

文章编号:1671-8879(2005)03-0028-05

## 纤维加筋沥青混凝土断裂性能试验

Aysar NAJD<sup>1</sup>, 郑传超<sup>1</sup>, 郭进英<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 河北省交通厅, 河北 石家庄 050051)

**摘 要:**应用断裂潜能和临界应力强度因子  $K_{IC}$  的概念,研究了在开裂的沥青路面上加铺沥青面层时的抗裂性能,分析了玻璃纤维加筋沥青混凝土(GFRAC)、普通沥青混凝土以及抗滑面层的开裂行为。采用马歇尔试验与 3 点弯曲试验,选取有预切缝和无切缝两种试件进行试验,利用断裂潜能的概念评估沥青混凝土抑制裂缝产生的能力,并且测定了材料的临界应力强度因子。研究表明,加入玻璃纤维能有效地提高沥青混合料稳定度,改善沥青混凝土的高温抗变形能力。

**关键词:**道路工程;纤维加筋沥青混凝土(FRAC);玻璃纤维;临界应力强度因子;断裂潜能

**中图分类号:**U416.2;TU528.42

**文献标识码:**A

### Experiments of fracture behavior of glass fiber reinforced asphalt concrete

Aysar NAJD<sup>1</sup>, ZHENG Chuan-chao<sup>1</sup>, GUO Jin-ying<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Department of Communications, Hebei Province Government, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** The glass fiber reinforced asphalt overlay was studied in view of crack propagation resistance, its laboratorial tests and numerical calculations were carried out. The behavior of fiber reinforced asphalt concrete (FRAC), plain asphalt concrete and the skid resistance asphalt course were discussed depending on Marshall Test, three point bending test using both notched and un-notched specimens. The concept of the potential fracture energy was introduced to determine asphalt concrete capability to resist crack initiation. The material critical stress intensity factor or fracture toughness was determined. The results indicate that the glass fiber reinforced asphalt concrete can improve the stability and the deformability of the asphalt concrete with no increasing bitumen content of HMA, which will be beneficial to prevent rutting and bleeding in high temperature degrees during the hot season. The potential fracture energy gives a simple and an effective criterion to determine the resistance of the material against crack initiation. Glass FRAC has greater potential energy to resist cracking in asphalt overlay. High potential fracture energy value shows that the material's resistance to crack initiation is high. The critical stress intensity factor for glass FRAC is higher than that for plain asphalt concrete, which indicates stronger resistance to crack propagation. 6 tabs, 15 figs, 6 refs.

**Key words:** road engineering; FRAC; crack propagation; critical stress intensity factor; potential fracture energy

收稿日期:2004-04-17

作者简介:Aysar NAJD(1972-),男,叙利亚人,长安大学博士研究生。

0 引言

在沥青混凝土混合料成形时加入短纤维,被称作纤维加筋沥青混凝土(FRAC)。中国学者对纤维加强沥青路面的研究很多,对多种纤维沥青混合料的设计研究已取得了较大进展,但对沥青路面的裂缝及其扩展的研究还较少<sup>[1]</sup>。如果在纤维沥青混凝土复合材料还加入高弹性模量纤维,如钢、玻璃、石棉、碳纤维等,会比普通沥青混凝土高,高模量短切纤维是三维随机分布而呈现各向同性,对于沥青路面的裂缝如反射裂缝的扩展有很强的防止作用<sup>[2]</sup>。本文采用断裂潜能与临界强度因子的概念,来判定玻璃纤维加筋材料对沥青罩面抵抗开裂和裂缝扩展的能力,并建议应用复合沥青路面罩面(抗滑表层+纤维沥青混合料)做抗裂系统。

1 玻璃纤维沥青混凝土马歇尔试验

1.1 原材料及级配组成

本文试验原材料采用石灰岩、盘锦沥青 AH-90 和玻璃纤维,玻璃纤维的技术性能指标如表 1。根据文献[3]采用沥青混合料 AC-10I,级配如图 1 所示。

表 1 玻璃纤维技术性能指标

纤维直径/mm	切断长度/mm	颜色	抗拉强度/MPa	拉伸率/%	弹性模量/MPa	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
0.005 8~0.009 7	6	白银色	2 000	5	70 000	2.54

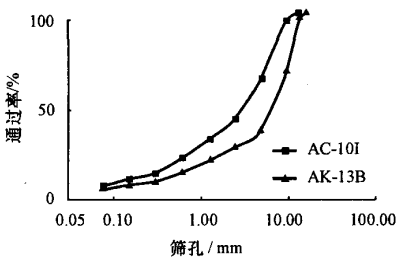


图 1 AC-10I 与 AK-13B 的级配曲线图

1.2 玻璃纤维沥青混凝土马歇尔试验结果分析

普通沥青混凝土 AC-10I 的马歇尔试验结果如表 2 所示。

表 2 普通沥青混凝土 AC-10 I 的马歇尔试验结果

最佳沥青用量/%	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	稳定度/kN	流值/mm	空隙率/%	VMA/%
5.0	2.452	9.83	2.5	3.50	14.9

注:最佳沥青用量值为沥青质量与石料质量的比率

由图 2、图 3 可以看出,VMA 的曲线跟密度的曲线是相反的。图 2 表明把玻璃纤维加入混合料

后,混合料的密度值会下降,并且随着纤维剂量的增加,混合料密度的下降速率减缓。其原因是纤维的相对密度比沥青混合料少。既然玻璃的相对密度比沥青混合料的密度大,当纤维加入沥青混合料后,由于它的形状分布,空隙率增大了(图 4)。

从图 5 可知,随着纤维剂量的增加,混合料的马歇尔稳定度增大,但超过一定的剂量(0.175%)反而有所下降。因为在较大的纤维剂量下,其分散性受限制,混合料的空隙率增加,颗粒之间的摩擦力下降,密度降低,故马歇尔稳定度随纤维剂量增加到一定值后反而有所降低。在图 6 中,流值随纤维剂量的增大而增大,与沥青用量的变化无关,这是因为对于所有的纤维沥青混合料试件只用了唯一的沥青用量。把纤维加入混合料能够有效地增强抗应变能力,试件在最大破坏荷载时具有潜能承受较大的应力而不脆裂。从图 6 还可以看出纤维剂量对流值的影响,与沥青用量对流值的影响有相同的行为。这个特点说明开裂或裂缝扩展不仅与材料强度有关,而且与材料的变形能力有关系。因此在评价沥青混合料的抗裂性时,应综合考虑这两方面因素。这说明适当增加沥青用量有利于提高沥青混合料的抗裂性。所以采用玻璃纤维可有效地提高强度和抗变形而沥青用量不变。

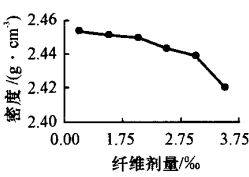


图 2 纤维剂量与密度关系曲线

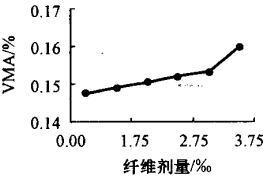


图 3 纤维剂量与 VMA 关系曲线

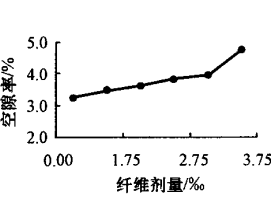


图 4 纤维剂量与空隙率关系曲线

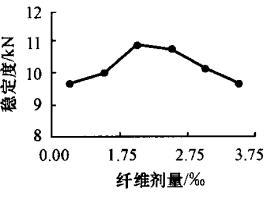


图 5 纤维剂量与稳定度关系曲线

图 7 表示玻璃纤维加入沥青混合料后,流值和强度变化很明显。玻璃纤维在沥青混合料中不仅增加了强度,而且抗变形能力也增大,虽然沥青用量没有变,但试件在荷载作用破坏后,稳定度与流值曲线的降低速率减缓了。

2 3 点弯曲试验

2.1 试件成型方法

本试验采用轮碾法成型板制作沥青混合料试

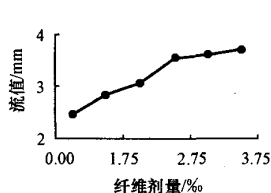


图6 纤维剂量与流值关系曲线

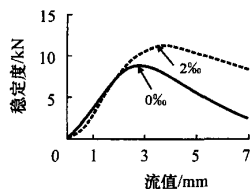


图7 2个不同玻璃纤维剂量的稳定性与流值关系曲线

件。尺寸为  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  轮碾成型板,切割制成  $70\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 250\text{ mm}$  的棱柱体试件。根据已确定的矿料级配和最佳沥青用量与马歇尔法确定的视密度,应用轮碾法成型板,一般碾压次数往返 12 次,按照文献[4]保证碾压至混合料密实度达到马歇尔标准击实密度的  $100 \pm 1\%$ 。试验温度  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;尺寸为  $70\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ ;跨径  $210\text{ mm}$ ;高跨比为  $1/3$ ;加载速率宜为  $50\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。本试验采用 3 种材料类型:AC-10I, GF-RAC, AK-13B, 每个类型采用 4 个试件,对每个试件试验结果计算平均值。

## 2.2 结果分析

图 8 表明玻璃纤维对沥青混合料的影响很明显,沥青混合料弯曲试验的测量与计算参数如表 3 所示。当玻璃纤维加入沥青混合料后弯拉强度增大了  $32.1\%$ ,最大劲度减低了  $56.2\%$ (沥青用量不变),最大应变增加了  $120\%$ 。而沥青混合料抗滑表层 AK-13B 与细粒级配沥青混合料 AC-10I 最大应变没有明显地变化,这也证明了玻璃纤维的连接(桥接)作用。AC-10I 与 AK-13B 最大劲度模量的差值很大,抗弯拉强度的差值也大,不过最大应变的差值为  $15\%$ (表 3)。

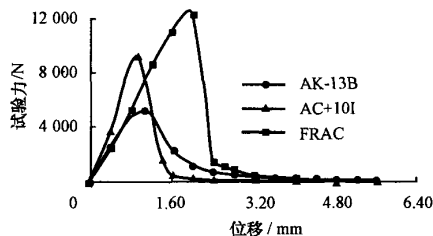


图8 弯曲试验力与位移关系曲线

表3 沥青混合料弯曲试验的测量与计算参数

试件类型	$R_b/\text{MPa}$	$S_b/\text{MPa}$	$P_b/\text{N}$	$d/\text{mm}$	$\epsilon_b$
AK-13B	5.66	563.352	5286	1.040	0.010 05
AC-10I	9.94	1 135.600	9 277	0.917	0.008 75
FRAC(AC-10I 加玻璃纤维)	13.14	681.440	12 267	2.003	0.019 29

$$R_b = \frac{3LP_b}{2bh^2}; \quad \epsilon_b = \frac{6hd}{L^2}; \quad S_b = \frac{R_b}{\epsilon_b} \quad (1)$$

式中:  $R_b$  为试件破坏时的抗弯拉强度;  $\epsilon_b$  为试件破坏时的最大弯拉应变;  $S_b$  为试件破坏时的弯曲劲度模量;  $b$  为跨中断面试件的宽度;  $h$  为跨中断面试件的高度;  $L$  为试件的跨径;  $P_b$  为试件破坏时的最大荷载;  $d$  为试件破坏时的跨中挠度。

沥青路面开裂不仅与材料强度有关,而且与材料的变形能力有关。沥青混合料的弯拉强度和变形其抗裂性的重要技术参数从试验结果可知,在普通沥青混合料中,不同的级配有不同的抗弯拉强度,而变形能力没有很大的变化。FRAC 不但提高了普通沥青混合料的弯拉强度而且增大了抗变形能力。

## 2.3 断裂潜能

劲度模量不是 1 个判断沥青混合料材料抵抗裂缝能力的有效参数。FRAC 的劲度模量比普通沥青混凝土低,但它的抗拉强度大得多,并且柔性也增加了。可以利用断裂潜能来表达材料的抗开裂能力,如果外力作用没有达到材料的断裂潜能,那么材料就不会开裂。断裂潜能可由式(2)计算

$$G = \int_0^{d_{\max}} P(x) dx \quad (2)$$

式中:  $G$  为试件的断裂潜能( $\text{N} \cdot \text{mm}$ );  $P(x)$  为挠度与外力的函数( $\text{N}$ );  $d_{\max}$  为试件破坏时的跨中挠度( $\text{mm}$ )。

通过计算破坏点前曲线下的面积,得到沥青混凝土的断裂潜能,如图 9 所示。

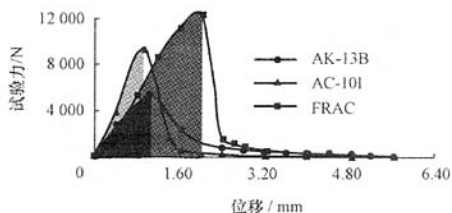


图9 计算潜能断裂能量

根据试验得到的力与位移曲线,对抗滑表面沥青混合料 AK-13B,其断裂潜能为

$$P_{AK-13B}(x) = -2 304.9x^2 + 7 479.9x, \quad R^2 = 1$$

$$G_{AK-13B} = \int_0^{1.04} (-768.3x^3 + 3 739.95x^2) dx = 3 180.8 (\text{N} \cdot \text{mm})$$

对普通沥青混凝土 AC-10I,其断裂潜能为

$$P_{AK-10I}(x) = 10 144x - 106.85, \quad R^2 = 0.998$$

$$G_{AK-10I} = \int_0^{0.917} (10 144x - 106.85) dx = 4 167.0 (\text{N} \cdot \text{mm})$$

对纤维加筋沥青混凝土 FRAC,其断裂潜能为

$$P_{\text{FRAC}}(x)=-1\,914.2x^3+4\,914.6x^2+3\,954.6x+14.574, R^2=0.999$$

$$G_{\text{FRAC}}=\int_0^{2.003}(-194.2x^3+4\,914.6x^2+3\,954.6x+14.574)dx=13\,423.96\text{ (N}\cdot\text{mm)}$$

与普通沥青混合料相比,FRAC 的断裂潜能能量值增大 322%。在外荷载时,大断裂潜能能量表示沥青混合料的变形性和挠性的能力,为抗开裂的效果。

3 有预切缝的试件 3 点弯曲试验

3.1 试验的描述

试验温度:5℃;试件尺寸:70 mm×60 mm×250 mm;跨径 210 mm;高跨比为 1/3;为模拟原有的裂缝,采用 1 个倒置的 T 形状的金属片。切缝深度  $a=7\text{ mm}$ ;切缝角度  $\theta\approx 20^\circ$  (图 10)。对每类型用了 4 个试件。本试验用了 3 种材料类型:AC-10I, GFRAC, AK-13B。



图 10 有预切缝的沥青混凝土试件

3.2 断裂韧性

临界应力强度因子  $K_{IC}$  可由试验确定,对有预切缝的小梁试件弯曲试验(图 11), L Monismith 给出了下面的公式<sup>[5]</sup>

$$K_{IC}=\frac{6M_c a^{1/2}}{bh^2}f(a/h) \tag{3}$$

式中: $M_c$  为临界破坏弯矩; $a$  为切缝深度; $b$  为梁宽; $h$  为梁高

$$f(a/h)=1.99-2.74(a/h)+12.97(a/h)^2-23.17(a/h)^3+24.80(a/h)^4 \tag{4}$$

根据式(3)、式(4)计算临界应力强度因子(表 5)。

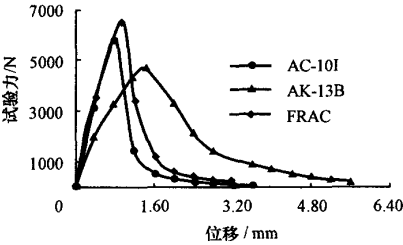


图 11 有预切缝的试件弯曲试验力与位移关系曲线

3.3 结果分析

由图 12、图 13 可以看出:

(1)细密级配沥青混合料的弯拉强度高,但裂缝扩展速度比粗级配沥青混合料高,原因是在粗级配试件裂缝扩展不是沿直线的,因为大颗粒的硬度比沥青浆大,这使得裂缝扩展时必须绕过大颗粒;另外,粗级配沥青混凝土中的空隙较大,可钝化裂尖,阻碍扩展。

(2)虽然玻璃纤维沥青混合料比普通沥青混合料有较高抵抗开裂扩展性能,但是效果没有无切缝的试件明显,在玻璃纤维加入沥青混合料后,弯拉强度能力只增大了 13.4%,这表明在高速率荷载和低温情况下,当裂缝开始扩展后,加筋沥青混凝土并不能有效阻碍扩展,所以按试验的情况与采用的材料,只要裂缝还没开始,加筋沥青混合料有很大的抗开裂能力,可是当裂缝扩展后,材料很快就破坏了。这是因为裂缝尖端承受很大的应力,而裂缝的周围没有有效的应力扩散机制。无切缝的试件可整体地抵抗外加力,在混合料内的纤维会结团沥青混合料的成分。当裂缝扩展后最大的应力集中在裂缝尖端,因此纤维的结团功效降低(图 14)。

(3)由表 4 知,FRAC(AC-10I 加入玻璃纤维)  $K_{IC}$  最大,比沥青混凝土(AC-10I)增加了 15%。

(4)表 5 计算了沥青混凝土的  $K_{IC}$  在不同切缝

表 4 不同沥青混合料临界应力强度因子  $K_{IC}$

试件类型	最大荷载 $P_b$ /N	高度 $h$ / mm	宽度 $b$ / mm	跨距 $L$ / mm	切缝深度 $a$ /mm	临界破坏弯矩 $M_c$ /(N·mm)	$a/h$	$f(a/h)$	$K_{IC}$ /(MPa·mm <sup>1/2</sup> )
AK-13B	4 636	70	60	210	7	245 459	0.099 6	1.852 2	24.339 3
AC-10I	5 686	70	60	210	7	304 185	0.099 2	1.852 4	29.860 2
FRAC	6 535	70	60	210	7	345 030	0.099 7	1.852 1	34.308 9

注:表中最大荷载值是校准后试件的宽和高

表 5 AC-10I 沥青混凝土的临界应力强度因子  $K_{IC}$  在不同切缝深度

试件类型	最大荷载 $P_b$ /N	高度 $h$ / mm	宽度 $b$ / mm	跨距 $L$ / mm	切缝深度 $a$ /mm	临界破坏弯矩 $M_c$ /(N·mm)	$a/h$	$f(a/h)$	$K_{IC}$ /(MPa·mm <sup>1/2</sup> )
AC-10I	6 624	70.1	60	210	5	347 760	0.071 327	1.872 042	29.624 03
	5 794	70.6	60.1	210	7	304 185	0.099 15	1.852 416	29.860 21
	5 341	71.9	60.2	210	9	280 403	0.125 174	1.844 686	29.917 32



图 12 AC-10I(细级配)  
的裂缝扩展线



图 13 AK-13B(粗级配)  
的裂缝扩展线

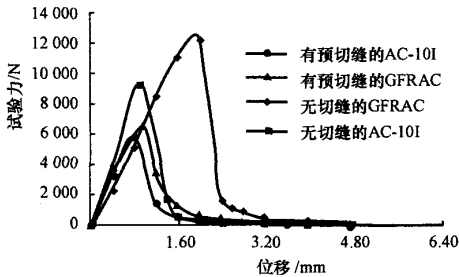


图 14 有预切缝和无切缝的试件弯曲  
试验力与位移曲线的比较

深度,  $K_{IC}$  基本没变化, 证明了  $K_{IC}$  是材料性能指标, 与裂缝的长度没有关系。

#### 4 双面抗裂系统

AC-13I 型有好的抵抗疲劳, 抗冻融耐久性, 但表面功能差; AK-13B 型反之; 表面构造、抗滑、排水、低噪声等表面功能特性都好, 但耐久性甚差; AK-13A 与 AC-13II 型居中, 前者接近 13I 型, 或者接近 AK-13B 型, 按一组比较试验<sup>[6]</sup>, 评价见表 6。

表 6 不同类型沥青混合料使用性能评价(5 分制)

级配类型	抗滑	低噪声	抗辙	抗裂	抗疲劳	冻融稳定性	表面排水
AC-13I	2	1	3	2	5	5	1
AC-13II	4	3	4	3	2	3	3
AK-13A	3	2	3	2	3	4	2
AK-13B	5	3	4	3	2	2	4

根据本文研究成果, 建议路面罩面用两层结构(图 15), 上层是普通沥青抗滑表层。级配如图 1 所示。根据 GBJ92-93 用 AK-13B 来做沥青罩面表面层, 下层采用纤维沥青混凝土。在罩面上层可以采用根据气候的不同, 确定沥青标号如盘锦 AH-70 或 AH-50。罩面下层采用玻璃纤维沥青混凝土, 下层的

的功能是抗裂, 应采用比较软的沥青诸如盘锦 AH-90 或 AH-100, 因为较软的沥青可使纤维均匀地混合在沥青混凝土之内, 并



图 15 应用复合路面沥青覆  
盖(AK-13B 与 FRAC-10I)

且由于上层的存在使下层玻璃纤维沥青混凝土避免被高温破坏, 上层的功能是抗滑与抗高温破坏, 当沥青老化之时, 可保护环境, 避免玻璃纤维粉从路面传递到空气, 对居民的健康造成不良的影响。

#### 5 结 语

(1) 在沥青混合料加入玻璃纤维时不必增加沥青用量, 因为玻璃纤维沥青混凝土的变形性高, 玻璃纤维吸附能力低, 加入玻璃纤维能有效改善沥青混合料高温稳定性、强度和变形能力。

(2) 断裂潜能提供了简单有效的判定材料抗开裂能力的方法, 利用断裂潜能和临界应力强度因子, 证明了玻璃纤维沥青混合料比普通沥青混合料具有较高抵抗裂缝扩展能力, 但是抵抗开裂能力不显著, 加筋沥青混凝土并不能有效地阻滞裂缝快速扩展。

(3) 应用复合沥青路面罩面(抗滑表层 + 纤维沥青混合料)来做抗裂系统会更有效, 因为它既能保护加筋下层又能提供合适的抗滑表面。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 郝培文, 张登良, 胡西宁. 沥青混合料低温抗裂性评价指标[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(3): 1-5.  
HAO Pei-wen, ZHANG Deng-liang, HU Xi-ning. Evaluation method for low temperature anti-cracking performance of asphalt mixture[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(3): 1-5.
- [2] 肖桂彰, 郑传超. 道路复合材料[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.  
XIAO Gui-zhang, ZHENG Chuan-chao. Roadway composite materials[M]. Beijing: People's Communication Press, 1999.
- [3] GBJ92-93. 公路工程试验规程[S]. 2001.  
GBJ92-93. Highway engineering laboratorial norms [S]. 2001.
- [4] A Najd. Improving the tensile strength of asphalt concrete by fibers[D]. Damascus: Damascus University, 1999.
- [5] 张登良. 沥青路面[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.  
ZHANG Deng-liang. Asphalt pavements[M]. Beijing: People's Communication Press, 1998.
- [6] 幸德刚. 高速公路沥青路面材料与结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
XING De-gang. Materials and structures of highway asphalt pavements[M]. Beijing: People's Communication Press, 2001.