

沥青与矿粉的交互作用评价及影响机理分析

王志臣^{1,2,3}, 孙雅珍¹, 桑海军^{2,4}, 孟祥竹^{2,4}, 于安康⁵

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省桥梁安全工程专业技术创新中心, 辽宁 沈阳 110122; 3. 哈尔滨剑桥学院 IEM 产教融合中心, 黑龙江 哈尔滨 150069; 4. 辽宁省交通高等专科学校, 辽宁 沈阳 110122; 5. 大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要 目的 评价沥青与矿粉的交互作用能力, 探究沥青与矿粉交互作用的影响机理。方法 在基质沥青中分别掺入石灰岩粉(LS)、花岗岩粉(GN)、粉煤灰(FA)和煤矸石粉(CG)制备沥青胶浆, 借助动态剪切流变仪(DSR)测试了沥青胶浆的流变性能, 基于 Palierne 模型提出沥青与矿粉交互作用能力的评价指标, 通过微观及物理化学试验对交互作用能力的影响机理进行分析。结果 4 种矿粉与沥青的交互作用能力从大到小依次为 CG、LS、FA、GN, 矿粉的孔外比表面积与 C 值具有较好的相关性, 可将其作为矿粉选用的考虑指标。结论 矿粉与沥青混合后并未产生新的产物, 两者之间主要发生物理化学吸附作用, 4 种矿粉中煤矸石粉对沥青的吸附作用最强, 因此煤矸石粉与沥青具有较强的交互作用能力。

关键词 道路工程; 沥青胶浆; Palierne 模型; 交互作用; 微观形貌

中图分类号 TU528.37; U414

文献标志码 A

Evaluation of the Interaction Between Asphalt and Mineral Powder and Analysis of its Influence Mechanism

WANG Zhichen^{1,2,3}, SUN Yazhen¹, SANG Haijun^{2,4}, MENG Xiangzhu^{2,4}, YU Ankang⁵

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Technology Innovation Center of Bridge Safety Engineering, Shenyang, China, 110122; 3. IEM Center for the Integration of Industry and Education, Harbin Cambridge University, Harbin, China, 150069; 4. Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang, China, 110122; 5. School of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026)

Abstract: In order to evaluate the interaction ability between asphalt and mineral fillers, and

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278454); 辽宁省桥梁安全工程专业技术创新中心 2021 年度开放基金项目(2021-06); 黑龙江省自然科学基金优秀青年项目(YQ2022E038); 哈尔滨剑桥学院 IEM 产教融合中心基金项目(21002)

作者简介: 王志臣(1987—), 男, 博士, 主要从事道路材料结构及力学行为等方面研究。

explore the influence mechanism of the interaction between asphalt and mineral fillers. Limestone (LS), granite (GN), fly ash (FA) and coal gangue (CG) fillers were added into the base asphalt to prepare asphalt mastic. The DSR tests were conducted to obtain the rheological properties of asphalt mastic. Based on the Palierne model, the evaluation index of interaction ability between asphalt and mineral fillers was proposed. The influence mechanism of interaction ability was analyzed through microscopic and physical-chemical tests. The results show that the interaction ability between four types of mineral fillers and asphalt is CG, LS, FA and GN in descending order. There exists a good correlation between the external specific surface area of mineral fillers and C value, which can be considered as an index in the selection of mineral fillers. There is no new substance formed after mixing of mineral fillers and asphalt. Physical and chemical adsorption is the major interaction between them. Among the four types of mineral fillers, coal gangue fillers have the strongest adsorption on asphalt, so coal gangue fillers have a strong interaction ability with asphalt.

Key words: road engineering; asphalt mastic; Palierne model; interaction; micromorphology

沥青胶浆属于沥青混合料多级分散体系的最末级,虽然其质量仅占沥青混合料总质量的10%左右,但起着关键的矿料黏结、空隙填充及荷载传递作用^[1],沥青胶浆的性能对沥青路面的使用性能有重要影响。沥青胶浆性能好坏取决于沥青与矿粉的交互作用,沥青与矿粉的交互作用能力越强,界面黏结性能越优良,沥青胶浆的性能越好^[2]。因此,开展沥青与矿粉的交互作用评价及影响机理研究,对于指导沥青混合料组成设计具有重要意义。

沥青与矿粉的交互作用能力与两者在界面区域的物理化学(物化)作用密切相关,矿粉吸附沥青中的极性化学组分在其表面形成吸附沥青膜^[3],界面区域发生的物理化学作用越强,生成的吸附沥青膜黏结力越强,沥青与矿粉的高温流变性能越好。因此,可以采用高温流变性能反映沥青与矿粉交互作用的强弱。

林海等^[4]分析了粉胶比和矿粉种类对沥青胶浆高温流变性能的影响。XING Baodong等^[5]通过灰关联分析得出矿粉形貌是影响沥青胶浆高温流变性能的主要因素。然而,沥青胶浆的高温流变性能指标与频率(时间)和温度等参数有关,难以直接对沥青与矿粉的交互作用进行量化评价。为了实现

沥青与矿粉交互作用的量化评价,研究人员将多相共混材料模型引入交互作用评价领域,谭忆秋等^[2]采用 Ziegel B 指标分析了温度和荷载对沥青与矿粉交互作用能力的影响。LIU Guoqiang等^[6]采用 ΔG^* 、 $K-B-G^*$ 、 $L-A-\delta$ 和 $K-B-\delta$ 指标评价了沥青与矿粉的交互作用能力,分析了不同评价指标的敏感度。郭猛^[7]采用 Ibrarra A、Ziegel B、Palierne C、 ΔG^* 指标评价了沥青与矿粉的交互作用能力,结果表明,Palierne C 具有较好的稳定性。上述研究较好探索了不同评价指标的应用效果,但流变性能主要集中于特定温度或频率,缺少宽温和宽频域内的交互作用能力综合评价以及交互作用影响机理的深入分析。

基于上述分析,笔者采用动态剪切流变仪(DSR)对不同类型沥青胶浆的高温流变性能进行测试,构建能够表征其宽温宽频特性的动态剪切模量($|G^*|$)主曲线,基于主曲线评价沥青与矿粉的交互作用能力,通过微观及物理化学试验揭示沥青与矿粉交互作用能力的影响机理。沥青与矿粉混合后并未产生新的产物,两者之间主要发生物理化学吸附作用,煤矸石粉与沥青具有较强的交互作用能力,可代替天然矿粉作为沥青混合料制备的填料。

1 试验材料和方法

1.1 材料技术指标

1.1.1 沥 青

选用辽河 A-90#基质沥青(BA),产地为辽宁盘锦,技术指标见表1。

表1 辽河 A-90#沥青技术指标

Table 1 The technical indicators of Liaoh A-90#

指标	25℃针入度/	软化点/	延度(5℃)/	闪点/	密度(15℃)/	三氯乙烯	旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)	
	0.1mm	℃	cm	℃	(g·cm ⁻³)	溶解度/%	质量损失率/%	25℃针入度比/%
检测值	80	48	8.6	254	1.003	99.87	0.05	73.2
规范要求值	80~100	≥44	—	≥245	—	≥99.5	≤±0.8	≥57

注:规范要求值源于《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)。

1.1.2 矿 粉

选用石灰岩(LS)和花岗岩(GN)两种不同岩性的常规矿粉;为考察固体废弃物在沥青路面铺筑中的资源化利用,选用粉煤灰(FA)和煤矸石粉(CG)进行比较,4种矿粉的技术指标见表2。

表2 矿粉技术指标

Table 2 The technical indicators of mineral fillers

矿粉 种类	表观密度/ (g·cm ⁻³)	比表面积/ (m ² ·g ⁻¹)	粒径小于0.075 mm 占比/%
LS	2.971	0.911	100
GN	2.793	0.996	100
FA	1.896	2.829	100
CG	1.901	2.681	100

1.2 试样制备

设计粉胶比(沥青与矿粉质量比,m₁/m₂)分别为0.4、0.8、1.2、1.6和2.0,制备沥青胶浆样品,矿粉烘干温度165℃,沥青加热温度150℃,采用电动搅拌器拌合15 min直至沥青胶浆均匀、表面无气泡。制备得到不同粉胶比的石灰岩粉-沥青胶浆(LSAM)、花岗岩粉-沥青胶浆(GNAM)、粉煤灰-沥青胶浆(FAAM)和煤矸石粉-沥青胶浆(CGAM)。

1.3 试验方法

1.3.1 沥青胶浆性能试验

动态剪切流变试验:选择温度-频率扫描方式对沥青胶浆进行动态剪切,试验采用

Bohlin Gemini II 动态剪切流变仪,0.1%加载应变,加载频率0.1~20 Hz,分别在测试温度为28℃、40℃、52℃、64℃、76℃下进行试验。

红外光谱试验:采用Frontier型傅立叶红外光谱分析仪(FTIR)进行沥青胶浆的红外光谱吸收试验,测试范围为400~4 000 cm⁻¹,扫描32次,分辨率为4 cm⁻¹。

原子力显微镜试验:采用PeakForce-QNM模式对沥青胶浆表面进行扫描,选用Dimension Fastscan AFM原子力显微镜,探针型号RTESPA,扫描频率1 Hz,范围20×20 μm,像素512×512。

1.3.2 矿粉性能试验

扫描电镜试验:4种矿粉在SUPRA55 SAPPHIRE扫描电子显微镜下进行形貌观测,扫描倍数选择1 000、2 000和3 000。

粒径分布试验:采用马尔文2000激光粒度仪对4种矿粉进行粒径分布试验,以蒸馏水为分散剂进行湿法测试,粒径范围0.02~2 000 μm,矿粉颗粒折射率取1.520。

比表面积试验:利用Autosorb-iQ全自动比表面和孔径分析仪测量4种矿粉的比表面积,吸附气体选择氮气,脱气温度200℃,采用全孔模式测试6 h。

X射线衍射试验:采用Rigaku Ultima IVX物相分析仪(XRD)对矿粉样品物相进行分析,测试条件为Cu靶Kα线,电压40 kV,电流40 mA,步长0.02°。

2 沥青与矿粉的交互作用评价

2.1 动态剪切模量 $|G^*|$ 主曲线的构建

材料的主曲线特性可以采用特定的函数模型进行表征,广义 sigmoidal 函数对于沥青材料的黏弹性主曲线表征具有较好的适用性^[8],函数表达式为

$$\log |G^*(f)| = \delta + \frac{\alpha}{[1 + \lambda \exp(\beta + \gamma \log(\alpha_T f))]^{1/\lambda}} \quad (1)$$

式中: f 为试验频率,Hz; δ 为主曲线下限,无量纲; λ 为主曲线形状系数; β 、 γ 为无量纲; α_T 为位移因子,无量纲。

根据时间-温度等效原理,利用位移因子将不同温度下的动态剪切模量 $|G^*|$ 平移构建主曲线。WLF 位移因子方程在沥青材料主曲线构建中得到较好应用,方程为

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad (2)$$

式中: T 为试验温度, $^{\circ}\text{C}$; T_r 为目标温度, $^{\circ}\text{C}$; C_1 为参数,无量纲; C_2 为参数, $^{\circ}\text{C}$ 。

将式(2)代入式(1)得到 $|G^*|$ 主曲线模型共有7个未知参数,选取目标温度 T_r ,以 $|G^*|$ 预测值与实测值的误差最小进行拟合,确定模型参数后构建 $|G^*|$ 主曲线。

2.2 基于 Palierne 模型的交互作用评价

基于流变学的 Palierne 模型在多相共混聚合材料流变性能预测中应用较为广泛,将分散相的粒径分布采用平均半径代替,Palierne 模型^[9-10]表示为

$$|G_c^*| = |G_m^*| \frac{1 + 3\phi H}{1 - 2\phi H} \quad (3)$$

$$H = [(2|G_m^*| + 5|G_i^*|) + (|G_i^*| - |G_m^*|) \times (16|G_m^*| + 19|G_i^*|)] / [10(|G_i^*| + |G_m^*|) + (2|G_i^*| + 3|G_m^*|)(16|G_m^*| + 19|G_i^*|)] \quad (4)$$

式中: $|G_c^*|$ 为多相共混聚合材料的动态剪切模量,Pa; $|G_m^*|$ 为连续相的动态剪切模量,Pa; ϕ 为分散相的体积分数; $|G_i^*|$ 为第*i*种

分散相的动态剪切模量,Pa。

在高温或常温条件下,沥青胶浆中矿粉为坚硬颗粒增强相,沥青为软质基体相,由此可以近似为 $|G_m^*|/|G_i^*| \rightarrow 0$,应用于式(4)可以得到 $H = 0.5$,可将 Palierne 模型简化为

$$|G_c^*| = |G_m^*| \frac{1 + 1.5\phi}{1 - \phi} \quad (5)$$

根据耗散能量理论,分散相体积分数 ϕ 可以采用 $\phi_f C$ 代替^[11],其中 ϕ_f 为矿粉体积分数, C 为沥青与矿粉的交互作用指标,其计算式为

$$C = \frac{|G_c^*|/|G_m^*| - 1}{(1.5 + |G_c^*|/|G_m^*|)\phi_f} \quad (6)$$

根据交互作用理论^[11],增强相与基体相之间的交互作用能力应不受增强相体积分数的影响,但通过式(6)不难发现,交互作用指标 C 与矿粉体积分数 ϕ_f 具有相关性。为了使指标 C 不受 ϕ_f 影响,将式(6)改写为

$$\frac{|G_c^*|}{|G_m^*|} = \frac{1 + 1.5\phi_f C}{1 - \phi_f C} \quad (7)$$

由式(7)可知,以 ϕ 为变量、 C 为参数进行最小二乘法拟合,得到的 C 值为常数,从而有效减弱了指标 C 对 ϕ_f 的依赖性。

3 试验结果与分析

3.1 沥青与矿粉的交互作用评价指标分析

由式(6)和式(7)可知, C 值可视为对矿粉体积分数的修正,即沥青胶浆中矿粉的体积分数为 ϕ_f 时,由于沥青与矿粉的交互作用使矿粉表面吸附了一层强极性沥青薄膜,实际有效的矿粉体积分数变为 $C^{[7]}$ 。 C 值越大表明矿粉吸附沥青的能力越强,因此指标 C 可用来评价不同种类矿粉与沥青的交互作用能力。利用式(7)拟合得到交互作用指标 C 值如图1所示。由图1可以看出,不同体积分数下 C 值拟合曲线具有较好的相关性,4种矿粉与沥青的交互作用能力从大到小依次为CG、LS、FA、GN。

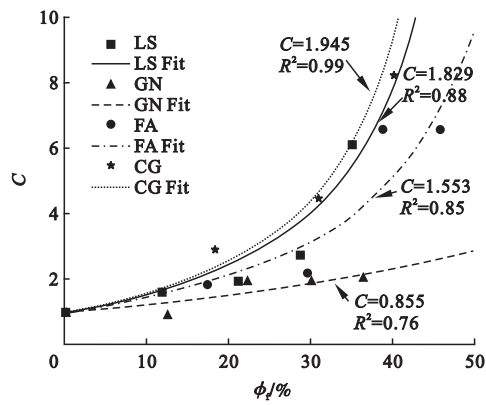


图1 不同种类矿粉的C值拟合结果

Fig. 1 The C value fitting results with different types of mineral fillers

3.2 沥青与矿粉交互作用能力的影响机理分析

3.2.1 矿粉微观及物理特性分析

通过激光粒度测试得到粒径分布曲线如图2所示,主要粒径参数见表3,其中 d_{vn} 代表体积分数 $n\%$ 以下矿粉粒径低于该值, $d[3,2]$ 为表面积平均粒径, $d[4,3]$ 为体积平均粒径。由图2和表3可知,矿粉的平均粒径越大,粒径分布曲线偏向右侧,表明矿粉粒径越粗,4种矿粉粒径由粗至细为 $d(\text{GN}) > d(\text{CG}) > d(\text{LS}) > d(\text{FA})$ 。矿粉粒径大小与交互作用指标C值并非完全呈反比关系,如FA平均粒径较小,但交互作用能力较LS和CG更弱,表明矿粉表面的微观形貌也将影响其与沥青的交互作用。

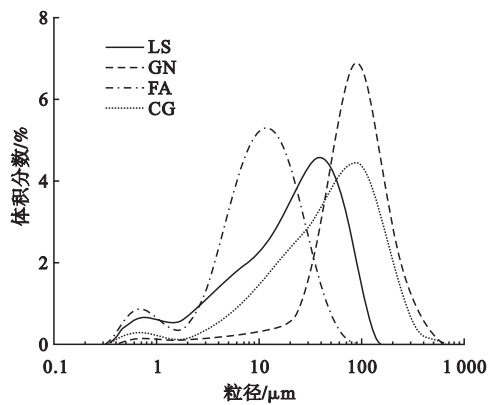


图2 矿粉粒径分布曲线

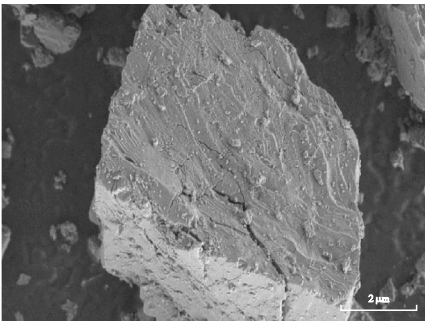
Fig. 2 The particle size distribution curve of mineral fillers

表3 矿粉的主要粒径参数

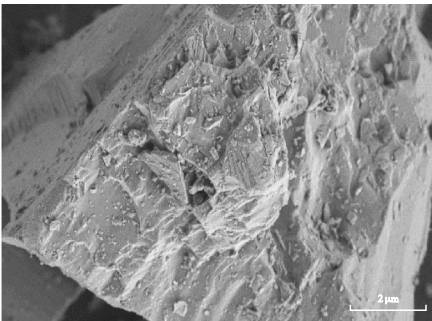
Table 3 The main particle size parameters of mineral fillers

矿粉种类	of mineral fillers				μm
	d_{v10}	d_{v50}	d_{v90}	$d_{[3,2]}$	$d_{[4,3]}$
LS	2.561	21.771	64.728	5.77	28.406
GN	28.488	80.285	189.615	25.525	98.388
FA	2.417	9.903	26.942	4.294	12.757
CG	7.577	50.103	156.001	11.859	69.457

图3为2000倍下矿粉颗粒的SEM扫描图像。由图可见,LS和GN呈块状,表面存在少量裂纹;FA和CG为球形颗粒,存在微小颗粒团簇形成具有连通孔隙的颗粒结构,沥青流动进入连通的开口孔隙中相互紧密嵌锁,增强了两者的交互作用。



(a)LS



(b)GN

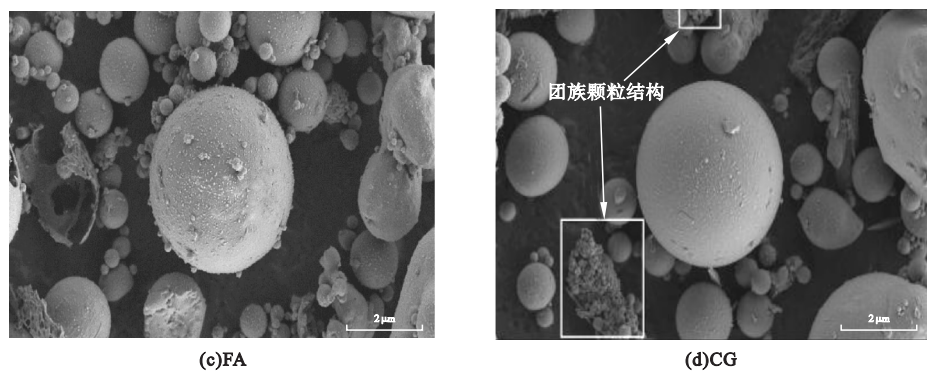


图3 矿粉的SEM图像

Fig. 3 The SEM image of mineral fillers

矿粉的BET比表面积测试结果见表4。矿粉的微孔隙比表面积中含有纳米尺度的介孔,沥青难以进入微小孔隙中从而产生交互作用,因此采用孔外比表面积进行比较分析更为合理。

表4 矿粉的比表面积

Table 4 The specific surface area of mineral fillers			
$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$			
矿粉种类	总比表面积	微孔比表面积	孔外比表面积
LS	0.911	0.118	0.793
GN	0.996	0.437	0.559
FA	2.829	1.501	1.328
CG	2.681	0.943	1.738

从表4可以看出,4种矿粉的孔外比表面积由大到小依次为CG、FA、LS、GN,这与

交互作用指标C值关系较为一致,表明矿粉的孔外比表面积与交互作用能力具有较好的相关性,可将其作为矿粉选用的考虑指标。

3.2.2 矿粉和沥青化学组成分析

采用XRD对4种矿粉进行衍射峰测试,通过衍射峰图积分计算得到化学组分的相对质量分数如表5所示。由表5可知,石灰岩中CaO质量分数最高,更易与呈酸性的沥青发生反应,从而能够提升与沥青的交互作用能力。粉煤灰主要成分为酸性 SiO_2 ,与沥青的交互作用能力相对较弱。煤矸石中 Al_2O_3 和CaO化学成分的占比较大,其中 Al_2O_3 属于两性偏碱性化合物,两种成分均有助于提升其与沥青的交互作用能力。

表5 矿粉的化学组分

Table 5 The chemical composition of mineral fillers							%
矿粉种类	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{K}_2\text{O})$
LS	2.13	0.53	0.25	9.48	51.48	0.11	0.20
GN	38.18	11.51	0.26	1.21	1.15	18.07	0.10
FA	45.01	16.52	17.10	1.20	2.80	0.50	0.60
CG	35.42	25.93	2.39	1.22	19.01	0.86	0.21

图4为不同类型沥青胶浆的红外光谱,限于篇幅,在此仅给出粉胶比为0.4和1.6的测试结果。图中纵坐标仅代表波形的变化趋势,对应的横坐标可找到峰值点,故无具体数值。由图4可知,沥青胶浆中并未出现新的特征峰,表明矿粉与沥青混合后并未产生新的产物,两者之间的化学作用主要为化学吸附,即沥

青与集料间的化学键合作用;除化学吸附作用外,在范德华力的作用下沥青与矿粉还将同时发生物理吸附作用^[12-13]。红外光谱中亚砷基($\text{S}=\text{O}$)伸缩振动产生的 $1\,000\,\text{cm}^{-1}$ 处特征峰和羟基($\text{C}=\text{O}$)伸缩振动产生的 $1\,700\,\text{cm}^{-1}$ 处特征峰与沥青的老化行为有关,沥青的老化程度越高,两种特征峰值越大^[14-15]。

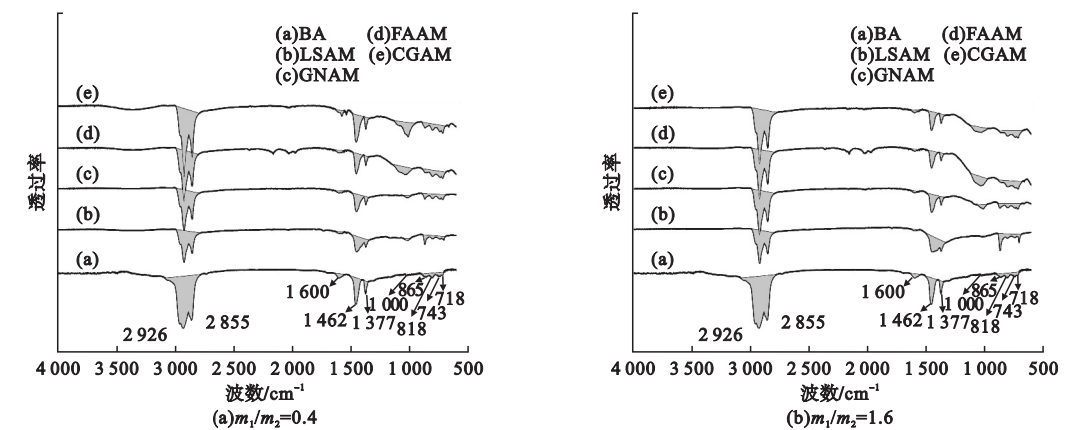


图4 沥青胶浆的红外光谱图

Fig. 4 The FTIR spectra of asphalt mastic

从图4可以看出,沥青及胶浆红外光谱中存在亚砷基的特征峰。为了消除试样厚度和辐照路径长度对光谱的影响,采用亚砷基官能团指数 $I_{S=O}$ 定量评价沥青的老化程度,定义为

$$I_{S=O} = A_{1000} / \sum A_i \tag{8}$$

式中: A_{1000} 为 1000 cm^{-1} 波形对应的峰面积, $\sum A_i$ 为各特征峰面积之和。

图5为不同类型沥青胶浆的 $I_{S=O}$ 计算结果。由图可知,沥青胶浆的 $I_{S=O}$ 均大于基质沥青,表明矿粉的掺入加速了沥青的老化,这是由于在物理化学吸附作用下,沥青中的沥青质等极性组分更易于吸附于矿粉表面,导致沥青的化学组分重新排列,暴露于空气中的芳香分等非极性轻质组分相对增多,而相同条件下芳香分等轻质组分更容易发生老化^[7]

3.2.3 沥青胶浆微观形貌分析

利用AFM对沥青及胶浆进行扫描,得到基质沥青AFM高度形貌如图6所示,粉胶比为0.4和1.6时沥青胶浆的AFM高度形貌分别见图7和图8。

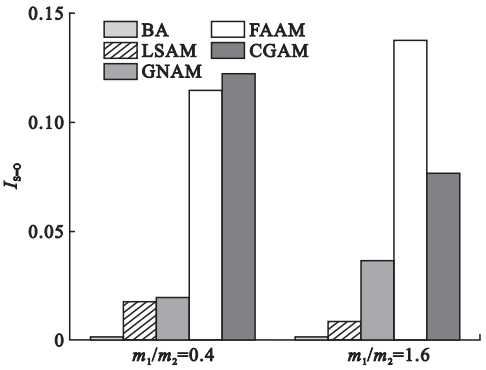


图5 不同类型沥青胶浆的 $I_{S=O}$

Fig. 5 The different types of asphalt mastic when $I_{S=O}$

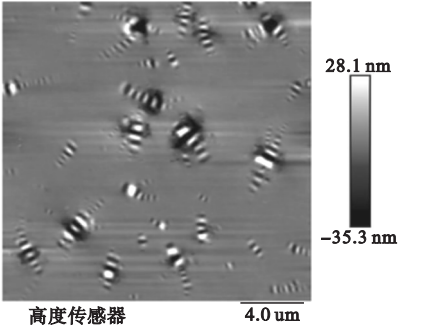


图6 基质沥青的AFM高度图

Fig. 6 The AFM height images of base asphalt

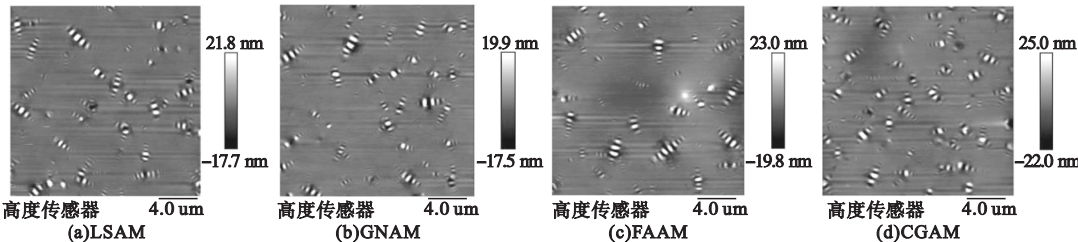


图7 不同类型沥青胶浆($m_1/m_2 = 0.4$)的AFM高度图

Fig. 7 The AFM height images of different types of asphalt mastic($m_1/m_2 = 0.4$)

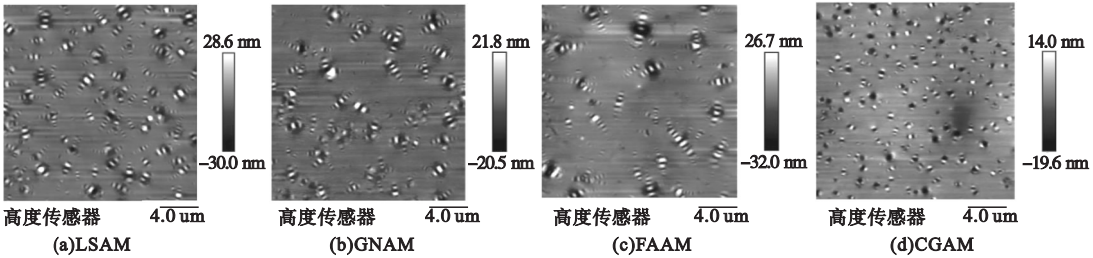


图 8 不同类型沥青胶浆($m_1/m_2 = 1.6$)的 AFM 高度图

Fig. 8 The AFM height images of different types of asphalt mastic($m_1/m_2 = 1.6$)

由图 6 ~ 图 8 可知,AFM 高度图中存在沥青典型的蜂形结构^[16],计算得到蜂形结构的数量和面积占比如表 6 所示。由表 6 可以看出,沥青胶浆的蜂形结构数量和面积占比均较基质沥青增大,这与沥青与矿粉的交互作用有关,矿粉吸附沥青中的极性组分,其原有的团聚形态逐渐分解形成若干小颗粒,从而增大了极性组分与蜡分子共晶作用形成的

晶核数量^[16~18],导致蜂形结构数量和面积占比增大。相同粉胶比下沥青胶浆的蜂形结构数量和面积占比由大至小依次为 CGAM、LSAM、GNAM、FAAM。CGAM 的“蜂状结构”数量和面积占比最大,表明煤矸石粉对沥青具有较强的物理化学吸附作用,因此煤矸石粉与沥青的交互作用能力较强。

表 6 不同类型沥青胶浆中“蜂状结构”的数量和面积占比

Table 6 The number and area proportion of “bee structures” of different types of asphalt mastic

沥青胶浆 类型	“蜂状结构”数量/个		“蜂状结构”面积占比/%	
	$m_1/m_2 = 0.4$	$m_1/m_2 = 1.6$	$m_1/m_2 = 0.4$	$m_1/m_2 = 1.6$
BA	31	5.91	31	5.91
LSAM	44	7.18	78	10.58
GNAM	38	6.90	43	9.83
FAAM	35	6.88	38	9.38
CGAM	53	8.18	133	10.52

4 结 论

(1)采用广义 sigmoidal 函数和 WLF 方程构建了沥青胶浆 $|G^*|$ 主曲线,基于 Palierne 模型提出了沥青与矿粉的交互作用能力评价指标 C ,利用参数拟合法计算得到 C 值分别为 1.945 (CG)、1.829 (LS)、1.533 (FA)、0.855 (GN),4 种矿粉与沥青交互作用能力从大到小依次为 CG、LS、FA、GN。

(2)含有较多连通开口孔隙的矿粉更易与沥青相互紧密嵌锁,从而提升了两者间的交互作用能力;矿粉的孔外比表面积与交互作用指标 C 具有较好的相关性,可将其作为

矿粉选用的考虑指标。

(3)矿粉与沥青混合后主要发生物理化学吸附作用,沥青中的沥青质等极性组分更易于吸附在矿粉表面,分解若干小颗粒后与蜡分子产生共晶作用;相同粉胶比下,CGAM 的蜂形结构数量和面积占比最大,从微观尺度证明了煤矸石粉对沥青的吸附作用较强。

参考文献

[1] MOON K H,FALCHETTO A C,PARK J Y, et al. Development of high performance asphalt mastic using fine taconite filler [J]. KSCE Journal of civil engineering, 2014, 18 (6): 1679 - 1687.

- [2] 谭忆秋,李晓琳,吴建涛,等. 温度及荷载频率对沥青-集料交互作用能力的影响[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 65-72.
(TAN Yiqiu, LI Xiaolin, WU Jiantao, et al. Influence of temperature and load frequency on asphalt aggregate interaction ability [J]. China journal of highway and transport, 2012, 25(3): 65-72.)
- [3] 林梅,李萍,念腾飞,等. 矿粉对沥青胶浆流变性能影响及微观分析[J]. 功能材料, 2020, 51(6): 6150-6157.
(LIN Mei, LI Ping, NIAN Tengfei, et al. Effect of mineral powder on rheological properties of asphalt mortar and micro analysis [J]. Journal of functional materials, 2020, 51(6): 6150-6157.)
- [4] 李晓民,豆莹莹,徐慧宁,等. 冻融循环作用下沥青胶浆交互能力及流变性能的研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 831-838.
(LI Xiaomin, DOU Yingying, XU Huining, et al. Interaction ability and rheological properties of asphalt mastic under freeze thaw cycles [J]. Journal of building materials, 2019, 22(5): 831-838.)
- [5] XING Baodong, FAN Weiyu, ZHUANG Chuanyi, et al. Effects of the morphological characteristics of mineral powder fillers on the rheological properties of asphalt mastics at high and medium temperatures [J]. Powder technology, 2019, 348: 33-42.
- [6] LIU Guoqiang, ZHAO Yongli, ZHOU Jian, et al. Applicability of evaluation indices for asphalt and filler interaction ability [J]. Construction and building materials, 2017, 148: 599-609.
- [7] 郭猛. 沥青与矿料界面作用机理及多尺度评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
(GUO Meng. Study on interaction mechanism and multiscale evaluation method of interfacial interaction between asphalt binder and mineral aggregate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.)
- [8] LIU Hanqi, LUO Rong. Development of master curve models complying with linear viscoelastic theory for complex moduli of asphalt mixtures with improved accuracy [J]. Construction and building materials, 2017, 152: 259-268.
- [9] PALIERNE J F. Linear rheology of viscoelastic emulsions with interfacial tension [J]. Rheologica acta, 1990, 29(3): 204-214.
- [10] GRAEBLING D, MULLER R. Determination of interfacial tension of polymer melts by dynamic shear measurements [J]. Colloids & surfaces, 1991, 55: 89-103.
- [11] ZIEGEL K D, ROMANOV A. Modulus reinforcement in elastomer composites. I. inorganic fillers [J]. Journal of applied polymer science, 2010, 17(4): 19-31.
- [12] MEHRARA A, KHODAII A. A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete [J]. Construction and building materials, 2013, 38(2): 423-442.
- [13] 郭猛. 沥青胶浆的界面行为与机理分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
(GUO Meng. Interfacial behavior of asphalt mastic and its mechanism [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.)
- [14] XING Chengwei, LIU Liping, CUI Yi, et al. Analysis of base bitumen chemical composition and aging behaviors via atomic force microscopy - based infrared spectroscopy [J]. Fuel, 2020, 264: 116845. 1-116845. 12.
- [15] 李晶,刘宇,张肖宁. 沥青老化微观机理分析[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(6): 1275-1281.
(LI Jing, LIU Yu, ZHANG Xiaoning. Microscopic analysis on the aging mechanism of asphalt [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2014, 33(6): 1275-1281.)
- [16] 崔亚楠,郭立典,陈东升. SBS改性沥青的复合老化机理[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1183-1191.
(CUI Ya'nan, GUO Lidian, CHEN Dongsheng. Composite aging mechanism of SBS modified asphalt [J]. Journal of building materials, 2020, 23(5): 1183-1191.)
- [17] 赵复笑,余天庆,金生吉. 沥青路面反射裂缝机理及夹层结构应力分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 296-300.
(ZHAO Fuxiao, YU Tianqing, JIN Shengji. Experimental study on deformation of multi-level retaining [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(2): 296-300.)
- [18] 杨震. 沥青老化前后多尺度行为特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
(YANG Zhen. Study on multi-scale behavioral characteristics of asphalt before and after aging [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)