 SBS 双改性沥青的普遍应用提供了基础。Ghazi 等^[4]测定不同温度下胶粉改性沥青的车辙因子, 研究发现胶粉的掺入可以提高沥青车辙因子; Liang 等^[5]采用应力控制流变仪测量了基质沥青和 CRM 与 SBS 复合改性沥青的黏滞特性和线性黏弹性行为, 研究结果表明:复合改性后, 沥青的黏弹特性和黏度显著提高; Xiang 等^[6]利用 RTFOT 模拟了基质沥青、SBS 改性沥青、CRM 改性沥青和 CRM 与 SBS 复合改性沥青的热氧化过程, 结果表明:CRM 与 SBS 复合改性沥青具有良好的抗老化性能; 刘梦梅等^[7]对沥青混合料进行橡胶与 SBS 复掺, 结果表明:复掺能显著提高沥青路面的抗车辙能力; 许志扬等^[8]将 SBS 和胶粉复掺, 研究发现可以使沥青的抗车辙能力提高; 包建业^[9]对胶粉和 SBS 复掺改性沥青的微观结构进行研究, 结果表明胶粉与 SBS 产生化学反应, 使得改性沥青内部

形成致密的网状结构; 次仁拉姆^[10]在橡胶粉和废塑料改性沥青最佳配比的基础上, 研究复合改性沥青的高温储存稳定性, 结果表明:废塑料替代部分橡胶粉可以改善沥青的高温储存稳定性; 廖隽^[11]研究发现车辙因子随老化时间呈指数增长。

目前大多数文献对沥青改性后各性能进行研究, 然而关于预测复合改性沥青 $G^*/\sin\delta$ 的非线性模型研究进展有限。Ghaffarpour^[12]建立纳米黏土改性沥青 $G^*/\sin\delta$ 的经验模型; Ashish^[13]分别建立纳米黏土和碳纳米管改性沥青 $G^*/\sin\delta$ 的经验模型。需要指出的是, 单掺纳米材料改性沥青的经验模型可能不适用双改性沥青, 如双掺 SBS 和 CRM。

该文采用两种基质沥青, 制备不同 SBS 和橡胶粉掺量的双改性沥青, 采用动态剪切流变仪, 测试 4 个不同温度(70 ℃、76 ℃、82 ℃、88 ℃)下的抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$, 并建立车辙因子的非线性模型。目的是建立双改性沥青的抗车辙因子及其主要影响因素间的关系, 探索双改性沥青抗车辙的影响模型, 对推广抗高温车辙性能的双改性沥青具有重要意义。

1 材料与试验

1.1 试验原材料

对市面上常用的两种 70# 基质沥青(1#、2#)进行

收稿日期:2022-05-26(修改稿)

基金项目:江苏省研究生科研创新计划项目(编号:KYCX19_2019)

作者简介:季学文,女,硕士研究生. E-mail:1347399361@qq.com

* 通信作者:沈菊男,男,教授,博士生导师. E-mail:shenjunnan@hotmail.com

复合改性,基质沥青各项性能指标见表 1。改性剂有 SBS 和废轮胎橡胶粉(CRM),SBS 型号为 YH-791H 的热塑性丁苯橡胶,其性能指标见表 2,CRM 采用 40

目胶粉,其性能指标见表 3。试验中 SBS 掺量设定为 0、2.5%、3.5%、4.5%,CRM 掺量为 0、6%、8%、10%、12%和 14%。

表 1 基质沥青的性能指标

性能指标	单位	1# 基质沥青	2# 基质沥青	技术要求
针入度(25 ℃,100 g,5 s)	0.1 mm	71.0	72.0	60~80
延度(15 ℃,5 cm/min)	cm	106.0	108.0	≥20
软化点(环球法)	℃	61.9	62.5	≥46
动力黏度(60 ℃)	Pa·s	224.0	180.0	≥180

表 2 SBS 性能指标

性能指标	单位	检测结果
灰分	%	≤0.2
300%拉伸应力	MPa	≥2.0
挥发分	%	≤1
熔体流动速率	g/(10 min)	0.01~0.50
扯断伸长率	%	≥700

表 3 CRM 性能指标

检测项目	单位	检测结果	标准要求
灰分	%	7.40	0~8.5
表观密度	g/cm ³	0.36	0.27~0.39
水分	%	0.76	0~2.0
25# 筛	%	0.20	0~2.0
筛分 50# 筛	%	67.80	55.0~80.0
筛余	%	32.00	18.0~45.0

1.2 试验方案

1.2.1 改性沥青制备

对 1#、2# 两种基质沥青进行 SBS 和橡胶粉复合改性,根据国内外 SBS 改性沥青中热塑性丁苯橡胶掺量建议不低于 2%,橡胶沥青中废胶粉掺量一般为 5%~30%,故该文 SBS 以 2.5%~4.5%代替沥青掺入,增量为 1%;CRM 以 6%~14%代替沥青掺入,增量为 2%。当固定 CRM 掺量为 10%时,改变 SBS 掺量为 0、2.5%、3.5%、4.5%;当固定 SBS 掺量为 4.5%,改变 CRM 掺量为 0、6%、8%、10%、12%、14%。复合改性的具体步骤如下:首先将基质沥青加热到 165 ℃,然后将计算好用量的 SBS 少量多次地加入沥青中,边加边搅拌,搅拌均匀后,使用 BME100LT 型高速剪切机剪切 45 min;再将对应量的 CRM 少量多次地掺入沥青中,边加边搅拌,搅拌均匀后,使用 JJ-1 精密增力电动搅拌器低速搅拌 30 min,最后放

入 180 ℃的烘箱里发育 2 h。

1.2.2 高温流变性能试验

依据改性沥青 PG 分级,选定 4 个不同温度(70 ℃、76 ℃、82 ℃、88 ℃),测定高温下的抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 。采用动态剪切流变仪(Dynamic Shear Rheometer,DSR)来评价沥青的高温流变性。主要测定样品的相位角 δ 和复数剪切模量 G^* ,通过 $G^*/\sin\delta$ 车辙因子指标,判定沥青高温抗车辙性能。所用的仪器为英国 BOHLIN CVO 100D 型动态剪切旋转流变仪,DSR 样品具体制备:首先将目标样品加热,使其呈流动状态,搅拌均匀后浇入硅胶模具中,等到样品冷却后进行试验。具体流程见图 1。

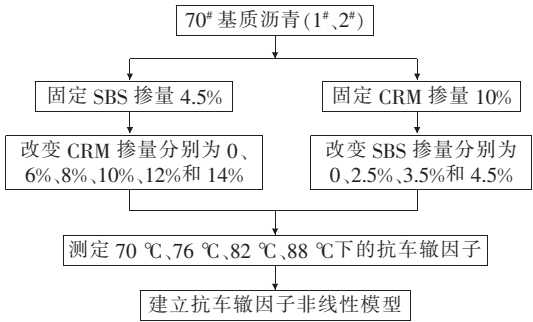


图 1 试验流程图

2 非线性模型方法和理论

该文主要讨论影响 $G^*/\sin\delta$ 的两个因素:① 改性剂的掺量;② 流变仪试验温度。考虑这两个因素,在选定参考抗车辙因子的基础上,建立的抗车辙因子非线性模型如下:

$$\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{\%,T} = \left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{\%-\text{ref},T-\text{ref}} \times F_{\text{DF}} \times F_{\text{TF}} \quad (1)$$

式中: $\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{\%,T}$ 为指定掺量(%)和指定温度(T)下预

测的车辙因子; $\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{\%-\text{ref}, T-\text{ref}}$ 为参考掺量(%-ref)和参考温度($T-\text{ref}$)下的抗车辙因子; F_{DF} 为改性剂掺量因子(Dosage Factor); F_{TF} 为流变仪试验温度因子(Temperature Factor)。

2.1 $G^*/\sin\delta$ 的改性剂掺量因子

改性剂掺量是 $G^*/\sin\delta$ 的主要影响因素之一, 该文研究 1[#]、2[#] 两种复合改性沥青的改性剂掺量因子时, 为了使沥青抗车辙因子值标准化, 选定温度 70 ℃, SBS 和 CRM 改性剂掺量分别为 4.5%、10% 下的 $G^*/\sin\delta$ 值作为参考。通过 1stOpt 对数据分析, 发现 1[#]、2[#] 两种复合改性沥青 $G^*/\sin\delta$ 值都呈指数增长, 因此 1[#]、2[#] 复合改性沥青在 70 ℃ 下的车辙敏感性的模型见式(2)、(3):

$$F_{\text{DF}^1_{(\text{S}, \text{M})}} = \frac{\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{\% \text{S}, \% \text{M}, 70^\circ \text{C}}}{\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{4.5\% \text{S}, 10\% \text{M}, 70^\circ \text{C}}} = A e^{(B \times \% \text{S} + C \times \% \text{M})} \quad (2)$$

$$F_{\text{DF}^2_{(\text{S}, \text{M})}} = \frac{\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{\% \text{S}, \% \text{M}, 70^\circ \text{C}}}{\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{4.5\% \text{S}, 10\% \text{M}, 70^\circ \text{C}}} = A_1 e^{(B_1 \times \% \text{S} + C_1 \times \% \text{M})} \quad (3)$$

式中: $F_{\text{DF}^1_{(\text{S}, \text{M})}}$ 为 1[#] 基质沥青在 SBS(S) 和 CRM(M) 复合改性后的改性剂掺量因子; $F_{\text{DF}^2_{(\text{S}, \text{M})}}$ 为 2[#] 基质沥青在 SBS(S) 和 CRM(M) 复合改性后的改性剂掺量因子; $\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{\% \text{S}, \% \text{M}, 70^\circ \text{C}}$ 为指定 SBS 掺量(%S)、CRM 掺量(%M), 在基准温度 70 ℃ 条件下, 对应的抗车辙因子; $\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_{4.5\% \text{S}, 10\% \text{M}, 70^\circ \text{C}}$ 为复合改性沥青在 SBS4.5%、CRM10% 以及基准温度 70 ℃ 条件下, 对应的抗车辙因子; A 、 B 、 C 和 A_1 、 B_1 、 C_1 为方程常数。

2.2 $G^*/\sin\delta$ 的温度因子

为了找出温度对抗车辙因子性能的影响, 用 1stOpt 软件对数据进行了分析。在该分析中, 采用 70 ℃ 时的 $G^*/\sin\delta$ 值作为参考, 进而使沥青抗车辙因子值标准化。分析结果表明: 指数关系与数据相关性最好。因此, 该文采用阿伦尼乌斯公式(Arrhenius Equation)评估温度变化对复合改性沥青的抗车辙因子($G^*/\sin\delta$)影响, 具体如式(4):

$$\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_t = \lambda e^{\frac{E_a}{Rt}} \quad (4)$$

式中: $\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_t$ 为对应温度(t)下的抗车辙因子; λ 为方程系数; E_a 为活化能; R 为通用气体定值[取值 8.314 J/(mol·K)]; t 为温度。

将该公式进行归一化后, 用于预测给定温度下的抗车辙系数, 见式(5):

$$\left(\frac{G^*}{\sin\delta}\right)_T = X e^{YT} \quad (5)$$

式中: X 、 Y 为方程两个常数; T 为流变仪试验温度。

3 结果与讨论

3.1 试验结果

对 1[#]、2[#] 两种基质沥青进行 SBS 和 CRM 复合改性, 当固定 CRM 掺量为 10% 时, 改变 SBS 掺量为 0、2.5%、3.5%、4.5%; 当固定 SBS 掺量为 4.5%, 改变 CRM 掺量为 0、6%、8%、10%、12%、14%。并对改性剂掺量不同的复合改性沥青进行 DSR 试验, 得到不同温度下的抗车辙因子, 见表 4。

由表 4 可以看出: 1[#]、2[#] 两种复合改性沥青的抗车辙因子, 在改性剂掺量相同时, 随着温度的升高, $G^*/\sin\delta$ 呈下降趋势, 且下降幅度逐渐减小; 在同一温度下, $G^*/\sin\delta$ 随改性剂掺量的增加而增大。

3.2 非线性分析

3.2.1 单因素(改性剂掺量)非线性模型

考虑改性剂掺量这一因素时, 为了使沥青抗车辙因子值标准化, 选定温度 70 ℃, SBS 和 CRM 改性剂掺量分别为 4.5%、10% 下的 $G^*/\sin\delta$ 值作为参考。利用 1stOpt 软件对改性剂掺量因子进行拟合, 得到 1[#]、2[#] 复合改性沥青改性剂掺量非线性公式, 具体方程表达式见表 5。

由表 5 可知: 无论是 1[#], 还是 2[#] 复合改性沥青, 掺量因子与 SBS 和 CRM 掺量呈指数变化, 决定系数 R^2 为 0.93。从表 5 中公式直观地知道, 改性剂掺量的增加可以提高沥青的抗车辙因子。究其原因, 是改性剂的增加, 使沥青具有更好的塑形、弹性以及延展性的网络结构, 进而提高沥青的抗车辙能力。

3.2.2 单因素(流变仪温度)非线性模型

基于表 4 试验数据, 经由 1stOpt 非线性拟合得到各掺量下 1[#]、2[#] 复合改性沥青的温度因子方程以及相关参数, 见表 6。1stOpt 软件通过最小二乘回归法, 对试验数据和预测数据的平方和误差(E_{SSE})进行优化。采用最小化的(E_{SSE})方法, 确定 1[#]、2[#] 复合改性

表 4 两种复合改性沥青各温度下的 $G^*/\sin\delta$

SBS 掺量/%	CRM 掺量/%	1 [#] 复合改性沥青抗车辙因子				2 [#] 复合改性沥青抗车辙因子			
		$(G^*/\sin\delta)/\text{kPa}$				$(G^*/\sin\delta)/\text{kPa}$			
		70 ℃	76 ℃	82 ℃	88 ℃	70 ℃	76 ℃	82 ℃	88 ℃
0	10	2.57	1.45	0.83	0.51	2.09	1.03	0.59	0.30
2.5	10	6.72	3.88	2.32	1.40	7.48	4.25	2.42	1.42
3.5	10	7.37	4.57	2.89	1.94	12.01	6.87	4.06	2.42
4.5	10	8.97	5.91	3.97	2.76	13.33	8.32	5.31	3.50
4.5	0	2.85	1.47	0.85	0.32	2.16	1.10	0.65	0.26
4.5	6	6.31	3.62	2.16	1.34	4.22	2.19	1.22	0.72
4.5	8	7.94	4.87	3.14	2.03	7.75	4.78	3.05	2.04
4.5	10	8.97	5.91	3.97	2.76	13.33	8.32	5.31	3.50
4.5	12	17.58	12.52	9.18	6.33	20.87	14.00	9.47	6.77
4.5	14	18.49	12.61	8.78	6.32	22.11	15.04	10.50	7.85

表 5 1[#]、2[#] 复合改性沥青的改性剂掺量因子方程

沥青	参数			公式	R^2
	A	B	C		
1 [#]	0.17	0.149 3	0.104 0	$F_{\text{DF}^1_{(\text{S},\text{M})}}=0.17\text{e}^{(0.149\ 3\times\%S+0.104\ 0\times\%M)}$	0.93
2 [#]	0.05	0.280 9	0.160 6	$F_{\text{DF}^2_{(\text{S},\text{M})}}=0.05\text{e}^{(0.280\ 9\times\%S+0.160\ 6\times\%M)}$	0.93

表 6 两种复合改性沥青不同改性剂掺量下的温度因子方程

SBS 掺 量/%	CRM 掺 量/%	1 [#] 复合改性沥青			2 [#] 复合改性沥青		
		温度因子方程	E_{SSE}	R^2	温度因子方程	E_{SSE}	R^2
0	10	$(G^*/\sin\delta)_T=666.93\text{e}^{(-0.092\ 94T)}$	0.000 2	0.999 6	$(G^*/\sin\delta)_T=2\ 155.23\text{e}^{(-0.109\ 74T)}$	0.000 8	0.998 1
2.5	10	$(G^*/\sin\delta)_T=495.25\text{e}^{(-0.088\ 68T)}$	9.959 4	0.999 7	$(G^*/\sin\delta)_T=700.70\text{e}^{(-0.093\ 62T)}$	2.556 7	0.999 9
3.5	10	$(G^*/\sin\delta)_T=213.62\text{e}^{(-0.076\ 69T)}$	0.000 3	0.999 6	$(G^*/\sin\delta)_T=562.29\text{e}^{(-0.090\ 5T)}$	9.679 5	0.999 8
4.5	10	$(G^*/\sin\delta)_T=108.01\text{e}^{(-0.066\ 94T)}$	0.000 2	0.999 4	$(G^*/\sin\delta)_T=203.05\text{e}^{(-0.075\ 96T)}$	0.000 1	0.999 5
4.5	0	$(G^*/\sin\delta)_T=1\ 976.04\text{e}^{(-0.108\ 47T)}$	0.001 5	0.996 7	$(G^*/\sin\delta)_T=1\ 935.29\text{e}^{(-0.108\ 14T)}$	0.001 4	0.996 8
4.5	6	$(G^*/\sin\delta)_T=501.24\text{e}^{(-0.088\ 89T)}$	0.000 3	0.999 3	$(G^*/\sin\delta)_T=1\ 375.12\text{e}^{(-0.103\ 31T)}$	0.000 6	0.998 8
4.5	8	$(G^*/\sin\delta)_T=222.78\text{e}^{(-0.077\ 3T)}$	0.000 2	0.999 3	$(G^*/\sin\delta)_T=212.92\text{e}^{(-0.076\ 67T)}$	0.000 3	0.999 0
4.5	10	$(G^*/\sin\delta)_T=108.01\text{e}^{(-0.066\ 94T)}$	0.000 2	0.999 4	$(G^*/\sin\delta)_T=203.05\text{e}^{(-0.075\ 96T)}$	0.000 1	0.999 5
4.5	12	$(G^*/\sin\delta)_T=49.40\text{e}^{(-0.055\ 72T)}$	0.000 2	0.999 3	$(G^*/\sin\delta)_T=89.59\text{e}^{(-0.064\ 28T)}$	0.000 2	0.999 1
4.5	14	$(G^*/\sin\delta)_T=70.97\text{e}^{(-0.060\ 96T)}$	0.000 2	0.999 1	$(G^*/\sin\delta)_T=65.62\text{e}^{(-0.059\ 87T)}$	0.000 6	0.997 6

沥青的温度因子方程,见式(6)、(7):

1[#] 复合改性沥青:

$(G^*/\sin\delta)_T=108.01\text{e}^{(-0.066\ 94T)}$

(6)

2[#] 复合改性沥青:

$(G^*/\sin\delta)_T=203.05\text{e}^{(-0.075\ 96T)}$

(7)

3.2.3 综合非线性模型

基于上述分析,确定 1[#]、2[#] 复合改性沥青抗车辙因子的预测模型,分别见式(8)、(9):

$$\frac{(G^*)}{(\sin\delta)_{\%,T}}=\frac{(G^*)}{(\sin\delta)_{\%-\text{ref},T-\text{ref}}}\times$$

$$0.17\text{e}^{(0.149\ 3\times\%S+0.104\ 0\times\%M)}\times108.01\text{e}^{(-0.066\ 94T)}$$

(8)

$$\frac{(G^*)}{(\sin\delta)_{\%,T}}=\frac{(G^*)}{(\sin\delta)_{\%-\text{ref},T-\text{ref}}}\times$$

$$0.05\text{e}^{(0.280\ 9\times\%S+0.160\ 6\times\%M)}\times203.05\text{e}^{(-0.075\ 96T)}$$

(9)

式中: $\frac{(G^*)}{(\sin\delta)_{\%,T}}$ 为复合改性沥青在指定掺量(%)和

指定温度(T)下预测的车辙因子; $(\frac{G^*}{\sin\delta})_{\%-\text{ref}, T-\text{ref}}$ 为改性剂参考掺量($\%-\text{ref}$)SBS4.5%、CRM10%和参考温度($T-\text{ref}$)70℃下的抗车辙因子。

3.3 非线性模型的验证

为了检验模型的准确性,采用试验值与模型预测值之间的相关性进行分析。需要特别说明的是,由于此次试验样本有限,验证也只是初步,抗车辙因子实测值与预测值对比见图2。由图2可知:数据点落在 $y=x$ 线上或者线附近的地方($R^2=0.93$),表明车辙因子非线性模型具有可靠性。

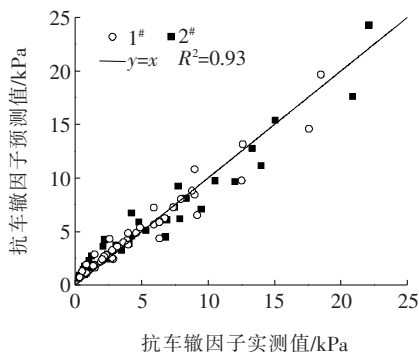


图2 抗车辙因子实测值与预测值对比图

实际工程中,确定参考抗车辙因子值后,将改性剂指定的掺量、温度分别代入车辙敏感性方程、抗车辙系数方程,便可预测SBS和橡胶粉复合改性沥青对应掺量以及温度下的抗车辙因子。

4 结论

该文的研究目的是建立双改性沥青的抗车辙因子及其主要因素间的关系,通过拟合的非线性模型,预测不同掺量的SBS、CRM及不同温度下的抗车辙因子。该模型建立选用的参考温度为70℃,以双改性沥青SBS掺量4.5%、CRM掺量10%为改性剂的参考掺量,在此条件下的抗车辙因子作为参考抗车辙因子。得出以下主要结论:

(1) $G^*/\sin\delta$ 在改性剂掺量一定的条件下,随温度的升高而降低;在温度一定的情况下,随改性剂掺量的增加而增大。

(2) 两种复合改性沥青,掺量因子与改性剂掺量之间都是呈指数关系;温度因子根据最小 E_{SSE} 的方

法,确定其非线性方程也是指数方程。

(3) 复合改性沥青的抗车辙因子可以用非线性模型来确定,实测值与预测值之间有良好的相关性,对推广抗高温车辙性能双改性沥青研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] 苏婷婷. 薄沥青路面结构形式分析与早期损害防治[D]. 北京:清华大学,2014.
- [2] 蔡旭. 沥青路面抗车辙性能评价及结构优化[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [3] 徐占磊. 基于抗车辙功能的高模量沥青混凝土路面力学响应与结构设计[D]. 西安:长安大学,2011.
- [4] AL-KHATEEB Ghazi G, RAMADAN Khaled Z. Investigation of the Effect of Rubber on Rheological Properties of Asphalt Binders Using Superpave DSR[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 19(1): 127-135.
- [5] LIANG M, XIN X, FAN W Y, et al. Investigation of the Rheological Properties and Storage Stability of CR/SBS Modified Asphalt[J]. Construction & Building Materials, 2015, 74(15): 235-240.
- [6] XIANG L, CHENG J, KANG S J. Thermal Oxidative Aging Mechanism of Crumb Rubber/SBS Composite Modified Asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 169-175.
- [7] 刘梦梅, 韩森, 任万艳, 等. 橡胶和SBS对排水沥青混合料性能影响的试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(3): 269-274.
- [8] 许志扬. 海绵城市排水路面改性沥青制备与性能研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2019.
- [9] 包建业. 胶粉对SBS改性沥青流变特性及微观结构的影响[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 234-240.
- [10] 次仁拉姆. 橡胶粉/废塑料复合改性沥青的性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 258-262.
- [11] 廖隽. 基于灰色理论的沥青紫外线老化后车辙因子预测[J]. 公路与汽运, 2018(3): 109-111.
- [12] GHAFARPOUR Jahromi S. Introduction of a Simple Method for Prediction of the Rutting Resistance Factor of Nanoclay-Modified Bitumen[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2019, 20(2): 216-221.
- [13] ASHISH P K, SINGH D. Development of Empirical Model for Predicting $G^*/\sin\delta$ and Viscosity Value for Nanoclay and Carbon Nano Tube Modified Asphalt Binder[J]. Construction & Building Materials, 2018, 165: 363-371.