

## 不同测试方法下沥青黏度特性研究

洪岭岭<sup>1</sup>, 冯国杰<sup>2</sup>, 孙雪阳<sup>3</sup>

(1.河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 451450; 2.石家庄市轨道交通有限责任公司, 河北 石家庄 437400; 3.徐辉设计股份有限公司, 河南 郑州 450016)

**摘要:** 沥青是一种黏弹性材料,黏度是其中一项重要指标,与沥青混合料施工温度、和易性和压实度密切相关。文中采用沥青布氏旋转黏度测试法、沥青流变性质测试法和沥青动力黏度测试法,分别测试原样、RTFOT 老化后和 PAV 老化后 SBS 改性沥青的旋转黏度、剪切黏度和动力黏度;针对沥青旋转黏度、剪切黏度、动力黏度影响因素,测试不同温度、转子、转速下沥青旋转黏度,不同温度、扫描频率下沥青剪切黏度和不同温度下沥青动力黏度。结果表明,原样、RTFOT 后、PAV 后 SBS 改性沥青的旋转黏度随转速不同分别呈幂函数、指数函数和二次项函数、二次项函数关系,剪切黏度满足幂函数关系( $y=ax^{-b}$ ),动力黏度呈指数函数( $y=Ae^{-Bx}$ )关系,相关性较好。

**关键词:** 公路;沥青;旋转黏度;剪切黏度;动力黏度

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671—2668(2021)04—0072—04

沥青温度敏感性强弱直接影响其路用性能。从工程应用角度,沥青是一种黏弹性材料,黏度是其中一项重要指标。由于沥青路面施工中不同阶段温差较大,其随温度变化的敏感程度会严重影响沥青混合料施工温度、和易性和压实度,有必要深入探究沥青黏度特性,从而更好地控制沥青混合料性能。常用沥青黏度测试方法有沥青布氏旋转黏度测试、动态剪切流变仪(DSR)测试(沥青剪切黏度)和动力黏度测试。已有研究建立了布氏旋转黏度和沥青剪切黏度与黏附性的关系,但仍存在一些不足,主要表现为沥青布氏旋转黏度大小和转速、温度有较大关系,而研究中一般只测定单一参数指标下黏度,以此建立沥青旋转黏度与黏附性的相关关系没有说服力;DSR 试验中黏度扫描软件对沥青测试时需设置转速、剪切力等指标,而以往研究没有考虑这些因素对沥青黏度的影响,得出的沥青黏度与黏附性相关性的结论是片面的;动力黏度的测试条件一般为 60℃,实际上夏季高温季节沥青远不止 60℃,导致 60℃沥青动力黏度试验的测试效果不好,工程项目上使用率低,有必要探索更高温度下沥青动力黏度性能。为此,该文着重讨论不同测试方法(布氏旋转黏度计、DSR、真空减压毛细管法)下不同参数指标的 3 种 SBS 改性沥青黏度特性变化规律。

## 1 沥青材料及其性能

采用 SBS 改性沥青,其中 SBS 改性剂为星型结

构,掺量为 4.5%。SBS 改性沥青的基本性能指标见表 1。

**表 1 SBS 改性沥青的基本性能指标**

测试项目	实测结果	技术标准
针入度(25℃)/(0.1 mm)	54.7	30~60
软化点(环球法)/℃	84.0	≥60
延度(5℃)/cm	26.9	≥20
弹性恢复(25℃)/%	86.00	≥75
溶解度(三氯乙烯)/%	99.80	≥99
闪点(COC)/℃	292	≥230
旋转薄膜 质量损失/%	0.19	≤1.0
烘箱试验 针入度比/%	72.58	≥65
(163℃) 延度(5℃)/cm	17.90	≥15

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对其进行旋转薄膜试验(RTFOT)和压力老化试验(PAV),制备短期老化沥青和长期老化沥青,并对 3 种不同老化程度沥青进行三大指标测试,试验结果见表 2。

**表 2 3 种 SBS 改性沥青的三大指标**

沥青种类	软化点/ ℃	针入度/ (0.1 mm)	延度/ cm
SBS 改性沥青	84.0	54.7	26.9
RTFOT 后 SBS 改性沥青	71.0	39.7	17.9
PAV 后 SBS 改性沥青	70.0	17.5	10.1

## 2 沥青黏度特性分析

### 2.1 沥青旋转黏度特性测试与分析

参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混

合料试验规程》中沥青旋转黏度试验方法,考虑不同温度(95、135、175 ℃)、转子(29<sup>#</sup>、27<sup>#</sup>、21<sup>#</sup>,其沥青用量分别为 13.5、10.4 和 7.1 g)、转速(2、4、6、8、20、40、60、80 r/min)对沥青旋转黏度的影响,使用布洛克菲尔德黏度计对原样、RTFOT 和 PAV 后 SBS 改性沥青进行旋转黏度测试,结果见表 3。对 3 种不同老化程度沥青在 3 种温度下的旋转黏度进行拟合,结果见图 1~3。

由图 1~3 可知:不同老化程度 SBS 改性沥青在相同温度下表现出的旋转黏度特性有很大区别,同一种 SBS 改性沥青在不同温度下的旋转黏度也有差别。不同函数对不同沥青旋转黏度的拟合结果见表 4。

表 3 SBS 改性沥青旋转黏度测试结果

试验条件			沥青黏度/(MPa·s)		
温度/ ℃	转子 型号	转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	原样	RTFOT 后	PAV 后
95	29 <sup>#</sup>	2	84 000.0	121 750.0	105 500.0
95	29 <sup>#</sup>	4	66 800.0	110 367.0	105 300.0
95	29 <sup>#</sup>	6	57 700.0	101 217.0	103 500.0
95	29 <sup>#</sup>	8	52 500.0	91 648.0	102 400.0
135	27 <sup>#</sup>	20	2 138.0	2 308.5	3 037.7
135	27 <sup>#</sup>	40	2 090.5	2 335.5	3 023.0
135	27 <sup>#</sup>	60	2 079.0	2 274.2	3 120.8
135	27 <sup>#</sup>	80	2 059.0	2 317.8	3 078.0
175	21 <sup>#</sup>	20	361.0	368.8	452.5
175	21 <sup>#</sup>	40	361.9	358.8	471.2
175	21 <sup>#</sup>	60	361.1	354.0	519.2
175	21 <sup>#</sup>	80	361.7	357.4	544.7

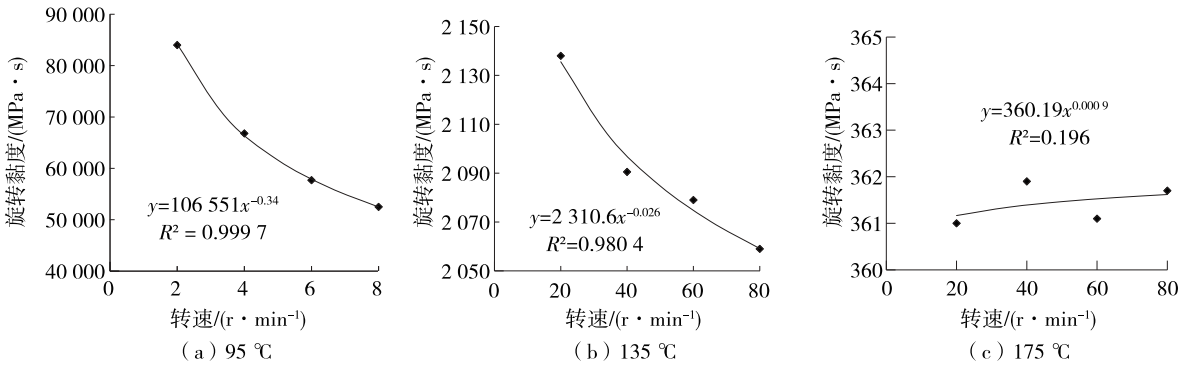


图 1 不同温度下 SBS 改性沥青旋转黏度拟合结果

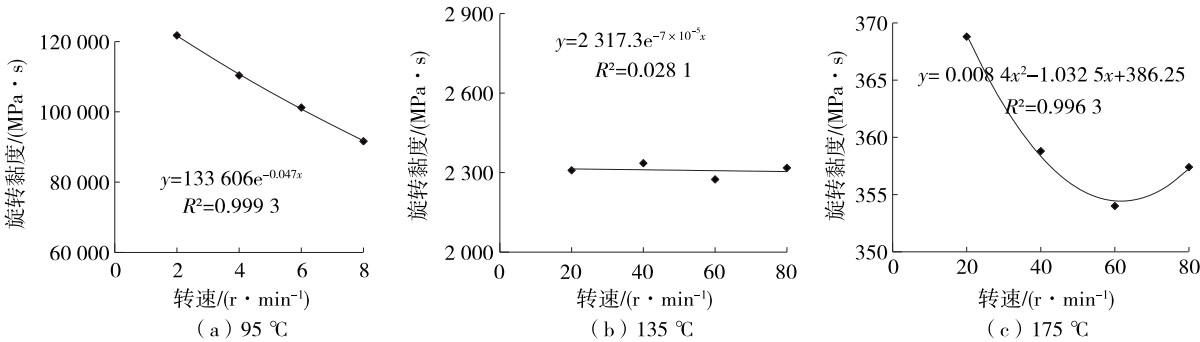


图 2 不同温度下 RTFOT 后 SBS 改性沥青旋转黏度拟合结果

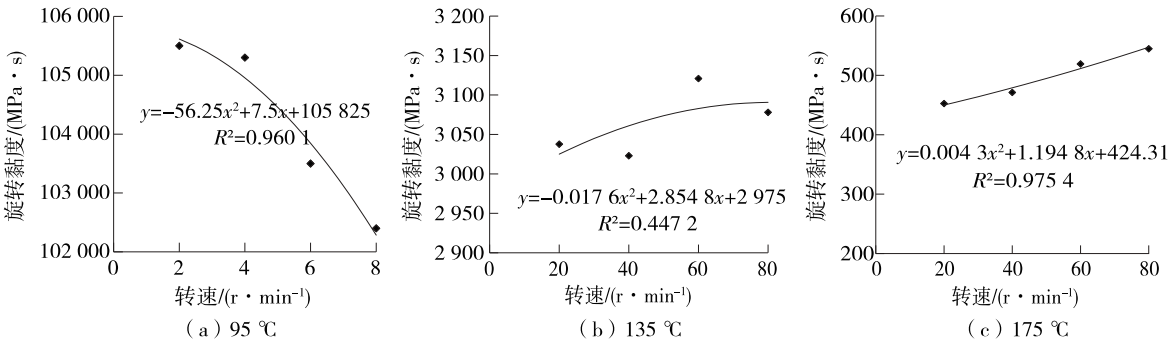


图 3 不同温度下 PAV 后 SBS 改性沥青旋转黏度拟合结果

表4 不同沥青旋转黏度拟合结果

沥青种类	不同温度(℃)下沥青旋转黏度的拟合关系					
	95		135		175	
	拟合曲线	相关系数	拟合曲线	相关系数	拟合曲线	相关系数
SBS 改性沥青	幂函数	0.999 8	幂函数	0.990 1	幂函数	0.443 1
RTFOT 后 SBS 改性沥青	指数函数	0.999 6	指数函数	0.167 6	二次项函数	0.998 1
PAV 后 SBS 改性沥青	二次项函数	0.979 8	二次项函数	0.668 7	二次项函数	0.987 6

由表4可知:原样、RTFOT 和 PAV 后 SBS 改性沥青的旋转黏度在某一温度出现线性相关性较低或拟合曲线函数不同的现象,表明 SBS 改性剂分子在该温度下达到不稳定状态,导致沥青表现的性能不稳定,出现无规律变化;沥青旋转黏度无规律时的温度不同(原样沥青为 175 ℃,RTFOT 后沥青为 135 ℃,PAV 后沥青为 135 ℃),表明老化让 SBS 改性剂分子结构产生了损伤,使其分解等变化提前;不同老化状态沥青旋转黏度拟合曲线的函数也不同,说明经过 RTFOT、PAV 老化后 SBS 改性沥青中 SBS 改性剂分子链段的长度和分子间作用力发生了变化;RTFOT 后 SBS 改性沥青的旋转黏度在不同温度下的函数拟合结果差异性比 PAV 后的大,表明 RTFOT 老化使 SBS 改性沥青中物质处于极其不稳定的状态,而 PAV 后 SBS 改性沥青的 SBS 改性剂分子的变化已达到相对稳定状态。

## 2.2 沥青剪切黏度特性测试与分析

利用动态剪切流变仪中黏度扫描软件测试沥青的剪切黏度,扫描温度为 50~190 ℃。为研究不同转速对沥青剪切黏度的影响,试验中转速分别采用 20、40、60 和 80 r/min,其他参数为默认值。数据采集为每 0.5 min 采集一个点,同时温度升高 1 ℃,共采集 141 个点。4 个特殊温度下沥青剪切黏度见表 5~7。以原样 SBS 改性沥青在 20 r/min 时的剪切黏度为例进行拟合,拟合结果见图 4。

由表 5~7、图 4 可知:同样转速下,随着温度升高,沥青的剪切黏度逐渐降低,沥青剪切黏度满足幂函数关系( $y = ax^{-b}$ );同样温度下,随着转速升高,沥青的剪切黏度在 95 ℃时变化无规律,在其他温度

表5 原样 SBS 改性沥青剪切黏度测试结果

试验温度/℃	不同转速(r/min)时的黏度/(Pa·s)			
	20	40	60	80
60	5 755.000	3 523.000	2 410.000	2 020.000
95	90.500	84.300	71.600	64.500
135	2.540	1.670	1.670	1.640
175	0.568	0.289	0.313	0.295

表6 RTFOT 后 SBS 改性沥青剪切黏度测试结果

试验温度/℃	不同转速(r/min)时的黏度/(Pa·s)			
	20	40	60	80
60	5 380.000	3 505.000	2 735.000	2 360.000
95	77.000	68.500	66.700	61.900
135	1.780	1.700	1.780	1.770
175	0.329	0.238	0.350	0.303

表7 PAV 后 SBS 改性沥青剪切黏度测试结果

试验温度/℃	不同转速(r/min)时的黏度/(Pa·s)			
	20	40	60	80
60	6 190.000	5 682.000	4 855.000	4 496.000
95	70.500	69.300	65.500	63.000
135	2.590	2.490	2.420	2.44
175	1.540	0.936	0.871	0.700

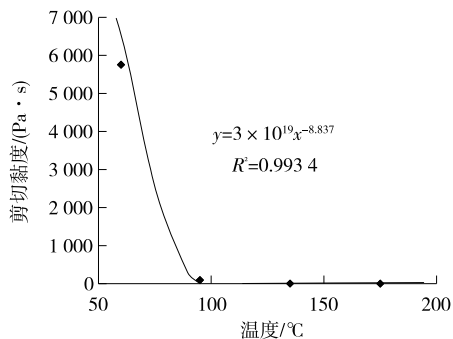


图4 转速为 20 r/min 时原样 SBS 改性沥青剪切黏度拟合结果

下表现为逐渐升高或逐渐降低的趋势,其关系拟合曲线没有明显的函数关系。

## 2.3 沥青动力黏度特性测试与分析

参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中沥青动力黏度试验方法,使用真空减压毛细管黏度计对 3 种不同状态 SBS 改性沥青进行沥青动力黏度测试,测定温度为 60、65、70、75、80 ℃,采用 400R 和 200R 2 种毛细管,测试结果见表 8。对 3 种沥青在不同温度下的动力黏度进行拟合,拟合结果见图 5~7。

表8 3种不同老化程度沥青动力黏度测试结果

温度/℃	不同老化程度沥青的动力黏度/(Pa·s)		
	原样	RTFOT后	PAV后
60	297 959.69	24 032.31	10 928.15
65	111 078.50	4 572.36	6 484.87
70	35 101.20	1 743.99	2 649.66
75	1 255.38	834.31	1 597.32
80	389.08	400.86	871.40

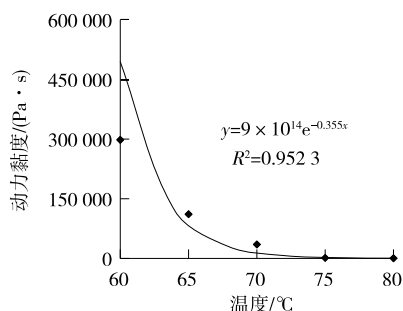


图5 原样 SBS 改性沥青动力黏度拟合结果

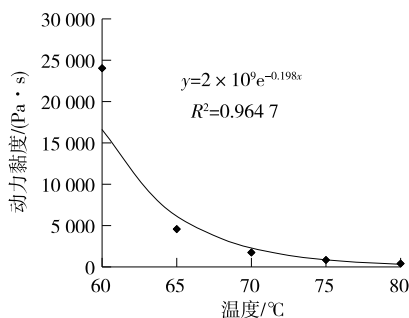


图6 RTFOT 后 SBS 改性沥青动力黏度拟合结果

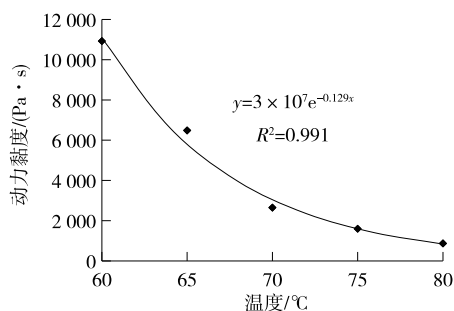


图7 PAV 后 SBS 改性沥青动力黏度拟合结果

由表8可知:随着温度的升高,3种改性沥青的动力黏度逐渐下降,其中原样 SBS 改性沥青的动力黏度下降速度最快,RTFOT 后沥青次之,PAV 后沥青最慢;温度为 80℃ 时,沥青动力黏度大小排序为 PAV 后沥青>RTFOT 后沥青>原样沥青,表明沥青老化后,沥青动力黏度受温度的影响较小。

由图5~7可知:不同状态 SBS 改性沥青的动力黏度均呈指数函数( $y = Ae^{-Bx}$ )关系,相关性较

好。随着 SBS 改性沥青老化程度的加重,其指数函数拟合曲线的  $A$  值和  $B$  的绝对值逐渐减小。 $A$  代表 60℃ 初始黏度值, $A$  值越大,沥青的性能越好; $B$  代表沥青的老化程度, $B$  的绝对值越小,沥青的老化程度越严重,其黏度受温度的影响小。

### 3 结论

(1) 原样、RTFOT 和 PAV 后 SBS 改性沥青的旋转黏度随转速不同分别呈幂函数、指数函数和二次项函数、二次项函数关系,表明 3 种沥青结构内部分子状态不同,RTFOT 后沥青状态最不稳定。

(2) 不同状态 SBS 改性沥青的剪切黏度满足幂函数关系( $y = ax^{-b}$ )。

(3) 不同状态 SBS 改性沥青的动力黏度均呈指数函数( $y = Ae^{-Bx}$ )关系,相关性较好。 $A$  代表 60℃ 初始黏度值, $A$  值越大,沥青的性能越好; $B$  代表沥青的老化程度, $B$  的绝对值越小,沥青的老化程度越严重,其黏度受温度的影响小。

(4) 原样、RTFOT 和 PAV 后 SBS 改性沥青动力黏度的指数函数回归曲线的  $A$  值表明沥青性能高低排序为原样沥青>PAV 后沥青>RTFOT 后沥青,表明 RTFOT 后沥青内部结构分子处于不稳定状态,性能较差,与旋转黏度特性呈现的结果相一致; $B$  的绝对值越小老化越严重,沥青老化程度高低排序为原样沥青<RTFOT 后沥青<PAV 后沥青,与实际情况一致。

### 参考文献:

- [1] 王岚,胡江三,陈刚,等.不同改性沥青温度敏感性[J].功能材料,2015,46(4):4086—4090+4095.
- [2] DANG V, THANH P, CHEN P. Study on marshall and rutting test of SMA at abnormally high temperature [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 1337—1341.
- [3] YUAN G M, LI X K, DONG Z J, et al. Microstructure analyses of mesophase pitch-based carbon fibers with high thermal conductivity [J]. Journal of Functional Materials, 2011, 42(10): 1806—1809.
- [4] 徐鸥明,韩森,牛冬瑜,等.测试条件对 SBS 改性沥青表观黏度影响研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(1):83—86+91.
- [5] 李宁利,李铁虎,陈华鑫,等.SBS 改性沥青的黏温特性研究[J].土木工程学报,2007,40(10):86—90.
- [6] 徐大卫,张帅.两种测量泡沫沥青黏度方法的对比[J].

(下转第 78 页)

$R > 0.95$ ,且二次多项式的相关系数高达 0.97,满足相关拟合精度要求,表明试验段二的 FWD 法和 BB 法测试弯沉值在 3 种数据拟合方式下的相关性较好,也反映出一、二级公路利用 FWD 法进行弯沉检测的准确性比 BB 法高。2) 对比 3 种数据拟合方式下  $R^2$  值,采用二次多项式对 2 种方法的测试数据进行拟合的相关性最好,其次是指数方式拟合,最后是线性方式拟合。考虑到对数据拟合的效率和简便性,优先采用二次多项式对所测数据进行拟合和相关性分析。

由表 4 可知:采用 3 种拟合方式得到的相关系数  $R < 0.95$ ,不能满足相关拟合精度要求,表明试验段三的 FWD 法和 BB 法测试弯沉值在 3 种数据拟合方式下的相关性不是很好。但数据拟合较差不代表利用 FWD 法检测弯沉的准确性不好,这是因为利用 BB 法检测弯沉受自身构造的影响会产生波动,且其测试弯沉是静态的,而 FWD 法测试弯沉是动态的,需进行换算后再用于相关性分析及评价。

### 3 结论

通过采用 FWD 法和 BB 法分别对 3 条公路试验段进行弯沉测试,并对测试弯沉值进行相关性分析,得到如下结论:

(1) 与 BB 法相比,FWD 法测试弯沉值的稳定性较好,准确度较高,在高等级公路中采用 FWD 法进行弯沉测试具有更好的稳定性。

(2) 各试验段 FWD 法测试弯沉值的变异系数大小为试验段三 > 试验段二 > 试验段一,与道路规范中道路等级的承载能力一致,表明可采用 FWD 法对不同等级公路进行弯沉测试。

(3) 根据 FWD 法和 BB 法测试弯沉值相关性

分析结果,高等级公路优先采用线性方式对 FWD 法和 BB 法测试弯沉值进行拟合和相关性分析;3 种拟合方式对低等级公路 FWD 法和 BB 法测试弯沉值的拟合相关性均较差,应对 FWD 法测试弯沉进行更深层次的研究,确保数据准确。

### 参考文献:

- [1] 张向阳,王光明.FWD 和贝克曼梁在路基弯沉检测中的相关性分析[J].中南公路工程,2004,29(2):76-78.
- [2] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会.贝克曼梁路面弯沉仪:JT/T 120—2008 [S].北京:中华人民共和国交通运输部,2008.
- [3] 全国公路专用计量器具计量技术委员会.落锤式弯沉仪:JJG(交通) 133—2017 [S].北京:中华人民共和国交通运输部,2017.
- [4] 唐伯明,邓学钧,李一鸣.落锤式弯沉仪(FWD)与贝克曼梁式弯沉仪(BB)的对比试验研究[J].中国公路学报,1990,3(3):37-43.
- [5] 高丹.提高落锤式弯沉仪与贝克曼梁检测相关性的方法探讨[J].福建交通科技,2019(4):28-30.
- [6] 李存华.贝克曼梁弯沉仪与落锤式弯沉仪(FWD)检测结果对比分析[J].市政技术,2016,34(5):28-30.
- [7] 石志勇,李倩倩,周兴业,等.沥青路面弯沉的温度修正研究[J].中外公路,2021,41(1):36-42.
- [8] 李颖.落锤式弯沉仪弯沉检测有效性分析[J].道路工程,2020(6):47-79.
- [9] 交通运输部公路科学研究院.公路路基路面现场测试规程:JTG 3450—2019 [S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [10] 赵青.FWD 与 BB 检测道路弯沉的相关性探讨[J].交通世界(建养·机械),2009(5):172-173.

收稿日期:2021-04-19

(上接第 75 页)

- 重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(1):44-47.
- [7] 张丽宏.沥青黏度影响因素的研究[J].石油沥青,2014,28(4):68-72.
  - [8] 林江涛,孙洪福.沥青黏度的不同测试方法研究[J].山东交通科技,2011(3):30-31.
  - [9] 程龙,于江,李林萍,等.基于表观黏度的新疆岩沥青改性沥青的老化动力性能[J].科学技术与工程,2017,17(26):295-301.
  - [10] 丁湛,赵浚凯,董浩,等.测试条件对橡胶改性沥青黏度的影响分析[J].河北工业大学学报,2020,49(3):

74-80.

- [11] 李立寒,耿韩,孙艳娜.高黏度沥青黏度的评价方法与评价指标[J].建筑材料学报,2010,13(3):352-356+362.
- [12] 弥海晨,郭平,胡苗.橡胶沥青黏度测试影响因素及黏度值确定方法研究[J].中外公路,2010,30(5):301-304.
- [13] 交通部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011 [S].北京:人民交通出版社,2011.

收稿日期:2020-12-07