

文章编号:1007-9629(2024)02-0181-08

# Aspha-Min 沸石对 SBS 改性沥青-填料 交互作用的影响

刘宁<sup>1</sup>, 刘黎萍<sup>1</sup>, 黄颂昌<sup>2</sup>, 陆清清<sup>3,4</sup>, 程志强<sup>3,4</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 交通运输部公路科学研究所道路结构与材料交通行业重点实验室(北京), 北京 100088; 3. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200082; 4. 上海绿色路面材料工程技术研究中心, 上海 200082)

**摘要:**沸石作为制备泡沫沥青温拌混合料的发泡剂, 其释放的沸石水和残留的沸石矿物对沥青-填料交互作用有着不同影响. 通过流变学试验, 研究了沸石、沸石矿物和沸石水对 SBS 改性沥青及其胶浆流变特性的影响. 试验发现, 在沥青或胶浆中添加沸石或沸石矿物可使其弹性增大, 且随其掺量的增加而增大, 沸石水则与之相反. 进一步, 利用基于流变特性的交互作用评价指标 $[\eta]$ 、Palierne-C-G<sup>\*</sup>和 Luis Ibrarra-A- $\delta$ , 研究了沸石、沸石矿物和沸石水对 SBS 改性沥青-填料交互作用的影响. 研究表明, 胶浆中添加沸石或沸石矿物可使沥青-填料交互作用增大, 且随其掺量的增加而增大, 沸石水则与之相反.

**关键词:** SBS 改性沥青; 沸石; 流变特性; 沥青-填料交互作用

中图分类号: U414.7<sup>+5</sup>

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.02.012

## Effect of Aspha-Min Zeolite on the SBS Modified Asphalt-Filler Interaction

LIU Ning<sup>1</sup>, LIU Liping<sup>1</sup>, HUANG Songchang<sup>2</sup>, LU Qingqing<sup>3,4</sup>, CHENG Zhiqiang<sup>3,4</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Road Structure & Materials Transportation(Beijing), Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 3. Shanghai Highway Bridge(Group) Co., Ltd., Shanghai 200082, China; 4. Shanghai Green Pavement Materials Engineering Technology Research Center, Shanghai 200082, China)

**Abstract:** As a foaming agent in the preparation of foamed asphalt warm-mix mixtures, zeolite water released from zeolite and its residual zeolite minerals have different influences on asphalt-filler interaction. The effects of zeolite, zeolite minerals, and zeolite water on the rheological properties of SBS modified asphalt and its mastic were studied by rheological tests. It is found that the addition of zeolite or zeolite minerals to asphalt or mastic can increase the elasticity with the increase of its dosage, while zeolite water is on the opposite. On this basis, the effects of zeolite, zeolite minerals and zeolite water on the asphalt-filler interaction were studied by using the interaction evaluation indexes  $[\eta]$ , Palierne-C-G<sup>\*</sup>, and Luis Ibrarra-A- $\delta$  via rheological properties. It has been shown that the addition of zeolite or zeolite minerals to mastic can increase the asphalt-filler interaction with the increase of its dosage, while zeolite water is on the opposite.

**Key words:** SBS modified asphalt; zeolite; rheological property; asphalt-filler interaction

收稿日期: 2022-03-13; 修订日期: 2023-07-07

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2022AAC03578); 甘肃省科技计划(科技重大专项)(21ZD8JA003)

第一作者: 刘宁(1991—), 男, 宁夏中卫人, 同济大学博士生. E-mail: liun1991@tongji.edu.cn

通讯作者: 刘黎萍(1968—), 女, 山东菏泽人, 同济大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: llp@tongji.edu.cn

沥青混合料是由沥青与填料(集料+矿粉)组成的多相复合材料<sup>[1]</sup>.作为沥青与填料的纽带,界面相是影响沥青混合料性能的关键环节,而沥青-填料交互作用对界面相的形成起着重要作用,直接关系到沥青混合料的结构强度和水稳定性<sup>[2-5]</sup>.

在全球变暖和能源短缺的发展背景下,作为一种新兴的绿色筑路技术,沸石发泡沥青温拌混合料因具有显著的经济和环境效益,在铺面工程中有着广阔的应用前景<sup>[6]</sup>.与热拌沥青混合料相比,沸石发泡沥青温拌混合料存在水稳定性差的问题,而沥青-填料交互作用是影响沥青混合料水稳定性的关键因素.根据列宾捷尔的研究:沥青-填料交互作用在填料表面形成具有不同流变特性的结构沥青和自由沥青,结构沥青的黏度较自由沥青大<sup>[7]</sup>.沥青-填料交互作用越强,结构沥青占比越大,界面流变能力越差<sup>[8]</sup>.因此,基于流变特性的交互作用参数可反映沥青-填料交互作用能力.现有沥青-填料交互作用评价模型包括:基于黏度的黏度系数和特性黏数( $[\eta]$ ),基于复数模量的复数模量系数、爱因斯坦系数和 Palieme-C-G<sup>\*</sup>系数,以及基于相位角的 Luis Ibrarra-A- $\delta$ 系数和 Ziegel-B- $\delta$ 系数<sup>[9]</sup>.目前,对交互作用评价指标使用条件的研究已取得了一定的成果<sup>[10-14]</sup>,而对沥青-填料交互作用的研究多集中在温度,加载频率,填料的类型、粒径、体积分

数,以及沥青的类型、老化的影响方面<sup>[15-21]</sup>,尚未对沸石发泡沥青-填料交互作用进行研究.

为研究 Aspha-min 沸石对 SBS 改性沥青-填料交互作用的影响,本文通过流变学试验研究了沸石、沸石矿物和沸石水对 SBS 改性沥青及其胶浆流变特性的影响.进一步,利用基于流变特性的交互作用评价指标,研究了沸石、沸石矿物和沸石水对 SBS 改性沥青-填料交互作用的影响.本研究可揭示沸石发泡剂对沥青材料性能的作用机理,对其在沥青混合料中的应用具有指导意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

沥青选用平湖市恒达改性沥青有限公司生产的 I-D 型 SBS 改性沥青,其主要技术指标见表 1.沸石为德国 Eurovia 公司生产的 Aspha-min 沸石,其主要成分为硅铝酸钠,是一种具有特殊多孔结构且不溶于水的白色粉末,密度为 2.0 g/cm<sup>3</sup>,平均粒径在 380  $\mu$ m 左右,含约 21%<sup>1)</sup>的结合水,在 85~182  $^{\circ}$ C 时可释放自身结合水.沸石矿物由沸石烘干脱水得到,经试验测定 Aspha-min 沸石 300  $^{\circ}$ C 的失水率约为 17%.填料为石灰岩矿粉,密度为 2.758 g/cm<sup>3</sup>,试验前先过 0.075 mm 筛,再在 105  $^{\circ}$ C 下烘 4 h.

表 1 SBS 改性沥青主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of SBS modified asphalt

Index	Test value	Specification	Method
Penetration (25 $^{\circ}$ C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	55	40-60	JTG E20-2011 T 0604
Ductility (5 $^{\circ}$ C)/cm	28	$\geq 20$	JTG E20-2011 T 0605
Softening point/ $^{\circ}$ C	72	$\geq 60$	JTG E20-2011 T 0606
Density (25 $^{\circ}$ C)/(g $\cdot$ cm <sup>-3</sup> )	1.03		JTG E20-2011 T 0603

### 1.2 试样制备

试验选用 SBS 改性沥青和 Aspha-min 沸石,考虑沸石矿物和沸石共 2 种沸石含水状态,设计 1%、3%、5%、7% 和 9% 共 5 个沸石掺量(以沥青质量计),沸石矿物掺量=沸石掺量 $\times$ (1-沸石失水率),制备沸石矿物改性沥青(沥青+沸石矿物)和沸石发泡改性沥青(沥青+沸石).先用发泡容器称取沥青,然后移至电热套内加热控温.待控温至试验温度 170  $^{\circ}$ C 后,按设计掺量称取相应质量的沸石/沸石矿物添加到沥青中,随即开启搅拌器以 200 r/min 搅拌 10 min.

进一步,选用石灰岩矿粉作填料,为避免颗粒结构化,在填料临界体积分数 40% 范围内<sup>[22]</sup>,设定粉胶

比为 1(对应填料体积分数为 37%),制备沸石矿物改性沥青胶浆(沥青+填料+沸石矿物)和沸石发泡改性沥青胶浆(沥青+填料+沸石).先用发泡容器称取沥青,然后移至电热套内加热控温.待控温至试验温度 170  $^{\circ}$ C 后,按设定粉胶比称取相应质量的填料分 3 次(5 min/次)加入到沥青中.接着,按设计掺量称取相应质量的沸石/沸石矿物添加到沥青中,期间采用搅拌器以 200 r/min 搅拌 25 min.

试样制备及测试分析流程图如图 1 所示.图中 RV 表示旋转黏度试验,DSR 表示动态剪切流变试验.

### 1.3 测试方法

采用布氏黏度计测定试样在 170  $^{\circ}$ C 下的黏度

1)文中涉及的含量和粉胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

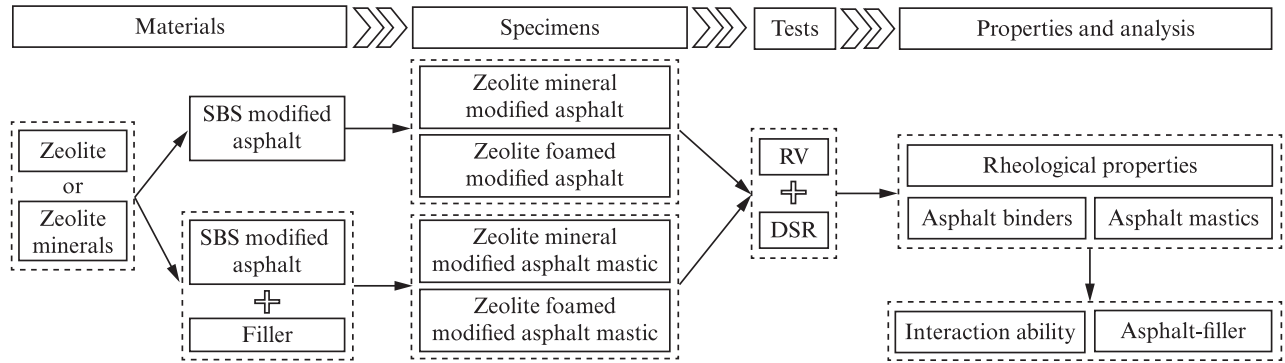


图1 试样制备及测试分析流程图

Fig. 1 Flow chart of sample preparation and testing analysis

( $\eta$ ). 测试选用27#转子, 设定转速为50.0 r/min.

在TA牌AR 1500EX型动态剪切流变仪(DSR)上对试样进行温度扫描试验, 测定其在58、64、70、76、82 °C的复数模量( $G^*$ )和相位角( $\delta$ ). 试验选用平行板直径为25 mm, 两板间隙为1 mm. 试验采用应变控制, 在12%的应变水平下, 以(10.0±0.1)r/s的频率施加正弦振荡荷载.

#### 1.4 沥青-填料交互作用评价指标

根据前述介绍, 本文选用交互作用评价指标 $[\eta]$ 、Palierne- $C-G^*$ 和Luis Ibrarra- $A-\delta$ 对沥青-填料交互作用进行评价.

$[\eta]$ 用于描述固体颗粒与液体交互作用的强弱, 其数值大小与固体颗粒的浓度无关. 对于填料体积分数不大的沥青胶浆, 填料颗粒充分分散且以单粒形式被包裹于沥青中, 界面无滑动, 类似于悬浮体系. 当用 $[\eta]$ 来评价沥青-填料交互作用时, 可采用Einstein模型进行计算, 见式(1)、(2).  $[\eta]$ 值越大, 则沥青-填料交互作用越强<sup>[23]</sup>.

$$[\eta] = (\eta_c / \eta_m - 1) / \phi_f \quad (1)$$

$$\phi_f = \frac{m_f / \rho_f}{m_f / \rho_f + m_z / \rho_z + m_m / \rho_m} \quad (2)$$

式中: $\eta_c$ 为胶浆黏度, Pa·s;  $\eta_m$ 为沥青黏度, Pa·s;  $\phi_f$ 为填料体积分数, %;  $m_f$ 、 $m_z$ 和 $m_m$ 分别为填料、沸石/沸石矿物和沥青的质量, g;  $\rho_f$ 、 $\rho_z$ 和 $\rho_m$ 分别为填料、沸石/沸石矿物和沥青的密度, g/cm<sup>3</sup>.

沥青与填料的交互作用评价指标Palierne- $C-G^*$ 由Palierne理论模型推导得出, 可通过测定沥青及其胶浆的复数模量进行计算. Palierne- $C-G^*$ 的物理意义为对填料体积分数的一种修正. 例如, 对填料体积分数为 $\phi_f$ 的沥青胶浆, 由于沥青-填料交互作用, 填料表面吸附了一层强极性沥青膜, 使得填料实际有效体积分数变为 $\phi_f C$ . 采用参数 $C$ 描述沥青-填料交互作用的强弱,  $C$ 值越大, 则沥青-填料交互作用越

强<sup>[24]</sup>.  $C$ 的计算式如下:

$$C = \frac{G_c^* / G_m^* - 1}{[1.5 + G_c^* / G_m^*] \phi_f} \quad (3)$$

式中: $G_c^*$ 为胶浆复数模量, Pa;  $G_m^*$ 为沥青复数模量, Pa.

Luis Ibrarra- $A-\delta$ 模型起初用于评价复合材料的界面能量损耗. 对于颗粒填充复合材料, 除了基体相和填充相外, 界面相的分子运动同样也对复合材料的力学损耗有贡献. 因此, 可通过评估界面的力学损耗来定量地评价复合材料中基体相和填充相的交互作用能力.

对于由沥青和填料组成的复合材料, 沥青-填料交互作用会形成界面相. 依据三相模型, 沥青胶浆的损耗因子可采用下式计算:

$$\tan \delta_c = \phi_f \tan \delta_f + \phi_i \tan \delta_i + \phi_m \tan \delta_m \quad (4)$$

式中: $\delta_c$ 为胶浆相位角, (°);  $\delta_f$ 为填料相位角, (°);  $\delta_i$ 为界面相位角, (°);  $\delta_m$ 为沥青相位角, (°);  $\phi_f$ 为界面体积分, %;  $\phi_m$ 为沥青体积分, %.

由于填料为刚性颗粒, 可假定 $\tan \delta_f = 0$ , 并且界面区域的体积分很小, 因此式(4)可简写为:

$$\tan \delta_c / \tan \delta_m = (1 - \phi_f)(1 + A) \quad (5)$$

参数 $A$ 表示沥青-填料交互作用的强弱,  $A$ 值越小, 则沥青-填料交互作用越强<sup>[25]</sup>. 为方便求解, 式(5)可改写为:

$$A = \left\{ \tan \delta_c / [(1 - \phi_f) \tan \delta_m] \right\} - 1 \quad (6)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 流变特性

通过旋转黏度试验和温度扫描试验, 测定了沸石矿物改性沥青及其胶浆和沸石发泡改性沥青及其胶浆的流变特性( $\eta$ 、 $G^*$ 和 $\delta$ ), 分析了沸石、沸石矿物和沸石水对SBS改性沥青及其胶浆流变特性的影响.

2.1.1 沸石掺量的影响

沸石发泡改性沥青及其胶浆的流变特性与沸石掺量的关系如图2所示。

由图2可以看出,在SBS改性沥青及其胶浆中添加沸石,其黏度和复数模量均增大,且随沸石掺量的增加而增大,而相位角呈相反规律.根据沸石的物质组成,沸石对沥青或胶浆性能的影响主要来自沸石矿物和沸石水.当沸石被添加到沥青或胶浆中,其自身的沸石矿物会起到体积填充和物理吸附的作用,吸附沥青中的轻质组分使沥青发生组分分离,增加沥青中胶质与沥青质的结合度,使得沥青或胶浆由黏弹性向弹性转变.相反,沸石水蒸发使沥青发泡而降黏,但由于水存在于沥青中在热力学上是不稳定的,随着发泡时间的延长,沸石水不断逸出,严重削弱其对沥青的降黏作用.综合看来,沸石发泡改性沥青及其胶浆的黏度和复数模量随着沸石掺量的增加而增大,说明沸石矿物对沥青或胶浆弹性的增强作用大于沸石水的削弱作用,故沸石矿物是影响沸石发泡改性沥青及其胶浆流变特性的主导因素。

由图2还可以看出,沸石发泡改性沥青及其胶浆的复数模量和相位角均随着试验温度的升高而减小.复数模量的减小主要是因为,随温度升高,沥青中的

黏性成分增加,弹性减小.相位角的减小是因为SBS是一种热塑性弹性体,在试验温度下为固体,起着物理交联和增强效果,会使SBS改性沥青在高温下的黏滞阻力增大,所以沸石发泡改性沥青及其胶浆的相位角随试验温度升高而减小。

2.1.2 沸石矿物掺量的影响

沸石矿物改性沥青及其胶浆的流变特性与沸石矿物掺量的关系如图3所示。

由图3可以看出:在SBS改性沥青及其胶浆中添加沸石矿物,其黏度和复数模量均增大,且随着沸石矿物掺量的增加逐渐增大,而相位角呈相反规律.主要原因是:沸石矿物的体积填充和物理吸附作用增加了沥青或胶浆的弹性;沸石矿物改性沥青及其胶浆的复数模量和相位角均随着试验温度的升高而减小.这与沸石发泡改性沥青及其胶浆的试验结果一致。

2.1.3 沸石水的影响

将图2、3中沸石矿物改性沥青及其胶浆和沸石发泡改性沥青及其胶浆的流变特性进行比较,可以看出,在同一掺量下,添加沸石矿物的SBS改性沥青及其胶浆的黏度和复数模量均在不同程度上大于添加沸石的,而相位角呈相反规律.与沸石矿物不同,沸石受热后会释放自身的沸石水,沸石水蒸发使沥青发泡,增加

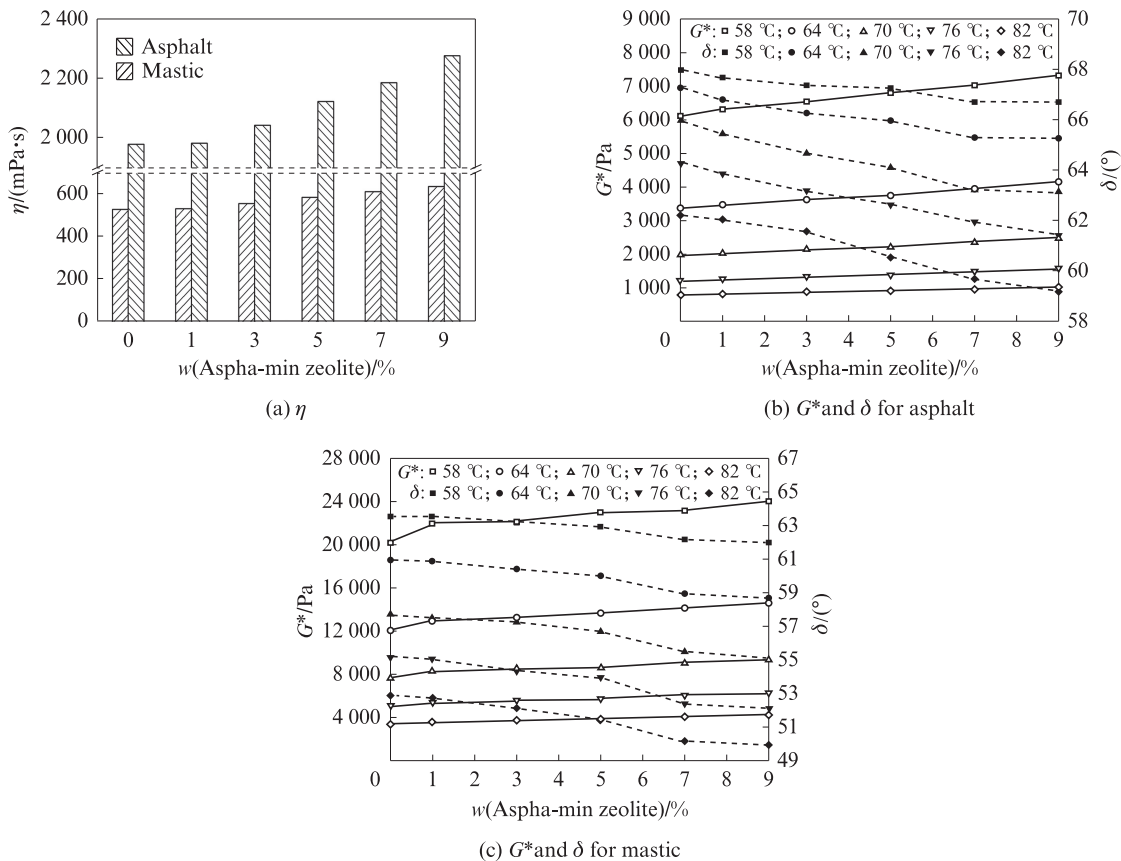


图2 沸石发泡改性沥青材料流变特性与沸石掺量的关系

Fig. 2 Relationship between rheological properties of zeolite foamed modified asphalt materials and zeolite dosage

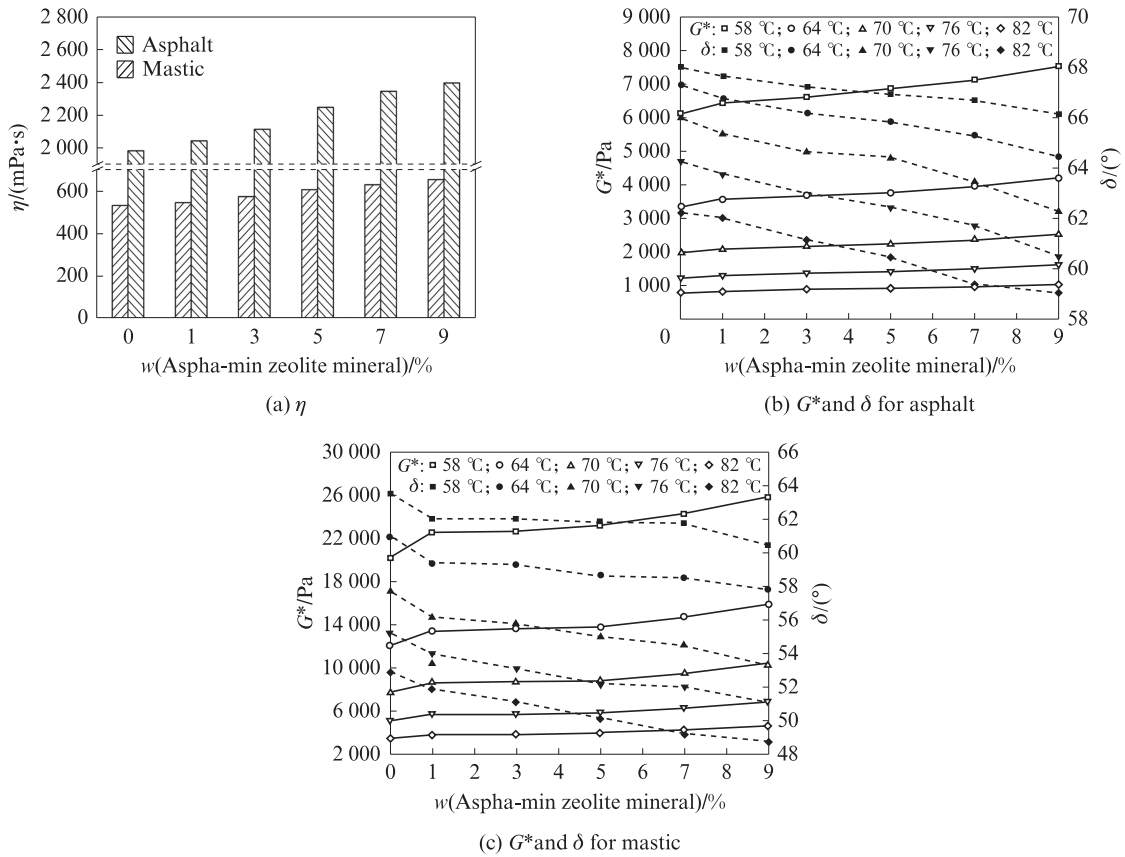


图3 沸石矿物改性沥青材料流变特性与沸石矿物掺量的关系

Fig. 3 Relationship between rheological properties of zeolite mineral modified asphalt materials and zeolite mineral dosage

了沥青中的黏性成分,同时可降低沥青与填料间的摩擦力,使得沥青或胶浆由弹性向黏弹性转变.说明沸石水对沥青或胶浆的弹性具有削弱作用,可知沸石水是影响沥青及其胶浆流变特性的重要因素.

2.2 沥青-填料交互作用

基于沸石矿物改性沥青及其胶浆和沸石发泡改性沥青及其胶浆的流变试验结果,利用交互作用参数 $[\eta]$ 、Palierne-C- $G^*$ 和 Luis Ibrarra-A- $\delta$ 评价沸石矿物改性沥青-填料和沸石发泡改性沥青-填料的交互作用,分析沸石、沸石矿物和沸石水对SBS改性沥青-填料交互作用的影响.

2.2.1 沸石掺量的影响

沸石发泡改性沥青-填料交互作用参数与沸石掺量的关系如图4所示.

由图4可以看出,沸石发泡改性沥青-填料交互作用参数 $[\eta]$ 和Palierne-C- $G^*$ 均随着沸石掺量的增加而增大,而 Luis Ibrarra-A- $\delta$ 呈相反规律.这说明沸石发泡改性沥青-填料交互作用随沸石掺量增加而增强.究其原因,沸石中的沸石矿物在沥青中可起到体积填充和物理吸附作用.具有多孔结构的沸石矿物易吸附沥青中的低分子量油分(如:饱和分与芳香分),使得沥青发生一定程度的组分分离,促进了沥青中胶

质和沥青质的结合度.相关研究发现,沥青中四组分对沥青-填料交互作用分别具有不同的贡献:其中饱和分与芳香分属非极性分子化合物,其与填料的作用仅为范德华力;而存在于沥青质和胶质中的表面活性成分对沥青-填料交互作用具有积极作用<sup>[16]</sup>.

由图4还可看出,随着试验温度的升高,沸石发泡改性沥青-填料交互作用参数Palierne-C- $G^*$ 增大,而 Luis Ibrarra-A- $\delta$ 减小.说明温度越高,沸石发泡改性沥青-填料交互作用越强.这主要是因为温度升高加剧了沥青中分子的热运动,促进了结构沥青的形成,有助于沥青-填料交互作用的增强.这与Liu等<sup>[26]</sup>的研究结论一致.

2.2.2 沸石矿物掺量的影响

沸石矿物改性沥青-填料交互作用参数与沸石矿物掺量的关系如图5所示.

由图5可以看出,沸石矿物改性沥青-填料交互作用参数 $[\eta]$ 和Palierne-C- $G^*$ 均随着沸石矿物掺量的增加而增大,Luis Ibrarra-A- $\delta$ 则呈相反规律.这说明沸石矿物改性沥青-填料交互作用随着沸石矿物掺量的增加而增强.这与沸石发泡改性沥青-填料交互作用随沸石掺量的变化规律一致.同样归因于沸石矿物对沥青的体积填充和物理吸附作用,其对沥青-

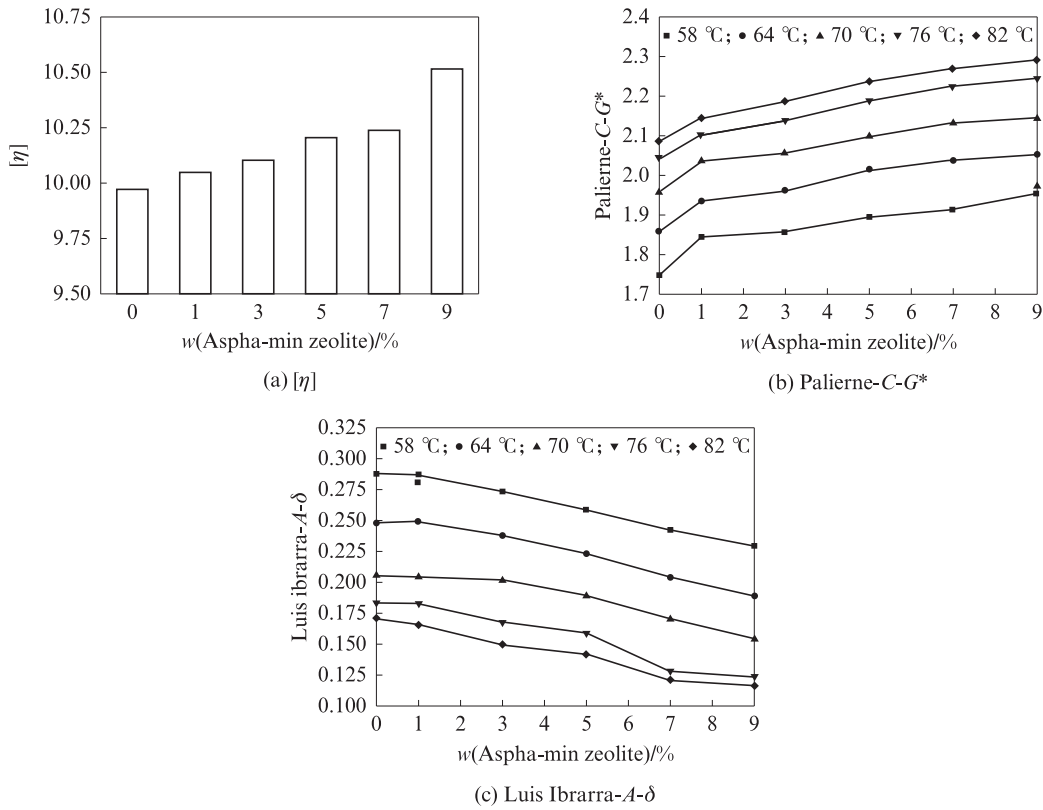


图 4 沸石发泡改性沥青-填料交互作用参数与沸石掺量的关系

Fig. 4 Relationship between zeolite foamed modified asphalt-filler interaction parameters and zeolite dosage

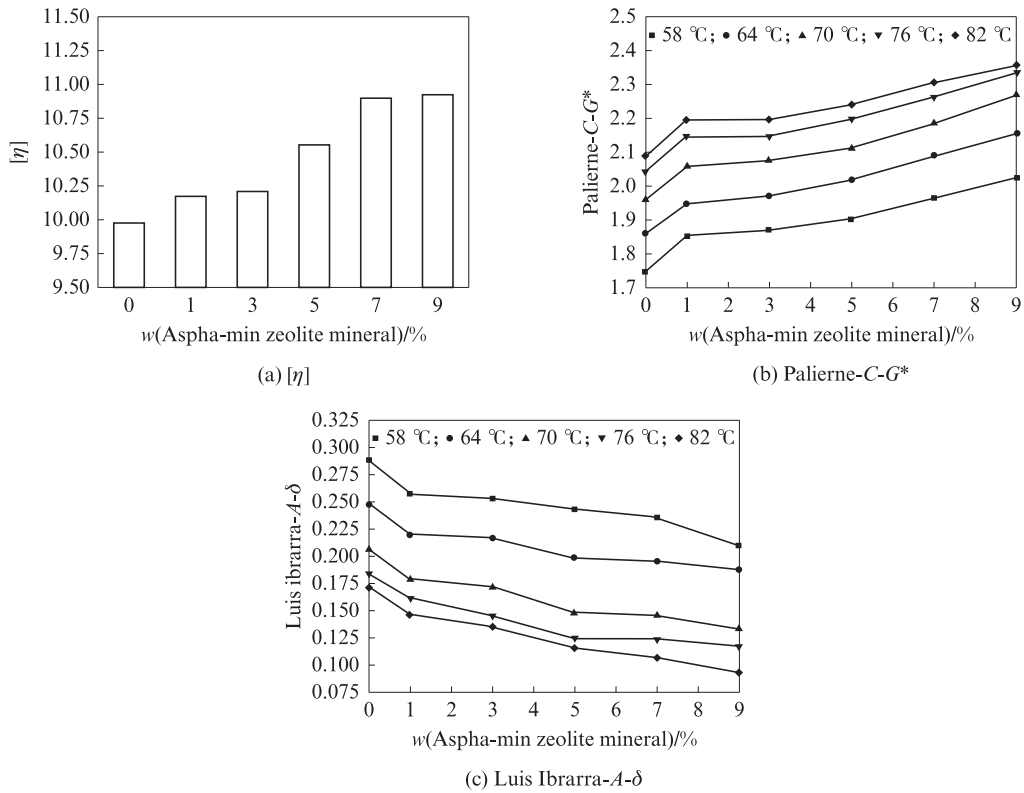


图 5 沸石矿物改性沥青-填料交互作用参数与沸石矿物掺量的关系

Fig. 5 Relationship between zeolite mineral modified asphalt-filler interaction parameters and zeolite mineral dosage

填料交互作用具有增强效果.

由图 5 还可看出,随着试验温度的升高,沸石矿

物改性沥青-填料交互作用参数 Palierne-C-G\* 增大,

而 Luis Ibrarra-A- $\delta$  减小.说明温度越高,沸石矿物改

性沥青-填料交互作用越强.这与沸石发泡改性沥青-填料交互作用随温度的变化规律一致.

### 2.2.3 沸石水的影响

将图4、5中沸石矿物改性沥青-填料与沸石发泡改性沥青-填料的交互作用参数进行对比,可以看出,在同一掺量下,沸石矿物改性沥青-填料交互作用参数 $[\eta]$ 和Palieme-C-G<sup>\*</sup>均在不同程度上大于沸石发泡改性沥青-填料,而Luis Ibrarra-A- $\delta$ 呈现相反规律.这表明沸石矿物改性沥青-填料交互作用大于沸石发泡改性沥青-填料交互作用,说明沸石水对沥青-填料交互作用具有削弱效果.不同于沸石矿物改性沥青,沸石发泡改性沥青中残留的沸石水倾向于吸附在极性更强的填料表面,这可能是导致沸石发泡沥青温拌混合料水稳定性变差的原因之一.

## 3 结论

(1)在SBS改性沥青及其胶浆中添加沸石或沸石矿物均会使其弹性增大,且随着两者掺量的增加其弹性增大.但在同一掺量下,添加沸石矿物的沥青或胶浆的弹性大于添加沸石的,说明沸石发泡沥青及其胶浆中的沸石水使其弹性降低.

(2)在SBS改性沥青胶浆中添加沸石或沸石矿物均会使沥青-填料交互作用增大,且随着两者掺量的增加而增大.但在同一掺量下,添加沸石矿物的沥青-填料交互作用大于添加沸石的,说明沸石水对沸石发泡沥青-填料交互作用有削弱效果.

(3)添加沸石或沸石矿物的SBS改性沥青胶浆中沥青-填料交互作用均随着试验温度的升高而增大,说明温度的升高对沸石发泡沥青-填料交互作用有促进效果.

### 参考文献:

- [1] 任敏达,冯汉卿,丛林,等.沥青混合料饱水过程的强度演化规律及机理分析[J].建筑材料学报,2022,25(5):537-544.  
REN Minda, FENG Hanqing, CONG Lin, et al. Strength evolution law and mechanism analysis of asphalt mixtures during water saturation[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5): 537-544. (in Chinese)
- [2] ALVAREZ A E, OVALLES E, CARO S. Assessment of the effect of mineral filler on asphalt-aggregate interfaces based on thermodynamic properties [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1):599-606.
- [3] 周璐,黄卫东,吕泉,等.不同改性剂对沥青黏结及抗水损害性能的影响[J].建筑材料学报,2021,24(2):377-384.  
ZHOU Lu, HUANG Weidong, LÜ Quan, et al. Effects of various modifiers on the bond property and moisture damage
- resistance of asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):377-384. (in Chinese)
- [4] 付军,熊定邦,李忠杰,等.沥青混合料界面区微米划痕试验与参数分析[J].建筑材料学报,2023,26(1):78-84.  
FU Jun, XIONG Dingbang, LI Zhongjie, et al. Micro-scratch test and parameter analysis of asphalt mixture interfacial transition zone[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):78-84. (in Chinese)
- [5] 豆莹莹,魏定邦,李晓民,等.沥青-集料界面黏附性衰减机理研究[J].建筑材料学报,2019,22(5):771-779.  
DOU Yingying, WEI Dingbang, LI Xiaomin, et al. Adhesion attenuation mechanism of asphalt-aggregate interface[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5):771-779. (in Chinese)
- [6] SUKHIIJA M, SABOO N. A comprehensive review of warm mix asphalt mixtures-Laboratory to field[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274:121781.
- [7] HESAMI E, BIRGISSON B, KRINGOS N. Numerical and experimental evaluation of the influence of the filler-bitumen interface in mastics[J]. Materials and Structures, 2013, 47(8): 1325-1337.
- [8] 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]. Materials and Structures, 2019, 22(5): 831-838. (in Chinese)
- [9] WU W J, JIANG W, YUAN D D, et al. A review of asphalt-filler interaction: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors [J]. Construction and Building Materials, 2021, 299:124279.
- [10] TAN Y Q, LI X L, WU J T. Evaluation indices of interaction ability of asphalt and aggregate based on rheological characteristics [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2012, 27(5):979-985.
- [11] TAN Y Q, GUO M. Interfacial thickness and interaction between asphalt and mineral fillers[J]. Materials and Structures, 2014, 47(4):605-614.
- [12] ZHANG J P, LIU G Q, ZHU C Z, et al. Evaluation indices of asphalt-filler interaction ability and the filler critical volume fraction based on the complex modulus[J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 18(6):1338-1352.
- [13] LIU G Q, JIA Y S, PAN Y Y, et al. Quantitative comparison of evaluation indices for asphalt-filler interaction ability within filler critical volume fraction[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 21(4):906-926.
- [14] HOU J P, MA X Y, CHEN H X, et al. A comparison of indices used to evaluate asphalt-filler interactions[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359:129501.
- [15] TAN Y Q, LI X L, ZHOU X Y. Interactions of granite and asphalt based on the rheological characteristics [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(8):820-825.
- [16] LIU G Q, YANG T, LI J, et al. Effects of aging on rheological properties of asphalt materials and asphalt-filler interaction ability

- [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 168:501-511.
- [17] CHEN M, JAVILLA B, HONG W, et al. Rheological and interaction analysis of asphalt binder, mastic and mortar[J]. *Materials(Basel)*, 2019, 12(1).
- [18] BI Y Q, WEI R Y, LI R, et al. Evaluation of rheological master curves of asphalt mastics and asphalt-filler interaction indices[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265:120046.
- [19] XU W Y, QIU X, XIAO S L, et al. Characteristics and mechanisms of asphalt-filler interactions from a multi-scale perspective[J]. *Materials(Basel)*, 2020, 13(12):2744.
- [20] LI F, ZHANG X, MENG S Y, et al. Experimental research of various evaluation indices on predicting the influences of internal and external factors on asphalt-filler interaction ability[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2023, 51(2):720-734.
- [21] LI F, ZHAO X, ZHANG X. Utilizing original and activated coal gangue wastes as alternative mineral fillers in asphalt binder: Perspectives of rheological properties and asphalt-filler interaction ability [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 365: 130069.
- [22] XU W Y, QIU X, XIAO S L, et al. Molecular dynamic investigations on the adhesion behaviors of asphalt mastic-aggregate interface [J]. *Materials(Basel)*, 2020, 13(22): 5061.
- [23] 刘国强. 基于流变特性的沥青/填料交互作用评价与机理研究[D]. 西安:长安大学, 2016.
- LIU Guoqiang. Mechanism research and evaluation of asphalt/filler interaction based on rheological properties[D]. Xi'an:Chang'an University, 2016.(in Chinese)
- [24] 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, 2015.
- GUO Meng. Study on mechanism and multiscale evaluation method of interfacial interaction between asphalt binder and mineral aggregate[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2015.(in Chinese)
- [25] 吴建涛. 基于流变特性的沥青与集料交互作用能力的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- WU Jiantao. Studies on interaction capability of asphalt and aggregate based on rheological characteristics[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2009.(in Chinese)
- [26] LIU G Q, ZHAO Y L, ZHOU J, et al. Applicability of evaluation indices for asphalt and filler interaction ability[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148:599-609.