

不同纤维对 SMA 路用性能的影响

刘克非^{1,2}

(1. 长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心,湖南 长沙 410114;

2. 中南林业科技大学 土木工程与力学学院,湖南 长沙 410004)

摘 要:选用 3 种不同的纤维(木质素纤维、矿物纤维和聚丙烯腈纤维),研究其对 SMA 混合料路用性能的影响。通过动态剪切流变试验(DSR)及简支梁弯曲蠕变试验(BBR),评价纤维沥青胶浆的技术性能。以 SMA-10 为例,通过车辙试验及动、静态蠕变试验和恒高度重复剪切试验(RSCH),评价不同纤维对 SMA 高温性能的影响。结果表明:纤维的加入能够改善沥青混合料的高温性能,同时也降低了沥青混合料的低温抗裂性能,与其他 2 种胶浆相比,木质纤维胶浆低温性能较差;车辙试验、动态蠕变试验和恒高度重复剪切试验结果具有较好的相关性,能较好地反映不同纤维对 SMA 高温性能的影响;动态蠕变试验得出的粘弹性常数可以用来进行沥青面层车辙的预估,矿物纤维 SMA-10 的高温性能好于另外 2 种纤维;通过 4 点弯曲疲劳试验,得到不同纤维对 SMA 疲劳寿命的影响,聚丙烯腈纤维 SMA-10 的抗疲劳性能最好。

关键词:道路工程;纤维沥青;SMA;路用性能;重复剪切试验

中图分类号:U414.75

文献标志码:A

Influence of different fibers on road performance of SMA

LIU Ke-fei^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Ministry of Education for Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road and Traffic Safety, Changsha University of Science and Technology, Changsha

410114, Hunan, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Central South

University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: Road performance of SMA (stone mastic asphalt) mixture with three various fibers (lignin fiber, mineral fiber, PAN fiber) are studied. Through the DSR (dynamic shear rheometer) test and the BBR (beam bending rheometer) test to evaluate the technical performance of fiber-asphalt glue, the tests reveal that adding fiber in asphalt can improve the high temperature properties of mixture while its low temperature crack resistance decreased, lignocellulosic asphalt glue's low-temperature performance is worse compared with the other two glues. For example of SMA-10, the rutting test, dynamic and static creep tests, RSCH(repeating shear with constant height) test are used to evaluate high-temperature performance of SMA with various fibers. It is pointed that the test results of rutting test, dynamic creep test and RSCH have good correlation, and these results can preferably reflect the influence of various fibers, the viscoelastic constant of

dynamic creep test can predict the rutting of asphalt surface, the high-temperature performance of mineral fiber SMA-10 is good compared with the other two mixtures. Through four-points bending fatigue test, it is found that SMA-10 with PAN fiber has the best fatigue property. 10 tabs, 17 refs.

Key words: road engineering; fiber asphalt; SMA; road performance; RSCH

0 引 言

沥青马蹄脂碎石混合料(SMA)是一种由沥青、纤维稳定剂、矿粉及少量细集料组成的沥青马蹄脂填充的间断级配的粗集料骨架间隙的沥青混合料^[1]。纤维作为一种传统的纺织材料,从形状上说,是一种比较柔韧的细而长的物质。SMA 中纤维的加入,能有效地改善沥青路面的高温稳定性、疲劳耐久性,并且具有低温抗拉和防止反射裂缝的作用^[2-3]。目前,美国和西欧等国家仍在大面积使用和研究纤维对沥青混合料的加强改性作用。中国对纤维沥青混合料的研究较晚,到 20 世纪 90 年代初,由于 SMA 路面结构的出现需要添加纤维,才引起人们对纤维类产品的关注。长安大学的陈华鑫、朱朝辉、丁智勇等对掺木质素纤维和博尼纤维的 AC、AK 的路用性能进行了研究^[4-6]。纤维几乎成了 SMA 的必需成分,原因与 SMA 使用较多的矿粉与沥青结合料有关。归纳起来,纤维有以下作用:①加筋作用,纤维在混合料中呈三维分散存在,可以起到加筋作用;②分散作用,如果没有纤维,用量颇大的沥青矿粉很可能成为胶团,它不能均匀地分散在集料之间,铺筑在路面上将清楚地看见“油斑”存在,纤维可以使胶团适当分散;③吸附及吸收沥青的作用,在 SMA 混合料中加入纤维稳定剂的作用在于充分吸附(表面)及吸收(内部)沥青,从而使沥青用量增加,沥青油膜变厚,提高混合料的耐久性;④稳定作用,纤维使沥青膜处于比较稳定的状态,尤其是在夏天高温季节,沥青受热膨胀时,纤维内部的空隙还将成为一种缓冲的余地,不致成为自由沥青而泛油,对高温稳定性也有好处^[7-8]。

目前,在 SMA 中所用的纤维大多数是木质素纤维、聚丙烯腈纤维和玄武岩矿物纤维。为此,本文基于长沙城市道路薄层 SMA 沥青混合料设计施工关键技术研究课题,选用 3 种不同纤维(木质素纤维、矿物纤维和聚丙烯腈纤维),对 SMA-10 的性能影响进行试验研究,以便选择出合适的纤维以及评价纤维在混合料中的作用。

1 SMA-10 沥青混合料配合比设计

1.1 原材料

SMA-10 的粗集料为镇江生产的玄武岩碎石,石屑(0~3 mm)为望城的石灰岩,矿粉采用石灰石粉,纤维分别采用上海捷漫贸易发展有限公司生产的路用木质素纤维、玄武岩矿物纤维和德兰尼特 AS 聚丙烯腈纤维,沥青采用江阴市宝利沥青公司生产的 SBS 改性沥青。粗细集料及矿粉均符合《公路工程集料试验规程》的要求,各种纤维的技术指标见表 1~表 3^[9]。

表 1 木质素纤维技术指标

技术指标	测试值
纤维素含量/%	75~80
pH 值	7.5±1
纤维密度/(g·cm ⁻³)	1.6
最大纤维长度/mm	5.0
平均纤维厚度/μm	46

表 2 聚丙烯腈纤维技术指标

技术指标	测试值
纤度/dtex	1.9
纤维直径/μm	≈14
切取长度/mm	6.0
纤维密度/(g·cm ⁻³)	1.18
纤维数/个	8.7×10 ⁸
最大拉伸率/%	8~12
抗拉强度/MPa	90~500

表 3 矿物纤维技术指标

技术指标	测试值
pH 值	7
纤维长度/mm	6.0
纤维直径/μm	5.0
纤维密度/(g·cm ⁻³)	2.55

1.2 矿料级配组成设计

对于 SMA-10 的配合比设计,按照《公路沥青路面施工技术规范》中的有关规定进行^[10];为了方便对比,不同纤维的添加量都选择为沥青混合料总质量的 3%^[11]。在各项设计指标满足要求的前提下,确定 SMA-10 的级配见下页表 4。

1.3 SMA-10 混合料设计检验

各种纤维沥青混合料的马歇尔测试结果见下页表 5。

表 4 SMA-10 级配设计

不同筛孔(mm)的通过率/%							矿粉/%	水泥/%
9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15		
5.0	58.0	14.0	4.5	3.5	2.0	1.5	9.5	2.0

表 5 SMA-10 马歇尔试验结果

纤维类型	最佳油石比/%	矿料有效相对密度/(g·cm ⁻³)	理论密度/(g·cm ⁻³)	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	空隙率/%	矿料间隙率 VMA/%	沥青饱和度 VFA/%	稳定度/kN	流值/mm	VCA _{mix} /%	VCA _{DRC} /%
木质素纤维	5.9	2.805	2.559	2.452	3.9	17.3	77.5	7.256	3.019	39.7	42.5
聚丙烯腈纤维	5.8	2.805	2.550	2.458	3.9	17.3	77.5	6.972	3.557	39.7	42.5
矿物纤维	5.8	2.805	2.554	2.450	3.8	17.3	78.0	6.783	3.247	39.7	42.5

注：VCA_{mix}为粗集料骨架最小空隙率；VCA_{DRC}为粗集料骨架干捣实空隙率。

2 纤维沥青胶浆试验

与基质沥青相比,在沥青中掺加纤维,其微观结构形成非均质,性能将产生变化,空间随机分布的纤维网络将对沥青的流动产生内摩擦阻力,即增加粘度。纤维的“增粘”作用将有效地提高沥青胶浆的抗剪切变形能力,从而提高了沥青路面抗车辙变形能

力^[12]。本研究采用 SHRP 试验中的动态剪切流变试验(DSR)和简支梁弯曲蠕变试验(BBR),测试沥青胶浆的技术性能。在进行纤维沥青胶浆试验中,将纤维与沥青按 1:20 的比例配成纤维沥青胶浆。

2.1 动态剪切流变试验

试验温度从 64 ℃开始,并以 6 ℃增量递增,测得相位角 δ 及抗车辙因子 G^{*}/sin(δ)的结果见表 6。

表 6 DSR 试验结果

纤维类型	不同温度(℃)下的试验结果									
	64		70		76		82		88	
	$\frac{G^*}{\sin(\delta)}/\text{kPa}$	δ/(°)	$\frac{G^*}{\sin(\delta)}/\text{kPa}$	δ/(°)	$\frac{G^*}{\sin(\delta)}/\text{kPa}$	δ/(°)	$\frac{G^*}{\sin(\delta)}/\text{kPa}$	δ/(°)	$\frac{G^*}{\sin(\delta)}/\text{kPa}$	δ/(°)
原样沥青	3.41	70.7	1.90	71.2	1.09	71.5	0.64	71.9		
木质素纤维	17.00	60.7	9.72	61.5	6.07	62.9	3.84	64.4	2.32	65.8
聚丙烯腈纤维	15.00	60.5	9.31	61.9	5.65	63.0	3.44	64.2	2.04	65.5
矿物纤维	10.60	60.2	6.74	61.4	4.29	63.2	2.74	65.7	1.73	68.5

由表 6 可知:纤维沥青胶浆抗车辙因子远远大于原样沥青抗车辙因子,说明纤维加入后,使沥青变硬,抗车辙能力得到提高;随着试验温度的升高,各种纤维沥青车辙因子迅速降低,即与原样沥青相比,纤维沥青胶浆的温度敏感性更大,3 种胶浆中,矿物纤维胶浆的车辙因子对温度敏感性较低;随着温度的升高,纤维种类对沥青高温性能的影响逐渐降低,其主要原因是纤维对沥青的吸附作用减弱,纤维胶浆中的自由沥青增多。从 3 种纤维的分散性来说,矿物纤维在沥青中的分散性最好,使纤维沥青胶浆形成良好的复合材料;而颗粒状的木质素纤维分散十分困难,使其沥青胶浆中有成团部分,对试验的结果造成一定影响;同时木质素纤维的内部中空结构吸收了一部分沥青,使其胶浆中的自由沥青含量少于另 2 种纤维,所以其车辙因子较大。由对比可知,纯沥青与纤维沥青胶浆的相位角相差较大,说明添

加了纤维后沥青的弹性增加;随着温度的升高,矿物纤维胶浆的相位角增大较快,其弹性部分向粘性转化较多^[13]。

2.2 简支梁弯曲蠕变试验

采用的纤维与沥青按 1:20 的比例配成纤维沥青胶浆,并经 RTFOT(旋转薄膜老化试验)老化 20 h 后的试样进行试验,结果见表 7。

表 7 BBR 试验结果

纤维类型	不同温度(℃) 蠕变劲度 S/MPa			不同温度(℃) 蠕变曲线斜率 m		
	-6	-12	-18	-6	-12	-18
原样沥青	56.5	73.5	251.5	0.687	0.482	0.339
木质素纤维	42.4	107.2	408.7	0.558	0.399	0.288
聚丙烯腈纤维	48.6	103.7	316.6	0.552	0.428	0.331
矿物纤维	46.7	130.4	320.2	0.432	0.360	0.301

由表 7 可知:纤维的加入使沥青的蠕变劲度增加,柔性降低;-12 ℃时,不同纤维沥青的劲度模量

影响相差不大。但是在-18℃时,木质素纤维胶浆的劲度模量迅速增加,说明木质素纤维胶浆的低温性能较差;温度下降时,不同纤维沥青胶浆的蠕变曲线斜率都随着温度的下降而减小,说明纤维并没有改善沥青的低温松弛性能,反而使其性能有所降低,其中,木质素纤维胶浆的性能最差^[14]。

3 水稳定性测试

分别用马歇尔残留稳定性和冻融劈裂强度比评价不同纤维 SMA-10 的水稳定性,试验所得数据见表 8。表 8 中:MS 为标准试件稳定度;MS₁ 为试件浸水后的稳定度;MS₀ 为浸水残留稳定度;R₁、R₂ 分别为冻融循环前、后的劈裂抗拉强度;TSR 为冻融劈裂抗拉强度比。

表 8 水稳定性试验结果

纤维类型	MS/kN	MS ₁ /kN	MS ₀ /%	R ₁ /MPa	R ₂ /MPa	TSR/%
木质素纤维	6.137	5.434	88.5	0.462	0.427	92.4
聚丙烯腈纤维	6.234	5.480	87.9	0.486	0.450	92.6
矿物纤维	6.197	5.411	87.3	0.617	0.566	91.7

表 9 高温稳定性试验结果

纤维类型	马歇尔试验		动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	静态蠕变试验 劲度模量/MPa	动态蠕变试验		重复剪切试验(RSCH)	
	稳定度/kN	流值/mm			瞬时弹性/MPa	延迟弹性/MPa	γ/%	k ₂ /10 ⁻⁷
木质素纤维	7.256	2.619	3 500	44.89	5.99	7.11	1.74	9.82
聚丙烯腈纤维	6.972	3.557	4 200	45.68	6.55	9.07	1.07	9.43
矿物纤维	6.581	3.247	5 250	46.06	6.74	21.61	0.99	8.56

尔稳定度只能在沥青混合料配合比设计中选择沥青最佳用量时使用,不能作为评价沥青混合料高温性能的指标。静态蠕变试验虽然可以得出不同纤维 SMA-10 的劲度模量,但之间的差别并不明显,而且与其他试验比较没有良好的相关性。动态蠕变试验与车辙试验及 RSCH 间有较好的相关性,动态蠕变试验的延迟弹性部分较好地体现了不同纤维 SMA-10 之间高温性能的差别;车辙的动稳定度也明显地反应了不同纤维对 SMA 高温性能的影响;RSCH 试验结果的评价指标体现了不同纤维混合料之间的区别。对于不同纤维混合料来说,车辙试验的动稳定度和动态蠕变试验的粘弹性常数及 RSCH 试验的 γ 和 k₂ 值,都可以用来评价不同纤维对 SMA-10 高温性能的影响^[16]。

相比之下,矿物纤维比另 2 种纤维具有更好的抗车辙性能;不同纤维 SMA-10 的劲度模量相差不大,动态蠕变试验及 RSCH 的结果表明,矿物纤维具有较好的高温性能。

从残留稳定度来看,不同纤维 SMA 的残留稳定度相差不大,木质素纤维的作用最好,这与木质素纤维的加入使混合料最佳沥青用量增加较多有关;从劈裂强度比来看,矿物纤维最低,但是其冻融前后的劈裂强度远高于另 2 种纤维,因此可认为矿物纤维 SMA-10 的动稳定性较好。

4 高温稳定性测试

由于影响沥青混合料高温性能的因素各异,可用于其高温性能试验的方法也很多,故本文采用车辙试验和动、静态蠕变试验以及恒高度重复剪切试验(RSCH)来评价不同纤维对沥青混合料高温稳定性的影响,试验温度均为 60℃^[15]。试验所得数据见表 9。表 9 中:γ 为永久剪切应变;k₂ 为沥青混合料第 2 阶段剪切变形曲线的斜率。

由表 9 的试验数据分析可知:各种纤维混合料的车辙动稳定度与马歇尔强度均满足规范要求;但很明显,车辙动稳定度、马歇尔稳定度及流值与沥青混合料性能试验结果排序是不一致的。因此,马歇

5 疲劳性能测试

本文采用 4 点弯曲疲劳试验,测试不同纤维对 SMA 沥青混合料疲劳性能的影响。试验设备采用英国沥青混合料试验设备生产商 Copper Research Technology Limited 生产的 UTM 动态伺服气动材料试验系统,其液压伺服加载装置为整个疲劳试验系统提供动力荷载,可根据要求输出不同频率、不同振幅以及不同形状的动力波形;力传感器能够准确测定所施加的荷载大小,测量精度为 1 N,最大测量荷载为 25 kN,在疲劳试验过程中可对试件所受到的荷载进行实时动态的检测^[17]。

5.1 疲劳试件的制备

制备 4 点弯曲疲劳试件的主要步骤,包括混合料拌和、碾压成型和试件切割。本研究中所采用的集料均经过水洗筛分,在烘箱中以 105℃±5℃烘干至恒重,并按照试验要求的级配严格进行配料,配制好的矿料在烘箱中预热至高于拌和温度约 15℃,在拌和机内的拌和时间为 240 s;采用轮碾成型设备

进行碾压,试板尺寸为 400 mm×300 mm×50 mm;将成型后的试板置于高精度金刚石双面锯内,采用双面同步切割技术切割成 400 mm×50 mm×50 mm 的标准 4 点弯曲小梁试件。

5.2 疲劳试验步骤

(1)所有沥青混合料小梁试件均在环境温控箱内在试验温度(15 ℃)下养护 4 h 以上,所采用的环境温控箱为气冷式,通过垂直方向循环输入一定温度的气流,以达到控制温度的目的。

(2)在控制软件中输入试验参数,包括:试验模式(应变控制模式)、试验波形(无间歇时间的偏正弦波)、试件尺寸(400 mm×50 mm×50 mm)、试验温度(15 ℃)、试验破坏准则(取初始劲度模量的 50%为破坏临界点)、试验荷载水平(应变水平)、试验频率(10 Hz)。本研究选取 200、300、400 微应变作为疲劳控制应变。

(3)将养护好的试件送入疲劳夹具内,通过定位板确定各夹头间距,夹紧夹头,将位移传感器放置在试件上表面。通过计算机控制启动疲劳试验,读取第 100 个加载循环时的劲度模量,作为试件的初始劲度模量。试验过程中,计算机系统自动控制加载,读取力传感器和位移传感器数值,在屏幕上实时显示各参数的变化情况,并按一定加载间隔自动记录试验数据,包括:加载次数、应力值、劲度模量、模量百分比、滞后角、耗散能等。当所测得的劲度模量下降至初始劲度模量的 50%时,试验自动停止。

5.3 试验参数计算方法

4 点弯曲疲劳试验结果的计算方法如下。

(1)最大拉应力 σ_t (kPa)

$$\sigma_t = \frac{LP}{wh^2} \times 10^6 \tag{1}$$

式中: L 为弯曲梁试件跨径(mm); P 为峰值荷载(kN); w 为弯曲梁试件宽度(mm); h 为弯曲梁试件高度(mm)。

(2) 最大拉应变 ϵ_t

$$\epsilon_t = \frac{12\delta'h}{3L^2 - 4a^2} \tag{2}$$

式中: δ' 为弯曲梁试件中心点最大变形(mm); a 为 $L/3$ (mm)。

(3) 弯拉劲度模量 S_{min} (MPa)

$$S_{min} = \frac{1\,000\sigma_t}{\epsilon_t} \tag{3}$$

(4) 滞后角 $\varphi(^{\circ})$

$$\varphi = 360fs \tag{4}$$

式中: f 为加载频率(Hz); s 为应变峰值滞后于应力

峰值的时间(s)。

(5) 单位荷载循环内的耗散能 D_i (kPa)

$$D_i = \pi\sigma_t\epsilon_t\sin(\varphi) \tag{5}$$

(6) 累积耗散能 D (kPa)

$$D = \sum_{i=1}^n D_i \tag{6}$$

式中: D_i 为第 i 次加载循环的耗散能。

5.4 疲劳性能试验结果

疲劳性能试验结果见表 10。

表 10 疲劳性能试验结果

纤维种类	应变水平	初始劲度模量/MPa	疲劳寿命/万次	滞后角/ (°)
木质素纤维	200	7 716	33.70	12.88
	300	7 514	4.57	14.23
	400	7 257	1.31	14.72
聚丙烯腈纤维	200	7 139	63.34	11.47
	300	6 779	18.26	14.16
	400	6 784	3.50	14.88
矿物纤维	200	6 975	57.83	12.30
	300	7 082	8.33	13.39
	400	6 986	2.28	13.06

由表 10 可知:3 种应变水平下木质素纤维 SMA-10 的初始劲度模量都大于矿物纤维和聚丙烯腈纤维,但其疲劳寿命相对较差;相比之下,聚丙烯腈纤维明显有助于沥青混合料疲劳寿命的增加;滞后角是反映沥青混合料粘弹比大小的指标,滞后角越大,混合料越倾向于粘性,反之则倾向于弹性。从 3 种纤维 SMA-10 的滞后角来看,3 种 SMA-10 的粘弹性性能差别并不大。

6 结 语

(1)纤维的加入能够改善沥青胶浆的高温性能,但其温度敏感性增大;随着温度的升高,纤维种类对沥青高温性能的影响逐渐降低。

(2)不同纤维对混合料的抗水损害能力影响不大,相比之下,矿物纤维 SMA-10 的冻稳定性更好,其高温稳定性也优于其他纤维;而聚丙烯腈纤维 SMA-10 的抗疲劳性能较好。

参考文献:

References:

[1] 李闯民. 开级配沥青磨耗层(OGFC)的研究[J]. 公路, 2002(3):70-75.
LI Chuang-min. Research on open-graded friction courses(OGFC)[J]. Highway, 2002(3):70-75.

- [2] 王 辉.不同纤维对 SMA 路用性能影响研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
 - [3] 王 民,刘 颖,薛 昕,等.高弹体改性 SMA 在桥面铺装中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(12):66-69.
WANG Min,LIU Ying,XUE Xin,et al.Application of high-elastic modified SMA in bridge deck pavement [J].Road Machinery & Construction Mechanization,2010,27(12):66-69.
 - [4] 陈华鑫.纤维沥青混凝土路面研究[D].西安:长安大学,2002.
 - [5] 朱朝辉.外掺纤维沥青混合料的路用性能研究[D].西安:长安大学,2004.
 - [6] 丁智勇.纤维沥青混合料应用研究[D].西安:长安大学,2004.
 - [7] Freeman R B,Barati J L,Amirkhanian S N.Polyester fibers in asphalt paving mixtures[J].Journal of Assoc Asphalt Paving Technology,1989,58:387-409.
 - [8] 赵 可,卢永贵,魏如喜.SMA 高温稳定性研究[J].中国公路学报,2004,17(2):11-17.
ZHAO Ke,LU Yong-gui,WEI Ru-xi.Research on high temperature properties of SMA [J].China Journal of Highway and Transport,2004,17(2):11-17.
 - [9] JTGE42—2005,公路工程集料试验规程[S].
 - [10] JTGF40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
 - [11] 赵丽华,孔永健,尚彦宇.纤维对沥青结合料性能改善的研究和分析[J].城市道桥与防洪,2005(6):153-155.
 - ZHAO Li-hua,KONG Yong-jian,SHANG Yan-yu.Study and analysis of performance improvement of fiber for bituminous bound-material[J].Urban Roads Bridges & Flood Control,2005(6):153-155.
 - [12] 张肖宁.沥青与沥青混合料的粘弹性力学原理及应用[M].北京:人民交通出版社,2006.
 - [13] AASHTO T 315-08,Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)[S].
 - [14] AASHTO T 313-08,Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rjeometer (BBR)[S].
 - [15] 舒富民,钱振东,罗 桑,等.复合式基层长寿命沥青路面设计指标和设计标准研究[J].筑路机械与施工机械化,2007,24(11):28-30.
SHU Fu-min,QIAN Zhen-dong,LUO Sang,et al.Re-search on design index and design standard of perpetual asphalt pavement with composite base[J].Pave-ment Machinery & Construction Technology,2007,24(11):28-30.
 - [16] 王旭东.沥青路面材料动力特性与动态参数[M].北京:人民交通出版社,2002.
 - [17] 张志祥,陈荣生,白琦峰.LSM 沥青混合料疲劳极限的试验研究[J].公路交通科技,2006,23(4):19-22.
ZHANG Zhi-xiang,CHEN Rong-sheng,BAI Qi-feng.Laboratory study of fatigue limit of LSM base mix-tures[J].Journal of Highway and Transportation Re-search and Development,2006,23(4):19-22.

(上接第 15 页)

 - [4] Manuel J C M,Jorge C P.Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method[R].Washington DC:Transportation Research Record,2005.
 - [5] 汪海年,郝培文.沥青混合料微观结构的研究进展[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(3):11-15.
WANG Hai-nian ,HAO Pei-wen.Advances in micro-structure study on asphalt mixture [J].Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2008,28(3):11-15.
 - [6] 田 波,候 芸,杜二鹏,等.沥青混合料中骨架结构特征的评价[J].同济大学学报,2001,29(5):541-545.
TIAN Bo,HOU Yun,DU Er-peng,et al.Characteris-tic evaluation of coarse aggregate in hot mix of asphalt [J].Journal of Tongji University,2001,29(5):541-545.
 - [7] 张争奇,李宁利,陈华鑫.改性沥青混合料拌和与压实温度确定方法[J].交通运输工程学报,2007,7(2):36-40.
ZHANG Zheng-qi,LI Ning-li,CHEN Hua-xin.Deter-mining method of mixing and compaction tempera-tures for modified asphalt mixture[J].Journal of Traf-fic and Transportation Engineering ,2007,7(2):36-40.
 - [8] 王助贫,邵龙潭.三轴试验土样的端部影响问题研究[J].岩石力学,2003,24(3):363-368.
WANG Zhu-pin,SHAO Long-tan.Research on influ-ence of end effect of soil specimens in triaxial tests [J].Rock and Soil Mechanics,2003,24(3):363-368.
 - [9] 杨 德.试验设计与分析[M].北京:农业出版社,2002.
 - [10] 黄志义,王金昌,朱向荣.含裂缝沥青混凝土路面的粘弹性断裂分析[J].中国公路学报,2006,19(2):18-23.
HUANG Zhi-yi,WANG Jin-chang,ZHU Xiang-rong.Viscoelastic fracture analysis of asphalt concrete pave-ment with cracks[J].China Journal of Highway and Transport,2006,19(2):18-23.
 - [11] Hartman A M,Gilchrist M D.Evaluating four-point bend fatigue of asphalt mix using image analysis[J].Journal of Materials in Civil Engineering,2004,16(1):60-68.