文章编号：1000-8608(2011)01-0068-05

# 用 SHRP 方法评价再生沥青性能

陈静云*[1]， 赵慧敏[2]

（1.大连理工大学 土木工程学院，辽宁 大连 116024；
2.中铁工程设计咨询集团有限公司郑州设计院，河南 郑州 450052）

**摘要：** 考虑到目前评价道路沥青的相关指标，如针入度、软化点、延度等的局限性，为了更好地反映再生沥青随荷载、时间和温度变化的流变学性质，应用战略公路研究计划(strategic highway research program，SHRP)方法对3种再生沥青的路用性能进行了评价，分别从高温稳定性、中温耐疲劳性和低温抗裂性3个方面进行了分析.结果表明，再生后的沥青具有良好的高温稳定性、耐疲劳性和抗裂性，其他路用指标达到了一定的路用要求.

**关键词：** 道路工程；性能评价；SHRP；再生沥青；路面病害
**中图分类号：** U416.26 **文献标志码：** A

## 0 引 言

由于对道路沥青评价的常规指标并不能反映沥青随荷载、时间和温度变化时的流变学性质，而沥青的流变性直接影响沥青路面的使用性能，美国战略公路研究计划(strategic highway research program，SHRP)中提出的“按性能分级(performance graded，PG)的沥青胶结料标准规范”，是基于路用性能来选择适于铺筑热拌沥青路面的沥青胶结料[1].它将沥青材料的粘弹性能本质用流变学指标进行量化，提出了在高温、中温和低温下与路面使用环境相关的流变特性指标.PG分级中的高温、中温性能是用动态剪切流变仪(DSR)测试的，分别由车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 和疲劳因子 $G^*\sin\delta$ 表征其高、中温性能，低温性能是用低温弯曲梁流变仪(BBR)和直接拉伸试验机(DDT)测试的，由蠕变劲度 $S$、蠕变速率 $m$ 和破坏应变 $\varepsilon$ 表征.

沥青路面再生技术，是将需要翻修的旧沥青路面，经过回收分离集料与旧沥青，再加入再生剂与新沥青新集料组成新沥青混合料的技术.由于再生沥青中客观地存在着老化沥青，其再生后的材料性能极大地影响翻修后的路面性能.随着路面材料组成与老化状态的不同，可有多种再生方案.但无论哪种再生方案都面临再生沥青及其混合料的性能评价问题.本文利用SHRP PG系统对3种再生沥青的高温、中温和低温性能进行评价.

## 1 PG指标与路面病害

PG结合料规范中有4个与路面主要病害相关的参量：$G^*/\sin\delta$ 代表沥青的高温抗车辙性能；$G^*\sin\delta$ 代表沥青的中温耐疲劳性能；$S$ 和 $m$ 为沥青的蠕变劲度和其60 s时的蠕变速率，代表沥青的低温抗裂性能.

### 1.1 车辙与高温性能评价指标

车辙属永久变形，主要由以下两种变形构成：一部分是由沥青面层在行车荷载反复作用下压密而产生的压实变形，另一部分是由于沥青混合料在高温时的强度不足以抵抗重载反复作用而产生的剪切变形.虽然集料和混合料的整体性能是路面车辙产生的主要因素，但结合料的性能也是十分重要的.在道路服务的温度范围内高温车辙比常温或低温下产生的车辙要普遍得多.

沥青在通常的道路服务温度下，一般表现为粘弹性材料特征，既像弹性固体又像粘性液体.利

**收稿日期：** 2008-04-16； **修回日期：** 2010-12-10.
**基金项目：** 国家自然科学基金资助项目(50578031).
**作者简介：** 陈静云*(1956-)，女，教授，博士生导师，E-mail：chenjy@dlut.edu.cn.

用 DSR 在给定的温度和荷载频率下可测定沥青的复数剪切模量 $G^*$ 和相位角 $\delta$. $G^*$ 可解释为重复剪切下沥青总的抵抗变形能力，由与相位角 $\delta$ 有关的 $G'$ 和 $G''$ 组成，$G'$ 是沥青的贮存模量或弹性（可恢复）性能，而 $G''$ 是沥青的损失模量或粘性（不可恢复）部分[2].

SHRP 沥青结合料的高温稳定性能，以平均 7 d 路面设计温度下的原样沥青及旋转薄膜烘箱（rolling thin film oven，RTFO）短期老化后残留沥青动态剪切试验的 $G^*/\sin\delta$ 作为指标. 美国通过对 50 多条试验路的观察和研究，对沥青材料提出了作为抗永久变形的车辙因子指标如下[3]：

原始沥青：$G^*/\sin\delta > 1.0$ kPa；

RTFO 试验后残留物：$G^*/\sin\delta > 2.2$ kPa.

### 1.2　疲劳与再生沥青中温性能评价指标

沥青路面开裂主要有两种类型：一是行车荷载和温度共同作用产生的反射裂缝；二是由于沥青面层温度变化产生的温度裂缝. 大量研究表明，反射裂缝是结构层受拉疲劳、受拉屈服与剪切屈服的耦合效应.

路面的疲劳性能可以用控制应力模式（对厚面层）或控制应变模式（对薄面层）进行评价. 而疲劳裂缝是强基薄面结构病害的主要破坏形式. 因此，应变控制的加载模式是对路面疲劳性能评价的重要形式. 可以利用耗散能的概念推导出沥青耐疲劳性能参数.

对于粘弹性材料，耗散能

$$W_c = \pi\sigma\varepsilon\sin\delta \tag{1}$$

在控制应变加载模式下

$$\sigma = \varepsilon_0 G^*,\ \varepsilon = \varepsilon_0 \tag{2}$$

因此，有

$$W_c = \pi\varepsilon_0^2(G^*\sin\delta) \tag{3}$$

由式(3) 知，如果要防止疲劳裂缝出现，则必须减少耗散能的损失，因此，应当通过限制 $G^*\sin\delta$ 的值来限制耗散能. 根据大量的试验得出，SHRP PG 系统对沥青的抗疲劳性能的要求是[2]

RTFO 和压力老化试验（PAV）残留物：

$$G^*\sin\delta < 5\ 000\ \text{kPa}$$

### 1.3　低温开裂与低温性能评价指标

研究表明，许多沥青路面在建成后正式通车前就产生裂缝，它们都是由温度变化所引起的温度裂缝，不仅与当地的环境气候条件有关，而且与路面特性和路面结构的组合设计密切相关. 当外界温度下降，路面材料逐渐变硬，并开始收缩，收缩产生的拉应力超过路面材料的抗拉强度时，沥青路面就开裂[4].

沥青在低温下较多地表现为弹性性质，高温下为粘性性质. 低温弯曲梁流变试验是一种判断沥青弹-粘性的有效方法，但其测试温度比较低. 如果沥青材料的蠕变劲度太大，则材料呈脆性，路面易开裂. 因此，为防止路面开裂，需限制沥青材料的蠕变劲度 $S$，SHRP 认为 $S$ 应不大于 300 MPa，而表征沥青低温劲度随时间的变化率 $m$ 应大于或等于 0.30.

## 2　再生沥青的温度效应

### 2.1　高温性能试验

本试验采用美国生产的 CVO 03 型动态剪切流变仪，试验时采用应变控制加载模式，对原样沥青的应变控制值 $\gamma = 12\%$，而 RTFO 残留物的应变控制值 $\gamma = 10\%$，振动频率 $\omega = 10$ rad/s，约等于 1.59 Hz，试验温度为 52、58、64、70 ℃，平行金属板的直径为 25 mm，沥青膜厚度控制在 1 mm. 试验结果见图 1、2.

对于粘弹性材料来说，剪切作用下的损耗柔量 $J''$ 将部分或全部转化为不可恢复的热量损耗掉，

$$J'' = \sin\delta/G^* \tag{4}$$

如果 $G^*$ 越小，或 $\delta$ 越大，则损耗柔量 $J''$ 越大，也就表示材料的粘性成分（不可恢复部分）增大，这将不利于材料的抗车辙性能. 当 $G^*$ 一定时，$\delta$ 越小，说明再生沥青中的弹性成分越大，则其抗车辙能力越好.

3 种再生沥青的动态剪切试验结果见图 1、2. 对原样的再生沥青（即未经过老化的再生沥青），从图 1(a)可以看出，随着试验温度的升高，3 种再生沥青的 $G^*$ 都有相似的下降趋势，但是再生沥青 B 的明显优于其他两种. 随着温度的升高，对 3 种再生沥青按 $G^*$ 的大小排序结果为 B＞A＞C. 由于 $\delta$ 可体现粘性分量和弹性分量的比例关系，即 $\delta$ 越大，粘性分量在复合模量中所占比例越高，反之弹性比例越高[5]. 从图 1(b)也可以看出，随着试验温度升高而 $G^*$ 减小的同时，3 种再生沥青

的相位角 $\delta$ 都以一定的速率增大，但相对于 A 和 C 来说，B 的粘性成分有更多的衰减. 因此，按照弹性成分对 3 种再生沥青的排序为 B＞A＞C. 根据 SHRP PG 规范，对原样沥青，车辙因子 $G^*/\sin\delta \geqslant 1.00$ kPa. 从图 1(c)知，再生沥青 A、B 和 C 的 $G^*/\sin\delta$ 在 52、58、64 ℃时均大于 1.00 kPa，但仍有 B＞A＞C. 虽然 B 在 70 ℃时 $G^*/\sin\delta$ 小于 1.00 kPa，但是比较接近 1.00 kPa，说明再生沥青 B 的弹性成分较大，其抗车辙能力优于 A 和 C.

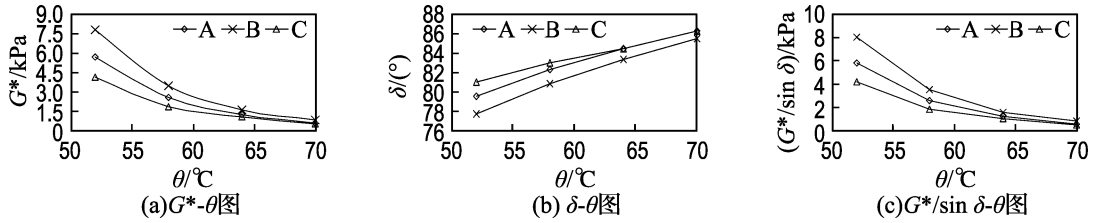



图 1 3 种再生沥青未老化时性能曲线

Fig. 1 Performence curves of three kinds of unaged recycle asphalts

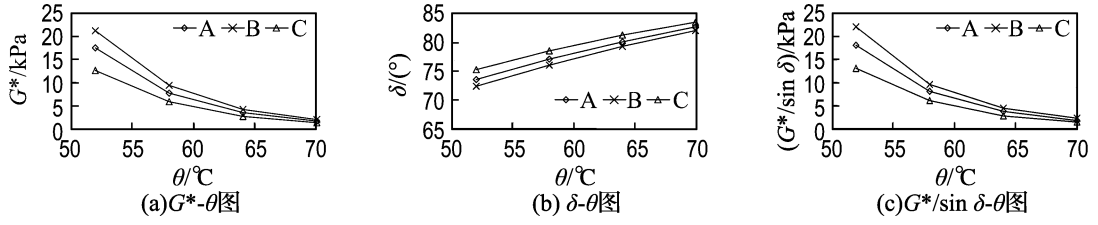



图 2 3 种老化再生沥青 RTFO 试验后残留物性能曲线

Fig. 2 Performence curves of the residues for three kinds of aged recycle asphalts by RTFO test

而真正反映抗车辙性能的是经过 RTFO 试验以后残留物的动态剪切试验，试验结果见图 2. 从图 2 可以看出，3 种再生沥青在经过 RTFO 后，它们的复数剪切模量 $G^*$ 随着温度的升高而减小，而相位角 $\delta$ 随温度升高而增大，车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 随温度升高而减小，也表明再生沥青的不可恢复部分增大. 根据 SHRP PG 规范，对于 RTFO 后残留物的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 不小于 2.20 kPa. 经过 RTFO 后 3 种沥青的残留物在 64 ℃时的车辙因子排序为 B＞A＞C，但在 70 ℃时已达不到 SHRP PG 规范要求.

从 3 种再生沥青未老化和 RTFO 后的 DSR 试验可以看出，再生沥青 B 的高温性能明显优于再生沥青 A 和 C，说明 B 的抗车辙能力较强. 但是从东北地区的气候来看，3 种再生沥青都是适用的.

## 2.2 中温性能试验

中温试验仍采用美国生产的 CVO 03 型动态剪切流变仪，试验时采用应变控制加载模式，对经过 RTFO 试验(163 ℃，85 min)和 PAV(100 ℃，2.07 MPa，20 h)后的残留物的应变控制值 $\gamma=1\%$，振动频率 $\omega=10$ rad/s，约等于 1.59 Hz，试验温度为 13、16、19、22、25 ℃，平行金属板的直径为 8 mm，沥青膜厚度控制在 2 mm. 试验结果见图 3.

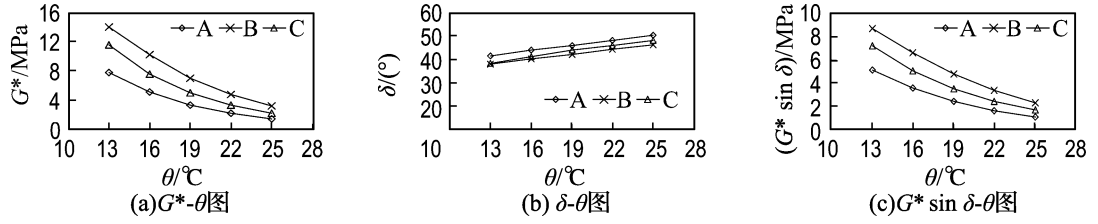



图 3 3 种再生沥青 PAV 后动态剪切性能曲线

Fig. 3 Dynamic shear performance curves of three kinds of recycle asphalts by PAV

经过模拟短期和长期老化过程可知，3 种再生沥青中的轻质成分已经部分挥发而被再度老化，与图 1(a)和 2(a)的高温试验结果相比，老化后再生沥青的 $G^*$ 明显增大而相位角 $\delta$ 有所减小，说明老化沥青抗变形能力较强，并且粘性较弱. 从 $G^*$ 的大小看，3 种再生沥青的排序为 B＞C＞A，故可认为，老化后的 3 种再生沥青中 B 的抗变形能力最强，但是粘性最弱.

对再生沥青进行中温试验时，依据 SHRP 规定沥青膜厚度为 2 mm，在沥青膜较薄时，受平行板的限制，测试的不是沥青自身的流变性能，无论是沥青的粘性还是弹性都受到制约，而在温度较低时，沥青则以弹性性质为主，所以厚度增加后，沥青的弹性优势立即得以恢复，表现为相位角 $\delta$ 随着试验温度的升高而增大[6]，从图 3(b)可以看到 3 种再生沥青的 $\delta$ 增加速率较为平缓.

从图 3(c)可以看出，对于 RTFO 及 PAV 后残留物来说，在 13～25 ℃的试验温度范围内，3 种再生沥青中 B 的疲劳因子 $G^* \sin\delta$ 最大，A 的 $G^* \sin\delta$ 最小，这意味着 B 的抗疲劳性能较差，A 的抗疲劳性能较好.

### 2.3　低温性能试验

低温弯曲梁流变仪(BBR)用于测量在恒定荷载和恒定的温度下沥青胶结料的变形或蠕变的大小，试验通过对沥青梁施加恒定荷载并量测整个 4 min 试验过程中梁中心的位移，应用经典的梁分析理论，计算出沥青的蠕变劲度[3]

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \tag{5}$$

式中：$S(t)$为时间 $t$ 时的蠕变劲度；$P$ 为荷载，$P$＝1 N；$L$ 为梁的间距，$L$＝102 mm；$b$ 为梁的宽度，$b$＝12.5 mm；$h$ 为梁的高度，$h$＝6.25 mm；$\delta(t)$为时间 $t$ 时的挠度.

蠕变速率是在劲度对数和时间对数曲线上任一时间的斜率. BBR 试验的测试温度是路面最低设计温度以上 10 ℃，规范要求 60 s 的蠕变劲度小于 300 MPa，$m$ 不小于 0.3，这两个值可以反映路面低温收缩时胶结料耗散应力的能力. 研究表明 BBR 试验能较好地体现沥青胶结料的低温性能，但是并不能很好反映改性沥青的变形能力[7]. 利用 BBR 试验对 3 种再生沥青进行了低温试验，以评价它们的低温性能.

3 种再生沥青在经过 RTFO 和 PAV 后，在－12、－18 和－24 ℃时低温性能的测试结果见图 4 和 5.

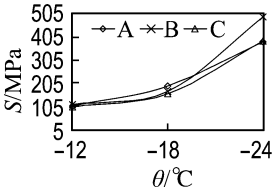



图 4　3 种再生沥青 $S$-$\theta$ 曲线

Fig. 4　$S$-$\theta$ curves of three kinds of recycle asphalts

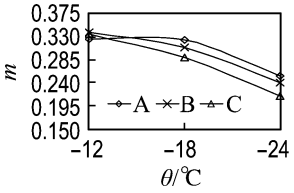



图 5　3 种再生沥青 $m$-$\theta$ 曲线

Fig. 5　$m$-$\theta$ curves of three kinds of recycle asphalts

对于低温造成的路面开裂，由于沥青劲度增加产生的应力可以通过自身的粘弹流动得到释放，低的劲度和高的释放速度对抵抗低温开裂是有利的.

从图 4 可知，－12 ℃时，A 和 C 的 $S$ 相差较小，而 B 的 $S$ 偏大. 随着温度的降低，B 在－24 ℃时的 $S$ 是三者当中最大的，说明 B 在低温收缩应变的同时具有的较大应力将导致路面的开裂. 故从低温性能方面的 $S$ 值考虑，A 的低温性能优于其他两种，B 的低温性能最差.

$m$ 代表了沥青通过粘弹流动对收缩应力的释放速度，$m$ 越大，说明释放速度越快，则沥青抗低温开裂性能越好. 从图 5 可以看出，3 种再生沥青 $m$ 值都随着温度的降低而减小，说明温度越低，沥青的释放速度越小，沥青在低温下的抗裂性得以证实. 从图 5 知，－12 ℃时，A 的 $m$ 值低于 B 和 C 的，但是随着温度的降低，B 和 C 的 $m$ 值都有所减小，但是 A 的 $m$ 值在－18 ℃和－12 ℃时几乎相同，说明 A 在此温度下仍保持较高的释放速度，即 A 是三者中低温性能最好的.

## 3 结 论

(1)本文采用 SHRP PG 沥青评价方法测试分析了3种再生沥青的高温、中温和低温性能,认为再生沥青基本达到路用要求,为发展沥青热再生技术提供了必要的理论基础.

(2)再生沥青高温性能评价结果表明,DSR试验测试再生沥青结合料的动态流变性状态参数 $G^*$ 和 $\delta$ 与温度之间存在相关关系,即随着温度的升高,$G^*$ 逐渐衰减,而 $\delta$ 增大,因此,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 也就随之减小.从结果可以看出沥青 B 的高温稳定性最好.

(3)再生沥青的抗疲劳性能评价结果表明,虽然 A 和 C 的高温性能相近,但经过长期老化后 A 的耐疲劳性最好,而 B 的最差,C 介于二者之间.

(4)低温性能评价结果表明,3种再生沥青在 −18 ℃到 −24 ℃内的蠕变劲度 $S$ 和蠕变速率 $m$ 的变化幅度较大,因此,3种再生沥青的低温性能有待进一步提高.

## 参考文献:

[1] 李志军,王仁辉. 按 PG 性能等级规范评价国产重交通道路沥青的性能[J]. 石油沥青, 2002, **16**(3):23-26

[2] 美国沥青再生协会. 美国沥青再生指南[M]. 北京:人民交通出版社, 2006

[3] 吕伟民. 沥青混合料设计原理与方法[M]. 北京:人民交通出版社, 2001

[4] 宋国伟,陶洁璇. 沥青路面裂缝分析[J]. 黑龙江交通科技, 2006(11):42-43

[5] 杜月宗,赵 可. 基质沥青与改性沥青在 SHRP PG 分级试验中的不同表现[J]. 石油沥青, 2003, **17**(B04):100-105

[6] 陈华鑫,袁迎捷,张争奇,等. 动态剪切流变仪试验影响因素研究[J]. 中南公路工程, 2005, **30**(2):142-145

[7] SOLEYMAN Hamid-reza. Viscoelastic characterization of recycle asphalt for asphalt pavement recycling [D]. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1998

# Performance evaluation of recycle asphalt by SHRP

CHEN Jing-yun[*1], ZHAO Hui-min[2]

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Zhengzhou Designing Institute of China Railway Engineering Consultation Group Co. Ltd., Zhengzhou 450052, China)

**Abstract**: Thinking of the disadvantages to evaluate road asphalt with current correlative indexes, such as penetration, soft point, ductility, etc., and reflect the rheology of recycle asphalt better when the load, time and temperature change, the strategic highway research program (SHRP) was used to evaluate the in service performances of three kinds of recycle asphalt. The stability, anti-fatigue and anti-cracking at high-temperature, middle-temperature and low-temperature are analyzed. The results indicate that the performances of the high-temperature stability, anti-fatigue and anti-cracking of the recycle asphalt binder are good, and the other indexes can achieve the requirements of service.

**Key words**: road engineering; performance evaluation; SHRP; recycle asphalt; pavement disease