

文章编号:1671-6833(2009)02-0040-04

# 纤维沥青混合料最佳纤维掺量与动稳定度计算模型

高丹盈, 黄春水, 汤寄予

(郑州大学 新型建材与结构研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 在原材料物理力学性能试验的基础上, 利用图解法并经过配合比调整和优化, 得出沥青混合料 AC-13 I 的配合比. 通过不同纤维种类、不同纤维掺量下沥青混合料的马歇尔试验, 得出纤维沥青混合料的最佳沥青用量 OAC, 然后通过高温车辙试验, 研究纤维种类和掺量对沥青混合料动稳定度的影响, 得出不同种类纤维的最佳掺量. 结果表明: 纤维能显著改善沥青混合料的高温性能; 不同种类的纤维在沥青混合料中对应着不同的最佳掺量. 最后, 建立了考虑基体沥青混合料动稳定度与纤维掺量、纤维类型影响的纤维沥青混合料动稳定度的计算模型.

**关键词:** 道路工程; 纤维沥青混合料; 车辙试验; 高温性能; 最佳纤维掺量

**中图分类号:** TU 528.42 **文献标识码:** A

## 0 引言

纤维沥青混凝土因其优良的路用性能, 受到越来越多的重视. 对于纤维沥青混凝土路用性能的研究, 主要以试验为依托, 研究纤维沥青胶浆的性能、纤维沥青混凝土的高、低温等路用性能以及纤维沥青混凝土的动态性能, 运用复合材料理论、界面化学理论等对纤维的增强作用进行分析和探讨<sup>[1-4]</sup>. 总结这些已有的研究成果, 仍存在一些不足. 首先, 混合料级配的选择均集中在规范推荐的级配中值<sup>[3]</sup>具有局限性; 纤维对沥青混凝土高温性能的增强作用, 必然对应一个最佳纤维掺量, 不同类型纤维最佳掺量的确定仍需进一步研究. 另外, 纤维对沥青混合料高温性能的增强改善作用, 仅仅停留在与普通沥青混凝土或者不同纤维沥青混凝土之间车辙动稳定度数值的简单对比上, 纤维增强能力有一个限度, 增强能力与哪些因素有关以及如何去计算等尚缺乏研究. 最后, 纤维增强作用的机理还需进一步完善. 为此, 本研究通过集料筛分试验, 调配出满足规范要求并经试验验证满足要求的集料级配, 然后进行马歇尔试验, 确定纤维沥青混合料的最佳油石比, 再通过基体沥青混凝土与纤维沥青混凝土高温车辙试验, 分析增强机理, 建立纤维沥青混凝土动稳定度计算模型,

并进一步研究纤维对基体沥青混凝土高温性能的增强能力, 从纤维增强能力出发, 确定纤维最佳掺量.

## 1 原材料及合成级配

试验采用国产 AH-70 沥青, 实测各项技术指标见表 1. 采用两种纤维, 一种是国产木质素纤维, 技术指标为: 纤维长度 < 6 mm, 灰分含量 18% ± 5%, 无挥发物, PH 值为 7.5 ± 1.0, 吸油率不小于纤维质量的 5 倍. 另一种是国产聚酯纤维, 主要技术指标为: 聚酯材质, 本色单丝, 比重 1.38, 直径 4 ~ 6 D (9 km 重 4 ~ 6 g 为 1D), 熔点 255 ~ 260 °C, 燃点 554 ~ 559 °C, 断裂伸长率 20% ~ 30%, 抗拉强度大于 500 MPa, 弹性模量大于 11 800 MPa.

表 1 AH-70 沥青主要技术指标  
Tab. 1 Major technical indexes of AH-70

指标	针入度 P/0.1 mm			软化点 SP/°C	延度 D/cm
	15°C	25°C	30°C		
测值	37	76	113	49	155

集料为玄武岩 S13 碎石、石灰岩 S10 碎石、花岗岩砂子和石灰岩矿粉, 级配为 AC-13 I. 主要物理力学性能见表 2. 原材料经过筛分试验后用图

收稿日期: 2008-11-15; 修订日期: 2009-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(50579068)

作者简介: 高丹盈(1962-), 男, 河南三门峡人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事新型建筑复合材料及其结构性能方面的研究.

解法<sup>[5]</sup>确定矿质混合料初始配合比为:S10 碎石:S13 碎石:石屑:砂子:矿粉=25:19:24:24:8。经调整优化后各矿料的最终级配为:S10 碎石:S13 碎石:石屑:砂子:矿粉=27:21:23:22:7。最终级配曲线与调整优化前的级配曲线、规范<sup>[6]</sup>规定的 AC-13I 级配上限、下限和中值之间的关系见图 1。

表 2 集料力学性能

Tab. 2 Mechanical performance of aggregates

项目	表观相对密度	压碎值/%	磨耗度/%
S10 碎石	2.84	26.0	26.4
S13 碎石	2.90	11.3	26.2
石屑	2.72	—	—
砂子	2.58	—	—
矿粉	2.63	—	—

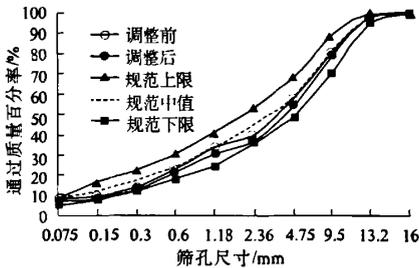


图 1 矿质混合料级配范围与合成级配曲线

Fig 1 Grading curve of mineral mixture

## 2 马歇尔试验

为得到不同种类纤维沥青混合料的最佳组成和最佳纤维掺量,首先由马歇尔试验确定无纤维沥青混合料的最佳组成作为对照组,并形成纤维沥青混合料的基体。在无纤维沥青混合料马歇尔试验确定的最佳油石比的基础上,将纤维作为掺合料,分别以一定间隔的掺量添加到沥青混合料中,同时以适当比例增加沥青用量,从而在每一纤维掺量下,又分别以一定间隔的沥青用量成型马歇尔试件进行试验,以确定在此种纤维掺量下沥青混合料的最佳油石比。马歇尔试验方案见表 3。

按照文献 [7] 规定的方法进行试验。纤维加入到集料中先搅拌 1 min,均匀后加入沥青,总搅拌时间比普通沥青混合料延长 3 min 左右,以使纤维在沥青混合料中尽量分散、均匀。

由不同种类的纤维沥青混合料在不同纤维掺量及不同沥青用量下的马歇尔试验结果,根据文献 [8] 规定的方法,得到不同纤维种类在不同纤维掺量下的纤维沥青混合料最佳沥青用量(油石比)OAC,结果见表 4。

根据试验结果,最佳沥青用量 OAC 与纤维掺量的关系见图 2。可以看出,曲线的峰值点以前,

最佳沥青用量 OAC 随着纤维掺量的增加而增加;峰值处,聚酯纤维引起最佳沥青用量 OAC 增加约 0.48%,木质素纤维引起最佳沥青用量 OAC 也约增加 0.48%;峰值点后,随着纤维掺量的增加,最

表 3 马歇尔试验设计

Tab. 3 Design of Marshall test

纤维类型	纤维掺量 /%	油石比 /%	试件组数/组
聚酯纤维	0	5.0	5
		5.5	
		6.0	
		6.5	
		7.0	
		5.8	
	0.15	6.0	4
		6.2	
		6.4	
		5.6	
		5.8	
		6.0	
0.25	6.0	5	
	6.2		
	6.4		
	5.8		
	6.0		
	6.0		
0.35	6.2	4	
	6.4		
	5.8		
	6.0		
	6.0		
	6.2		
木质素纤维	0.15	6.2	4
		6.4	
		5.6	
		5.8	
		6.0	
		6.0	
	0.25	6.0	5
		6.2	
		6.4	
		5.8	
		6.0	
		6.4	
0.35	6.2	5	
	6.4		
	6.6		
	5.8		
	6.0		
	6.6		

表 4 不同纤维种类不同纤维掺量下纤维沥青混合料的最佳沥青用量

Tab. 4 Optimal bituminous content of asphalt mixture at different fiber type and content %

混合料类型	纤维掺量	OAC <sub>min</sub>	OAC	OAC <sub>max</sub>	ZOAC
AC	0	5.25	5.59	5.90	0.65
	0.15	5.80	6.07	6.48	0.68
PFAC	0.25	5.65	5.95	6.05	0.40
	0.35	5.72	5.94	6.05	0.33
CFAC	0.15	5.65	5.95	5.98	0.33
	0.25	5.77	6.07	6.12	0.35
	0.35	5.70	6.03	5.99	0.29

佳沥青用量 OAC 逐渐减少. 这表明, 随着纤维掺量的增加, 纤维的比表面积增大<sup>[4]</sup>, 由于沥青对纤维的浸润以及纤维对沥青的吸附与稳定作用, 使得 OAC 增加. 但是, 当纤维掺量进一步增加后, 过量的纤维在沥青混合料中的分散性、均匀性降低, 甚至结团成束, 使纤维总表面积不再增加甚至减少, 所以会出现 OAC 不再增加甚至减少的波动现象. 由此可见, 最佳沥青用量 OAC 的变化反映了纤维在沥青混合料中的分散程度, OAC 曲线峰值点处对应纤维最佳掺量.

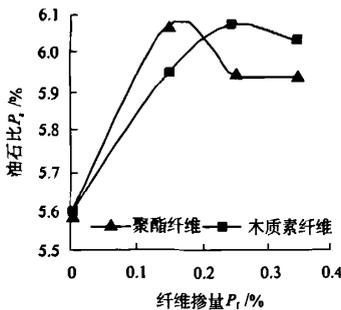


图2 纤维掺量与油石比的关系

Fig. 2 Relationship between fiber content and asphalt content

### 3 高温车辙试验

依照文献[6]的试验方法, 分别测试作为对比组的 AC-13 I 沥青混合料基体、纤维掺量分别为 0.15%、0.25% 和 0.35% 的聚酯纤维和木质素纤维沥青混合料在各自 OAC 下 60 ℃ 的动稳定度, 结果见表 5.

表5 纤维沥青混合料动稳定度试验结果

Tab. 5 Result of dynamic stability of fiber reinforced asphalt mixture

混合料类型	纤维掺量/%	最佳沥青用量/%	DS/(次·mm <sup>-1</sup> )
无纤维	0	5.59	1 228
	0.15	6.07	2 328
聚酯纤维	0.25	5.95	2 400
	0.35	5.94	2 274
木质素纤维	0.15	5.95	1 590
	0.25	6.07	1 899
	0.35	6.03	1 240

纤维沥青混凝土动稳定度与纤维掺量的关系见图 3.

可以看出, 纤维沥青混凝土动稳定度较普通沥青混凝土基体动稳定度有显著提高, 当纤维掺量为 0.25% 时, 聚酯纤维沥青混凝土的动稳定度

提高约 95%, 木质素纤维沥青混合料动稳定度提高约 55%. 由此可见, 纤维的加入能显著改善沥青混凝土的高温性能. 这是因为, 一方面, 纤维沥青混凝土中, 大量纵横交错乱向分布的纤维形成的桥架作用<sup>[4-5]</sup>与沥青胶浆的粘聚力相互重叠与补充, 阻止了骨料间的滑移, 承受了由于温度升高所产生的拉应力, 弥补了沥青的粘聚力, 从而提高了沥青混凝土的高温稳定性; 另一方面, 由于纤维直径一般小于 20 μm, 每克纤维的表面积可达数千平方米以上, 纤维分散到沥青混合料中, 其巨大的表面积与沥青的浸润作用形成的界面层<sup>[9-10]</sup>缓冲了沥青混凝土这种复合材料中各相间的应力, 纤维对沥青的改性以及界面层中形成的化学键<sup>[9-10]</sup>增加了沥青粘性, 降低了沥青的感温性, 从而提高了沥青混凝土的高温稳定性.

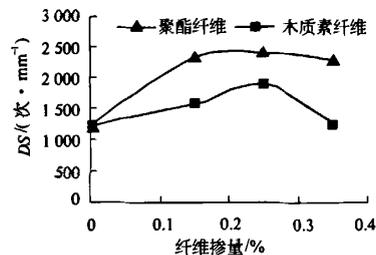


图3 纤维类型及掺量与动稳定度关系

Fig. 3 Relationship of the fiber type and fiber content with the dynamic stability

由图 3 还可以看出, 在适量纤维掺量下, 纤维沥青混凝土动稳定度随纤维掺量增加而增大, 聚酯纤维沥青混合料在纤维掺量约为 0.18% 时出现动稳定度峰值; 木质素纤维沥青混凝土在纤维掺量为 0.25% 时出现动稳定度峰值, 随后逐渐减小或者不稳定波动. 这说明纤维对沥青混凝土高温性能的增强作用对应一个最佳掺量, 此时纤维对沥青的稳定、改性和对混合料的加筋作用<sup>[4]</sup>达到最佳, 聚酯纤维最佳掺量约为 0.18%, 木质素纤维最佳掺量约为 0.25%. 当纤维掺量超过最佳掺量后, 纤维沥青混合料的动稳定度开始下降或不稳定波动, 这是因为, 过量的纤维使其分散、均匀性下降, 那些未分散的纤维结团成束后, 成为混合料中的“瑕点”<sup>[11]</sup>, 不能充分发挥纤维的改性、增粘以及加筋作用, 甚至降低了沥青混凝土的高温稳定性.

当纤维掺量在最佳掺量范围内, 纤维对沥青混凝土高温性能的增强作用主要与普通沥青混合料动稳定度、纤维类型和纤维掺量有关, 考虑三者影响的纤维沥青混凝土动稳定度的计算模型为:

$$DS_f = DS(1 + \alpha_f \lambda_f) \quad (1)$$

式中:  $DS_f$  为纤维沥青混合料的动稳定度, 次/mm;  $DS$  为沥青混合料基体的动稳定度, 次/mm;  $\lambda_f$  为纤维掺量;  $\alpha_f$  为纤维对沥青混合料动稳定度的影响系数, 与纤维类型、沥青类型等因素有关。根据本文的试验结果, 对于聚酯纤维  $\alpha_f = 4.34$ ; 对于木质素纤维  $\alpha_f = 1.39$ 。对于聚酯纤维, 试验值与式(1)计算值之比的均值为 0.978、方差为 0.0159、变异系数为 0.016; 对于木质素纤维, 本文试验值与式(1)计算值之比的均值为 0.966、方差为 0.0421、变异系数为 0.044。

#### 4 结论

(1) 最佳沥青用量 OAC 的变化反映了纤维在沥青混合料中的分散程度, 适量的纤维掺量引起纤维沥青混合料最佳沥青用量 OAC 的增大。

(2) 纤维对沥青混合料的高温性能有增强作用, 适量的纤维能显著提高沥青混合料的高温稳定性能。相同试验条件下, 聚酯纤维对沥青混合料高温性能的改善效果优于木质素纤维。

(3) 纤维对沥青混合料高温性能的改善对应一最佳纤维掺量, 本文试验条件下, 聚酯纤维的最佳掺量约为 0.18%, 木质素纤维的最佳掺量约为 0.25%。

(4) 在最佳纤维掺量范围内, 纤维沥青混合

料的动稳定度与基体沥青混合料的动稳定度、纤维掺量和纤维类型有关。考虑三者影响的纤维沥青混合料动稳定度计算模型可用式(1)表示, 公式在一定程度上反映了纤维类型及其掺量对基体沥青混合料高温性能的增强能力。

#### 参考文献:

- [1] 杨大田. 纤维沥青混合料性能试验研究[D]. 重庆: 重庆交通学院道路与铁道工程系, 2005.
- [2] 张争奇, 李平, 王秉纲. 纤维和矿粉对沥青胶浆性能的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(5): 140-143.
- [3] 郭乃胜, 赵颖华, 张洪涛. 纤维沥青混凝土的等效劲度模量[J]. 公路交通科技, 2006, 23(9): 23-26.
- [4] 张争奇, 胡长顺. 纤维加强沥青混凝土几个问题和讨论[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(1): 29-32.
- [5] 李立寒, 张南鹭. 道路建筑材料[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [6] 徐培华, 王安玲. 公路工程混合料配合比设计与试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 120-135.
- [7] JTJ 052-2000, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [8] JTJ F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [9] 丁智勇, 黄杰, 彭波. 纤维沥青混合料性能研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2007, 28(2): 11-14.

### The Optimal Fiber Content & Dynamic Stability Calculation Model of Fiber Reinforced Asphalt Mixture

GAO Dan - ying, HUANG Chun - shui, TANG Ji - yu

(New Building Materials & Structure Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Based on the physical and mechanical tests of the constituent materials, this paper obtained the mineral mixture of AC-13 I by using the graphic method, adjustment and optimization of the mixture. Through Marshall Tests of fiber asphalt mixture of different fiber types and different fiber contents, OAC of different fiber asphalt mixture is obtained. Then, through the high-temperature rutting tests, the influence of fiber type and content on the dynamic stability of asphalt mixture is studied, and the mechanism of fiber reinforcement is discussed. Furthermore, from the impact characteristics of fiber to dynamic stability of the asphalt mixture, the optimal fiber content for different fiber type is obtained. The results show that fiber can significantly improve the high-temperature performance of asphalt concrete. Moreover, different types of fiber have its optimal content in the corresponding asphalt mixture. Finally, the calculation model of the dynamic stability of fiber asphalt mixture is established, which takes the influence of the fiber content and fiber type on the dynamic stability of asphalt mixture into consideration.

**Key words:** road engineering; fiber bituminous mixture; rutting test; high temperature performance; optimal fiber content