

# 基于沥青黏弹性的弹性恢复率测量装置及 试验方法研究

付玮玮

(贵安新区开发投资有限公司, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 该文通过对现有 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》T0662—2000 沥青弹性恢复试验过程存在问题的分析,对比 3 种不同改性沥青的低温弹性恢复试验、极限弹性恢复试验、持载弹性恢复试验结果,提出了一种基于沥青黏弹性的改性沥青弹性恢复率测量装置及试验方法,并对该方法的准确性进行了验证,以及与现有方法进行了比较。结果表明:该方法不仅能够准确反映改性沥青弹性恢复率,同时提高了试验结果的准确性,而且可以同时进行多组沥青试样的测量,提高了试验工作效率。

**关键词:** 公路工程; 弹性恢复率; 测量装置; 改性沥青; 试验方法

## 1 前言

为了能够制备出在高温条件下较硬而低温条件下较软的改性沥青,国外研究人员常常采用聚合物改性沥青,因为加入聚合物后,采用低标号的沥青同样能满足高温性能,而较软的沥青又能够在低温下屈服及减少低温应力,从而有较大的应变能密度和抗开裂能力。根据聚合物改性剂对普通沥青的改性效果,将聚合物改性剂分为抗永久变形、抗疲劳开裂、抗低温开裂、抗水损害和抗老化 5 类。而弹性恢复值是反映改性沥青在受到外力拉伸后恢复至原状态能力的重要力学指标,国内外均采用这项指标评价改性沥青弹性能力,其性能的优劣将直接影响到混合料的高温、低温、抗疲劳性能与耐久性能。但参照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中对于改性沥青弹性恢复的测定方法 T0662—2000,测定的橡胶沥青、SBS 改性沥青及其他改性沥青的弹性恢复区分度很小,弹性恢复值大部分都能够达到 75% 以上,均满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求,且现有规范测试过程受仪器设备、操作人员试验熟练程度影响较大,通过长期对不同试验结果分析发现,该项测试已经不能明显全面地表征和区分不同改性沥青的恢复性能,而且在测试改性沥青弹性恢复的试验过程中,现有规范的试验虽然是一套参照 ASTM 试验方法,但在

多次试验过程中,发现以下问题:

(1) 试验步骤 3.2 中“将试样安装在滑板上,按延度试验方法以规定的 5 cm/min 的速率拉伸试样达  $(10 \pm 0.25)$  cm 时停止拉伸”,在改性沥青拉伸后恢复过程中,不同种类改性沥青的恢复速率是不同的,由于其在拉伸过程中,内部应力不断增大,恢复力增加,而不同种类的改性沥青,由于其改性机理不同,在拉伸过程中应力增加速率不一致,所以说以传统的弹性恢复方法拉伸至固定长度(10 cm)后剪断,会导致延度较低种类的沥青处于“紧绷”的状态,而延度值较大的沥青则处于“松弛”的状态,在这种情况下,评定其恢复速率就失去了公平性。

(2) 试验步骤 3.3 中“拉伸停止后就立即用剪刀在中间将沥青试样剪断,保持试样在水中 1 h”,这个过程 1 h,沥青试样是一直固定在滑板上的,而不能进行下一组沥青试样的试验,导致试验效率低,而且通过不同改性沥青试验,“拉伸停止后就立即用剪刀在中间将沥青试样剪断”这一条件会对改性沥青的性能做出误判。

(3) 试验步骤 3.4 中“移动滑板使改性沥青试样的尖端刚好接触,测量试件的残留长度”,这个过程既繁琐又费时间,且沥青处于下垂状态,不好控制沥青试样尖端刚好接触,导致试验结果不够精确。

基于以上分析,该文设计一种基于沥青黏弹性的沥青弹性恢复测试装置及方法,同时给出低温弹性恢

复、极限弹性恢复、持载弹性恢复 3 种反映沥青弹性恢复能力的试验方法,并利用 SBS、橡胶粉、高黏剂 (TPS)改性添加剂制备 3 种具有代表性的改性沥青后进行对比研究,综合评定目前几种主要改性沥青的弹性恢复特性。

2 试验部分

2.1 主要仪器

现行 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的方法:试样加载拉伸采用 SYD—4508F 沥青延伸度试验器,温度精度为  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,拉伸试验采用标准尺寸的沥青延度试验用模具。

该文提出的基于沥青黏弹性的改性沥青弹性恢复测试方法:采用自主研发的一种新型沥青弹性恢复测量装置,装置设置有金属柱和标尺,试验方法通过沥青弹性恢复率测量装置(图 1)测量沥青回缩后的长度(图 2、3),进而达到测定沥青弹性恢复率的目的。

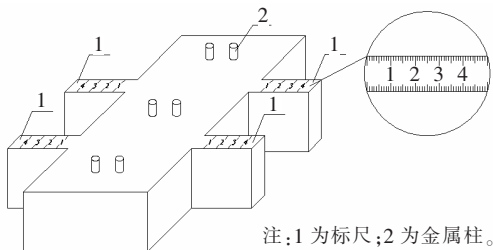


图 1 新型沥青弹性恢复测量装置

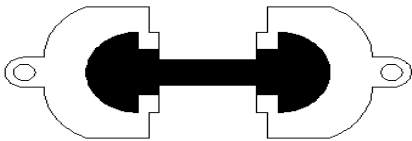


图 2 拉伸前的试样

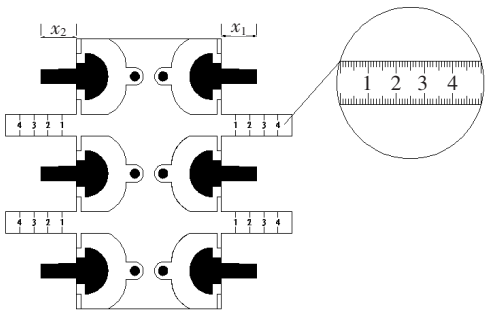


图 3 沥青试样回缩后的长度测量示意图

2.2 试样制备

沥青采用盘锦 70<sup>#</sup> 道路沥青 (AH—70<sup>#</sup>), 各项技术指标如表 1 所示。SBS 采用线形 SBS 改性剂。采

用 40 目橡胶粉,所选用的 TPS 颗粒直径为 2~3 mm,密度为 0.98 g/cm<sup>3</sup>。

表 1 AH—70<sup>#</sup> 沥青基本性能指标试验结果

试验项目	单位	实测值	规定值
针入度	30 $^{\circ}\text{C}$	0.1 mm	122.6
	25 $^{\circ}\text{C}$	0.1 mm	69.5
(100 g, 5 s)	15 $^{\circ}\text{C}$	0.1 mm	26.4
针入度指数 $PI$		0.15	-1.0~+1.0
延度 (5 cm/min, 15 $^{\circ}\text{C}$ )	cm	112	$\geq 100$
软化点 (环球法)	$^{\circ}\text{C}$	49.9	$\geq 46$
闪点 (COC)	$^{\circ}\text{C}$	308	$\geq 260$
密度 (15 $^{\circ}\text{C}$ )	g/cm <sup>3</sup>	1.027	实测值
溶解度 (三氯乙烯)	%	99.65	$\geq 99.5$
薄膜加热	质量损失	%	0.09
试验 (163 残留针入度比	%	69.8	$\geq 60$
$^{\circ}\text{C}$ , 5 h)	延度 (15 $^{\circ}\text{C}$ )	cm	20
			$\geq 15$

改性沥青采用高速剪切方法制备,具体步骤为:将基质沥青加热至 170  $^{\circ}\text{C}$ ,在 6 000 r/min 高转速剪切情况下,依次加入 SBS、橡胶粉及 TPS 后制备 3 种不同的改性沥青,保持剪切时间 1 h,停止剪切,将改性沥青放入烘箱 (160  $^{\circ}\text{C}$ ) 中溶胀发育 2 h 后,取出冷却,制得各组改性沥青。

2.3 试验方法

2.3.1 现行规范弹性恢复试验方法

弹性恢复试验 (T0662—2000) 在 25  $^{\circ}\text{C}$  水浴条件下进行,在延度试验仪上把橡胶沥青试样以  $(5\pm 0.25)$  cm/min 的速率拉伸至  $(10\pm 0.25)$  cm 时停止,并迅速从中间剪断,使试样保持在 25  $^{\circ}\text{C}$  水浴中 1 h,然后根据测得的试件残余长度计算其弹性恢复率。

2.3.2 该文提出的沥青弹性恢复率测量装置及试验方法

弹性恢复试验是检测沥青流变特性的方法,但具体试验规程各国有所不同:德国、法国是将改性沥青拉伸 20 cm 后 10 s 时剪断,测定 30 min 恢复率;美国的 AASHTO 301—95 是在拉伸 20 cm 并持载 5 min 后剪断,测定 1 h 的恢复率;ASTM D6084—97 以及中国的现行规程采用拉伸 10 cm 后立即剪断,测定 1 h 的恢复率。为更好地反映 SBS 改性沥青的流变特性,该研究设计的测试方法具体步骤是:

- (1) 按 JTG E20—2011 中的 T0605 沥青研读试验方法浇灌改性沥青试样、制模,最后将试样在 25  $^{\circ}\text{C}$  水槽中保温 1.5 h。
- (2) 将试样(图 2)两端的孔分别套到延度仪滑板

及槽端固定板的金属柱上,按延度试验方法规定的速率(5±0.25 cm/min)拉伸试样达到(10±0.25) cm 时停止拉伸。

(3) 拉伸一停止立即用剪刀在中间将沥青试样剪断,然后将两个半截的沥青试样从滑板上取下套在如图 1 装置的金属柱上;保持试样在水中 1 h,并保持水温不变。

(4) 将两个半截的回缩沥青试样轻轻捋直(沥青试样在回缩过程中会微微下垂),直接在新型弹性恢复测量装置上测量两个半截的回缩沥青试样的长度  $X_1$  和  $X_2$ (图 3)。

(5) 计算弹性恢复率( $D$ ):

$$D = \frac{10 - (X_1 + X_2 - 3)}{10} \times 100 \tag{1}$$

式中: $X_1$ 、 $X_2$  为第一、二沥青试样的长度。

2.3.3 低温弹性恢复试验

不同的改性沥青在低温条件下的性质不同,对温度的敏感性不同,随着温度的降低,改性沥青的各项黏弹性指标均发生变化,由流动体转变为橡胶体最终转变为玻璃体状态。根据改性沥青的这种变化特性,该研究调整标准弹性恢复试验的试验温度,分别测试改性沥青 5、15、25 ℃ 的弹性恢复值,区分对比不同种类的改性沥青的低温恢复能力。

2.3.4 极限弹性恢复试验

考虑到恢复速率受沥青内部应力水平的影响,调整改性沥青弹性恢复的剪断值,剪断值取为该种沥青的延度值  $T$  分别乘以 0.3、0.5、0.7,并在剪断沥青后,立刻开始计时,记录恢复过程中相应时间的恢复值,比较不同种类改性沥青的恢复速率。记录方式为:剪断后的前 10 min,每 2 min 记录一次,10 min 后,10 min 记录一次,60 min 终止试验。

2.3.5 持载弹性恢复试验

不同种类沥青的黏弹性和抵抗应力松弛性能不一样,为表征这种差别,通过将延度试样拉伸至沥青的延度值乘以 0.7 时停止拉伸,保持拉伸状态,并分别在 10、20、30 min 后剪断沥青,比较不同种类改性沥青在保持拉伸一段时间后弹性恢复能力的变化,其记录数据的方法和极限弹性恢复速率相同。

3 结果与讨论

3.1 改性沥青试验结果

研究表明改性剂在沥青中溶解,使沥青在相同温

度下与基质沥青相比黏度增大、软化点及当量软化点提高,提高幅度与改性剂分散于沥青中的微颗粒数量相关,且随改性剂掺量增加而增大,但延度和针入度明显降低,试验采用 3 种沥青的性能试验检测结果表明符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》技术要求,试验结果见表 2。

表 2 改性沥青试验结果

沥青种类	针入度(25 ℃)/ (0.1 mm)	延度 (5 ℃)/cm	软化点/ ℃
SBS 改性沥青(I-D)	56	28	71.0
橡胶改性沥青(20% 的 40 目胶粉掺量)	42	14	68.5
高黏沥青	38	34	92.0

3.2 低温弹性恢复试验结果

不同温度下改性沥青弹性恢复值见图 4。

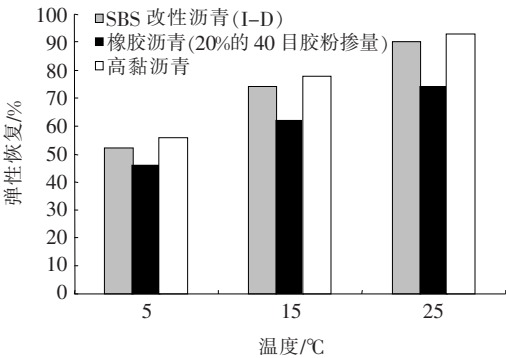


图 4 不同温度下改性沥青弹性恢复值

由图 4 可知:3 种改性沥青的弹性恢复值均随着温度的降低而减小,并且不同种类的改性沥青随温度的降低而减小的程度不同,可以对不同改性沥青弹性恢复能力进行区分。SBS 改性沥青和高黏沥青的弹性恢复值受温度的影响最为明显,在 25 ℃ 时的弹性恢复值分别为 90%、93%,5 ℃ 时仅为 52%和 56%,低温性能方面高黏沥青略优于 SBS 改性沥青,这是由于高黏沥青中的 TPS 改性剂含有少量的树脂和增塑剂,使沥青具有更好的自愈性,抗变形能力得到提高。

不同种类的改性沥青随温度的降低而减小的程度不同是由于沥青在不同改性剂改性后的微观结构不同。SBS 类改性沥青由于其在沥青中以丝状随机分布,之间通过聚苯乙烯链段之间的物理交联形成网络结构,在低温下聚苯乙烯链段微区起着物理交联点的作用,保证网络骨架结构不破坏,聚丁二烯段的高弹性保证了低温的弹性能力,所以 SBS 改性沥青具备很高

的低温延度值。高黏改性沥青由于结构中既具备橡胶粉改性在低温下较强的恢复能力,足以克服沥青低温下的硬度变形,还具备 SBS 改性后形成的网络骨架,并且由于高黏改性沥青中增黏组分的加入,使其具有较强的抗拉伸性能和更好的恢复能力,表现出最佳的低温恢复能力。而橡胶改性沥青由于其内部橡胶颗粒与沥青中的轻质组分能够很好地相容,又因为废胎胶粉本身是一种柔性材料,并在剪切过程中发生脱硫反

应,此过程也有利于改善沥青在低温条件下的韧性,但橡胶沥青的弹性恢复值与橡胶粉颗粒大小和加工工艺有较大关系,在试验结果再现性方面较差。

### 3.3 极限弹性恢复试验

采用该文设计的极限弹性恢复的测定方法,对 3 种改性沥青进行不同剪断长度的弹性恢复试验,得到恢复时间与弹性恢复值曲线图,并记录几种改性沥青的弹性恢复速率,试验结果如图 5 所示。

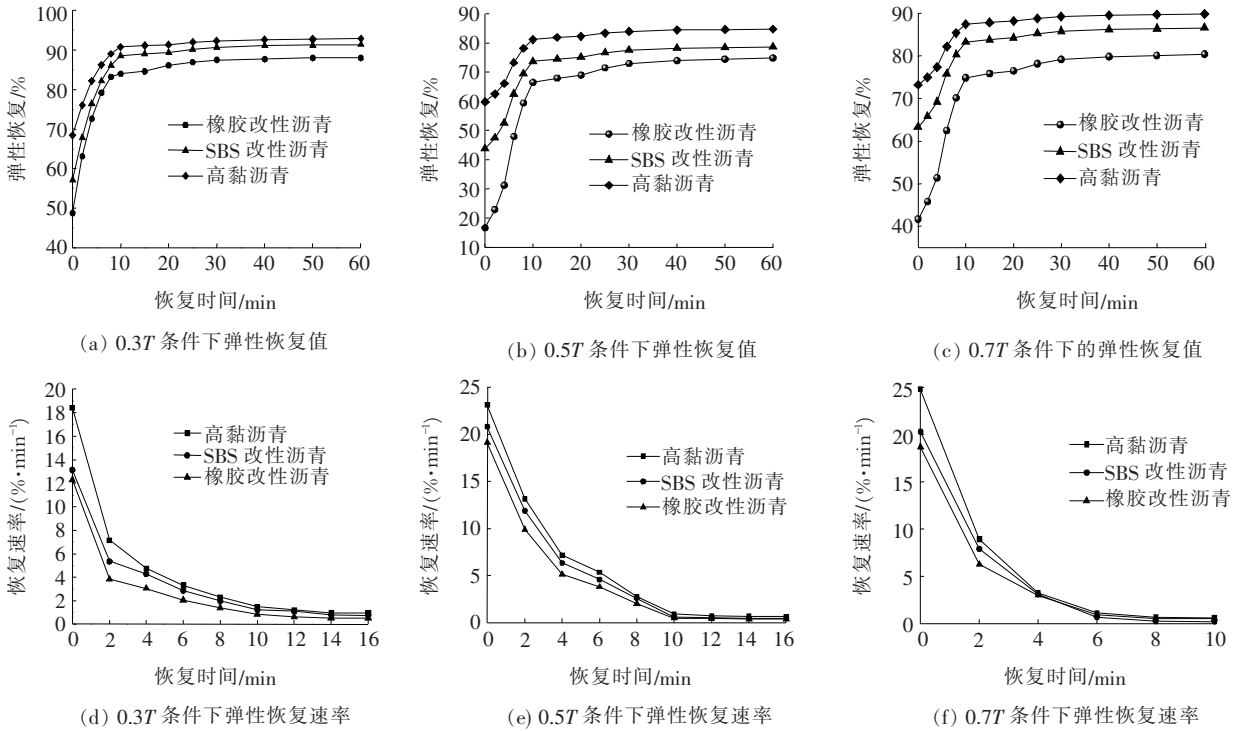


图 5 不同条件下改性沥青的弹性恢复值、恢复速率与时间的关系曲线(注:  $T$  为试件长度)

为研究方便,该文将改性沥青在恢复 10 min 的弹性恢复值称为瞬时恢复值,将 10~60 min 的弹性恢复值称为持续恢复值。由图 5(a)~(c)可知:3 种沥青的瞬时弹性恢复值大小顺序为:高黏沥青>SBS 改性沥青>橡胶改性沥青,这与低温弹性恢复试验研究的结果是一致的。瞬时恢复值和极限弹性恢复值的大小排序一致,两项指标具有很好的相关性,说明瞬时恢复值在一定程度上决定了极限弹性恢复值。同时,对比 0.3 $T$ 、0.5 $T$ 、0.7 $T$  条件下不同沥青的弹性恢复速率曲线可知:0.7 $T$  条件是 3 种条件中最早进入速率稳定期的工况,所以在持载弹性恢复试验中选择 0.7 $T$  时剪断。

### 3.4 持载弹性恢复试验

该文进行了 5℃ 下 0.7 $T$  时分别延时 10、20、30 min 再剪断沥青的持载弹性恢复试验,其弹性恢复时

间和弹性恢复值的关系如图 6 所示。

由图 6 可知:3 种沥青的弹性恢复值均随着延时的增长而显著降低,3 种沥青的瞬时弹性恢复值下降率的大小顺序为:高黏沥青>SBS 改性沥青>橡胶改性沥青,橡胶改性沥青的恢复特征不同,瞬间恢复值虽然发生了下降,但是即使是 30 min 的长持载时间下,瞬间回复率仍然有 40% 以上,并且在后续恢复过程中,曲线斜率大,恢复速率较高,尤其是 10 min 之后依然有较强的恢复速率,表现出了很好的抗持载恢复能力。

### 3.5 试验方法可行性验证

使用该方法对检测样本的弹性恢复进行对比,达到对该方法的准确性和适用性进行验证的目的。以 25℃ 下的 3 种改性沥青弹性恢复试验为例,试验结果准确验证如表 3 所示。



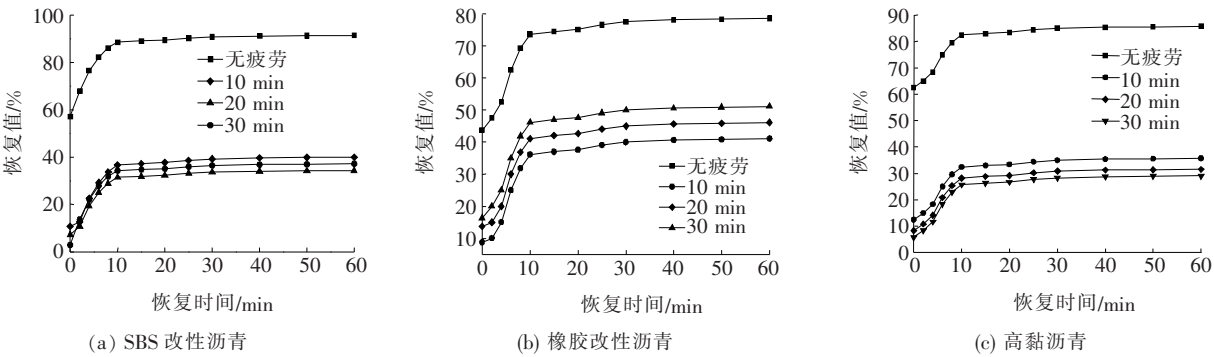


图 6 3 种沥青弹性恢复值与恢复时间的关系

表 3 试验结果准确性验证

沥青种类	回缩后第 1 沥青试样长度 度 $X_1$ /cm	回缩后第 2 沥青试样长度 $X_2$ /cm	实测弹性恢复率/%	实际弹性恢复率/%	实测与实际弹性恢复率之差/%
SBS 改性沥青 (I-D)	1.9	2.1	90.3	90.1	0.2
	2.1	2.0			
	1.8	2.0			
橡胶改性沥青 (20% 胶粉掺量)	2.7	2.9	74.7	74.2	0.5
	2.7	2.8			
	2.9	2.6			
高黏沥青	2.0	1.6	93.3	93.0	0.3
	1.7	1.9			
	2.2	1.6			

注:实际弹性恢复率为沥青厂家提供的数据,此数据由沥青厂家在生产沥青过程中经过大量的试验得到的稳定结果。

由表 3 可知:采用该方法测得的沥青弹性恢复率与实际弹性恢复率的误差很小,均在 0.5% 以内,可见该文方法准确度较高。

以下是该方法与现有方法的对比试验。试验中分别采用该文方法和现有方法对相同的沥青样品进行检测。检测结果对比分析见表 4~6。

表 4 两种测试方法试验结果误差对比

沥青种类	现有规范方法			该文方法	
	弹性恢复率/%	误差/%		弹性恢复率/%	误差/%
SBS 改性沥青	90.1	91.3	1.2	90.3	0.2
橡胶沥青	74.2	76.0	1.8	74.7	0.5
高黏沥青	93.0	94.3	1.3	93.3	0.3

由表 4、5 可知:与现有规范方法相比,该文试验方法误差更小,可见其测试精度更高,尤其是测试结果处于合格标准临界值,现有规范方法不能准确判断试样

表 5 两种测试方法偏差系数对比

沥青种类	偏差系数/%	
	现有规范方法	该文方法
SBS 改性沥青	2.2	1.0
橡胶沥青	2.5	1.1
高黏沥青	2.1	1.0

注:对 3 种沥青样品分别进行 20 次试验,根据其试验结果分别计算偏差系数。

表 6 两种测试方法工作效率对比

连续完成试验数量	试验所需时间*/min		工作效率提高率/%
	现有规范方法	该文方法	
1	64	62	3
2	128	64	100
3	192	66	190

注:\* 试验所需时间是指沥青试样从拉伸开始到试验结束所用的时间。

合格与否,该文方法的优势凸显。由表 6 可知:该文试验方法工作效率更高,且连续试验数量越多,工作效率提高越明显。

3.6 基于沥青黏弹性的弹性恢复试验方法流程图

综上,通过对 3 种不同类型的改性沥青进行不同

温度、不同持载时间等弹性恢复试验,给出基于沥青黏弹性的弹性恢复试验方法流程图和试验结果判定指标,如图 7 所示。

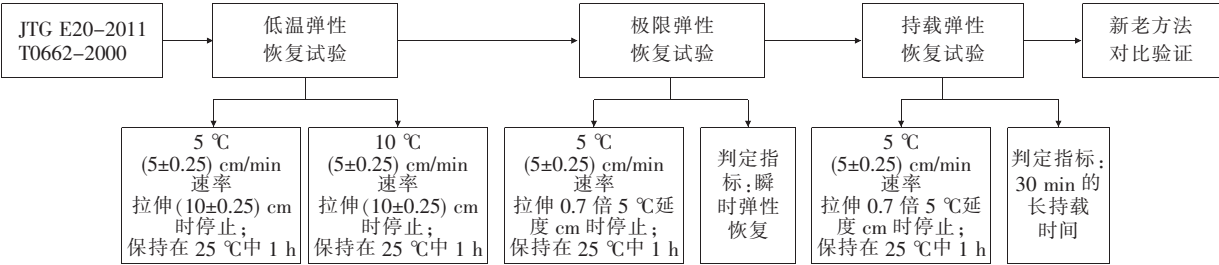


图 7 基于沥青黏弹性的弹性恢复试验方法流程图

4 结论

(1) 针对现有沥青弹性恢复率试验方法的不足,利用一种新型测量装置,提出了一种基于沥青黏弹性的改性沥青弹性恢复率的试验方法。

(2) 采用该研究设计的低温、极限、持载恢复试验评价方法,恢复特征区分明显,试验方法易于操作,适合作为研究不同改性沥青的弹性恢复性能的试验方法;极限弹性恢复试验中,10 min 瞬间恢复值与沥青弹性恢复值的大小有良好的相关性,可作为一种快速评价改性沥青弹性恢复性能的方法。持载试验过程中,针对不同的改性沥青,考虑到改性沥青长期性能要求,30 min 长持载时间可作为评价改性沥青长期老化性能的指标之一。

(3) 对该文方法进行了工作效率验证,并与现有规范方法进行了对比,试验工作效率高于现有规范方法,且连续试验数量越多工作效率提高越明显。同时对该文方法进行了准确性验证,并与现有规范方法进行了对比,试验结果准确度高于现有规范方法。

参考文献:

[1] Maccarrone, G. Holleran and G. p. Gnanasseelan [R]. Properties of Polymer Modified Binders and Relationship

to Mix and Pavement Performance, AAPT,1995.  
[2] X. Lu. on Polymer Modified Road Bitumens[R]. TRITA—IP FR,1997.  
[3] H. U. Bahia, W. P. Hislop, H. Zhai, et al. Classification of Asphalt Binders into Simple and Complex Binders[R]. A Paper Submitted for Presentation at the 1998 AAPT, 1998.  
[4] 美国国家沥青研究中心,美国阿拉巴马州奥本大学. 热拌沥青材料、混合料设计与施工[M]. 王嫵,译. 北京:人民交通出版社,2009.  
[5] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].  
[6] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].  
[7] 曹丽萍,谭忆秋,董泽蛟,等. 应用玻璃化转变温度评价 SBS 改性沥青低温性能[J]. 中国公路学报,2006.  
[8] 贾锦绣. 沥青混合料添加粒化聚合物适用性研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2004.  
[9] 弓锐,郭彦强,徐鹏. SBS/SBR 复合改性乳化沥青的性能研究[J]. 中外公路,2019(1).  
[10] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用[M]. 北京:人民交通出版社,2004.  
[11] 沈金安. 改性沥青与 SMA 路面[M]. 北京:人民交通出版社,1999.  
[12] 景彦平. 沥青结构及高聚物改性沥青机理研究[D]. 长安大学博士学位论文,2005.  
[13] DG/T J08—2109—2012 橡胶沥青路面技术规范[S].