

许新权,唐胜刚,杨 军. 粉胶比对沥青胶浆高低温性能的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2020,40(4):14-26.

XU Xin-quan, TANG Sheng-gang, YANG Jun. Influence of filler-asphalt ratio on high-and-low-temperature performance of asphalt mortar [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(4): 14-26.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.04.002

粉胶比对沥青胶浆高低温性能的影响

许新权^{1,2}, 唐胜刚¹, 杨 军¹

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420)

摘 要: 为了研究粉胶比对沥青胶浆高低温性能的影响, 以及采用水泥、消石灰替代部分矿粉后沥青胶浆的高低温性能变化, 采用布氏黏度(RTV)试验研究了不同温度、粉胶比条件下沥青胶浆布氏黏度变化情况。通过动态剪切流变(DSR)试验测试复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 、车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 等指标, 分析沥青胶浆的高温流变特性; 采用弯曲梁流变(BBR)试验测试不同温度、粉胶比和水泥、消石灰替换量的沥青胶浆的劲度模量 S 和蠕变速率 m , 分析不同沥青胶浆的低温流变特性, 并且通过引入低温系数($\lambda=S/m$)进一步评价沥青胶浆的低温性能, 从而全面分析不同粉胶比以及不同水泥、消石灰替换量对沥青胶浆的高温性能和低温性能的影响。研究表明: 增大粉胶比能提高沥青胶浆的高温稳定性, 降低感温性, 但同时也会降低其低温抗裂性, 建议合理的粉胶比范围为 1.0~1.3; 用消石灰或水泥替代部分矿粉具有同样的效果, 均可提升沥青胶浆的高温稳定性, 但低温性能也会有所降低; 当采用水泥替代时, 建议水泥用量为矿粉质量的 20% 以获得较好的经济性和改善效果; 采用消石灰替代时, 建议消石灰用量为矿粉质量的 20%, 以免对沥青胶浆的低温性能产生较大不利影响, 必要时应根据实际工程情况加以确定。

关键词: 道路工程; 沥青胶浆; 粉胶比; 高温稳定性; 低温抗裂; 水泥; 消石灰

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1671-8879(2020)04-0014-13

Influence of filler-asphalt ratio on high-and-low-temperature performance of asphalt mortar

XU Xin-quan^{1,2}, TANG Sheng-gang¹, YANG Jun¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Guangdong Hualu Transport Technology Co. Ltd, Guangzhou 510420, Guangdong, China)

Abstract: In order to study the influence of the filler-asphalt ratio on the high-and-low-temperature performance of asphalt mortar, and change of high-and-low-temperature properties of asphalt mortar after replacing some mineral powder with cement or hydrated lime, the Brookfield viscometer (RTV) was used to study the changes of RTV of asphalt mortar under different temperatures and filler-asphalt ratios, the complex shear modulus G^* , phase angle δ , rutting

收稿日期: 2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778140); 广东省交通运输厅科技计划项目(2016-02-009)

作者简介: 许新权(1981-), 男, 江苏徐州人, 高级工程师, 工学博士研究生, E-mail: xuxinquan998@126.com。

通讯作者: 杨 军(1968-), 女, 江苏扬州人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: yangjun@seu.edu.cn。

factor $G^*/\sin(\delta)$ and other indicators of asphalt mortar under different conditions were tested, by using the dynamic shear rheometer (DSR) to study the rheological properties of asphalt mortar at high temperature, and the bending beam rheometer (BBR) was used to test the stiffness modulus S and creep rate m of asphalt mortars with different temperatures, filler-asphalt ratios and substitutions of cement or hydrated lime in order to study the low-temperature rheological properties of different asphalt mortars, the low-temperature coefficient $\lambda=S/m$ was introduced to further evaluate the low-temperature performance of asphalt mortar, so as to comprehensively study the effects of different filler-asphalt ratios and different cement or hydrated lime substitutions on the high-and-low-temperature performance of asphalt mortar. The results show that increasing the filler-asphalt ratio can improve the high-temperature stability of asphalt mortar, reduce the temperature sensitivity of asphalt mortar, but also reduce the low-temperature cracking resistance of asphalt mortar, the recommended reasonable filler-asphalt ratio range is 1.0 to 1.3. Replacing some of the mineral powder with hydrated lime or cement has the same effect, which can improve the high-temperature stability of asphalt mortar but decrease the low-temperature performance. When using cement, it is recommended that the amount of cement should be 20% of the quality of mineral powder to obtain better economy and effect. When adopting hydrated lime, it is suggested that the amount of hydrated lime should be 20% of the quality of mineral powder, so that it will not have a more adverse impact on the low-temperature performance of asphalt mortar. If necessary, it should be determined according to the actual engineering situation. 9 tabs, 24 figs, 35 refs.

Key words: road engineering; asphalt mortar; filler-asphalt ratio; high-temperature stability; low temperature cracking resistance; cement; hydrated lime

0 引言

沥青胶浆是沥青与矿粉初级混合后得到的产物,有着黏结粗细集料并填充集料空隙的作用。根据胶浆理论,沥青混合料为三级空间网状分散体系,由沥青与填料(主要为矿粉)结合成为初级分散系,即沥青胶浆,再由沥青胶浆黏结、填充细集料,组成以细集料为主要分散相的沥青砂浆,最终由沥青砂浆黏结粗细集料并填充其空隙,形成沥青混合料^[1]。Zhan 等通过分析沥青胶浆的黏弹性和混合料动态模量之间的关系发现,沥青胶浆的黏弹性和混合料动态模量之间相关性较强,沥青胶浆的黏弹性可以很好预测混合料的动态模量^[2]。Arshadi 在沥青胶浆黏弹性与沥青混合料抗车辙性能的研究中发现,沥青胶浆中的黏性成分可以有效提高混合料的抗车辙性能,弹性成分具有同样的效果,但相比黏性成分作用要小^[3]。这表明,沥青胶浆作为混合料中的初级分散体系,对混合料的高低温性能有着十分重要的影响。

矿粉是沥青胶浆中的另一个重要组成部分。研究表明,在沥青混合料中,沥青只有吸附在填料(主

要是矿粉)表面形成薄膜,并且和填料混合形成胶浆后,才能对粗、细集料产生较好的黏附作用。同时研究表明,沥青中的某些酸性成分会和矿粉发生化学反应,从而提高沥青胶浆的黏结力,使胶浆可以更好黏附集料^[4]。填料的比表面积越大,则裹敷的沥青膜越薄,结构沥青比例也就越高,集料之间的黏结性也就越强^[5]。因此矿粉和沥青的比例在很大程度上影响着沥青胶浆的性能,进而影响沥青混合料的性能。

近些年,沥青胶浆的性能越来越受到关注,许多学者针对沥青胶浆性能的影响因素进行了研究,通过不同的方法来提高沥青胶浆的性能,从而改善沥青混合料的性能。这方面的研究主要可以分为2个方向。一个方向是针对沥青胶浆中填料与沥青的比例,即粉胶比进行研究^[6-8]。这类研究主要是通过研究不同的粉胶比对沥青胶浆性能的影响,从而确定沥青胶浆适宜的粉胶比^[9-10]。Xing 等通过研究高黏沥青的流变特性发现,车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 随着粉胶比的增加在增大,不同沥青胶浆最大 $G^*/\sin(\delta)$ 值对应不同的粉胶比^[11]。郑传峰等在粉胶比对沥青胶浆低温黏结强度的影响研究中表明,合适的粉

胶比可以有效保证沥青胶浆的低温黏度,较大的粉胶比会导致集料附聚,从而降低胶浆的低温黏结强度^[12]。另一个方向是针对沥青胶浆中某一组分进行研究,如研究不同的沥青或者填料下沥青胶浆性能的变化。其中沥青类研究较多的为改性沥青,如 SBS 改性沥青、橡胶改性沥青,活化煤矸石粉等^[13-16]。熊锐等对煤矸石粉改性沥青胶浆进行研究,发现煤矸石粉可以很好均衡沥青胶浆的高低温性能,并且可以降低沥青胶浆的感温性^[17]。填料类方面的研究可以分为 2 种。一种是通过研究不同石料来源的矿粉对沥青胶浆性能影响,从而选择合适的矿粉提高沥青胶浆性能^[18]。谢博等对凝灰岩矿粉与石灰岩矿粉沥青胶浆性能进行研究,发现凝灰岩沥青胶浆的高温性能优于石灰岩沥青胶浆^[19]。另一种是通过采用其他填料来代替部分矿粉,从而提高沥青胶浆的性能,在工程中应用较多的是水泥和消石灰^[20-21]。另外,也有学者采用稻壳灰、陶瓷、钢渣等材料代替矿粉也都取得了不错的效果^[22]。Mistry 等研究发现,稻壳灰代替矿粉可有效降低密级配沥青混合料的水损害^[23]。近年来,也有学者对纤维沥青胶浆进行了研究,通过在沥青胶浆中加入纤维,利用纤维的加筋效果来提高沥青胶浆的黏性。

如覃潇等研究发现,玄武岩纤维可以有效提高沥青胶浆的极限拉力和高温流变性^[24-26]。

虽然目前国内外针对沥青胶浆性能方面已经有了较多的研究成果,但大多数研究是针对沥青胶浆某一方面性能的改善进行研究,并且很多新材料的应用,如陶瓷等,也仅限于试验研究,无法对工程实际起到指导和参考作用。因此,本文在前人的基础上,针对目前工程实践中常采用的调整粉胶比以及采用水泥、消石灰替代部分矿粉的方法进行研究,对不同粉胶比沥青胶浆的高、低温流变特性进行评价,研究粉胶比对沥青胶浆性能的影响,并对水泥、消石灰替代部分矿粉后的沥青胶浆的高低温性能进行评价,建议合适粉胶比范围,推荐适宜的水泥或消石灰替换矿粉比例,研究结果可为工程实际应用提供参考。

1 试验材料

1.1 沥青

本文采用的沥青为 A 级 70 号道路石油沥青,相关技术指标检验参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行,主要指标如表 1 所示。

表 1 沥青主要性能指标

Tab. 1 Main performance indicators of asphalt

性能指标	针入度(25℃,100 g,5 s)/ 0.1 mm	延度(15℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	延度(10℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	软化点(环球法)/℃	密度(15℃)/ (g·cm ⁻³)	针入度 指数
技术要求	62	>150	32.1	48.5	1.032	-1.317

1.2 矿粉

本文采用的矿粉为石灰石粉,相关技术指标参照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005),筛分及表观相对密度如表 2 所示。

表 2 填料筛分及表观相对密度测试结果

Tab. 2 Test results of packing screening and apparent relative density

性能指标	表观相对 密度	不同筛孔尺寸下(mm)的通过率/%			
		0.6	0.3	0.15	0.075
技术要求	2.853	100.0	100.0	100.0	98.6

1.3 胶浆制备

采用人工搅拌进行沥青胶浆的制备,如图 1 所示。先将矿粉放入烘箱中在 105℃下加热 4 h 以除去水分,之后将沥青和矿粉统一加热到 150℃恒温,将称量好的矿粉分批加入到一定质量的沥青中,并不停搅拌,以保证沥青和矿粉混合。待矿粉完全加入到沥青中后,继续搅拌 10 min,并趁热制备试验所需的样品,制成的样品如图 2 所示。



图 1 沥青胶浆的制备

Fig. 1 Preparation of asphalt mortar

2 试验方法

2.1 旋转黏度试验

试验采用的是美国 Brookfield DV-II 型旋转黏度仪,试验设备见图 3。试验方法参照美国试验与材料协会标准(ASTM)方法,在 110℃、135℃及



图 2 沥青胶浆试样
Fig. 2 Samples of asphalt mortar



图 4 装有沥青胶浆试样的盛样筒
Fig. 4 Samples holder holding with asphalt mortar



图 3 Brookfield DV-II 型旋转黏度仪
Fig. 3 Brookfield DV-II rotating viscometer



图 5 转子插入试样筒
Fig. 5 Put rotor into sample holder

175 ℃ 下进行布氏黏度试验。

首先,将沥青胶浆试样在烘箱中加热到软化点以上(100 ℃ 左右)保温 30~60 min 备用,并将转子和盛样筒放在已控温至试验温度的烘箱中保温,维持 1.5 h;之后调平仪器,并将温度设置到试验要求的温度,预热 5 min;取出胶浆试样,适当搅拌后加入盛样筒,装有沥青胶浆试样的盛样筒如图 4 所示。之后将盛样筒和转子安装在黏度计上,使转子插入沥青胶浆液面中至规定高度,如图 5 所示。接着使胶浆试样在恒温容器中保温,达到所需平衡温度(不少于 15 min)后打开仪器读数,如图 6 所示。当仪器读数的小数点后 2 位稳定后进行读数,每个试验温度下每隔 60 s 读 1 次,以 3 次读数的平均值作为测定值。

2.2 流变试验

采用动态剪切流变(DSR)试验测试沥青胶浆的高温流变性能,试验设备如图 7 所示。以复数剪切



图 6 试验中的旋转黏度仪
Fig. 6 Rotating viscometer in test

模量 G^* 、相位角 δ 、车辙因子 $G^* / \sin(\delta)$ 作为评价高温性能的指标,测试在既定条件下沥青胶浆的 G^*

和相位角 δ 来表征沥青胶浆的黏弹性性质,DSR 测试原理如图 8 所示。其中, δ 又称相位差,是峰值剪应变与峰值剪应力的时间滞后,表征材料的黏弹性比例。 δ 越小,沥青胶浆的弹性越好; δ 越大,沥青胶浆的黏性越好。 G^* 是峰值剪应力与峰值剪应变的比值,表征材料受重复应力作用时抵抗变形的能力,由表征弹性性能(变形可恢复)的储存模量 G' 和表征黏性性质(变形不可恢复)的损耗模量 G'' 两部分构成。同时,也可通过沥青胶浆的车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 来表征沥青路面高温抗变形能力,其值越大,表示沥青路面抗车辙变形能力越强。各参数计算如下

$$G^* = \tau_{\max} / \gamma_{\max} \quad (1)$$

式中: τ_{\max} 为峰值剪应力(kPa); γ_{\max} 为峰值剪应变。

$$G^* = G' + iG'' \quad (2)$$

式中: i 为虚数单位, $i^2 = -1$; G' 、 G'' 分别为储能模量、损耗模量。

$$G' = G^* \cos(\delta) \quad (3)$$

$$G'' = G^* \sin(\delta) \quad (4)$$

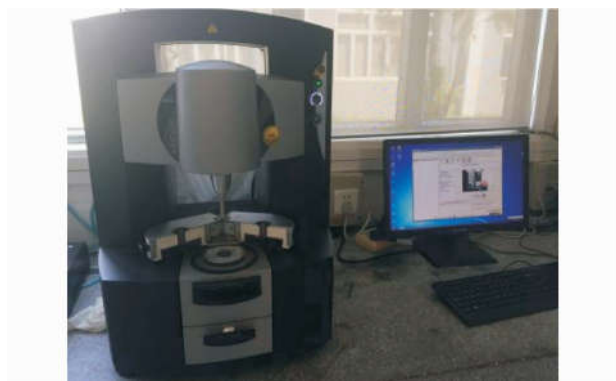


图 7 Kinexus 动态剪切流变仪

Fig. 7 Kinexus DSR

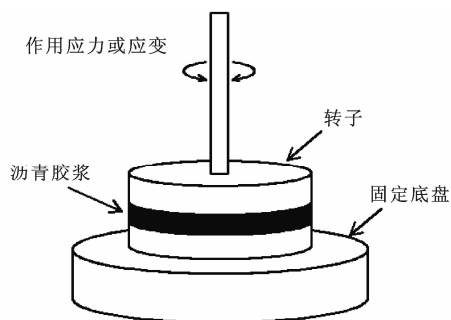


图 8 DSR 工作原理示意

Fig. 8 Schematic of DSR working principle

本文测试不同粉胶比的沥青胶浆在不同温度下的各项指标,研究粉胶比、温度对沥青胶浆高温性能的影响。测试荷载为 100 Pa,频率为 1.59 Hz(对应角速度为 10 rad/s);试样直径为 25 mm,厚度为 1 mm。

首先,将试验板固定于试验机上调整和清洁表面,并将沥青胶浆加热到流动状态用来浇筑试件,加热温度不宜高于 135 °C;之后将沥青胶浆浇筑到试验板中心处,待沥青变硬后将试验板装回流变仪,如图 9 所示;移动试验板挤压试件,接着加热试件修整器,修整周边多余的沥青胶浆,并调整间隙到试验间隙,如图 10 所示;调整好间隙后,将试件温度上升到试验温度 ± 0.1 °C,保温 10 min,进行试验,数据记录和计算均由系统完成。



图 9 将浇筑好沥青胶浆试样的试验板装回流变仪

Fig. 9 Install test plate with asphalt mortar back into rheometer



图 10 移动试验板挤压试样

Fig. 10 Move test plate to squeeze specimen

2.3 蠕变劲度试验

由于沥青常规三大技术指标的测试受人为因素影响严重且制样误差较大。本文采用 BBR 测试不同粉胶比沥青胶浆的劲度模量 S 和蠕变速率 m ,研究粉胶比对沥青胶浆低温性能的影响,试验仪器如图 11 所示。

测试温度为 -6 °C 和 -12 °C,误差精确至 ± 0.1 °C,测定加载 60 s 时 S 、 m 值以及 S 值随加载时间变化的速率等指标,研究不同粉胶比沥青胶浆的低温流变性能。其中 S 值越大,低温抗裂性越差; m 值越大,在低温环境中越不易开裂。试验步



图11 CANNON 弯曲梁流变仪

Fig. 11 CANNON BBR

骤具体如下:首先,将沥青胶浆在烘箱加热到流动状态以待制备试件,之后将金属模具清洗干净并用橡胶环将模具固定,在内表面涂上一层石油基润滑脂,方便脱模;接着在模具中浇筑沥青胶浆,浇筑好的试件如图12所示,待冷却到室温后用加热的刀片切平高出模具顶端的沥青试样;浇筑完的试件达到脱模条件后进行脱模,脱模时尽量小心避免试件变形,脱模的试件如图13所示;试件脱模后放入试验温度下的恒温水箱中,恒温保持 60 ± 5 min 后,将试验条件输入计算机并手动移动压头接触试件,安放好的试件如图14所示;之后开启自动试验系统,数据记录和计算由系统完成。



图12 浇筑好的沥青胶浆小梁试件

Fig. 12 Poured asphalt mortar beam simple



图13 脱模后的小梁试件

Fig. 13 Demoulded beam simple

3 结果与分析

3.1 黏度特性分析

不同温度 T 和粉胶比 r 下,沥青胶浆的布氏黏度测试结果如图15所示,黏温曲线如图16所示。

由图15可以看出,不同温度下沥青胶浆的布氏

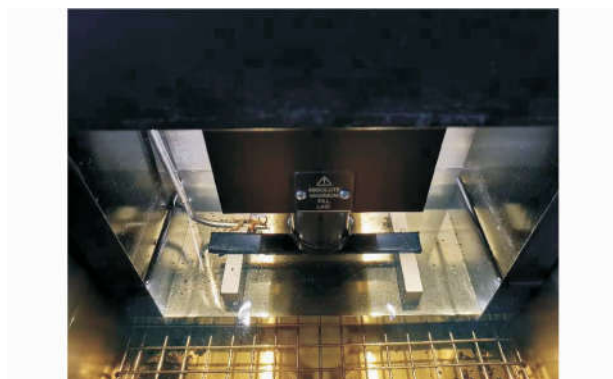


图14 安放好的小梁试件

Fig. 14 Placed beam simple

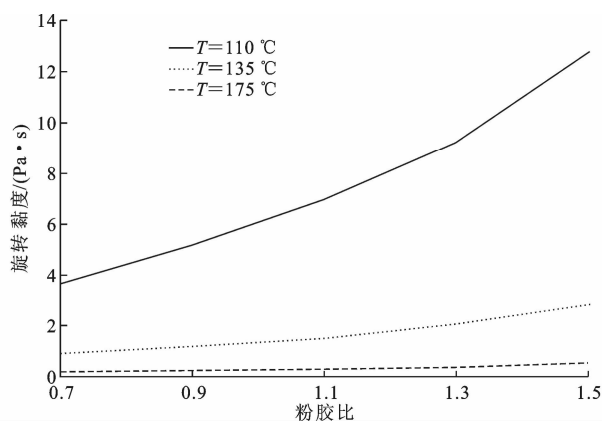


图15 粉胶比对沥青胶浆布氏黏度的影响

Fig. 15 Effect of powder binder ratios on Brookfield viscosities of asphalt mortar

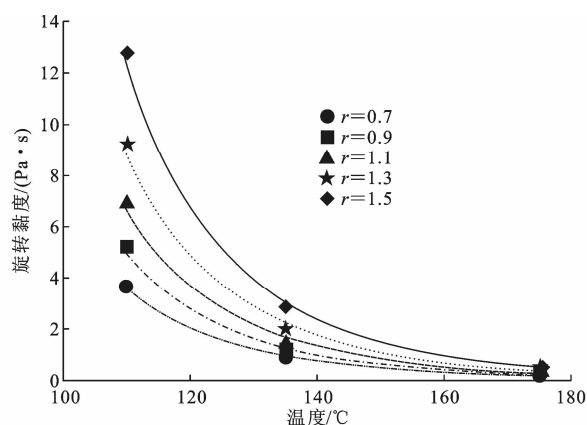


图16 不同粉胶比下的沥青胶浆黏温曲线

Fig. 16 Viscosity temperature curves of asphalt mortar with different filler-asphalt ratios

黏度随着粉胶比的增大而增大,但其变幅具有明显差异。当粉胶比在 $0.7 \sim 1.1$ 之间,沥青胶浆的布氏黏度值随粉胶比变化的幅度较小,近似成线性关系,属于缓慢增长阶段;当粉胶比大于 1.1 时,布氏黏度增长加快,属于迁移增长阶段;当粉胶比从 1.3 上升到 1.5 时,黏度值随粉胶比的增大有较大提高,属于

迅速增长阶段。这说明沥青胶浆的高温稳定性随着粉胶比的增大而不断提升。其原因在于沥青与矿料混合后,沥青在矿料表面形成了一层结构薄膜,膜内的沥青被称为结构沥青,结构沥青不同于膜外的自由沥青,可以提供较强黏结力和稳定性,且矿粉表面有很多微孔隙,有利于吸收沥青中的轻质组分。所以增大粉胶比,就是增大了矿粉的比表面积,更多的自由沥青被矿粉吸附成为结构沥青,增加了沥青的黏度,从而改善了胶浆的高温稳定性^[27-28]。而当粉胶比过大时,多余的矿粉反而起阻隔作用,少量矿粉发生“团聚”现象,填料颗粒之间的摩阻力上升,布氏黏度迅速增大^[29]。为保证沥青胶浆有足够的高温性能,沥青胶浆粉胶比应大于缓慢增长阶段,即取 1.1 以上较适宜。

由图 16 可知,随着温度的升高,沥青胶浆布氏黏度均发生明显下降,黏温曲线符合幂函数的形式,即

$$y=Cx^D \quad (5)$$

式中: y 为黏度($\text{mPa} \cdot \text{s}$); x 为温度($^{\circ}\text{C}$); C 、 D 为回归系数。

系数 C 反映了沥青胶浆黏度, C 越大黏度越大;系数 D 反映了沥青胶浆的感温性, D 越大感温性越强。目前评价沥青感温性的指标主要有针入度指数、针入度黏度指数与黏温指数。由于针入度受人为操作及制样影响较大,试验效果不佳。因此采用黏温指数 V_{TS} 更能准确表征沥青的感温性,其计算如下

$$V_{\text{TS}} = \frac{\lg(\lg \sigma_{T_1}) - \lg(\lg \sigma_{T_2})}{\lg(T_1 + 273.13) - \lg(T_2 + 273.13)} \quad (6)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为沥青黏度的 2 个测试温度,本文 $T_1 = 135^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 110^{\circ}\text{C}$; σ_{T_1} 、 σ_{T_2} 分别为 T_1 、 T_2 下的黏度值。

V_{TS} 绝对值越大,沥青的感温性越强。 V_{TS} 值随粉胶比的变化情况如图 17 所示。由图 17 可知,粉胶比增加, V_{TS} 绝对值变小,即感温性减弱。加入的矿粉发挥了体积增强以及物化反应作用,部分抵消了沥青黏度的降低,因而表现为添加填料后感温性降低^[30]。

由图 17 还可发现,随着粉胶比增加,沥青胶浆的黏温指数减小速率逐渐变缓,在 1.1 处出现明显拐点。当粉胶比从 0.7 上升到 1.1 时, V_{TS} 值迅速下降,表明此时增大粉胶比可以很好地降低胶浆的感温性;当粉胶比大于 1.1 时, V_{TS} 值下降幅度明显降低,基本不随粉胶比发生变化,说明此时增大粉胶比

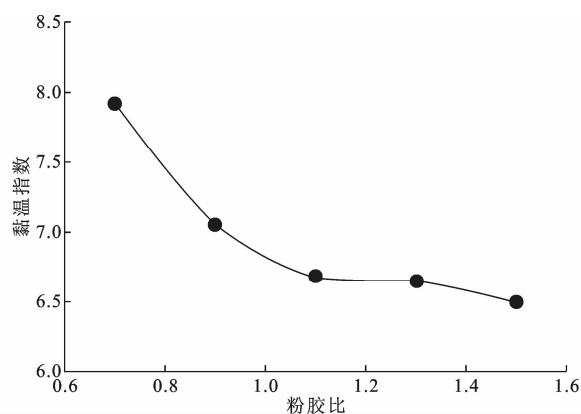


图 17 沥青胶浆的黏温指数随粉胶比的变化

Fig. 17 Changes of viscosity-temperature indexes of asphalt mortar with filler-asphalt ratios

的作用在迅速减小。因此,为了有效改善沥青胶浆感温性,建议粉胶比应在 1.1 以上。

3.2 高温性能分析

3.2.1 复数模量和相位角

高温性能分析通过 DSR 试验实现,不同温度和粉胶比下沥青胶浆的复数模量值如表 3 所示。可见,复数模量均随粉胶比的增大而增大,说明增大粉胶比可以提高沥青胶浆的高温稳定性。这与第 3.1 节的结果一致。并且,随着温度的增大,复数模量的增大速率在不断减小,这表明,粉胶比改善高温稳定性的效果会受到温度的影响,温度越高其影响越明显。

表 3 不同温度和粉胶比下沥青胶浆的 G^* 值

Tab. 3 G^* values of asphalt mortar with different filler-asphalt ratios at different temperatures

粉胶比	不同温度($^{\circ}\text{C}$)下的 G^* /kPa			
	58	64	70	76
0.7	6.814 4	2.983 0	1.379 4	0.695 7
0.9	8.229 1	3.586 7	1.688 3	0.863 5
1.1	9.453 6	4.479 0	2.070 1	1.048 7
1.3	10.652 3	4.800 6	2.301 4	1.158 7
1.5	12.885 6	5.744 1	2.732 1	1.381 4

由表 3 可看出,沥青胶浆的 G^* 均随温度的升高而不断减小,且减小的速率逐渐变缓,在 64°C 时发生明显转折。这是因为随着外界温度的变化,沥青会表现出 3 种状态(玻璃态、高弹态及黏流态):玻璃态下沥青脆,容易发生低温开裂;高弹态下复合模量大,变形能力强;黏流态下黏结力大幅降低,抗变形能力逐渐丧失。在高温条件下,分子动能增加,沥青会从高弹态变为黏流态,黏结力降低,抵抗变形能力减弱,具体表现为 G^* 的减小^[31]。在 76°C 时,不同粉胶比沥青胶浆的 G^* 基本一致,这是因为在此温度下沥青以黏性为主,而粉胶比对黏性的影响很小。

不同温度和粉胶比下沥青胶浆的相位角 δ 如表 4 所示。由表 4 可知,同一温度下 δ 随粉胶比的变化幅度很小,大约在 0.5° 左右,说明增大粉胶比并不能改变沥青本身的黏弹性成分比例,这与沥青的性质有关,与矿粉替换量无关。同一粉胶比下沥青胶浆在低温时 δ 较小,表明此时沥青胶浆以弹性为主;随着温度的增加, δ 逐渐增大,此时黏性起主要作用。

表 4 不同温度和粉胶比下沥青胶浆的 δ 值
Tab. 4 δ values of asphalt mortar with different filler-asphalt ratios at different temperatures

粉胶比	不同温度($^\circ\text{C}$)下的 $\delta/^\circ$			
	58	64	70	76
0.7	86.86	87.85	88.57	89.05
0.9	86.74	87.75	88.49	88.99
1.1	86.91	87.92	88.63	89.13
1.3	87.00	87.95	88.55	88.81
1.5	87.15	88.09	88.70	89.04

3.2.2 储能模量和损耗模量

储能模量是表征沥青胶浆弹性(变形可恢复)的指标,其与黏性模量的比例越大,沥青胶浆的弹性越好。损耗模量表征沥青胶浆抵抗疲劳开裂(变形不可恢复)的指标,是沥青胶浆在循环荷载作用一周期内损失的能量,其与弹性模量的比例越小,沥青的抗变形能力越强。不同温度沥青胶浆的储能模量 G' 、损耗模量 G'' 随粉胶比的变化如表 5 和表 6 所示。

表 5 不同温度和粉胶比下沥青胶浆的 G' 值
Tab. 5 G' values of asphalt mortar with different filler-asphalt ratios at different temperatures

粉胶比	不同温度($^\circ\text{C}$)下的 G'/kPa			
	58	64	70	76
0.7	0.373 264 96	0.111 909 55	0.034 423 78	0.011 534 61
0.9	0.467 964 55	0.140 813 18	0.044 489 10	0.015 220 84
1.1	0.509 591 91	0.162 564 75	0.049 493 47	0.015 923 23
1.3	0.557 498 31	0.171 725 22	0.058 235 94	0.024 063 80
1.5	0.640 689 74	0.191 448 64	0.061 984 06	0.023 144 50

表 6 不同温度和粉胶比下沥青胶浆的 G'' 值
Tab. 6 G'' values of asphalt mortar with different filler-asphalt ratios at different temperatures

粉胶比	不同温度($^\circ\text{C}$)下的 G''/kPa			
	58	64	70	76
0.7	6.804 169 36	2.980 900 07	1.378 970 40	0.695 604 37
0.9	8.215 783 35	3.583 934 78	1.687 713 72	0.863 365 84
1.1	9.439 855 35	4.476 048 89	2.069 508 25	1.048 579 11
1.3	10.637 701 40	4.797 527 57	2.300 663 06	1.158 450 10
1.5	12.869 662 16	5.740 908 66	2.731 396 78	1.381 206 10

由表 5 和表 6 可知,沥青胶浆的 G' 和 G'' 均随粉胶比的增大而上升,而上升的幅度受温度影响,温度越高,上升的幅度越小,到 70°C 以上时已经不明显了。说明在较低温度时增大粉胶比能显著增大沥青胶浆的弹性模量和黏性模量,提高其高温抗车辙能力;但当温度达到 70°C 以上时,这种作用将会很小。同一温度下沥青胶浆的 G'' 明显大于 G' ,说明沥青胶浆的黏性成分大于弹性成分。沥青胶浆的 G' 和 G'' 均随温度的升高而减小,且减小的速率逐渐降低,在 64°C 附近开始出现明显变化。这是因为温度升高,沥青会从高弹态变为黏流态,黏结力降低,所以沥青胶浆的 G' 和 G'' 均减小。温度为 76°C 时,不同粉胶比沥青胶浆的 G' 基本一致,此时沥青胶浆以黏性为主,弹性比例很小。

3.2.3 车辙因子

路面在车辆行驶过程中会出现 2 种变形:可恢复变形和永久变形。车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 表征沥青在重复荷载作用下抵抗永久变形的能力,并以此对沥青进行分级。也有学者认为采用其他指标(零剪切黏度、改进型车辙因子等)评价更加合理,且其合理性还要经过高温性能的检验,因此,本文采用车辙因子研究沥青胶浆的高温抗车辙性能。 $G^*/\sin(\delta)$ 值越大,沥青胶浆的高温抗车辙能力、抗疲劳开裂能力越强。沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 随粉胶比和测试温度的变化分别如图 18 和图 19 所示。

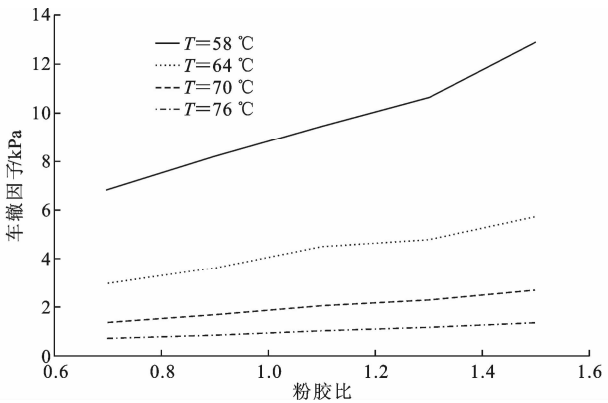


图 18 沥青胶浆的车辙因子随粉胶比的变化
Fig. 18 Changes of rut factors of asphalt mortar with filler-asphalt ratios

由图 18 可知,同一温度下,沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 随粉胶比的增加而增加,但随着温度的升高,这种趋势在不断变缓。这说明,在较低温度时,增大粉胶比能显著提高沥青胶浆的高温抗车辙性能。

由图 19 可知,不同沥青胶浆的 $G^*/\sin(\delta)$ 均随温度的升高逐渐减小,即沥青胶浆的高温抗车辙性

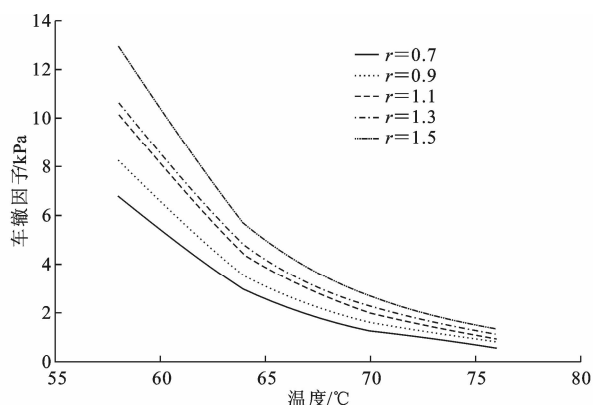


图 19 沥青胶浆的车辙因子随温度的变化

Fig. 19 Changes of rut factors of asphalt mortar with temperatures

能随温度升高而降低,且其降低幅度随着温度升高而不断变缓,在 64 °C 出现明显拐点。

综合表 3~表 6、图 18、图 19 可以发现,不同温度下沥青胶浆的高温性能随粉胶比变化的规律是类似的,当粉胶比在 0.7~1.0 之间,沥青胶浆高温性能平稳上升,两者成线性关系;当粉胶比在 1.0~1.3 之间时,高温性能缓慢上升,胶浆体系呈稳定阶段;当粉胶比大于 1.3 时,高温性能上升明显。综合可知,为了保证沥青胶浆的高温稳定性,建议粉胶比应大于 1.0。这也与第 3.1 节采用布氏黏度评价沥青胶浆高温性能所得结果接近。

3.3 低温性能分析

3.3.1 劲度模量和蠕变速率

低温性能分析通过 BBR 试验完成,表 7 为 -6 °C、-12 °C 下沥青胶浆的劲度模量 S 和蠕变速率 m 随粉胶比的变化。由表 7 可知,温度为 -6 °C 时,所有沥青胶浆均满足 S 不大于 300 MPa、 m 不小于 0.3 的要求。当温度降低到 -12 °C 时,沥青胶浆的 m 值已经接近规范下限, S 值只有粉胶比为 0.7 的沥青胶浆能满足要求。而 S 值增加、 m 值下降,则表明沥青胶浆的低温抗裂性变差。粉胶比较小的沥青胶浆具有较小的 S 值,较大的 m 值,增大粉胶比会降低沥青胶浆的低温抗裂性能。这种情况在较低温度和较大粉胶比的情况下,表现的更明显。

3.3.2 低温系数

本文定义低温系数 $\lambda = S/m$,进一步评价沥青胶浆的低温性能。 λ 值越小,沥青胶浆的低温抗裂性越好。 λ 值随粉胶比的变化情况如图 20 所示。由图 20 可知, λ 值随着粉胶比的增加而不断增大。温度为 -6 °C 时, λ 值增加比较平缓;当温度降低到 -12 °C 时, λ 值先快速增加,然后缓慢增加。这表明,不同温度下沥青胶浆的低温抗裂性表现出不同

表 7 不同粉胶比沥青胶浆的劲度模量和蠕变速率值

Tab. 7 Stiffness modulus and creep rates of asphalt mortar with different filler-asphalt ratios

粉胶比	-6 °C 时		-12 °C 时	
	S/MPa	m	S/MPa	m
0.7	98.7	0.525	275.0	0.406
0.9	118.0	0.516	345.0	0.390
1.1	145.0	0.504	452.0	0.370
1.3	163.0	0.520	530.0	0.368
1.5	189.0	0.506	568.0	0.348

的规律:-6 °C 时,增大粉胶比对沥青胶浆低温抗裂性的影响较小;-12 °C 时,粉胶比高于 1.1 后,再增大粉胶比对沥青胶浆低温抗裂性的影响逐渐减小。

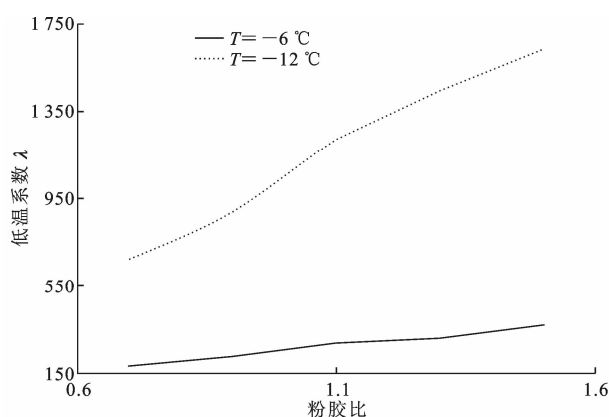


图 20 沥青胶浆低温系数随粉胶比的变化

Fig. 20 Changes of low-temperature coefficients of asphalt mortar with filler-asphalt ratios

由表 7 及图 20 可以发现:当粉胶比在 1.0~1.3 之间时,沥青胶浆的低温抗裂性能稳定;当粉胶比大于 1.3 时,-6 °C 下的沥青胶浆低温性能明显下降。

3.4 水泥替换部分矿粉的沥青胶浆性能分析

水损害一直是路面病害的典型问题,其根本原因是沥青和集料发生了剥离。研究表明,实际对混合料的黏结性起作用的不是沥青,而是沥青胶浆^[32],因此要从沥青胶浆方面来改善混合料的性能。工程中会采用水泥来替代部分矿粉,这是由于水泥有着比矿粉更大的比表面积,水泥中碱性组分含量高可以与沥青中的羧酸发生反应,生成具有较强吸附力的产物,且水泥颗粒可以裹敷在酸性集料的表面,改善集料表面酸碱性,使沥青更易吸附。与矿粉相比,水泥对沥青的吸附能力更强^[33-34]。本文采用水泥替换 20%、40%、60%、80% 矿粉(质量分数,下同),制作粉胶比为 1.2 的沥青胶浆,进行 DSR 与 BBR 试验,研究不同水泥用量对沥青胶浆性能的影响,具体结果如表 8 及图 21、图 22 所示。

表 8 不同水泥用量沥青胶浆的相位角值

Tab. 8 Phase angles of asphalt mortar with different cement substitutions

水泥替换量/%	不同温度(℃)下的 $\delta/(^{\circ})$			
	64	70	76	82
0	87.94	88.59	88.97	
20	88.10	88.76	89.20	89.44
40	88.06	88.72	89.16	89.41
60	88.08	88.75	89.16	89.41
80	88.01	88.65	89.01	89.24

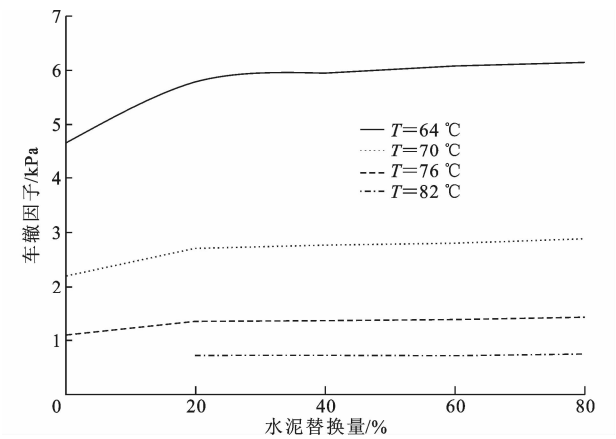


图 21 沥青胶浆车辙因子随水泥用量的变化

Fig. 21 Changes of rut factors of asphalt mortar with cement substitutions

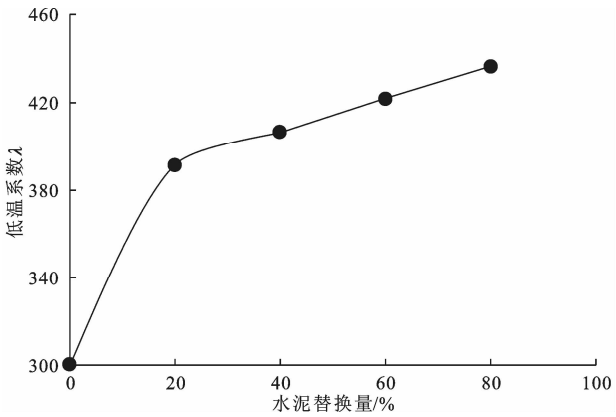


图 22 沥青胶浆低温系数随水泥用量的变化

Fig. 22 Changes of low-temperature coefficients of asphalt mortar with cement substitutions

由表 8、图 21、图 22 可以发现,当采用水泥替换 20% 矿粉时,高温性能提高、低温性能降低均较大,但用量超过 20% 后影响不明显。因此,在实际工程中采用水泥替换矿粉改善路用性能时,建议水泥的最优替换量为 20%。

3.5 消石灰替换部分矿粉的沥青胶浆性能分析

另一类解决水损害问题的方法就是用消石灰来替代部分矿粉。消石灰同样具有比矿粉更大的比表

面积和更强的碱性,可以更好地吸附沥青。除此之外,消石灰与沥青之间的物理和化学双重反应可以有效提高沥青胶浆的黏性和流变特性,消石灰可以中和沥青中的酸性组分,减缓沥青的老化硬化,且消石灰中的钙离子与沥青中的酸中和形成不溶于水的盐也会在集料表面集聚,改善集料的表面特性。同时,碳酸钙沉淀也会有较高的表面粗糙度,这均有利于沥青吸附,从而提高沥青胶浆的力学行为和流变特性^[34-35]。因此,本文采用消石灰替换 20%、40%、60% 及 80% 矿粉,制作粉胶比为 1.2 的沥青胶浆,进行 DSR 与 BBR 试验,研究不同消石灰用量对沥青胶浆性能的影响。具体结果如表 9 及图 23、图 24 所示。

表 9 不同消石灰用量沥青胶浆的相位角值

Tab. 9 Phase angles of asphalt mortar with different hydrated lime substitutions

消石灰替换量/%	不同温度(℃)下的 $\delta/(^{\circ})$			
	64	70	76	82
0	87.94	88.59	88.97	
20	88.21	88.79	89.14	89.34
40	88.34	88.87	89.16	89.35
60	88.41	88.89	89.13	89.27
80	88.44	88.90	89.15	89.28

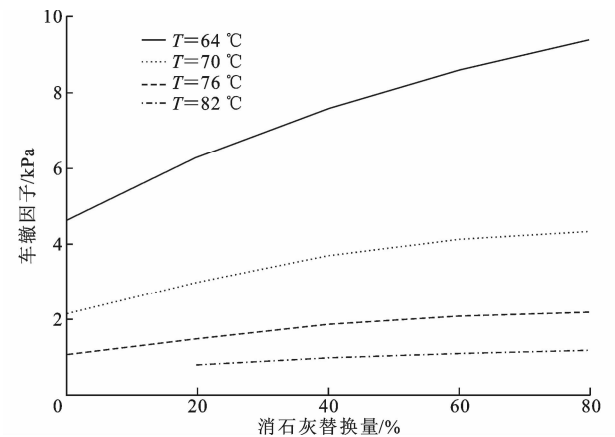


图 23 沥青胶浆车辙因子随消石灰用量的变化

Fig. 23 Changes of rut factors of asphalt mortar with hydrated lime substitutions

由表 9 及图 23、图 24 可以发现,沥青胶浆的高温性能随着消石灰替换量增加而提高,而低温性能随着消石灰替换量的增加而降低,二者均成线性关系。考虑到消石灰在改善沥青胶浆高温性能的同时对其低温性能也有较大的不利影响,因此,在实际的工程应用中建议消石灰的替换量为 20%,必要时应根据当地气候条件和实际工程需要对高低温性能进行合理抉择,选择合适的消石灰替换量来改善沥青

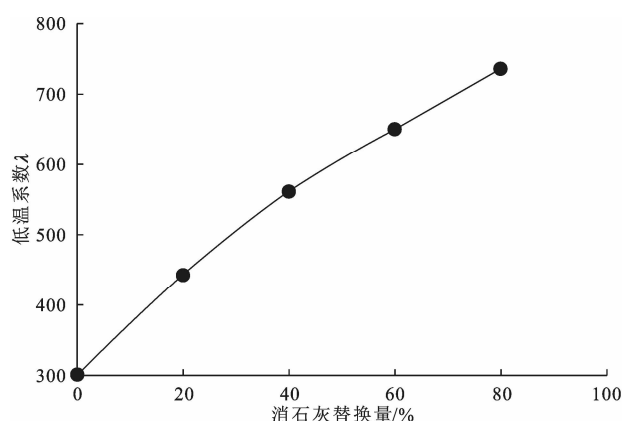


图 24 沥青胶浆低温系数随消石灰用量的变化

Fig. 24 Changes of low-temperature coefficients of asphalt mortar with the hydrated lime substitutions

胶浆的高低温性能。

综合表 8、表 9 及图 21~图 24 可知:在相同的替换量下,消石灰对沥青胶浆高温性能的提高效果要大于水泥,并且在替换量大于 20%之后,这种差距在进一步增大,此时增大水泥替换量对沥青高温性能的影响已经不明显了;低温性能试验具有相反的结果,在相同的替换量下,水泥对沥青胶浆低温性能的不利影响要小于消石灰,并且同样在替换量大于 20%后,增大水泥替换量对沥青胶浆低温性能变化的不利影响在大幅降低,而增大消石灰替换量对沥青胶浆低温性能的不利影响仍在增加。对于消石灰和水泥替换部分矿粉后沥青胶浆性能变化规律的差异还需要进一步研究。

在实际工程应用中,当对沥青胶浆的高温性能改善需求较小(替换量小于 20%)时,采用水泥或消石灰替代部分矿粉来改善沥青胶浆性能均可满足改善要求,二者差别不大;当对沥青胶浆的高温性能需求较高(替换量大于 20%)时,考虑到消石灰对沥青胶浆低温性能的不利影响较大,应采用水泥替代矿粉来改善沥青胶浆的高温性能。

4 结 语

(1)沥青胶浆的高温稳定性随着粉胶比的增大而不断提高,增大粉胶比可以很好提高沥青胶浆的高温抗车辙能力,降低沥青胶浆的温度敏感性。

(2)增大粉胶比会降低沥青胶浆的低温抗裂性,并且这种影响在较低的温度和较大的粉胶比下更为明显。

(3)采用水泥和消石灰替代部分矿粉均可以提高沥青胶浆的高温性能,但同时也会降低沥青胶浆的低温性能,当水泥的替换量大于 20%时,水泥替

换量对沥青胶浆性能变化影响会大幅降低,因此建议采用水泥替换矿粉质量的 20%,以获得较好的经济性和改善效果;消石灰的替换量与沥青胶浆性能变化之间有较强的相关性,二者近似成线性关系,但与水泥相比,消石灰替换量大于 20%时,对沥青胶浆的低温性能产生较大的不利影响,因此建议消石灰替代矿粉的替换量宜为 20%。

(4)粉胶比的增大有利于提高沥青胶浆的高温稳定性,但同时低温抗裂性也会有所下降,建议的粉胶比为 1.0~1.3。

(5)本文所推荐的粉胶比适用性较为单一,仅针对 AC 类混合料。对于水泥、消石灰替换部分矿粉的情况,仅介绍了替换后沥青混合料性能的变化,未阐释其变化的产生原因。下一步应对不同沥青混合料的适宜粉胶比以及水泥、消石灰替代部分矿粉后与沥青的微观作用机理进行研究,从而全面分析粉胶比以及水泥、消石灰替代部分矿粉对不同沥青胶浆性能的影响。

参考文献:

References:

- [1] 李 涛,扈惠敏. 矿粉对沥青胶浆性能的影响[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2013,36(8):983-987.
LI Tao, HU Hui-min. Influence of mineral fillers on properties of asphalt mortar[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2013, 36(8): 983-987.
- [2] ZHAN X L. Prediction of dynamic modulus of asphalt mixture based on viscoelastic properties of asphalt mortar[J]. Advanced Materials Research, 2013, 651: 419-423.
- [3] ARSHADI A. Importance of asphalt binder properties on rut resistance of asphalt mixture[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison.
- [4] 王贤良,王志祥. 钢桥面铺装浇注式沥青混合料性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 1956-1962.
WANG Xian-liang, WANG Zhi-xiang. Research on the steel deck pavement performance of pouring asphalt concrete[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(8): 1956-1962.
- [5] WASILEWSKA M, MALASZKIEWICZ D, IGNATIUK N. Evaluation of different mineral filler aggregates for asphalt mixtures[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 245: 022042.

- [6] ZHENG C F, FENG Y P, MA Z, et al. Influence of mineral filler on the low-temperature cohesive strength of asphalt mortar[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 133: 1-6.
- [7] 季 节, 李鹏飞, 索 智, 等. DCLR 掺量和粉胶比对沥青胶浆性能的影响分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 35(2): 35-39, 178.
- JI Jie, LI Peng-fei, SUO Zhi, et al. Analysis of the properties of asphalt mortar affected by DCLR content and filler-asphalt ratio[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2016, 35(2): 35-39, 178.
- [8] CHENG Y C, TAO J L, JIAO Y B, et al. Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic[J]. Construction & Building Materials, 2016, 118: 268-275.
- [9] ZHENG C F, LI R M, ZOU L L, et al. Effects of filler-bitumen ratio and mineral filler characteristics on the low-temperature performance of bitumen mastics[J]. Materials, 2018, 11(7): 1155-1168.
- [10] 徐 波, 刘运新, 王 英. 填料对橡胶沥青胶浆高低温性能的影响[J]. 功能材料, 2016, 47(1): 1106-1109.
- XU Bo, LIU Yun-xin, WANG Ying. Effects of filler on high temperature and low temperature performance of CRMA mastic[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(1): 1106-1109.
- [11] XING M L, CHEN H X, LI Z Z, et al. Rheological properties of asphalt mortar with high viscosity[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 359: 012048.
- [12] 郑传峰, 冯玉鹏, 郭学东, 等. 粉胶比对沥青胶浆低温粘结强度的影响[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.
- [13] SHAN L, QI X, DUAN X, et al. Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on the rheological behavior of asphalt binders[J]. Construction & Building Materials, 2020, 231: 117076.
- [14] JI J, YAO H, YANG X, et al. Performance analysis of direct coal liquefaction residue (DCLR) and Trinidad lake asphalt (TLA) for the purpose of modifying traditional asphalt[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016, 41: 3983-3993.
- [15] 季 节, 石越峰, 索 智, 等. DCLR 与 TLA 改性沥青胶浆的流变性能对比[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2015, 31(6): 1041-1048.
- JI Jie, SHI Yue-feng, SUO Zhi, et al. Rheological performance comparison of the DCLR and the TLA modified asphalt mortar[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2015, 31(6): 1041-1048.
- [16] CHEN T, MA T, HUANG X M, et al. The performance of hot-recycling asphalt binder containing crumb rubber modified asphalt based on physiochemical and rheological measurements[J]. Construction & Building Materials, 2019, 226: 83-93.
- [17] 熊 锐, 杨晓凯, 杨 发, 等. 活化煤矸石改性沥青胶浆粉胶比确定及粘温特性研究[J]. 材料导报, 2017, 31(2): 121-125.
- XIONG Rui, YANG Xiao-kai, YANG Fa, et al. Research on filler-bitumen ratio and viscosity-temperature property of activated coal gangue modified asphalt mortar[J]. Materials Reports, 2017, 31(2): 121-125.
- [18] 任俐璇. 不同矿粉对沥青胶浆的模量增效研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(5): 25-30, 35.
- REN Li-xuan. Study on modulus increasing effect of asphalt mortar by different kinds of mineral powder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(5): 25-30, 35.
- [19] 谢 博, 杨 涛, 关宏信, 等. 凝灰岩矿粉与石灰岩矿粉沥青胶浆性能的对比[J]. 交通科学与工程, 2015, 31(2): 10-14.
- XIE Bo, YANG Tao, GUAN Hong-xin, et al. Performance comparison of the tuff mineral and the limestone mineral[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31(2): 10-14.
- [20] 王振军, 安等等, 刘 亮, 等. 水泥乳化沥青胶浆与 RAP 粘附性的量化评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2016, 36(5): 16-21, 59.
- WANG Zhen-jun, AN Deng-deng, LIU Liang, et al. Quantitative evaluation of interfacial adhesion between cement emulsified asphalt mastic and RAP[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36(5): 16-21, 59.
- [21] 张宝龙, 吴 平, 闫新勇, 等. 表面修饰粉煤灰对沥青路面性能的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版,

- 2018,38(3):43-51.
- ZHANG Bao-long, WU Ping, YAN Xin-yong, et al. Effect of surface-modified fly ash on engineering performance of asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2018, 38(3):43-51.
- [22] MUNIANDY R, ABURKABA E, TAHA R. Effect of mineral filler type and particle size on the engineering properties of stone mastic asphalt pavements[J]. Australian Journal of Basic & Applied Sciences, 2013, 10(2): 13-32.
- [23] MISTRY R, ROY T K. The effect of using rice husk ash as filler on moisture susceptibility of asphalt mix [C]//MEEN T H, PRIOR S D, LAM A D K T. International Conference on Advanced Materials for Science & Engineering. New York: IEEE, 2016: 593-596.
- [24] 覃 潇, 申爱琴, 郭寅川. 玄武岩纤维沥青胶浆性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(4): 659-664.
- QIN Xiao, SHEN Ai-qin, GUO Yin-chuan. Experimental study on road performance of basalt fiber reinforced bitumen mastics[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 659-664.
- [25] WU M M, LI R, ZHANG Y Z, et al. Stabilizing and reinforcing effects of different fibers on asphalt mortar performance [J]. Petroleum Science, 2015, 12: 189-196.
- [26] BONICA C, TORALDO E, ANDENA L, et al. The effects of fibers on the performance of bituminous mastics for road pavements[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 95: S1359836816301573.
- [27] 吴萌萌, 李 睿, 张玉贞, 等. 纤维沥青胶浆高低温性能研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015, 39(1): 169-175.
- WU Meng-meng, LI Rui, ZHANG Yu-zhen, et al. Study of high and low temperature performance of fiber-asphalt mortar[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2015, 39(1): 169-175.
- [28] TAN Y, GUO M. Interfacial thickness and interaction between asphalt and mineral fillers[J]. Materials & Structures, 2014, 47: 605-614.
- [29] 张 宏, 刘 新, 乔 志. 沥青胶浆粘度及流变特性的影响因素研究 [J]. 材料导报, 2019, 33(14): 2381-2385.
- ZHANG Hong, LIU Xin, QIAO Zhi. Research on viscosity and rheological properties of asphalt mortar [J]. Materials Reports, 2019, 33(14): 2381-2385.
- [30] FU Q, XIE Y J, LONG G C, et al. Temperature sensitivity and model of stress relaxation properties of cement and asphalt mortar[J]. Construction & Building Materials, 2015, 84: 1-11.
- [31] 倪 玮. 矿粉对沥青胶浆流变性能影响研究[J]. 现代交通技术, 2019, 16(4): 12-15.
- NI Wei. Study on the effect of the mineral powder on the performance of asphalt mortar[J]. Modern Transportation Technology, 2019, 16(4): 12-15.
- [32] 张争奇, 王永财. 沥青胶浆对沥青混合料高低温性能的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 1-5.
- ZHANG Zheng-qi, WANG Yong-cai. Influence of asphalt mortar on hot mix asphalt performance at high and low temperature[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 1-5.
- [33] 李 玫, 赵 娜, 左永振, 等. 水泥替代矿粉对水工沥青混凝土长期性能影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增 1): 74-78.
- LI Mei, ZHAO Na, ZUO Yong-zhen, et al. Influence of cement instead of mineral powder on long-term deformation characteristics of asphalt concrete [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(S1): 74-78.
- [34] 陈华鑫, 牛昌昌, 况栋梁, 等. 填料对再生沥青胶浆粘弹响应的影响[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2017, 38(2): 72-77.
- CHEN Hua-xin, NIU Chang-chang, KUANG Dong-liang, et al. Effects of fillers on viscoelastic response of recycled asphalt cement[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2017, 38(2): 72-77.
- [35] LESUEUR D, PETIT J, RITTER H J. The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: A state-of-the-art review [J]. Road Materials and Pavement Design, 2012, 14(1): 1-16.