

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.09.003

聚酯布提高沥青路面车辙性能试验研究

杨群¹, 余承喜¹, 屠正彦², 孙文州³

- (1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;
2. 上海东南郊环高速公路投资发展有限公司, 上海 200336;
3. 上海市市政规划设计研究院, 上海 200031)

摘要: 为了研究高温与长期荷载条件下聚酯布对沥青路面抗车辙性能的影响, 选择两种聚酯布进行车辙与 MMLS3 试验, 并结合时-温等效理论分析两个试验结果的相关性。车辙试验结果表明与普通试件相比, 高温条件下 1[#]、2[#] 聚酯布试件的车辙深度依次降低 24.7% 和 55.7%, 动稳定度分别提高 1.8 和 2.5 倍。MMLS3 试验结果表明长期荷载作用下聚酯布试件的最终车辙深度比普通试件小约 20%; 25 万次加载后普通试件出现剪切裂缝, 进入破坏阶段, 聚酯布试件则进入稳定剪切变形阶段。两个试验共同说明高温与长期荷载条件下, 聚酯布均能有效分散轮胎荷载应力, 提高沥青路面的抗车辙性能。

关键词: 道路工程; 沥青路面; MMLS3 试验; 聚酯布; 车辙

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 09-0014-06

Experimental Study on Rutting Performance of Asphalt Pavement Improved by Polyester Paving Mat

YANG Qun¹, YU Cheng-xi¹, TU Zheng-yan², SUN Wen-zhou³

- (1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Southeast Outskirt Ring Expressway Investment Development Co., Ltd., Shanghai 200336, China;
3. Shanghai Municipal Planning Design Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: In order to study the impact of polyester paving mat on the anti-rutting performance of asphalt pavements under high-temperature and long-term loads, 2 kinds of polyester paving mat are selected to conduct rutting test and MMLS3 test, and the correlation between the 2 test results is analyzed by time-temperature equivalence theory. The rutting test result shows that the rutting depth of the 1st and the 2nd polyester paving mat specimens are reduced by 24.7% and 55.7% respectively, and the dynamic stability are increased by 1.8 and 2.5 times at high-temperature compared with the control specimens. The MMLS3 test result shows that (1) the final rutting depth of mat specimens is about 20% smaller than that of the control specimen under long-term loads; (2) after 250 000 times loading, the control specimens appeared shear cracks and entered into damage phases; while the polyester paving mat ones stepped into steady shear deformation phase. The 2 tests indicates that polyester paving mat can effectively disperse tire load stress and improve the anti-rutting performance of asphalt pavement under high-temperature and long-term loads.

Key words: road engineering; asphalt pavement; MMLS3 test; polyester paving mat; rutting

收稿日期: 2015-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178348)。

作者简介: 杨群 (1975-), 男, 江苏海安人, 教授. (qunyang.w@tongji.edu.cn)

0 引言

车辙是沥青路面最严重的病害之一, 面层尤其中面层沥青混合料的剪切流动是导致永久变形的主要原因。在温度或者环境荷载的作用下, 中面层混合料具有最大的剪应力; 现场调研表明中面层车辙占路面总车辙深度的 60% 左右^[1-2]。因此, 降低中面层混合料的车辙深度是提高路面整体抗车辙性能的关键。目前, 国内、外主要通过添加抗车辙剂、调整级配、增加面层厚度等方法来提高沥青路面的车辙性能^[3], 但很少从路面结构加强方面进行研究。

聚酯布是一种以聚合物为基础的土工材料, 具有与沥青混合料特性相似的黏弹性, 两者具有良好的相容性。国内、外学者对土工材料进行了大量研究。研究表明^[4-5], 土工格栅的加筋能够起到减少车辙、延缓反射裂缝发展, 加强面层, 延长寿命的作用; 东南大学的尹应梅^[6]的研究表明聚酯布能够提高沥青罩面的抗裂、防水、加筋等路用性能; 胡学亮^[7]的研究表明, 聚酯布能够起到减小荷载作用下的强度因子, 防止反射裂缝, 延长路面使用寿命的作用。

目前, 聚酯玻纤布在国外主要用于旧路面性能修复、防裂和桥面防水, 并没有对聚酯玻纤布提高沥青路面的抗车辙性能进行深入探讨。笔者认为聚酯布与聚酯布玻纤布具有类似的性质及作用, 其桥联增韧效应和整体效应, 以及与粒料间的嵌锁、加筋作用, 能够抑制沥青混合料的塑性变形, 减缓车辙发展。

因此, 本研究的主要目的是设计能够真实反映聚酯布对沥青路面抗车辙性能影响的试验方法, 对聚酯布沥青路面的抗车辙性能进行研究, 为类似复合沥青路面抗车辙性能的评价提供参考。

1 试验方案

选用车辙试验和小型加速加载 (MMLS3) 试验来分别研究高温与长期荷载条件下聚酯布对沥青路面车辙性能的影响。试件分为 1[#]、2[#] 聚酯布试件及对比试件 3 种。

1.1 车辙试验

研究表明^[8], 中面层是车辙易发的关键层位, 其混合料的剪切流动变形更易加重车辙病害。为了直观观测聚酯布对中面层混合料抗车辙性能的影响, 车辙试验将聚酯布碾压粘贴在车辙板顶面直接承受轮胎荷载作用, 试验时间延长至 90 min。与对比试

件的动稳定度、车辙深度、车辙发展规律进行对比分析, 研究高温环境下聚酯布对沥青路面抗车辙性能的影响。

1.2 MMLS3 试验

沥青是一种黏弹性材料, 沥青路面在长期荷载条件下会引起较大的永久变形。而 MMLS3 试验是现场车辙行为的有效模拟手段, 能在短期内获得实际路面路用性能在长期行车荷载作用下的变化规律^[9-12]。

因此, 通过小型压路机模拟沥青路面实际摊铺碾压方式成型试件, 利用 MMLS3 试验模拟实际长期行车荷载作用下车辙的发展。与普通试件的车辙深度、车辙发展规律及速率、外观形态进行对比分析, 研究长期荷载条件下聚酯布对沥青路面抗车辙性能的影响。

2 试验材料

2.1 聚酯布

试验选用 1[#]、2[#] 两种聚酯布, 根据《公路工程土工合成材料试验规程》(JTG E50—2006)^[13]对各种聚酯布的物理力学性能进行了试验, 试验结果见表 1。

表 1 聚酯布测试结果

Tab. 1 Experimental result of polyester paving mat

检测项目	技术要求	
	1 [#]	2 [#]
单位面积质量/(g·m ⁻²)	142.5	170.8
厚度/mm	1.08	1.15
纵向最大拉伸强度/(kN·m ⁻¹)	15.2	18.5
横向最大拉伸强度/(kN·m ⁻¹)	11.6	14.1
纵向延伸率/%	31.5	32.4
横向延伸率/%	30.2	31.8
15%形变强度 (纵向)/(kN·m ⁻¹)	9.2	11.2
15%形变强度 (横向)/(kN·m ⁻¹)	7.8	9.5
CBR 顶破强度/N	2 258	2 742

2.2 沥青混合料

试验选用中海 70[#] 基质沥青, 粗集料采用湖州某公司生产的辉绿岩; 细集料采用浙江富阳生产的石灰岩; 填料为石灰石料经细磨得到的矿粉。原材料均满足规范要求。试验选用 AC-13 和 AC-20 两种沥青混合料, 根据《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40—2004^[14] 马歇尔试验进行沥青混合料配合比设计, 级配见表 2, 设计参数见表 3。

表 2 级配设计结果
Tab. 2 Gradation design result

级配类型	通过各筛孔孔径 (mm) 的质量分数/%											
	26.5	19.0	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	100	100	100	90.3	74.7	53.0	30.1	20.0	12.7	7.4	5.0	3.0
AC-20	100.0	98.8	84.3	70.2	59.6	44.9	23.7	16.4	9.5	4.9	3.7	3.5

表 3 沥青混合料设计参数
Tab. 3 Design parameters of asphalt mixture

混合料 类型	最佳油石 比/%	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	空隙 率/%	稳定度/ kN	流值/ (0.1 mm)	浸水马歇尔残留 稳定度/%	劈裂强度/ MPa	冻融劈裂残留 稳定度/%
AC-13	5.0	2.46	4.2	11.48	33.8	92.4	0.776	86.6
AC-20	4.4	2.48	4.38	11.62	40.0	85.4	1.129	82

2.3 乳化沥青

试验选用常温下为液态的中裂型乳化沥青，保证洒布的均匀性。

3 试验设计

3.1 车辙试验设计

(1) 试验条件

车辙试验根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[15]中的相关规定进行，试验橡胶轮外径 20 cm，宽 5 cm，试验温度 60 ℃，胎压为 0.7 MPa，碾压速度为 42 次/min，试验时间延长至 90 min。试验混合料选用我国中面层材料常用的 AC-20，试件成型好后放入车辙试验机中保温 4 h 后进行车辙试验。试验开始之前，利用肥皂磨光聚酯布表面，然后涂抹一层矿粉，防止试验过程中聚酯布被试验轮带起。

(2) 试件成型方法

①利用轮碾法成型车辙板，碾压次数达到 30 次时停止碾压，在车辙板表面涂抹乳化沥青后粘贴聚酯布。

②在车辙板上方设置一张两面涂抹隔离液的橡胶板，防止碾压过程中聚酯布被带起，如图 1 所示，进行最后 12 次的碾压；对比试件则直接碾压 42 次。

③养生 48 h 后进行车辙试验。车辙试验示意图如图 2 所示。

3.2 MMLS3 试验设计

(1) 试件尺寸

因为 MMLS3 试验试槽宽为 20 cm，长为 95 cm，可测试的高度在 10 cm 之内，而且考虑到沥青面层厚度是混合料最大公称粒径 3 倍左右时的压实效果最好，因此试验的试件尺寸采用 4 cm AC-13+6 cm

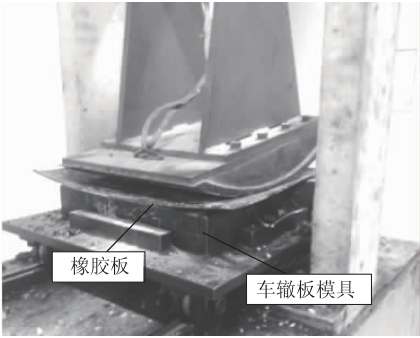


图 1 车辙板成型
Fig. 1 Rutting board molding

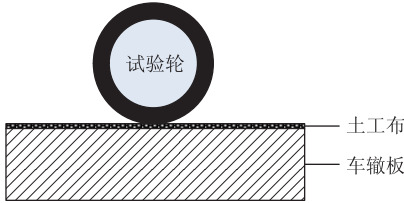


图 2 车辙试验模型
Fig. 2 Rutting test model

AC-20 的路面组合形式，这与实际常用的沥青路面结构形式一致。试件宽度取 14 cm，长度取 30 cm。

(2) 胎压和温度

MMLS3 最大轮载为 2.9 kN，作用于直径 300 mm 的充气轮胎。为了与车辙试验进行比较分析，试验的胎压取 0.71 MPa。试验温度为常温，约 25 ℃。

(3) 试件成型方法

试验利用小型压路机碾压成型，最后切割成符合尺寸要求的试件，压路机振动频率为 40 Hz，具体成型步骤如下：

①拌制沥青混合料，然后倒入模具中进行下面层的碾压。

②下面层混合料自然冷却后,洒布乳化沥青、铺设聚酯布,摊铺、碾压上面层。

③自然冷却后脱模,养生 48 h 后切割成 14 cm × 30 cm 的试件,3 个试件同时安放至 MMLS3 试槽中进行试验,如图 3 所示。试件模型如图 4 所示。

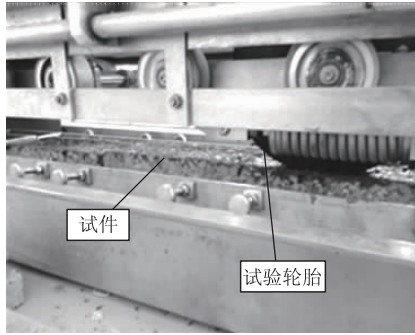


图 3 MMLS3 试验

Fig. 3 MMLS3 test

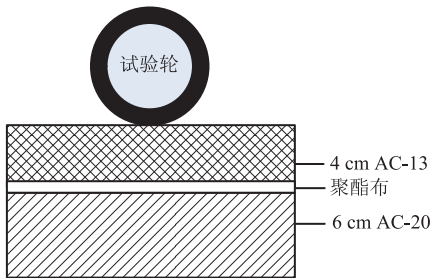


图 4 MMLS3 试验模型

Fig. 4 MMLS3 test model

4 试验结果分析

4.1 车辙试验结果

车辙试验获得的车辙深度及动稳定度结果见表 4。

表 4 车辙试验结果

Tab. 4 Result of rutting test

编号	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	车辙深度/mm
AC	2 451	2.596
TNP	6 923	1.954
TKP	8 630	1.149

注: TNP, TKP, AC 依次代表 1[#]、2[#]聚酯布试件和对比试件。

由表 4 可知,动稳定度的优劣如下: TKP > TNP > AC, 车辙深度正好相反,即含 2[#]聚酯布沥青混合料试件的动稳定度最优,普通试件最小。与普通试件相比,1[#]、2[#]聚酯布试件动稳定度依次提高了 1.8 和 2.5 倍,而车辙深度分别降低了 24.7% 和 55.7%,这说明聚酯布能够有效降低沥青路面车辙的深度,提高动稳定度。而对比试件动稳定度高达 2 451 次/mm,

主要是因为 AC-20 沥青混合料粗集料采用性能优良的辉绿岩,级配偏粗,骨架架构良好,强度较高。车辙发展曲线如图 5 所示。

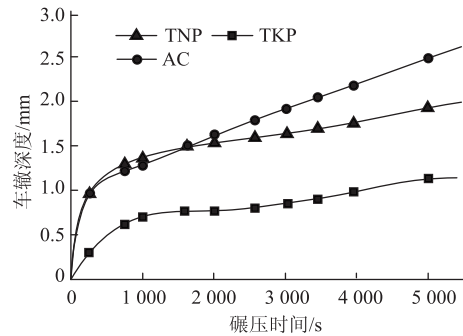


图 5 车辙试验车辙发展规律

Fig. 5 Rutting development law in rutting test

从图 5 中可以看出:

(1) 3 种试件的车辙曲线表现为明显两个阶段,即快速发展和稳定发展阶段。聚酯布试件和对比试件在第一阶段都具有较大车辙发展速率;第二阶段时聚酯布试件的车辙发展速率明显减小,说明此时聚酯布开始发挥减缓车辙发展的作用。聚酯布的横、纵向抗拉伸强度随着车辙深度的加深而增大,当车辙达到一定深度时,聚酯布形成具有一定强度的板体性结构,将轮胎荷载扩散至整个聚酯布表面,降低沥青混合料剪切流动变形的发展速率。由于 2[#]聚酯布的厚度、纵向及横向形变强度均大于 1[#],因此 2[#]聚酯布具有较好的效果。

(2) 高温条件下,两种聚酯布能够降低聚酯布下层沥青混凝土层的车辙发展速率;经过 90 min 轮胎直接碾压,两种聚酯布完好无损,说明聚酯布具有良好的耐久性能。

4.2 MMLS3 试验结果

根据试件车辙发展规律以及外观形态,测量不同累计碾压次数时的车辙深度,具体检测结果见表 5。

表 5 MMLS3 试验车辙深度

Tab. 5 Rutting depths in MMLS3 test

加载次数/(×10 ⁴ 次)	车辙深度/mm		
	TNP	TKP	AC
0	0	0	0
4	0.84	0.87	1.25
8	1.76	1.68	2.18
12	2.29	2.4	2.86
20	3.38	3.5	3.88
25	4.09	4.08	4.31
35	4.4	4.63	5.33
40	4.59	4.66	5.93

注: TNP, TKP, AC 依次代表 1[#]、2[#]聚酯布试件和对比试件。

由表5可知,与普通试件相比,1[#],2[#]聚酯布试件的车辙深度分别减小了1.34 mm和1.27 mm,降低幅度分别为21.4%和22.6%。这说明长期荷载条件下层间聚酯布能够有效减小沥青路面的车辙深度。

根据表5描绘出车辙变化规律如图6所示。

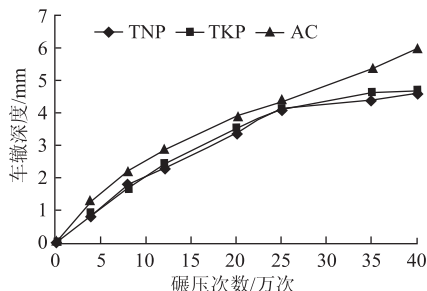


图6 MMLS3试验车辙发展规律

Fig. 6 Rutting development law in MMLS3 test

从图6中可以看出:

(1) 普通试件的车辙曲线存在两个迅速发展的阶段即0~25万次和25~40万次,而聚酯布试件存在车辙迅速阶段(0~25万次)和稳定发展阶段(25~40万次)。

(2) 碾压次数为25万次时,1[#],2[#]聚酯布和普通试件的车辙深度依次为4.09,4.08,4.31 mm,车辙发展规律和深度相近;聚酯布试件从25万次开始进入稳定发展阶段,而普通试件车辙仍迅速发展且车辙曲线呈现出发散的趋势。这是由于当碾压次数达到25万次时,试件端部从层间连接处开始出现剪切裂缝,导致混合料的整体抗剪切能力减小。随着轮胎荷载的作用,裂缝不断发展延伸至上下表面,加剧了混合料的剪切流动变形,使得混合料向两边推移隆起,加快车辙发展;而聚酯布试件具有非常好的整体性和强度,并没有出现破坏,加载40万次后试件表面状况如图7所示。轮胎荷载被分散到整个聚酯布表面,有效减小甚至消除应力集中现象,防止剪切裂缝的产生,从而起到减小混合料剪切流动变形和降低车辙发展速率的作用。

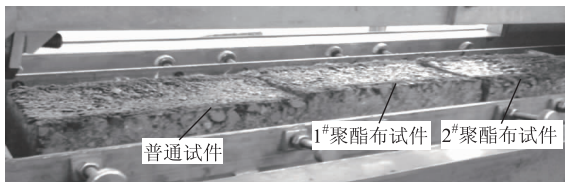


图7 MMLS3试验试件端部外表

Fig. 7 Appearance of specimen ends in MMLS3 test

(3) 根据上述分析可知,前25万次碾压沥青路

面主要发生的是压密型车辙,后15万次主要是剪切流动型车辙。

4.3 高温与长期荷载下车辙演变规律对比

温度和时间是沥青混合料力学特性的两个重要影响因素。升高温度增强分子链的运动能力,自由体积增多,表现为黏度下降,蠕变和松弛速度变快,因而升高温度与延长作用时间对混合料的塑性变形都是等效的^[16]。车辙试验的第2阶段耗时约80 min,碾压次数约为3 360次;而MMLS3试验在常温下经过约15万次碾压能够达到等量的车辙深度。因此,相同轴载条件下,高温短期荷载和常温长期荷载对沥青路面车辙发展的影响是等效的。

在车辙试验中,1[#],2[#]聚酯布试件和对比试件第2阶段的车辙深度发展速率依次为6 923,8 630,2 451次/mm;在MMLS3试验中则依次为50,43.1,15.4万次/mm,聚酯布试件的车辙发展速率显著低于对比试件。这说明在高温短期荷载与常温长期荷载聚酯布都能够起到延缓车辙发展的作用。

聚酯布在车辙试验与MMLS3试验第2阶段中都起到降低车辙深度发展速率的作用,且效果相近,而就最终车辙深度减小效果而言车辙试验效果更好。这主要是由车辙板压实程度的差异性与高温条件下沥青混合料蠕变和松弛速度变快等因素所致。

4.4 经济效益与技术效果分析

目前,国内常用SBS改性沥青与抗车辙来改善沥青路面的抗车辙性能。工程实践表明,同时使用两种材料时沥青混合料动稳定度指标能达到甚至超过6 000次/mm,工程造价增加约30元/m²,而混合料的高温性能改善效果及工程造价与铺设聚酯布相当。研究表明^[5-6],沥青路面层间铺设聚酯布还能够起到防止反射裂缝,延长路面使用寿命的作用。因此,沥青路面铺设聚酯布具有良好的经济效益与技术效果。

5 结论

(1) 90 min车辙试验表明聚酯布能够提高沥青路面的高温抗车辙性能,且具有良好的耐久性能;由于厚度和强度的差异性,2[#]聚酯布效果优于1[#]。

(2) MMLS3试验表明,与普通试件相比,常温下聚酯布试件的车辙深度减小了约20%。25万次加载次数是车辙发展的分水岭,聚酯布试件由此开始进入稳定剪切变形阶段,而普通试件则出现剪切裂缝,加速了车辙的发展,进而进入破坏阶段。

(3) 沥青混合料是一种典型的黏弹性材料,具

有显著的时温等效特性,车辙和MMLS3试验说明高温短期荷载和常温长期荷载作用会引起同样的永久变形。两个试验结果说明,聚酯布具有较强的整体性和强度,在高温和长期荷载条件下均能够有效扩散荷载应力,延缓车辙发展,提高沥青路面的抗车辙性能。

参考文献:

References:

- [1] SUN Li-jun, WANG Xin-wu. Analysis of Load Stress for Asphalt Pavement of Lean Concrete Base [J]. *Physics Procedia*, 2012, 24 (1): 404–411
- [2] XU Tao, HUANG Xiao-ming. Investigation into Causes of In-place Rutting in Asphalt Pavement [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 28 (1): 525–530.
- [3] 董泽蛟, 肖桂清, 龚湘兵. 级配及抗车辙剂对沥青混合料抗车辙性能的影响分析 [J]. *公路交通科技*, 2014, 31 (2): 27–31, 46.
DONG Ze-jiao, XIAO Gui-qing, GONG Xiang-bing. Analysis on Impact of Gradation and Anti-rutting Additive on Rutting Resistance of Asphalt Mixture [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31 (2): 27–31, 46.
- [4] BROWN S F, HUGHES D A B, BRODERICK B V. The Use of Polymer Grids for Improved Asphalt Performance [C] // *Bitumen, Flexible and Durable*, 3rd Eurobitume Symposium 1985. Hague, Netherland: Eurobitume, 1985.
- [5] 孙雅珍, 刘杰民, 赵复笑. 基于土工合成材料加铺层的沥青混凝土路面抗裂性能 [J]. *公路交通科技*, 2012, 29 (1): 34–37.
SUN Ya-zhen, LIU Jie-min, ZHAO Fu-xiao. Crack Resistance of Geosynthetics Overlay Based Asphalt Concrete Pavement [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012, 29 (1): 34–37.
- [6] 尹应梅. 聚酯玻纤布在高速公路罩面工程中的应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2005.
YIN Ying-mei. Research on Application of Fiberglass-polyester Paving Mat in Expressway Overlays [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [7] 胡学亮. 聚酯玻纤布防治半刚性基层沥青路面反射裂缝的机理研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
HU Xue-liang. Research on Mechanism of Using Fiberglass-polyester Paving Mat to Prevent Semi-rigid Asphalt Pavement Cracking [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [8] 黄菲. 沥青路面永久变形数值模拟及车辙预估 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
HUANG Fei. Numerical Simulation of Permanent Deformation and Rutting Prediction for Asphalt Pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [9] MARTIN A E, W ALUBITA L F, HUGO F, et al. Pavement Response and Rutting for Full Scale and Scaled APT [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2003, 129 (4): 451–461.
- [10] SIRIN O, TIA M, ROQUE R, et al. Evaluation of Performance Characteristics of the Heavy Vehicle Simulator in Florida [J]. *Building and Environment*, 2007, 42 (3): 1270–1277.
- [11] 潘友强, 杨军. 国内外足尺加速路面试验研究概况 [J]. *中外公路*, 2005, 25 (6): 137–140.
PAN You-qiang, YANG Jun. Research Summary of Full-scale Accelerated Road Test at Home and Abroad [J]. *Journal of China Foreign Highway*, 2005, 25 (6): 197–140.
- [12] 胡朋, 柳志军. 加速加载条件下沥青路面疲劳破坏分析 [J]. *山东交通学院学报*, 2010, 18 (1): 74–77.
HU Peng, LIU Zhi-jun. Asphalt Pavement Fatigue Failure Analysis in Condition of Accelerated Pavement Testing [J]. *Journal of Shandong Jiaotong University*, 2010, 18 (1): 74–77.
- [13] JTG E50—2006, 公路工程土工合成材料试验规程 [S].
JTG E50—2006, Test Methods of Geosynthetics for Highway Engineering [S].
- [14] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].
JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [15] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S].
JTG E20—2011, Specifications and Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [16] 周岚, 倪富健, 赵岩荆. 环境温度及荷载对沥青路面车辙发展的影响性分析 [J]. *公路交通科技*, 2011, 28 (3): 42–47, 54.
ZHOU Lan, NI Fu-jian, ZHAO Yan-jing. Impact of Environment Temperature and Vehicle Loading on Rutting Development in Asphalt Concrete Pavement [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28 (3): 42–47, 54.