

文章编号:1007-9629(2021)01-0146-07

玄武岩纤维沥青胶浆及混合料的低温性能关联性

李震南, 申爱琴, 郭寅川, 吴 华

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 采用拉伸试验和低温弯曲试验,研究了玄武岩纤维沥青胶浆(BFAM)及混合料的低温性能,并对两者的关联性进行了分析;同时对BFAM相态变化及混合料的微观结构进行了测试与表征,深入分析了玄武岩纤维对沥青胶浆及混合料低温性能的改善机理.结果表明:BFAM与混合料的低温性能有良好的相关性, -20°C 下BFAM的拉伸断裂能与混合料的弯拉应变关联性最大;基于低温性能推荐玄武岩纤维的最佳掺量为 0.4% ; -20°C 下最佳玄武岩纤维掺量BFAM的拉伸断裂能是普通沥青胶浆的4.6倍, -10°C 、 -20°C 下玄武岩纤维沥青混合料弯拉应变比普通沥青混合料分别提高了 19.0% 、 25.0% ;BFAM具有良好的低温性能和热稳定性,其玻璃化转变温度比普通沥青胶浆低 3.75°C ,从高弹态到黏流态转化过程中吸热量增加 0.1525 J/g ;普通沥青混合料内部连接较薄弱,玄武岩纤维增强了沥青混合料的整体性,同时玄武岩纤维能承受和传递应力,约束裂纹的扩展,进而改善混合料的抗裂性.

关键词: 玄武岩纤维; 沥青胶浆; 关联性; 相态变化; 微观结构

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.020

Low Temperature Performance Correlation of Basalt Fiber Asphalt Mortar and Mixture

LI Zhennan, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, WU Hua

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The low temperature performance of basalt fiber asphalt mortar(BFAM)and mixture was studied by tensile test and bending test, and the correlation of low temperature performance between BFAM and mixture was analyzed. The phase change of BFAM and the microstructure of asphalt mixture were tested and characterized, and the mechanism of improving the low temperature performance of BFAM and mixture by basalt fiber was thoroughly analyzed. The results show that the low temperature performance of BFAM and mixture has a close correlation, and the tensile fracture energy of mortar at -20°C has the greatest correlation with the bending strain of mixture. Based on the low temperature performance, the optimal content of basalt fiber is recommended to be 0.4% . The tensile fracture energy of the BFAM with the optimal content of basalt fiber is 4.6 times that of the ordinary asphalt mortar at -20°C , and the bending strain of mixture is 19.0% and 25.0% higher than that of the ordinary asphalt mixture at -10°C and -20°C . BFAM has good low temperature performance and thermal stability. The glass transition temperature of mortar is 3.75°C lower than that of ordinary asphalt mortar, and the heat absorption increases by 0.1525 J/g during the transition from high elastic state to viscous flow state. The internal connection of ordinary asphalt mixture is weak. Basalt fiber enhances the integrity of mixture and restrains the crack propagation, thus improves the crack resistance of asphalt mixture.

Key words: basalt fiber; asphalt mortar; relevance; phase change; microstructure

收稿日期:2019-09-20; 修订日期:2019-10-19

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2017JQ5085);内蒙古自治区交通运输厅交通科技项目(NJ-2015-38)

第一作者:李震南(1991—),男,河南驻马店人,长安大学博士生.E-mail: lizhennan115@163.com

低温开裂是沥青路面常见的病害之一,而沥青胶浆及混合料的低温性能是影响沥青路面低温开裂的重要因素^[1-2].玄武岩纤维(BF)作为一种新型环保路面材料,具有模量高、耐久性好、与沥青相容性好等优点,对沥青胶浆及混合料的低温性能有良好的改善作用^[3-4].Davar 等^[5]研究发现玄武岩纤维能提高沥青混合料的低温变形能力,减少沥青路面开裂.Tanzadeh 等^[6]认为玄武岩纤维能显著提高沥青混合料的强度.吴萌萌等^[7]研究表明在合理掺量下玄武岩纤维能改善沥青胶浆的低温抗裂性,但纤维掺量过大会对其抗裂性产生不利影响.马立杰等^[8]研究表明玄武岩纤维能增加高模量沥青的柔韧性和强度,并对其作用机理进行了初步探究.覃潇等^[9]认为玄武岩纤维沥青胶浆及混合料的路用性能具有良好的相关性,但未对其低温指标进行关联性分析.以上研究主要集中于玄武岩纤维沥青胶浆(BFAM)或混合料的低温性能,未对两者间的关联性进行定量分析,更缺乏玄武岩纤维对沥青低温性能改善机理

的深入研究.此外,针对纤维沥青胶浆的低温性能,目前尚未有统一的评价方法和评价指标.

基于此,本文通过拉伸试验研究了 BFAM 的低温性能,并提出了多种评价指标;采用低温弯曲试验评价了玄武岩纤维沥青混合料的低温性能,并对两者的关联性进行定量分析;同时对 BFAM 相态变化及玄武岩纤维沥青混合料的微观结构进行测试与表征,深入分析了 BF 对沥青胶浆及混合料低温性能的改善机理,为玄武岩纤维沥青路面的发展提供理论和技术支撑.

1 试验

1.1 原材料

沥青为盘锦 90# 基质沥青,其主要技术指标见表 1;纤维为浙江石金公司生产的玄武岩纤维(BF)短切丝,其主要技术指标见表 2;粗集料为玄武岩碎石,细集料为石灰岩碎石,填料为石灰岩矿粉,原材料各项性能均满足要求.

表 1 沥青的主要技术指标
Table 1 Main technicals indicators of asphalt

Penetration (25 ℃)/(0.1 mm)	Softening point/℃	Ductility (15 ℃)/cm	TFOT		
			Quality change (by mass)/%	Residual penetration ratio (25 ℃)/%	Residual ductility (10 ℃)/cm
97.3	45.2	>100	-0.192	59.71	37

表 2 BF 的主要技术指标
Table 2 Main technical indicators of BF

Length/mm	Diameter/ μm	Proportion/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Melting point/℃	Tensile strength/MPa	Elasticity modulus/GPa	Fracture elongation/%
9	6-9	2.63-2.65	1 050	3 000	105	3.1

1.2 配合比设计

采用 AC-13 型沥青混合料,其级配见表 3.采用

马歇尔法确定不同玄武岩纤维掺量¹⁾ w_{BF} 下的最佳油石比($m_{\text{A}}/m_{\text{S}}$),结果见表 4.

表 3 沥青混合料级配组成
Table 3 Aggregate gradation of asphalt mixture

Seive size/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio(by mass)/%	100.0	95.3	78.4	50.8	32.5	22.3	18.2	13.7	9.5	5.6

表 4 不同 BF 掺量下的最佳油石比
Table 4 Optimum asphalt-aggregate ratios under different BF contents

$w_{\text{BF}}/\%$	0	0.2	0.3	0.4	0.5
$m_{\text{A}}/m_{\text{S}}$	0.051 5	0.052 0	0.053 0	0.054 0	0.054 5

1.3 试验方法

1.3.1 拉伸试验

将沥青加热至 $(165\pm5)^\circ\text{C}$,加入矿粉(粉胶比为

1:2),拌和后加入相应掺量的 BF 并搅拌均匀,在玻璃板上成型厚度均匀的 BFAM 板状试件,试件尺寸为 15 cm $\times$ 12 cm.试验前将试件分别在-10、-20 ℃下保温 3 h 后,在低温环境箱内进行拉伸试验.MTS 试验机拉伸速度为 10 mm/min,当拉力衰减为极限拉力(F_u)的 50%时停止试验,得到试件的荷载-位移(F - δ)曲线.典型的 F - δ 曲线见图 1.

1)文中涉及的掺量、油石比、粉胶比等均为质量分数或质量比.

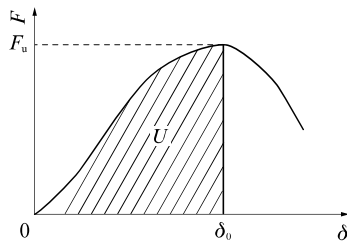


图1 典型的 $F-\delta$ 曲线
Fig. 1 Typical $F-\delta$ curve

通过拉伸试验测试 BFAM 的极限拉力,以此表征胶浆在不同低温环境下的抗裂性能.另外,纤维胶浆的变形能力对其抗裂性能也有较大影响,因此引入拉伸断裂能 U (达到极限拉力前荷载-位移曲线面积,即图1中阴影部分面积)来综合评价胶浆的低温性能,纤维胶浆拉伸断裂能 U 为:

$$U = \int_0^{\delta_0} F d\delta \quad (1)$$

式中: δ_0 为极限拉力对应的位移, m.

1.3.2 低温弯曲试验

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,分别在 -10 、 -20 $^{\circ}\text{C}$ 下进行沥青混合料的弯曲试验,并计算不同 BF 掺量下混合料的弯拉强度 (R_B)、弯拉应变 (ϵ_B) 和应变能密度 (dW/dV),以此评价沥青混合料的低温性能.

1.3.3 灰色关联度计算方法

灰色关联度作为一种多属性决策工具,通过计算主序列(目标值)与子序列(影响因素)之间的关联度,并对关联度进行排序,从而寻找影响主序列的主要因素,计算步骤如下^[10].

(1) 对各子序列进行均值化处理,得到参考序列:

$$X_i'(k) = X_i(k) / \bar{X}_i, (k=1, 2, \dots, m; i=0, 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: $X_i'(k)$ 为参考序列; $X_i(k)$ 为子序列; $\bar{X}_i$ 为子序列均值; k, i 分别为序列数、指标数.

(2) 计算比较序列与参考序列的关联系数:

$$\gamma_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + 0.5 \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (3)$$

$$\Delta_i(k) = |X_0'(k) - X_i'(k)| \quad (4)$$

式中: $\gamma_i(k)$ 为关联系数; $\min_i \min_k \Delta_i(k)$ 为两极最小差; $\max_i \max_k \Delta_i(k)$ 为两极最大差; $\Delta_i(k)$ 为比较序列与参考序列的差; $X_0'(k)$ 为比较序列.

(3) 计算关联度 γ_i :

$$\gamma_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \gamma_i(k) \quad (5)$$

若子序列 $X_i'(k)$ 与比较序列 $X_0'(k)$ 的关联系数 γ_i 越大,说明 $X_i'(k)$ 对 $X_0'(k)$ 的影响越大.

2 结果与讨论

2.1 BFAM 的低温性能

BFAM 的极限拉力和拉伸断裂能分别见图2、3.由图2、3可见:BFAM 在 -10 $^{\circ}\text{C}$ 下的极限拉力和拉伸断裂能随着纤维掺量 w_{BF} 的增大而增加,但其增长幅度逐渐变缓慢;随纤维掺量增加,BFAM 在 -20 $^{\circ}\text{C}$ 下的极限拉力和拉伸断裂能出现先增大后减小的趋势,在 0.4% 掺量下其极限拉力和拉伸断裂能均达到最大值;与普通沥青胶浆(玄武岩纤维掺量为 0%)相比,玄武岩纤维对沥青胶浆的低温性能具有明显的增强效果,在 0.4% 掺量时 -10 $^{\circ}\text{C}$ 下 BFAM 的极限拉力是普通沥青胶浆的 5.4 倍, -20 $^{\circ}\text{C}$ 下其极限拉力、拉伸断裂能分别是普通沥青胶浆的 5.6、4.6 倍.

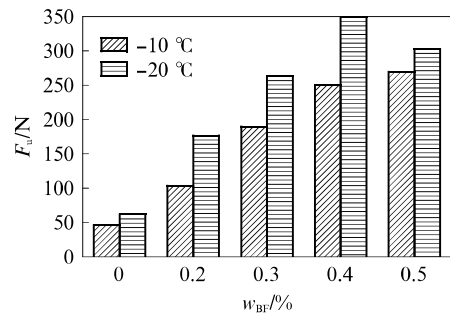


图2 BFAM 的极限拉力
Fig. 2 Ultimate tension of BFAM

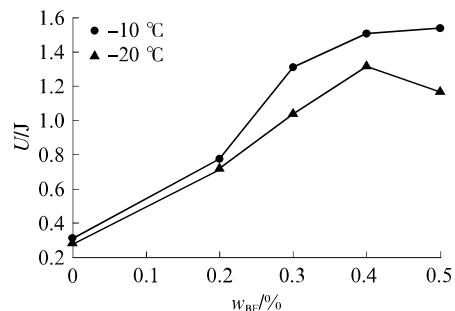


图3 BFAM 的拉伸断裂能
Fig. 3 Tensile fracture energy of BFAM

在沥青基体受拉应力时,玄武岩纤维与基体共同受力,且其具有较高的抗拉强度和断裂伸长率,因此能大幅度提高沥青胶浆的极限拉力和拉伸断裂能.当玄武岩纤维掺量过多时,纤维束无法分散为均匀的纤维丝,降低了沥青对纤维的裹覆程度,纤维与沥青无法形成均匀、稳定的整体,从而削弱玄武岩纤维的增强效果,宏观表现为低温指标降低或增幅变缓^[11].

2.2 玄武岩纤维沥青混合料的低温性能

沥青混合料的弯拉应变 ϵ_B 、弯拉强度 R_B 与应变能密度 dW/dV 见图 4、5。由图 4 可见:随玄武岩纤维掺量增加,低温下沥青混合料的弯拉应变先增大后减小;当玄武岩纤维掺量由 0% 增加至 0.2%、0.3% 和 0.4% 时, -10°C 下沥青混合料的弯拉应变分别增加了 8.0%、18.3% 和 19.0%, -20°C 下混合料的弯拉应变分别增加了 9.0%、15.5% 和 25.0%;当纤维掺量增加至 0.5% 时,混合料的弯拉应变出现减小的趋势;与普通沥青混合料相比, -10°C 、 -20°C 下 BF 掺量为 0.4% 的沥青混合料弯拉应变增幅分别为 19.0%、25.0%,即随温度降低沥青混合料的弯拉应变增幅变大。由此表明,在合理的玄武岩纤维掺量下混合料对低温环境有较强的适应性。由图 5 可见:玄武岩纤维沥青混合料的弯拉强度、应变能密度与其弯拉应变有相同的变化规律,均在玄武岩纤维掺量为 0.4% 掺量时达到峰值。

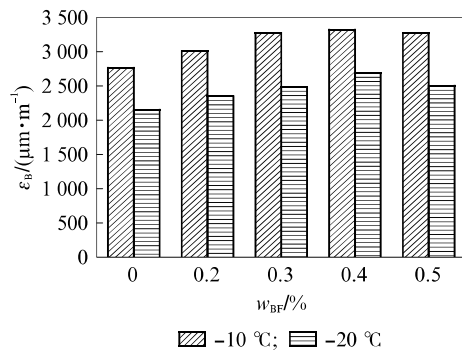


图 4 沥青混合料的弯拉应变
Fig. 4 Bending strain of asphalt mixtures

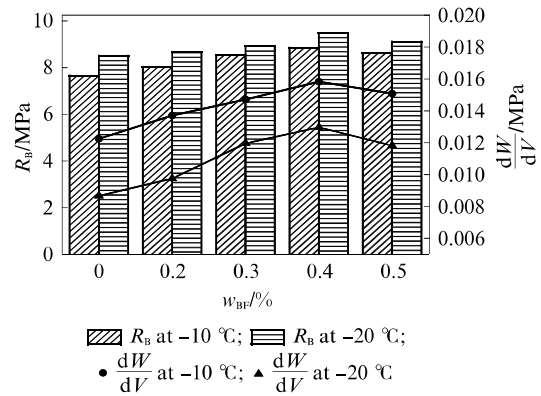
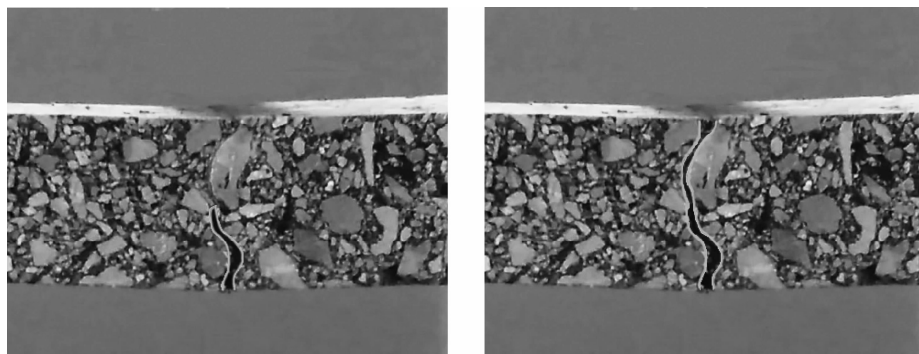


图 5 沥青混合料的弯拉强度和应变能密度
Fig. 5 Bending strength and strain energy density of asphalt mixtures

普通沥青混合料的裂缝发展过程见图 6。弯曲试验加载过程中:初期普通沥青混合料和玄武岩纤维沥青混合料均未发生破坏,玄武岩纤维的增强作用不明显;随荷载的持续增加,荷载和变形超过普通沥青混合料的极限后,普通混合料底部出现裂缝并向上扩展,见图 6(a);接着裂缝会快速发展,最终形成贯穿裂缝,导致试件的整体破坏,见图 6(b)。

玄武岩纤维沥青混合料在弯曲试验加载初期,其所受荷载较小,玄武岩纤维与混合料基体作为一个整体共同承受荷载作用,并通过纤维-沥青界面的黏结作用将应力传递至纤维。弯曲试验加载过程中:在玄武岩纤维沥青混合料中,首先是横跨在微裂缝或薄弱部位两侧的桥接纤维承受荷载作用,约束微裂纹的发展;随着荷载的继续增加,玄武岩纤维沥青混合料内部的微裂缝逐渐扩展,成为宏观裂缝,此时



(a) Crack in the bottom and middle of specimen

(b) Penetrating crack in specimen

图 6 普通沥青混合料裂缝发展过程

Fig. 6 Crack development process of ordinary asphalt mixture

混合料内部的玄武岩纤维承受更大的荷载应力,减慢开裂速度,混合料仍具有较强的承载能力;随着荷载不断增长,沥青混合料底部的玄武岩纤维不断被拉伸、拔出,位置偏上的玄武岩纤维开始承受荷载作

用,进一步提高混合料的抗裂性能。当玄武岩纤维沥青混合料达到承载能力的极限后,裂缝失稳扩展,玄武岩纤维被拔出、脱胶、拉断等,混合料的承载能力降低。玄武岩纤维拔出、拉断等过程同样消耗能量,

因此与普通混合料相比,玄武岩纤维沥青混合料具有较高的弯拉强度、弯拉应变和应变能密度。

此外,玄武岩纤维的增强效果与其掺量密切相关:当玄武岩纤维掺量过小时,对沥青混合料的增强效果不明显;当玄武岩纤维掺量过多时,纤维难以均匀分散,纤维结团、卷曲,纤维丝相互重叠,形成受力薄弱面,降低混合料的抗裂性能。

2.3 关联性分析

由 BFAM 及混合料的低温性能试验结果可知,玄武岩纤维掺量对 BFAM 及混合料有相似的影响规律,但目前两者低温指标间的关联性鲜有报道。JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中主要以 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的弯拉应变来评价沥青混合料的低温性能,此外,中国北方季冻区及重冰冻区冬季气温远远低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此本文以 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下各纤维掺量的玄武岩纤维沥青混合料弯拉应变为比较序列,分析各子序列($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 BFAM 的极限拉力和拉伸断裂能)与比较序列的关联度,计算结果见表 5。

表 5 BFAM 的低温性能指标与玄武岩纤维沥青混合料弯拉应变关联度分析结果

Table 5 Analysis results of correlation degree between low temperature performance indexes of BFAM and bending strain of basalt fiber asphalt mixture				
Sequence	$F_u(-10\text{ }^{\circ}\text{C})$	$U(-10\text{ }^{\circ}\text{C})$	$F_u(-20\text{ }^{\circ}\text{C})$	$U(-20\text{ }^{\circ}\text{C})$
$\epsilon_B(-10\text{ }^{\circ}\text{C})$	0.640	0.653	0.692	0.717
$\epsilon_B(-20\text{ }^{\circ}\text{C})$	0.612	0.631	0.662	0.688

由表 5 可见:BFAM 低温性能指标与玄武岩纤维沥青混合料弯拉应变的灰色关联度排序依次为: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 拉伸断裂能 $>-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 极限拉力 $>-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 拉伸断裂能 $>-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 极限拉力。 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 BFAM 的拉伸断裂能与玄武岩纤维沥青混合料弯拉应变的关联程度最大,因此在以后研究中,应采用 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下沥青胶浆的拉伸断裂能评价玄武岩纤维沥青混合料的低温性能,并可以通过该指标初步优选纤维规格。

2.4 BFAM 的相态变化分析

为深入研究 BFAM 性能的改善机理,采用差示扫描量热(DSC)分析法探讨 BFAM 在受热过程中的相态变化,最佳玄武岩纤维掺量(0.4%)下 BFAM 及普通沥青胶浆的 DSC 曲线见图 7。

由图 7 可见:BFAM 的玻璃化转变温度比普通沥青胶浆低 $3.75\text{ }^{\circ}\text{C}$,意味着 BFAM 处于高弹态的温度范围更大,其在低温环境下具有更好的黏弹性;BFAM 的弹流态转变温度与普通沥青胶浆相差不大,但在相态转变过程中,BFAM 的吸热量高于普通沥青胶浆,吸热量增加 $0.152\text{ }5\text{ J/g}$ 。在高弹态与黏流态的转变过程中,BFAM 需要吸收更多的热量以完成相态变化,因此其具有良好的热稳定性。玄武岩纤维丝直径为 $6\sim 9\text{ }\mu\text{m}$,具有较大的比表面积,能吸附沥青中的轻质组分,使在转化温度区间内发生相态变化的分子数量减少,从而使沥青胶浆具有良好的低温性能和热稳定性。

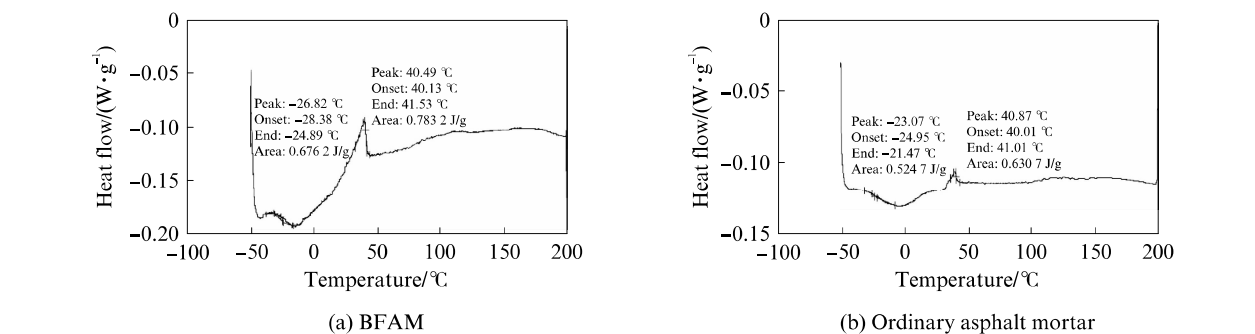


图 7 BFAM 和普通沥青胶浆的 DSC 曲线
Fig. 7 DSC curves of BFAM and ordinary asphalt mortar

2.5 玄武岩纤维沥青混合料的微观结构

采用扫描电镜(SEM)测试了普通沥青混合料和玄武岩纤维沥青混合料的微观结构,如图 8 所示。

由图 8 可见:普通沥青混合料内部连接较薄弱,集料与沥青间存在不同程度的剥离,其整体性较差;玄武岩纤维沥青混合料具有较好的整体性,沥青、纤维和矿料连接成一体,无明显的剥离现象。究其原因,

因,主要是玄武岩纤维对沥青有较强的吸附作用,使沥青混合料中结构沥青增多,自由沥青减少,沥青膜厚度增加,从而提高集料与沥青间的黏结力,增强了混合料的整体性,因此其性能优于普通沥青混合料。

玄武岩纤维在沥青混合料中的分散状态见图 9。由图 9(a)可见:玄武岩纤维纵横交错,相互重叠,形成致密结构。当沥青混合料受力变形时,玄武岩纤

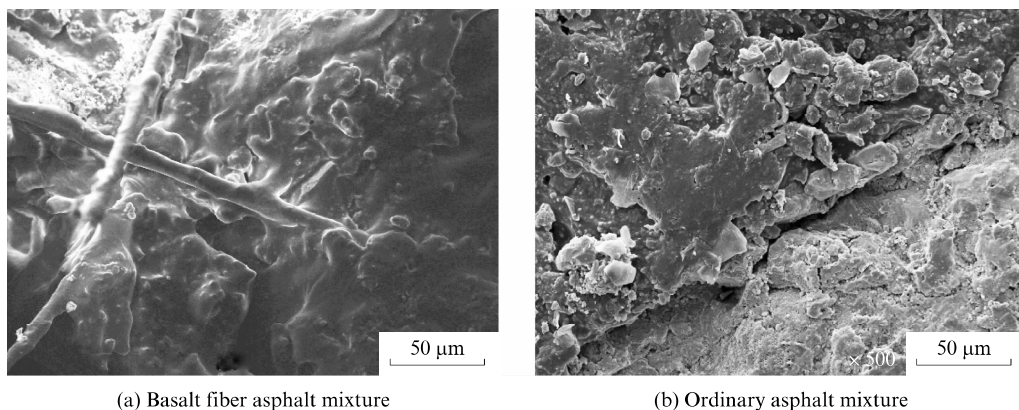


图8 玄武岩纤维沥青混合料和普通沥青混合料的微观结构

Fig. 8 Microstructure of basalt fiber asphalt mixture and ordinary asphalt mixture

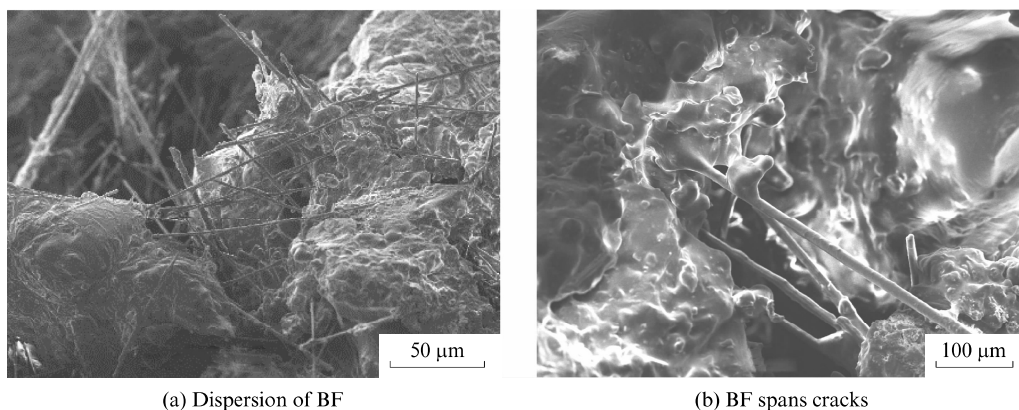


图9 玄武岩纤维在沥青混合料中的分散状态

Fig. 9 Dispersion state of BF in asphalt mixture

维结构分散和传递应力,有效地避免了应力集中,使混合料的受力和变形更均匀。

由图9(b)可见:玄武岩纤维跨越孔隙及裂纹,形成桥接纤维,约束裂纹的发展。当荷载作用时,横跨在微裂纹处的玄武岩纤维承受应力;随荷载持续作用,玄武岩纤维被拉断或拔出,裂缝才能进一步扩展。通过玄武岩纤维的加筋阻裂作用,延缓裂纹的扩展,从而提高沥青混合料的抗裂性。

3 结论

(1)BFAM与混合料的低温性能有良好的关联性,−20℃下BFAM的拉伸断裂能与混合料的弯拉应变关联度最大,推荐采用−20℃下BFAM的拉伸断裂能来评价玄武岩纤维沥青混合料的低温性能。

(2)基于低温性能推荐玄武岩纤维的最佳掺量为0.4%,−20℃下最佳玄武岩纤维掺量BFAM的拉伸断裂能是普通沥青胶浆的4.6倍,−10、−20℃下玄

武岩纤维沥青混合料的弯拉应变比普通沥青混合料分别提高19.0%、25.0%。

(3)BFAM具有良好的低温性能和热稳定性,其玻璃化转变温度比普通沥青胶浆低3.75℃,从高弹态到黏流态转化过程中吸热量增加0.152 J/g。

(4)普通沥青混合料内部连接较薄弱,集料与沥青间剥离严重,掺入玄武岩纤维增强了沥青混合料的整体性,同时玄武岩纤维能承受和传递应力,约束裂纹扩展,从而改善沥青混合料的抗裂性。

参考文献:

- [1] SZWED A, KAMIŃSKA I. Mitigation of low-temperature cracking in asphalt pavement by selection of material stiffness[J]. Procedia Engineering, 2015, 111: 748-755.
- [2] ZHAO X, SHEN A Q, MA B F. Temperature response of asphalt pavement to low temperatures and large temperature differences[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 6: 1-14.
- [3] 钱振东, 刘长波, 唐宗鑫, 等. 短切玄武岩纤维对环氧沥青及其混合料性能的影响[J]. 公路交通科技, 2015, 32(6): 1-5.

- QIAN Zhendong, LIU Changbo, TANG Zongxin, et al. Effect of basalt fiber chopped strand on performance of epoxy asphalt and its mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(6):1-5. (in Chinese)
- [4] 常睿, 郝培文. 盐冻融循环对沥青混合料低温性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3):481-488.
- CHANG Rui, HAO Peiwen. Impact of freeze-thaw cycles with salt on low temperature properties of asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3):481-488. (in Chinese)
- [5] DAVAR A, TANZADEH J, FADAEE O. Experimental evaluation of the basalt fibers and diatomite powder compound on enhanced fatigue life and tensile strength of hot mix asphalt at low temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153:238-246.
- [6] TANZADEH R, TANZADEH J, TAHAMI S A. Experimental study on the effect of basalt and glass fibers on behavior of open-graded friction course asphalt modified with nano-silica[J]. Construction and Building Materials, 2019, 212:467-475.
- [7] 吴萌萌, 李睿, 张玉贞, 等. 纤维沥青胶浆高低温性能研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(1):169-175.
- WU Mengmeng, LI Rui, ZHANG Yuzhen, et al. Study of high and low temperature performance of fiber-asphalt mortar[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015, 39(1):169-175. (in Chinese)
- [8] 马立杰, 杨春风. 掺加纤维对高模量沥青混合料柔韧性及路用性能影响研究[J]. 功能材料, 2019, 50(1):1164-1173.
- MA Lijie, YANG Chunfeng. Study on the influence of fiber on flexibility and road performance of high modulus asphalt mixture[J]. Journal of Functional Materials, 2019, 50(1):1164-1173. (in Chinese)
- [9] 覃潇, 申爱琴, 郭寅川. 基于关联性的玄武岩纤维沥青胶浆及其混合料性能研究[J]. 材料导报, 2016, 30(12):124-128.
- QIN Xiao, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan. Relevance research on road performance of basalt fiber reinforced bitumen mastics and corresponding mixture[J]. Materials Review, 2016, 30(12):124-128. (in Chinese)
- [10] 王鹏, 曾凡奇, 黄晓明. 沥青高温性能指标的灰色关联度分析[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3):32-36.
- WANG Peng, ZENG Fanqi, HUANG Xiaoming. Grey relation degree analysis of high-temperature performance indexes of asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3):32-36. (in Chinese)
- [11] 张小元, 顾兴宇, 吕俊秀, 等. 玄武岩纤维沥青碎石封层性能及合理材料用量[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3):417-423.
- ZHANG Xiaoyuan, GU Xingyu, LÜ Junxiu, et al. Performance and rational content of basalt fiber asphalt chip coat[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3):417-423. (in Chinese)

(上接第 136 页)

- [10] PETERSEN J C, ROBERTSON R E, BRANTHAVER J F, et al. Binder characterization and evaluation. Volume 4: Test methods[M]. Washington D. C.: National Research Council, 1994:17-26.
- [11] 刘宇, 张肖宁, 迟凤霞. 国外 SCB(半圆弯抗)试验方法在沥青混合料中的研究与应用[J]. 中外公路, 2008, 28(3):190-191.
- LIU Yu, ZHANG Xiaoning, CHI Fengxia. Foreign SCB(semi-circular bending) research and application of test methods in asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(3):190-191. (in Chinese)
- [12] SAHA G, BILIGIRI K P. Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular bending test: A state-of-the-art review and future research[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105:103-112.