

# 基于东北季冻区气候下高黏改性沥青性能研究

于保阳<sup>1,2</sup>, 高超<sup>1</sup>, 张荣华<sup>1</sup>

(1.沈阳建筑大学 交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2.大连海事大学 交通运输装备与海洋工程学院)

**摘要:** 基于东北季冻区气候条件下提出合理的高黏改性剂掺量。测试高黏改性沥青指标并计算针入度指数  $PI$  值评价改性沥青的感温性能, 进行软化点试验和  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  动力黏度试验评价改性沥青的高温性能, 进行低温延度 ( $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  延度) 试验和 BBR 试验评价改性沥青的低温性能。改性剂掺量为  $12\%\sim 13\%$  时各指标均满足要求。BBR 试验表明改性剂掺量为  $13\%$  时改性沥青抵抗永久变形的能力最好, 掺量为  $12\%$  时应力释放能力最强, 抗低温开裂能力最好, 同时对改性沥青进行 PG 分级低温分析。推荐东北季冻区高黏改性剂掺量为  $12\%\sim 13\%$ 。

**关键词:** 季冻区; 高黏改性沥青;  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  动力黏度; BBR 试验

透水路面有良好的排水、净水性能可防止城市内涝、净化水质, 有良好的抗滑性能, 可提高行车安全系数, 通过减弱车辆轮胎和道路表面的空气泵作用来减弱噪声污染等。日本对透水路面的研究较早, 对高黏改性沥青的技术研究较成熟, 认为高黏改性剂在保证透水路面路用性能方面具有重要的作用。中国南方地区目前已有许多透水试验路的铺筑, 在东北季冻区对透水沥青路面(高黏改性沥青)的研究很少, 因此, 该文查阅相关规范, 结合东北季冻区的气候条件对透水沥青路面中的结合料即高黏改性沥青进行分析。

## 1 原材料、试验方法和气候条件

### 1.1 原材料

#### (1) 高黏改性剂

选用国产 OLB-1 型高黏改性剂, 外观为浅黄色半透明半球状颗粒, 由多种聚合物复合而成, 通过对基质沥青的增黏、加筋、填充、提高弹性恢复和降低温度敏感性等多重作用而改善沥青的综合性能, 从而提高沥青混合料的抗疲劳损坏能力、高温抗车辙能力、低温抗开裂能力和抗低温脆性能力等, 用于东北季冻区的透水路面具有很大的优势和适用性。

#### (2) 基质沥青

基质沥青选用辽河 90# 基质沥青, 基本技术性能指标见表 1。

### 1.2 高黏改性沥青的制备

采用湿法工艺制备高黏改性沥青, 制备步骤如下:

表 1 辽河 90# 基质沥青技术性能指标测试结果

试验项目	单位	90# 基质沥青	规范要求	测试方法
针入度 ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	0.1 mm	80.5	$80\sim 100$	T0604
软化点	$^{\circ}\text{C}$	48.3	$\geq 43$	T0606
延度 ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	cm	$> 15$	$\geq 15$	T0605
$60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 动力黏度	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	276.5	$\geq 160$	T0620
闪点	$^{\circ}\text{C}$	322	$\geq 245$	T0611

① 确定制备高黏改性沥青的总质量, 用内掺法计算、称量基质沥青和改性剂的质量; ② 将称量好的基质沥青放入烘箱中加热至  $(180\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 然后加入称量好的改性剂恒温搅拌  $5\text{ min}$ ; ③ 用 B25 型高速剪切机 C 档 ( $16\ 000\text{ r/min}$ ) 低速剪切  $10\text{ min}$ , 然后调至 E 档 ( $22\ 000\text{ r/min}$ ) 高速剪切  $20\text{ min}$ , 再将试样放入  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  的恒温烘箱中溶胀  $10\text{ min}$  后, 取出继续用 E 档高速剪切  $15\text{ min}$  即可。剪切时间过短会导致改性剂颗粒无法充分熔化、均匀分散, 剪切时间过长又导致沥青老化严重, 建议剪切时间  $\leq 1\text{ h}$ , 控制剪切温度在  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 以达到最佳的剪切效果。

### 1.3 高黏改性沥青的技术要求

对比了中国规范 CJJ-T 190-2012《透水沥青路面技术规程》和日本规范中高黏改性沥青各指标的差异, 具体要求见表 2。

### 1.4 东北季冻区气候条件

中国《公路自然区划》将全国划分为多年冻土区、

收稿日期: 2018-07-29

作者简介: 于保阳, 男, 博士研究生, 副教授. E-mail: 109876813@qq.com

表 2 不同规范对高黏度改性沥青的技术要求

检测项目	单位	中国规范要求	日本规范要求
软化点	℃	>85	>80
针入度(25 ℃)	mm	>40	>40
针入度指数 <i>PI</i>		—	≥+0.2
5 ℃延度	cm	≥30	—
15 ℃延度	cm	—	>50
135 ℃黏度	Pa·s	<3.0	<3.0
黏韧性	N·m	>20	>20
韧性	N·m	>15	>15
60 ℃黏度	Pa·s	>20 000	>20 000

季节冻土区和全年不冻区三大地带。东北季冻区气候分区为夏热区、冬寒区和湿润区,具有春、秋季节持续时间短,冬季寒冷漫长,夏季高温多雨等特征,路面结构每年经历 70 ℃左右的温差变化,详细气候条件及 PG 分级见表 3。冬季最低气温可达-30 ℃甚至更低且持续时间长,路面极易产生低温开裂破坏,透水路面较密级配路面更易出现损伤,故对改性沥青的要求更加严格;夏季时沥青路面接近 40 ℃的持续高温使车辙病害严重。何演等研究表明:90%的低温抗裂性能都是由沥青来提供的。因此,选择低温性能好、感温性能好并且同时兼顾良好的高温性能的结合料可以保证东北季冻区透水沥青路面具有良好的低温抗裂性能、良好的高温抗车辙性能和耐久性等。

表 3 北方季冻区气候条件

城市	纬度/ (°)	最热 7 d 平均气 温/℃	日均最 低气 温/℃	年平均降 水量/ mm	PG 分级
哈尔滨	45.75	30.4	-24	536.6	58-28
长春	43.90	30.8	-20	587.0	58-28
沈阳	41.73	31.1	-17	716.7	58-28

2 试验结果和分析

2.1 基本指标

在相同的试验条件下,对不同高黏改性剂掺量的改性沥青进行基本指标的试验,结果如图 1~3 所示。

由图 1 可知:随着高黏改性剂掺量的增加改性沥青的软化点不断增加,掺量小于 5%时软化点增加较慢,这是由于改性剂掺量很小时只与小部分基质沥青

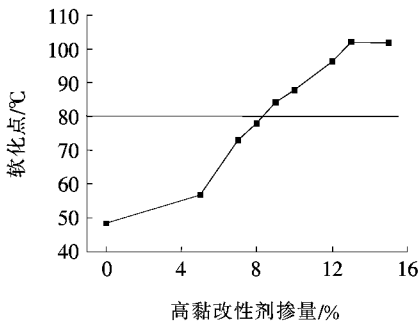


图 1 软化点曲线

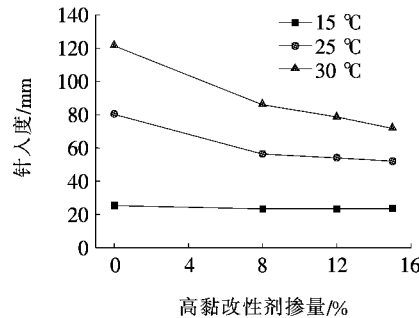


图 2 针入度曲线

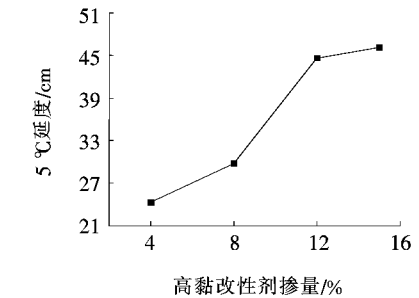


图 3 5 ℃延度曲线

溶胀结合,改性效果不明显。掺量逐渐增加到 13%的过程中,软化点增加较快且呈线性增长。原因在于,在不断的搅拌剪切过程中,改性剂中的聚合物在拌和过程中拉丝成纤维状,纤维体之间相互搭接,缠绕在一起,而且聚合物具有很好的热稳定性和相当的劲度,随着改性剂的继续增加聚合物纤维体不断地互相搭接缠绕,逐渐形成网状架构,改性沥青的软化点随着网状结构的不断形成呈现出线性增长的趋势。当掺量由 13%增至 15%时,网状架构基本形成,软化点数值不再增长。从图 1 看出掺量为 9%时软化点已超过 80 ℃,所以改性剂掺量大于 9%时即满足规范对软化点的要求,掺量为 13%时软化点达 102.1 ℃,说明改性沥青的高温性能好,用作东北季冻区的透水路面具有良好的高温抗车辙能力。

由图 2 可知:随着改性剂掺量的增加不同试验温度下改性沥青的针入度均不断减小,且随掺量的减小其数值减小的幅度也逐渐变小,30℃下减小幅度最为明显,25℃次之,15℃时针入度变化不明显,掺量从 0%增至 15%时,针入度仅减小了 1.8 mm,说明掺量的增加使改性沥青的稠度增加,高温性能逐渐变好。当掺量大于 8%时稠度增加变缓,这是由于改性剂的增加使聚合物纤维体不断增多,且互相搭接缠绕提高了稠度,掺量大于 8%后聚合物纤维体网状架构逐渐形成,高温性能改善的幅度逐渐减小。

在评价沥青低温性能方面,低温延度是一个重要的指标,具有方法简单、比较直观等优点,故延度试验温度不采用 15℃,而选择 5℃进行低温延度试验。由图 3 可知:5℃试验条件下,随着改性剂掺量的增加改性沥青的延度不断增加,但是延度增加的速度变缓,改性剂掺量从 12%增加到 15%,延度仅增加了 3.4%。表明随着改性剂掺量的增加高黏改性沥青的低温性能不断变好,但当改性剂的掺量为 15%附近时,延度增

加不明显,此时如继续增加改性剂掺量对改善低温性能作用很小;当改性剂掺量为 15%时,5℃延度为 46.1 cm,满足规范要求。

## 2.2 针入度指数 $PI$ 值及衍生指标

沥青是感温性结合料,加热变软,遇冷变硬,因此感温性是评价高黏改性沥青的重要指标。东北季冻区的明显特征是温差大,每年温差可达 70℃以上,这对改性沥青的感温性能提出了很高的要求。中国“八五”攻关研究中提出以针入度指数评价改性沥青的感温性,要求置信度为 95%、 $R$  值  $>0.997$ ,此时试验误差小,试验数据可用。

根据 JTJ 052—2011《公路沥青及沥青混合料试验规程》中的公式计算针入度指数  $PI$  值及衍生指标,具体数据见表 4。

$$y = a + bx (y = \lg P, x = T) \quad (1)$$

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

式中: $T$  为不同试验温度下的针入度  $P$ ;  $K$  为回归方程的常数项  $a$ ;  $A_{\lg Pen}$  为回归方程的常数项  $b$ 。

表 4 针入度指数  $PI$  值及衍生指标结果

改性剂 掺量/%	直线回归 系数 $R^2$	$a(K)$	$b(A_{\lg Pen})$	$PI$	$T_{800}$ 当量 软化点/℃	$T_{1.2}$ 当量 脆点/℃	塑性温度 范围 $\Delta t$ /℃
0(基质)	0.997 1	0.724 7	0.046 0	-0.91	47.36	-14.03	61.39
8	0.999 8	0.785 1	0.038 8	0.20	54.59	-18.19	72.78
12	0.999 3	0.846 8	0.035 1	0.89	58.58	-21.87	80.45
15	0.997 7	0.889 7	0.032 5	1.43	61.95	-24.94	86.89

$$PI = \frac{20 - 500A_{\lg Pen}}{1 + 50A_{\lg Pen}} \quad (3)$$

$$T_{800} = \frac{\lg 800 - K}{A_{\lg Pen}} \quad (4)$$

$$T_{1.2} = \frac{\lg 1.2 - K}{A_{\lg Pen}} \quad (5)$$

$$\Delta T = T_{800} - T_{1.2} \quad (6)$$

由表 4 可知:随高黏改性剂掺量的增加针入度指数  $PI$  值和  $T_{800}$  当量软化点呈现增加趋势,表明改性沥青温度敏感性有所降低,提高了改性沥青的温度稳定性。沥青路面的抗车辙能力、抗低温开裂能力和耐久性与感温性有内在联系,感温性降低意味着透水路面的整体性能提高。规范中要求对冬季寒冷,日温差、年温差大的地区宜选用  $PI$  指数大的沥青,该文基质沥青的  $PI$  值为 -0.91,当掺量为 15%时  $PI$  值为 1.43,远大于基质沥青的  $PI$  值和规范  $\geq +0.2$  的要求,说明高黏改性剂对降低沥青的温度敏感性起到了巨大作用,用于大温差的东北季冻区有很好的优势和适用

性,可有效提高路面抗车辙能力、抗低温开裂能力和耐久性。 $T_{1.2}$  当量脆点不断降低,塑性温度范围  $\Delta t$  不断增加都表明随着改性剂掺量的增加改性沥青的温度敏感性降低,低温性能变好适用于东北季冻区。

## 2.3 60℃动力黏度和 135℃运动黏度指标

透水路面空隙率大,空气和雨水易进入结构内部,所以要求混合料有足够的强度、耐久性和很好的抗水损害性能。日本研究表明透水路面的结合料应使用高黏改性沥青(要求 60℃时改性沥青的动力黏度大于 20 000 Pa·s,日本常用的改性剂为 TPS),并且认为高黏改性剂具有重要地位。60℃动力黏度及 135℃运动黏度具体结果数据见图 4、5。

由图 4、5 可知:随着高黏改性剂掺量的增加 60℃动力黏度呈现指数增加,掺量为 12%时动力黏度  $>20\,000\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,当掺量为 15%时动力黏度达到 90 170 Pa·s,满足透水路面结合料的要求。JTJ F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求“在不改变改性沥

青性质并符合安全条件的温度下易于泵送和拌和,或证明适当提高泵送和拌和温度时能保证改性沥青质量,容易施工,需要测定改性沥青 135 ℃ 运动黏度,要求测量值 $\leq 3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ”。试验结果表明:改性沥青的 135 ℃ 运动黏度随掺量的增加而增加,当掺量为 15% 时运动黏度值为  $2.75 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,满足规范要求。

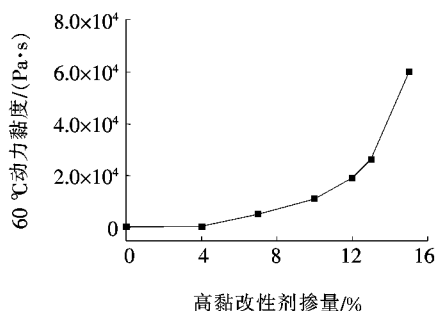


图4 60℃动力黏度曲线

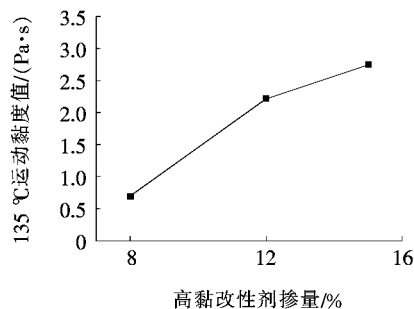


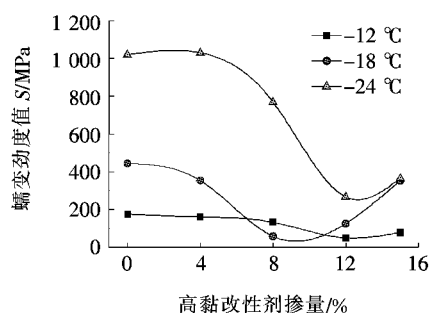
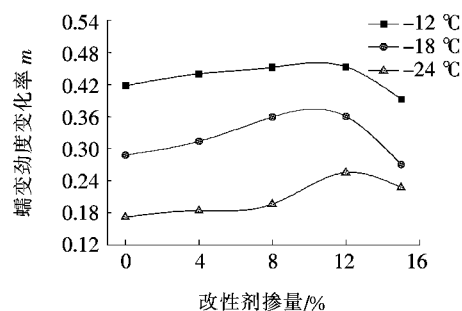
图5 135℃运动黏度曲线

## 2.4 BBR 指标

东北季冻区冬季最低气温可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至更低,每年经历 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的温差变化,透水路面在这样的气候下,低温开裂破坏现象更容易发生,然后迅速发展导致路面使用性能急剧衰减,最后路面破坏。国际上广泛采用 SHRP 提出的沥青弯曲梁流变试验进行预防且证实:蠕变劲度设计值应在路面最低温度下加载 2 h 时测得,但当试验温度提高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,等价的蠕变劲度值只需要加载 60 s 便可测得。

采用弯曲梁流变仪对高黏改性沥青(包括基质沥青)进行 BBR 试验,试验温度为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验荷载加载时间为 240 s,取 60 s 的蠕变劲度  $S$  和蠕变速率  $m$  进行分析(图 6、7)。

由图 6 可知:随着高黏改性剂掺量的增加不同温度下的蠕变劲度值  $S$  变化规律相似,均呈现出在掺量范围为 $0\sim 5\%$ 时  $S$  值先缓慢减小,掺量范围为 $5\%\sim 13\%$ 时  $S$  值迅速减小,当掺量大于 $13\%$ 之后  $S$  值开始有迅速增加的趋势。因为蠕变劲度  $S$  反映的是沥

图6 蠕变劲度值  $S$  曲线图7 蠕变劲度变化率  $m$  曲线

青抵抗永久变形的能力,其值越小越好,所以  $S$  值变化趋势说明当改性剂掺量在 $12\%$ 附近时抵抗永久变形能力最好;不同试验温度下  $S$  值的最低值有些差异,试验温度为 $-12$ 和 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、掺量为 $13\%$ 时  $S$  值最小,试验温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、掺量为 $10\%$ 时  $S$  值最小,试验温度越低  $S$  值越大,越呈现出低温脆性的特点,且相同温差下试验温度越低  $S$  值变化越大,说明改性沥青的低温脆性为非线性变化,温度越低低温脆性越明显;掺量为 $15\%$ 时,试验温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的  $S$  值相同,说明掺量 $15\%$ 或者更大时,改性沥青抵抗永久变形的能力相同,在一定的条件下可以通过提高改性剂掺量改善改性沥青的抵抗极限低温的能力。

蠕变速率值  $m$  是反映沥青劲度的时间敏感性及应力松弛性能的参数,其值越大越好。由图 7 可知: $m$  值随掺量的增加而增加,当掺量在 $12\%$ 附近时  $m$  值达到最大,随后开始下降,说明当掺量 $12\%$ 时应力释放能力最强,低温抗开裂能力最好;掺量小于 $14\%$ 时,相同温差下  $m$  值变化基本相同,试验温度 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、掺量为 $15\%$ 时的  $m$  值逐渐接近,说明改性沥青的应力松弛性能也是非线性的。综合  $S$  值和  $m$  值的分析可知:高黏改性剂掺量为 $12\%\sim 13\%$ 时,改性沥青抵抗永久变形的能力和应力释放能力最好,低温脆性现象最不明显,满足用于东北季冻区透水路面结合料的要求。

根据 BBR 试验 PG 低温等级可知,基质沥青和改性剂掺量为 15% 的改性沥青低温性能较差,而改性剂掺量为 4%、8% 和 12% 的改性沥青 PG 低温等级相同。对于相同 PG 低温等级的改性沥青,根据不同温度下 BBR 试验得出的  $S$  和  $m$  值按照  $\lg S = a_1 + b_1 T$  和  $\lg m = a_2 + b_2 T$  回归计算出临界温度  $T_{L,S}$  ( $S=300$  MPa 时的低温临界温度)和  $T_{L,m}$  ( $m=0.3$  时的低温临界温度),再根据 Superpave 性能规范标准得出  $S \leq 300$  MPa 且  $m \geq 0.3$  时的低温等级温度  $T_{LC}$ 。数据见表 5。

表 5 PG 低温等级温度分析

改性剂 掺量/%	PG 等级	$T_{L,S}/$ ℃	$T_{L,m}/$ ℃	$T_{LC}/$ ℃
0(基质)	22	—	—	—
4	28	-16.33	-18.7	-16.33
8	28	-22.36	-20.09	-20.09
12	28	-31.83	-21.87	-21.87
15	22	—	—	—

一般来说改性沥青  $S$  值小,  $m$  值大,表明材料的低温性能好,当 PG 等级相同时,采用低温等级温度  $T_{LC}$  进行低温性能区分,得到的不同改性剂掺量的改性沥青低温性能差异性明显,可有效区分低温性能的优劣。由表 5 可知:改性剂掺量为 4%、8% 和 12% 的改性沥青低温等级温度  $T_{LC}$  大小排序为:掺量 12% > 8% > 4%,所以高黏改性沥青中改性剂掺量在 12% 左右时低温抗开裂性能最好。

### 3 结论

(1) 当高黏改性剂掺量大于 9% 时软化点和针入度均满足规范要求。随着掺量增加软化点、 $PI$  值和  $T_{800}$  当量软化点呈增加趋势,表明改性沥青高温性能逐渐变好,温度敏感性降低,透水路面的整体性能提高。 $T_{1.2}$  当量脆点不断降低,塑性温度范围  $\Delta t$  不断增加都表明随掺量的增加改性沥青的温度敏感性降低,低温性能变好,用于大温差的东北季冻区具有很好的优势和适用性。

(2) 60 ℃ 动力黏度是评价高黏改性沥青的重要

指标,要求试验值 > 20 000 Pa · s,根据试验数据知改性剂掺量大于 11% 时就可保证透水路面具有良好的高温性能和耐久性。高黏改性沥青黏度大,对施工要求高,规范规定试验值 > 3.0 Pa · s,当掺量为 15% 时改性沥青的 135 ℃ 运动黏度为 2.75 Pa · s 满足规范要求。

(3) 当高黏改性剂掺量在 13% 附近时  $S$  值最小,沥青抵抗永久变形的能力最好。改性沥青的低温脆性为非线性变化,温度越低低温脆性越明显,在一定的条件下可以通过提高掺量改善改性沥青的抵抗极限低温的能力。 $m$  值随掺量的增加而增加,当掺量在 12% 附近时  $m$  值达到最大,说明掺量为 12% 时应力释放能力最强,低温抗开裂能力最好;试验温度为 -18 和 -24 ℃ 下掺量 15% 时  $m$  值逐渐接近,说明改性沥青的应力松弛性能也是非线性的。改性剂掺量为 12% 时,低温延度为 44.6 cm 远大于规范要求限值,表明该掺量下的高黏改性沥青低温性能良好。

### 参考文献:

- [1] Legret M, Colandini V, Marc C L. Effects of a Porous Pavement with Reservoir Structure on the Quality of Runoff Water and Soil[J]. Science of the Total Environment, 1996, 189(96): 335—340.
- [2] 日本道路协会.排水性铺装技术指南[M].东京:丸善株式会社.1992
- [3] 谭忆秋,郭猛,曹丽萍.常用改性剂对沥青粘弹特性的影响[J].中国公路学报,2013(4).
- [4] 韩君,于晓飞,周德洪,等.玄武岩纤维增强高粘沥青混合料制备工艺与性能研究[J].中外公路,2015(2).
- [5] 刘强强.基于 PG 技术的黑龙江省道路沥青性能评定[D].东北林业大学硕士学位论文,2014.
- [6] JTJ 003—86 公路自然区划标准[S].
- [7] 何演,区国梁,周进川.沥青胶结料低温性能 MTS 试验研究[J].公路交通技术,2011(5).
- [8] JTJ 052—2011 公路沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [9] 黄卫东,孙立军,张志全,等.沥青针入度指数的研究[J].同济大学学报:自然科学版,2005(3).
- [10] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [11] 胡曙光,黄绍龙,张厚记,等.开级配沥青磨耗层(OGFC)的研究[J].武汉理工大学学报,2004(8).
- [12] 段周洋.沥青性能综合分析 with 优选方法研究[D].长安大学硕士学位论文,2015.