

DOI:10.11918/202307061

矿粉微观特征及其与沥青胶浆流变性能的灰度分析

纪伦¹, 鄒金麒¹, 李红专², 程邳策^{1,3}, 刘济玮¹, 谭忆秋¹

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 大庆油田工程建设有限公司路桥公司, 黑龙江 大庆 163453; 3. 中国五冶集团有限公司, 成都 610011)

摘要: 为探究矿粉的物理特征及微观结构, 深入研究胶浆流变性能及矿粉对胶浆性能的影响, 分析了不同类型矿粉的物理特性、化学组成及微观结构, 采用不同类型矿粉及不同 0.075 mm 筛孔通过率矿粉制备不同掺量的沥青胶浆, 利用动态剪切流变与弯曲梁流变试验对不同矿粉沥青胶浆的高低温流变性能的影响规律进行分析, 借助灰色关联分析法分别探究矿粉的物理参数、微观结构参数与沥青胶浆高温、低温性能之间的关联性。试验结果表明: 5 种矿粉的微小孔隙数量较少, R3 与 R4 矿粉的孔隙多为狭长型, R1、R2、R5 矿粉的孔隙多是颗粒堆积形成的; 随矿粉掺量的增加, 沥青胶浆的整体高温性能和抗流动力越好, 而低温性能先减弱后增强; 将比表面积等指标作为比较数列, 相位角等指标作为参考数列, 利用灰色关联分析法确定氧化物含量对高温性能影响最大, 矿粉比表面积影响最小; 低温条件下, 矿粉粒度对蠕变劲度影响最大, 平均孔径对蠕变劲度变化率影响最大。对矿粉指标的控制及其高低温特性变化的研究结果可为实际工程应用提供参考。

关键词: 沥青混合料; 矿粉; 沥青胶浆; 灰色关联分析法

中图分类号: U415 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2024)11-0001-14

Microscopic characteristics of mineral powder and gray analysis of its rheological properties with asphalt mortar

Ji Lun¹, Wu Jinqi¹, Li Hongzuan², Cheng Zhice^{1,3}, Liu Jiwei¹, Tan Yiqiu¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Daqing Oilfield Engineering Construction Co., Ltd. Luqiao Company, Daqing 163453, Heilongjiang, China;
3. China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu 610011, China)

Abstract: In order to explore the physical characteristics and microstructure of mineral powder, and to conduct an in-depth study of the rheological properties of cement paste and the influence of mineral powder on the properties of cement paste, the physical characteristics, chemical composition and microstructure of different types of mineral powder were analyzed. Using different types of mineral powder with varying pass rates through a 0.075 mm sieve, asphalt mortar with different dosages was prepared. The influence of dynamic shear rheology and bending beam rheology test on the rheological properties of asphalt cement paste at high and low temperatures was analyzed. Gray relational analysis was employed to explore the relationships between the physical parameters and microstructural characteristics of the mineral powder and the high and low-temperature performance of the asphalt mortar. The experimental results show that the five types of mineral powders have relatively few small pores. The pores of R3 and R4 mineral powders are predominantly elongated, while the pores of R1, R2 and R5 mineral powders are mostly formed by particle accumulation. With the increase of mineral powder content, the overall high-temperature performance and anti-flow ability of asphalt mortar improve, while the low-temperature performance first weakens and then strengthens. Taking specific surface area and other indicators as comparison series and phase angle as reference series, the grey relational analysis method is used to determine that oxide content has the greatest influence on high temperature performance and the specific surface area of mineral powder has the least influence. At low temperature, the particle size of mineral powder has the greatest influence on creep stiffness, and the average pore diameter has the greatest influence on the change rate of creep stiffness. The control of mineral powder index and the change of high and low temperature characteristics can provide references for practical engineering applications.

Keywords: asphalt mixture; mineral powder; asphalt mortar; grey relational analysis method

收稿日期: 2023-07-20; 录用日期: 2023-08-27; 网络首发日期: 2024-11-05

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20241104.1458.002>

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20315); 国家重点研发计划(2016YFE0202400)

作者简介: 纪伦(1973—), 男, 副教授, 硕士生导师; 谭忆秋(1968—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 纪伦, jilun@hit.edu.cn

沥青混合料是在集料、填料和沥青的相互作用下形成的一个多层分散体系,矿粉作为填料在沥青混合料中起填充作用。填料的填充可以确保沥青混合料的均匀分布,使其具有良好的耐久性,更适用于道路工程^[1-3]。在选择填料时,必须充分考虑填料对沥青胶浆性能的影响。目前针对于填料对胶浆性能影响的研究多集中于填料的掺量、类型以及自身特性等方面,如沥青胶浆的高低温性能随胶浆比的增加呈指数增长,因此根据计算建议粉胶比范围为 0.9 ~ 1.4,这样可以在保证稳定性和抗裂性的同时,达到最佳的综合性能表现^[4]。在普通矿粉中添加部分等胶浆比的水泥和消石灰时,沥青胶浆的高温性能有所提高^[5]。形状和表面纹理是影响填料与沥青胶浆黏附性的重要因素,因其能影响填料与胶浆之间的表面接触面积和黏附强度;矿粉的比表面积以及化学组分对胶浆性能影响更大^[6]。然而,在对填料与沥青间的交互作用分析时,还缺少一些填料的关键指标,如 0.075 mm 通过率等。若能对成体系的指标因素整体分析,可以实现对填料的性能控制,并进一步保证混合料的质量。

本文在已有研究的基础上,增加了 0.075 mm 筛孔通过率矿粉指标,分析矿粉的物理特征和微观

结构对沥青胶浆性能的影响,得出对沥青胶浆性能影响较大的参数指标;借助灰色模型建立的沥青铺面拌合场质量状态体系构建方法^[7]和灰色关联分析法,提出了一种分别探究矿粉的物理参数、微观结构参数与沥青胶浆高温、低温性能之间关联性的方法,旨在最终能通过对矿粉指标的控制实现对沥青胶浆质量的控制,进一步提高混合料整体的耐久性和强度等。

1 矿粉物理与结构特征

1.1 试验材料

1.1.1 沥青

本文采用工程提供的 SBS 改性沥青,其技术要求及室内性能测试结果见表 1。

1.1.2 矿粉

选择 5 种不同实际工程提供的矿粉填料,产地分别为吉林省四平市、黑龙江省哈尔滨市南岗区、黑龙江省鸡西市、黑龙江省哈尔滨市阿城区。分别编号为 R1 ~ R5,其中 R1 与 R2 为同一产地,但 R1 为单质矿粉,R2 为复合矿粉,其余 3 种均为单质矿粉。对以上 5 种矿粉进行筛分并测试基础指标,结果见表 2。

表 1 SBS 改性沥青基础性能测试结果

Tab. 1 Test results of SBS modified asphalt foundation performance

项目	针入度(25℃)/mm	延度(5℃)/cm	软化点/℃	沥青相对密度	闪点/℃	溶解度/%
技术要求	60 ~ 80	≥30	≥55	—	≥230	≥99
测试结果	62.5	32.7	69.9	1.012	241.0	99.92

表 2 矿粉性能

Tab. 2 Performance of mineral powder

矿粉编号	表观密度/(g·cm ⁻³)	对水的密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	亲水系数	外观
R1	2.612	2.631	0.1	0.52	无团粒结块
R2	2.625	2.639	0.2	0.61	无团粒结块
R3	2.713	2.725	0.1	0.56	无团粒结块
R4	2.681	2.702	0.3	0.59	无团粒结块
R5	2.715	2.731	0.1	0.64	无团粒结块

考虑到 0.075 mm 筛孔通过率为矿粉的重要指标^[8],为了后续研究的全面性,将 R1 矿粉过 0.075 mm 筛孔筛分,取筛上与筛下两部分按质量比例充分结合,制备了 0.075 mm 通过率分别为 75%、80%、85%、90% 的 4 种新矿粉,分别编号 R11、R12、R13、R14。

1.2 矿粉物理特征

为了添加后续比较数列的内容,除了矿粉密度、亲水系数等基础指标,还对矿粉的多项物理指标进行了分析。

1.2.1 粒度特征

粒度指标一般用于评价尺寸在毫米至纳米之间的颗粒。通常,矿粉颗粒的粒径大小在一定范围内分布,即粒度分布。描述粒度分布范围常用的关键指标有 D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} ,分别表示测试样品的累计粒度分布百分数达到 10%、50%、90% 时所对应的粒径大小。

考虑到测试矿粉的粒径范围及仪器操作等问题,本文采用激光粒度仪对 R1 ~ R5 矿粉颗粒的粒度分布进行测试,结果见表 3 和图 1。

表 3 不同矿粉颗粒粒度关键指标

Tab. 3 Key indexes of particle size of different mineral powder

矿粉编号	表面积平均粒径/ μm	体积平均粒径/ μm	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$
R1	6.353	40.738	2.806	28.224	96.686	0.944
R2	6.116	51.500	2.571	31.404	121.598	0.981
R3	9.924	92.103	5.512	51.391	92.103	0.605
R4	11.317	92.818	6.927	11.317	208.531	0.530
R5	10.019	108.921	4.315	77.375	264.378	0.599

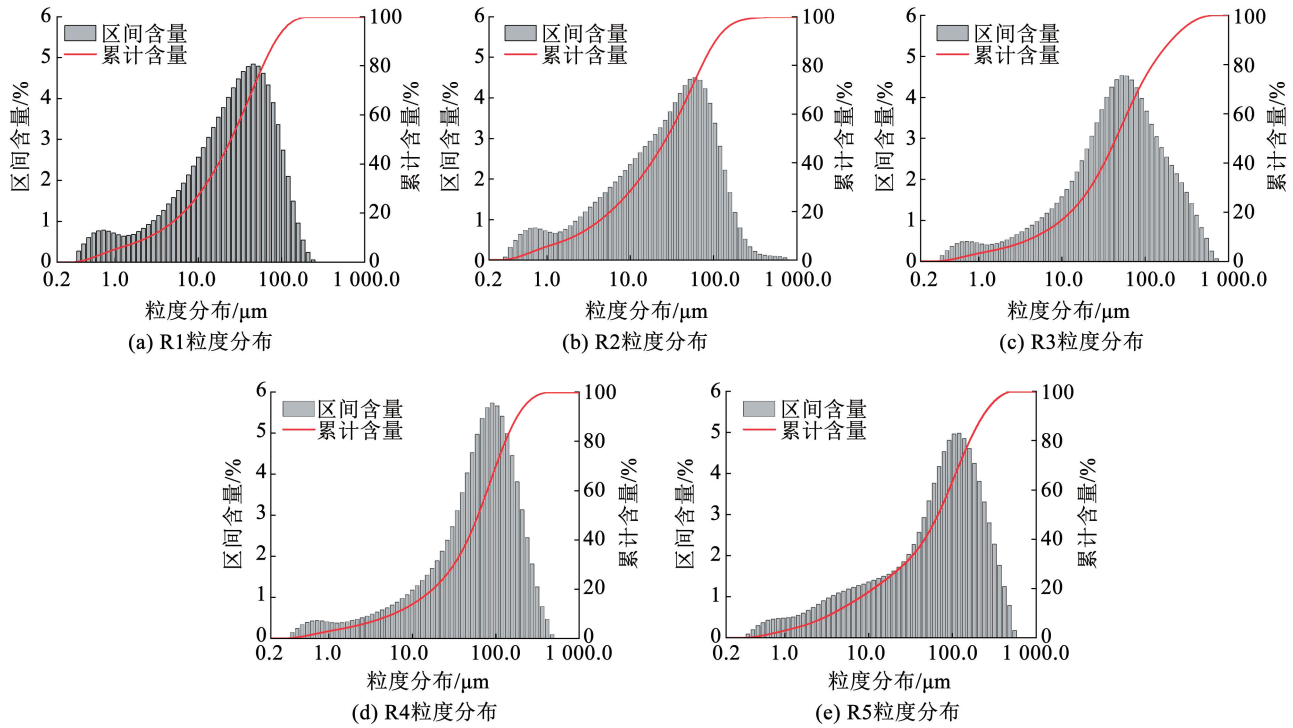


图 1 不同矿粉颗粒粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of different mineral powders

由表 3 和图 1 可以看出:5 种矿粉的粒度分布均只存在一个波峰,说明 5 种矿粉的加工工艺良好,粒度较为均匀;比表面积与表面积平均粒径间基本呈负相关,平均粒径越大,比表面积越小;R1 矿粉与其他矿粉不同,其粒度分布范围最窄;R1 与 R2 生产厂家相同,虽然 R2 中掺有消石灰,但 R1 与 R2 的粒度分布范围基本相同,集中在 10 ~ 100 μm 之间;R1 与 R2 的 D_{50} 也最为接近。

1.2.2 比表面积特征

矿粉作为填料与沥青之间的交互作用决定着沥青胶浆的性能。在混合料中,矿粉颗粒表面吸附沥青的量大于总吸附量的 65%^[9],因此比表面积尤其重要。本文采用吸附法测试微粒比表面积,利用最常用的 BET (Brunauer-Emmett-Telle) 方法^[10] 计算,公式为

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m K} + \frac{K-1}{V_m K} \times \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

式中: P 为吸附气体的压力, P_0 为吸附气体的饱和蒸气压, V 为吸附量, V_m 为单分子层吸附量, K 为与吸附热相关的常数。

式(1)基于对吸附等温线的分析,通过绘制不同压力下的吸附量与相对压力图像,再进行线性拟合,得到 BET 等温线斜率和截距,进而计算出吸附量和比表面积。

5 种原矿粉及制备的 4 种矿粉的比表面积测试结果见表 4。由表 4 可以看出:BET 法测得 R4 的比表面积最大,R1 的比表面积最小;粒度仪测得的比表面积偏低;两种方法所测试的每种矿粉比表面积间大小关系也不相同,其中 R4 矿粉测试值之间相差最大,R1 矿粉测试值之间相差最小。造成此差异的主要原因是粒度仪的计算方法中未考虑矿粉颗粒表面孔隙等因素,而是单纯将颗粒假设为球体进行计算。同时对比 R11 ~ R14 矿粉,BET 法测试的比表面积逐渐增大,这与实际情况相符,因此后续分析

采用 BET 法测试矿粉的比表面积。

表 4 不同方法测得比表面积结果

Tab.4 Results of specific surface area measured by different methods

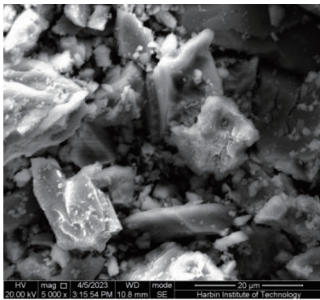
矿粉编号	比表面积/(m ² · g ⁻¹)	
	BET 法测试值	粒度仪测试值
R1	0.673	0.944
R2	3.338	0.981
R3	1.560	0.605
R4	4.268	0.530
R5	1.332	0.599
R11	0.793	—
R12	0.801	—
R13	0.807	—
R14	0.863	—

1.3 矿粉微观结构特征分析

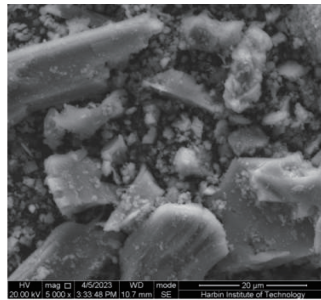
沥青混凝土除了自身结构表征的体积参数随着沥青混合料的级配、沥青用量的改变而变化外^[11], 矿粉颗粒的性质、表面纹理及孔隙等形貌特征也对其与沥青的接触产生了巨大的影响, 进而影响混合料的性能^[12]。因此还需对矿粉形貌及孔隙进行探究。

1.3.1 表面特征

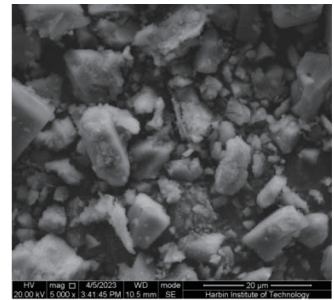
采用 Quanta 200FEG 型扫描电镜对 5 种矿粉进行投射观察其形貌特征, 扫描结果见图 2。由图 2 可以看出: R1 与 R2 矿粉大多数颗粒形状相似, 颗粒棱角较多, 原因是两者为同一厂家生产的; 但 R2 矿粉有部分颗粒形貌较为松散且呈团状, 孔隙更多, 原因是该矿粉中掺有部分消石灰; R4 矿粉中有一些偏圆形的颗粒, 为 Si 类化合物。整体来看, 由于所有矿粉主要成分都是 CaCO₃, 因此大致形貌都相似。



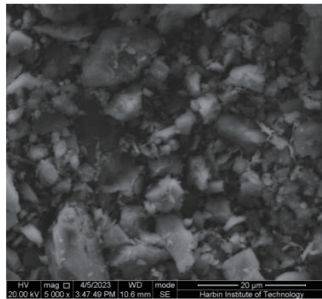
(a) R1 矿粉



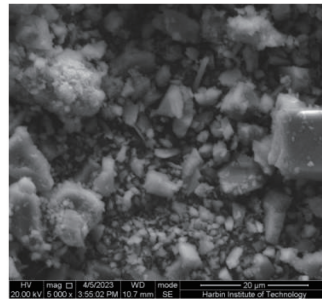
(b) R2 矿粉



(c) R3 矿粉



(d) R4 矿粉



(e) R5 矿粉

图 2 放大后矿粉颗粒的外观形貌

Fig.2 Appearance and morphology of mineral powder particles magnified

1.3.2 孔隙结构特征

采用 N₂ 吸附试验进行测试, 依据吸附 - 脱附曲线确定不同矿粉的微孔分布, 进而分析矿粉颗粒的微观孔隙结构。

1) N₂ 吸附 - 脱附曲线。N₂ 吸附试验的主要原理是基于孔径分布与氮气吸附量之间的关系, 根据吸附等温线的形状和特征, 得到孔隙结构的一些重要参数, 如比表面积、孔隙分布曲线、孔隙体积等。本次试验采用 QUADRASORB SI-KR/MP 四站全自动比表面积分析仪进行测试, 计算得到不同矿粉的

吸附 - 脱附曲线, 见图 3。由图 3 可以看出: 所有矿粉在低压区对于氮气的吸附量都偏低且增长缓慢, 说明 5 种矿粉的微小孔隙数量比较少; R3 与 R4 矿粉在中高压区吸附曲线与脱附曲线间隙较大, 说明 R3 与 R4 矿粉颗粒的孔隙多为狭长型、层状的; 在相同压力下, R2 矿粉氮气吸附量最多, R1 矿粉氮气吸附量最少; R1、R2、R5 矿粉的吸附曲线与脱附曲线间隙小, 说明 3 种矿粉中的孔隙多是颗粒堆积形成的。

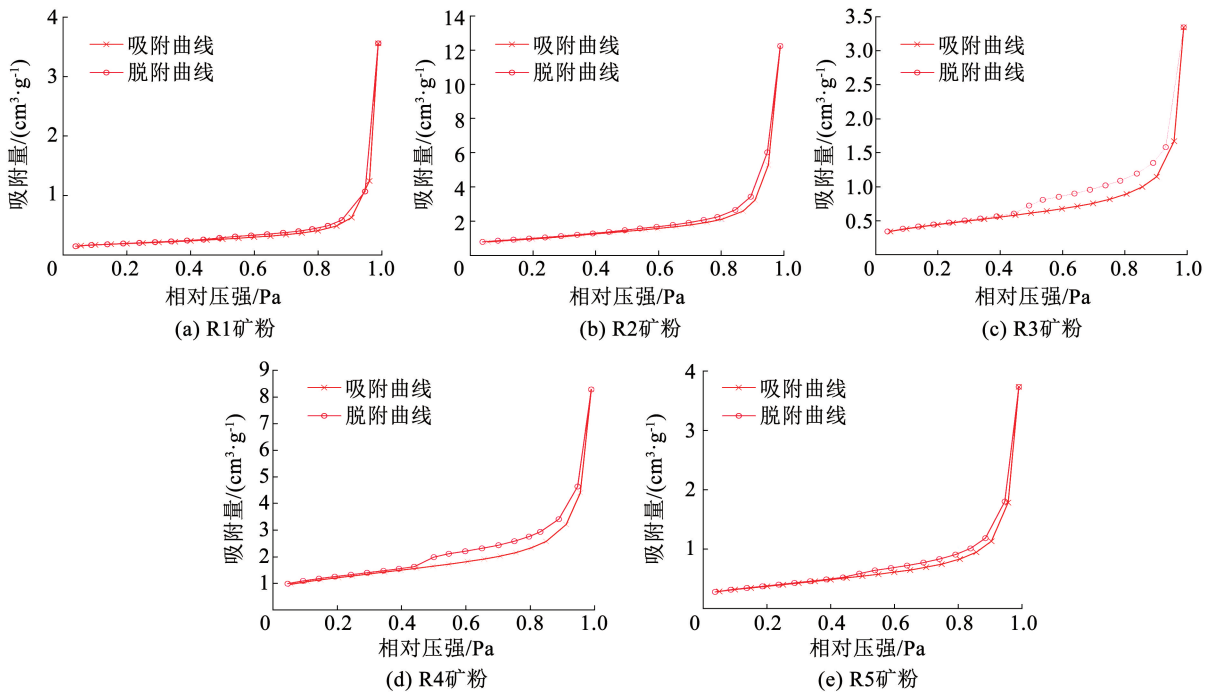


图 3 不同矿粉的吸附-脱附曲线

Fig. 3 Adsorption desorption curves of different mineral powders

2) 孔径分布。依据吸附-脱附曲线数值计算得出矿粉的平均孔径 D_{ap} 、平均孔容积 V_{ap} 及孔径分布,见表 5 和图 4。由表 5 和图 4 可以发现,5 种矿粉的孔径分布分为 3 类:第 1 类为 R1 和 R2 矿粉,其孔容积随粒径的增大呈从零持续增大的趋势,孔径增大过程中不断波动,达到最大波峰后持续降低;第 2 类为 R3 和 R4 矿粉,其孔容积整体随粒径的增大波动下降;第 3 类为 R5 矿粉,其特点与第 1 类类似,但仪器的粒径测试范围内无法展示所有孔径分布,因此其孔径可能分布更广。对比 5 种矿粉的孔径分布曲线峰值发现,R1 矿粉的孔径分布曲线峰值最大,R4 矿粉最小,说明 R1 矿粉孔容积峰值最大,R4 矿粉孔容积峰值最小。

表 5 不同矿粉的 D_{ap} 和 V_{ap}

Tab. 5 Average pore size and average pore volume of different mineral powders

矿粉编号	D_{ap}/nm	$V_{ap}/(10^{-3} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$
R1	38.81	5.508
R2	29.40	18.920
R3	35.00	5.175
R4	25.83	12.800
R5	33.80	5.772
R11	33.80	5.161
R12	38.81	4.896
R13	35.00	4.735
R14	33.80	4.178

2 沥青胶浆动态流变性能

2.1 试验设计

2.1.1 沥青胶浆制备

采用上述 9 种矿粉及 SBS 改性沥青制备胶浆比不同的沥青胶浆,制备方案见表 6,制备过程如下:

1) 将 SBS 改性沥青加热至 180 °C,矿粉在 120 °C 环境下烘干后放入 160 °C 环境保存,沥青和矿粉分别保持各自的温度 30 min。

2) 利用电动搅拌器搅拌矿粉与沥青,转速恒定为 500 r/min。将矿粉平均分 3 次缓慢加入沥青中,每一次加入后搅拌 5 min,之后再次加入下一次,待矿粉加入完毕后再搅拌 15 min。

3) 搅拌完毕后放入 160 °C 烘箱养生 20 ~ 30 min,保证内部气泡全部排出。

分别对制备后的质量掺量(后述掺量均为质量掺量)为 80%、110%、140% 的胶浆编号“-1”、“-2”、“-3”,如掺量 80% 的 R1 矿粉所制的胶浆编号为 R1-1。

2.1.2 动态剪切流变试验

本文利用动态剪切流变仪(DSR)通过施加剪切力研究材料的流变性质,分别选择频率扫描模式、温度扫描模式及多应力重复蠕变模式(MSCR)进行试验研究。

频率扫描模式是指在一定的温度下,频率由低到高的扫描方式对沥青材料的动态剪切模量、相位角等参数进行的测试。本模式温度分别设置为 36、

48、60、72 ℃,采用复数量 G^* 及其主曲线对沥青胶浆高温流变性能进行评价。 G^* 控制小范围频率

在 0.1 ~ 1 000 Hz 之间, G^* 主曲线控制大范围频率在 0.001 ~ 10 000 Hz 之间。

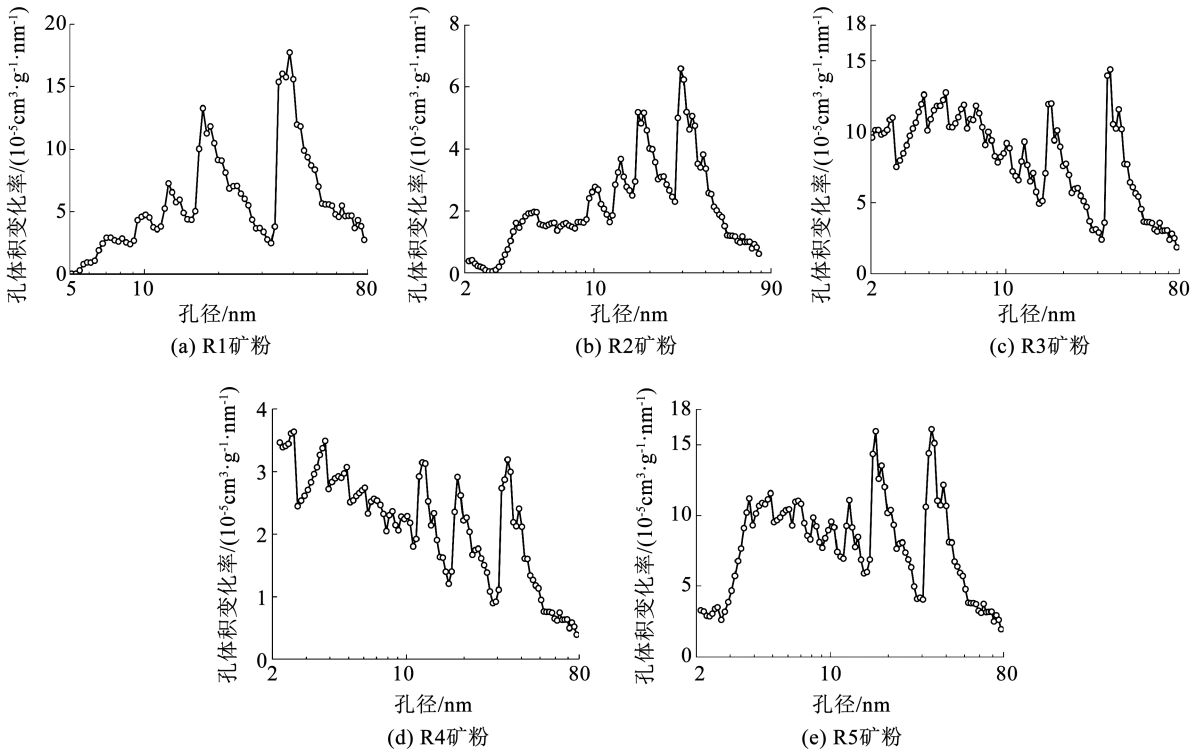


图 4 不同矿粉孔径分布

Fig. 4 Distribution of pore size of different mineral powders

表 6 胶浆制备方案

Tab. 6 Preparation plan for mortar

矿粉编号	掺量/%	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
R1	80,110,140	0.673
R2	80,110,140	3.338
R3	80,110,140	1.560
R4	80,110,140	4.268
R5	80,110,140	1.332
R11	80,110,140	0.793
R12	80,110,140	0.801
R13	80,110,140	0.807
R14	80,110,140	0.863

温度扫描模式则是在固定的温度下对沥青胶浆进行的动态剪切流变试验。本模式温度设置为 60 ℃,固定频率 10 Hz。采用美国公路战略研究计划 (SHRP) 推荐的车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 评价胶浆的抗车辙性能^[13],相角 δ 评价胶浆中黏弹性成分的比例。

利用多应力重复蠕变模式 (MSCR) 模拟道路实际使用条件下的应力-应变状态。温度设置为 60 ℃,分别采用 0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力重复对试样加载 10 次。分析测试结果中的蠕变恢复率 R 和不可恢复蠕变柔量 J_{nr} ,以评价胶浆的高温流变性能。计算式分别为

$$R = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_r}{\varepsilon_c - \varepsilon_0} \quad (2)$$

$$J_{nr} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_0}{\tau} \quad (3)$$

式中: ε_c 为周期内的最大应变, ε_r 为周期内的残余应变, ε_0 为周期内的初始应变, τ 为周期内的应力水平 (0.1 kPa 或 3.2 kPa)。

同时,为了评价沥青胶浆的应力敏感性,分别采用 R 和 J_{nr} 的相对差异指标 R_{diff} 及 $J_{nr,diff}$ 描述沥青胶浆的敏感性及其评价沥青混合料的力学响应特征,即

$$R_{diff} = \frac{R_{0.1} - R_{3.2}}{R_{0.1}} \times 100\% \quad (4)$$

$$J_{nr,diff} = \frac{J_{nr,3.2} - J_{nr,0.1}}{J_{nr,0.1}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $R_{0.1}$ 、 $R_{3.2}$ 分别为 0.1、3.2 kPa 应力下全过程 R 的平均值, $J_{nr,0.1}$ 、 $J_{nr,3.2}$ 分别为 0.1、3.2 kPa 应力下全过程 J_{nr} 的平均值。

2.1.3 弯曲梁流变试验

利用弯曲梁流变仪 (BBR) 数据采集系统采集和处理试验过程中的数据,得到蠕变劲度 S 和蠕变劲度变化率 m ,二者分别反映沥青低温时的抗变形能力和沥青的刚度变化速率。一般 S 越大说明沥青越脆,而 m 越大说明沥青越不容易断裂^[14-15]。

将制备好的均匀胶浆加热后倒入 BBR 样品模具中, BBR 试样的尺寸为 127.0 mm × 12.7 mm × 6.4 mm。当倒入的胶浆高于模具 2 mm 时停止倒入。将试样置于室温下冷却 2 h, 利用加热刮刀进行修整, 在 -5 °C 环境中静置 1 h 后脱模。

2.2 动态剪切流变试验结果分析

分别制备了 9 种矿粉在 3 种掺量下的胶浆。为了分别从矿粉的掺量、类型、0.075 mm 通过率方面探究其对沥青胶浆的影响, 并且减少重复工作量, 每

方面仅挑选典型数据进行对比分析。

2.2.1 复数模量 G^*

1) 不同掺量矿粉的影响。R2 和 R3 矿粉的频率扫描 G^* 结果见图 5, 图中 0.8-36 °C 线条表示在 36 °C 时 80% 掺量矿粉的 G^* 曲线, 其余同理。由图 5 可以看出: 在相同温度下, 沥青胶浆的 G^* 随频率、矿粉掺量的增大而增大; 矿粉掺量对 G^* 的影响比较明显, 表现为各掺量的 G^* 折线间的间隙较大。

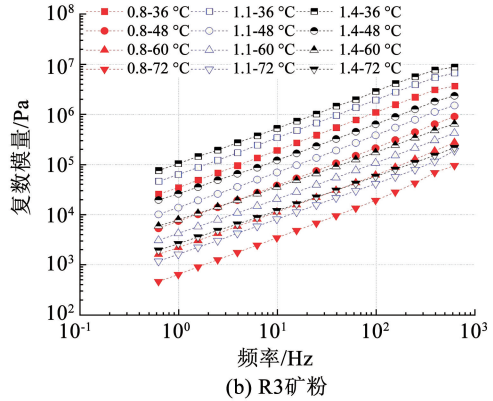
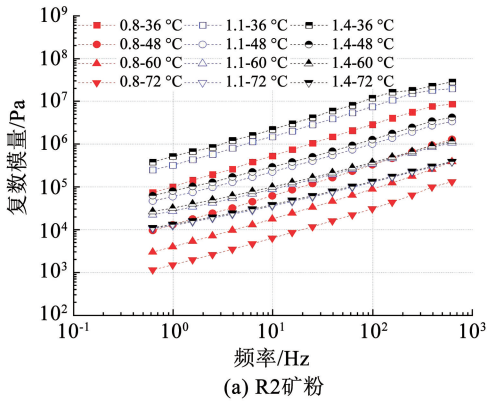


图 5 R2 和 R3 不同掺量的 G^* 结果

Fig. 5 G^* results of R2 and R3 with different dosages

2) 不同类型矿粉的影响。5 种不同类型掺量均为 110% 的矿粉沥青胶浆的 4 个温度下 G^* 的结果见图 6。根据 G^* 的变化趋势可以将 5 种沥青胶浆为两类: 一类是 R2 和 R4 矿粉, 其特征为在中温时 G^* 较大, 高温时与其他沥青胶浆相比, G^* 差距不大, 但高温时随频率的增大, G^* 的增大较为平缓; 另一类是 R1、R3 和 R5 矿粉, 随着温度升高, G^* 的降低值均较为接近, 3 种矿粉对 G^* 的影响大小依次为 R5、R3、R1。

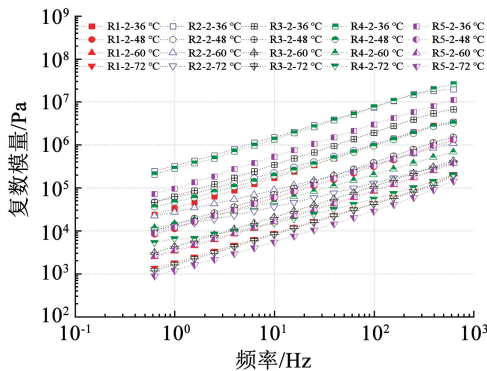


图 6 不同矿粉沥青胶浆的 G^* 结果

Fig. 6 G^* results of asphalt mortar with different mineral powder

3) 不同 0.075 mm 通过率的影响。图 7 为 R11 ~ R14 不同 0.075 mm 通过率的矿粉, 在掺量为 110% 时 4 个温度下胶浆的 G^* 结果。由图 7 可以看

出: 85% 的 0.075 mm 通过率在中温时 G^* 较大; 其他 0.075 mm 通过率的矿粉沥青胶浆, 各温度下 G^* 均差异不大。

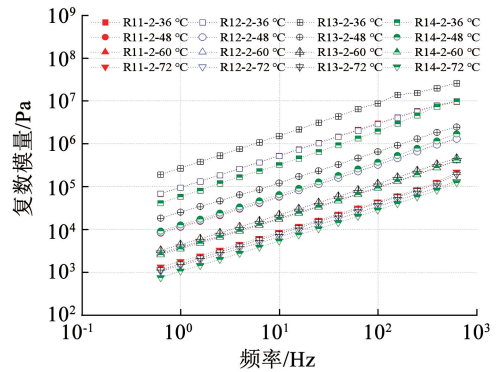


图 7 不同 0.075 mm 胶浆的 G^* 结果

Fig. 7 G^* results of different 0.075 mm mortar

2.2.2 复数模量 G^* 主曲线

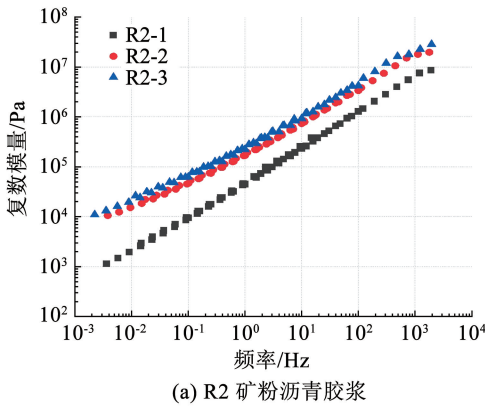
G^* 主曲线是描述沥青胶浆动态力学性质的重要指标之一。通过最小二乘法平移 G^* 并计算移位因子, 平移后叠加的曲线即为 G^* 主曲线。实际操作需用最小二乘法求解式^[16]:

$$S_{EE} = \sum \frac{(\log |G_e(f, T)| - \log |G_d(\alpha_T(T, T_r) \times f, T_r)|)^2}{(\log |G_e(f, T)|)^2} \quad (6)$$

式中: $G_e(f, T)$ 为原始 G^* 值, $G_d(f, T_r)$ 为最小二乘法

所求 G^* 值, T 为实际温度, T_r 为参考温度, $\alpha_T(T, T_r)$ 为实际温度与参考温度间的移位因子, f 为频率。

1) 不同掺量矿粉的影响。图 8 为参考温度为 48 °C 时 R2、R3 矿粉沥青胶浆的 G^* 主曲线。由图 8



可以看出:随着矿粉掺量的增加, G^* 主曲线整体向左上平移;且同一频率下, G^* 随着矿粉掺量的增加而增大。这说明随着矿粉掺量的增加, 沥青胶浆的刚性及弹性增强。

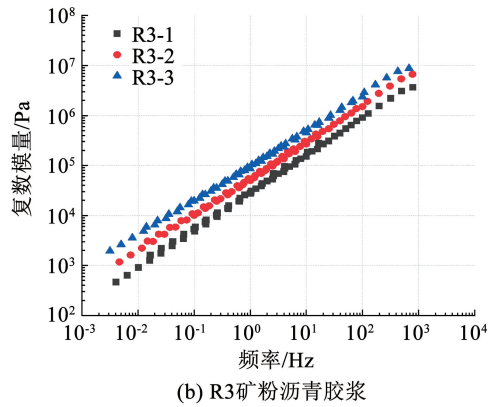


图 8 不同矿粉掺量的沥青胶浆 G^* 主曲线

Fig. 8 G^* main curves of asphalt mortar with different mineral powder content

2) 不同类型矿粉的影响。掺量为 110% 的 5 种不同矿粉的沥青胶浆 G^* 主曲线见图 9。可以看出, 5 种矿粉的 G^* 主曲线分为两类: R1、R3、R5 矿粉胶浆的 G^* 偏低, 且主曲线基本重合; R2、R4 矿粉沥青胶浆的 G^* 大于另外 3 种, 其中, 低频时 R2 矿粉沥青胶浆的 G^* 较大, 而高频时 G^* 的增长变平缓且低于 R4 矿粉沥青胶浆, 但总体上差异较小。

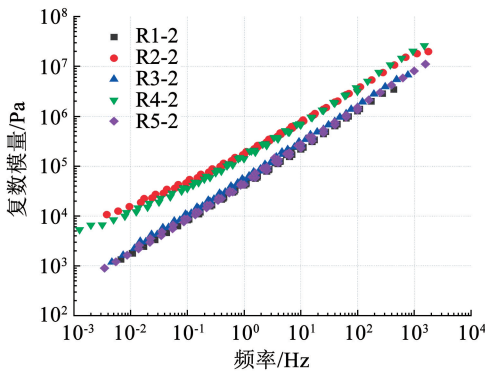


图 9 不同类型矿粉的 G^* 主曲线

Fig. 9 G^* main curves of different types of mineral powders

3) 不同 0.075 mm 通过率矿粉的影响。图 10 为不同 0.075 mm 通过率矿粉的 G^* 主曲线。由图 10 可以看出: 4 组不同 0.075 mm 通过率矿粉胶浆中, 仅 85% 时 G^* 相对较大; 其他通过率的矿粉胶浆 G^* 之间差异不大, G^* 由大到小排序为 90% > 75% > 80%。因此在所研究的 0.075 mm 通过率范围内, 胶浆 G^* 的大小存在先变小后增大的规律, 与前文所研究的规律相同。

2.2.3 车辙因子和相位角

1) 车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 。图 11 为 60 °C 下温度扫描的 $G^*/\sin \delta$ 计算结果。由图 11 可以看出: 当矿

粉掺量增加时, 沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 也逐渐增大, 说明在该掺量范围内增加矿粉掺量可以提高胶浆的抗车辙性能; R1 矿粉掺量最大时的 $G^*/\sin \delta$ 远大于 R3、R5 矿粉掺量最大时的 $G^*/\sin \delta$, 说明随矿粉掺量的增大, $G^*/\sin \delta$ 的变化并不是线性的, 而可能是迅速增大; 随着矿粉 0.075 mm 通过率的增大, 胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 先变大后减小, 在 85% 通过率时 $G^*/\sin \delta$ 最大; 在掺量和 0.075 mm 通过率相同的情况下, 仅比较 5 种矿粉的抗车辙能力, 由强到弱依次为 R4、R2、R3、R5、R1。

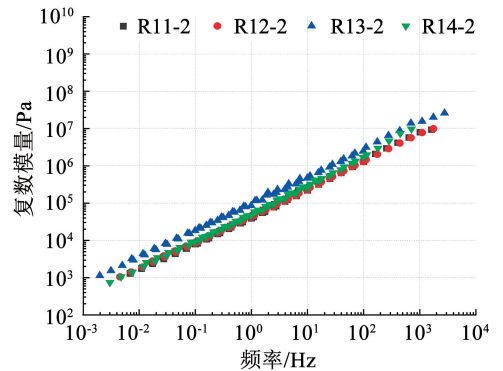


图 10 不同 0.075 mm 通过率矿粉的 G^* 主曲线

Fig. 10 G^* main curves of mineral powder with different 0.075 mm passing rates

2) 相位角 δ 。图 12 为 60 °C 温度扫描 δ 的结果。由图 12 可以看出: 3 种矿粉胶浆的 δ 随掺量变化规律均一致, 即随矿粉掺量的增加而减小, 说明矿粉加入的量会改变沥青胶浆的黏弹性; 矿粉掺量均为 110% 时, 对比同温同频的沥青胶浆, 对应矿粉的 δ 由大到小依次为 R3、R5、R2、R1、R4, 说明 R3 矿粉对沥青胶浆黏弹性的影响最大, 而 R4 矿粉对其影响最小。

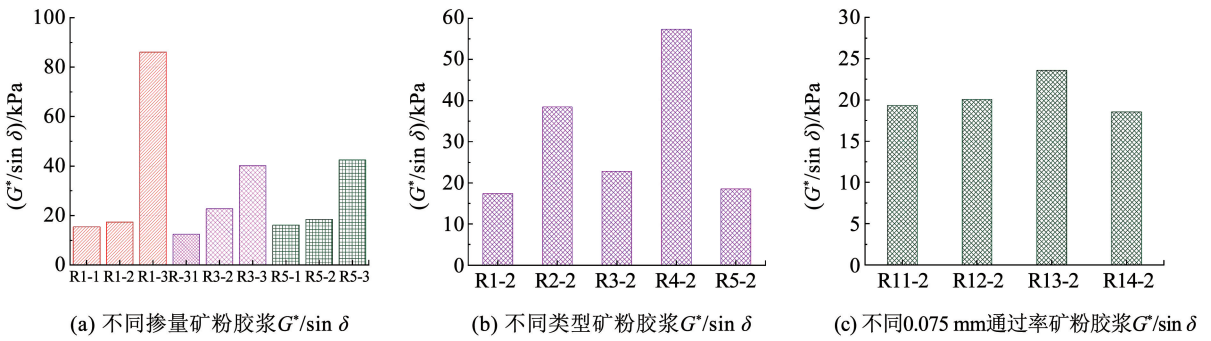


图 11 温度扫描 $G^*/\sin \delta$ 结果

Fig. 11 Temperature scan results of $G^*/\sin \delta$

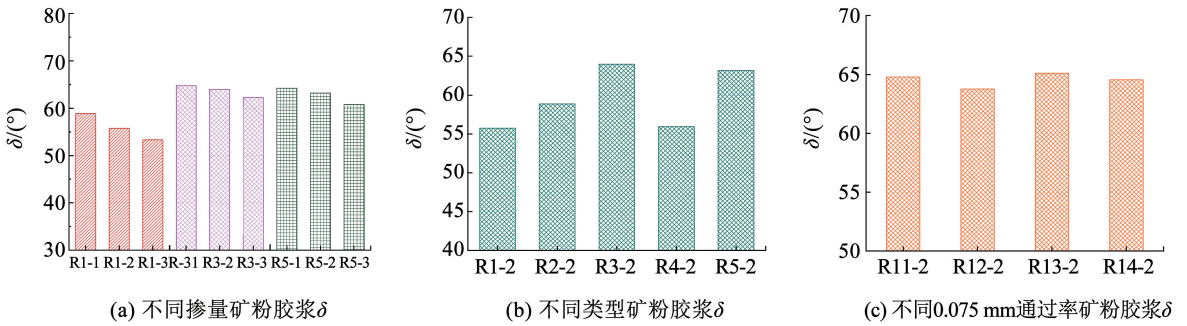


图 12 温度扫描 δ 结果

Fig. 12 Temperature scan results of δ

2.2.4 蠕变恢复率 R 和不可恢复蠕变柔量 J_{nr}

1) 不同掺量矿粉的影响。R11 矿粉 3 个掺量胶浆的应变变化见图 13。可以看出, 沥青胶浆的应变随着矿粉掺量的增加而减小, 说明矿粉的加入使沥青胶浆的抗流动性能变强。对于未展示的其他 8 种矿粉的沥青胶浆也基本是此规律, 所以在一定掺量范围内, 增加矿粉掺量可以提升沥青胶浆的抗永久变形能力。表 7 为 R11 矿粉沥青胶浆的 MSCR 试验结果。由表 7 可以看出: 在掺矿粉后 R 已经处于较高水平, 说明延迟弹性较好, 因此掺量的变化对高指标的影响不大; 但 J_{nr} 随矿粉掺量的增加而减少, 说明在一定掺量范围内矿粉掺量越高, 沥青胶浆的高温性能越好; 3.2 kPa 应力作用下的 J_{nr} 明显大于 0.1 kPa 应力作用下的 J_{nr} , 这与实际重载交通更容

易产生车辙的现象相对应; R_{diff} 与矿粉掺量间关系并不明显, 这与 R 的无规律性相对应, 而 $J_{nr,diff}$ 则随矿粉掺量的增加逐渐减少, 说明增加矿粉掺量能降低胶浆的应力敏感度。

2) 不同类型矿粉的影响。0.1 kPa 应力作用下 5 种矿粉均为 110% 的沥青胶浆 MSCR 试验结果见图 14。由图 14 可知: R4 矿粉胶浆的累积应变最小, 且其应变随时间的增加而增长最缓慢; R2 矿粉胶浆与 R4 矿粉胶浆变形趋势相近。表 8 为 5 种矿粉沥青胶浆 0.1 kPa 与 3.2 kPa 应力水平下的 MSCR 试验计算指标值, 可以看出: R2 矿粉沥青胶浆的抗高温性能最好, R3 矿粉最差; R4 矿粉的应力敏感度最大, R1 矿粉最小。

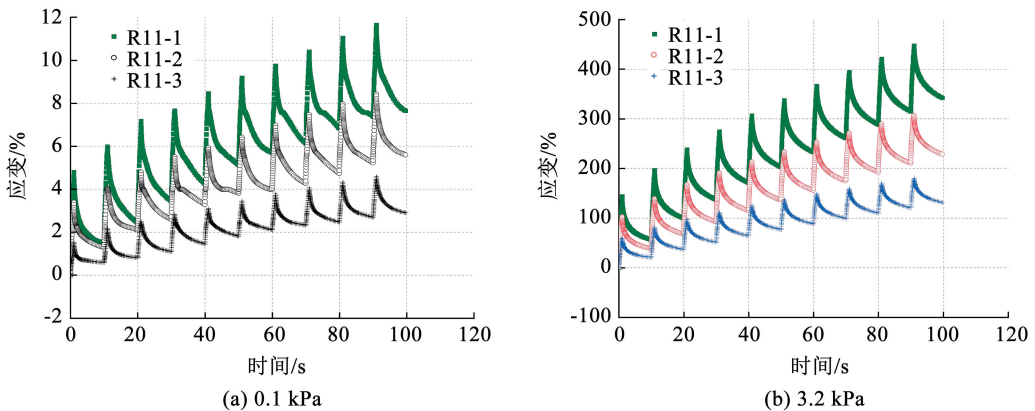


图 13 R11 矿粉 3 个掺量胶浆的应变变化

Fig. 13 Strain variation of R11 mineral powder with three different dosages of asphalt mortar

表 7 MSCR 试验评价指标结果

Tab. 7 Results of MSCR test evaluation indicators

矿粉编号	掺量/%	R/%		J_{nr}		$R_{diff}/\%$	$J_{nr,diff}$
		0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa		
R11	80	81.86	74.43	7.97	10.68	33.93	9.08
R11	110	80.66	76.39	5.60	7.14	27.47	5.29
R11	140	81.91	77.62	2.90	4.10	43.30	5.23

表 8 MSCR 试验评价指标结果

Tab. 8 Results of MSCR test evaluation indicators

矿粉编号	掺量/%	R/%		J_{nr}		$R_{diff}/\%$	$J_{nr,diff}$
		0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa		
R1	110	77.00	74.50	3.32	3.70	3.25	11.48
R2	110	89.52	87.64	0.92	1.41	2.09	53.47
R3	110	74.52	72.72	4.79	5.41	2.42	12.89
R4	110	88.25	76.17	1.25	1.94	13.69	55.26
R5	110	85.85	79.82	3.63	5.55	7.02	53.00

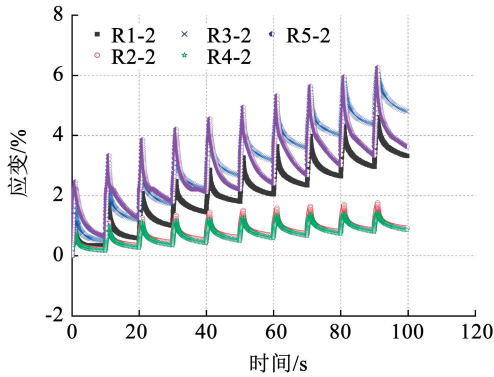


图 14 不同类型矿粉沥青胶浆的应变变化

Fig. 14 Strain variation of different types of mineral powder asphalt mortar

3) 不同 0.075 mm 通过率矿粉的影响。0.1 kPa 应力水平下,掺量为 110% 的 4 种不同 0.075 mm 通过率矿粉制备的沥青胶浆的应变变化见图 15。由图 15 可以看出:累积应变的大小随通过率的增大呈先减小后变大的趋势;4 种 0.075 mm 通过率的矿粉中 75% 通过率的累积应变最大,85% 通过率的累积应变最小,说明 75% 通过率的矿粉沥青胶浆在持续高温下的性能最差,而 85% 的最好。表 9 展示了掺量为 110% 的 4 种沥青胶浆在 0.1 kPa 与 3.2 kPa 应力水平下的 MSCR 试验指标结果。由表 9 可以看

出:随通过率的增大, R 先变大后减小,这与累积应变的规律相同,说明在一定通过率范围内,胶浆恢复变形的能力先增强后变弱,且存在峰值; J_{nr} 随通过率的增大先减小后增大,说明胶浆的抗高温性能先增强后减弱;0.075 mm 通过率为 80% 的应力敏感度最大。

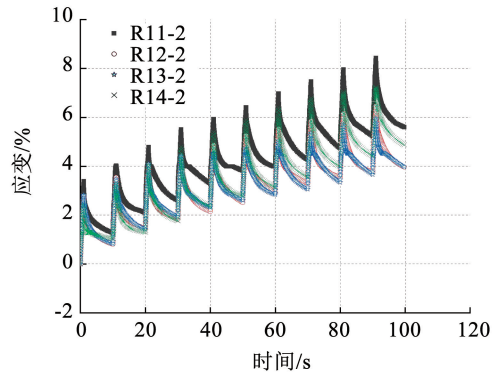


图 15 不同 0.075 mm 通过率胶浆的应变变化

Fig. 15 Strain variation of mineral mortar with different 0.075 mm pass rates

2.3 低温弯曲梁流变性能试验结果分析

为了分别从矿粉掺量、类型、0.075 mm 通过率方面探究其对沥青胶浆低温流变性能的影响,仅挑选典型数据进行对比分析。

表 9 MSCR 试验评价指标结果

Tab. 9 Results of MSCR test evaluation indicators

矿粉编号	掺量/%	R/%		J_{nr}		$R_{diff}/\%$	$J_{nr,diff}$
		0.1 kPa	3.2 kPa	0.1 kPa	3.2 kPa		
R11	110	80.66	76.39	5.60	7.14	5.29	27.47
R12	110	84.49	77.44	3.97	6.02	8.35	51.67
R13	110	83.36	76.48	3.98	5.84	8.25	46.82
R14	110	82.37	76.76	4.88	6.17	6.81	26.36

2.3.1 不同矿粉掺量的影响

R1 矿粉的 3 个掺量在 -12、-18、-24 °C 温度下的 BBR 试验结果见图 16。由图 16 可以看出: 在同一温度下, 随着矿粉掺量的增加, S 增大, m 减小, 说明在一定范围内增加矿粉掺量会降低胶浆的低温抗变形能力; 在 3 个温度环境下, m 均随掺量的增大而减小, 说明在一定范围内矿粉掺量的增加会使沥青胶浆的低温柔性变差。

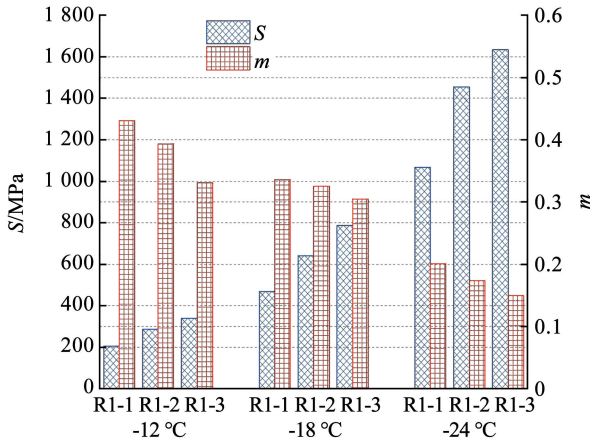


图 16 3 个温度环境下 BBR 试验结果

Fig. 16 BBR test results of different dosages under three temperature environments

2.3.2 不同类型矿粉的影响

对于沥青胶浆低温性能, S 越小, m 越大, 则沥青胶浆的低温流变性能越好。R1 ~ R5 矿粉掺量为 110% 的沥青胶浆在 -12 °C 温度下 S 和 m 测试结果见图 17。由图 17 可以看出, 在 5 种矿粉中, R5 矿粉的低温流变性能最好。

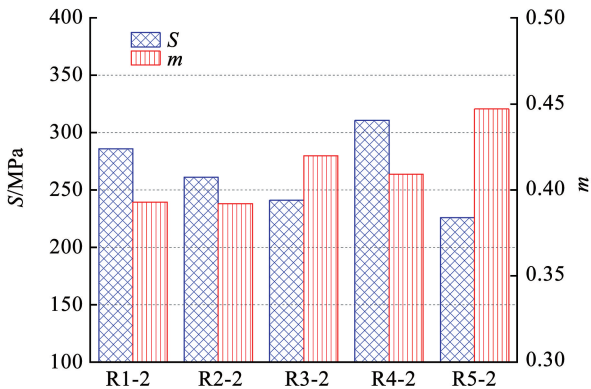


图 17 不同类型矿粉胶浆测试结果

Fig. 17 Test results of different types of mineral powder asphalt mortar

2.3.3 不同 0.075 mm 通过率矿粉的影响

针对 0.075 mm 通过率, R11 ~ R14 矿粉制成的沥青胶浆在 -12 °C 温度下的试验结果见图 18。由图 18 可以看出: 对于 S , 即低温抗裂性能由强到弱依次为 R12、R14、R11、R13; 对于 m , 即胶浆的低温

柔性由强到弱依次为 R14、R13、R11、R12, 说明单独从 S 与 m 分析并不能找到 0.075 mm 通过率与胶浆低温流变性能的关系。由于 S 用于评价沥青胶浆的低温抗裂能力, 并随着矿粉掺量的增加而增大; m 用于评价沥青胶浆的低温柔性, 随着矿粉掺量的增加而减小。因此, 可以得出 S 与掺量成正相关, $1/m$ 与掺量也成正相关, 所以本节采用 S/m 指标进行评价, S/m 指标越大, 沥青胶浆低温流变性能越低。4 种矿粉的 S/m 由大到小依次为 R13、R12、R11、R14, 说明随着矿粉 0.075 mm 通过率的增大, 其胶浆低温流变性能先减弱后增强。

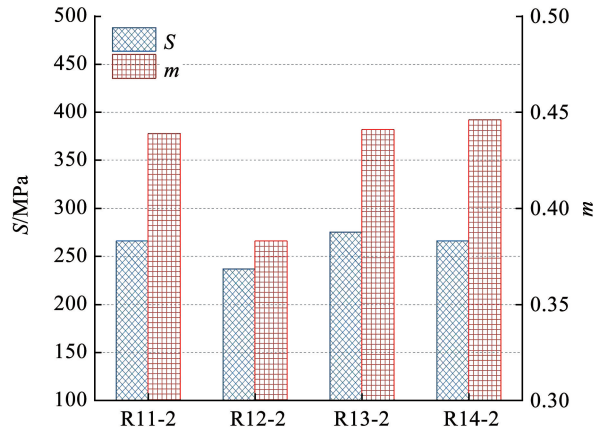


图 18 不同 0.075 mm 通过率矿粉胶浆测试结果

Fig. 18 Test results of mineral powder slurry with different 0.075 mm pass rates

3 矿粉特征对沥青胶浆流变性能的灰色关联分析

3.1 灰色关联分析法

灰色关联分析法是我国系统控制学专家邓聚龙教授提出的灰色系统理论中的重要方法, 是一种通过量化分析指标之间的关联程度确定其重要性的方法, 适用于指标间关系复杂、数据不完整或数据不确定的情况^[17]。

矿粉与沥青的交互作用受矿粉颗粒表面影响较大, 假设沥青在矿粉颗粒表面均匀裹挟, 因此, 利用矿粉表面积与沥青总体积的比值定义沥青胶浆膜厚度 T_{af} , 公式为

$$T_{af} = \frac{m_a}{\rho_a \times A_{ss} \times m_b} \quad (7)$$

式中: m_a 、 m_b 分别为沥青和矿粉的质量, ρ_a 为沥青密度, A_{ss} 为矿粉比表面积。

为探究矿粉特征与沥青胶浆高温、低温的关联程度, 在进行灰色关联分析时, 设置比较数列和参考数列分别进行分析。参考数列可以反映系统行为特征, 比较数列影响系统行为。依据研究内容, 参考数

列包括 δ 、 $G^*/\sin \delta$ 等,将影响这些数值的指标如 A_{ss} 等作为比较数列。

依据温度差异,将参考数列分为两组:第 1 组包括矿粉掺量为 110% 的 5 种胶浆在 60 °C 的 $G^*/\sin \delta$ 、 δ 及 60 °C 时 0.1 kPa 应力水平下的 R 和 J_{nr} ;第 2 组包括矿粉掺量为 110% 的沥青胶浆在 -12 °C 环境中

的 S 和 m 。同时,以矿粉粒度 (D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90})、氧化物含量 C_{ox} 、 A_{ss} 、 D_{ap} 、 V_{ap} 、矿粉密度 ρ 以及新定义的 T_{af} 作为比较数列。表 10 和表 11 分别为参考数列值和原始比较数列值。

灰色关联分析之前先对数据进行标准化处理,结果见表 12 和表 13。

表 10 参考数列值

Tab. 10 Reference sequence values

胶浆编号	$\delta/(\circ)$	$(G^*/\sin \delta)/\text{Pa}$	$R/\%$	J_{nr}	S/MPa	m
R1-2	55.74	17 419.19	77.00	3.32	285.946	0.393
R2-2	58.86	38 434.12	89.52	0.92	261.196	0.392
R3-2	63.97	22 788.03	74.52	4.79	240.922	0.420
R4-2	55.94	57 341.91	88.25	1.25	310.585	0.409
R5-2	63.19	18 504.21	85.85	3.63	225.842	0.447

表 11 原始比较数列值

Tab. 11 Original comparison sequence values

矿粉编号	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$A_{ss}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	D_{ap}/nm	$V_{ap}/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$C_{ox}/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$T_{af}/\mu\text{m}$
R1	2.806	28.224	96.686	0.673	38.81	0.005 51	23.89	2.612	1.327
R2	2.571	31.404	121.598	3.338	29.40	0.018 92	27.17	2.625	0.268
R3	5.512	51.391	92.103	1.560	35.00	0.005 18	31.46	2.713	0.572
R4	6.927	11.317	208.531	4.268	25.83	0.012 80	31.36	2.681	0.209
R5	4.315	77.375	264.378	1.332	33.80	0.005 77	31.80	2.715	0.670

表 12 标准化参考数列

Tab. 12 Standardized reference sequence

胶浆编号	$\delta/(\circ)$	$(G^*/\sin \delta)/\text{Pa}$	$R/\%$	J_{nr}	S/MPa	m
R1-2	0	0	0.165	0.620	0.709	0.018
R2-2	0.379	0.526	1.000	0	0.417	0
R3-2	1.000	0.134	0	1.000	0.178	0.509
R4-2	0.024	1.000	0.915	0.085	1.000	0.309
R5-2	0.905	0.027	0.755	0.700	0	1.000

表 13 标准化比较数列

Tab. 13 Standardized comparison sequence

矿粉编号	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$A_{ss}/(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	D_{ap}/nm	$V_{ap}/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$C_{ox}/\%$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$T_{af}/\mu\text{m}$
R1	0.054	0.256	0.027	0	1.000	0.024	0	0	1.000
R2	0	0.304	0.171	0.741	0.275	1.000	0.415	0.126	0.053
R3	0.675	0.607	0	0.247	0.706	0	0.957	0.981	0.325
R4	1.000	0	0.676	1.000	0	0.555	0.944	0.670	0
R5	0.400	1.000	1.000	0.183	0.614	0.043	1.000	1.000	0.412

3.2 矿粉特征对胶浆性能影响的灰色关联

3.2.1 高温性能影响分析

矿粉特征与胶浆高温性能灰色关联度结果见图 19。由图 19 可以看出,在 60 °C 温度下,矿粉的各种特征参数与沥青胶浆 δ 、 $G^*/\sin \delta$ 、 R 和 J_{nr} 的灰色关联度由大至小的排序分别为

$$1) \delta: C_{ox} > \rho > D_{ap} > D_{90} > D_{50} > D_{10} > T_{af} > V_{ap} > A_{ss} \circ$$

$$2) G^*/\sin \delta: D_{50} > D_{90} > T_{af} > C_{ox} > D_{ap} > V_{ap} > A_{ss} > D_{10} > \rho \circ$$

$$3) R: T_{af} > A_{ss} > V_{ap} > D_{10} > \rho > D_{90} > C_{ox} > D_{50} > D_{ap} \circ$$

$$4) J_{nr}: A_{ss} > V_{ap} > D_{ap} > D_{90} > T_{af} > D_{50} > C_{ox} > \rho > D_{10} \circ$$

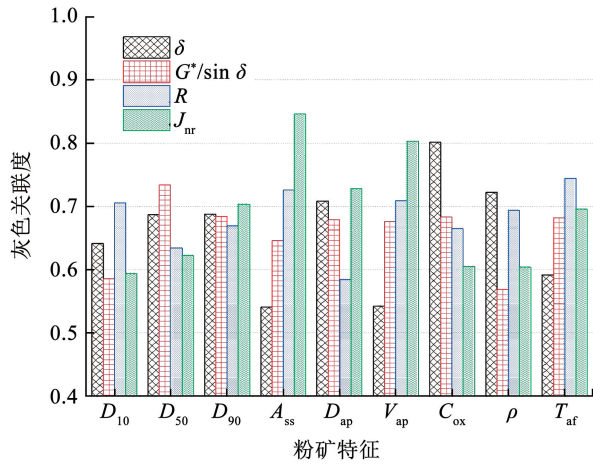


图 19 矿粉特征与胶浆高温性能灰色关联度

Fig. 19 Grey correlation between mineral powder characteristics and high-temperature performance of mortar

对于表征沥青胶浆黏弹性质的 δ , 矿粉的 C_{ox} 对其影响最大, 比表面积对 δ 的影响程度最低; 对于表征沥青胶浆耐久性和车辙性能的 $G^*/\sin \delta$, 矿粉的粒度指标 D_{50} 对其影响最大, ρ 对 $G^*/\sin \delta$ 的影响最小; 对于表征沥青混合料的抗蠕变性和稳定性的两个指标 R 和 J_{mr} , T_{af} 对 R 的影响最大, A_{ss} 对 J_{mr} 的影响最大, 这符合矿粉比表面积的大小决定了其吸附沥青能力的事实。

3.2.2 低温性能影响分析

矿粉特征与胶浆低温性能灰色关联度结果见图 20。由图 20 可以看出: 在 $-12\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下, 矿粉的各种特征参数与 S 、 m 的灰色关联度由大至小的排序分别为

- 1) $S: D_{90} > \rho > T_{af} > D_{ap} > A_{ss} > D_{50} > C_{ox} > V_{ap} > D_{10}$ 。
- 2) $m: D_{ap} > T_{af} > D_{90} > \rho > D_{10} > C_{ox} > V_{ap} > A_{ss} > D_{50}$ 。

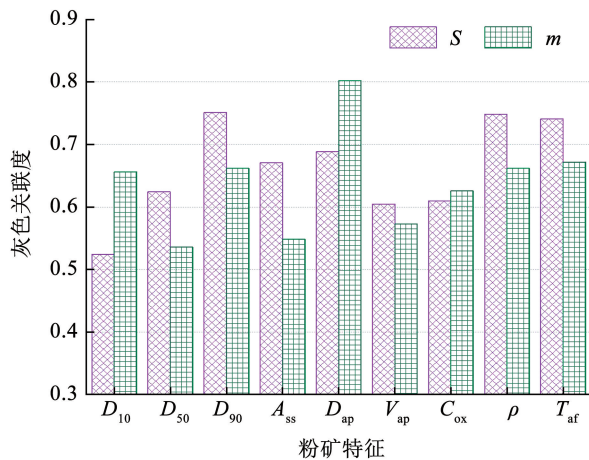


图 20 矿粉特征与胶浆低温性能灰色关联度

Fig. 20 Grey correlation between mineral powder characteristics and low-temperature performance of mortar

对于表征沥青胶浆低温下的抗蠕变性能的 S , D_{90} 对其影响程度最大, 而 D_{10} 对其影响最小; 对于表征胶浆低温稳定性的 m , 矿粉的 D_{ap} 对其影响最大, 而 D_{50} 对其影响最小。

4 结 论

1) 利用不同仪器分别测试了 5 种矿粉的粒度、比表面积、化学元素组成、化合物组成、微观形貌特征及孔隙结构。对于物理特征, 粒度仪测试 5 种矿粉的 D_{50} 结果由大到小依次为 R5、R3、R2、R1、R4, 比表面积测试结果由大到小依次为 R2、R1、R3、R5、R4。对于微观结构, R1 与 R2 矿粉大多数颗粒形状相似且棱角较多, R4 矿粉中偏圆形的颗粒较多; 同时, 5 种矿粉的微小孔隙数量较少, R3 与 R4 矿粉的孔隙多为狭长型, 而 R1、R2、R5 矿粉的孔隙多是颗粒堆积形成的。

2) 对制备的不同掺量、类型及 0.075 mm 通过率的矿粉沥青胶浆分析试验结果发现: 高温时, 随着矿粉掺量的增大, 胶浆的复数模量和车辙因子增大, 相位角和不可恢复蠕变柔量减小, 蠕变恢复率变化不明显, 说明矿粉掺量越高, 沥青胶浆的整体高温性能越好, 且胶浆的抗流动性能越强; 低温时, 随矿粉掺量的增大, 蠕变劲度增大, 蠕变劲度变化率减小; 当 0.075 mm 通过率在 75% ~ 90% 范围内增大时, 复数模量、车辙因子和蠕变恢复率均先增大后减小, 不可恢复蠕变柔量先减小后增大, 相位角没有明显规律, 说明低温时性能先减弱后增强。

3) 将矿粉的粒度、比表面积、氧化物含量、平均孔径、平均孔容积、密度以及沥青胶浆膜厚度作为比较数列, 车辙因子、相位角、蠕变恢复率及不可恢复蠕变柔量作为高温性能参考数列, 将蠕变劲度、蠕变劲度变化率作为低温性能参考数列分别进行灰色关联度分析, 得出: 对于高温指标, 矿粉的氧化物含量对相位角影响最大, 而比表面积对其影响程度最小; 矿粉粒度 D_{50} 对车辙因子的影响最大, 而矿粉密度对其影响最小; 沥青胶浆膜厚度对蠕变恢复率的影响最大, 平均孔径对其影响最小; 比表面积对不可恢复蠕变柔量的影响最大, 矿粉粒度 D_{10} 对其影响最小。对于低温性能指标, 矿粉粒度 D_{90} 对蠕变劲度影响程度最大, 而矿粉的平均孔径对蠕变劲度变化率影响最大。

参考文献

[1] QIU Hongsheng, TAN Ximing, SHU Shi, et al. Influence of filler-bitumen ratio on performance of modified asphalt mortar by additive [J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(1): 40

- [2]冯浩. 基于粘弹性理论的沥青胶浆试验特性研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008
FENG Hao. Research on the experimental characteristics of asphalt mortar with visco-elasticity theory [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008
- [3]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): 5
ZHANG Zhengqi, WANG Yongcai. 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): 5. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2006.02.001
- [4]TAN Yiqiu, LI Zhihui, ZHANG Xiaoyan, 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. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000015
- [5]刘丽, 郝培文, 肖庆一, 等. 沥青胶浆高温性能及评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007, 27(5): 30
LIU Li, HAO Peiwen, XIAO Qingyi, et al. High temperature properties and evaluation method of asphalt mortar[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2007, 27(5): 30. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2007.05.007
- [6]BARRA B, MOMM L, GUERRERO Y, et al. Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciencias, 2014, 86(2): 995. DOI: 10.1590/0001-3765201420130165
- [7]纪伦, 徐琳琳, 邬金麒, 等. 沥青铺面拌合场质量状态灰色模型评测体系构建[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(7): 1
JI Lun, XU Linlin, WU Jinqi, et al. Construction of grey model evaluation system for quality management of asphalt mixture mixing plant[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(7): 1. DOI: 10.11918/202201035
- [8]纪伦, 李云良, 孙维刚, 等. 沥青混合料中矿粉用量、细度和密度指标的控制[J]. 公路交通科技, 2014, 31(8): 25
JI Lun, LI Yunliang, SUN Weigang, et al. Control dosage, fineness and density index of mineral in asphalt mixtures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(8): 25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.08.000
- [9]董仕豪, 韩森, 尹媛媛, 等. 基于表面能理论的石灰改性沥青黏附性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 89
DONG Shihao, HAN Sen, YIN Yuanyuan, et al. Adhesion of lime modified asphalt based on surface energy theory [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(3): 89. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2021.03.14
- [10]郑水林. 无机粉体表面改性技术发展现状与趋势[J]. 无机盐工业, 2011, 43(5): 1
ZHENG Shuilin. Present development status and trend of surface modification technology for inorganic powders [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2011, 43(5): 1
- [11]孙勇, 纪伦, 孙维刚, 等. 沥青混凝土结构表征与参数构建[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3): 38
SUN Yong, JI Lun, SUN Weigang, et al. Characterization and parameter construction of asphalt concrete structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(3): 38. DOI: 10.11918/201810183
- [12]MICAELO 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: 228. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.066
- [13]柳浩, 李晓民, 张肖宁, 等. 消石灰与矿粉沥青胶浆流变性能比较[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(11): 1506
LIU Hao, LI Xiaomin, ZHANG Xiaoning, et al. Compared rheology of asphalt mastics performance with hydrated lime and limestone filler [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 35(11): 1506
- [14]王琨, 郝培文. BBR 试验的沥青低温性能及粘弹性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(10): 1138
WANG Kun, HAO Peiwen. Analysis of asphalt low temperature performance and viscoelasticity based on BBR test [J]. Journal of Liaoning Technological University (Natural Science), 2016, 35(10): 1138. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.2016.10.024
- [15]陈静云, 赵慧敏. 用 SHRP 方法评价再生沥青性能[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(1): 68
CHEN Jingyun, ZHAO Huimin. Performance evaluation of recycle asphalt by SHRP [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(1): 68
- [16]马晓燕. 沥青-填料交互作用效应与沥青胶浆性能预估研究[D]. 西安: 长安大学, 2019
MA Xiaoyan. Study on asphalt-filler interaction and prediction of asphalt mastic performance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2019.000028
- [17]刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041
LIU Sifeng, CAI Hua, YANG Yingjie, et al. Advance in grey incidence analysis model [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8): 2041