

# 组合纤维沥青混凝土的抗裂性能试验

林增华<sup>1,2</sup>, 王凤池<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁科技大学土木工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

**摘要** 目的 为提高沥青混凝土路面的抗裂性能, 研究聚丙烯纤维和玻璃纤维格栅组合对沥青混凝土抗裂性能的影响规律. 方法 以 AC-16 沥青混凝土为例, 在配合比设计基础上进行纤维沥青混凝土的劈裂试验和弯曲试验, 得到聚丙烯纤维和玻璃纤维格栅的最佳组合方式. 通过车辙试验, 分析组合纤维混凝土的高温性能. 结果 确定粒径 10~20 mm 碎石、5~10 mm 碎石、石屑和矿粉 4 种矿料配合比, 质量分数分别为 29%、29%、39% 和 3%. 最佳油石比为 5.17. 聚丙烯纤维最佳掺量为 0.20%, 抗拉强度提高 5.63%. 玻璃纤维格栅铺设距离底面 10 mm 的位置时效果最佳, 抗拉强度提高到了 6.25 MPa. 最佳组合纤维沥青混凝土的动稳定度提高到了 1750.9 次/mm. 结论 确定了有利于阻止沥青混凝土开裂的最佳纤维组合形式, 聚丙烯纤维和玻璃纤维格栅均可有效提高沥青混凝土的抗拉强度.

**关键词** 组合纤维; 沥青混凝土; 最佳组合; 抗裂性能

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## The Crack Resistance Experiment of Composite Fiber Asphalt Concrete

LIN Zenghua<sup>1,2</sup>, WANG Fengchi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, China, 114051)

**Abstract:** In order to improve the crack resistance of asphalt concrete pavement, the influence of polypropylene fiber and glass fiber grille on the crack resistance of asphalt concrete is studied. AC-16 asphalt concrete taken as an example, the splitting test and bending test on fiber asphalt concrete are carried out on the basis of the mixture ratio design to obtain the best combination of the polypropylene fiber with the glass fiber grille. Through the wheel tracking test, the high temperature performance of the composite fiber concrete is studied. The mixture ratio of the four materials is determined and their mass fractions are 29%, 29%, 39% and 3% respectively. This four materials are crushed stone, gravel, aggregate chips and mineral powder. The crushed stone's

收稿日期: 2019-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678374)

作者简介: 林增华(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事道路防冻胀措施和固体废弃物应用方面研究.

size is 10 to 20 mm, and the other three materials' size is 5 to 10 mm. The optimum asphalt aggregate ratio is 5.17. When the optimum mixing amount of polypropylene fiber is 0.20%, the tensile strength increases by 5.63%. Best performance of fiber asphalt concrete can be obtained and its tensile strength increases to 6.25 MPa when the glass fiber grille is placed 10 mm away from the bottom. The dynamic stability of the optimum combined fiber asphalt concrete is improved to 1 750.9 times/mm. Both the polypropylene fiber and glass fiber grille can effectively improve the tensile strength of asphalt concrete. The best fiber combination for preventing cracking of asphalt concrete is determined.

**Key words:** composite fiber; asphalt concrete; optimum combination; crack resistance

我国地域辽阔,季节性冻土区分布十分广泛,道路冻害现象明显,沥青混凝土路面开裂现象普遍存在<sup>[1-5]</sup>. 沥青混凝土路面的使用性能研究主要集中了3个方向:使用改性沥青,让沥青能更好地与矿料相结合,从而提高沥青混凝土的抗裂性能;不断调整矿料级配,进一步优化矿料配合比;在普通沥青混凝土中添加不同比例的纤维,组成纤维沥青混凝土以提高强度. 纤维沥青混凝土具有更好的路用性能,能有效改善沥青混凝土的低温开裂和高温泛油现象,纤维在沥青混凝土中起到加筋作用,防治沥青混凝土开裂,从而提高了使用年限<sup>[6-8]</sup>. 曾梦澜等<sup>[9]</sup>进行了纤维沥青混凝土动力性能进行试验研究,得出聚酯纤维增强沥青混凝土抗压强度最佳. 卢玲<sup>[10]</sup>采用 ABAQUS 软件建立含裂缝的沥青路面二维有限元模型,研究了考虑冰劈效应的沥青路面裂缝的开裂机理. 封基良<sup>[11]</sup>研究了纤维沥青混凝土的作用机理,依据纤维沥青混凝土的试验结果,提出纤维的技术指标及要求. 高丹盈等<sup>[12-13]</sup>建立了纤维沥青混凝土的本构模型,分析和解释了沥青混凝土的蠕变特性. SUN Lu<sup>[14]</sup>建立了沥青混凝土连续两阶段黏弹性和黏塑性本构模型,分析了其蠕变机理,基于试验校核分析了沥青混凝土屈服阶段的受力特征. 马士宾<sup>[15]</sup>进行了聚丙烯纤维沥青混凝土的三分点加载试验,研究表明聚丙烯纤维的掺加提高了复合梁的抗折强度. 徐勋倩<sup>[16]</sup>构造了一种预测 FRA 黏弹性行为模型,推导出该模型的本构方程、蠕

变柔量和松弛模量表达式,通过试验校核了模型的可靠性. 不同沥青路面所处的外部环境不同,进而产生的沥青路面的开裂状态也不尽相同. 笔者结合鞍山地区沥青混凝土路面施工的具体情况,通过加入不同掺量的聚丙烯纤维从微观改善沥青结合料的连接性能,加入玻璃纤维格栅在沥青混凝土中起到加筋作用,得出最佳的纤维组合方式,双向纤维防治沥青混凝土抗裂,同时,基于最佳组合纤维沥青混凝土的车辙试验,进一步研究组合纤维沥青混凝土的高温性能,进而指导工程设计和施工.

## 1 试验材料

采用鞍山地区常用的沥青路面矿料,以 AC-16 矿料为例,选石灰岩质矿料分别是粒径为 10~20 mm 的 1 号碎石、5~10 mm 的 2 号碎石、石屑和矿粉,确定配合比. 试验用沥青为 SBS 改性沥青,按照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017)中的规定, SBS 改性沥青性能指标如表 1 所示.

表 1 SBS 改性沥青性能指标

Table 1 The performance index of SBS modified asphalt

指标来源	针入度/ 0.1 m	软化 点/℃	延度/ cm	闪点/ ℃	溶解 度/%
试验值	72	57	30.5	253	99.5
规范值	60~80	≥55	≥30	≥230	≥99

试验采用的聚丙烯纤维是山东海众土工材料有限公司生产,基本参数如表 2 所示.

玻璃纤维格栅采用的是山东路德新材料股份有限公司生产,型号为TGSB30-30,基本参数表3所示。

表2 聚丙烯纤维基本参数

Table 2 The basic parameters of polypropylene fiber

长度/ mm	直径/ μm	抗拉强 度/MPa	延伸 率/%	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
6 ± 1	20 ~ 30	≥500	≥15	1.38

表3 玻璃纤维格栅基本参数

Table 3 The basic parameters of fiberglass geogrid

纵向强度/ (kN·m <sup>-1</sup> )	横向强度/ (kN·m <sup>-1</sup> )	弹性模 量/MPa	伸长 率/%	网格/ mm
30	30	67	≤3%	25.4 × 25.4

## 2 沥青混凝土配合比设计

### 2.1 矿料配合比

依据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017),对4种矿料进行筛分,得到各自的通过率,将通过率输入矿质集料级配组成设计程序,经过试配,得到1号矿石、2号矿石、石屑和矿粉的配合比质量分数分别为:29%、29%、39%和3%。级配曲线如图1所示。

表4 马歇尔试验结果

Table 4 The data of marshall test

油石 比/%	实际密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	理论密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	沥青体 率/%	空隙率/%	料料空 隙率/%	饱和度/ %	稳定 度/kN	流值/ 0.1 mm	马氏模量/ (kN·mm <sup>-1</sup> )
3.5	2.398	2.562	8.0	6.4	13.6	53.0	13.83	44.4	3.10
4.0	2.444	2.544	9.3	3.9	12.3	68.0	10.23	41.4	2.49
4.5	2.418	2.525	10.3	4.3	13.7	68.9	7.58	37.8	1.91
5.0	2.402	2.504	11.3	4.1	14.7	72.4	8.73	42.9	2.20
5.5	2.418	2.483	12.5	2.6	14.5	82.3	8.01	33.0	2.69

依据表4的试验数据,分析不同油石比的马歇尔试件在稳定性、试件毛体积密度、目标孔隙率、矿料间隙率和设计沥青饱和度的变化规律。在同时满足5个方面公共沥青用量,确定最佳的油石比为4.77。随着纤维的

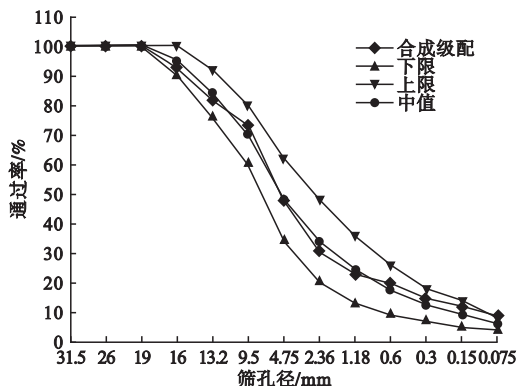


图1 矿料合成级配曲线

Fig. 1 The mineral gradation curve

### 2.2 沥青混凝土马歇尔试验

依据《公路工程沥青及沥青混凝土试验规程》(JTG E20—2011)关于沥青混凝土马歇尔试验相关规定,选取5种油石比,分别为3.5%、4.0%、4.5%、5.0%和5.5%。按试验标准击实成型马歇尔。由于试验粒径小于26.5 mm,试验选择长宽101.6 mm × 63.5 mm的标准马歇尔试件,每组3个试件,每个质量为1 200 g左右。试件成型后,量测试件的直径及高度,满足试验要求后,试验加载和计算按试验规程进行,确定最佳油石比。试验结果如表4所示。

加入,要吸附更多的沥青,根据文献[2]纤维沥青混凝土相比沥青混凝土沥青的用量会增加0.20%~0.60%,笔者采用增加0.40%,油石比采用5.17%。

### 3 聚丙烯纤维沥青混凝土劈裂试验

依据《公路工程沥青及沥青混凝土试验规程》(JTG E20—2011),试件制作过程和马歇尔试验试件制作相同,为了研究不同质量分数的聚丙烯纤维对抗裂性能的影响规律,试验参照参考文献[5]进行.分别选取劈裂试件的聚丙烯纤维占试件总质量的质量分数为0%,0.10%,0.20%,0.30%,每组3个试件,劈裂试验如图2所示.试验通过劈裂试验的最大荷载计算试件的抗拉强度,劈裂试验结果如表5所示.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi hD} \quad (1)$$

式中: $\sigma_t$ 为沥青混凝土的抗拉强度,kPa; $P$ 为试验的最大荷载,kN; $h$ 为试件的高度,m; $D$ 为试件的直径,m.



图2 劈裂试验

Fig. 2 The test of split

聚丙烯纤维的加入,能有效改善沥青和矿料的连接性能,增大沥青黏聚性,进而增加沥青对碎石结合料之间的包裹力,能有效阻止外荷载作用下裂缝的产生和贯通,最终达到防止沥青混凝土的开裂.随着聚丙烯纤维的加入沥青混凝土的抗拉强度先增大后减小,0.10%、0.20%和0.30%的聚丙烯纤维沥青混凝土的平均抗拉强度分别为

805.96kPa,819.20kPa,793.45kPa 相对普通沥青混凝土的775.5kPa 分别提高了3.93%、5.63%和2.31%,含聚丙烯纤维为0.20%的沥青混凝土效果最佳.

表5 劈裂试验结果

Table 5 The data of split test

试件编号	纤维质量分数/%	$h/mm$	$D/mm$	$P/kN$	$\sigma_t/kPa$
0—1	0.00	101.6	63.5	7.85	775.00
0—2	0.00	101.5	63.5	7.90	780.71
0—3	0.00	101.6	63.6	7.82	770.83
1—1	0.10	101.5	63.5	8.16	806.40
1—2	0.10	101.6	63.5	8.20	809.56
1—3	0.10	101.5	63.5	8.11	801.93
2—1	0.20	101.5	63.5	8.27	817.27
2—2	0.20	101.5	63.6	8.32	820.91
2—3	0.20	101.6	63.5	8.30	819.43
3—1	0.30	101.6	63.5	7.95	784.87
3—2	0.30	101.5	63.4	8.09	800.74
3—3	0.30	101.6	63.5	8.05	794.75

### 4 玻璃纤维格栅沥青混凝土弯曲试验

依据《公路工程沥青及沥青混凝土试验规程》(JTG E20—2011)的有关规定进行沥青混凝土的弯曲试验,玻璃纤维格栅距离试件底面的距离分别为0 mm,5 mm,10 mm和15 mm,先用轮碾法成型试件,长宽高为300 mm×300 mm×50 mm,成型后切制长为(250±2.0)mm,宽(30±2.0)mm,高(35±2.0)mm的棱形体小梁.为保证玻璃纤维格栅的铺设位置,采取分层填料,然后碾压,每个水平选取3个最优的合格试件.试验采用路面材料强度仪,可直接读取最大拉应力值,利用百分表测定试件跨中挠度,试验在(15±0.5)℃条件下进行,试验恒温处理、加载处理破坏试件如图3所示.玻璃纤维格栅沥青混凝土的抗弯拉强度计算结果如表6所示.

$$R_B = \frac{3LP_B}{2bh^2} \quad (2)$$

式中:  $R_B$  为试件破坏时的抗弯拉强度, MPa;

$h$  为跨中断面试件的高度, mm;  $b$  为跨中断面试件的宽度, mm;  $L$  为试件的跨径, mm;  $P_B$  为试件破坏时的最大荷载, kN.

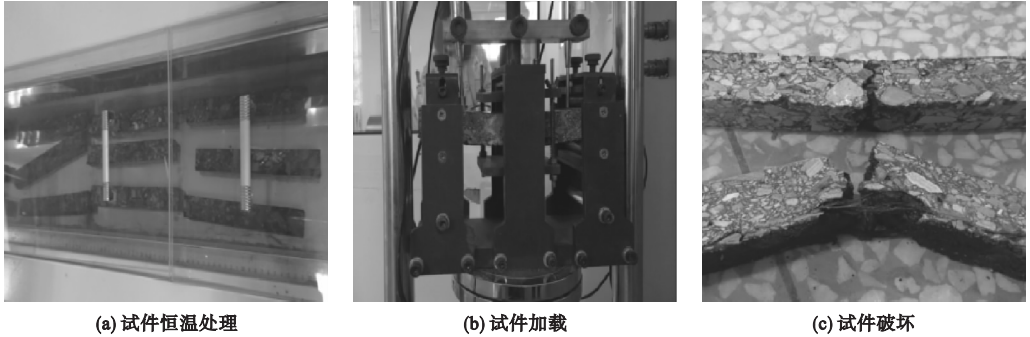


图3 小梁弯曲试验

Fig. 3 The test of trabecular bending

表6 小梁的抗弯曲试验数据

Table 6 Bending test data of trabeculae

试件编号	距底面位置 $H/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$P_B/\text{kN}$	跨中挠度/ mm	$R_B/\text{MPa}$	均值弯拉 强度/MPa
A-1	0	200.0	30.5	35.0	0.55	2.696	4.42	
A-2	0	200.0	30.0	34.5	0.58	2.965	4.87	4.54
A-3	0	200.0	30.5	34.5	0.54	2.790	4.46	
B-1	5	200.0	31.0	34.5	0.68	2.878	5.53	
B-2	5	200.0	30.5	35.0	0.73	2.969	5.86	5.69
B-3	5	200.0	31.0	34.5	0.70	3.086	5.69	
C-1	10	200.0	31.0	35.0	0.78	3.120	6.16	
C-2	10	200.0	30.0	34.5	0.75	3.285	6.30	6.25
C-3	10	200.0	30.5	34.5	0.76	3.350	6.28	
D-1	15	200.0	31.0	35.0	0.50	2.970	4.90	
D-2	15	200.0	30.5	35.0	0.63	3.070	5.06	4.97
D-3	15	200.0	30.5	34.5	0.60	3.080	4.96	

玻璃纤维格栅的加入,对沥青混凝土起到加筋的作用,进而提高了沥青混凝土的抗拉能力.在试验破坏过程中,随着荷载的作用,沥青混凝土产生挠曲变形,进而产生开裂,直至达到最大拉应力破坏,玻璃纤维格栅的加入能在一定程度上阻碍裂缝的深入开展,增加了沥青混凝土的承受变形能力,有效提高了劲度模量,当玻璃纤维格栅铺设位置的不同,纤维沥青混凝土也体现出不同的性质(见图4).在玻璃纤维格栅铺设位置为5 mm和10 mm的沥青混凝土中,相比于铺设玻璃纤维格栅的沥青混凝土抗拉强度分别提高了25.33%和34.67%,随着铺设位置的提高,抗拉强度先增加后减小,当铺设位置试件

底面距离是10 mm时,抗拉强度提高的最大,平均达到6.25 MPa.玻璃纤维格栅铺设位置距离底面为10 mm效果最好.

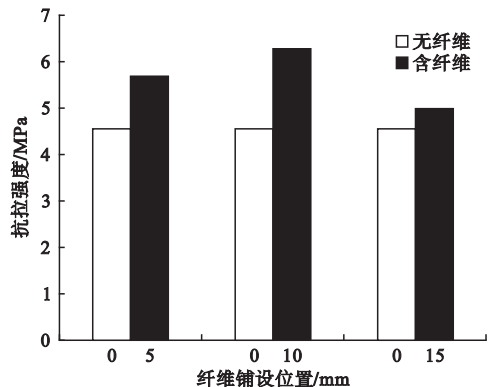


图4 纤维位置对抗拉强度对比

Fig. 4 Tensile strength with different fiber position



## 5 组合纤维沥青混凝土的车辙试验

通过聚丙烯纤维沥青混凝土的劈裂试验和玻璃纤维格栅沥青混凝土的弯曲试验确定掺量为0.20%的聚丙烯纤维和铺设位置距离底面为10 mm的玻璃纤维格栅的组合为两种的最佳纤维沥青混凝土的组合形式。为了进一步确定组合纤维沥青混凝土的高温性能,进行了组合纤维沥青混凝土的车辙试验。

试验按照《公路工程沥青及沥青混凝土试验规程》(JTG E20—2011)中有关车辙试验的规定进行。利用轮碾成型板块试件的长宽高为300 mm×300 mm×50 mm的普通沥

青混凝土和组合纤维沥青混凝土分别制作3个试件,试验采用河北献县生产的全自动车辙实验仪,试验温度为60℃,轮压为0.7 MPa,位移测量精度为0.01 mm,计算动稳定度DS,3个试件的动稳定变异系数小于20%,车辙试验计算结果如表7所示。

$$DS = \frac{N(t_2 - t_1)}{d_2 - d_1} \times c_1 \times c_2 \quad (3)$$

式中:DS为沥青混凝土的动稳定度,次/mm; $d_1$ 为对应于时间 $t_1$ 引起的变形量,mm; $d_2$ 为对应于时间 $t_2$ 引起的变形量,mm; $c_1$ 为试验机类型修正系数,曲柄连杆往返加载方式取1.0; $c_2$ 为试件系数,宽300 mm的试件为1.0; $N$ 为试验轮往返碾压速度。

表7 车辙试验计算结果

Table 7 The data of rutting test

试件类别	编号	$t_1$ / min	$t_2$ / min	$d_1$ / mm	$d_2$ / mm	$N$ / (次·min <sup>-1</sup> )	$DS$ / (次·mm <sup>-1</sup> )	动稳定度平 均值/(次·mm <sup>-1</sup> )
普通沥青 混凝土试件	a—1	45	60	2.46	3.11	42	969.23	989.91
	a—2	45	60	2.62	3.26	42	984.38	
	a—3	45	60	2.55	3.17	42	1 016.13	
组合纤维 沥青混凝土	b—1	45	60	1.62	1.97	42	1 800.00	1 750.9
	b—2	45	60	1.46	1.82	42	1 750.00	
	b—3	45	60	1.54	1.91	42	1 702.70	

组合纤维沥青混凝土在抵抗高温性能方面也得到了提升,相比于普通沥青混凝土,动稳定度均有大幅度提高,平均提升到1 750.9次/mm。组合纤维的加入,能防止沥青混凝土产生变形,进而大大提高了沥青混凝土抵抗车辙的能力。从而验证了组合纤维沥青混凝土不仅能抵抗沥青路面开裂,同时兼具沥青混凝土的抗高温车辙能力。

## 6 结论

(1)通过室内配合比试验得到矿料级配的质量分数分别为29%、29%、39%和3%。通过马歇尔试验得出最佳的油石比为5.17。

(2)聚丙烯纤维的加入能有效提高沥青混凝土的抗拉强度,随着聚丙烯纤维含量的

增加,沥青混凝土的强度先增加后减小,质量分数为0.20%的聚丙烯纤维沥青混凝土的提高值最大,最佳添加量聚丙烯纤维沥青混凝土的抗拉强度提高了5.63%。

(3)玻璃纤维格栅在沥青混凝土中起到加筋的作用,能有效防止裂缝的深入开展,能大幅度提高沥青混凝土的抗拉性能和挠曲变形能力,当铺设位置距离底面为10 mm时效果最佳,相比于普通沥青混凝土,玻璃纤维格栅沥青混凝土的抗拉强度提高了6.25 MPa。

(4)组合纤维沥青混凝土车辙试验表明,聚丙烯纤维和玻璃纤维格栅的加入能大幅提高沥青混凝土的高温抗车辙能力,动稳定度提高到了1 750.9次/mm。组合纤维沥青混凝土不仅具有很强的抗裂能力,同时,兼具抗高温车辙能

力,为组合纤维的实际应用提供了保证。

## 参考文献

- [1] 刘中林,田文,史建方,等.高等级公路沥青混凝土路面新技术[M].北京:人民交通出版社,2002.  
(LIU Zhonglin, TIAN Wen, SHI Jianfang, et al. High grade highway asphalt concrete ten new road surface technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.)
- [2] 张争奇,胡长顺.纤维加强沥青混凝土几个问题的研究和探讨[J].西安公路交通大学学报,2001(1):29-32.  
(ZHANG Zhengqi, HU Changshun. A study on fiber-enhanced asphalt concrete [J]. Journal of Xi'an highway transportation university, 2001 (1): 29-32.)
- [3] 吴涛.聚酯纤维沥青混凝土在桥面铺装中的应用的研究[D].南京:东南大学,2009.  
(WU Tao. Study on the application of polyester fiber asphalt concrete in bridge deck pavement [D]. Nanjing: Southeastern University, 2009.)
- [4] 何德云.纤维增强沥青混凝土性能研究[D].重庆:重庆交通学院,2005.  
(HE Deyun. Study on properties of fiber reinforced asphalt concrete [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2005.)
- [5] 郭乃胜.聚酯纤维沥青混凝土的静动态性能研究[D].大连:大连海事大学,2007.  
(GUO Naisheng. Static and dynamic performance of polyester fiber reinforced asphalt concrete [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007.)
- [6] 赵豫生,李红涛.玄武岩短切纤维对沥青混凝土性能的影响[J].公路交通科技,2012,29(9):38-42.  
(ZHAO Yusheng, LI Hongtao. Impact of short-cut basalt fiber on asphalt concrete performance [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2012, 29 (9): 38-42.)
- [7] 谭忆秋,刘凯,王英园.碳纤维/石墨烯导电沥青混凝土的非线性伏安特性[J].建筑材料学报,2019,22(2):278-283.  
(TAN Yiqiu, LIU Kai, WANG Yingyuan. Nonlinear voltammetric characteristics of carbon fiber/graphene conductive asphalt concrete [J]. Journal of building materials, 2019, 22(2): 278-283.)
- [8] 吴金荣,马芹永.聚酯纤维对透水沥青混凝土冲击压缩性能的影响[J].爆炸与冲击,2016,36(2):279-284.  
(WU Jinrong, MA Qinyong. Influence of polyester fiber on impact compressive characteristics of permeable asphalt concrete [J]. Explosion and shock waves, 2016, 36(2): 279-284.)
- [9] 曾梦澜,彭珊,黄海龙.纤维沥青混凝土动力性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2010(8):1-6.  
(ZENG Menglan, PENG Shan, HUANG Hailong. Experimental study of the dynamic proper ties of fiber reinforced asphalt concrete [J]. Journal of Hunan university (natural science edition), 2010(8): 1-6.)
- [10] 卢玲.考虑冰裂效应的沥青路面开裂研究[D].大连:大连海事大学,2013.  
(LU Ling. Study on cracking of asphalt pavement considering the ice-split effect [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013.)
- [11] 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,2005.  
(FENG Jiliang. Study of performance and mechanism of fiber reinforced asphalt mixtures [D]. Nanjing: Southeastern University, 2005.)
- [12] 高丹盈,黄春水.纤维沥青混凝土五单元八参数粘弹性力学模型[J].中国公路学报,2014,27(2):1-8.  
(GAO Danying, HUANG Chunshui. Viscoelastic mechanical model with five units and eight parameters for fibre reinforced asphalt concrete [J]. China journal of highway and transport, 2014, 27(2): 1-8.)
- [13] 高丹盈,黄春水.纤维含量特征参数对纤维沥青混凝土粘弹性力学模型的影响[J].应用基础与工程科学学报,2015,23(4):715-727.  
(GAO Danying, HUANG Chunshui. Influence of fiber content characteristic parameter on viscoelastic mechanical model of fiber reinforced asphalt concrete [J]. Journal of basic science and engineering, 2015, 23 (4): 715-727.)
- [14] SUN L, ZHU Y. A serial two-stage viscoelastic-viscoplastic constitutive model with thermodynamical consistency for characterizing time-dependent deformation behavior of asphalt concrete mixtures [J]. Construction and building materials, 2013, 40: 584-595.
- [15] 马士宾,高建强,徐文斌,等.聚丙烯纤维混凝土-沥青混凝土复合切口梁弯曲韧性研究[J].硅酸盐通报,2018,37(4):1423-1429.  
(MA Shibin, GAO Jianqiang, XU Wenbin, et al. Flexural toughness of polypropylene fiber concrete over asphalt concrete composite notch beam [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2018, 37(4): 1423-1429.)
- [16] 徐勋倩,郭贺贺,仇云强,等.纤维沥青混凝土FRA粘弹性预测模型[J].计算力学学报,2018,35(6):763-768.  
(XU Xunqian, GUO Hehe, QIU Yunqiang, et al. Viscoelasticity prediction model of fiber reinforced asphalt concrete-FRA [J]. Chinese journal of computational mechanics, 2018, 35 (6): 763-768.)
- (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)