

# 消石灰与矿粉沥青胶浆流变性能比较

柳 浩<sup>1</sup>, 李晓民<sup>1</sup>, 张肖宁<sup>2</sup>, 谭忆秋<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 华南理工大学 交通学院, 广州 510640)

**摘 要:** 利用动态剪切流变仪、弯曲梁流变仪以及直接拉伸试验仪对掺加消石灰和矿粉后沥青胶浆的动态黏弹性能实验进行比较, 粉胶比为 1.2 时, 消石灰胶浆的车辙因子是矿粉胶浆的 1.6 倍, 抵抗永久变形能力提高; 粉胶比为 0.6 时, 消石灰胶浆的断裂能是矿粉胶浆的 2.2 倍, 提高了沥青抗低温开裂性能; 粉胶比为 0.9 时, 消石灰胶浆的疲劳破坏次数是矿粉胶浆的 1.4 倍, 沥青的疲劳性能提高; 由于消石灰物理吸附及化学反应的协同作用使消石灰胶浆比矿粉胶浆具有更好的高温稳定性、低温柔性和抗疲劳开裂性。

**关键词:** 沥青胶浆; 消石灰; 高温稳定性; 低温柔性; 疲劳开裂

**中图分类号:** TU 528.59

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2009)11-1506-06

沥青混合料的剥离是沥青路面几种常见的破坏现象之一, 消石灰作为一种热拌沥青混合料的矿物填料, 因其可有效增加沥青与集料的粘附性和抗剥落能力, 提高沥青路面的水稳定性和耐久性而被国外广泛使用. 近年来, 针对消石灰提高沥青与集料的粘附性已经进行了大量的研究<sup>[1-3]</sup>, 但是, 对消石灰提高沥青混合料的抗车辙能力、低温性能、抗疲劳能力的相关研究重视程度不够. 目前, 矿粉是沥青混合料中最常用的一种矿物填料, 与矿粉相比, 消石灰具有相当的活性, 而且比表面积大, 在热拌沥青混合料的作用与矿粉有所不同. 已有研究表明<sup>[4-6]</sup>: 消石灰具有物理和化学反应的双重作用, 可以显著改变沥青胶浆的流变性质及其力学行为. 因此, 作者进行了不同消石灰掺量的沥青胶浆的高温性能、低温性能、疲劳性能试验, 与掺加矿粉的沥青胶浆进行了比较, 研究了消石灰和矿粉的掺量对沥青胶浆流变性能的影响, 并分析了消石灰对沥青胶浆性能的物理化学协同作用.

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

所用的原材料主要有 70 号道路石油沥青、石灰石矿粉、消石灰, 其主要性能指标如表 1、2 所示.

### 1.2 试件制备与测试方法

采用美国 TA 公司生产的高级流变仪 AR-2000(advanced rheometer-2000)测试沥青胶浆的动态黏弹力学性能. 试样的制备方法是将约 1 g 搅拌均匀的沥青胶浆放在直径为 25 mm 的平板夹具的下平板上, 调节上平板至 1 000  $\mu\text{m}$ , 用热刀将平板周围压出的试样刮去后, 恒温 15 min. 沥青胶浆的疲劳性能试验采用动态时间扫描试验, 试验温度为 20  $^{\circ}\text{C}$ , 应变大小为 2%, 角速度为 10 rad/s.

沥青胶浆的低温性能试验采用美国 CANON 公司生产的弯曲梁流变仪 BBR (bending-beam-rheometer), 通过蠕变劲度 ( $S$ ) 和蠕变速率 ( $m$ ) 来评价沥青结合料的低温抗裂性能, 试验温度设置为 -12

收稿日期: 2008-03-27.

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目资助(2006BAJ18B05); 国家自然科学基金资助项目(5008005); 教育部 2006 年度新世纪优秀人才支持计划资助项目(2006348).

作者简介: 柳 浩(1969-), 女, 山东高密人, 博士研究生.

℃. DT (direct tension) 试验通过低温时的破坏应变和试件拉断时的荷载来反映沥青的低温性能, 温度设置为  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

表 1 70 号道路石油沥青性能指标  
Table 1 Main performance indices of 70<sup>#</sup> asphalt binder

评价指标	中国标准 技术要求	试验结果	试验方法 (JT J052-2000)	
25 °C 的针入度/0.1 mm	60~80	63	T0604	
针入度指数(PI)	-1.5~+1.0	-0.8	T0604	
软化点( $T_{R\&B}$ )/°C	≥46	51.2	T0606	
15 °C 的延度/cm	≥100	>100	T0605	
25 °C 的相对密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	实测记录	1.012	T0603	
蜡的质量含量/%	≤2.2	1.89	T0615	
表观黏度 60 °C/(Pa·s)	实测	254	T0625	
表观黏度 135 °C/(Pa·s)	实测	0.391	T0625	
薄膜烘箱试验 (温度 163 °C, 时间 5 h)	质量损失/% 针入度比/% 15 °C 的延度/cm	≤0.8 ≥61 ≥15	0.05 84.2 18	T0610 T0604 T0605

表 2 矿物填料的物理性能  
Table 2 Main properties of filler

填料种类	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$SA/(\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1})$	$D_{0.1}/\mu\text{m}$	$D_{0.5}/\mu\text{m}$	$D_{0.9}/\mu\text{m}$
矿粉	2.758	0.675	4.895	28.191	75.930
消石灰	2.418 8	2.188	1.132	5.735	71.223

注:  $D_{0.1}$ 指通过率为 10% 的最大粒径

### 1.3 试验方案

将基质沥青加热至  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 矿粉和消石灰加热至  $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 按照表 3 所示的质量百分数加入到基质沥青中, 并利用搅拌机进行快速搅拌, 速度为  $500\text{ r}/\text{min}$ , 搅拌 3 min 后立即成型所需要的试样进行检测, 矿粉胶浆放置时间长会产生沉淀现象, 每次成型试模前必须进行重新搅拌.

表 3 掺加矿粉和消石灰的沥青胶浆试验方案  
Table 3 Experimental project of asphalt mastic with limestone and hydrated lime

矿物填料品种	矿粉					消石灰			
$w/\%$	0	23.1	37.5	47.4	54.5	23.1	37.5	47.4	54.5
F/B	0	0.3	0.6	0.9	1.2	0.3	0.6	0.9	1.2
试验编号	A1	LS2	LS3	LS4	LS5	HL2	HL3	HL4	HL5

注: F/B 指粉胶质量比, 简称粉胶比.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 沥青胶浆的高温性能分析

动态剪切流变试验(DSR)是美国 SHRP 计划中提出的评价沥青结合料高温抗车辙性能试验方法. DSR 采用量测沥青结合料的复数剪切模量( $G^*$ )和相位角( $\delta$ )来表征黏性和弹性性状. Superpave 沥青结合料性能规范中, 以最高路面设计温度下沥青结合料流变仪试验指标  $G^*/\sin\delta$  作为沥青结合料的高温评

价指标<sup>[7-9]</sup>.  $G^*/\sin\delta$  越大, 即高温时的流动变形越小, 抗车辙能力越强, 用该值作为反映沥青材料的永久变形性能的指标. 作者采用粉胶比为 1.2 的不同填料的沥青胶浆以及不同消石灰掺量的沥青胶浆进行试验, 试验结果如图 1 所示.

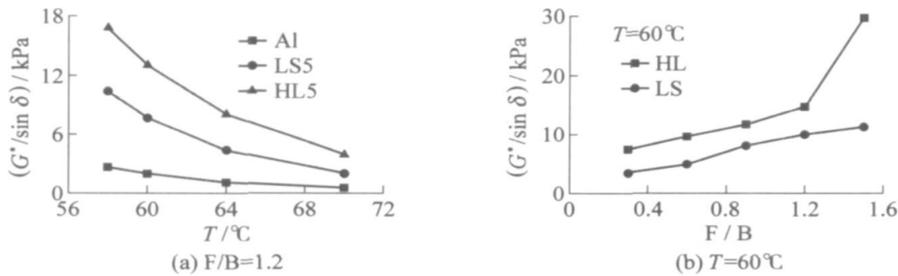


图 1 不同温度下及不同粉胶比的消石灰和矿粉胶浆的车辙因子曲线图

Fig. 1 Curves of  $G^*/\sin\delta$  mastics with hydrated lime and limestones in varied temperature and F/B

从图 1 中可以看出:

1) 在相同粉胶比情况下, 消石灰和矿粉胶浆的抗车辙因子  $G^*/\sin\delta$  随着温度的升高逐渐减小, 而且温度越高, 不同矿料的抗车辙因子  $G^*/\sin\delta$  差距逐渐减小, 这是因为温度升高后,  $\delta$  变小, 沥青的黏性越加明显, 沥青黏性的增加削弱了掺加矿粉对弹性成分的影响, 从而呈现出增长幅度的降低.

2) 在相同温度下, 消石灰沥青胶浆的抗车辙因子  $G^*/\sin\delta$  明显大于矿粉, 以沥青混合料常采用的粉胶比为 1.2 为例, 60°C 的消石灰胶浆的  $G^*/\sin\delta$  为 13 kPa, 是矿粉胶浆的 1.6 倍, 是基质沥青的 5 倍, 从表 2 中可以看出消石灰的比表面积  $2.188 \text{ m}^2/\text{g}$ , 与矿粉相比具有较大的比表面积, 颗粒的粒径小, 通过率为 50% 的最大粒径为  $5.375 \mu\text{m}$ , 因此与沥青产生较强的物理吸附作用; 另外,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  是强碱性物质,  $\text{pH} > 12$ , 具有较高的化学吸附能和相对低的分子量, 沥青中的羧酸及对二苯酚等相关的化学键与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应生成不可溶解的钙盐, 因此沥青中加入消石灰后由于其物理和化学的协同作用, 提高了基质沥青的抗车辙因子, 从而提高沥青胶浆的抗永久变形能力.

3) 不同矿物填料的车辙因子随着粉胶比的增大而逐渐增大, 当粉胶比小于 1.2 时, 消石灰与矿粉的车辙因子增长趋向一致, 当粉胶比大于 1.2 时, 消石灰的车辙因子增幅超过矿粉胶浆, 这对于提高沥青的高温性能是十分有利的.

## 2.2 沥青胶浆的低温性能研究

弯曲梁流变仪 (BBR) 用于测量沥青梁在蠕变荷载作用下的劲度, 蠕变荷载用于模拟温度下降时路面中逐步积聚的应力, 用计算机数据采集系统自动采集荷载、变形并计算 60 s 时的  $S$ 、 $m$ .  $S$  反映沥青抵抗荷载的能力,  $m$  不仅反映曲线的形状, 也代表了沥青的松弛性能. 因粉胶比大于 1.2 时, 沥青胶浆的试件难于成型, 弯曲小梁的气泡过多, 数据离散性大, 故作者采用粉胶比为 0.3、0.6、0.9、1.2 的矿粉胶浆和消石灰胶浆进行低温性能试验, 试验结果如图 2 所示.

从图 2 中可以看出, 随着粉胶比的增加, 消石灰胶浆和矿粉胶浆的  $S$  逐渐增大,  $m$  逐渐减小, 这意味

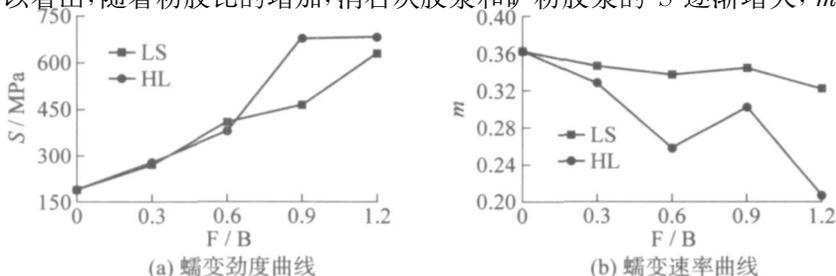


图 2 不同粉胶比的消石灰胶浆和矿粉胶浆的  $S$  及  $m$  值曲线图

Fig. 2 Value of  $S$  and  $m$  of mastics mixed with hydrated lime and limestone with varied F/B

加入矿物填料后, 沥青胶浆的弹性成分增大, 黏性成分变小, 低温柔性和变形能力变差, 同时使得沥青胶浆的应力累加速度增加, 当粉胶比大于 0.6 后, 消石灰的  $S$  明显大于矿粉的  $S$ , 而消石灰和矿粉胶浆的  $m$  均出现增加现象, 随后均下降, 这是因为矿物填料存在着一个最大的填充体积<sup>[10-11]</sup>, 对于消石灰这类的活性填料填充到沥青中, 最大填充系数仅为 20% (粉胶比为 0.6 左右), 当超过这临界填充系数时, 胶浆的流变性能将会发生变化。

通过以上分析可以看出, 消石灰胶浆的低温变形能力明显不如矿粉所形成的胶浆, 但不排除有的沥青结合料刚度并不低, 可在破裂前进一步延伸, 弯曲蠕变试验并不能完全反映一类沥青结合料的延伸性能, 因此 SHRP 计划采用 DT 试验对 BBR 试验进行补充, 作者采用不同粉胶比的矿粉和消石灰进行直接拉伸试验, 试验结果如图 3 所示。

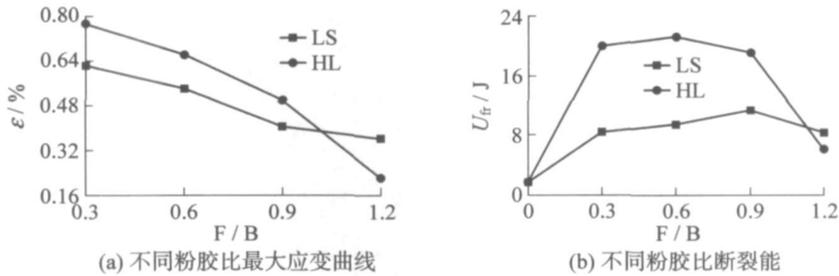


图 3 消石灰和矿粉胶浆不同粉胶比的低温性能曲线图

Fig. 3 Low temperature performance of mastics hydrated lime and limestone with varied F/B

从图 3 中可以看出: 加入矿物填料后的沥青胶浆随着粉胶比的增加, 最大拉应变逐渐减小; 粉胶比小于 1.0 时, 加入消石灰的沥青胶浆的最大拉应变大于加入矿粉沥青胶浆的最大拉应变; 同时, 加入矿物填料后的断裂能 ( $U_{fr}$ ) 增加, 且加入消石灰的沥青胶浆的  $U_{fr}$  大于矿粉胶浆的  $U_{fr}$ , 这是因为消石灰加入沥青后, 沥青胶浆成为一个粒子填充复合体, 沥青和消石灰之间存在着良好的黏结力, 当给定沥青胶浆一恒定直接拉伸应力时, 沥青通过与矿物填料粒子的黏结有效地传递荷载<sup>[12]</sup>, 增加了沥青胶浆的  $U_{fr}$ ; 消石灰与矿粉相比, 具有较高的表面活性, 与沥青中的有机酸发生反应, 生成能起到表面活性作用的有机盐, 界面之间的粘接力更大, 使其具有较高的  $U_{fr}$ . 消石灰胶浆的粉胶比为 0.6 后逐渐下降, 而矿粉胶浆的粉胶比为 0.9 后逐渐下降, 因此对于消石灰存在一个适当的掺配比例, 即消石灰的粉胶比为 0.6, 可以提高沥青的抵抗低温断裂性能。

### 2.3 沥青胶浆的疲劳性能研究

沥青路面的疲劳破坏是重复交通荷载作用导致的最常见最复杂的破坏形式之一, 混合料疲劳研究已经清楚表明荷载模式 (应力控制或应变控制) 是一个描述疲劳特性的重要因素, 在胶浆试验中, 荷载模式有同样重要的影响. 目前广泛使用的破坏定义之一是衰减至初始复合模量的 50% 的次数<sup>[13]</sup>, 而沥青混合料疲劳破坏最常用的定义模式是刚度降低到初始刚度的 50% 以下. 这种胶浆疲劳定义方式使二者一致起来. 研究表明, 应变控制下, 采用了与混合料疲劳试验水平一致的应变水平的胶浆试验得到的结果与同样应变水平和温度控制下的混合料试验结果存在比较好的相关性, 因此, 作者对不同掺量的消石灰和矿粉胶浆按照上述破坏定义进行其疲劳性能试验, 试验结果如图 4、5 所示。

如图 4 所示, 在粉胶比同为 0.9 时, 不同矿物填料的沥青胶浆衰减至初始复合模量的 50% 所用的次数是不同的, 消石灰胶浆为 21.0 万次, 矿粉胶浆为 15.3 万次, 基质沥青为 15.0 万次, 因此, 加入消石灰可以增加疲劳破坏的次数, 提高沥青的抗疲劳性能. 基质沥青在进行时间扫描时产生复合模量先增加而后逐渐减小, 这是因为聚合物在同一方向外力的反复作用下会出现分子取向的现象, 在不考虑疲劳破坏的情况下, 取向表现在模量上就是模量增加, 即硬化现象. 沥青胶浆中由于矿物粒子的不均匀分散, 不会产生此现象。

从图 5 中的动态时间扫描曲线可以看出, 加入不同比例的消石灰对沥青的疲劳性能影响是不相同的,

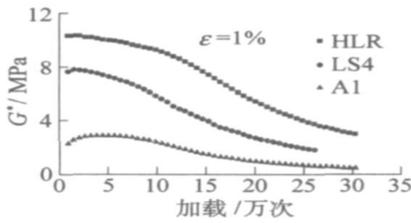


图4 不同矿物填料的动态时间扫描曲线

Fig.4 Curves of dynamic time sweep with different filler

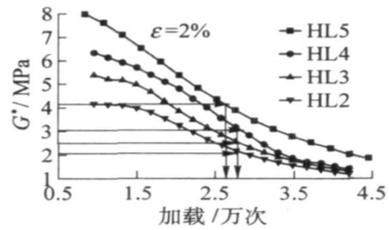


图5 不同掺量消石灰胶浆的动态时间扫描曲线

Fig.5 Curves of dynamic time sweep mastics with different amount of hydrated lime

当粉胶比为 1.2 时, 动态时间扫描后的疲劳破坏次数为 2.59 万次, 在粉胶比小于 0.9 时, 动态时间扫描后的疲劳破坏次数均为 2.79 万次, 这是因为矿物填料粒子达到填充临界饱和状态时, 粒子之间形成最紧密的堆积状态, 沥青膜厚度达到最大化, 当多余的粒子加入时, 粒子表面的沥青膜变薄, 降低了胶浆抵抗重复加载破坏的能力. 因此, 粉胶比大于 1.2 时, 会降低消石灰胶浆的疲劳性能, 当粉胶比小于 0.9 时, 沥青胶浆的疲劳破坏源于基质沥青本身, 不受消石灰掺量的影响.

### 3 消石灰沥青胶浆最佳粉胶比建议

低温开裂和高温推移是沥青路面主要的破坏形式, 它们是一对矛盾体. 在满足沥青路面低温性能时, 其高温稳定性通常较差, 为此, 要保证沥青路面的低温性能, 通常以损失其高温性能为代价. 因此, 综合考虑沥青路面的高、低温性能对提高路面的使用性能具有重要的理论意义和实用价值, 此外, 还应兼顾沥青路面疲劳的性能. 因此, 虽然消石灰沥青胶浆性能优于矿粉沥青胶浆的性能, 也存在一个最佳粉胶比的问题, 可以参照最佳沥青用量方法确定最佳粉胶比, 如图 6 所示.

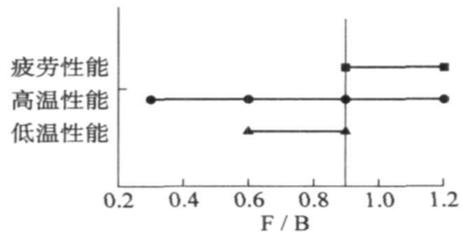


图6 最佳粉胶比确定

Fig.6 Determination of the optimized ratio of filler bitumen

从图 6 上可以看出粉胶比在 0.9~1.2 时消石灰的疲劳性能提高最大; 在 0.3~1.2 时整体区间消石灰胶浆的高温性能均优于矿粉胶浆的高温性能; 在 0.6~0.9 时消石灰胶浆的低温性能较好. 因此, 建议消石灰沥青胶浆的最佳粉胶比为 0.9.

### 4 结论

1) 加入消石灰后可以显著提高基质沥青的车辙因子, 提高沥青胶浆抵抗永久变形能力, 且在相同粉胶比消石灰的抗车辙能力大于矿粉.

2) 与矿粉相比, 加入消石灰后增大沥青的蠕变劲度, 降低沥青的蠕变速率, 但可以提高沥青的断裂能, 选择合适的比例可以提高沥青胶浆的低温开裂性能.

3) 加入消石灰后可以显著增加沥青的疲劳破坏次数, 提高沥青胶浆的疲劳性能, 在粉胶比小于 0.9 时, 疲劳破坏源于基质沥青本身, 而不受消石灰掺量的影响.

4) 掺消石灰沥青胶浆的高温、低温和疲劳性能好于掺矿粉沥青胶浆, 是由于消石灰与沥青胶浆的物理吸附和化学反应协同作用的结果, 而矿粉与沥青胶浆仅存在物理吸附作用.

### 参考文献:

[1] PRITHVI S. Kandhal. moisture susceptibility of HMA mixes; identification of problem and recommended solutions [R].

- Alabama USA: National Center for Asphalt Technology, Auburn University, 1992: 1-35.
- [2] KAVUSSI A, HICK R G. Properties of bituminous mixtures containing different fillers[J]. AAPT, 1997, 66: 281-311
- [3] 郑晓光, 吕伟民. 消石灰与液体抗剥落剂对沥青混合料作用的研究[J]. 公路, 2004, 11: 94-96.  
ZHENG Xiao-guang, LÜ Wei-min. Research on effects of hydrated lime and liquid anti-strip additives on asphalt mixtures [J]. Road, 2004, 11: 94-96. (in Chinese)
- [4] DIDIER L, DALLAS N L. Effect of hydrated lime on the rheology, fracture, and aging of bitumen[C]//Proceedings of the 77th TRB Annual Meeting. Washington, D.C: Transportation Research Board, 1998: 1-23.
- [5] ROMAN L, MARKUS S, RONALD B, et al. Is low temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy—arguments from multiscale analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5): 485-491.
- [6] DALLAS N L, PETERSEN J C. Unique effects of hydrated lime filler on the performance related properties of asphalt cements; Physical and chemical interactions revisited[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(2): 207-218.
- [7] 张志清, 傅海滨, 李东辰. 防止沥青路面车辙产生的结构设计参数分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(5): 475-479.  
ZHANG Zhi-qing, FU Hai-bin, LI Dong-chen. The analysis of control parameter of structure design for preventing the rut of bituminous pavement [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(5): 475-479. (in Chinese)
- [8] 张志清, 傅海滨, 金江. 重载作用下沥青路面结构动力特性分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(7): 693-696.  
ZHANG Zhi-qing, FU Hai-bin, JIN Jiang. Dynamic response of asphalt pavement under heavy load [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(7): 693-696. (in Chinese)
- [9] 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, 2001. 60-72.
- [10] PETERSEN J C, PLANCHER H, HARNSBERGER P M. Lime treatment of asphalt to reduce age hardening and improve flow properties[J]. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, 1987, 56: 632-653.
- [11] 张志清, 胡光艳, 张兴友, 等. 白炭黑改性沥青混合料低温抗裂性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(11): 1007-1010.  
ZHANG Zhi-qing, HU Guang-yan, ZHANG Xing-you, et al. The study of low temperature property of silica modified asphalt mixture[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(11): 1007-1010. (in Chinese)
- [12] CHEN Jian-shiuh, PENG Chun-hsiang. Analyses of tensile failure properties of asphalt mineral filler mastics [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1998, 10(4): 256-263.
- [13] 袁燕, 张肖宁, 陈育书. 改性沥青胶浆的疲劳评价研究现状[J]. 中外公路, 2005, 25(4): 163-166.  
YUAN Yan, ZHANG Xiao-ning, CHEN Yu-shu. Review of the research on the method to evaluation fatigue performance of modified asphalt mortar[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25(4): 163-166. (in Chinese)

## Compared Rheology of Asphalt Mastics Performance With Hydrated Lime and Limestone Filler

LIU Hao<sup>1</sup>, LI Xiao-min<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ning<sup>2</sup>, TAN Yi-qiu<sup>1</sup>

(1. School of Traffic Science and Engineering, Harbin Inst. of Tech., Harbin, Heilongjiang 150090, China;

2. College of Traffic and Communications, South China Uni. of Tech., Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** In this paper, the dynamic viscoelastic mechanics comparison between hydrated lime and limestone filler asphalt mastics is made by dynamic shear rheometer(DSR), bending beam rheometer(BBR) and direct tension(DT). The hydrated lime mastics rutting parameter is 1.6 times of limestone mastics when the ratio of filler bitumen(F/B) is 1.2, and the high temperature rheological is enhanced. The break energy of hydrated lime mastics is 2.2 times of limestone mastics when the F/B is 0.6, which improves low temperature cracking resistance. The cycles to failure of hydrated lime mastics is 1.4 times of limestone mastics. It is proposed that the synergistic effects of physical adsorption and chemical interactions enhance the high temperature rheology, low temperature flexibility, and fatigue failure of the hydrated lime asphalt mastics much more than that of limestone mastics.

**Key words:** mastics; hydrated lime; high temperature rheology; low temperature flexibility; fatigue failure

(责任编辑 郑筱梅)