

聚酯纤维沥青胶浆及混合料路用性能

董刚¹, 郑南翔¹, 王甲飞²

1. 长安大学公路学院, 西安 710064
2. 西安市政设计研究院有限公司, 西安 710068

摘要 为研究聚酯纤维沥青混合料的性能, 引入木质素纤维作对比, 对两种纤维的技术指标进行测试; 通过动态剪切流变试验、弯曲梁流变试验、车辙试验、低温弯曲小梁试验、冻融劈裂试验和四点弯曲疲劳试验分别对无纤维和掺加聚酯纤维、木质素纤维的沥青胶浆和沥青混合料性能进行试验研究, 并分析其改善机制。结果表明, 掺加纤维能显著地改善沥青混合料的路用性能, 聚酯纤维沥青混合料比木质素纤维混合料具有更优良的路用性能。

关键词 聚酯纤维; 沥青混合料; 路用性能; 四点弯曲疲劳试验

中图分类号 U414 **文献标志码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.03.007

Pavement performance of polyester fiber asphalt mortar and its mixture

DONG Gang¹, ZHENG Nanxiang¹, WANG Jiafei²

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, China

Abstract To study the performance of asphalt mixture with polyester fiber, polyester fiber is contrasted with lignin fiber. The test is taken for comparing the performances of the two fibers. By the tests of dynamic shear rheometer (DSR) and bending beam rheometer (BBR), the performance of polyester fiber asphalt mortar is studied. By the rutting test, low-temperature bending beam test, water stability test, and four point bending beam fatigue test, the pavement performance and the improvement mechanism of the asphalt mixture without fiber, the asphalt mixture with polyester fiber and the asphalt mixture with lignin fiber are comprehensively analyzed. The results show that the polyester fiber can evidently enhance the performance of the asphalt mixture, and that the mixture with polyester fiber obtains a better performance than the mixture with lignin fiber.

Keywords polyester fiber; asphalt mixture; pavement performance; four point bending beam fatigue test

作为一种高强、耐久、质轻的外掺增强材料, 纤维能显著改善沥青混合料的力学性能, 提高沥青路面的使用性能, 延长路面结构的疲劳寿命^[1]。目前, 中国沥青路面工程中常用的纤维主要有木质素纤维、矿物纤维和聚酯纤维 3 种^[2]。其中, 木质素纤维是应用时间最长、范围最广的一种路用有机纤维。近几年, 由于性能优良的木质素纤维价格连续上涨, 聚酯纤维在沥青混合料中的应用也更加广泛。目前, 聚酯纤维

研究主要集中在混合料路用性能及工程应用方面^[3-5]。系统分析纤维对沥青胶浆及混合料的作用方面的研究尚不多见^[6,7]。因此, 本文在对聚酯纤维物理性能测试的基础上, 对其沥青胶浆及混合料的性能进行试验研究, 引入无纤维和掺加木质素纤维的沥青胶浆及混合料进行对比试验, 系统分析其对沥青胶浆及混合料性能的改善作用, 并对路用纤维的种类进行优选。

收稿日期: 2014-10-14; 修回日期: 2014-12-30

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)项目(20120205110003)

作者简介: 董刚, 博士研究生, 研究方向为道路工程, 电子信箱: ykdonggang@126.com

引用格式: 董刚, 郑南翔, 王甲飞. 聚酯纤维沥青胶浆及混合料路用性能[J]. 科技导报, 2015, 33(3): 49-53.

1 聚酯纤维技术指标测试

引入常用的木质素纤维与聚酯纤维进行对比,按照相关

标准的测试方法分别对这2种纤维的耐热性、吸附沥青率、含水率和分散性等技术指标进行试验分析,结果见表1。

表1 试验用纤维的技术指标

Table 1 Technical indicators of polyester fiber and lignin fiber

检测项目	纤维长度/mm	吸附沥青率/%	含水率/%	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	最大断裂延伸率/%	耐热性 (210, 2 h)/%	分散性
技术要求	≤6	—	≤5	—	—	—	颜色、体积基本无变化;热失重≤6%	分散均匀,不结团
聚酯纤维	<6	449	1.25	30~40	>500	20~50	0.45	细丝状,分散均匀
木质素纤维	<6	662	2.56	30~40	<500	15~30	5.62	黏结絮状,分散均匀
方法	GB/T 14336—2008	JT/T 533—2004	JT/T 533—2004	JT/T 533—2004				

1.1 耐热性试验

将纤维静置于210℃高温的烘箱中2 h,测量其热失重,并观测物理性状变化。2种纤维耐热性试验结果对比如图1所示。

由图1可知,经高温后,聚酯纤维几乎没有什么明显变化,说明其没有发生明显的物理和化学变化,耐热性能良好;木质素纤维不仅颜色明显变暗,且体积明显减小,说明其耐热性能较差。

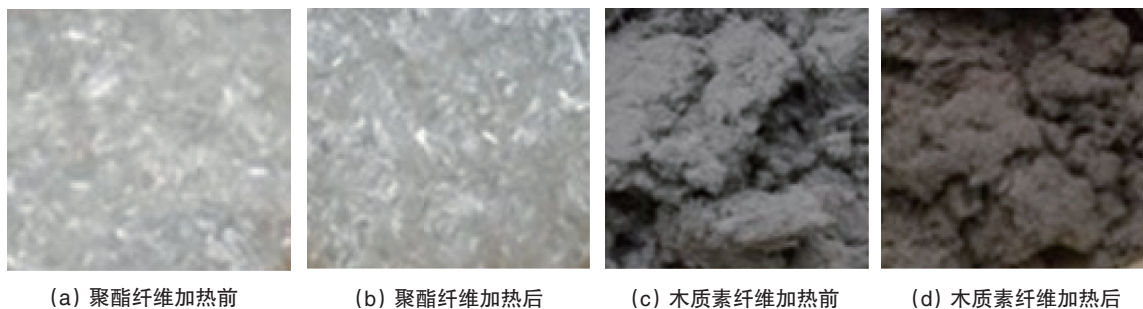


图1 两种纤维耐热性试验结果对比

Fig. 1 Comparison of polyester fiber with lignin fiber in heat resistance

1.2 吸附沥青率试验

在烧杯中称取烘干的纤维质量 m_1 为(5±0.10) g,向烧杯中倒入100 g热沥青,用玻璃棒充分搅拌15 min,静置5 min;称取试样筛质量 m_2 ,精确至0.01 g,置于纤维吸油率测定仪上;将塑料杯中的混合物倒入试样筛中,启动纤维吸油率测定仪,经10 min后仪器自动停机;取下试样筛,称取试样筛和吸有沥青的纤维质量 m_3 ,精确至0.01 g,可由式(1)计算出纤维的沥青吸附率 x_1 。

$$x_1 = \frac{(m_3 - m_2 - m_1)}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

从表1结果可知,木质素纤维的吸附沥青率约为聚酯纤维的1.5倍,说明聚酯纤维自身吸附的沥青较少。因此相同矿料级配下,聚酯纤维的最佳用量稍小于木质素纤维。若其混合料能够取得优良性能,则聚酯纤维能够在一定程度上降低沥青用量,节约施工成本。

1.3 含水率试验

称取未经烘干的纤维10 g置于温度为121℃的烘箱中恒

温2 h,纤维若成团应预先分散开;然后取出纤维,放入干燥器中冷却后,称取干燥纤维的质量,用加热前后纤维质量的差值除以未经烘干的纤维的总质量即为纤维的含水率。根据表1的试验结果,聚酯纤维的含水率是木质素纤维的一半,这表明其放在空气中不易受潮,容易存储。

1.4 分散性试验

先将拌和锅升温至180℃,然后将已经在200℃的烘箱中保温5 h的集料倒入拌和锅中搅拌30 s,再将纤维按质量分数0.3%的比例加入,最后再拌和90 s停机,观察纤维在矿料中的分散状态。结果显示,聚酯纤维以细丝状分散均匀,木质素纤维以黏结絮状基本分散均匀。

2 纤维沥青胶浆性能试验

采用人工分次加入搅拌的方法,将木质素纤维、聚酯纤维分别与沥青按质量比1:20制备纤维沥青胶浆,利用动态剪切流变试验(DSR)和筒支梁弯曲蠕变试验(BBR)测试分析2种纤维沥青胶浆和无纤维沥青胶浆的高、低温性能^[8-10]。

2.1 纤维沥青胶浆 DSR 试验及结果分析

试验选用壳牌SBS I-D改性沥青。将制备好的纤维沥青胶浆制作成直径为25 mm,厚度为1 mm的试样,进行DSR试验。试验频率 $\omega=10$ rad/s,试验温度从64℃至88℃,按6℃的增量递增。两种不同纤维胶浆以及无纤维沥青的DSR试验结果分别见图2和图3。

从图2可以看出,添加纤维有利于提高沥青胶浆的车辙因子 $G^*/\sin\delta$,能够改善胶浆的高温性能;随着试验温度的升高,两种纤维沥青胶浆车辙因子迅速降低,说明其对温度的敏感性较大。

相位角 δ 越大,表示胶浆变形中不可恢复的部分越大,越容易产生永久变形。如图3所示,改性沥青和纤维沥青胶浆的相位角相差较大,说明加入纤维增大了沥青胶浆的弹性,提高了其抗变形的能力。

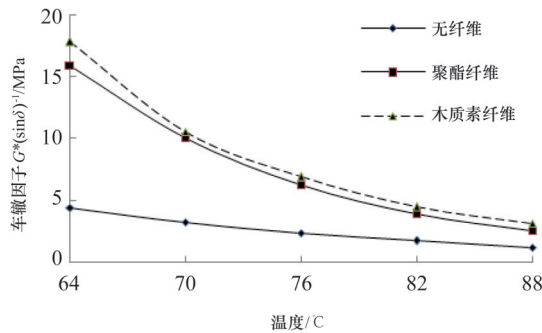


图2 纤维沥青胶浆的车辙因子与温度的关系
Fig. 2 Curves of relationship between $G^*\sin\delta^{-1}$ of fiber asphalt mortar and temperature

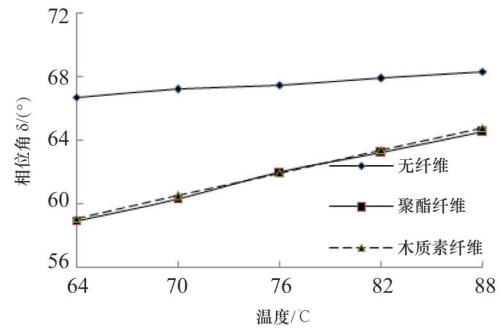


图3 纤维沥青胶浆的相位角与温度的关系
Fig. 3 Curves of relationship between δ of fiber asphalt mortar and temperature

纤维沥青胶浆的DSR试验结果表明,加入纤维能明显增强沥青胶浆的高温性能。这一方面是由于纤维的比表面积较大,吸附了沥青中的部分轻质油分,相当于提高了沥青质的相对含量,从而提高了沥青胶浆的黏度。另一方面,加入纤维提高了纤维沥青胶浆的抗剪强度和沥青-纤维之间的界面效应^[6]。由于在沥青吸附能力上存在差异,试验中木质素纤维对改性沥青高温性能的改善效果稍好一些。

2.2 纤维沥青胶浆 BBR 试验及结果分析

将3种试样经压力老化20 h后,制成尺寸为101.6 mm×12.7 mm×6.4 mm的沥青小梁,分别在-6、-12、-18℃条件下进行BBR试验,根据试验结果计算出沥青胶浆的蠕变劲度S和蠕变曲线斜率m值(表2)。

表2 不同纤维沥青 BBR 试验结果

Table 2 Results of BBR test in polyester fiber asphalt and lignin fiber asphalt

胶浆类型	S/MPa			m		
	-6℃	-12℃	-18℃	-6℃	-12℃	-18℃
无纤维	36.0	75.8	254.0	0.692	0.461	0.346
聚酯纤维	47.0	106.0	313.0	0.583	0.445	0.334
木质素纤维	59.0	112.0	403.0	0.487	0.379	0.293

由表2可知,加入纤维使得沥青的蠕变劲度增加,柔量降低,在-6℃和-12℃时,3种试样的劲度模量相差不大,随着温度降低到-18℃,木质素纤维沥青胶浆的劲度模量迅速增大,表明其抗低温开裂的能力较差。

3 混合料路用性能试验及结果

采用SMA-13和AC-13两种级配,分别对无纤维的沥青混合料、聚酯纤维沥青混合料和木质素纤维沥青混合料在各自的最佳油石比条件下进行路用性能试验。试验级配如表3所示。试验选用的粗集料为四川峨眉的玄武岩碎石,细集料为四川旺苍石灰岩轧制的机制砂,填料为石灰岩磨细矿粉。根据工程实际应用经验,试验中聚酯纤维和木质素纤维的合理掺量分别为0.25%和0.3%(质量分数)。

表3 试验用两种混合料的级配

Table 3 Gradations of SMA-13 and AC-13

筛孔/mm	通过率/%	
	SMA-13	AC-13
16.000	100.0	100.0
13.200	96.5	97.0
9.500	65.1	81.0
4.750	28.7	60.0
2.360	19.4	32.0
1.180	16.7	18.0
0.600	14.7	13.0
0.300	12.6	10.0
0.150	11.7	6.0
0.075	10.1	4.0

混合料的高温性能采用60℃的车辙试验评价。低温性能采用-10℃的小梁弯曲试验评价。水稳定性采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验评价。疲劳性能采用四点弯曲疲劳

试验进行测试,应变水平为300微应变,加载频率为10 Hz^[3]。两种不同级配混合料试验结果分别见表4和表5。

表4 掺加不同纤维的SMA-13沥青混合料路用性能试验结果

Table 4 Results of performance test of SMA-13 with polyester fiber and lignin fiber respectively

混合料种类	最佳油石比 OAC/%	动稳定度DS/ (次·mm ⁻¹)	破坏应变ε _d / 10 ⁻⁶	残留稳定度 MS _d /%	冻融劈裂强度比 TSR/%	疲劳寿命/ 10 ⁴ 次	飞散/%	析漏/%
无纤维	5.9	5477.5	2125.3	83.7	84.8	3.35	10.2	0.131
掺入0.25%聚酯纤维	6.1	9951.6	3147.6	93.2	94.9	17.26	3.5	0.062
掺入0.3%木质素纤维	6.3	7419.2	2903.9	90.5	92.3	9.57	3.1	0.043

表5 掺加不同纤维的AC-13沥青混合料路用性能试验结果

Table 5 Results of performance test of AC-13 with polyester fiber and lignin fiber respectively

混合料种类	最佳油石比 OAC/%	动稳定度 DS/(次·mm ⁻¹)	破坏应变ε _b / /10 ⁻⁶	残留稳定 度MS _d /%	冻融劈裂强 度比TSR/%	疲劳寿命 /10 ⁴ 次
无纤维	4.9	3473.2	1944.6	84.8	82.2	3.73
掺入0.25%聚酯纤维	5.1	6046.5	3376.2	91.6	88.9	12.75
掺入0.3%木质素纤维	5.2	4993.8	3169.5	90.1	83.4	6.74

4 混合料路用性能试验结果与改善机制分析

4.1 高温性能试验结果及分析

由表4和表5可知,两种掺加纤维的混合料其动稳定度DS明显大于无纤维的混合料,且聚酯纤维沥青混合料大于木质素纤维混合料。这表明掺加聚酯纤维的混合料高温性能最好,木质素纤维的次之,无纤维的较差。

这是由于沥青混合料是一种黏弹性材料,其变形能力可以用复数剪切模量 $G^*(\omega)$ 表示^[11,12]。复数剪切模量 $G^*(\omega)$ 与黏度 η 、弹性模量 G 及剪切振动频率 ω 有关:

$$G^*(\omega)=G'(\omega)+iG''(\omega) \quad (2)$$

式中, G' 为动力弹性模量,MPa; G'' 为损失弹性模量,MPa。 G' 和 G'' 与 η 、 G 、 ω 有关。

在相同的剪切振动频率下,沥青的复数剪切模量取决于黏度和弹性模量,黏度和弹性模量愈大,复数剪切模量愈大,混合料抵抗变形的能力越好。

沥青混合料的弹性模量受沥青胶浆弹性模量的影响较大,二者成正比,且沥青胶浆对沥青混凝土弹性模量的影响程度远大于集料的影响^[13]。同时,根据复合材料细观力学原理,由式(3)可知,纤维沥青复合材料的弹性模量与纤维的弹性模量和掺量成线性正比^[14]。因此,加入纤维能够增大沥青混合料的弹性模量。

$$G=G_f\Phi_f+G_m(1-\Phi_f) \quad (3)$$

式中, G_f 为纤维的弹性模量,MPa; G_m 为沥青的弹性模量,MPa; Φ_f 为纤维的体积分数,%。

加入纤维,增加了沥青的黏度且提高了混合料的弹性模量。因此,掺加纤维的沥青混合料有更大的复数剪切模量,具有更好的抵抗高温车辙变形的能力。

4.2 低温性能试验结果及分析

表4和表5中的结果表明,3种不同沥青混合料的 ϵ_b 的排序为:聚酯纤维沥青混合料>木质素纤维沥青混合料>无纤维沥青混合料。这表明加入纤维能显著提高沥青混合料的低温抗变形能力。

因为纤维本身具有良好的低温拉伸性能和较大的抗拉强度。加入纤维具有提高沥青混合料抗拉屈服强度和增加沥青混合料韧性的作用,提高沥青混合料低温开裂性能。可以运用复合材料的细观力学原理来解释这一结论^[14]:一方面,纤维的掺加增加了沥青混合料的抗拉屈服强度,有利于提升混合料的低温变形能力;另一方面,加入纤维,使得在纤维与沥青基体界面周围形成残余应力应变场及微裂纹。残余应力应变场可以抵消部分外加荷载,降低宏观裂纹扩展时裂纹的应力集中因子。微裂纹不仅能够释放材料中的应变而使裂纹区存在残余应变,从而降低宏观裂纹扩展后,其尾区的残余应变,具有增韧的效果,而且还能降低其周围材料的弹性模量,起到软化材料的作用,有利于降低宏观裂纹尖端的应力集中因子,产生增韧的效果。

4.3 水稳定性试验结果及分析

根据表4和表5所示数据,两种添加了纤维的混合料残留稳定度和冻融劈裂强度比都明显优于不掺加纤维混合料的材料。这是由于加入纤维,不但增大了混合料的油石比,也增加混合料的沥青膜厚度,同时增大了沥青的黏度。水需要更大的界面能剥离沥青和骨料间的黏结。

4.4 疲劳性能试验结果及分析

表4疲劳试验结果显示,两种掺加纤维混合料的疲劳寿命分别是无纤维混合料的5.15倍和2.86倍。表5中AC-13混

合料的疲劳试验结果也显示出相似的结果。这表示加入纤维能显著提高沥青混合料的抗疲劳性能。

用断裂力学和银纹理论可以解释这一现象。银纹是指材料表面或内部存在的缺陷受到应力集中作用时产生的细微纹痕。当形变进一步发展,取向伸直的纹痕发生断裂,就转化为微裂缝。在重复荷载的作用下微裂缝逐渐发育,最终引起断裂破坏。对于纤维沥青混合料,在银纹转化为裂缝时,界面处由于有交错纵横的纤维存在,会阻碍裂缝进一步发展。同时,纤维吸收并消耗了沥青混合料断裂所需的能量,导致沥青混合料的微裂纹转向或钝化,延缓了裂缝的产生,减慢了材料破坏的进程,从而延长了沥青混合料的疲劳寿命^[15]。

根据连续力学损伤原理,沥青混合料的疲劳寿命与其抗拉屈服强度成指数正比关系。掺加纤维能在理论上大大提高混合料的抗拉强度,显著延长沥青混合料的疲劳寿命。

5 结论

1) 掺加纤维对沥青混合料的抗拉强度和韧性有一定的提高,可以显著增强沥青混合料高温稳定性、低温抗裂性和抗疲劳性能。

2) 纤维沥青胶浆的BBR试验结果表明,掺加纤维反而降低了沥青胶浆的低温开裂性能,这与混合料低温小梁弯曲试验的结论和加入纤维能提高沥青混合料抗低温开裂能力的工程应用实际相矛盾,表明BBR试验在评价纤维沥青低温性能方面存在一定的缺陷。如何发展一种有效的评价方法有待进一步研究。

3) 纤维可以通过提高沥青混合料的最佳沥青用量来增加沥青膜的厚度,并能提高沥青的黏稠度,增大了沥青和集料表面之间的界面能,提升了沥青混合料的水稳定性。

4) 试验结果表明,与木质素纤维沥青混合料相比,聚酯纤维沥青混合料表现出更优良的路用性能。

参考文献(References)

- [1] 姚占勇, 张燕军. 沥青混合料用纤维性能分析[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(4): 69-74.
Yao Zhanyong, Zhang Yanjun. Performance analysis on the fibers of a bituminous concrete mixture[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science Edition, 2008, 38(4): 69-74.
- [2] 万军, 杨军. 聚酯纤维对沥青混合料性能影响的研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(5): 23-26.
Wan Jun, Yang Jun. Research on influence of polyester fibre on asphalt mixture performance[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(5): 23-26.
- [3] 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.
Wang Hui. Study on different fibres influences on pavement performance of SMA[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.
- [4] 周亮, 栗培龙, 张争奇, 等. 纤维对沥青混合料高温性能影响分析[J].

武汉理工大学学报, 2008, 30(11): 58-61.

- Zhou Liang, Li Peilong, Zhang Zhengqi, et al. Analysis of effect of fiber on high temperature performance of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(11): 58-61.
- [5] 赵颖华, 赵立东, 范颖芳, 等. 聚酯纤维改性沥青混合料的高温和水稳定性[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(5): 550-554.
Zhao Yinghua, Zhao Lidong, Fan Yingfang, et al. High temperature stability and water stability of asphalt mixture modified by polyester fiber[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5): 550-554.
- [6] 倪良松, 陈华鑫, 胡长顺, 等. 纤维沥青混合料增强作用机理分析[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2003, 26(5): 1033-1037.
Ni Liangsong, Chen Huaxin, Hu Changshun, et al. Discussion on the reinforcement mechanism of fiber-reinforced asphalt mixture[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2003, 26(5): 1033-1037.
- [7] 封基良. 纤维沥青混合料增强机理及其性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
Feng Jiliang. Study of Performance and Mechanism of Fiber Reinforced Asphalt Mixtures[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [8] American Society for Testing and Materials. D7175-08: Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer[S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [9] American Society for Testing and Materials. D6648-08: Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)[S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- [10] 卢永贵, 赵可. 玛蹄脂性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 9-13.
Lu Yonggui, Zhao Ke. Study of the test for the characterization of SMA mortars[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(4): 9-13.
- [11] 刘立新. 沥青混合料黏弹性力学及材料学原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
Liu Lixin. Asphalt mixture viscoelasticity and the principles of material science[M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [12] 张文刚, 纪小平, 宿秀丽, 等. 路用矿物纤维沥青混合料性能及增强机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(8): 50-54.
Zhang Wengang, Ji Xiaoping, Su Xiuli, et al. Study on Improvement mechanism and performance of asphalt mixture adding with mineral fiber used in pavement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(8): 50-54.
- [13] 朱兴一, 黄志义, 陈伟球. 基于复合材料细观力学模型的沥青混凝土弹性模量预测[J]. 中国公路学报, 2010, 23(3): 29-34.
Zhu Xingyi, Huang Zhiyi, Chen Weiqiu. Elastic modulus prediction of asphalt concrete based on composite material micromechanics model [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(3): 29-34.
- [14] 杜善义, 王彪. 复合材料细观力学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Du Shanyi, Wang Biao. Micromechanics of Composite[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [15] 吴中伟, 潘智勇, 梁立, 等. 增韧聚苯乙烯银纹化微观机理模型[J]. 科技导报, 2009, 27(15): 92-96.
Wu Zhongwei, Pan Zhiyong, Liang Li, et al. Micromechanical model for crazing in toughened polystyrene[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(15): 92-96.

(编辑 田恬)