

# 玄武岩纤维/橡胶复合改性沥青胶浆路用性能研究

展宏图<sup>1,2</sup>, 柳力<sup>3</sup>

(1.广东交科检测有限公司, 广东 广州 510550; 2.广东华路交通科技有限公司; 3.长沙理工大学 土木工程学院)

**摘要:** 采用20%废旧轮胎橡胶粉(CRM)和0.3%玄武岩纤维(BF)分别制备了CRM改性沥青胶浆、玄武岩/橡胶复合改性沥青胶浆;采用动态剪切流变仪和低温弯曲流变仪研究了胶浆的高温性能、低温性能及黏度,并分析了改性机理。结果表明:在相同试验温度下,玄武岩/橡胶复合改性沥青的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 均高于基质沥青和CRM改性沥青,复合改性沥青的失效温度比基质沥青高约23℃,比CRM改性沥青高12℃;复合改性沥青弯曲蠕变劲度 $S$ 较小, $m$ 值较大,低温性能高于基质沥青和橡胶改性沥青1个等级;同时,复合改性沥青胶浆的动态黏度是其他3种沥青的数倍,玄武岩纤维对胶浆黏度影响不大。

**关键词:** 材料工程; 废旧轮胎橡胶粉; 玄武岩纤维; 流变性能; 增强机理

## 1 前言

目前中国公路建设已进入提质改造和养护的新时期,很多早期修建的公路经过多年的车辆荷载和雨水作用,已出现不同程度的病害,严重影响路面的使用性能。近年来,在原有路面加铺2~3 cm的SAC-10、SMA-10和OGFC-10等薄层罩面和超薄磨耗层等技术得到了广泛的应用,由于该层较薄,因而要求其沥青胶结料拥有良好的高、低温性能和疲劳性能。

在国内外现有研究中,对薄层罩面的沥青混合料研究较多,而对其中重要组成部分胶结料研究较少,尤其是玄武岩纤维橡胶沥青胶浆鲜有涉及。废旧轮胎作为一种固体废弃物,曾是社会的黑色污染,而将其加工成废旧轮胎橡胶粉(CRM),不仅可以将废旧轮胎“一站式”无害化处理,而且可成为一种优良的沥青改性剂。玄武岩纤维(BF)作为一种新材料,较常用的纤维具有比表面积大、表面浸润性好、力学性能优异、水稳定性好等特点,可有效提高沥青路面高温抗车辙、低温抗裂、抗疲劳、抗冻融及抗水损害性,对大幅提高路面承载能力和使用寿命可起到显著的作用。

该文采用不同掺量的CRM和BF进行复合,对橡胶沥青和玄武岩纤维橡胶沥青胶浆的制备过程进行研究,采用美国Superpave评价方法对其流变性能进行全面评价,同时对CRM和BF在沥青材料中的增强机

理和反应机理进行研究分析。

## 2 玄武岩纤维橡胶沥青胶浆制备过程

### 2.1 原材料

#### 2.1.1 基质沥青

基质沥青采用70#道路石油沥青,其主要性能指标如表1所示。

表1 70#基质沥青性能指标

设计指标	单位	检测结果
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	70
针入度指数 $PI$		-0.87
软化点(R&B)	℃	49
动力黏度(60℃)	Pa·s	230
延度(10℃,5 cm/min)	cm	37
延度(15℃,5 cm/min)	cm	>100
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.040
旋转薄膜质量损失	%	-0.328
老化延度(10℃,5 cm/min)	cm	6.2
(RTFOT) 针入度比	%	63.8

#### 2.1.2 胶粉和玄武岩纤维

胶粉采用40目废旧轮胎橡胶粉,玄武岩纤维采用GBF玄武岩纤维,其性能指标如表2所示。

收稿日期:2019-09-10(修改稿)

作者简介:展宏图,男,硕士,E-mail:493074183@qq.com

表 2 GBF 玄武岩纤维性能指标

检测项目	单位	技术指标
颜色		金褐色
主要化学成分		SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, MgO
纤维直径	μm	12~15
短切长度	mm	6~12
密度	g/cm <sup>3</sup>	2.56~3.05
耐热性	℃	180±5、体积无变化
熔点	℃	1 450~1 500
耐酸碱腐蚀度		强
导热、导电能力		弱
吸湿率	%	<0.1
抗拉强度	MPa	2 800~3 800
弹性模量	GPa	90~110
断裂延伸率	%	3.2

2.2 玄武岩纤维橡胶沥青制备

2.2.1 橡胶沥青制备过程

(1) 将基质沥青在烘箱加热至 170~180 ℃,并恒温 1 h 左右。

(2) 将称量好的橡胶粉加入基质沥青中,采用高速剪切仪剪切 30 min,转速为 5 000 r/min,剪切完成后将其放入 170~180 ℃烘箱中发育 30 min。

(3) 将发育后的混合物继续高速剪切 15~20 min,转速为 5 000 r,剪切完成后放入烘箱溶胀 1 h,得到橡胶沥青。

2.2.2 玄武岩纤维橡胶沥青胶浆制备过程

(1) 称量试验所需玄武岩纤维,并将其均匀分成

3 份。

(2) 将制备好的橡胶沥青加热至 170~180 ℃,分 3 次加入玄武岩纤维,每次时间间隔 15 min 左右,并采用玻璃棒匀速搅拌,试验过程中温度控制在 170~180 ℃。

制备完成的玄武岩纤维橡胶沥青胶浆应尽快进行相关性能试验,以防因离析造成试验误差。

3 玄武岩纤维橡胶沥青胶浆流变性能研究

由于 CRM 和 BF 都具有难溶于基质沥青的特点,采用中国传统的沥青指标难以客观全面反映玄武岩纤维橡胶沥青胶浆的路用性能,由于该文主要研究玄武岩纤维橡胶沥青性能,在查阅大量文献的基础上,选定 CRM 掺量为 20%,BF 掺量为 0.3%。采用美国 Superpave 沥青测试方法对 20%CRM 和 20%CRM+0.3%BF 的沥青材料(复合改性沥青)进行路用性能评价。

3.1 高温性能

沥青材料路用性能与沥青在温度和荷载作用下的流变性能直接相关,玄武岩纤维橡胶沥青胶浆的高温性能采用动态剪切流变仪(DSR)模拟胶浆材料在温度和荷载作用下的动态剪切,以抗车辙因子  $G^*/\sin\delta$  值作为评价指标,对于原样沥青材料抗车辙因子  $G^*/\sin\delta$  应不小于 1.0 kPa。为了试验结果具有对比性,分别对 20%CRM 沥青和复合改性沥青胶浆进行试验,试验结果如表 3 所示。

表 3 高温动态剪切试验结果

沥青种类	不同试验温度(℃)时的( $G^*/\sin\delta$ )/kPa							失效温度/℃
	58	64	70	76	82	88	94	
基质沥青	3.03	1.31	0.62	—	—	—	—	66.5
20%CRM	8.60	4.32	2.31	1.26	0.708	—	—	78.4
复合改性沥青 (20%CRM+0.3%BF)	—	—	9.12	4.73	2.59	1.38	0.747	90.4
技术要求	$\geq 1.0$							—

由表 3 可知:

(1) 在试验温度为 70 ℃时,20%CRM 橡胶沥青的  $G^*/\sin\delta$  为基质沥青的 3.7 倍、复合改性沥青胶浆材料的  $G^*/\sin\delta$  为基质沥青的 14.7 倍,说明 CRM 和 BF 加入基质沥青中能显著提升沥青的高温稳定性。

(2) 在试验温度为 70~82 ℃时,复合改性沥青胶浆材料的  $G^*/\sin\delta$  为 20%CRM 橡胶沥青的 3.9 倍,因为 BF 能吸附和稳定沥青,且具有多方向的加筋功能,可有效吸收沥青材料中多余的油分,降低高温流动性,提高沥青材料的稠度,增强黏结力,BF 能显著提升

橡胶沥青的高温稳定性。

(3) 基质沥青的失效温度为 66.5 ℃,20%CRM 橡胶沥青的失效温度为 78.4 ℃,复合改性沥青胶浆的失效温度为 90.4 ℃。增加 20%的 CRM,基质沥青失效温度提高了 17.9%;在 20%的橡胶沥青中增加 0.3%的 BF,沥青胶浆失效温度提高了 15.3%,表明在橡胶沥青中增加少量的 BF,对其高温性能有较大的改善。

3.2 低温性能

低温弯曲梁流变仪(BBR)测定沥青的弯曲蠕变劲度  $S$  和  $m$  值,美国 Superpave 规范中要求经过 RT-

FOT 和 PAV 老化后沥青试样的  $S \leq 300 \text{ MPa}$ ,  $m \geq 0.3$ ,试件尺寸为长  $(127 \pm 2) \text{ mm}$ ,厚  $(6.35 \pm 0.05) \text{ mm}$ ,高  $(12.70 \pm 0.05) \text{ mm}$ 。由于该文主要研究两种沥青材料性能的对比,为简化试验过程,所以采用原样沥青材料。

根据 SHRP 规范,沥青胶结料弯曲蠕变劲度模量  $S$  值越小,则表明弹性成分小,黏性成分大,低温的抗变形能力好; $m$  值越大,则黏性大,沥青胶结料应力积累变形能力越好。低温弯曲梁流变试验结果如表 4 所示。

表 4 低温弯曲梁流变试验结果

沥青种类	-18 ℃		-12 ℃		-6 ℃	
	蠕变劲度 $S/\text{MPa}$	$m$ 值	蠕变劲度 $S/\text{MPa}$	$m$ 值	蠕变劲度 $S/\text{MPa}$	$m$ 值
基质沥青	465.0	0.253	249.0	0.310	130.0	0.374
20%CRM	339.8	0.265	181.2	0.359	125.0	0.454
复合改性沥青 (20%CRM+0.3%BF)	285.4	0.351	147.1	0.469	87.4	0.582

由表 4 可知:

(1) 在试验温度为 -6、-12 和 -18 ℃时,20% CRM 橡胶沥青  $S$  值为基质沥青的 96.2%、72.8%和 73.1%; $m$  值为基质沥青的 1.21、1.16 和 1.05 倍,表明增加 20%的 CRM 可对沥青的低温性能提升 5%~20%,改善效果显著。

(2) 在试验温度为 -6、-12 和 -18 ℃时,20% CRM+0.3%BF 沥青胶浆  $S$  值为 20%CRM 橡胶沥青的 70.0%、81.2%和 84.0%; $m$  值为 1.28、1.31 和 1.32 倍,表明增加 0.3%的 BF 可对橡胶沥青的低温性能提升 20%~30%,改善效果显著。

(3) 按 SHRP 沥青胶结料分级规范,20%CRM 橡胶沥青的低温等级为 -12 ℃,20%CRM+0.3%BF 沥青胶浆材料的低温等级为 -18 ℃,低温性能提升了 1 个等级,也表明在橡胶沥青中适当增加 BF,可使沥青胶结料低温性能得到改善,文献[14]提出沥青胶结料的低温性能对沥青混合料低温开裂贡献达 90%,研究说明沥青胶浆材料可有效提高沥青混合料的低温性能,减少路面因温度降低产生的裂缝,延长路面的使用寿命。

3.3 黏度

沥青胶结料的黏度指沥青材料在外力作用下抵抗剪切变形的能力,同时其是与沥青路面力学行为联系

最紧密的一个指标,已有研究表明:沥青材料的黏度与沥青混合料高、低温性能均存在较好的相关关系,目前对改善沥青材料性能主要有两种方式,即添加改性剂和纤维。

3.3.1 CRM 黏度增强

CRM 作为一种改性剂,可显著改善沥青材料的路用性能,添加 CRM 后,沥青材料的黏度计算如式(1)所示。

$$\eta = \eta_m [1 + C_0 K(T) M^{\alpha(T)}] \tag{1}$$

式中: $\eta_m$  为基质沥青黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ); $C_0$  为改性剂的质量百分数(%); $M$  为改性剂的黏均相对分子量; $K(T)$ 、 $\alpha(T)$  均为常数,其中  $C_0 K(T) M^{\alpha(T)}$  被称为改性剂的增黏因子。

3.3.2 BF 黏度增强

BF 是一种新型沥青无机改性材料,其对沥青材料黏度增强计算如式(2)所示。

$$\eta = \eta_m (1 + K_E V_f) \tag{2}$$

式中: $\eta_m$  为基质沥青黏度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ); $V_f$  为纤维体积分数(%); $K_E$  为 Einstein 系数; $K_E V_f$  为纤维增强沥青的增黏因子。

3.3.3 CRM 和 BF 复合黏度增强效果分析

通过 DSR 对基质沥青、0.3%BF、20%CRM 橡胶沥青和 20%CRM+0.3%BF 沥青胶浆进行 60、135、

170 ℃的动态黏度扫描,分析不同温度下温度与黏度的关系,试验结果如表 5 所示。

表 5 不同改性方式在不同温度下黏度试验结果

沥青种类	不同温度(℃)时的黏度/(Pa·s)				
	60	135	150	160	170
基质沥青	230	55	51	47	42
0.3%BF	167	58	54	50	55
20%CRM	673	165	154	148	142
复合改性沥青 (20%CRM+0.3%BF)	1 120	288	265	232	204

由表 5 试验结果可知:

(1) 20%CRM 沥青胶浆与基质沥青相比,其 60~170 ℃黏度提高近 3 倍,由式(1)可知添加 CRM 后,沥青材料的黏度变化只与增黏因子  $C_0 K(T) M^{a(T)}$  有关,随着温度的升高,沥青材料的黏度降低。

(2) 0.3%BF 沥青胶浆与基质沥青相比,其黏度并未有明显增加,由式(2)可知沥青材料的增黏因子  $K_E V_f$  是与温度无关的一个常量,表明 BF 性能不随温度升高而改变,具有一定的热稳定性。

(3) 20%CRM+0.3%BF 沥青胶浆与 20%CRM 橡胶沥青相比,60 ℃黏度高出近 1 倍,表明 0.3%BF 在沥青中可起到加筋作用,可吸收沥青材料中多余油分,降低流动性,提高沥青材料的稠度,提升路面的使用性能。

(4) 20%CRM+0.3%BF 沥青胶浆材料的 135 ℃黏度较大,因此在施工过程中应适当提高拌和和摊铺温度,减少因黏度过大造成路面病害。

(5) 20%CRM+0.3%BF 玄武岩纤维橡胶沥青胶浆的 60 ℃黏度明显大于 0.3%BF 和 20%CRM 改性沥青,且达到了“1+1>2”的效果,说明玄武岩橡胶沥青胶浆具有高黏的特点。

## 4 玄武岩纤维橡胶沥青胶浆反应机理研究

CRM 与 BF 在沥青中的反应及分布状态是一个复杂的过程,该文通过电子显微和电镜扫描分析方法对两种改性剂对沥青的改性机理进行研究。

### 4.1 CRM 反应机理

沥青材料中除了沥青质,还有部分轻质组分,在高温条件下,CRM 与沥青反应主要以物理反应为主,在

一般条件下,CRM 颗粒不会完全溶解在沥青中,橡胶沥青的三维结构如图 1 所示。CRM 颗粒与沥青拌和前后颗粒变化的电子显微图像如图 2 所示,橡胶沥青电镜扫描图如图 3 所示。

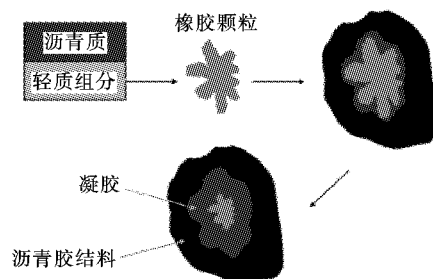


图 1 橡胶沥青三维结构图

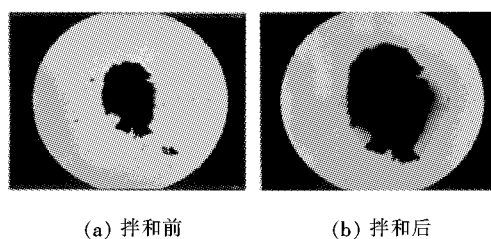


图 2 CRM 颗粒与沥青拌和前后颗粒变化的电子显微图



图 3 橡胶沥青电镜扫描图

由图 2、3 可知:

(1) 在高温条件下,CRM 颗粒吸收了沥青材料中的轻质组分,发生溶胀反应,体积膨胀,体积一般可增大 30%~40%,同时沥青材料中的轻组分减小,重组分增加,导致橡胶沥青的黏度明显增强。

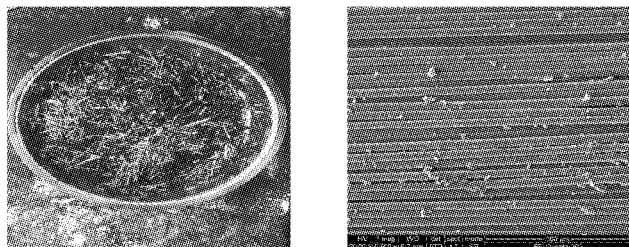
(2) CRM 颗粒溶胀体积增大,增加了 CRM 颗粒之间的接触机会,CRM 颗粒之间通过凝胶层互相连接,形成黏度相对较大的半固态连续相体系。

### 4.2 BF 在橡胶沥青中的反应机理

BF 作为一种矿物纤维,其在宏观条件下呈现“条片状”,取一根 BF 进行电镜扫描,其在微观条件下是由无数根“条柱状”细丝组成,并在细丝表面有部分“凸起”,BF 宏观与微观图像如图 4 所示。

由于 BF 与橡胶沥青在物理吸附作用、浸润作用和化学键作用下紧密黏结,并在 BF 表面形成具有一

定厚度的薄层沥青,该区域称为界面区,如图5所示。BF相互之间通过橡胶沥青的凝胶层互相连接,形成连续相体系。



(a) 宏观图像

(b) 微观图像 500 倍

图4 BF宏观和微观图

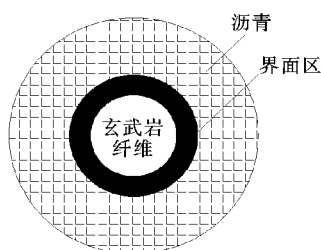


图5 BF与沥青接触示意图

在玄武岩纤维橡胶沥青胶浆制备过程中,“条片状”玄武岩纤维在温度和外力作用下,分散成大量的“条柱状”细丝,三维乱向地分布在橡胶沥青中,增大了BF与沥青材料的接触面积,同时由于BF表面存在部分“凸起”,根据界面理论,“凸起”增大了纤维与沥青之间的吸附力,加上BF与沥青材料之间的互相缠绕,可有效提高橡胶沥青的黏度。

## 5 结论

(1) BF加入基质沥青中,BF性能不随温度升高而改变,具有一定的热稳定性。BF加入20% CRM沥青中,BF能吸附和稳定沥青,可有效吸收沥青材料中多余的油分,且具有多方向的加筋功能。

(2) 在相同试验温度下,复合改性沥青的车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 均高于基质沥青和橡胶改性沥青,复合改性沥青的失效温度比基质沥青高约23℃,比橡胶改性沥青高12℃,说明玄武岩/橡胶复合改性沥青具有优良的高温性能。

(3) 复合改性沥青弯曲蠕变劲度 $S$ 较小, $m$ 值较大,低温性能高于基质沥青和20% CRM改性沥青1

个等级;同时,复合改性沥青胶浆的动态黏度是其他3种沥青的数倍。

(4) 高温动态剪切试验、低温弯曲梁流变试验和黏度扫描试验表明:复合改性沥青胶浆材料具有优良的高、低温性能,可显著提高沥青材料的稠度,提升路面的使用性能。

(5) 扫描电镜微观分析表明:CRM和BF可在沥青中形成稳定的连续相体系,CRM和BF复合改性可对沥青材料的黏度达到“1+1>2”的增强效果。

## 参考文献:

- [1] 王旭东,李美江,路凯冀,等.橡胶沥青及混凝土应用成套技术[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [2] 宋云祥,韦佑坡,李玉梅,等.玄武岩纤维沥青胶浆的路用性能[J].公路交通科技,2012(8).
- [3] 任韦波,许金余,张宗刚,等.高温后玄武岩纤维增强混凝土的冲击变形特性[J].建筑材料学报,2014(5).
- [4] 赵庆新,董进秋,潘慧敏,等.玄武岩纤维增强混凝土冲击性能[J].复合材料学报,2010(6).
- [5] 叶邦土,蒋金洋,王文灏,等.矿物掺和料对玄武岩纤维水泥砂浆强度发展的影响[J].建筑材料学报,2014(3).
- [6] 关苏军,万春风,汪丽娜,等.玄武岩纤维增强木塑复合材料的力学性能[J].复合材料学报,2011(5).
- [7] 李为民,许金余,沈刘军,等.玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J].复合材料学报,2008(2).
- [8] 王宁.玄武岩纤维及其改性沥青的性能研究[D].中国地质大学博士学位论文,2013.
- [9] 霍文静,张佐光,王明超,等.复合材料用玄武岩纤维耐酸碱碱性实验研究[J].复合材料学报,2007(6).
- [10] 钟明键,彭响兰.玄武岩纤维增强沥青混合料性能试验研究[J].公路工程,2013(5).
- [11] 交通运输部公路科学研究所.废旧橡胶粉用于筑路技术的推广应用技术[R],2011.
- [12] 刘振玉,张明,邵腊庚.DSR对改性沥青PG分级的影响与分析[J].中外公路,2009(6).
- [13] 沈金安.沥青及沥青混合料路用性能[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [14] 刘朝晖,柳力,史进,等.路面结构抗裂层沥青新材料研发及性能评价[J].公路交通科技,2013(9).
- [15] 付力强,王子灵,张锐,等.SBS与纤维在沥青及沥青混凝土中改性效果对比分析[J].公路交通科技,2007(5).
- [16] 赵丽华.玄武岩纤维对沥青混合料性能影响机理的研究[D].大连理工大学博士学位论文,2013.