

沥青胶浆高温流变性能及矿粉强化效应评价

李松^{1,2}, 石星星^{1,3}, 司春棣^{1,2}, 蒋继望⁴, 暴斌硕⁵

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043; 3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 4. 东南大学 交通学院, 南京 211102; 5. 石家庄铁道大学 管理学院, 石家庄 050043)

摘要:为定量表征矿粉对沥青胶浆的性能影响,采用改进的多应力蠕变恢复(MSCR)试验,评价沥青胶浆的高温流变性能,基于沥青胶浆的不可恢复柔量 J_{nr} 指标提出矿粉强化效应指标 ΔJ_{nr} ,并诠释矿粉强化规律。结果表明:矿粉强化效应与沥青种类有关,其中SBS改性沥青胶浆矿粉强化作用呈两阶段趋势,即先随矿粉掺量的增加而线性增强,随后不再受矿粉掺量的影响。两阶段临界值可作为沥青胶浆的推荐矿粉掺量,计算得到3.5%和4.0% SBS改性剂掺量的改性沥青胶浆的推荐矿粉掺量分别为120%和100%。构建了矿粉强化效应的多元线性回归模型,进一步阐明了应力等级、改性剂掺量和矿粉掺量对矿粉强化效应的影响。

关键词:道路工程; 沥青胶浆; 高温流变性能; 矿粉强化效应; 推荐矿粉掺量; 多应力蠕变恢复试验

中图分类号: U416 文献标志码: A 文章编号: 1671-5497(2024)11-3244-11

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230073

Evaluation of high-temperature rheological properties of asphalt mastic and its filler stiffening effect

LI Song^{1,2}, SHI Xing-xing^{1,3}, SI Chun-di^{1,2}, JIANG Ji-wang⁴, BAO Bin-shuo⁵

(1. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211102, China; 5. School of Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of filler particles on the properties of asphalt mastic, its high-temperature rheological performance of asphalt mastic is investigated by using a modified multiple stress creep recovery (MSCR) test. The difference in J_{nr} values between an asphalt binder and its corresponding asphalt mastic is proposed as an index to evaluate the filler stiffening effect in asphalt mastic quantitatively. The results showed that the filler stiffening effect was highly related with the type of asphalt binder. For the

收稿日期: 2023-01-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972237, 12072205); 河北省重点研发计划项目(21373801D); 河北省中央引导地方科技发展资金项目(226Z3801G); 河北省自然科学基金项目(E2022210054); 河北省引进留学人员项目(C20210306); 河北省交通厅科技计划项目(JD-202007, JD-202006, JX-202010).

作者简介: 李松(1989-), 男, 讲师, 博士. 研究方向: 沥青路面材料性能. E-mail: lisong@stdu.edu.cn

SBS-modified asphalt mastic, the addition of mineral filler tends to stiffen the binder until a critical filler content where any further addition of filler would not yield any stiffening effect in the resulting asphalt mastic. It was found that the critical filler contents can be regarded as appropriate filler content for the SBS-modified mastic. It was also found that the critical filler contents can be regarded as appropriate filler content for the SBS-modified mastic and they are found to be 120% and 100% of asphalt binder by mass for the asphalt mastics made by modified binders with 3.5% and 4.0% SBS respectively. Multiple linear regression models for quantifying the filler stiffening effect are derived and the effect of creep stress, SBS content and filler content on filler stiffening is discussed.

Key words: pavement engineering; asphalt mastic; high-temperature rheological properties; filler stiffening effect; appropriate filler content; multiple stress creep recovery test

0 引 言

沥青混合料是由粗集料、细集料、矿粉、沥青以及空隙等构成的典型非均质复合材料^[1,2]。在沥青混合料的多尺度结构体系中,沥青胶浆^[3]可以看作由矿粉颗粒(粒径小于0.075 mm)充当分散系均匀分布在沥青基体而形成的两相复合材料。沥青胶浆均匀随机裹附在集料颗粒表面并填充于矿料间隙之中,对沥青混合料整体黏弹特性和宏观力学行为具有显著影响^[4,5]。当沥青混合料在大应力或大应变条件下,表现出非线性力学行为时,分布在集料之间的沥青胶浆将首先出现微裂缝等材料损伤。可见,沥青胶浆是沥青混合料结构体系中最为薄弱的部分^[6-8]。因此,沥青胶浆自身的黏聚性、黏附性以及流变特性与沥青混合料的宏观力学性能紧密相关^[9-12]。

沥青胶浆的结构体系与沥青较为接近,其室内测试方法通常借鉴沥青胶结料,采用动态剪切流变仪(DSR)测定沥青胶浆的高温流变性能^[13-15]。通过DSR试验,能够得到沥青胶浆线性黏弹性范围内复数模量(G^*)和相位角(δ)的主曲线^[16,17],进而表征沥青胶浆线性黏弹性条件下的基本力学性能。同时,测得的车辙因子($G^*/\sin \delta$)指标在一定程度上反映沥青胶浆的高温抗变形能力^[18,19]。然而,现有研究表明车辙因子与沥青混合料抗车辙性能的关联性较差,无法准确表征沥青或者沥青胶浆的高温黏弹性能^[18]。同时,仅线性黏弹性指标尚不能满足沥青材料的高温性能评价需求,这与沥青材料在大应力条件下呈现出非线性力学行为有关。因此,在进行沥青胶浆高温性能评价时,需要充分考虑其非线性黏弹性^[20]。通过重复蠕变恢复(RCR)试验,得到的重

复蠕变劲度的黏性指标 G_v ,能够表征沥青或沥青胶浆在特定应力加载条件下的高温黏弹性响应^[21,22]。但是,RCR试验通常在一个应力水平下进行,无法准确评价沥青胶浆高温黏弹性能的应力依赖性。考虑到沥青胶浆高温黏弹性能试验评价的局限性,多应力蠕变恢复(MSCR)试验得到了多数研究人员的普遍关注^[23,24],该试验通过DSR同时测定沥青在多重应力条件下的蠕变和恢复响应,进而同时表征沥青胶浆的线性和非线性黏弹性能^[25,26]。通过MSCR试验,计算得到的不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 和恢复率百分比 $\%R$ 两项指标,均与沥青混合料的抗车辙性能具有良好的关联性^[25],是当前沥青高温性能评价和沥青选择的首选性能指标。因此,采用MSCR试验,能够更好地表征沥青和沥青胶浆的高温流变性能。根据美国AASHTO规范要求,标准的MSCR试验采用64℃试验温度,并在0.1 kPa和3.2 kPa两级应力加载条件下进行。因此,针对沥青胶浆的MSCR试验,应在沥青MSCR试验程序的基础上,充分考虑更为宽泛的试验温度、加载应力以及加载时间^[27]。

由于沥青胶浆体系中矿粉颗粒同沥青的相互作用,沥青胶浆的整体强度得以显著提升^[28,29],相比于沥青,沥青胶浆的强度指标值能够提高至3~5倍^[30]。同时,沥青胶浆中的矿粉可以增强沥青胶浆的弹性响应,提高其高温抗变形能力^[31,32]。其中,矿粉掺量是影响沥青胶浆宏观力学行为的主要因素之一^[33-35]。矿粉与沥青的质量比在90%~140%时,沥青胶浆的高温性能和低温性能综合最佳^[21]。沥青胶浆中矿粉的增强效应能够采用沥青胶浆与沥青的黏度比或者 J_{nr} 指标比

来进行评价,并且矿粉的增强效应与采用的沥青种类有关,SBS改性沥青对该增强效应更为敏感^[36]。此外,矿粉的强化效应与沥青胶浆的矿粉掺量有关,矿粉与沥青体积比为35%的沥青胶浆比体积比为18%的沥青胶浆,其矿粉强化效应更为显著^[37]。

总之,针对适用于沥青胶浆的高温流变性能测试方法,目前尚未统一。同时,沥青胶浆中矿粉强化效应的定量分析依然较少,矿粉强化效应的作用规律尚不明晰。因此,本文采用改进后的多应力蠕变恢复(MSCR)试验综合评价不同矿粉掺量的沥青胶浆的高温流变性能,并定量评价沥青胶浆体系中矿粉的强化效应,以此确定沥青胶浆的推荐矿粉掺量值。同时建立不同阶段的矿粉强化效应的多元线性回归模型,进一步揭示矿粉强

化效应的影响因素和发展规律,为进一步挖掘沥青胶浆的作用和完善沥青混合料的优化设计提供一定的理论支撑。

1 材料制备

1.1 沥青

本文分别选用江苏省公路建设常采用的3种不同种类的沥青,制备研究所需沥青胶浆样本,分别为70#基质沥青和2种不同改性剂掺量的SBS改性沥青,即SBS改性剂分别为沥青质量的3.5%和4.0%。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[38],对选用的3种沥青分别进行软化点、延度、针入度等基本性能试验,并确定3种沥青的PG高温分级。3种沥青的基本性能结果如表1所示。

表1 沥青基本性能

Table 1 Performance of asphalt binders

技术指标	沥青种类		
	基质沥青	SBS改性沥青-I	SBS改性沥青-II
SBS含量/%	0	3.5	4.0
软化点/°C	47	65	76
延度/cm(5 cm/min, 5 °C)	—	50	43
延度/cm(5 cm/min, 15 °C)	60	—	—
针入度(0.1 mm, 100 g, 15 °C, 5 s)	25	21	21
针入度(0.1 mm, 100 g, 25 °C, 5 s)	70	52	54
针入度(0.1 mm, 100 g, 30 °C, 5 s)	125	87	86
针入度指数	-1.004 5	-0.228 0	-0.115 3
PG高温分级	PG 64-××	PG 70-××	PG 76-××

1.2 沥青胶浆

本文选用粒径小于0.075 mm的石灰岩矿粉来进行沥青胶浆样本的制备,该石灰岩矿粉密度为2.705 g/cm³。使用矿粉掺量作为沥青胶浆的控制指标,即添加矿粉与沥青的质量比。根据常用的沥青混合料级配类型和设计方法,等效反算得到其中沥青胶浆的矿粉掺量通常控制在50%~150%^[20,39]。在此基础上,本文研究所需的沥青胶浆样本选用7种不同的矿粉掺量,即0%、50%、80%、100%、120%、150%和180%。

为保证制备得到的沥青胶浆样本的均质性和可重复性,参照沥青混合料的拌和条件和流程,沥青胶浆的拌和应按照如下程序进行^[18,28]。首先,将称量好的沥青和矿粉放置于180 °C烘箱之中,恒温加热2 h以上。将加热好的矿粉分3~4次缓

慢添加至液态沥青当中,同时使用高速搅拌机进行充分拌和,拌和温度保持在170 °C左右。随着矿粉的加入,搅拌速度逐渐加快,整个添加矿粉的过程控制在10 min左右。待矿粉添加完毕,使用高速搅拌机继续以3 000 r/min的恒定转速持续拌和30 min。最后,将制备好的胶浆样本贮存在温度为25 °C的室温环境之中。为了保证老化程度相接近,本文中使用的沥青样本(矿粉掺量0%的沥青胶浆)均采用旋转薄膜烘箱试验(RT-FOT)进行短期老化。制备好的沥青胶浆采用硅胶模具浇筑成直径为20 mm,厚度为2~3 mm的圆柱体样本进行MSCR试验。为了表述方便,本文中采用的70#基质沥青、3.5%和4.0% SBS改性剂掺量的SBS改性沥青制备得到的沥青胶浆样本,在后文中分别以NM、3.5M和4.0M表示。

2 试验方法

本文采用改进的多应力蠕变恢复(MSCR)试验来综合评价沥青胶浆的高温流变性能。根据沥青 MSCR 标准试验程序,沥青胶浆的 MSCR 试验采用动态剪切流变仪(DSR)进行,并选用直径为 25 mm、样本间隙为 1.0 mm 的平行加载板。沥青胶浆样本在 MSCR 试验加载过程中,每级应力进

行 10 个蠕变-恢复循环,其中蠕变阶段的加载时间为 1.0 s,恢复阶段的卸载时间为 9.0 s^[40]。改进的 MSCR 试验对沥青和沥青胶浆样本均进行 0.1、3.2、6.4、12.8、25.6、40.0 kPa 共计 6 个应力等级的加载。MSCR 试验从最小应力开始至最大应力逐级加载,不同应力等级之间不设置时间间隔。试验温度选用 64 ℃。改进的 MSCR 试验的蠕变-恢复的循环加载形式如图 1 所示。

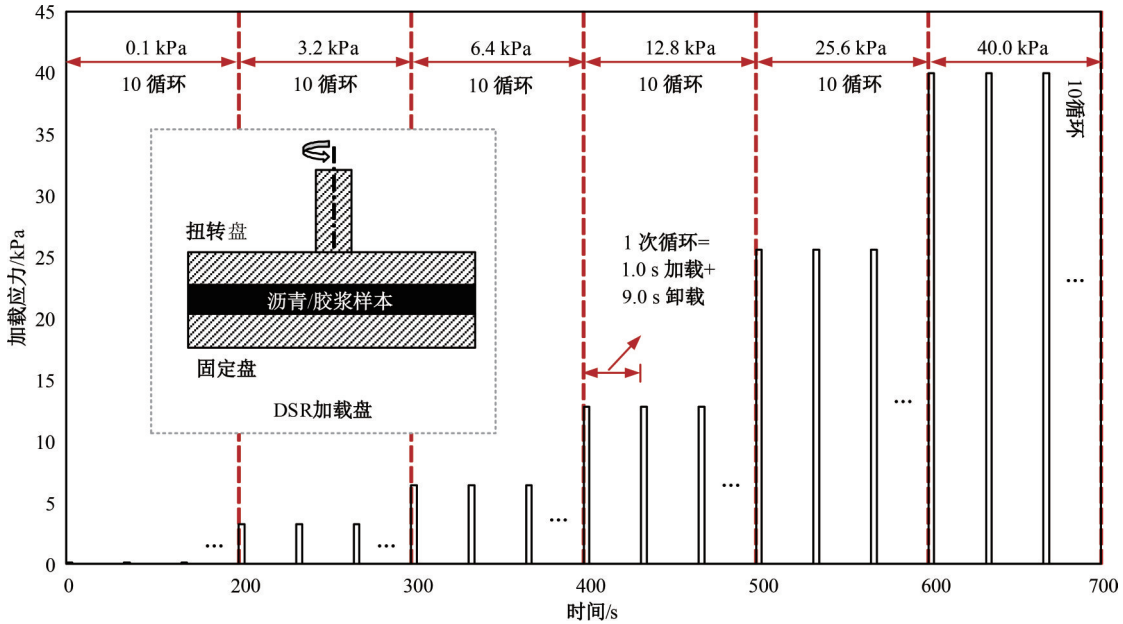


图 1 沥青胶浆 MSCR 试验加载示意图

Fig. 1 Framework of MSCR test for asphalt mastic

沥青和沥青胶浆的 MSCR 试验为应力控制的加载模式,在恒定蠕变应力加载条件下测定沥青或沥青胶浆样本的应变值。MSCR 试验过程中每隔 0.1 s 记录样本的应变值。以基质沥青胶浆 NM 为例,图 2 为其在 0.1 kPa 蠕变应力条件下

的 10 次蠕变-恢复循环的应变曲线图。以此计算沥青胶浆的不可恢复柔量 J_{nr} 指标,并用来评价沥青胶浆的高温流变性能,进而提出强化效应评价指标,表征沥青胶浆矿粉强化效应。

如图 2 所示,每次蠕变和恢复循环后,能够得到 3 个应变值用于计算其高温流变性能指标,即蠕变开始时的初始应变值 ϵ_0 ,蠕变结束时(1.0 s)应变值 ϵ_c 和恢复结束时(10.0 s)应变值 ϵ_r 。因此,每次蠕变-恢复循环中的不可恢复应变值 $\epsilon_{nr}(N)$ 可以通过恢复结束时的应变值与初始应变值的差值确定,如式(1)所示。最终,每级应力对应的不可恢复柔量 J_{nr} 指标值能够计算得到。具体计算公式如式(2)和式(3)所示:

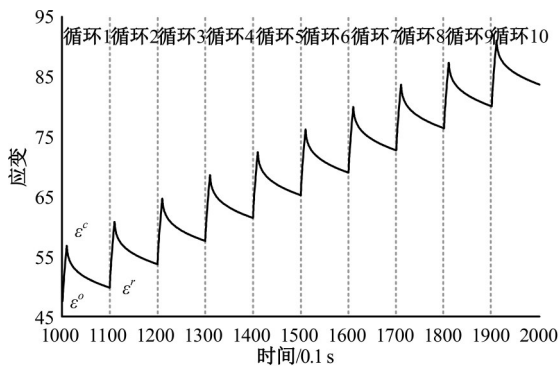


图 2 MSCR 试验中沥青胶浆在单一应力条件下的应变-时间关系示意图

Fig. 2 Illustration of strain-time relationship for asphalt mastic at one creep stress level of the MSCR test

$$\epsilon_{nr}(N) = \epsilon_r - \epsilon_0 \quad (1)$$

$$J_{nr}(\sigma, N) = \frac{\epsilon_{nr}(N)}{\sigma} \quad (2)$$

$$J_{nr}(\sigma) = \frac{\sum_{N=1}^{10} J_{nr}(\sigma, N)}{10} \quad (3)$$

3 沥青胶浆高温流变性能

不同沥青胶浆样本通过MSCR试验,能够计算得到不同沥青种类和不同矿粉掺量对应的沥青胶浆的 J_{nr} 指标结果。根据沥青胶浆自身材料特性,本节分基质沥青胶浆和SBS改性沥青胶浆分别进行分析讨论。

3.1 基质沥青胶浆

由于制备NM样本的基质沥青高温黏弹性能较差,在多重蠕变应力的加载条件下,基质沥青和NM样本(尤其矿粉掺量较少的NM样本)在较大应力条件下会出现损伤或破坏现象,仅在0.1 kPa应力条件下能够获得有效的 J_{nr} 指标结果。图3为基质沥青胶浆NM的 J_{nr} 指标在0.1 kPa应力条件下随不同矿粉掺量的变化趋势。显然,NM的 J_{nr} 指标值随矿粉掺量的增加呈现显著的线性下降趋势,沥青胶浆的高温流变性能随矿粉的掺入而线性增强。因此,矿粉的掺入能够促使NM的高温流变性能显著提升。

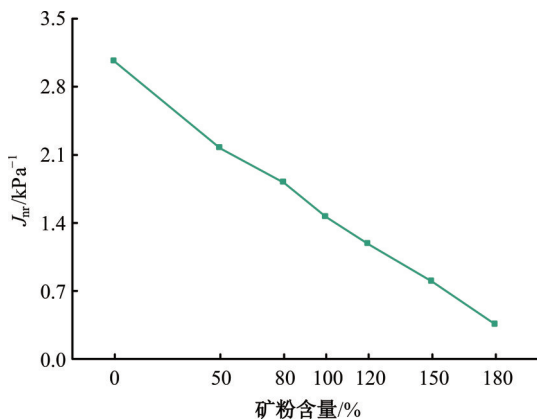


图3 NM沥青胶浆 J_{nr} 指标值随矿粉掺量的变化结果
Fig. 3 J_{nr} values for NM with different filler contents

3.2 SBS改性沥青胶浆

与NM沥青胶浆的试验结果类似,较小矿粉掺量的改性沥青胶浆,如0%、50%和80%矿粉掺量的3.5M和0%、50%矿粉掺量的4.0M样本,在最大应力(40 kPa)的加载条件下会出现损伤或者破坏,对应计算得到的 J_{nr} 指标值得以舍去。其余不同矿粉掺量的SBS改性沥青胶浆样本在MSCR试验中的6种应力下均能获得有效的 J_{nr} 指标值。因此,不同矿粉掺量和多重应力条件下的3.5M和4.0M沥青胶浆的 J_{nr} 指标结果如图4所示。

与NM沥青胶浆 J_{nr} 结果类似,图4中3.5M和4.0M沥青胶浆在不同蠕变应力条件下,其 J_{nr} 指

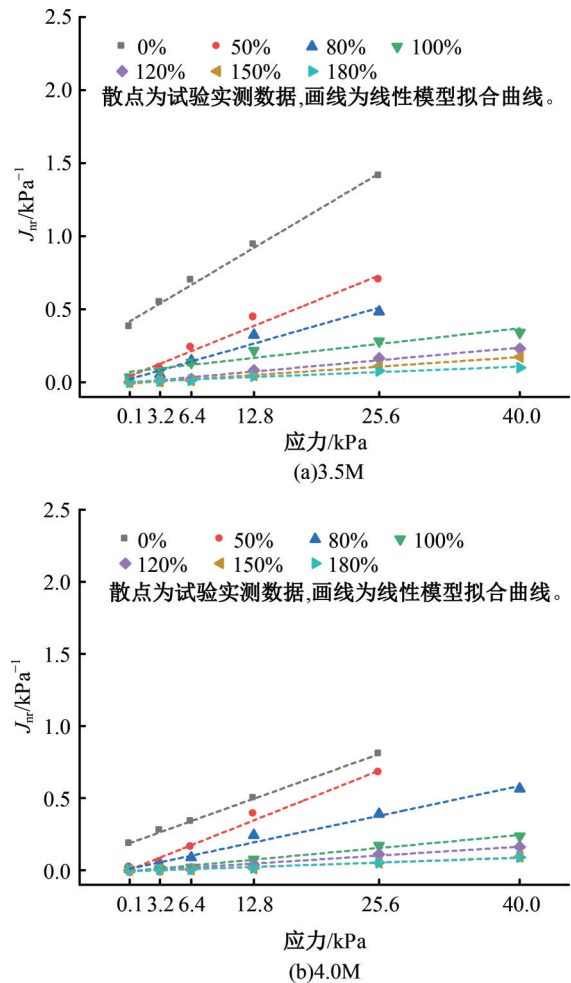


图4 不同矿粉掺量和不同加载应力条件下的3.5M和4.0M沥青胶浆 J_{nr} 指标值
Fig. 4 J_{nr} values for 3.5M and 4.0M with different filler contents and creep stresses

标值均随着矿粉掺量的增加而显著减小。根据式(1)和式(2)可知,矿粉颗粒的不断添加,会导致沥青胶浆的不可恢复应变减小,弹性响应增强,进而促进矿粉颗粒在胶浆体系中的强化效应,促使沥青胶浆的高温流变性能和抗车辙潜得以改善。

通过观察多应力条件下的3.5M和4.0M沥青胶浆的 J_{nr} 结果,3.5M和4.0M的高温流变性能表现出显著的应力依赖性,其 J_{nr} 指标值随蠕变应力的增长而线性增加。同时,其 J_{nr} 指标的应力依赖性与其矿粉掺量显著相关。 J_{nr} 指标值随应力增加的变化率随矿粉掺量的增加而逐渐减小,并且矿粉掺量越大的沥青胶浆其应力依赖性越低。

此外,如图4所示,在较小应力(特别是在0.1 kPa和3.2 kPa)条件下,无论沥青胶浆中矿粉掺量如何,3.5M和4.0M沥青胶浆计算得到的

J_{nr} 指标值均较为接近。可见,较小蠕变应力条件下,沥青胶浆的 J_{nr} 指标结果无法显著地区分不同矿粉掺量对胶浆高温流变性能的影响。因此,如果采用 J_{nr} 评价 SBS 改性沥青胶浆的高温流变性能,根据图 4 中 J_{nr} 指标值的变化规律可知,改性沥青胶浆 MSCR 试验中建议采用的最小蠕变应力等级为 6.4 kPa。

4 沥青胶浆的矿粉强化效应机制

基于沥青胶浆的 MSCR 试验指标 J_{nr} 的结果分析,提出沥青胶浆矿粉强化效应的评价指标,定量阐述矿粉强化效应的变化规律,并以此为依据得到沥青胶浆的推荐矿粉掺量值。

4.1 矿粉强化效应的评价指标

通过图 3 和图 4 中沥青胶浆 J_{nr} 指标值的结果可知,本文选用的沥青胶浆其 J_{nr} 指标值均随着矿粉掺量的增加而明显减小。显然,沥青胶浆中添加矿粉后,相较于纯沥青其整体强度显著提高。为了更好地评价沥青胶浆体系中因添加矿粉而导致的整体强度变化,本文采用沥青 J_{nr} 与沥青胶浆 J_{nr} 指标差值来表征沥青胶浆相对于沥青的强度提升,即沥青胶浆中的矿粉强化效应。因此,沥青胶浆矿粉强化效应指标 ΔJ_{nr} 的计算如下所示:

$$\Delta J_{nr} = J_{nr}^{\text{沥青}} - J_{nr}^{\text{胶浆}} \quad (4)$$

式中: $J_{nr}^{\text{沥青}}$ 为沥青的 J_{nr} 值; $J_{nr}^{\text{胶浆}}$ 为与 $J_{nr}^{\text{沥青}}$ 沥青相对应的沥青胶浆的 J_{nr} 值。

沥青与其相应沥青胶浆的 J_{nr} 差值 ΔJ_{nr} 作为沥青胶浆矿粉强化效应的定量评价指标,同时也是表征沥青胶浆的强度提高和高温流变性能改善程度的指标。 ΔJ_{nr} 值越大,表明沥青胶浆中矿粉强化效应越显著,其高温流变性能越好。本文中选用不同矿粉掺量和不同沥青种类的沥青胶浆样本的矿粉强化效应指标 ΔJ_{nr} 的结果如图 5 所示。

图 5(a) 为基质沥青胶浆 NM 的矿粉强化效应的计算结果。在 0.1 kPa 应力条件下,其矿粉强化效应随矿粉掺量的增加呈现线性增长的趋势。然而对于图 5(b) 和 (c) 中的 SBS 改性沥青胶浆 3.5M 和 4.0M,矿粉强化效应指标 ΔJ_{nr} 的值起初随矿粉掺量的增加而增加,而后指标值逐渐趋于定值。显然,SBS 改性沥青胶浆随着矿粉掺量的持续增加,其矿粉强化效应不再显著增强。因此,根据矿粉掺量的增加,可以将 3.5M 和 4.0M 的 ΔJ_{nr} 指标的变化趋势分成 2 个阶段,即低矿粉掺

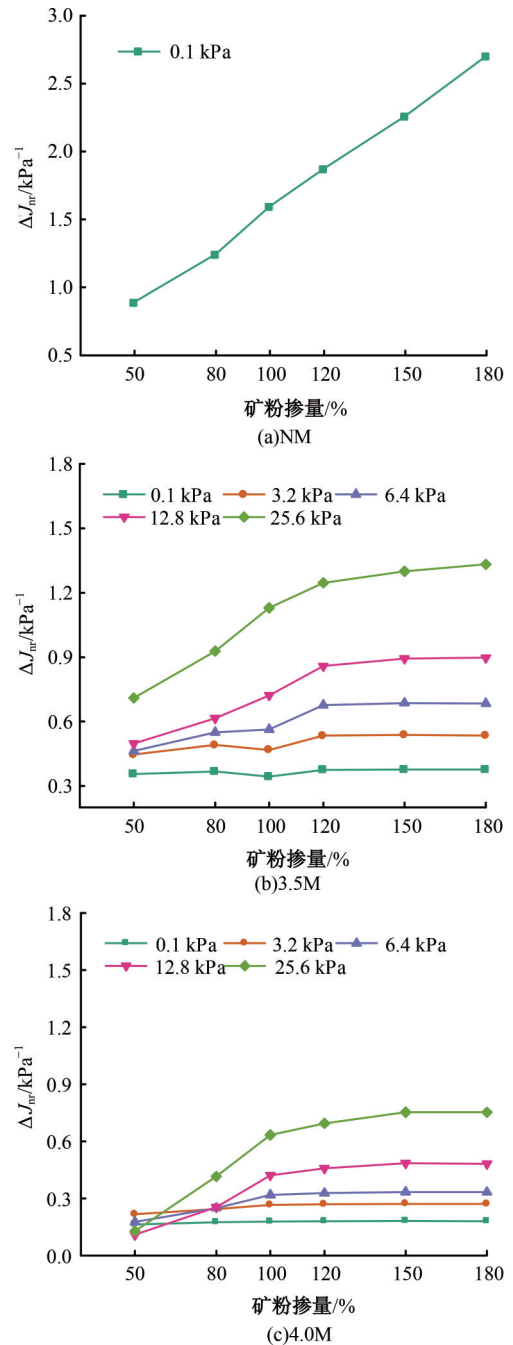


图 5 不同沥青胶浆的 ΔJ_{nr} 指标结果

Fig. 5 ΔJ_{nr} results of different asphalt mastics

量阶段(I)和高矿粉掺量阶段(II)。在 I 阶段,沥青胶浆矿粉掺量较低,矿粉掺量值对 ΔJ_{nr} 指标值影响显著,其强化效应随矿粉掺量的增加而逐渐增强,沥青胶浆的高温流变性能逐渐增强。当矿粉掺量的继续增加至 II 阶段,沥青胶浆矿粉掺量较高,此时 ΔJ_{nr} 指标值不再随矿粉掺量的增加而显著增加,矿粉的强化效应将趋于某个定值。此外,由图 5(b) 和 (c) 可知,在同一应力和相同矿粉掺量条件下,3.5M 的 ΔJ_{nr} 值普遍大于 4.0M。

可见,矿粉在 3.5 M 沥青胶浆中的强化效应大于其在 4.0M 沥青胶浆中的强化效应。因此,沥青胶浆中矿粉的强化效应与沥青的材料性能紧密相关。对于 SBS 改性剂掺量较低,黏弹性能较差的沥青制备的沥青胶浆,矿粉在其中起到的强化效应更为显著。

4.2 推荐矿粉掺量确定

根据由 SBS 改性沥青制得的 3.5M 和 4.0M 沥青胶浆的矿粉强化效应分析结果可知,随着矿粉掺量增加至某一临界值,其矿粉强化效应将不再随着矿粉掺量的增加而继续增强。该矿粉掺量临界值可以作为改性沥青胶浆的推荐矿粉掺量值。这是因为当矿粉掺量超过该临界值时,矿粉掺量的增加对沥青胶浆强化效应的影响不显著,在这种情况下,沥青胶浆能够以最少的矿粉掺量达到最好的矿粉强化效果。

为了确定临界矿粉掺量值,分别将 3.5M 和 4.0M 沥青胶浆 I 阶段和 II 阶段 ΔJ_{nr} 指标与矿粉掺量的关系进行线性回归,并通过拟合曲线的交点确定 I 阶段和 II 阶段临界点对应的矿粉掺量值。图 6 是 3.5M 和 4.0M 沥青胶浆的 ΔJ_{nr} 数据的线性回归结果。同时,沥青胶浆 I 阶段和 II 阶段的线性回归模型及其临界矿粉掺量计算结果见表 2。

如图 6 和表 2 所示,对于 SBS 改性沥青胶浆的 I 阶段和 II 阶段,其 ΔJ_{nr} 指标随矿粉掺量的变化规律通过一元线性模型具有良好的拟合效果。因此,通过计算不同应力条件下的 ΔJ_{nr} 指标线性模型的交点来确定 I 阶段和 II 阶段转折点对应的

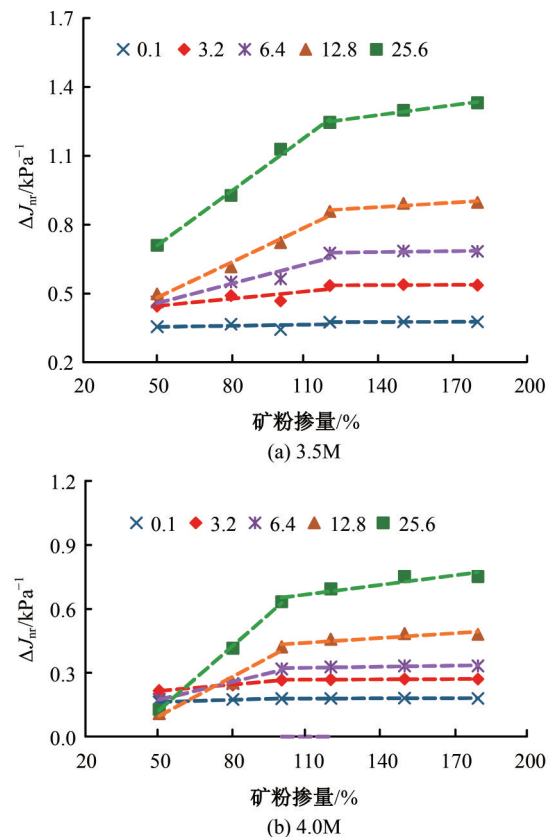


图 6 3.5M 和 4.0M 在 I 和 II 阶段的线性回归结果
Fig. 6 Linear regression of I and II phases of 3.5M and 4.0M

矿粉掺量值。根据图 5 和图 6 可得,改性沥青胶浆 I 阶段和 II 阶段的转折点受应力的影响较小,不同蠕变应力条件下,计算得到的转折点对应的矿粉掺量的数值较为接近。因此,取不同蠕变应力条件下, I 阶段和 II 阶段线性模型的交点所对应的矿粉掺量平均值作为 SBS 改性沥青胶浆的推荐矿粉掺量值。由此分别计算得到 3.5M 的推荐

表 2 SBS 改性沥青胶浆 I 阶段和 II 阶段的线性模型计算结果

Table 2 Results of linear model for I and II phases of SBS-modified mastics

沥青胶浆	应力 /kPa	模型		模型		转折点 矿粉掺量/%	转折点矿粉掺量 平均值/%
		I 阶段	R^2	II 阶段	R^2		
3.5M	25.6	$y=0.7866x+0.3153$	0.993	$y=0.1427x+1.0788$	0.980	118.57	124.84
	12.8	$y=0.5109x+0.2261$	0.983	$y=0.0643x+0.7864$	0.830	125.46	
	6.4	$y=0.2822x+0.3160$	0.922	$y=0.0131x+0.6616$	0.845	128.43	
	3.2	$y=0.1198x+0.3875$	0.958	$y=0.0029x+0.5316$	0.839	123.27	
	0.1	$y=0.0254x+0.3426$	0.800	$y=0.0015x+0.3733$	0.920	128.45	
4.0M	25.6	$y=1.0066x-0.3795$	0.999	$y=0.1488x+0.5037$	0.839	102.96	102.30
	12.8	$y=0.6152x-0.2106$	0.976	$y=0.0736x+0.3600$	0.778	105.35	
	6.4	$y=0.2797x+0.0334$	0.990	$y=0.0171x+0.3043$	0.732	103.16	
	3.2	$y=0.0985x+0.1663$	0.996	$y=0.0053x+0.2616$	0.729	102.25	
	0.1	$y=0.0331x+0.1464$	0.974	$y=0.0020x+0.1768$	0.791	97.75	

注:线性模型中 y 为 J_{nr} 值; x 为矿粉掺量。

矿粉掺量为 124.84%,4.0M 的推荐矿粉掺量为 102.30%。为了方便工程应用,可以近似地将 120% 和 100% 分别作为 3.5M 和 4.0M 沥青胶浆的推荐矿粉掺量。进一步分析推荐矿粉掺量结果,其掺量值与制备沥青胶浆所需的沥青自身黏弹性能有关。本文选用的两种 SBS 改性沥青中,SBS 掺量较少的改性沥青,其高温黏弹特性相对较差。由其制备而成的 3.5M 沥青胶浆,其推荐矿粉掺量大于 4.0M 沥青胶浆。该结论与矿粉在 3.5M 沥青胶浆中的强化效应更为显著有关,因此,在 3.5M 沥青胶浆体系中需要更多矿粉的掺入。此外,SBS 改性沥青胶浆的推荐矿粉掺量值不随加载应力的变化而改变。

显然,在沥青胶浆体系中,矿粉与沥青的相互协调作用促成矿粉在沥青胶浆中的强化效应。根据矿粉强化效应的变化规律,在沥青混合料配合比设计阶段,对于不同沥青混合料级配类型,其中矿粉掺量应尽量接近其胶浆体系中的推荐掺量值,才能够有效发挥矿粉在其中的强化作用,并确保沥青混合料体系中沥青胶浆的良好流变性能。

4.3 矿粉强化效应的多元线性回归模型

基于改性沥青胶浆 ΔJ_{nr} 指标的分析结果,可知 ΔJ_{nr} 指标的变化规律主要受蠕变应力(σ)、矿粉掺量(F_c)以及改性剂掺量(S_c)的影响。为进一步探究矿粉强化作用 ΔJ_{nr} 指标的发展规律,本文通过构建 ΔJ_{nr} 指标同蠕变应力、矿粉掺量和沥青改性剂掺量的多元线性回归模型,揭示 ΔJ_{nr} 指标随其影响因素的变化规律。根据 4.2 节的分析结果,SBS 改性沥青 ΔJ_{nr} 指标随矿粉掺量的变化分为 2 个阶段,即在 I 阶段时, ΔJ_{nr} 指标受矿粉掺量的影响较为显著,当进入 II 阶段时, ΔJ_{nr} 指标受矿粉掺量的影响较小。因此,在进行 ΔJ_{nr} 指标多元线性回归时,分 I 阶段和 II 阶段进行分析计算,并且在 II 阶段中不考虑矿粉掺量这一影响因素。通过多元线性回归,得到的改性沥青胶浆 I 阶段和 II 阶段 ΔJ_{nr} 指标的多元线性回归模型分别如式 (5)和式(6)所示,同时数据拟合结果如图 7 所示。

改性沥青胶浆 I 阶段:

$$\Delta J_{nr} = 0.0171 \times \sigma - 0.6295 \times S_c + 0.3613 \times F_c + 2.3399 \quad (5)$$

改性沥青胶浆 II 阶段:

$$\Delta J_{nr} = 0.0266 \times \sigma - 0.7296 \times S_c + 3.0517 \quad (6)$$

式中: σ 为 MSCR 试验的蠕变应力,kPa; S_c 为沥青胶浆的 SBS 含量,%; F_c 为沥青胶浆的矿粉掺

量,%。

如图 7 所示,通过 ΔJ_{nr} 指标实测值和预测值的对比可知,改性沥青胶浆 ΔJ_{nr} 指标在 I 阶段和 II 阶段随影响因素的变化规律均得到较好的拟合效果。根据式(5)和式(6)可知,改性沥青胶浆在 II 阶段的回归模型中,矿粉掺量和 SBS 改性剂掺量的拟合参数均大于该影响因素在 I 阶段回归模型中的参数值。可见,矿粉掺量和改性剂掺量在沥青胶浆的 II 阶段中对其矿粉强化效应的影响更为显著。因此,当改性沥青处于 II 阶段时,其矿粉强化效应虽然不受矿粉掺量的影响,但受蠕变应力和 SBS 改性剂掺量的影响更为显著。

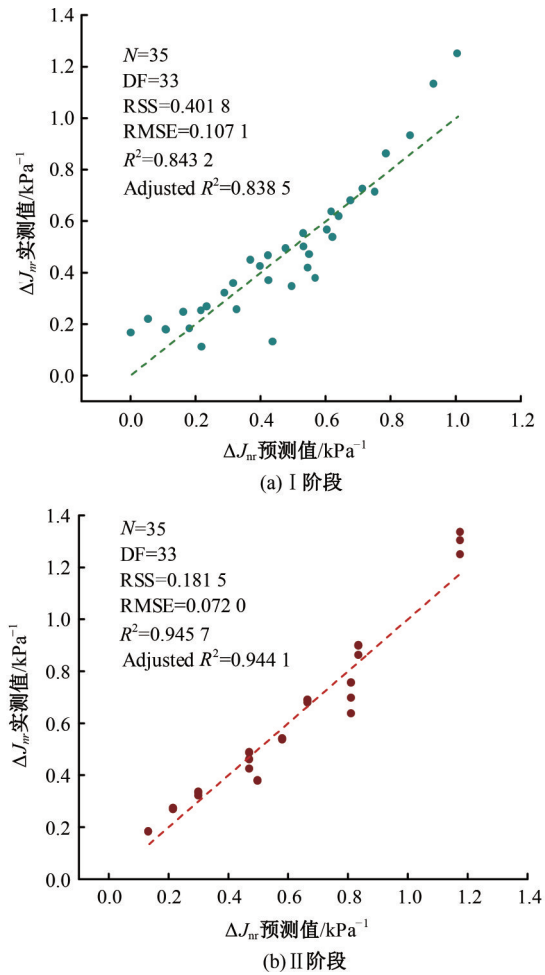


图 7 多元线性回归模型的拟合结果

Fig. 7 Fitting results of the multiple linear regression models

5 结 论

(1) 增加了蠕变应力加载范围的 MSCR 试验能够较好地检测沥青胶浆的高温流变性能。沥青胶浆体系中矿粉的掺加能够显著降低沥青胶浆的

J_{nr} 值,提高沥青胶浆的整体强度,进而改善其高温流变性能。对于SBS改性沥青胶浆, J_{nr} 指标值随蠕变应力的增大而增大,具有显著应力依赖性,并且该应力依赖性会随矿粉掺量的增加而逐渐降低。

(2) 基于沥青胶浆 J_{nr} 指标变化规律,本文提出了能够定量评价矿粉强化效应的指标 ΔJ_{nr} ,即沥青与其对应的沥青胶浆的 J_{nr} 的指标差值。在0.1 kPa时,基质沥青胶浆NM的矿粉强化效应随矿粉掺量的增加呈线性增强的趋势。然而,对于SBS改性沥青胶浆3.5M和4.0M,其矿粉强化效应随矿粉掺量的增加呈现出2个阶段的变化趋势,即矿粉掺量较低的I阶段和矿粉掺量较高的II阶段。在I阶段,矿粉强化效应随矿粉掺量增加而线性增加,当矿粉掺量继续增加至II阶段,矿粉掺量的继续增加对矿粉的强化效应没有显著影响。

(3) SBS改性沥青胶浆的推荐矿粉掺量可根据其矿粉强化效应的变化趋势确定。根据I阶段和II阶段的转折点,计算出3.5M和4.0M的推荐矿粉掺量分别为124.84%和102.30%。工程应用中,改性沥青胶浆3.5M和4.0M的适宜矿粉掺量可分别取120%和100%。此外,3.5M和4.0M胶浆的推荐矿粉掺量不受蠕变应力的影响。

(4) 分别建立了SBS改性沥青胶浆在I阶段和II阶段的矿粉强化效应的多元线性回归模型。根据矿粉强化效应变化趋势,在I阶段,考虑了蠕变应力、矿粉掺量和SBS改性剂的掺量的影响;在II阶段,只考虑蠕变应力和SBS改性剂掺量的影响。此外,蠕变应力和SBS改性剂掺量影响因素对矿粉强化效应的影响在II阶段更加显著。

参考文献:

- [1] You T, Kim Y R, Rami K Z, et al. Multiscale modeling of asphaltic pavements: comparison with field performance and parametric analysis of design variables[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2018, 144(2): No. 04018012.
- [2] 董伟智,张爽,朱福. 基于可拓层次分析法的沥青混合料路用性能评价[J]. 吉林大学学报:工学版, 2021, 51(6): 2137-2143.
Dong Wei-zhi, Zhang Shuang, Zhu Fu. Evaluation of pavement performance of asphalt mixture based on extension analytic hierarchy process[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(6): 2137-2143.
- [3] Guo M, Bhasin A, Tan Y. Effect of mineral fillers adsorption on rheological and chemical properties of asphalt binder[J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 152-159.
- [4] Underwood B S, Kim Y R. Nonlinear viscoelastic analysis of asphalt cement and asphalt mastics[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 16(6): 510-529.
- [5] 李震南,申爱琴,郭寅川,等. 玄武岩纤维沥青胶浆及混合料的低温性能关联性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 146-152.
Li Zhen-nan, Shen Ai-qin, Guo Yin-chuan, et al. Low temperature performance correlation of basalt fiber asphalt mortar and mixture[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 146-152.
- [6] Diab A, You Z. Linear and nonlinear rheological properties of bituminous mastics under large amplitude oscillatory shear testing[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(3): No. 04017303.
- [7] 李松. 沥青混合料高温蠕变性能的多尺度研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2020.
Li Song. Multi-scale study on creep property of asphalt mixture at high temperature[D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2020.
- [8] 詹小丽,张肖宁,王端宜,等. 基于DMA方法的沥青胶浆微观结构[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(4): 916-920.
Zhan Xiao-li, Zhang Xiao-ning, Wang Duan-yi, et al. Microstructure of asphalt mastic using dynamic mechanical analysis[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(4): 916-920.
- [9] Cheng Y, Tao J, Jiao Y, et al. Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic[J]. Construction and Building Materials, 2016, 118: 268-275.
- [10] Zhang J, Liu G, Hu Z, et al. Effects of temperature and loading frequency on asphalt and filler interaction ability[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124: 1028-1037.
- [11] 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 Ding-bang, Li Zhong-jie, et al. Micro-scratch test and parameter analysis of asphalt

- mixture interfacial transition zone[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(1): 78-84.
- [12] 熊锐, 乔宁, 褚辞, 等. 掺盐沥青胶浆低温流变及粘附特性[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2020, 50(1): 183-190.
- Xiong Rui, Qiao Ning, Chu Ci, et al. Investigation on low-temperature rheology and adhesion properties of salt-doped asphalt mortar[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(1): 183-190.
- [13] Underwood B S, Kim Y R. Microstructural investigation of asphalt concrete for performing multiscale experimental studies[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2013, 14(5): 498-516.
- [14] Wang H, Liu X, Apostolidis P, et al. Investigating the high-temperature and low-temperature performance of warm crumb rubber - modified bituminous binders using rheological tests[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 2021, 147(4): No. 04021067.
- [15] Vignali V, Mazzotta F, Sangiorgi C, et al. Rheological and 3D DEM characterization of potential rutting of cold bituminous mastics[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 73: 339-349.
- [16] Li Q, Li G, Ma X, et al. Linear viscoelastic properties of warm-mix recycled asphalt binder, mastic, and fine aggregate matrix under different aging levels [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 99-109.
- [17] 王志臣, 孙雅珍, 桑海军, 等. 沥青与矿粉的交互作用评价及影响机理分析[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2023, 39(2): 339-347.
- Wang Zhi-chen, Sun Ya-zhen, Sang Hai-jun, et al. Evaluation of the interaction between asphalt and mineral powder and analysis of the influence mechanism [J]. *Journal of Shenyang University of Architecture (Natural Science Edition)*, 2023, 39(2): 339-347.
- [18] Domingos M D I, Faxina A L. Susceptibility of asphalt binders to rutting: literature review[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(2): No. 04015134.
- [19] Do N D, Liao M C, Mamuye Y, et al. Characteristics of alkali-activated slag filler and its effects on rheology of asphalt mastic[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(4): No. 04023003.
- [20] Li S, Ni F, Dong Q, et al. Effect of filler in asphalt mastic on rheological behaviour and susceptibility to rutting[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, 22(1): 87-96.
- [21] Tan Y, Li Z, Zhang X, et al. Research on high- and low-temperature properties of asphalt-mineral filler mastic[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(8): 811-819.
- [22] Tabatabaee N, Tabatabaee H A. Multiple stress creep and recovery and time sweep fatigue tests: crumb rubber modified binder and mixture performance[J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2180(1): 67-74.
- [23] 郭咏梅, 许丽, 吴亮, 等. 基于MSCR试验的改性沥青高温性能评价[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(1): 154-158.
- Guo Yong-mei, Xu Li, Wu Liang, et al. High temperature performance evaluation of modified asphalt based on multiple stress creep recover test[J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(1): 154-158.
- [24] 罗蓉, 许苑, 刘涵奇, 等. DCLR改性沥青的流变力学性质[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(6): 165-171.
- Luo Rong, Xu Yuan, Liu Han-qi, et al. Rheological mechanical properties of DCLR-modified asphalt binders[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(6): 165-171.
- [25] Angelo J A. The relationship of the MSCR test to rutting[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2011, 10(s1): 61-80.
- [26] Domingos M, Faxina A L. Literature review of the multiple stress creep and recovery, performance-related test[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 2021, 147(1): No. 03121001.
- [27] Liao M C, Airey G, Chen J S. Mechanical properties of filler-asphalt mastics[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2013, 6(5): 576-581.
- [28] 郑传峰, 冯玉鹏, 郭学东, 等. 粉胶比对沥青胶浆低温黏结强度的影响[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2016, 46(2): 426-431.
- Zheng Chuan-feng, Feng Yu-peng, Guo Xue-dong, et al. Effect of filler-to-bitumen ratio on low-temperature cohesive strength of asphalt mortar[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2016, 46(2): 426-431.
- [29] 张亚刚, 林梅, 薛瑛, 等. 基于灰熵关联的沥青胶浆高低温性能研究[J]. *公路*, 2023, 68(1): 345-348.
- Zhang Ya-gang, Lin Mei, Xue Ying, et al. Research on high and low temperature performance of asphalt mastic based on ash-entropy correlation[J]. *High-*

- ways, 2023, 68(1): 345-348.
- [30] Chen M, Javilla B, Hong W, et al. Rheological and interaction analysis of asphalt binder, mastic and mortar[J]. *Materials*, 2019, 12(1): 128-150.
- [31] 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*, 2015, 2(6): 373-381.
- [32] 王志臣, 郭乃胜, 赵颖华, 等. 基于细观力学的沥青胶浆动态剪切模量预测[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2017, 47(2): 459-467.
- Wang Zhi-chen, Guo Nai-sheng, Zhao Ying-hua, et al. Dynamic shear modulus prediction of asphalt mastic based on micromechanics[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(2): 459-467.
- [33] Anderson D, Bahia H, Dongre R. Rheological Properties of Mineral Filler-asphalt Mastics and its Importance to Pavement Performance[M]. West Con-hawken: ASTM International, 1992.
- [34] Qiu H, Tan X, Shi S, et al. Influence of filler-bitumen ratio on performance of modified asphalt mortar by additive[J]. *Journal of Modern Transportation*, 2013, 21(1): 40-46.
- [35] Underwood B S, Kim Y R. Experimental investigation into the multiscale behaviour of asphalt concrete [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2011, 12(4): 357-370.
- [36] Wang H, Alqadi I, Faheem A, 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, 2: 33-39.
- [37] Hajikarimi P, Fakhari T F, Moghadas N F, et al. Mechanical behavior of polymer-modified bituminous mastics: experimental approach[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 31(1): No. 04018337.
- [38] 交通部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [39] Zeng M, Wu C. Effects of type and content of mineral filler on viscosity of asphalt mastic and mixing and compaction temperatures of asphalt mixture[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2008, 2051(1): 31-40.
- [40] 刘安刚, 周庆福, 胡义成, 等. 基于MSCR与测力延度试验的阻燃改性沥青高低温性能评价[J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2022, 46(4): 713-717.
- Liu An-gang, Zhou Qing-fu, Hu Yi-cheng, et al. Evaluation of high and low temperature performance of flame-retardant modified asphalt based on MSCR and force ductility test[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition)*, 2022, 46(4): 713-717.