

基于时间扫描试验、LAS试验和弹性恢复试验的复合改性沥青抗疲劳性能研究

王永吉^{1,2} 王云^{1,2} 董会明^{1,2} 张全兵^{1,2}

1. 甘肃畅陇公路养护技术研究院有限公司; 2. 甘肃省公路养护技术创新中心

摘要: 重复交通荷载引起的疲劳开裂是降低沥青路面性能和使用寿命的主要病害之一。沥青混合料的沥青相对于抵抗疲劳破坏是最关键的, 因此必须仔细评估其疲劳性能。本文评价7种具有代表性的改性沥青的抗疲劳性能, 包括SBS聚合物改性沥青、橡胶粉改性沥青、终端端共混(TB)橡胶沥青、EVA改性沥青、岩石沥青改性沥青和生物油改性沥青。评估了三种试验(时间扫描试验、LAS试验和弹性恢复试验)和四种不同的失效准则。结果表明, 弹性改性沥青的疲劳性能最好, 其次是非弹性改性沥青和普通沥青。弹性改性沥青在较高应变水平条件下表现出更好的抗疲劳性, 此外, LAS试验的疲劳寿命与弹性恢复有很好的相关性, 并且这种相关性随应变水平的提高而提高, 表明弹性恢复率是表征沥青混合料疲劳寿命的一个重要指标。

关键词: 改性沥青; 时间扫描试验; LAS试验; 弹性恢复试验; 疲劳失效

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.06.046

一、引言

重复交通荷载引起的疲劳开裂是降低沥青路面性能和使用寿命的主要病害之一^[1]。从材料层面来看, 沥青混合料的疲劳性能是一个关键性能。沥青混合料的沥青相是抵抗疲劳破坏的最关键因素, 因此必须对其疲劳性能进行评估。目前的沥青性能等级(PG)规范中使用参数 $G^* \sin \delta$ 来量化沥青的抗疲劳性^[2], 时间扫描试验的概念很简单, 因为它是疲劳型载荷的直接应用, 如果在足够的刚度水平下进行, 可以测量相关的疲劳性能指标。大量研究致力于定义沥青材料试验中的疲劳破坏, 最常用的标准是刚度损失50%^[3]。定义沥青疲劳失效的另一种方法是使用与损伤演化的显著变化相对应的现象学参数, 例如, 相位角峰值已被用于定义沥青混凝土和细集料砂浆的疲劳失效^[4]。

为了避免时间扫描试验花费时间长, 科学家开发了线性振幅扫描(LAS)测试。LAS测试本身就是振幅扫描程序代替疲劳型试验, 当配合简化的粘弹性连续损伤(S-VECD)模型时振幅扫描数据能够在短时间内模拟和预测沥青疲劳寿命^[5, 6]。因此, LAS试验在表征各种沥青材料的疲劳特性方面越来越受到重视和应用。

本文通过不同沥青粘结剂的疲劳试验, 对几种具有代表性的改性沥青的疲劳性能进行了表征。制备了7种具有代表性的改性沥青, 使用三种疲劳试验(时间扫描试验、LAS试验和DSR弹性恢复试验)来测试沥青的抗疲劳特性, 在时间扫描试验中, 比较了四种失效准则, 在LAS测试中, 加载了不同应变水平。最后, 研究了不同

疲劳试验计算的疲劳寿命之间的相关性, 并对评价改性沥青的疲劳性能提出了建议。

二、材料与方法

(一) 原材料

以PG 58-22 ESSO普通沥青为原料制备改性沥青, 采用了SBS、橡胶粉、EVA、岩石沥青和生物油等5种常用改性剂。本文所使用的改性沥青均是在实验室条件下将普通沥青与适当的改性剂混合制备而成。为了制备EVA和岩石改性沥青, 首先将普通沥青加热到165℃, 并将所需的改性剂添加到热沥青中, 接着将混合物剪切20分钟(4000 rpm), 然后搅拌60分钟(800 rpm)。对SBS改性沥青和橡胶粉改性沥青进行了不同的制备。制备温度设定到180℃, 剪切阶段延长到60分钟, 以确保更好的膨胀和均匀。

为了模拟现场短期老化, 在制备完成后, 所有沥青按照AASHTO T 240进行RTFOT老化, 收集老化后的残留物进行疲劳试验。

(二) 试验方法

1. 时间扫描试验

时间扫描试验是在应变控制模式下进行的, 频率为10赫兹, 使用的是TA DHR-3 DSR, 在25℃下使用的是2毫米厚、8毫米直径的沥青样品。沥青的高应变大约是混合应变的90~100倍, 因此, 用于沥青的应变极限设定为5%和10%。

目前, 有许多失效准则来定义时间扫描试验的疲劳寿命。本研究调查和比较了四种最有代表性的方法, 即50%模量减少、相位角峰值、S×N峰值和20%弹性恢复偏差值。

2. LAS试验

LAS试验用于评估沥青抗疲劳损伤的能力。LAS测试包括两个步骤: 第一步, 测量未受损的流变特性, 第二步, 测量沥青的受损特性。试验在应变控制模式下进行, 使用振荡剪切, 频率为10 Hz。加载过程包括10秒的恒定应变振幅间隔, 随后是另一个增加应变振幅的间隔。应变幅度从0.1%增加到30%。每10个载荷循环记录一次峰值剪切应变和峰值剪切应力, 以及相位角和动态剪切模量。

疲劳寿命使用等式(1)计算。

$$N_f = A(\gamma_{\max})^{-B} \quad (\text{式1})$$

其中A和B是系数, 取决于使用简化粘弹性连续损伤理论(S-VECD)计算的材料特性。 γ_{\max} 是给定路面结构的最大预期粘结应变。该试验按照AASHTO TP101在25℃

下进行。在5%、10%、15%的应变水平下，根据LAS试验结果计算疲劳寿命。每种沥青至少测试两次以获得平均值，变异系数在15%以内。

3. 弹性恢复试验

采用动态剪切流变仪（DSR-ER）测试沥青的弹性恢复率。根据AASHTO TP123-16，在DSR 8 mm平行板装置上进行试验。板间隙为2 mm，测试温度为25℃、以0.02315/s的恒定应变率剪切沥青2分钟。然后施加恒定的零剪应力30分钟，这与试验的松弛部分相对应。在恒定剪切状态和松弛状态下记录剪切应变，根据式（2）计算弹性恢复率。

$$ER = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \quad (式2)$$

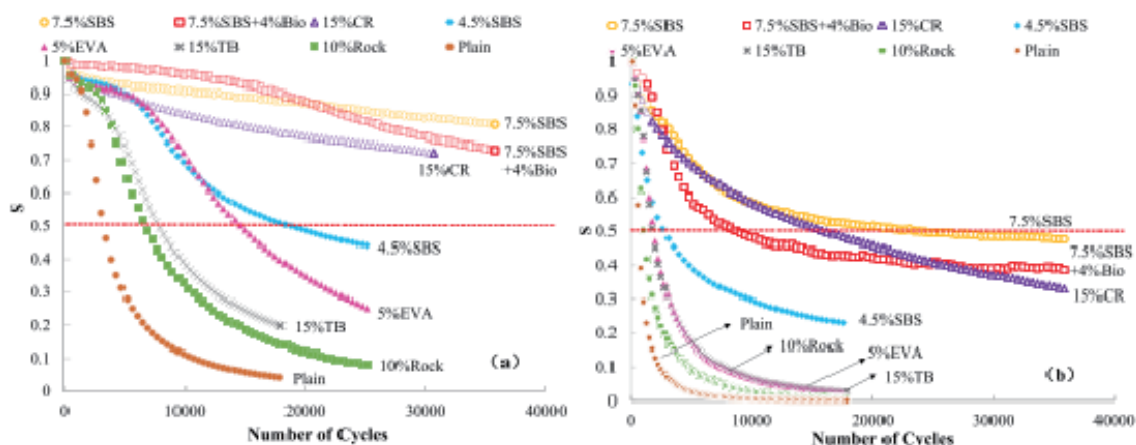


图1 时间扫描试验中模量与加载周期的关系图，应变水平：（a）5%，（b）10%

为了使15%CR、7.5%SBS、7.5%SBS + 4%Bio产生50%的模量降低，在10%应变水平下再次进行时间扫描测试。在10%的应变水平下，所有沥青都没有显示初始平台，但硬度迅速降低。然而，即使在36000次负载循环后，15%CR、7.5%SBS、7.5%SBS + 4%Bio仍保持相当高的结构完整性，并显示出宽广的平台。可以看出，非弹性改性沥青在10000次循环内迅速失效，因为它们的模量接近0。

2. 相位角峰值准则

时间扫描测试中的相位角的峰值在两种应变水平（5%，10%）下都不明显，尤其是对于弹性改性沥青。因此，相位角峰值准则并不适合确定疲劳寿命。由于相位角峰值的理论背景尚不清楚，本文不推荐使用这种方法确定疲劳寿命。

3. S×N峰值准则

S×N计算结果与观察到的相位角相似，弹性沥青在两个应变水平下都没有看到S×N峰。其余沥青的疲劳寿命等级为：5%EVA>15%TB>10%岩石>普通沥青。这与模量降低准则的排序是一致的。

4. 20%弹性恢复偏差准则

DSR弹性恢复在5%应变水平下，改性沥青的DER偏差远小于20%。DSR弹性恢复的演化由G*和相位角的变化所决定。基于G*演变和相位角演变的结果，G*的变化远大

式中： γ_1 为剪切阶段结束时的应变， γ_2 为整个试验结束时的恢复应变。

三、结果与讨论

（一）时间扫描试验

1. 50%模量折减准则

时间扫描测试结果如图1所示。在5%应变水平下，具有高改性剂剂量（15% CR、7.5%SBS、7.5%SBS + 4%Bio）的弹性改性沥青显示出优异的疲劳性能，因为它们的刚度在36000次振荡循环后仅减少约20%。4.5%SBS的抗疲劳性略低于上述沥青，但仍优于其他非弹性改性沥青。其他沥青在加载开始时仅显示一个短的平台区，随后急剧下降，这表明材料发生了疲劳失效。

于相位角的变化。以4.5%SBS沥青为例，在5%应变水平的的时间扫描试验中，其模量变化为50%，相位角变化仅为0.9%。因此，DER的演化主要依赖于G*的演化。

通过对4种不同破坏准则的比较，得出相位角峰和S×N不能量化高性能弹性改性沥青的结论。50%模量降低准则和20% DER偏差准则均受G*演化的支配，具有较强的相关性。

（二）LAS试验

LAS测试的应力-应变曲线汇总如图2所示。图2显示

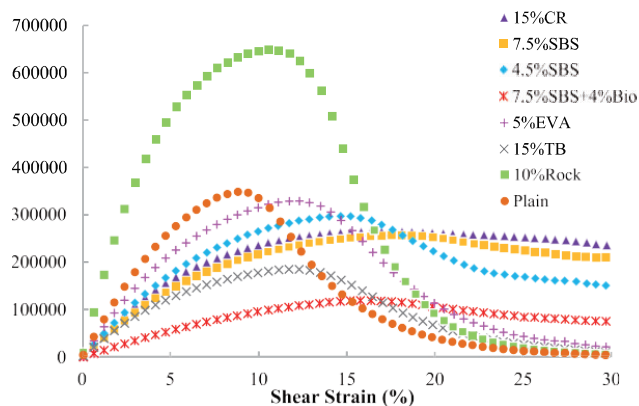


图2 LAS试验的应力应变图

了当非弹性改性沥青和普通沥青在应变增加的情况下逐渐屈服，弹性改性沥青通常不会屈服。弹性改性沥青在高达30%的应变水平下仍显示出相当大的应力，表明它们仍保持相当强的结构完整性。

LAS测试中的峰值应力不一定转化为强抗疲劳性，但它是材料硬度的良好指标。峰值应力排序如下：10%岩石>普通沥青>5%EVA>4.5% SBS > 15% CR > 7.5% SBS > 15% TB > 7.5% SBS + 4% Bio。关于特定改性剂的影响，岩石改性沥青表现出最高的峰值应力，但是它不具有足够的韧性/延展性，因此倾向于表现出脆性断裂。由于黏性生物油的引入，7.5%SBS + 4%Bio表现出最小的峰值应力。15%CR和7.5%SBS表现出中等峰值应力和相当大的韧性/延展性，从而表现出理想的抗疲劳性能。

(三) 弹性恢复试验

改性沥青的DSR-ER试验结果见图3。显然，弹性改性沥青（15%CR、4.5%SBS、7.5%SBS和7.5%SBS + 4%Bio）显示出比非弹性改性沥青高得多的弹性恢复。由于制备方法不同，15%TB的弹性恢复率比15%CR低得多，即使它们使用相同的橡胶粉作为原始改性剂。15%TB经历极端高温固化，显示出较小交联度，并因此降低了橡胶恢复能力。

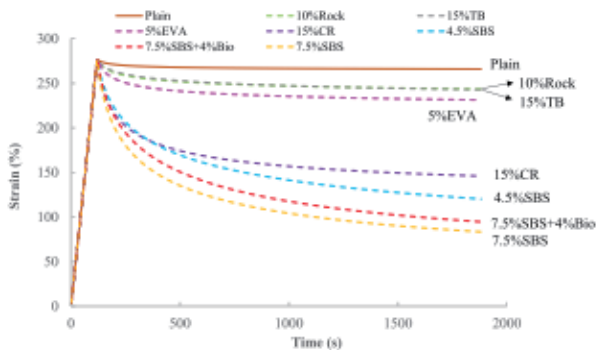


图3 DSR弹性恢复试验得出的回收率

(四) 不同测试结果之间的相关性

1. 时间扫描试验与LAS试验

通过关联时间扫描试验和LAS试验计算的疲劳寿命，研究了它们之间的关系。时间扫描试验的应变水平设定为10%，因此LAS试验疲劳寿命也以10%的应变水平计算。从结果可知，时间扫描测试和LAS测试之间有很强的相关性（ $R^2 = 0.94$ ）。两种试验都不考虑改性剂的不同，均量化不同改性沥青的疲劳寿命。

2. LAS试验与弹性恢复试验

许多研究表明，沥青弹性恢复与其抗疲劳性能之间可能存在相关性。DSR弹性恢复与LAS试验疲劳寿命的关系如图8所示。采用5%、10%、15%和20% 4种应变水平计算疲劳寿命，相关性结果为0.67、0.78、0.83、0.86。显然，LAS试验的疲劳寿命与弹性恢复之间存在逻辑关联，应变水平的提高显著改善了关联性。随着应变水平从5%增加到20%， R^2 从0.67增加到0.86。弹性恢复率与高应变水平下LAS的疲劳寿命有较好的相关性，因此弹性恢复率可作为沥青/混合料疲劳寿命表征的指标。

3. 时间扫描试验与弹性恢复试验

根据所测得数据得出DSR弹性恢复与时间扫描试验疲劳寿命（10%应变）的关系存在逻辑相关性（ $R^2 = 0.75$ ），但其相关性不如弹性恢复与15%应变水平LAS疲劳寿命之间的相关性（ $R^2 = 0.84$ ）强。

四、结论

本文比较了三种沥青疲劳试验（时间扫描试验、LAS试验和DSR弹性恢复试验）在评价改性沥青疲劳特性方面的能力。在时间扫描试验中，比较了四种失效准则，在LAS试验中，研究了加载应变的影响以及三种试验结果之间的相关性，得出以下结论：

(1) 在时间扫描试验中，相位角峰和 $S \times N$ 峰无法区分，不适用于几种高性能弹性改性沥青。50%模量折减准则是最推荐的准则，用模量折减准则计算的疲劳寿命与20%弹性恢复偏差准则计算的疲劳寿命具有较强的相关性（ $R^2 = 0.96$ ）。

(2) 时间扫描的测试压力需要谨慎确定，小的应变水平（如5%）无法使几种高性能沥青遭受足够的破坏，而大的应变水平将使弱沥青的性能难以区分。

(3) 疲劳寿命与弹性恢复率之间存在较好的相关性，且随应变水平的提高而提高。这表明弹性恢复率是沥青/混合料疲劳寿命表征的一个重要指标。

(4) 弹性改性沥青的疲劳性能最好，非弹性改性沥青次之，普通沥青次之。弹性改性沥青具有良好的弹性恢复能力，在较高的应变水平下表现出较好的抗疲劳性能。

参考文献

[1] Jiao Liya, Harvey John T, Elkashef Mohamed, et al. Investigation of surrogate performance related tests for fatigue cracking of asphalt pavements[J]. Transportation Research Record, 2021, 10: 96-108.

[2] 吴碍. 沥青混合料抗疲劳性能评价方法研究[D]. 江苏: 东南大学, 2016.

[3] 王超, 张金喜. 沥青结合料疲劳失效定义与失效准则[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(10): 1574-1583.

[4] 王昊鹏, 杨军, 王征, 等. 沥青混合料疲劳自愈合特性研究[J]. 现代交通技术, 2014, 11(04): 1-5.

[5] 武金博. 橡胶沥青混合料拌和温度优化研究[J]. 公路工程, 2021, 46(03): 295-300.

[6] 杨光, 王旭东, 时敬涛. 基于耗散能方法评价硬质沥青混合料抗疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(06): 913-919.

基金项目: 甘肃省科技计划重点研发项目(项目编号: 20YF3GA044, 21YF11GA013);

甘肃省交通运输厅科研项目: 《基于全寿命周期的甘肃省高速公路沥青路面结构与材料优化设计研究》; 《基于材料基因组技术的改性沥青结构与性能关系研究》(项目编号: 2021-21)。

作者简介: 王永吉(1989-), 男, 硕士研究生, 工程师, 现从事公路工程检测管理工作。