

# 交联聚乙烯改性沥青混合料弯拉疲劳性能研究

丁国盛

(中铁六局集团 路桥建设有限公司, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 通过四点弯曲弯拉疲劳试验, 对不同交联聚乙烯掺量的改性沥青混合料在温度、应力比、加载频率等因素影响下的疲劳性能进行研究。结果表明, 适量的交联聚乙烯改性剂可改善沥青混合料的疲劳性能, 其最佳掺量为 5%; 交联聚乙烯改性沥青混合料的弯拉强度、疲劳寿命和劲度模量随着温度的升高而降低; 随着应力比的增大, 疲劳寿命逐渐降低, 劲度模量逐渐增大; 荷载频率对交联聚乙烯改性沥青路面疲劳性能的影响较大, 低频率比高频率更容易产生疲劳破坏。

**关键词:** 公路; 交联聚乙烯; 改性沥青混合料; 疲劳性能; 四点弯曲试验

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)03-0077-04

疲劳破坏是当前中国沥青路面的主要破坏形态之一, 提高疲劳性能已成为沥青路面结构设计中特别重要的一环。该文采用四点弯曲疲劳试验, 对不同聚乙烯掺量的改性沥青混合料在不同试验温度、荷载频率及应力水平下的弯拉疲劳性能进行研究。

## 1 沥青混合料疲劳破坏机理

如图 1、图 2 所示, 沥青路面结构层内任一点 (如 B 点) 均处于三相应力状态, 当荷载作用于 B 点左侧时, B 点承受主拉应力, 应力大小随着荷载作用位置接近 B 点的程度而逐渐增大; 当车轮荷载处于 B 点正上方时, B 点受到最大主压应力; 当荷载作用于 B 点右侧时, B 点主要承受主拉应力, 应力值也逐渐减小。对于车流量大的路段, 其路面结构的应力与应变长期处于重复循环变化状态, 应力与应变值会逐渐减小, 荷载重复作用超过一定次数时, 沥青路面结构的抵抗力将小于荷载作用下路面内部产生的应力, 促使沥青路面产生疲劳破坏。

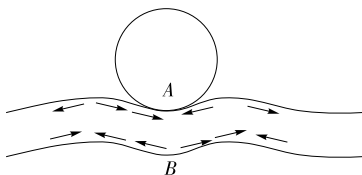


图 1 车辆荷载作用示意图

为了更形象地说明沥青路面的受力情况, 通过 ABAQUS 有限元软件对沥青混合料小梁试件的受力情况进行数值模拟。分析时作如下假定: 1) 沥青小梁试件是均匀、连续、各向同性的线弹性材料, 其应力应变关系符合广义胡克定律; 2) 受力分析时不

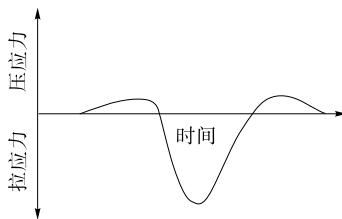


图 2 B 点应力随时间的变化

考虑结构自重。根据上述假设和已有试验数据进行数值模拟, 得到沥青小梁试件四点弯曲应力云图 (见图 3)。

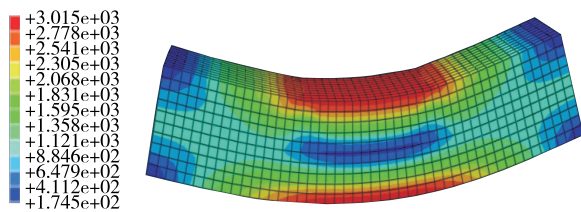


图 3 沥青小梁试件四点弯曲应力云图 (单位: N)

从图 3 可看出: 当沥青小梁试件承受四点弯曲变形时, 试件中间段的应力大于其他两段的应力, 中间段的顶部和底部应力大于中部处的应力, 距离小梁  $1/3L$  处加载位置的应力大于其周围应力, 且该处的应力随着小梁高度的降低而逐渐减小。说明当疲劳试验的加载方式选用三分点加载时, 沥青小梁的疲劳断裂位置将出现在中间段的某个位置。

## 2 原材料与试验方法

### 2.1 原材料

用于配制交联聚乙烯改性沥青的基质沥青采用东莞泰和沥青产品有限公司的埃索 70 号 A 级沥

青,用于对照组的 SBS 改性沥青采用江苏镇江有限公司(壳牌)的成品 SBS 改性沥青(I-D),其性能分别见表1、表2。

表1 埃索70号基质沥青的性能指标

指标	试验结果	规范要求
针入度(25℃,5s,100g)/(0.1mm)	67	60~80
软化点/℃	47.5	≥47
5℃延度/cm	>100	≥100

表2 SBS(I-D)改性沥青的性能指标

指标	试验结果	规范要求
针入度(25℃,5s,100g)/(0.1mm)	53.9	30~60
软化点/℃	83.4	≥70
5℃延度/cm	35.0	≥25
相对密度(25℃)	1.027	实测

选取硬度大、表面纹理粗糙、棱角性好及扁平颗粒含量较少的粗集料;细集料采用机制砂,要求其棱角性良好、表面粗糙度较低,同时掺入一部分石屑增大细集料的表面摩擦力;填料选取石灰岩经磨细的矿粉。试验选取长沙县水口碎石场生产的粗细集料和矿粉,分为0~5、5~10、10~15mm三挡,其各项技术性能指标均满足规范要求。

## 2.2 试验方法

采用MTS试验材料机,选用四点弯曲试验方法,采用应力控制的半正弦波加载模式;荷载频率取5和10Hz,试验温度取5、10、15℃,应力水平取0.3、0.4、0.5;试件由实验室车轮碾压成型的沥青混合料车辙板切割而成,尺寸为380mm×50mm×63.5mm。试验时将试件保温至试验温度,按照要求加载至破坏(见图4)。

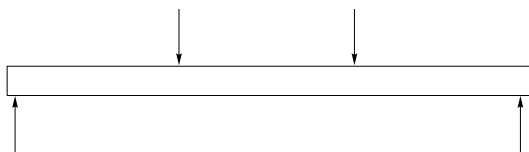


图4 四点弯曲疲劳试验加载示意图

## 3 试验结果与分析

采用AC-13C矿料级配,设计级配见表3。交联聚乙烯掺量为3%、5%和7%(占基质沥青的质量比),分别采用马歇尔方法确定SBS和不同交联聚

乙烯掺量改性沥青混合料的最佳油石比。

表3 AC-13C矿料级配

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
13.20	98.1	0.600	19.7
9.50	74.2	0.300	13.3
4.75	43.5	0.150	9.4
2.36	33.4	0.075	6.2
1.18	26.1		

### 3.1 不同改性沥青混合料的抗弯拉强度

不同交联聚乙烯掺量的改性沥青混合料及SBS改性沥青混合料在不同温度下的弯曲强度见图4。

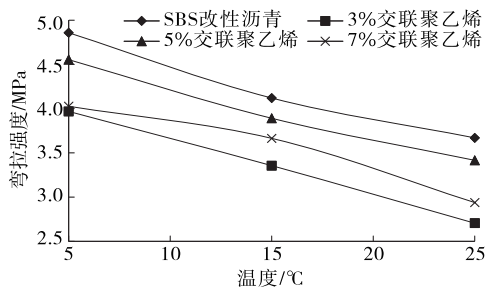


图5 改性沥青混合料在不同温度下的弯曲强度

从图5可看出:随着温度的升高,4种改性沥青混合料的弯拉强度都逐渐下降;对于交联聚乙烯改性沥青混合料,随着改性剂用量的增加,弯拉强度先增加后减小,掺量为5%时达到最大,此时弯曲强度仅次于SBS改性沥青混合料。

### 3.2 温度对交联聚乙烯改性沥青混合料疲劳性能的影响

选择应力控制模式,在应力比0.4,加载频率10Hz,温度5、15、25℃的条件下进行试验,分析温度对交联聚乙烯改性沥青混合料疲劳性能的影响,结果见图6、图7。

从图6、图7可看出:4种改性沥青混合料的疲劳寿命随着温度的升高而降低;温度对沥青混合料疲劳寿命的影响可通过劲度模量来解释,劲度模量

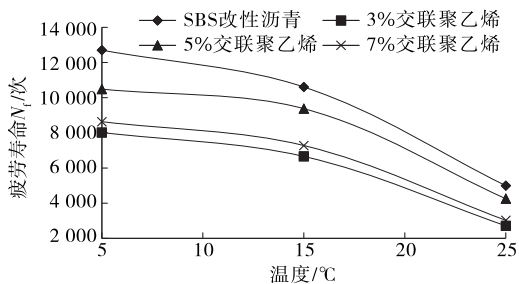


图6 温度对改性沥青混合料疲劳寿命的影响

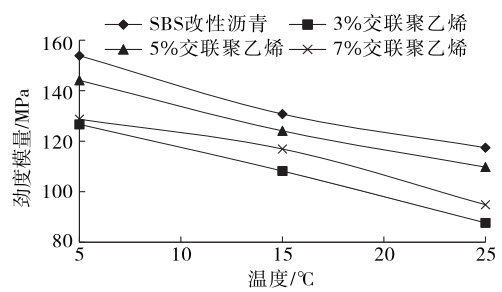


图 7 温度对改性沥青混合料弯曲劲度模量的影响

随着温度的升高呈逐渐下降的趋势,说明在温度升高的一定幅度内及对试件施加恒定应变的过程中,试件内部产生的应变逐渐增大,使沥青混合料所能承受的重复荷载次数减小。在同一温度条件下,随着改性剂掺量的增加,交联聚乙烯改性沥青混合料的疲劳寿命先增大后降低,在掺量为 5% 时达到最佳,接近于 SBS 改性沥青混合料。5~15℃ 时温度对疲劳作用次数的影响不大,疲劳作用次数的减小幅度很小;15~25℃ 时各沥青混合料的疲劳次数下降速率非常明显,下降幅度也很大。

3.3 应力比对交联聚乙烯改性沥青混合料疲劳性能的影响

在温度 15℃,加载频率 10 Hz,应力比 0.3、0.4、0.5 的条件下进行试验,分析应力比对交联聚合物改性沥青混合料疲劳性能的影响,结果见图 8、图 9。按式(1)所示应力控制模式下的疲劳寿命方程对不同交联聚乙烯掺量下的沥青混合料疲劳寿命进行回归拟合分析,得到各沥青混合料的疲劳寿命方程曲线(见图 10)和回归分析参数(见表 4)。

$$\lg N_f = K + n(\sigma/S) \tag{1}$$

式中: $\lg N_f$  为改性沥青的疲劳寿命; $K$  为应力、疲劳

寿命对数曲线的截距; $n$  为应力、疲劳寿命对数曲线的斜率; $\sigma/S$  为应力比。

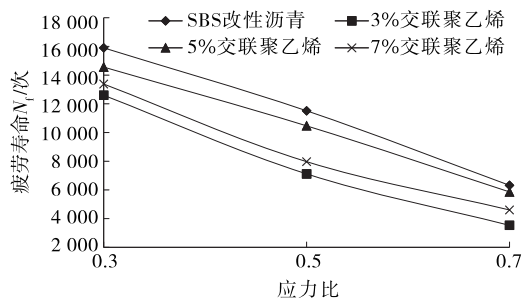


图 8 应力比对改性沥青混合料疲劳寿命的影响

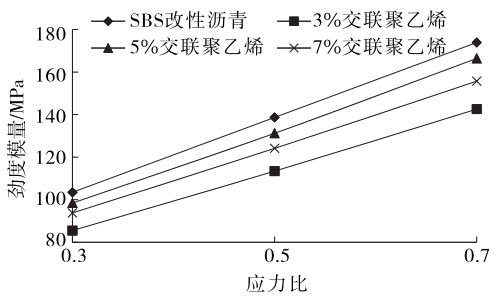


图 9 应力比对改性沥青混合料弯曲劲度模量的影响

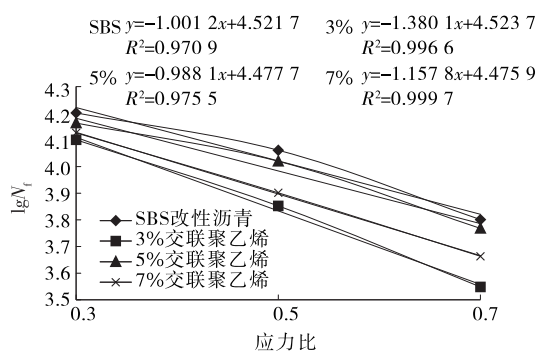


图 10 不同应力比下各改性沥青混合料疲劳寿命回归分析

表 4 改性沥青混合料应力比—疲劳寿命方程

沥青混合料类型	回归系数			疲劳方程
	K	n	R <sup>2</sup>	
SBS 改性沥青	4.521 7	-1.001 2	0.970 9	$\lg N_f = 4.521 7 - 1.001 2(\sigma/S)$
交联 3%	4.523 7	-1.380 1	0.996 6	$\lg N_f = 4.523 7 - 1.380 1(\sigma/S)$
聚乙烯 5%	4.477 7	-0.988 1	0.975 5	$\lg N_f = 4.477 7 - 0.988 1(\sigma/S)$
改性沥青 7%	4.475 9	-1.157 8	0.999 7	$\lg N_f = 4.475 9 - 1.157 8(\sigma/S)$

从图 8~10、表 4 可看出:1) 随着应力比的增大,4 种改性沥青混合料的疲劳寿命均逐渐降低、劲度模量逐渐增大,说明车辆荷载会影响沥青路面的服务寿命,随着车辆荷载的增大,单次荷载作用下不可恢复的变形量增大,最终导致沥青路面内部应力

大于结构抗力,路面出现疲劳裂缝。2) 相同应力比下,交联聚乙烯改性沥青混合料的疲劳寿命在改性剂掺量为 5% 时最大,基本接近于 SBS 改性沥青混合料;7% 掺量时次之;3% 掺量时最小。交联聚乙烯改性剂的最佳掺量为 5%。3) 4 种改性沥青混合料

疲劳寿命方程的相关系数都在95%以上,说明疲劳寿命方程可很好地预测或解释沥青混合料在不同应力比下的疲劳寿命。4)在疲劳寿命方程中, $n$ 代表应力比—疲劳寿命的斜率,表示应力比对沥青混合料疲劳寿命的影响程度,其绝对值越小,应力比对沥青混合料疲劳寿命的影响越小。4种改性沥青混合料中, $n$ 值的大小顺序为5%交联聚乙烯改性沥青<SBS改性沥青<7%交联聚乙烯改性沥青<3%交联聚乙烯改性沥青,说明适量的交联聚乙烯改性剂可明显改善沥青混合料的应力敏感性,改性剂掺量过大会产生相反的效果。

### 3.4 加载频率对交联聚乙烯改性沥青混合料疲劳性能的影响

在温度15℃,应力比0.4,加载频率5、10 Hz的条件下进行试验,分析加载频率对交联聚乙烯改性沥青混合料疲劳性能的影响,结果见图11。

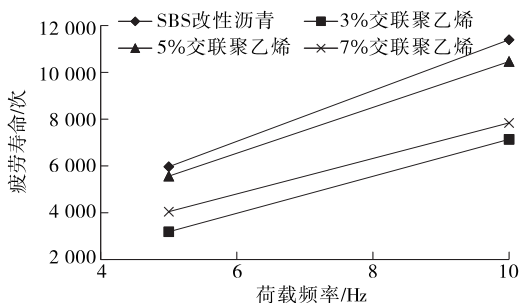


图11 加载频率对改性沥青混合料疲劳寿命的影响

从图11可看出:加载频率10 Hz下改性沥青混合料的疲劳作用次数约为5 Hz时的2倍。10 Hz加载频率相当于车速为60 km/h。荷载频率较高(10 Hz)时,沥青路面产生的应变来不及响应,累计形变量较小,路面抵抗疲劳作用次数较多;荷载频率较低(5 Hz)时,路面容易产生疲劳破坏,如高速公路主路发生疲劳破坏的概率较小,而出入口处由于车速较低容易发生疲劳破坏。在荷载频率一定时,交联聚乙烯掺量为5%时沥青混合料的疲劳寿命最大,接近于SBS,说明一定量的交联聚乙烯能改善沥青混合料的粘弹性,增强其疲劳性能。

## 4 结论

(1)随着温度的升高,SBS和交联聚乙烯掺量为3%、5%和7%的改性沥青混合料的弯拉强度都逐渐下降,改性剂掺量为5%时交联聚乙烯改性沥青混合料的弯曲强度仅次于SBS改性沥青混合料。

(2)4种改性沥青混合料的疲劳寿命和劲度模

量均随着温度的升高而降低;在同一温度条件下,随着交联聚乙烯掺量的增加,交联聚乙烯改性沥青混合料的疲劳寿命先增大后降低,在掺量为5%时达到最佳,接近于SBS改性沥青混合料。

(3)随着应力比的增大,4种改性沥青混合料的疲劳寿命均逐渐降低,劲度模量逐渐增大;相同应力比下,交联聚乙烯改性沥青混合料的疲劳寿命在改性剂掺量为5%时最大,适量的交联聚乙烯改性剂可改善沥青混合料的应力敏感性,交联聚乙烯改性剂的最佳掺量为5%。

(4)荷载频率对沥青混合料疲劳性能的影响较大,低频率比高频率更容易产生疲劳破坏;荷载频率一定时,交联聚乙烯改性剂掺量为5%时的疲劳寿命最大,接近于SBS,说明一定量的交联聚乙烯可改善沥青混合料的疲劳性能。

### 参考文献:

- [1] 叶国铮.柔性路面疲劳优化设计[M].北京:人民交通出版社,1989.
- [2] 陈昌鑫,叶群山.交联聚乙烯和橡胶复合改性沥青高温性能研究[J].西部交通科技,2017(3).
- [3] 欧阳春发.聚合物/填料复合物改性沥青性能与结构研究[D].上海:上海交通大学,2006.
- [4] 高爽.沥青混合料疲劳损伤机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.
- [5] 葛哲圣,黄朝晖,黄晓明.沥青混合料疲劳性能的影响因素分析[J].公路交通科技,2002,19(6).
- [6] Pell P S, Brown S F. The characteristics of materials for the design of flexible pavement structures proceedings [A]. Third International Conference on the Structure Design of Asphalt Pavement[C].1972.
- [7] 许志鸿.沥青混合料疲劳性能研究[R].广州:华南理工大学,2004.
- [8] 叶永迪.沥青混合料弯拉疲劳损伤性能试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2011.
- [9] 朱洪洲,高爽,唐伯明.沥青混合料常应变小梁弯曲疲劳试验[J].华中科技大学学报:城市科学版,2009,26(2).
- [10] 张跃峰,赖正林,李俊.沥青混合料小梁弯曲疲劳试验研究[J].公路与汽运,2013(1).
- [11] 鲁高群,刘大梁,李清泉.有机化蒙脱土和聚乙烯复合改性沥青的性能研究[J].公路与汽运,2011(2).
- [12] 李廉.废旧轮胎胶粉改性沥青混合料低温与疲劳性能研究[D].西安:长安大学,2012.