

DOI: 10.11918/202008041

无机微粉填料对沥青胶浆疲劳性能影响规律分析

贾晓东^{1,2}, 梁乃兴¹, 彭义雯³

(1.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2.重庆工商职业学院 城市建设工程学院, 重庆 400085;
3.重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074)

摘要: 为了探究无机微粉填料在沥青胶浆中的疲劳性能影响规律,以3类9种常用无机微粉颗粒作为添加矿料,从无机微粉填料颗粒形貌特征、填料类型和颗粒粒径出发,通过扫描电镜(SEM)对微粉颗粒的形貌特征进行表征,再通过动态剪切流变仪(DSR)时间扫描试验分析不同种类微粉填料对沥青胶浆的疲劳性能的影响规律,然后采用 N_{I50} 和 N_{DER} 两种指标对沥青胶浆疲劳寿命进行比对分析。结果表明:扫描电镜下消石灰微粉颗粒表现出较多的表面孔隙和复杂表面纹理,动态剪切流变试验下随着无机微粉颗粒粒径的减小,沥青胶浆的疲劳性能有较大改善;同一颗粒粒径下,由于形貌特征和化学组成的差异使消石灰和水泥表现出优于石灰岩的疲劳性能; N_{DER} 与 N_{I50} 相比,疲劳寿命意义清晰、数值易确定,且所获得疲劳寿命加载次数均较小,用于沥青路面结构设计和材料选择安全性高,推荐采用 N_{DER} 对胶浆疲劳寿命进行分析。

关键词: 无机微粉; 颗粒粒径; 沥青胶浆; 疲劳性能; SEM

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)03-0148-07

Analysis on fatigue performance of asphalt mortar with inorganic micro-powder filler

JIA Xiaodong^{1,2}, LIANG Naixing¹, PENG Yiwen³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Urban Construction Engineering, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 400085, China;

3. School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to explore the influence of inorganic micro-powder fillers on the fatigue performance of asphalt mortar, nine kinds of commonly used inorganic micro-powder particles in three types were used as additive mineral materials, and the morphology characteristics, filler types, and particle sizes of the micro-powder particles were investigated. The morphology characteristics of the micro-powder particles were characterized by SEM, the influence of different kinds of micro-powder fillers on the fatigue properties of asphalt mortar was studied by dynamic shear rheometer (DSR), and the fatigue life of asphalt mortar was compared and analyzed by indexes N_{I50} and N_{DER} . Results show that under SEM, the hydrated lime particles had more surface pores and complex surface texture, and the fatigue performance of the asphalt mortar was greatly improved with the decrease in the particle size of the inorganic micro-powder filler under dynamic shear rheological test. With the same particle size, due to the special morphology characteristics and chemical compositions, the fatigue performances of hydrated lime and cement were better than that of limestone. Compared with N_{I50} , the fatigue life meaning of N_{DER} was clearer, the numerical value was easier to determine, and the obtained fatigue life loading times were smaller. The use of N_{DER} in asphalt pavement structure design and material selection is safer, so it is recommended to adopt N_{DER} for the analysis of the fatigue life of mortar.

Keywords: inorganic micro-powder; particle size; asphalt mortar; fatigue performance; SEM

沥青路面开裂是最常见的破坏形式,与沥青混合料力学性能的优劣有着直接关系,沥青路面的疲劳破坏极其复杂,疲劳失效不仅仅与与路面所用的

材料和结构设计有关,还取决于路面上的行车荷载和路面所处的自然环境,同时,在路面施工和养护过程中的一些人为因素也会加剧产生疲劳破坏^[1-3]。而沥青混合料内部产生疲劳损伤的部位也不仅仅发生在通常人们认为的骨料颗粒和沥青黏结界面处,矿料与沥青组成的沥青胶浆也常产生疲劳破坏^[4]。

近年来多位学者发现沥青胶浆疲劳强度主要与材料本身以及材料之间的影响特性相关^[5-7],例如无机微粉填料本身的物理特性、尺寸和形状等表面

收稿日期: 2020-08-10

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2020jcyj-msxmX0320);

重庆市教委科学技术重点项目(KJZD-K201904001);

重庆工商职业学院科研项目(NDZD2020-01)

作者简介: 贾晓东(1988—),男,讲师,博士研究生;

梁乃兴(1953—),男,教授,博士生导师

通信作者: 梁乃兴, Liangnx@cquc.edu.cn

特征会影响沥青胶浆的各项指标。文献[8-9]通过动态剪切流变化(DSR)研究了无机微粉填料种类和掺量对沥青胶浆的疲劳性能影响,发现随着掺量的增加,抗疲劳性能显著增加;文献[10-11]通过室内试验研究发现,沥青胶浆的黏度对高温情况下沥青混合料的永久变形能力、低温下的抗开裂性能和中温下的抗疲劳寿命有明显的影响;文献[6]采用动态剪切流变仪(DSR)进行了振动试验和轮距疲劳试验,发现无机微粉填料颗粒在基质沥青中的分布也影响着沥青胶浆以及混合料的整体疲劳寿命,这种现象主要表现在疲劳损伤过程中产生的微裂缝会被细小的填料障碍物阻挡,这些填料会阻断裂缝的发展;此外,文献[12]研究了在相同体积掺量下,无机微粉填料粒径越小胶浆的疲劳性能越好,即胶浆的弹性性能越好,这主要是由于微粉填料颗粒越小吸附沥青越多所引起的。石灰岩矿粉是中国在制备沥青混合料中最常用的无机微粉填料,为了提高沥青混合料的水稳定性,增加沥青与集料之间的黏附性,部分地区的沥青路面结构设计中也会将无机微粉颗粒水泥和消石灰作为填料使用^[13-17]。

综上所述,众多学者虽然对沥青胶浆的疲劳性能进行了多个因素的研究,但这些研究者针对的是沥青胶浆力学性能的研究,而对沥青胶浆性能影响的内部因素研究较少,特别是无机微粉填料种类、填料粒径和填料形貌特性等填料自身特性对沥青胶浆的影响研究较少,因此,本文选取石灰岩矿粉、水泥和消石灰3种无机微粉填料,每种填料取3档粒径,制备共计9种胶浆进行性能试验,并采用扫描电镜

(SEM)对微粉填料本身形貌特征进行分析,最后利用DSR流变仪对沥青胶浆进行时间扫描试验,分析沥青胶浆的疲劳性能。

1 试验

1.1 试验材料

本文选取的沥青为70#基质沥青,表1给出了基质沥青的基本物理性质。

表1 70#基质沥青性能检测结果

Tab.1 Properties of 70# base asphalt

对比项目	针入度(25℃)/	延度(15℃)/	软化点/	密度(15℃)/
	0.1 mm	cm	℃	(g·cm ⁻³)
技术要求	60~80	≥100	≤45	
试验结果	68	>150	47.4	1.019

选取消石灰、石灰岩矿粉、水泥3种无机微粉颗粒作为研究对象。其中石灰岩微粉颗粒在沥青混合料中应用最为广泛,且具有良好的物理特性,同时可增加沥青与石料之间的黏附性;水泥和消石灰具有良好的几何尺寸和物理特性,对沥青混合料的水稳定性具有良好的改善效果,其化学性质稳定、耐久性好,而且价格低廉、效果显著,在路面施工中可以大量使用,但两者在沥青胶浆和混合料的其他性能却少有研究。因此,本文选取这3种无机微粉颗粒的不同粒径对沥青胶浆性能影响进行研究,使用负压筛分将每种填料分为3类粒径:200~300目(M1),400~500目(M2),800~1000目(M3)。9种微粉颗粒样品外观见图1。

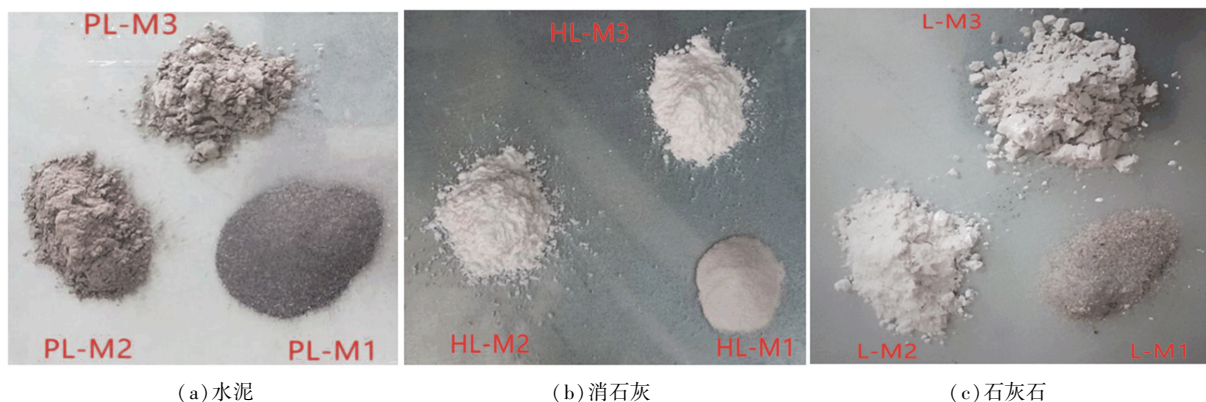


图1 3类无机微粉颗粒9种粒径的外观

Fig.1 Appearance of three types of inorganic micro-powder particles with nine particle sizes

通过9种微粉颗粒与70#基质沥青组合制备9种沥青胶浆,确定微粉颗粒占胶浆的体积为27%,使用高速剪切机以3000 r/min的速度搅拌40 min,使微粉颗粒在沥青中分布均匀,然后改为500 r/min的转速低速搅拌10 min,消除高速剪切过程中产生的气泡,其中沥青胶浆参数见表2。

1.2 试验方法

1.2.1 扫描电镜(SEM)

利用扫描电镜(JSM-7900)对3类无机微粉颗粒的外貌形态进行表征,以评价微粉颗粒形态与胶浆疲劳性能和流变性能之间的内在关系,另外由于微粉颗粒均为无机物,非导电性材料,在进行电镜扫

描之前,先对填料表面进行镀金^[18]。

表 2 试验沥青胶浆配比
Tab.2 Mix ratio of asphalt mortar

胶浆代号	无机微粉类型	粉胶比	矿料与胶浆体积比	填料粒径/目
27PC-M1	水泥	1.12	0.27	200~300
27PC-M2	水泥	1.12	0.27	400~500
27PC-M3	水泥	1.12	0.27	800~1 000
27L-M1	石灰岩	1.01	0.27	200~300
27L-M2	石灰岩	1.01	0.27	400~500
27L-M3	石灰岩	1.01	0.27	800~1 000
27HL-M1	消石灰	0.89	0.27	200~300
27HL-M2	消石灰	0.89	0.27	400~500
27HL-M3	消石灰	0.89	0.27	800~1 000

1.2.2 时间扫描试验 (TS)

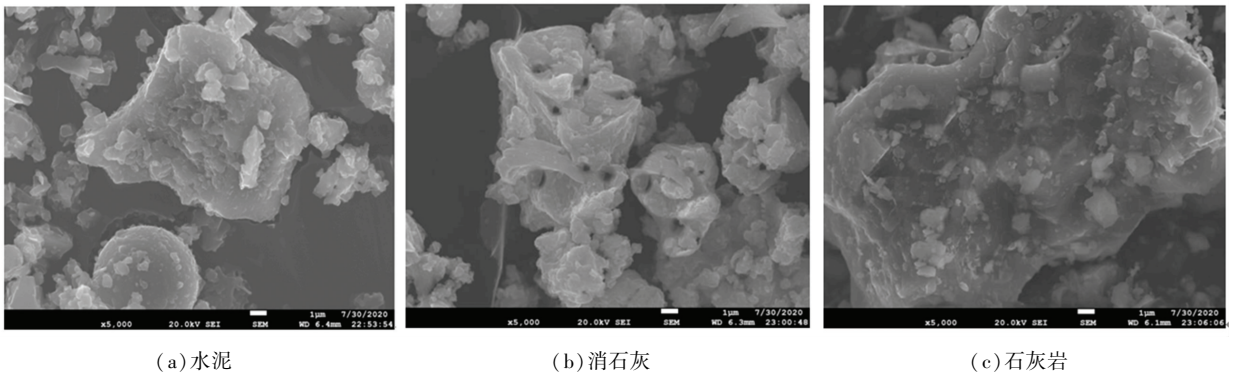
本文采用动态剪切流变仪(美国 TA 动态剪切

流变仪)进行时间扫描,对胶浆的疲劳行为进行研究,分别选用 0.1、0.15、0.2 MPa 3 个应力水平,试验频率为 10 Hz,试验温度为 25 °C,试验模具选用平行板几何形状(直径为 8 mm,间隙为 2 mm),选用 10 Hz 的加载频率是因为该频率是沥青疲劳试验研究中最常用的加载频率^[9,19],试验在 25 °C 温度下进行,确保所研究的样品均不出现边缘流动故障和材料刚度相关问题^[20-21]。

2 试验结果与分析

2.1 无机微粉颗粒表面特征

无机微粉具有较小的颗粒粒径较大的比表面积,在沥青胶浆中,微粉颗粒的表面直接与沥青中的烃类大分子接触,产生吸附作用,因此无机微粉的表面特性在一定程度上会对胶浆性能产生影响。图 2 分别是水泥、消石灰和石灰岩矿粉颗粒在扫描电镜下颗粒形貌特征。



(a) 水泥

(b) 消石灰

(c) 石灰岩

图 2 3 类无机微粉颗粒 SEM 图

Fig.2 SEM images of three types of inorganic micro-powder particles

可以看出:水泥颗粒表面凹凸不平,且颗粒形状多样,如图 2(a)所示,有针状体、球体、块状体等多种形态,且部分呈低团聚状态;消石灰表面纹理明显,且呈不规则体,表面有多个空隙;石灰岩矿粉颗粒较为规则,多呈多边形状态,大部分颗粒表面光滑圆润,表面无明显棱角特征,且颗粒表面无孔隙。

水泥是多种不同结构物质组成的混合物,因此水泥颗粒会有不同形态呈现;消石灰是生石灰与水反应生成的产物,固体颗粒为一种疏松的白色粉末,因此表面会有多种孔隙和褶皱结构;石灰岩矿粉是通过石灰岩研磨所得,因此所具有的形态与常用的石料表面形态类似。

不同的颗粒形貌也导致了胶浆性能的差异,当与沥青发生物理吸附时,相较于石灰岩颗粒,水泥颗粒得益于其表面的多棱角特征,能在高速剪切机作用下,与沥青中的大分子产生更好的缠绕、吸附效果,形成的“水泥-沥青”界面更加牢固,而且在受到外界荷

载作用时,水泥颗粒表面的棱角也能带来更大的摩阻力,使得沥青材料更不容易出现变形。而消石灰不仅具有比水泥更加粗糙的表面特征,其表面还有多个孔隙,其吸附沥青效果更为显著,形成的“石灰-沥青”界面更加牢固。因此,在后期的性能测试中,本文预测消石灰的多项力学性能应优于其他两类微粉颗粒。

2.2 疲劳性能演化规律

通常有复数模量 N_{I50} 、耗散能变化率 N_{DR} 和累积耗散能比 N_{DER} 3 个指标来评价沥青胶浆的疲劳寿命。 N_{I50} 是目前最为简明和广泛使用的沥青疲劳评价指标^[22-24],文献^[25]提出的累积耗散能比 N_{DER} 则常用于表征沥青材料独特的固有疲劳规律。因此,本文选用 N_{I50} 和 N_{DER} 两个指标来研究沥青胶浆疲劳寿命规律,并对两种研究方法进行分析。沥青在疲劳加载过程中,单位荷载周期内耗散能和加载过程中累积耗散能比计算公式^[26-27]分别为

$$\omega_i = \pi \varepsilon \sigma \sin \delta = \pi \varepsilon^2 G^* \sin \delta \quad (1)$$

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \omega_i}{\omega_n} \quad (2)$$

式中: ω_n 和 ω_i 分别为第 n 次和 i 次荷载周期内耗散能量; ε 为第 i 次荷载周期内应变; σ 为第 i 次荷载周期内应力; δ 为相位角; G^* 为复数剪切模量; DER 为累积耗散能比。

2.2.1 复数模量下 N_{f50} 的变化规律

复数模量 G^* 通常用来表征沥青抵抗疲劳破坏阻力的大小^[28],不同应力、不同材料条件下表现出相同的变化规律,图3~5为不同粒径、不同应力和不同材料下部分沥青胶浆的复数模量变化曲线(G^*-N),其他胶浆的复数模量变化曲线(G^*-N)类似,本文不一一列举和分析。

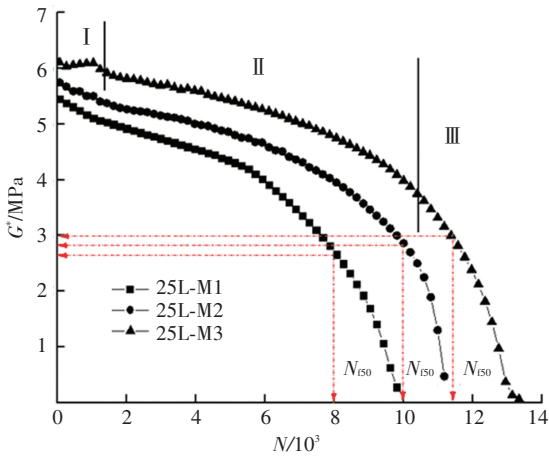


图3 石灰岩矿粉胶浆在0.1 MPa下疲劳寿命 N_{f50}

Fig.3 Fatigue life N_{f50} of limestone powder mortar at 0.1 MPa

由图3可见,0.1 MPa应力作用下无机微粉石灰岩颗粒在不同粒径下胶浆的 G^*-N 曲线变化趋势相同,均随着加载次数的增加复数模量减小。根据曲线趋势,可以将这种趋势分为3个阶段,在试验加载早期, G^* 会有明显的震荡变化过程,此阶段为加载应力的适应阶段,这一阶段较短;随着应力的持续作用, G^* 随加载次数的变化趋于稳定,但是在这一过程中,沥青损伤的累积是不断增加的,此阶段为损伤累积阶段;当损伤累积达到沥青抗疲劳损害的临界值时,进入加速破坏阶段,这一阶段中 G^* 下降速率明显增大,这一临界值通常取值为初始复数模量 G^* 值的50%,即 N_{f50} 。

另外,从图3中对比石灰岩微粉不同粒径颗粒制备的胶浆疲劳寿命发现,M3制备的疲劳性能最好,M2次之,M1最差,M3和M2相比于M1的疲劳寿命分别提高了42%和25%。这主要是由于随着微粉颗粒的粒径减小,颗粒间的间距也随之减小,使得沥青胶浆微裂缝的扩展难以避开微颗粒生成的障碍

物;相同体积下,粒径越小,意味着微粉颗粒越多。因此,胶浆内部会有更多的颗粒阻碍微裂缝的扩展,从而延长的沥青胶浆的疲劳寿命^[29];同时,与大粒径颗粒相比,小粒径颗粒吸附更多的沥青在颗粒上,导致颗粒与沥青之间总的相互作用增强,这也增加了疲劳寿命。

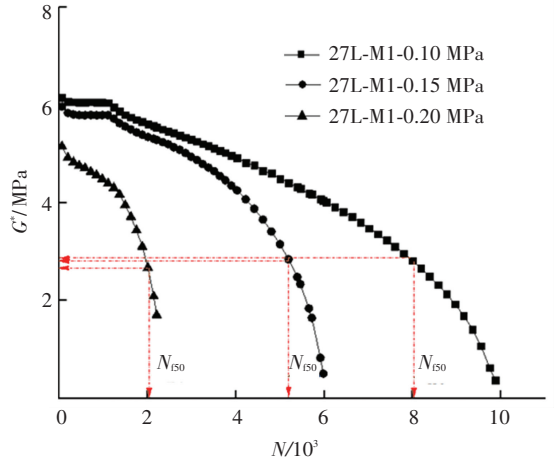


图4 石灰岩矿粉在不同应力下疲劳寿命 N_{f50}

Fig.4 Fatigue life N_{f50} of limestone powder under different stresses

在图4中,不同应力作用下,随着施加应力增加,胶浆的 N_{f50} 临界值减小,且呈现几何倍数减小,0.2 MPa时约为0.1 MPa时疲劳寿命的30%,这一规律和沥青混合料永久变形规律类似,大应力对沥青胶浆和沥青混合料的疲劳破坏加剧,这也是为什么沥青路面破坏一般是超载、重载车辆所产生的破坏。图5为3种不同种类的无机微分颗粒在应力0.1 MPa作用下复数模量变化曲线,从图中可以看出,影响沥青胶浆疲劳寿命的微粉颗粒由大到小依次为消石灰、水泥、石灰岩,且消石灰和水泥相较于石灰岩胶浆的疲劳寿命提高显著,分别为石灰岩的3倍和2.2倍。

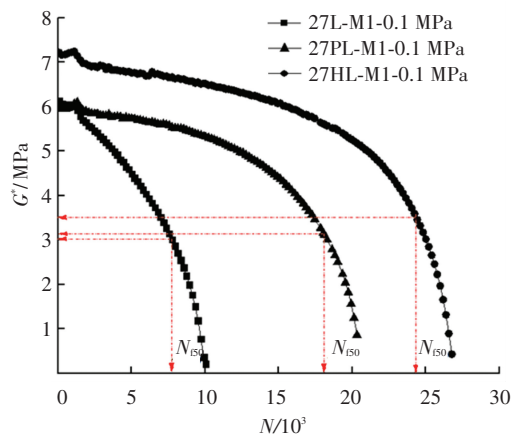


图5 0.1 MPa下不同填料的疲劳寿命 N_{f50}

Fig.5 Fatigue life N_{f50} of different fillers at 0.1 MPa

其原因是由于消石灰因具有活跃的碱性特性和较低的分子密度,容易与沥青中的羧酸和 2-噻诺酮类发生不可逆的反应,形成的钙盐会增加沥青胶浆硬度和增加沥青黏度从而具有更高的复数剪切模量和抗剪切能力^[30]。水泥呈弱碱性,能够与沥青中的亚砷和羧酸等酸性物质反应,生成具有吸附力的产物,从而会增强沥青与颗粒之间的黏结性^[5]。

另外,沥青胶浆疲劳性能与微粉填料颗粒形貌特征有显著关系,且微粉颗粒的物理特性相较于化学特性对胶浆性能影响更为显著,特别是比表面积特性^[31]。消石灰颗粒表面粗糙,结构蓬松,有表面孔隙,比表面积最大,吸附沥青多,导致疲劳寿命优于其他两种微粉颗粒;而水泥颗粒表面虽没有孔隙,但表面粗糙,颗粒形状多样,相比于石灰岩颗粒表面光滑、形状单一的形貌特征比表面积较大,能吸附较多的沥青,从而可增加胶浆韧性,延长疲劳寿命。

2.2.2 累积耗散能比(DER)的变化规律

累积耗散能比是沥青胶浆疲劳寿命表征的另一个重要指标,它是通过沥青在疲劳破坏过程中前 N 次加载循环内耗散能之和与第 N 次循环周期内耗散能的比值获得,通过式(2)计算。

当沥青胶浆没有发生疲劳损伤或者损伤程度较小时,循环周期内耗散能相同, $DER_n = N$,数据点均在 $DER = N$ 直线上;随着应力作用次数累积,第 $N + 1$ 个耗散能周期内损伤加大,耗散能值增加,即 $DER_{n+1} < N + 1$ 。

3 种无机微粉颗粒在不同应力和粒径下的累积耗散能变化曲线(DER- N)如图 6~8 所示,图中可以看到 DER 随着胶浆加载次数变化趋势相同。加载初始阶段,沥青胶浆没有发生损伤或者损伤程度较小,单位荷载作用周期内耗散能变化不大,即 $DER \approx N$;随着应力作用不断加载,沥青胶浆的疲劳损伤不断累积,周期内耗散能逐渐增大,耗散能变化曲线逐渐偏离 $DER = N$ 的直线,当沥青胶浆的疲劳损伤累积达到顶峰时,沥青胶浆加速破坏,周期内损耗能成倍数激增,耗散能变化曲线呈现下降趋势,此时拐点即为累积耗散能比对应的疲劳寿命 N_{DER} 。因此,累积耗散能比所定义的疲劳寿命即为材料内部疲劳累积损伤达到顶峰,材料出现加速破坏的变化点所对应的加载次数。

从图 6~8 中同样可以得知:无机微粉颗粒粒径对胶浆疲劳性能影响较大,小粒径对应的高抗疲劳性能;大应力对相同无机微粉颗粒的疲劳损伤最大,且损伤程度会成倍增加;消石灰对沥青胶浆的耗散能累积比影响最大,即消石灰沥青胶浆具有最好的抗疲劳性能。

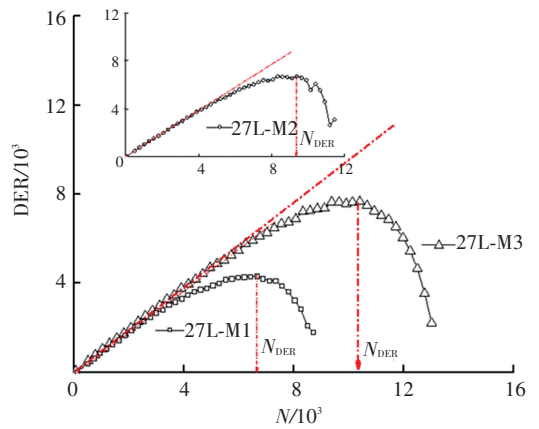


图 6 石灰岩矿粉胶浆 0.1 MPa 下疲劳寿命 N_{DER}
Fig.6 Fatigue life N_{DER} of limestone powder mortar at 0.1 MPa

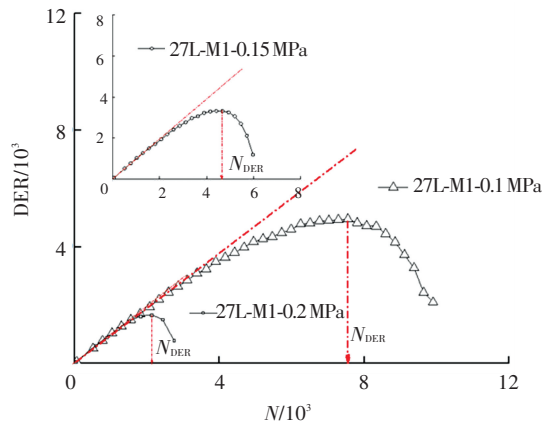


图 7 石灰岩矿粉在不同应力下疲劳寿命 N_{DER}
Fig.7 Fatigue life N_{DER} of limestone powder under different stresses

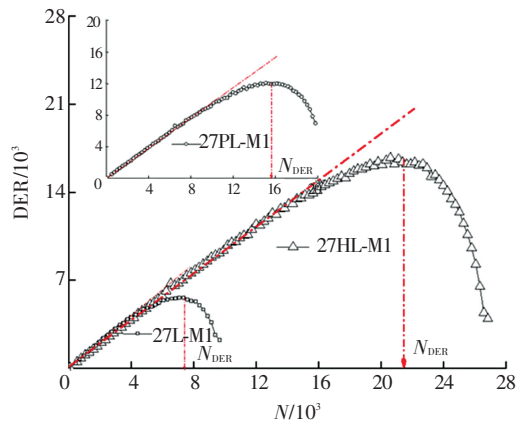


图 8 0.1 MPa 下不同填料的疲劳寿命 N_{DER}
Fig.8 Fatigue life N_{DER} of different fillers at 0.1 MPa

2.2.3 不同方法下疲劳寿命对比

将不同分析方法确定的疲劳寿命进行统计,如图 9 所示。从图中可以得到,两种方法确定的疲劳寿命相差不大,但 N_{150} 均大于 N_{DER} ,从路面设计和材料选择角度考虑,采用该指标作为评价沥青胶浆性能安全性较高。此外, N_{150} 疲劳定义是根据经验选定模量降到初始模式的 50% 为界限值,没有从材料

破坏机理的角度进行分析^[31],不能反映出材料处于何种破坏水平;在应力控制模式下, N_{DER} 荷载作用次数曲线存在明显的拐点,拐点为材料内部累积损伤能量发生突变位置^[32],从图 6~8 可以看出,DER-N 曲线均存在明显的材料内部疲劳损伤加剧的拐点。

综上所述, N_{DER} 指标确定疲劳寿命意义清晰且容易确定数值,推荐使用累积耗散能比作为沥青胶浆的疲劳寿命评价指标。

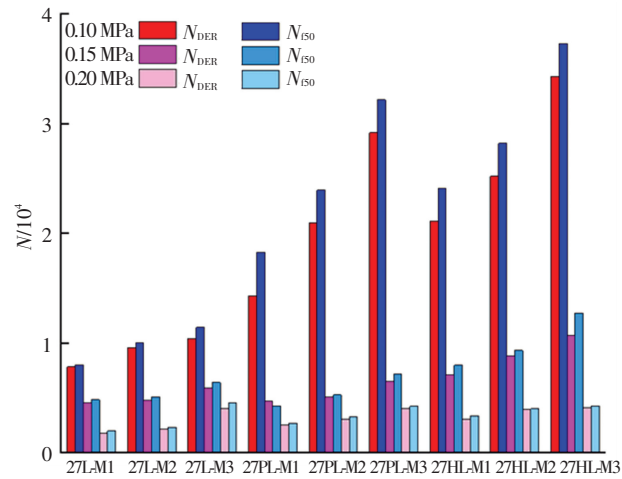


图9 不同应力下9种沥青胶浆疲劳寿命 N_{150}/N_{DER}

Fig.9 Fatigue life N_{150}/N_{DER} of nine kinds of asphalt mortar under different stresses

3 结 论

通过扫描电镜和时间扫描试验对3类9种沥青胶浆疲劳性能进行研究,从无机微粉颗粒种类和粒径大小对沥青胶浆的疲劳性能影响进行了全面的分析,得出以下结论:

1)在扫描电镜下,发现消石灰具有更加复杂的外貌特征和表面孔隙,水泥颗粒具有多种颗粒形态和复杂的表面棱角,而石灰岩矿粉表面光滑,颗粒形态单一。

2)在时间扫描试验结果中,消石灰表现出较好的疲劳寿命,这主要与消石灰的形貌特征和化学成分有关;相同材料中大比表面积也表现出较好的疲劳寿命,这主要是由于微粉颗粒的大比表面积具有更强的吸附作用。

3)通过累积耗散能比和复数模量两种方法表征了胶浆的疲劳寿命,发现累积耗散能比指标定义清晰意义明确,且在设计和材料选择中安全性更高。

参考文献

[1] AIREY G D, RAHIMZADEH B, COLLOP A. Evaluation of the linear and non-linear viscoelastic behaviour of bituminous binders and asphalt mixtures[C]//6th International Conference on the Bearing

Capacity of Roads and Airfields. Lisbon: Nottingham Centre for Pavement Engineering, 2002

[2] PEREZ-JIMENEZ F, BOTELLA R, MARTINEZ A H, et al. Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2013, 46(9): 193. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.04.019

[3] LÓPEZ-MONTERO T, MIRÓ R. Differences in cracking resistance of asphalt mixtures due to ageing and moisture damage[J]. Construction and Building Materials, 2016, 112(6): 299. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.199

[4] LIAO M C, CHEN J S, TSOU K W. Fatigue characteristics of bitumen-filler mastics and asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(7): 916. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000450

[5] GIORGIA M, AMEDEO V, FRANCESCO C. Influence of different fillers and SBS modified Bituminous blends on fatigue, self-healing and thixotropic performance of mastics[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 20(1): 1

[6] ANTUNES V, FREIRE A C, QUARESMA L, et al. Effect of the chemical composition of fillers in the filler-bitumen interaction[J]. Construction and Building Materials, 2016, 104: 85. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.042

[7] CARDONE F, FRIGIO F, FERROTTI G, et al. Influence of mineral fillers on the rheological response of polymer-modified bitumens and mastics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2015, 2(6): 373. DOI: 10.1016/j.jtte.2015.06.003

[8] MIRÓ R, MARTÍNEZ A H, PÉREZ-JIMÉNEZ F E, et al. Effect of filler nature and content on the bituminous mastic behaviour under cyclic loads[J]. Construction and Building Materials, 2017, 132: 33. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.114

[9] MICAEL R, GUERRA A, QUARESMA L, et al. Study of the effect of filler on the fatigue behaviour of bitumen-filler mastics under DSR testing[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155(30): 228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.066

[10] HU J, QIAN Z, LIU Y, et al. High-temperature failure in asphalt mixtures using micro-structural investigation and image analysis[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84(6): 136. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.090

[11] WANG H, AL-QADI I L, FAHEEM A F, et al. Effect of mineral filler characteristics on asphalt mastic and mixture rutting potential[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2208(1): 33. DOI: 10.3141/2208-05

[12] XING Baodong, FAN Weiyu, HAN Ling, et al. Effects of filler particle size and ageing on the fatigue behaviour of bituminous mastics[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 117052. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117052

[13] XING Baodong, FAN Weiyu, ZHUANG Chuanyi. 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.123

[14] AL-TAMEEMI A F, WANG Y, ALBAYATI A, et al. Moisture susceptibility and fatigue performance of hydrated lime-modified asphalt concrete: experiment and design application case study[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(4): 13. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002634

[15] DIDIER L, JOËLLE P, HANS-JOSEF R. The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state-of-the-art review

- [J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(1):1. DOI: 10.1080/14680629.2012.743669
- [16] MOON K H, FALCHETTO A C, WANG D, et al. Mechanical performance of asphalt mortar containing hydrated lime and EAFSS at low and high temperatures[J]. Materials, 2017, 10:743. DOI: 10.3390/ma10070743
- [17] DIAB A, YOU Z, HOSSAIN Z. Moisture susceptibility evaluation of nanosize hydrated lime-modified asphalt-aggregate systems based on surface free energy concept[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2446(1):52. DOI:10.3141/2446-06
- [18] JIN Jiao, TAN Yanqing, LIU Ruohua, et al. Structure characteristics of organic bentonite and the effects on rheological and aging properties of asphalt[J]. Powder Technology, 2018, 329: 107. DOI:10.1016/j.powtec. 2018.01.047
- [19] RICCARDI C, CANNONE F A, WISTUBA M P, et al. Fatigue comparisons of mortars at different volume concentration of aggregate particles[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 104(11):416. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2017.08.005
- [20] ANDERSON D, HIR Y, MARASTEANU M, et al. Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders[J]. Transport Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1766(1):48
- [21] CANESTRARI F, VIRGILI A, GRAZIANI A, et al. Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70(1):351. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2014.08.004
- [22] 徐骁龙, 叶奋, 宋卿卿, 等. 沥青疲劳评价指标试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(2):14
XU Xiaolong, YE Fen, SONG Qingqing, et al. Experimental study on asphalt fatigue evaluation index [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31(2): 14. DOI: 10.3969/j. issn. 1005-0523.2014.02.003
- [23] ZHANG Yuan, LENG Zhen. Quantification of bituminous mortar ageing and its application in ravelling evaluation of porous asphalt wearing courses[J]. Materials and Design, 2017, 119(4):1
- [24] LUNDSTROM R, BENEDETTO H D, ISACSSON U. Influence of asphalt mixture stiffness on fatigue failure[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6):516. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(516)
- [25] PÉREZJIMÉNEZ F E, BOTELLA R, MIRÓ R. Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests[J]. Construction and Building Materials, 2012, 2293(1): 8. DOI: 10.3141/2293-02
- [26] 朱洪洲, 范世平, 卢章天, 等. 基于耗散能的老化沥青疲劳寿命预估模型分析[J]. 公路交通科技, 2019, 36(9): 8
ZHU Hongzhou, FAN Shiping, LU Zhangtian, et al. Analysis of fatigue life prediction model of aged asphalt based on dissipative energy[J]. Highway Transportation Technology, 2019, 36(9): 8
- [27] 朱洪洲, 袁海, 张新强. 老化沥青常应力疲劳演化规律分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(16):345
ZHU Hongzhou, YUAN Hai, ZHANG Xinqiang. Analysis of constant stress fatigue evolution law of aged asphalt [J]. Science and Technology Andengineering, 2019, 19(16):345. DOI:10.3969/j. issn.1671-1815.2019.16.054
- [28] 吕天华, 章毅. 布敦岩沥青改性沥青高温动态流变性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2010, 27(4):13
LÜ Tianhua, ZHANG Yi. Study on high temperature dynamic rheological properties of butun rock asphalt modified asphalt [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2010, 27(4):13
- [29] CHIARELLI A, DAWSON A R, GARCÍA A. Generation of virtual asphalt mixture porosity for computational modelling [J]. Powder Technology, 2015, 275(5):351
- [30] SMITH B J, HESP S A M. Crack pinning in asphalt mastic and concrete: regular fatigue studies [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1728(1):75. DOI:10.3141/1728-11
- [31] 陶敬林. 矿料性质及其对沥青混合料高低温粘弹性能的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017
TAO Jinglin. Research on characteristics of mineral aggregate and its effect on high and low temperature viscoelastic performance of asphalt mixture[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017
- [32] 郁锦刚, 刘伟民, 黄晓明. 基于黏弹性理论的沥青混合料劈裂疲劳模型研究[J]. 上海公路, 2009(4): 60
YU Jingang, LIU Weimin, HUANG Xiaoming. Study on splitting fatigue model of asphalt mixture based on viscoelastic theory [J]. Shanghai Highway, 2009(4):60. DOI:10.3969/j. issn.1007-0109.2009.04.014

(编辑 魏希柱)