

沥青疲劳试验方法评价

袁海¹, 朱洪洲^{1,2}, 魏巧¹, 胡蓝心¹, 廖能武³ 编译

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 交通土工工程材料国家地方联合工程实验室;
3. 重庆高速工程顾问有限公司)

摘要: Superpave 规范中通常采用疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 来表征沥青的疲劳性能, 但疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 是在线黏弹性范围内测得的, 本质上属于线黏弹性模量类的指标, 不能合理表征材料的疲劳损伤特性。基于此, 该文采用疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 测试、弹性恢复试验、多应力蠕变恢复 (MSCR) 试验、线性振幅扫描 (LAS) 试验、双边缺口拉伸 (DENT) 试验对 6 种沥青的疲劳性能进行了表征, 并采用沥青混合料推拉疲劳试验进行验证, 旨在找出更为合理的沥青疲劳性能评价方法。通过对比沥青试验和沥青混合料推拉疲劳试验的结果, 证实了 $G^* \sin \delta$ 、MSCR 试验和 LAS 试验的结果与对应沥青混合料疲劳性能的关联度较差。DENT 试验和弹性恢复试验的结果与沥青混合料疲劳试验结果具有相同的疲劳等级, 相较完全经验性的弹性恢复试验, DENT 试验更为基础, 推荐采用 DENT 试验评价沥青疲劳性能。

关键词: 沥青; 疲劳性能; 双边缺口拉伸 (DENT) 试验; 线性振幅扫描 (LAS) 试验

1 引言

现行沥青 PG 分级是在美国公路战略研究计划 (SHRP) 沥青项目的基础上制定的, 其主要研究对象是基质沥青, 不适用于改性沥青。相关研究表明, PG 分级能较好地评价沥青的整体质量, 但在某些情况下无法准确表征沥青的抗车辙性能和抗开裂性能。此外, 规范中沥青疲劳性能的评价标准不够严谨, 目前 Superpave 规范中使用参数 $G^* \sin \delta$ 来评价沥青的疲劳性能。SHRP 研究假设每个加载循环的耗散能 (应

变控制模式, $w_i = \pi \epsilon^2 G^* \sin \delta$) 越低, 对应的累积损伤越小, 即 $G^* \sin \delta$ 值小的沥青具有更好的抗疲劳开裂能力, 中温条件下 $G^* \sin \delta$ 必须小于 5 000 kPa, 否则认为沥青发生疲劳破坏。

许多研究人员质疑参数 $G^* \sin \delta$ 的可靠性。 $G^* \sin \delta$ 是一个基于刚度的参数, 采用动态剪切流变仪 (DSR) 在较小应变、固定频率 (10 rad/s)、少量剪切作用次数下测量得到, 这明显与具有更多加载周期和损伤特征的复杂的疲劳现象不同。为提出新的沥青疲劳性能分析及评价指标, 国内外学者进行了大量的研究。表 1 为现有的试验方法以及每种方法的特点。

表 1 沥青疲劳性能试验方法

项目	规范要求	评价指标	试件老化程度	试验设备	试验材料加载模式	超出线弹性范围	优点	缺点
疲劳因子试验	AASHTO T315	$G^* \sin \delta$	长期老化	DSR	沥青剪切	否	标准试验	无法准确评价疲劳性能
MSCR 试验	AASHTO TP 70	蠕变恢复率	短期老化	DSR	沥青剪切	是	标准试验	新试验, 指标与疲劳相关性未知
时间扫描试验	NCHRP 9-10	疲劳寿命	短期老化 长期老化	DSR	沥青剪切	是	与混合料疲劳试验相关性好	潜在的边缘裂缝效应
LAS 试验	文献[9]	不同应变水平下的疲劳寿命	短期老化/ 长期老化	DSR	沥青剪切	是	通过 LTPP 数据初步验证	新试验

收稿日期: 2020-04-10 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 50808189)

续表 1

项目	规范要求	评价指标	试件老化程度	试验设备	试验材料加载模式	超出线弹性范围	优点	缺点
弹性恢复试验	AASHTO T301 ASTM D6084	弹性恢复率	短期老化	延度仪	沥青拉伸	是	标准试验	经验性测试
DENT 试验	加拿大安大略省交通部: LS-299	裂纹尖端开口位移 CTOD	长期老化	测力延度仪	沥青拉伸	是	通过 FHwA—APT 数据验证	新试验,半经验性测试
DMA 试验	文献[10]	疲劳寿命	未老化	动态力学分析仪	沥青砂浆剪切	是	考虑沥青和细集料对疲劳的影响	试件成型和孔隙控制

目前,可用于测试沥青疲劳性能的方法主要有以下 4 种:

(1) 线性振幅扫描(LAS)试验: Bahia 等最早提出在常应变(或时间扫描)/常应力模式下使用动态剪切流变仪来测试沥青疲劳性能。该方法理论上是合理的,但仍存在一定缺陷。Anderson 等提出,由于在某些情况下沥青的塑性流动和边缘裂缝效应,基于 DSR 的时间扫描测试不适用于表征疲劳性能。Bahia 等开发了一种新的试验方法,称为线性振幅扫描(LAS)试验,其试验结果与路面长期使用性能(LTPP)研究计划中的疲劳裂缝数据具有良好的相关性。周水文等采用 LAS 试验测试了 13 种沥青的疲劳性能,提出应采用 PAV 老化后的试样进行试验,以应力峰值失效点定义沥青疲劳失效。

(2) 多应力蠕变恢复(MSCR)试验: MSCR 试验通常用于表征沥青的抗车辙性能,但蠕变恢复率可用于评价沥青的延迟弹性响应,如蠕变恢复率与疲劳性能相关性良好,则该法可用于沥青疲劳性能评价。

(3) 双边缺口拉伸(DENT)试验: 加拿大皇后大学的研究人员最早提出对韧性材料断裂能的测量,以评估沥青的抗疲劳开裂能力,该试验是一个试样两侧带缺口的延度试验。美国联邦公路管理局(FHwA)的研究人员采用 DENT 试验对加速加载疲劳试验(ALF)中用到的沥青进行测试,发现 DENT 试验的结果与加速加载试验数据之间具有很好的等级相关性。罗浩原等采用 DENT 试验和疲劳因子测试评价了 7 种不同沥青的疲劳性能,并采用四点弯曲试验从混合料层面进行性能验证,其试验结果同样表明 DENT 试验结果与混合料疲劳性能更具相关性。

(4) 动态力学分析(DMA)试验: Kim 等使用动态力学分析试验表征沥青的疲劳性能和愈合潜力。不同于其他以沥青作为试验材料的试验,DMA 试验以沥

青玛蹄脂作为试验对象。DMA 试验的优点是能够清晰地定义疲劳失效并避免沥青塑性流动和边缘裂缝效应带来的影响。该试验主要关注砂或细集料对沥青材料疲劳性能的影响,显然,该试验需要确定一种标准材料进行试验,而不是砂或细集料。

该文主要进行 $G^* \sin \delta$ 、弹性恢复试验、MSCR 试验、LAS 试验和 DENT 试验共 5 种沥青试验,并与沥青混合料推拉疲劳试验结果进行比较,以确定最合理的沥青疲劳评价方法。

2 技术路线

技术路线如图 1 所示。

3 沥青疲劳试验

3.1 沥青

由于 SHRP 计划已对基质沥青的疲劳性能有较为详细的研究,因此该文主要选择 5 种改性沥青和 1 种基质沥青(对照组)作为材料进行试验来评价现有沥青的疲劳性能。沥青相关信息见表 2。试验中涉及到的沥青拌和温度和压实温度均由相关厂家提供。

3.2 沥青试验介绍

(1) PG 分级试验: 依据 AASHTO T315 中使用动态剪切流变仪(DSR)测定沥青的流变特性和 AASHTO T313 中使用弯曲梁流变仪(BBR)测定沥青的弯曲蠕变劲度的规定对 6 种沥青进行试验。

(2) 弹性恢复试验: 按照 AASHTO T301 中用延度仪对沥青材料进行弹性恢复试验”或 ASTM D6834A 中使用延度仪对沥青材料进行弹性恢复的标准试验方法的规定进行试验,试验所用沥青均经过 RTFO 老化,试验温度为 25℃。试验中,沥青试样经

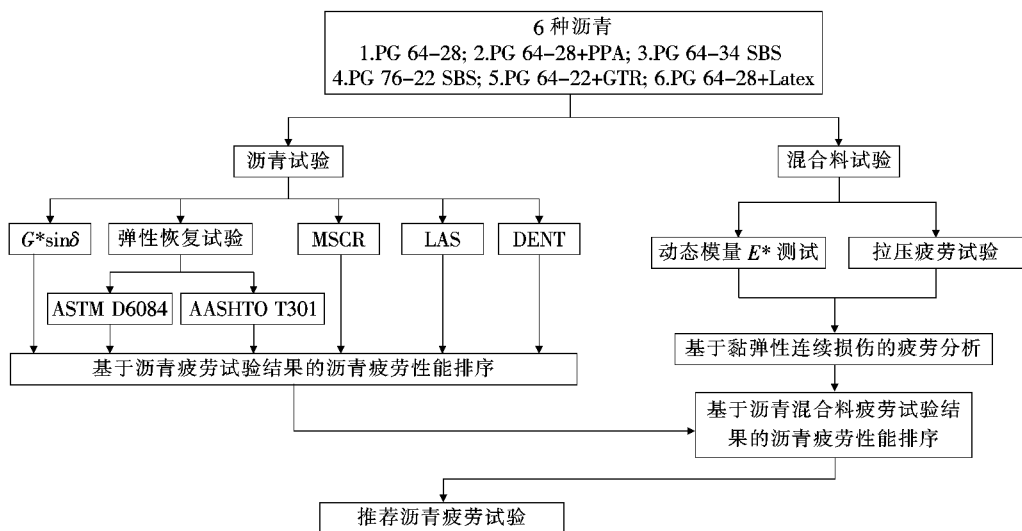


图 1 技术路线

表 2 试验用沥青

沥青种类	改性情况
PG 64-28	未改性
PG 64-28+PPA	聚磷酸(PPA)
PG 64-34 SBS	SBS
PG 76-22 SBS	SBS
PG 64-22+GTR	12%胶粉
PG 64-28+Latex	2.0%胶乳

拉伸至规定的伸长率并保持,然后在拉伸试样的中间切开并测定每个试样的回弹率。AASHTO T301 和 ASTM D6084A 两种方法的主要差异见表 3。

表 3 两种弹性恢复试验的比较

试验方法	拉伸速度/(cm·min ⁻¹)	总伸长/cm	切割前保持时间/min	恢复率测量前的保持时间/min
AASHTO T301	5	20	5	60
ASTM D6084A	匀速	10±0.25	无	60

(3) MSKR 试验:根据 AASHTO TP70 中使用动态剪切流变仪(DSR)对沥青进行多应力蠕变恢复(MSKR)试验的规定进行试验。在沥青的高温 PG 等级温度下进行测试。假定在 MSKR 试验中,弹性恢复率越高,沥青的疲劳性能越好。

(4) LAS 试验:相比时间扫描,LAS 试验是一种加速疲劳试验,采用 DSR 进行试验,试验夹具为标准 8 mm 厚平行板,所用试样为经 RTFO 老化或 PAV 老化的沥青样品。该试验用于确定沥青结合料疲劳方

程 $N_f = a \times \gamma_{\max}^b$ 中的两个参数 a 和 b 。研究提出,LAS 试验包括两个试验步骤:频率扫描和振幅扫描。在 0.1% 的荷载振幅下进行频率扫描,以评估原样试样的性能,得到参数 b 。振幅扫描时间为 300 s,荷载施加呈线性增加,振幅范围从 0.1% 线性增长至 30%。最后根据黏弹连续介质损伤模型(VECD 模型)确定疲劳方程中的参数 a 。Bahia 等提出 LAS 试验结果与 LTPP 的疲劳数据具有良好的相关性。研究采用每种沥青经 PAV 老化后,在 25 ℃ 条件下进行试验,计算得到疲劳参数 a 和 b 。

(5) DENT 试验:加拿大皇后大学的研究人员最早提出 DENT 试验及其试验指标裂纹尖端开口位移(CTOD)。美国联邦公路管理局对该方法做出了一些改动使该法能够适用于美国地区,并制定了一个 AASHTO 格式的试行方法。通常认为,韧性材料断裂所需的能量由两部分组成:① 用于在局部裂纹发展过程中形成两个新截面;② 提供拉伸过程中材料空化和剪切屈服所需的能量。对同一沥青进行测试时,需使用 3 个不同韧带长度,即对缺口截面宽度分别为 5、10、15 mm 的试件进行试验。试样及试验结果如图 2 所示。Gibson 等提出,裂纹尖端开口位移与美国联邦公路管理局加速加载疲劳试验(FHwA-ALF)数据有良好的关联性。CTOD 值越大,材料的疲劳性能越好。

3.3 沥青试验结果与分析

每种测试方法均进行两次平行试验,以其平均值作为试验结果,见表 4。

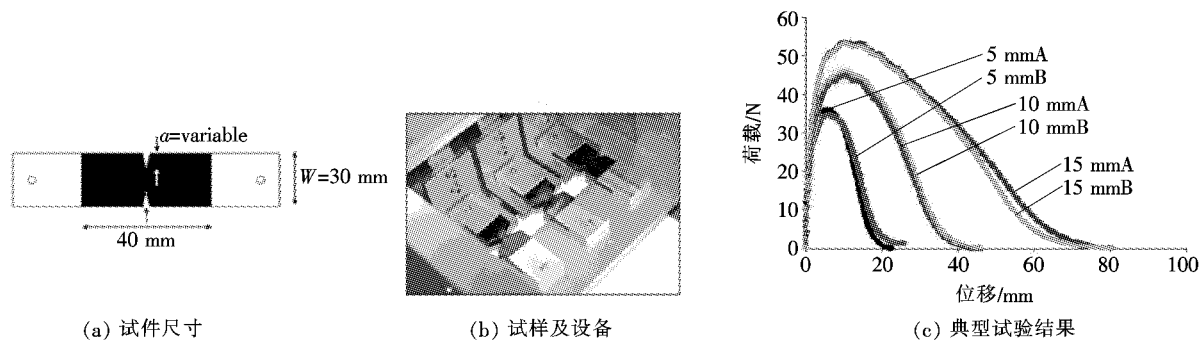


图 2 DENT 试验[图 2(c)中,A、B 表示同一缺口截面宽度下的两组不同的平行试验]

表 4 沥青疲劳测试结果

项目	沥青分级				弹性恢复试验			DENT	
	PG 分级	连续分级	中温等级/℃	综合排序	弹性恢复率(AASHTO T301)/%	弹性恢复率(ASTM D6084A)/%	综合排序	CTOD/mm	综合排序
PG 64-34SBS	PG64-34	69.9-36.1	8.4	A	89	95.0	A	34	A
PG 76-22SBS	PG76-22	80.8-27.6	19.2	F	65	77.5	B	23	B
PG 64-28+Latex	PG70-22	75.2-26.3	17.1	D	63	67.5	C	21	C
PG 64-28	PG64-28	67.9-29.2	18.7	E	10	35.0	D	17	D
PG 64-28+PPA	PG64-28	66.4-29.6	15.2	C	7	30.0	E	11	E
PG 64-22+GTR	PG88-16	88.7-19.8	13.3	B	拉断	75.0	F	8	F

项目	MSCR					LAS				
	试验温度/℃	蠕变恢复率(100 Pa)/%	蠕变恢复率(3 200 Pa)/%	恢复率差值比/%	综合排序	参数 a	参数 b	疲劳寿命(γ _{max} =2.5%)/次	疲劳寿命(γ _{max} =5%)/次	综合排序
PG 64-34SBS	64	88.7	88.7	0	A	1.56×10 ⁸	5.728	818 559	15 445	A
PG 76-22SBS	76	51.6	30.7	40.7	B	1.03×10 ⁷	5.617	59 929	1 221	F
PG 64-28+Latex	70	31.4	15.7	50.0	D	5.14×10 ⁷	5.739	267 571	5 010	B
PG 64-28	64	12.5	4.35	65.2	F	1.11×10 ⁷	5.347	82 593	2 030	E
PG 64-28+PPA	64	20.3	4.2	79.2	E	2.33×10 ⁷	5.883	106 282	1 803	D
PG 64-22+GTR	88	52.9	11.1	79.1	C	1.85×10 ⁸	7.170	259 483	1 803	C

注:测试结果排序从 A~F:A 表示沥青疲劳性能最好,F 表示沥青疲劳性能最差。

由表 4 可知:

(1) $G^* \sin \delta$ 等级:表中列出了 $G^* \sin \delta$ 为 5 000 kPa 时的中温等级。一般情况下,中温等级越高,疲劳性能越差。根据 $G^* \sin \delta$ 测试结果,PG 64-34SBS 疲劳性能最好,其次是 PG 64-22+GTR、PG 64-28+PPA、PG 64-22+Latex 和 PG 64-28,PG 76-22SBS 最差。

(2) 弹性恢复等级:两种测试方法下,PG 64-34SBS 均表现出最高的弹性恢复率,此外,PG 76-22SBS 和 PG 64-28+Latex 的疲劳性能优于 PG 64-

-28+PPA、PG 64-28 和 PG 64-22+GTR。在 AASHTO T301 弹性恢复试验中,PG 64-22+GTR 在延度达到 20 cm 之前已经拉断,但在 ASTM D6084A 方法中,弹性恢复表现更好,可以看出 PG 64-22+GTR 对所施加的应变水平非常敏感。考虑到实际路面上,沥青会承受交通荷载引起的各种应变,因此 PG 64-22+GTR 等级为 F。

(3) MSCR 等级:PG 64-34SBS 在两种应力水平下的蠕变恢复率最高,PG 76-22SBS 次之;PG 64-

22+GTR 在 100 Pa 应力水平下的蠕变恢复率与 PG 76-22SBS 相似,在 3 200 Pa 应力水平下的蠕变恢复率与 PG 76-22SBS 相似,但在 3 200 Pa 应力水平下的蠕变恢复率很小,进一步表明 PG 64-22+GTR 对施加的应力/应变非常敏感;PG 64-28+Latex 的蠕变恢复率明显高于 PG 64-28+PPA 和 PG 64-28;PG 64-28+PPA 在高应力水平下与 PG 64-28 相似,在低应力水平下较好,PG 64-28 最差。

(4) LAS 等级:根据表中疲劳寿命结果可知,PG 64-34SBS 最佳,其次是 PG 64-28+Latex 和 PG 64-22+GTR,PG 64-28+PPA 在小应变水平下的疲劳寿命远高于 PG 64-22,PG 76-22SBS 最差。

(5) DENT 等级:6 种沥青在 DENT 试验中的排序为:PG 64-34SBS>PG 76-22SBS>PG 64-28+Latex>PG 64-28>PG 64-28+PPA>PG 64-22+GTR。

4 沥青混合料推拉疲劳试验

沥青在不同疲劳试验中的等级不同。为正确评价沥青的疲劳性能并确定最佳沥青疲劳测试方法,对 6 种沥青制备的沥青混合料的抗疲劳开裂性能进行评价。研究选择沥青混合料推拉疲劳试验评价沥青混合料疲劳性能,利用 VECD 模型对试验结果进行分析,能够很好地评价沥青混合料的疲劳性能。

选择 Superpave-10 沥青混合料进行推拉疲劳试验,按照 Superpave 方法(AASHTO M323)进行设计,旋转压实 100 次,混合料体积指标见表 5。6 种沥青混合料采用同种集料和级配。由于掺加了胶粉或胶乳,PG 64-22+GTR 改性沥青混合料和 PG 64-28+Latex 改性沥青混合料的沥青含量较高。

表 5 沥青混合料体积指标

沥青种类	沥青含量/%	VV/%	VMA/%	粉胶比
PG 64-28	5.80	3.9	15.5	0.8
PG 64-28+PPA	5.80	4.3	15.9	0.8
PG 64-34SBS	5.80	4.1	16.2	0.8
PG 76-22SBS	5.80	3.5	15.1	0.8
PG 64-22+GTR	7.30	4.0	18.5	0.6
PG 64-28+Latex	6.25	4.5	16.9	0.8

在进行推拉疲劳试验之前,使用沥青混合料性能试验(AMPT)装置对每种混合料进行动态模量试验,

绘制动态模量主曲线(图 3)。

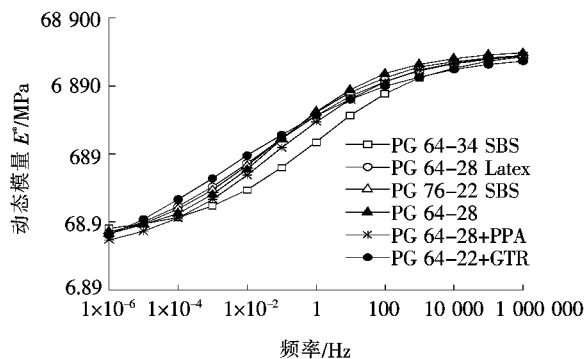


图 3 动态模量主曲线

试验使用 Kutay 等提出的 N_f 方程预测每种沥青混合料在 25 °C、频率 10 Hz 下的疲劳寿命,见图 4。值得注意的是,如果将 80 kN 等效单轴荷载(ESALs)作为标准设计荷载,则图 4 中涉及到的 4 种应变水平能够代表从永久性路面到薄层等多种路面结构的受力情况。

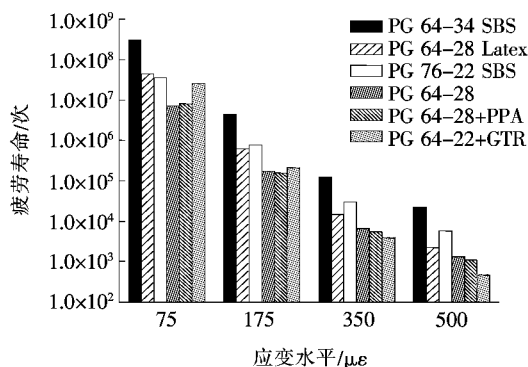


图 4 4 种应变水平下沥青混合料的疲劳寿命

由图 4 可以看出:① PG 64-34SBS、PG 76-22SBS 和 PG 64-28+Latex 等 3 种沥青混合料,在 4 种应变水平下的疲劳性能均优于 PG 64-28、PG 64-28+PPA 和 PG 64-22+GTR 3 种沥青混合料;② 各应变水平下,均是 PG 64-34SBS 沥青混合料的疲劳性能最好,其次是 PG 76-22SBS 沥青混合料,然后是 PG 64-28+Latex 沥青混合料。除最小应变水平 75 $\mu\epsilon$ (即永久性路面)外,PG 76-22SBS 沥青混合料的性能优于 PG 64-28+Latex 沥青混合料;③ PG 64-22+GTR 沥青混合料对应变水平非常敏感,在 75 $\mu\epsilon$ 水平下,其疲劳性能明显优于 PG 64-28 沥青混合料和 PG 64-28+PPA 沥青混合料。相较其他应变水平,同种沥青混合料在 500 $\mu\epsilon$ 水平下的疲劳性能最差。因此,PG 64-22+GTR 沥青混合料的整体疲劳性能排名最后。PG 64-28 沥青混合料和 PG 64-28

+PPA 沥青混合料的疲劳性能非常接近。

根据上述分析,6 种沥青疲劳性能的排名为:PG 64-34SBS>PG 76-22SBS>PG 64-28+Latex>PG 64-28≥PG 64-28+PPA>PG 64-22+GTR。

5 试验方法评价

将沥青疲劳等级与沥青混合料疲劳等级进行比较,提出:① 现行的疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 与沥青混合料推拉疲劳试验结果相关性很差,有必要提出新的沥青疲劳试验;② MSCR 试验和 LAS 试验与沥青混合料推拉疲劳试验相关性较差,MSCR 试验是在高温 PG 等级温度下进行的,但其他 4 种沥青疲劳试验和沥青混合料推拉疲劳试验都是在中温等级下进行的,MSCR 试验需要在较低试验温度下进一步验证。LAS 试验是一个更为基础的测试方法,在数据分析中,需充分考虑材料线性黏弹特性和非线性黏弹特性(即黏塑性)。另外,研究证明 LAS 试验适用于评价基质沥青疲劳性能,但其疲劳失效判定不适用于改性沥青;③ DENT 试验和弹性恢复试验是该文认为的最佳沥青疲劳试验,试验结果与沥青混合料推拉疲劳试验具有相同的等级。与弹性恢复试验(经验性试验)相比,DENT 试验更为基础,试验将拉伸过程中的做功分为基本断裂功和塑性流动功,并根据基本断裂功计算得到 CTOD。CTOD 表征延性状态下沥青在极限张拉应变约束下的应变容限,因此能够代表裂纹失稳拓展前,沥青膜在集料颗粒间的张拉程度。建议采用 DENT 试验评价沥青的疲劳性能。

6 结论

目前 Superpave 规范使用参数 $G^* \sin \delta$ 来量化沥青的疲劳性能,这是规范中存在一定问题的部分。基于此,该文探讨一种更合理的沥青疲劳试验方法,对 5 种沥青疲劳试验进行评价,并与沥青混合料推拉疲劳试验进行了比较。结论如下:

(1) 进一步证实了参数 $G^* \sin \delta$ 与沥青疲劳性能的相关性较差。

(2) MSCR 试验和 LAS 试验与沥青混合料推拉疲劳试验相关性较差,这两种试验方法还需要进一步展开研究,在进行数据分析(考虑非线性黏弹性)时,应进一步考虑试验温度带来的影响。

(3) DENT 试验和弹性恢复试验已被证明是评价

沥青胶结料疲劳性能的最佳手段,与沥青混合料推拉疲劳试验有完全相同的等级。DENT 试验更为基础,其测试指标 CTOD 表征了沥青胶结料在延性状态下的应变容限,因此代表了沥青膜失效前,在集料颗粒间的拉伸程度。

(4) 以上结论均基于室内试验结果,还需要进一步通过现场实试验证。此外,仅沥青材料的疲劳性能不能完全决定路面结构的疲劳响应,沥青混合料特性、路面结构本身、所处的交通环境以及自然环境对决定路面性能同样具有重要作用。

参考文献:

- [1] 王超. 沥青结合料路用性能的流变学研究[D]. 北京工业大学博士学位论文, 2015.
- [2] 王承献, 王立志, 王鹏. 沥青胶结料疲劳性能评价的研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2015(5).
- [3] 胡金龙, 孙大权, 曹林辉. 沥青疲劳性能分析方法与评价指标[J]. 石油沥青, 2013(5).
- [4] 白琦峰, 钱振东, 赵延庆. 基于流变学的沥青抗疲劳性能评价方法[J]. 北京工业大学学报, 2012(10).
- [5] 孙艳娜, 李立寒, 汪于凯. 沥青疲劳性能评价指标[J]. 西南交通大学学报, 2014(6).
- [6] 陈浩浩, 吴少鹏, 刘全涛, 等. 沥青的疲劳性能评价方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015(12).
- [7] 聂忆华, 胡静轩. 加拿大沥青改进测力延度试验(DENT)介绍[J]. 中外公路, 2018(3).
- [8] 张含宇, 徐刚, 陈先华, 等. 不同试验方法的老化沥青疲劳性能研究[J]. 建筑材料学报, 2013(1).
- [9] Hintz C. Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue[D]. University of Wisconsin~Madison, 2012.
- [10] Kim Y R, Little D N, Lytton R L, et al. Use of Dynamic Mechanical Analysis (DMA) to Evaluate the Fatigue and Healing Potential of Asphalt Binders in Sand Asphalt Mixtures[J]. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists—Proceedings of the Technical Sessions, 2002, 71: 176—206.
- [11] 周水文, 时敬涛, 张蓉, 等. 基于线性振幅扫描试验评价沥青疲劳性能研究[J]. 石油沥青, 2018(2).
- [12] 罗浩原, 欧阳铨霏, 冷慧康, 等. 基于临界裂纹尖端位移的沥青抗疲劳性能评价[J/OL]. 建筑材料学报: 1—13 [2019-07-01]. <http://kns.cnki.net/-kcms/detail/31.1764.tu.20190517.1327.002.html>.
- [13] Zhou F, Mogawer W, Li H, et al. Evaluation of Fatigue Tests for Characterizing Asphalt Binders[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(5): 610—617.