

纤维沥青混合料抗裂性能的试验研究

王巨创

(厦门市公路局, 福建 厦门 361009)

摘要: 采用 MTS 810 对未切缝及预切缝两种小梁试件进行低温 3 点弯曲试验, 并利用临界应变能密度及材料的临界应力强度因子评价纤维长度及纤维力学性能对低温抗裂性能的影响。结果表明, 掺加纤维能有效阻滞裂纹的进一步发展, 提高沥青混合料的低温抗裂能力, 且随纤维力学强度的增大及长度的适当增长, 纤维的增强效果进一步改善。

关键词: 沥青混合料; 沥青路面; 低温开裂

中图分类号: U214 75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2007)06-0055-06

Experiment on Fracture Behavior of Fiber Reinforced Asphalt Mixture

WANG Ju-chuang

(Xiamen Highway Bureau, Xiamen, Fujian 361009, China)

Abstract Three point bending tests are performed using unnotched and notched specimens to study the crack propagation resistance with critical strain energy density and stress intensity factor at low temperature. Fiber with various length and strength are added to asphalt mixture to assess their effects on cracking resistance. It is shown through the results that adding fiber to asphalt mixture can effectively improve its performance at low temperature and enhance cracking resistance, and that the enhance degree is greater with higher strength and longer fiber.

Key words asphalt mixture; asphalt pavement; low-temperature cracking

0 引言

低温开裂是沥青路面存在的主要病害之一, 受到各国道路界的普遍关注。路面开裂产生的主要原因是寒冷季节周期性变化产生的温度应力及行车荷载作用产生的累积应力或材料的损伤超过材料的容许程度。在沥青混合料中掺入纤维是一种提高混合料抗裂性能的手段, 国内外对其性能的研究开展了大量的研究, 并取得了较大进展^[1]。但开展纤维长度及纤维力学性能对纤维沥青混合料 (FRAM) 阻裂作用的研究很少。本文采用临界应变能密度及应力强度因子判断纤维对沥青混合料抗裂性能, 研究纤维长度及纤维力学性能对抗开裂及裂纹扩展的阻滞能力的影响, 为热拌沥青混合料用纤维的选择提供借鉴。

1 原材料

采用 SBS 改性沥青, 其性能指标如表 1 所示。碎石材料为花岗岩, 石灰石矿粉, 混合料级配采用 AC-16C 型级配, 纤维采用厦门鑫富荣纤维有限公司提供聚脂纤维及北京特希达科技有限公司提供 FORTA AR, 聚脂纤维的长度分别为 3mm, 6mm, 15mm, 掺量均为 2.5%, FORTA AR 纤维的掺量为 0.45%, 长度为 19mm, 纤维的基本性能如表 2 所示。

表 1 沥青性能指标
Tab 1 Properties of asphalt

材料	针入度 /	软化点 /	15℃延度 /	密度 /	25℃	薄膜加热试验 / (165℃ · 5h ⁻¹)	
	(25℃, 1/10mm)	℃	cm	(g · cm ⁻³)	弹性恢复	质量损失 /%	针入度比 /%
改性沥青	43	77.8	27.4	1.039	85.5%	0.44	86

收稿日期: 2007-07-12

作者简介: 王巨创 (1966-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 道桥。E-mail: JL.F@163.com

表 2 纤维的基本性能指标
Tab 2 Basic properties of fiber

纤维种类	主要成份	比重	颜色	直径 / μm	抗拉强度 /MPa	断裂伸长率 /%	弹性模量 /MPa	熔点 / $^{\circ}\text{C}$
聚脂纤维	聚脂	1.38	白色	20	570	15	15 000	249
FORT AR	芳纶	1.44	黄色	14	2 756	≥ 10	83 000	260
	聚丙烯	0.91	白色	—	483	≥ 10	3 700	177

2 未切缝试件低温试验结果及分析

2.1 低温 3点弯曲试验

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[2]的规定,采用轮碾法制作成型尺寸为 300 mm × 300 mm × 60 mm 的板,板的密实度应达到马歇尔标准击实密度的 100 ± 1%。将板切割成长 50 mm × 50 mm × 250 mm 的棱柱体小梁试件,在 MTS-810 材料试验机上进行小梁 3 点弯曲试验,跨径为 200 mm,试验温度为 -10 °C,加载速率为 50 mm/min,每组制备 4 个试件。

2.2 低温弯曲试验结果

不同纤维长度的纤维沥青混合料 -10 °C 下 3 点弯曲试验结果如图 1。

2.3 利用弯曲应变能密度评价混合料的低温性能

我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)^[3]以沥青混合料的破坏应变作为低温性能控制指标。然而,沥青混合料的强度和变形是路面结构的重要技术参数,在衡量沥青混合料性质时仅考虑材料的强度参数或变形特性,这对于沥青混合料路用性能是不利的^[4]。因此,有必要寻找一种反映强度和变形的综合技术参数。

依据材料的损伤准则,材料的损伤过程包括裂缝的产生、亚临界状态增大及最后终止 3 个阶段。假定材料的破坏形式与单位体积内的能量变化相对应,则材料的损伤可以用应变能密度函数 $\frac{dW}{dV}$ 表示,即

$$\frac{dW}{dV} = \int_0^{\varepsilon_0} \sigma_j d\varepsilon_j$$

式中: $\frac{dW}{dV}$ 为应变能密度函数; σ_j 、 ε_j 分别为应力、应变分量; ε_0 为最大弯拉应力对应的应变值(以下简称临界应变)。

$\frac{dW}{dV}$ 的临界值是断裂时实际单轴应力、应变关系曲线下的面积。材料在单向拉伸时可按上式计算临界应变能密度,它反映了材料发生破坏所需的能量,其值越大,低温性能愈好。

图 2 为纤维沥青混合料弯曲试验典型的应力-应变曲线,从图中可发现沥青混合料的应力、应变关系可以用多项式拟合,即

$$\sigma = A_k \varepsilon^k + A_{k-1} \varepsilon^{k-1} + \dots + A_1 \varepsilon + A_0$$

式中: σ 为应力,MPa; ε 为应变; A_k 、 A_{k-1} 、 A_0 为常数,与材料类型有关; k 为拟合多项式的最高次项。本

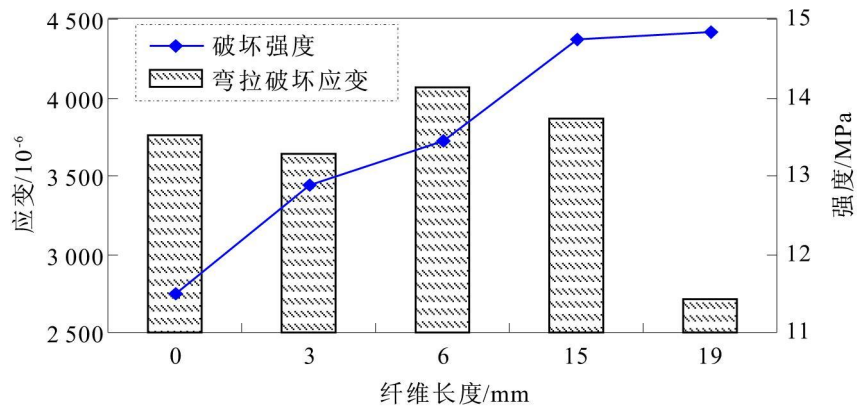


图1 纤维沥青混合料低温弯曲试验结果

Fig.1 Bending test results of asphalt mixture reinforced with fiber at low temperature

文采用 3 次多项式拟合, 相关系数 > 0.995 纤维沥青混合料的临界应变能计算结果如图 3。

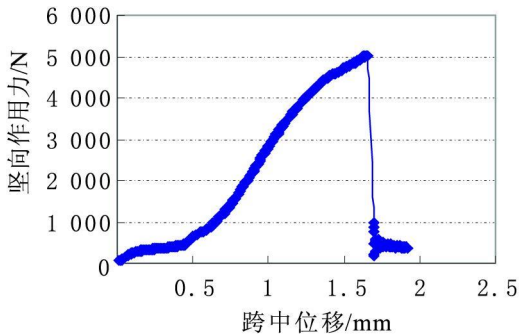


图2 弯曲试验典型应力应变曲线
Fig.2 Typical curve of stress and strain for three points bending Tests

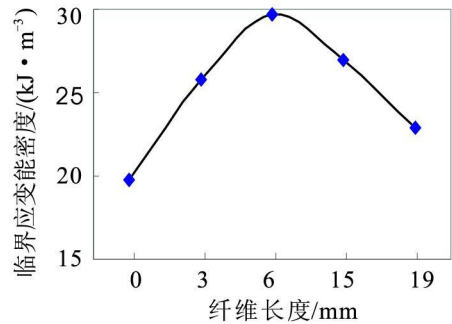


图3 纤维沥青混合料低温临界应变能密度
Fig.3 Critical strain energy density of asphalt mixture reinforced with fiber at low temperature

2.3 结果分析

图 1, 2 分别为混合料弯拉破坏强度、弯拉破坏应变及临界应变能密度随纤维长度的变化趋势, 纤维长度为 0 代表未掺入纤维。

从图 1 可知, 纤维长度为 6mm 的沥青混合料破坏应变最大, 纤维长度为 15mm 的纤维沥青混合料次之, 而掺加 3mm 长的纤维及 19mm 长的纤维沥青混合料的弯拉破坏应变则均小于不掺纤维的沥青混合料。若单纯以弯拉应变作为控制指标, 会得出掺加 19mm 长的 FORTA AR 纤维及掺加 3mm 长的聚脂纤维低温性能变差的结论。但从试验结果可以看出, 掺入纤维后沥青混合料的弯拉破坏强度均不同幅度的提高, 其中掺加 19mm 长的 FORTA AR 纤维强度提高的幅度最大, 达 29%, 掺加 3mm 长的聚脂纤维对强度提高的幅度有 12%。而强度和变形是材料的 2 个重要技术参数, 在衡量沥青混合料的性质时仅考虑强度或变形, 对混合料的路用性能是不利的, 存在一定的局限性。

FRAM 强度随纤维长度的增加而增大, 表明纤维长度适当增长, 沥青混合料通过界面作用传递给纤维作用力增大, 有利于发挥纤维材料高性能的特点而提高沥青混合料的强度。掺量仅为 0.45% FORTA AR FRAM 强度增加效果最大, 达 29% 说明纤维本身的力学特性对沥青混合料的增强效果的影响很大。但由于 FORTA AR 纤维是由涤纶纤维与聚丙烯纤维按 1:3 的比例组成, 单丝纤维的数量较少, 纤维间距较大, 当加载速率较高时, 对裂纹的阻滞作用较小, 破坏弯曲应变反而变小, 表现出脆性较不掺纤维的沥青混合料大。

从图 2 中可以看出, 掺加纤维的沥青混合料临界应变能均大于未掺纤维的沥青混合料, 其中掺加 2.5% 的 6mm 长聚脂纤维沥青混合料低温性能改善的幅度最大, 达到 50%, 19mm 长掺量为 0.45% 的 FORTA AR 纤维的临界应变能也增加 16%, 表明掺加增强纤维可有效提高沥青混合料的低温抗裂性能。低温抗裂性能优劣的次序为: 2.5% 6mm 长聚脂 FRAM > 2.5% 15mm 长聚脂 FRAM > 2.5% 3mm 长聚脂 FRAM > 0.45% 19mm 长 FORTA AR FRAM > 未掺纤维沥青混合料。

3 预切缝试件 3 点弯曲试验结果及分析

3.1 试件准备

预切缝小梁试件的尺寸与未切缝小梁试件一致, 考虑到临界应力强度因子是材料的性能指标, 与裂缝深度没有关系^[1], 文选取的切缝深度为 1mm, 切缝角约为 20°, 每组制备 4 个试件, 用 MTS 810 材料试验机进行小梁 3 点弯曲试验, 试验温度仍为 -10℃, 加载速率为 50 mm/min。

3.2 断裂韧性

纤维沥青混合料的临界断裂强度因子可由试验确定, 对有预切缝的小梁弯曲试验, 应力强度的计算因子可用 L Monismith 给出的下式计算^[5]。

$$K_{Ic} = \frac{M_c a^{1/2}}{bh^2} f(a/h) \quad (1)$$

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.

$$f(a/h) = 1.99 - 2.74(a/h)^2 - 23.17(a/h)^3 + 24.80(a/h)^4$$

根据公式和计算临界应力强度因子 K_{Ic} (MPa $\sqrt{\text{mm}}$) 结果如表 3

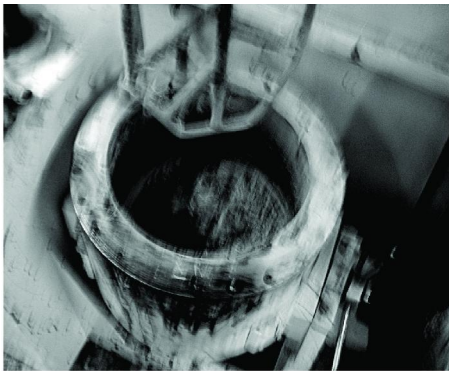
表 3 临界应力强度因子计算结果

Tab 3 Calculated results of critical stress intensity factor

指标	未掺纤维 沥青混合料	2.5% 3mm 长聚脂 FRAM	2.5% 6mm 长聚脂 FRAM	2.5% 15mm 长 聚脂 FRAM	0.45% 19mm 长 FORTA AR FRAM
(K_{Ic} MPa $\sqrt{\text{mm}}$)	36.21	37.58	38.47	37.83	41.63

3.3 结果分析

从表 3 的计算结果可以看出: 掺加材料力学性能优越的 FORTA AR 纤维的混合料临界应力强度因子较大, 较基质沥青混合料增大 14.97%, 掺加聚脂纤维的纤维沥青混合料临界应力强度因子也增大, 其中 3mm 长, 6mm 长, 15mm 的聚脂纤维增大的幅度分别为 3.78%、6.24% 及 4.47%. 纤维沥青混合料应力强度因子随纤维长度的增长具有增大的趋势. 表明随纤维长度的增加, 基质沥青混合料传递给纤维的作用力增大, 增强作用更明显, 而 15mm 长的聚脂纤维效果反而较 6mm 长聚脂纤维差的一个主要原因为纤维的分散较差, 纤维达 15mm 长时, 在试验室拌和时, 由于纤维的截面较细, 在拌和过程中产生的静电作用易使纤维缠绕在搅拌叶片上如图 4 分散性较差, 从而影响了 15mm 长聚脂纤维对混合料性能改善性果. 从试验结果看, 若未能采取有效措施解决较长纤维的分散性问题, 选择 6mm 长的纤维是合适的.



(a) 6mm 长纤维干拌 15s 后情况



(b) 15mm 长纤维干拌 15s 后情况

图 4 纤维干拌后分散情况

Fig.4 Dispersion of fiber after dry-mixed

4 纤维沥青混合料低温性能的增加机理

从上面的分析可知, 掺加纤维后沥青混合料的低温性得到有效改善, 混合料出现韧性破坏的趋势, 主要表现在不掺纤维的沥青混合料断裂后, 裂纹迅速扩展而贯穿整个试件, 而纤维沥青混合料则出现裂而不断的状况. 主要原因在于, 当沥青混合料基体发生开裂后, 由于纤维的桥接作用仍可维持一定的承载能力. 下面简要分析纤维低温性能的增加机理.

4.1 纤维的阻裂机理

由于沥青混合料内部存在缺陷或裂纹, 在温度应力及行车荷载作用下裂缝尖端会产生应力集中, 促使裂纹进一步扩展. 当在沥青混合料中掺入高抗拉强度、高模量的增强纤维后, 因纤维的直径很小, 长度较短, 数量众多的纤维均匀分散后可形成三维网状结构, 对裂纹的扩展起到阻滞作用, 约束裂纹或材料缺陷

的进一步扩展, 从而改善材料的低温抗裂性能. 纤维阻裂机理可用基于线弹性断裂力学原理的应力强度因子叠加法(简称 K 叠加法)来分析^[6]. 按照 K 叠加法, 纤维沥青混合料中裂纹的应力强度因子可表示为:

$$K_{fm} = K^m + K^f \quad (3)$$

式中: K_{fm} 为纤维沥青混合料的应力强度因子; K^m 为沥青混合料基体的应力强度因子; K^f 为纤维阻裂作用产生的应力强度因子. 用一根纤维等效集中力 P 产生的裂纹近端应力强度因子为^[6]

$$K^f = k_l^f = P / \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{(2a - b) / b} \quad (4)$$

式中: P 为裂尖等效集中力; b 为纤维至裂尖的距离; $2a$ 为裂纹的尺寸.

对式(4)分析可知, 在裂纹尖端刚好穿过纤维的瞬间, b 是一个微量, 即 $b \rightarrow 0$ 因而有:

$$K^f \rightarrow \infty \quad (5)$$

可见, 在裂纹尖端穿过纤维的瞬间, 纤维对裂纹的阻滞作用是巨大的. 用叠加原理可得到纤维穿过一系列纤维时产生的应力强度因子. 这是为何纤维沥青混合料出现明显的韧性破坏形式, 在低温三点弯曲试验后, 试件可保持裂而不断, 而不加纤维的沥青混合料表现出明显的脆性破坏的主要原因之一.

4.2 纤维的加筋机理

按照复合材料理论, 纤维沥青混合料的劲度模量 和抗拉强度, 可由下列公式计算:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (6)$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (7)$$

式中: E_c 为纤维沥青混合料的劲度模量; E_f 为纤维的弹性模量; V_f , V_m 分别为纤维、沥青混合料基体的体积率; E_m 为沥青混合料的劲度模量; σ_f 为纤维的强度; σ_m 为沥青混合料的强度.

由于纤维的强度和模量较沥青混合料的强度和劲度模量高得多, 按式(6), (7)式可知纤维沥青混合料的强度增加, 纤维犹如沥青混合料“微加筋”, 对沥青混合料起到增强作用. 低温弯曲试验结果也表明了纤维沥青混合料掺入纤维后, 强度和模量得到提高. 但式(6), (7)式的复合材料理论仅是一种理想状态, 纤维的增强作用不仅与纤维材料的性质有关, 还与纤维在混合料中的取向(分散情况)、纤维与沥青混合料的界面粘结、纤维的有效长度等密切相关, 而纤维与沥青混合料基体的界面粘结还与纤维的几何特征、纤维与沥青混合料的相容性有关.

4.3 纤维的增韧机理

众所周知, 沥青混合料是一种粘弹性材料, 高温下变软、低温变脆, 在温度应力及行车荷载的作用下会因抗变形能力不足而发生开裂. 在沥青混合料中掺入高抗拉强度及高模量的纤维不仅可提高沥青混合料基体的强度, 还可增加混合料的变形能力, 使材料具有很高的韧性. 对纤维沥青混合料而言, 即使已出现裂纹, 纤维的桥接作用仍可使材料继续承受外载作用, 变形能力增强. 韧性实际上表示材料在外载作用下吸收能量的能力, 其含义是材料不仅应具有足够的强度, 还须具有良好的变形(包括弹性变形或粘性变形)能力, 可用应力-应变关系定量描述. 通过常用材料的应力-应变曲线所包围的面积 Ω 表示. 与应变能密度 $\frac{dW}{dV}$ 的计算方法相同.

从韧性定义可知, 韧度的大小不仅取决于材料的强度, 也取决于材料破坏时的变形性能. 材料的强度高, 但变形能力低, 或变形能力高但强度低, 其韧性都不会大, 抗裂性能自然也不会好. 而选择合适的纤维材料及掺量, 可使混合料的强度增强, 还会因发生多缝开裂模式, 变形能力也得到增强, 从而改善混合料的低温性能. 纤维沥青混合料低温性能应变能密度评价也证实了这一点.

4.4 纤维对沥青混合料自愈能力的增强机理

由于沥青混合料具有的粘弹性特性, 路面具有应力松弛的能力, 所产生的温度应力会随时间的延长逐渐松弛减小, 乃至消失. 因而不需像水泥混凝土路面一样设置收缩缝. 沥青混合料的自愈能力对沥青路面的抗开裂能力及抗疲劳能力具有重要的影响^[7]. 自愈过程的重要性已由 K in 等^[8]应用应力波技术测量沥青混凝土层歇息 24 h 前后的弹性模量验证. 结果表明: 弹性模量随温度的增加而减小, 24 h 间隔后的模量显示出明显的恢复.

纤维沥青混合料在受到拉伸的过程中,纤维可阻止裂纹的进一步扩展,对裂扩展起到阻滞作用,而外界作用力消失后,因纤维受到拉伸发生拉伸变形,外界作用消失后,将发生弹性回复,具有促使沥青混合料恢复原来形态的趋势,增强了材料自愈能力,减小外力作用引起的损伤,从而改善材料的抗裂能力,提高低温性能。

5 结论

1) 掺加纤维可提高沥青混合料的强度,强度提高的幅度与纤维的长度及纤维材料本身的力学特性相关。纤维的强度和模量愈高,增强效果愈好;适当增加纤维的长度有利于提高纤维的增强效果;

2) 掺 6 mm 长及 15 mm 长聚脂纤维沥青混合料的强度及破坏应变均增加,而掺 3 mm 长的纤维及掺量为 0.45% 弯拉破坏强度提高,但破坏应变较不掺纤维的沥青混合料小;

3) 强度和变形是材料的 2 个重要参数,只以变形作为评价指标不确切,而临界应变能密度是一种反映了材料的强度和变形的综合性参数,可用于评价沥青混合料的低温性能;

4) 按临界应变能密度评价混合料低温抗裂性能优劣的次序为: 2.5% 6 mm 长聚脂 FRAM > 2.5% 15 mm 长聚脂 FRAM > 2.5% 3 mm 长聚脂 FRAM > 0.45% 19 mm 长 FORTA AR FRAM > 未掺纤维沥青混合料;

5) 在沥青混合料中掺入纤维后,纤维的桥接作用可有效改善混合料对裂纹扩展的阻滞作用,提高低温抗裂性能;

6) 纤维阻裂作用的大小与纤维材料的力学强度及埋深有关,纤维的强度愈大,长度愈长,通过混合料基体传递给纤维的界面作用力愈大,阻裂性能越好。但纤维长度的选择应保证纤维能在混合料中有效分散,否则会引起纤维成束,降低材料的利用率;

7) 试验结果表明,选择 6 mm 长的纤维长度是合适的,在解决好纤维分散性的情况下,适当增长纤维的长度有利用充分发挥纤维的优良性能,提高混合料性能。

参考文献:

- [1] NAJD A, 郑传超, 郭进英. 纤维加筋沥青混凝土断裂性能试验 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(3): 28-32
- [2] 交通部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000
- [3] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [4] 郝培文, 张登良. 沥青混合料低温抗裂性能评价指标的研究 [J]. 公路, 2000(5): 63-67
- [5] 张登良, 王哲人. 沥青路面 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998
- [6] 易志坚, 杨庆国, 李祖伟, 等. 基于断裂力学原理的纤维阻裂机理分析 [J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(6): 43-45
- [7] Si Z, Little D N, Lyton R L. Characterization of Microdamage and Healing of Asphalt Concrete Mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14(6): 461-470
- [8] Kim Y R, Little D N. Linear Viscoelastic Analysis of Asphalt Mixtures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(2): 122-132
- [9] Kim Y R, Whimoyer S L, Little D N. Healing in Asphalt Concrete Pavements: Is it real? [J]. Transportation Research Record, 1994(1514): 89-96