

DOI:10.11918/202112048

石灰岩矿粉性质对沥青胶浆性能的影响因素及其技术标准

王 龙¹, 马海龙², 王天伟¹, 彭海东³

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 黑龙江省交通投资集团有限公司, 哈尔滨 150060;
3. 东北林业大学 工程咨询设计研究院有限公司, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了确定石灰岩矿粉性质中影响沥青胶浆抗冻性能的主要因素, 并制定石灰岩矿粉分级和选用原则, 对不同类型矿粉的沥青胶浆进行了冻融循环试验, 分别检测其冻融前后的化学成分、微观形貌、微观力学性质和流变性能的变化, 并对试验结果进行随机森林分析。结果表明: 矿粉的掺入能够改善沥青胶浆的冻融老化性能, 冻融循环后, 胶浆粗糙度下降幅度、表面模量提升幅度与矿粉 CaCO_3 含量(质量分数)呈抛物线下降趋势, 沥青胶浆黏附力与矿粉 CaCO_3 含量呈直线下降关系, 为保持沥青胶浆冻融后性能的稳定, 矿粉的 CaCO_3 含量不应低于 85%; 季冻区的沥青路面比非季冻区更容易发生水损害, 与非季冻区相比, 季冻区矿粉中 CaCO_3 含量应提高 10%。随机森林方法分析表明, 矿粉的物理化学性质对胶浆性能影响的程度排序为比表面积 > CaCO_3 含量 > 细度指标 > 塑性指数, 比表面积影响沥青与矿粉的反应速度, 而 CaCO_3 含量影响其反应的充分性。所提出的石灰岩矿粉母岩技术要求与矿粉的综合分级技术标准, 可指导路用矿粉的分级、选用和生产控制。

关键词: 沥青胶浆; 矿粉性质; 冻融循环; 微观分析; 流变特性; 随机森林; 技术标准

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)09-0007-10

Influence of limestone mineral powder properties on asphalt mortar performance and its technical standards

WANG Long¹, MA Hailong², WANG Tianwei¹, PENG Haidong³

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Heilongjiang Transportation Investment Group Co., Ltd., Harbin 150060, China;

3. Northeast Forestry University Engineering Consulting and Design Institute, Harbin 150001, China)

Abstract: To investigate the main factors affecting the anti-frost properties of asphalt mortar and provide classification and selection principle for limestone powder, we carried out freezing-thawing cycle tests on asphalt mortar with different types of mineral powder. The chemical composition, microscopic morphology, microscopic mechanical property, and rheological property were detected during the freezing-thawing cycles, and random forest analysis was conducted on the test results. Results showed that the addition of mineral powder improved the anti-aging properties of asphalt mortar during freezing and thawing. After freezing-thawing cycles, the decrease in mortar roughness and the increase in surface modulus showed a downward-parabolic trend with the content of CaCO_3 (mass fraction), while the adhesion decreased linearly with the content of CaCO_3 . The CaCO_3 content of mineral powder should not be less than 85%, so as to maintain the stability of asphalt mortar properties after freezing-thawing cycles. Asphalt pavement moisture damage was more likely to occur in seasonal frozen area than in non-seasonal frozen area. Compared with non-seasonal frozen area, the CaCO_3 content of mineral powder in seasonal frozen area should be increased by 10%. Random forest analysis showed that the ranking of influence factors of physical and chemical indexes of mineral powder on the properties of mortar were specific surface area (SSA) > CaCO_3 content (CC) > fineness index (X_{90}) > index of plasticity (IP). Specific surface area affected the reaction rate of asphalt and mineral powder, while CaCO_3 content affected the adequacy of the reaction. The technical requirements of limestone rocks and the comprehensive classification technical standards of mineral powder were proposed, which can guide the classification, selection, and production of mineral powder for road usage.

Keywords: asphalt mortar; mineral powder properties; freezing-thawing cycle; micro-analysis; rheological properties; random forest; technical standards

收稿日期: 2021-12-11

作者简介: 王 龙(1968—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 马海龙(1975—), 男, 硕士, 高级工程师

对于季冻区, 不仅存在春、秋季的冻融循环作用, 而且夏季炎热多雨, 相比非季冻地区, 对沥青混

合料耐久性的要求更高^[1],而作为填料的矿粉,其物理化学性质影响其与沥青中酸性物质的化学反应状态,进而影响沥青混合料的耐久性^[2];然而,相关技术规范对矿粉的技术要求极为简单,仅给出了级配、塑性指数和亲水系数等物理指标的技术要求^[3],而影响沥青胶浆性能的因素不仅仅是矿粉的物理性质,其主要化学成分的含量更是主要因素^[4]。因此有必要研究矿粉的物理、化学性质在冻融循环作用下对沥青胶浆性能的影响,根据其影响的幅度,确定出矿粉的主要物理、化学指标的排序,并采用随机森林法分析影响胶浆性能的主导因素,从沥青材料的化学组成、微观结构和流变性能等方面揭示矿粉的物理化学性质对沥青胶浆耐久性的影响规律,进而提出季冻区沥青混合料用石灰岩矿粉各指标的技术要求。

1 试验方法与材料

1.1 试验方法

石灰岩矿粉中化合物的成分采用 XRD (X-ray diffraction) 射线衍射光谱进行测量,根据谱图中峰

表 1 基质沥青性能检测结果

Tab.1 Performance test results of asphalt

技术指标	针入度/0.1 mm	15 °C 延度/cm	软化点(R&B)/°C	密度/(g·cm ⁻³)	运动黏度(135 °C)/(Pa·s ⁻¹)
试验值	84.5	158.6	49	1.1	0.286
规范要求值	80~100	≥140	≥45	—	—

采用 4 种产地的矿粉,用比表面积(SSA)、塑性指数(IP)、细度指数(X₉₀)和 CaCO₃含量(CC)来表征矿粉的物理化学指标,不同矿粉的物理化学性质指标见表 2,可以看出,金泰矿粉的 CaCO₃含量最高为 90%,山林矿粉的最低为 60%。

表 2 不同产地矿粉物理化学性质

Tab.2 Physical and chemical properties of mineral powder from different producing areas

矿粉产地	X ₉₀ /μm	SSA/(m ² ·g ⁻¹)	IP/%	CC/%
山林	64.1	0.97	3.5	60
嫩江	44.8	1.04	6.7	70
年丰	45.7	1.18	7.4	80
金泰	52.0	1.09	5.9	90

2 矿粉性质对胶浆化学组成的影响

利用傅里叶红外光谱分析图中吸收峰的位置可以判断物质中所含的化学基团的种类,而吸收峰高度的大小表示化学基团含量的多少;由于沥青胶浆不透明,因此采用反射方法,样品的制备采用溴化钾(KBr)压片法,试验采用 PERKINELMER 公司的傅里

的高度来确定矿粉中各结晶成分的含量,采用氮吸附比表面积及孔径分析仪来测试不同矿粉的比表面积,应用傅里叶红外光谱 FTIR 测试,判断沥青胶浆在冻融过程中官能团含量的变化^[5-7],采用原子力显微镜 AFM 测试其表面微观特性^[8-9],采用旋转剪切流变仪 DSR,研究矿粉的物理化学性质对沥青胶浆性能的影响。根据沥青胶浆的制备和冻融循环试验的相关研究^[10-12],确定沥青胶浆的制备方法如下:配制粉胶比为 0.8 的沥青胶浆,先用玻璃棒搅拌沥青胶浆 10 min,再利用电力搅拌器搅拌 15 min,然后在直径为 50 mm、深度为 10 mm 铝皿中一次性浇筑成型,将铝皿置于冰箱和水浴箱中,完成冻融循环试验条件的模拟;胶浆冻结的温度为 -20 °C±1 °C,冻结时间为 16 h,融化温度为 20 °C±1 °C,融化时间为 8 h,一次冻融循环时间为 24 h,对经过 0、5、10、15 次冻融循环的沥青胶浆进行相关性能测试。

1.2 试验材料

沥青胶浆采用安达 90 号基质沥青,因基质沥青更容易受到老化的作用,从而更容易分析矿粉性质对其性能的影响,表 1 为沥青的主要技术指标。

叶红外光谱仪,红外光谱的波数为 650~4 000 cm⁻¹。

对基质沥青和不同矿粉下的沥青胶浆在未冻融和 15 次冻融的试样进行红外光谱试验,部分红外光谱如图 1 所示,根据红外光谱图对比得到的各沥青胶浆官能团含量变化见表 3。

根据图 1 和表 3 的数据可以得到如下结论:

1) 掺入矿粉之后的沥青并没有产生新的特征峰,只是某些官能团的含量发生了变化,说明矿粉的加入短期内并没有与沥青产生新的化合物,但是发生了一定的化学反应,影响了官能团的含量。2) 根据沥青老化理论,沥青老化的主要原因是亚砷基和羰基的增加,从表 3 可以发现,基质沥青和山林矿粉沥青胶浆中的亚砷基有所提高,产生了老化现象,而基质沥青和山林矿粉的 CaCO₃偏低(分别为 0 和 60%),而其他 3 种矿粉的胶浆未发生老化现象,说明高 CaCO₃含量的矿粉(CC>70%)能够减小沥青胶浆的冻融老化。3) 基质沥青、年丰沥青胶浆中,位于 1 376 cm⁻¹、1 456 cm⁻¹处的非对称脂肪族化合物含量下降,这与自由基的反应机理是吻合的,即轻组分产生了裂化与挥发。

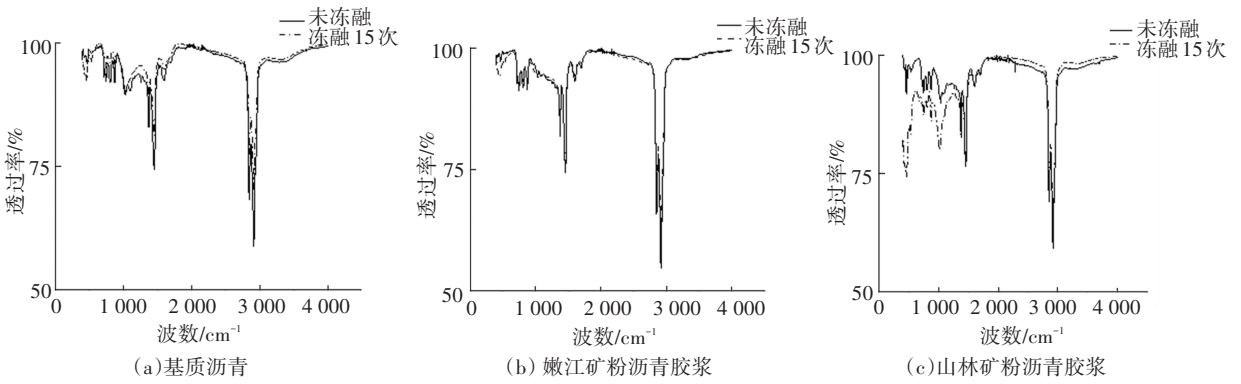


图1 基质沥青与沥青胶浆冻融前后红外光谱

Fig.1 Infrared spectra of asphalt and asphalt mortar before and after freezing and thawing

表3 基质沥青及胶浆官能团冻融作用前后含量变化

Tab.3 Content changes in functional groups of asphalt and mortar before and after freezing and thawing

矿粉产地	二取代芳香烃 (C-H) (745 cm ⁻¹ , 810 cm ⁻¹)	三取代芳香烃 (874 cm ⁻¹ , 1 031 cm ⁻¹)	亚砷基(S=O) (1 033 cm ⁻¹)	非对称脂肪族化合物 (1 376 cm ⁻¹ , 1 456 cm ⁻¹)
基质	↓	↑	↑	↓
年丰	—	—	—	↓
嫩江	—	↑	—	—
山林	—	—	↑	—
金泰	—	—	—	—

注:“—”代表官能团含量不发生变化,“↑”代表官能团含量上升,“↓”代表官能团含量下降。

综上所述,矿粉的加入会与沥青产生反应,但不会形成新的官能团。矿粉中的 CaCO₃会与沥青中的酸酐反应,阻碍沥青的冻融损伤,而且不同的 CaCO₃含量对沥青的影响不同,如金泰矿粉中的 CaCO₃含量最高,含量为 90%,所以其阻碍官能团变化的作用最好。山林矿粉的 CaCO₃含量较低,为 60%,而且其比表面积最小,粒径较大,导致反应的接触面积小,反应较弱,所以其不能阻止造成沥青老化的主要产物亚砷基的生成。因此,从沥青老化上考虑,矿粉的 CaCO₃含量不应低于 60%。

3 矿粉性质对胶浆表面特性的影响

经过冻融损伤之后,沥青胶浆表面的粗糙度、弹

性模量以及黏附力会产生很大的变化,采用原子力显微镜 AFM 扫描未冻融和冻融 15 次沥青胶浆的表面形貌图以及力曲线信息,建立表面形态、力学指标与矿粉性质之间的关系,揭示沥青与矿粉的交互作用机理,确定矿粉的技术标准。

3.1 矿粉性质对胶浆表面形貌的影响

试验中每个扫描点的扫描范围为 20 μm × 20 μm,每个试样扫描 6 个点。利用 NanoScope Analysis 软件分析实验结果。图 2 和图 3 分别为基质沥青和年丰沥青胶浆未冻融和冻融 15 次的微观形貌图。

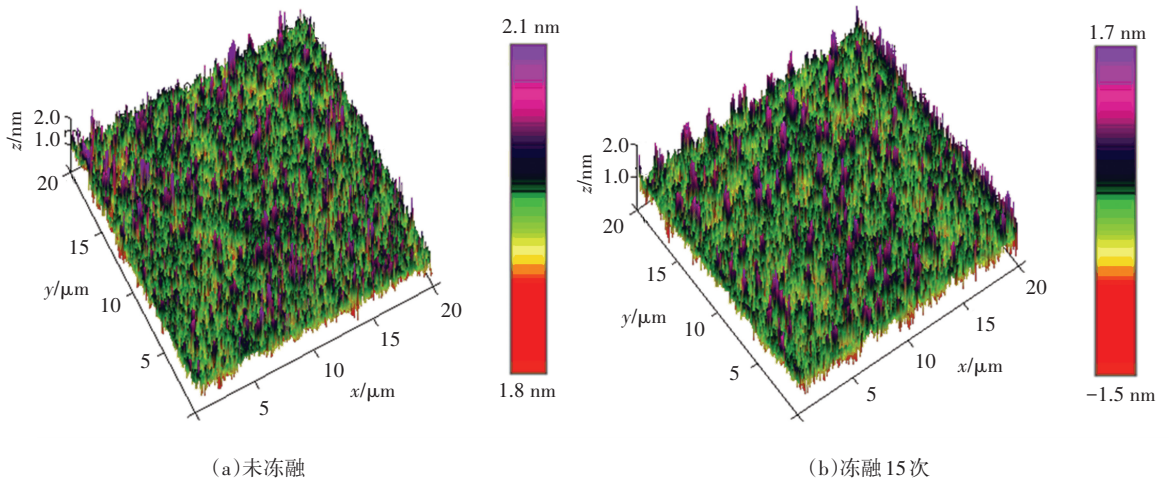


图2 基质沥青冻融前后微观形貌

Fig.2 Microscopic morphology of asphalt before and after freezing and thawing

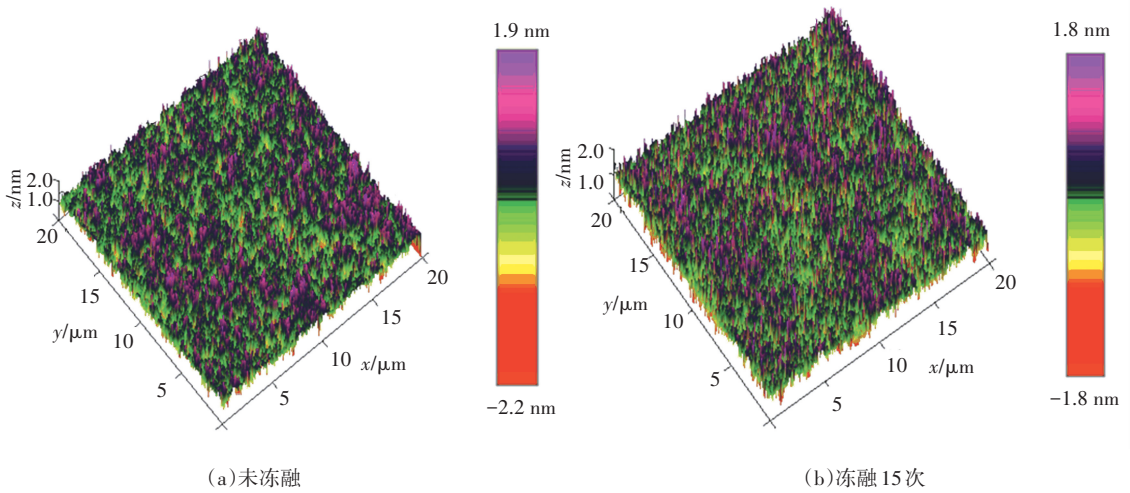


图 3 年丰沥青胶浆冻融前后微观形貌

Fig.3 Microscopic morphology of Nianfeng asphalt mortar before and after freezing and thawing

从图 2 和图 3 中可以看出,基质沥青和沥青胶浆在经过冻融老化之后的表面高低起伏发生了变化,参考粗糙度国际参数^[13-14],选取 Ra 评价沥青胶浆表面的粗糙度,计算公式如式(1)所示,不同矿粉下沥青胶浆在冻融循环前后的粗糙度及其降低幅度 ΔRa 见表 4,沥青胶浆在冻融循环前后 Ra 的变化如图 4 所示。

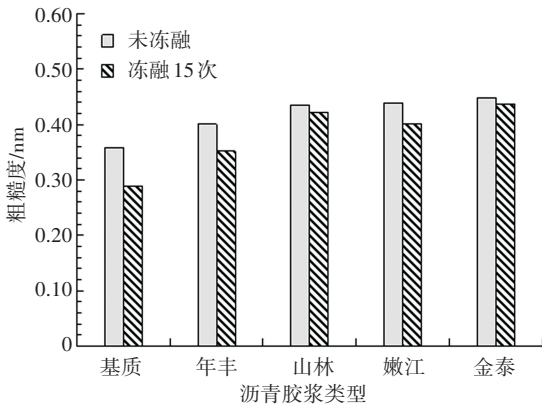
$$Ra = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_j \quad (1)$$

式中: Ra 为沥青胶浆表面的粗糙度, nm; N 为所选范围内数据点的采样数; Z 为表面上某一点相对于显微镜运行状态下的高度值, 可为负值, nm。

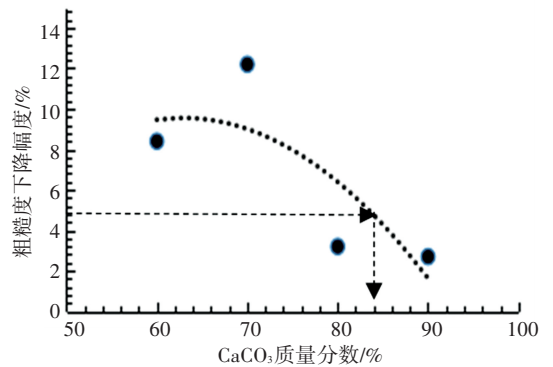
表 4 沥青与沥青胶浆冻融前后的表面粗糙度及其变化

Tab.4 Surface roughness of asphalt and asphalt mortar before and after freezing and thawing and its variation

沥青胶浆种类	Ra/nm		变异系数/%		$\Delta Ra/\%$
	未冻融	冻融 15 次	未冻融	冻融 15 次	
基质沥青	0.359	0.289	28.7	23.2	19.5
年丰矿粉胶浆	0.401	0.352	18.7	24.5	12.2
山林矿粉胶浆	0.435	0.421	15.3	20.6	3.2
嫩江矿粉胶浆	0.439	0.402	23.4	25.7	8.4
金泰矿粉胶浆	0.449	0.437	21.8	16.9	2.7



(a) 冻融前后粗糙度的对比



(b) 粗糙度下降幅度与 $CaCO_3$ 质量分数的关系

图 4 冻融循环前后沥青胶浆表面粗糙度变化

Fig.4 Surface roughness changes in asphalt mortar before and after freezing and thawing

从图 4(a) 中可以看出,冻融前后沥青胶浆的表面粗糙度均大于基质沥青表面粗糙度,说明掺入矿

粉后,冻融前后沥青胶浆与集料的黏附性均有很大的提升,平均提升的幅度分别为 20% 和 40%,主要

原因是矿粉的掺入后,矿粉与沥青发生了化学反应,降低了沥青胶浆的冻融损伤,但冻融后,沥青胶浆的表面粗糙度均小于冻融前,降低幅度在3%~20%之间,说明在季冻区的沥青路面比非季冻区更容易发生水损害,对于季冻区的沥青混合料,其矿粉的质量要求应高于非季冻区。图4(b)为矿粉CaCO₃含量与胶浆粗糙度下降幅度的关系,可以看出,冻融15次后,粗糙度的下降幅度与CaCO₃含量呈抛物线下降趋势,当以粗糙度的下降幅度为5%作为标准,则要求季冻区矿粉中CaCO₃含量不应小于85%,结合图4(a)中年丰和金泰矿粉冻融前后粗糙度的变化可知,金泰矿粉沥青胶浆冻融后的粗糙度与年丰矿粉冻融前的粗糙度相当,说明季冻区矿粉中CaCO₃含量应平均增加10%,其应用效果才能与非季冻区相一致。

3.2 矿粉性质对沥青胶浆表面力学性质的影响

采用原子力显微镜 AFM 对不同的沥青胶浆进行表面力曲线扫描,沥青胶浆的弹性模量结果如图5和图6所示。图7(a)为冻融循环后沥青胶浆的

弹性模量的变化图,由图可知,在没有冻融的情况下,沥青胶浆的弹性模量在掺入矿粉之后均有一定程度的提高,但提升的幅度不大,平均提升了12%左右,其中金泰矿粉提升的幅度最高,为16%,因为其CaCO₃含量高,比表面积较大,加速了其沥青的反应,形成高模量物质较多。在冻融15次以后,模量均有较大程度的提高,嫩江和年丰矿粉所含有的CaCO₃含量都较低,所以其弹性模量的变化幅度较大,分别为35.6%和32.1%,山林矿粉CaCO₃含量最低,且比表面积较小,所以其弹性模量变化也较大,为30.2%,而金泰矿粉的CaCO₃含量最高,比表面积大,与沥青的相互作用能力较强,所以其未冻融的弹性模量较大,但在冻融作用下,模量增加的幅度最小,为17.3%,说明矿粉的CaCO₃含量越高,比表面积越大,沥青胶浆抗冻融效果越好,性能越稳定。图7(b)为矿粉CaCO₃含量与表面模量提升幅度的关系,可以看出,二者呈抛物线关系,当提升幅度控制在25%以内时,矿粉CaCO₃含量应大于85%。

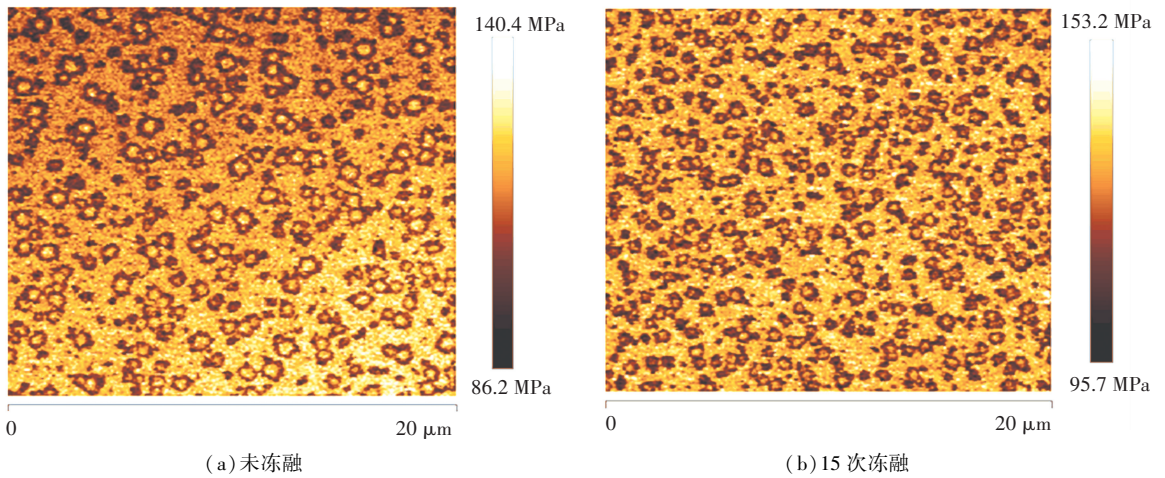


图5 冻融前后基质沥青弹性模量

Fig.5 Elastic modulus of asphalt before and after freezing and thawing

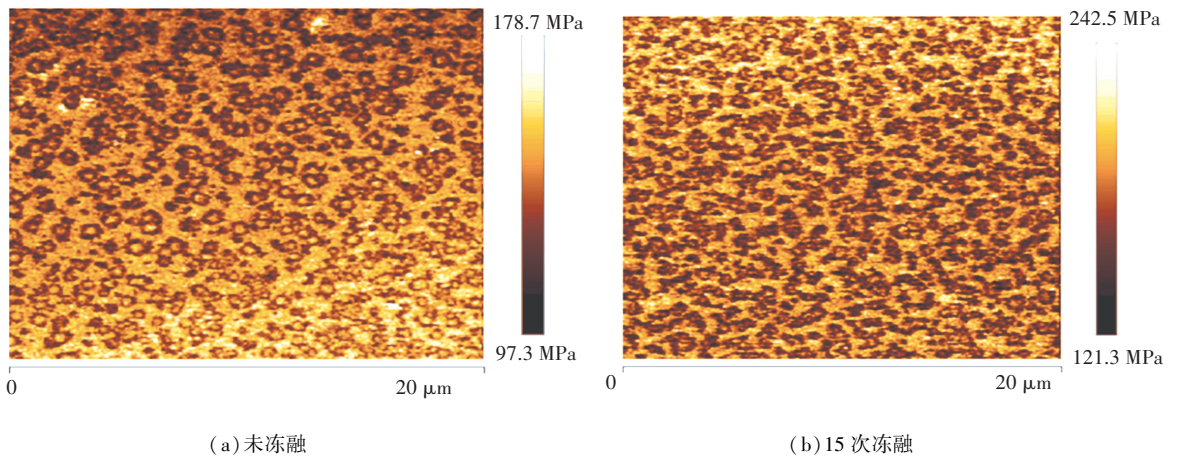


图6 冻融前后嫩江沥青胶浆弹性模量

Fig.6 Elastic modulus of Nenjiang asphalt mortar before and after freezing and thawing

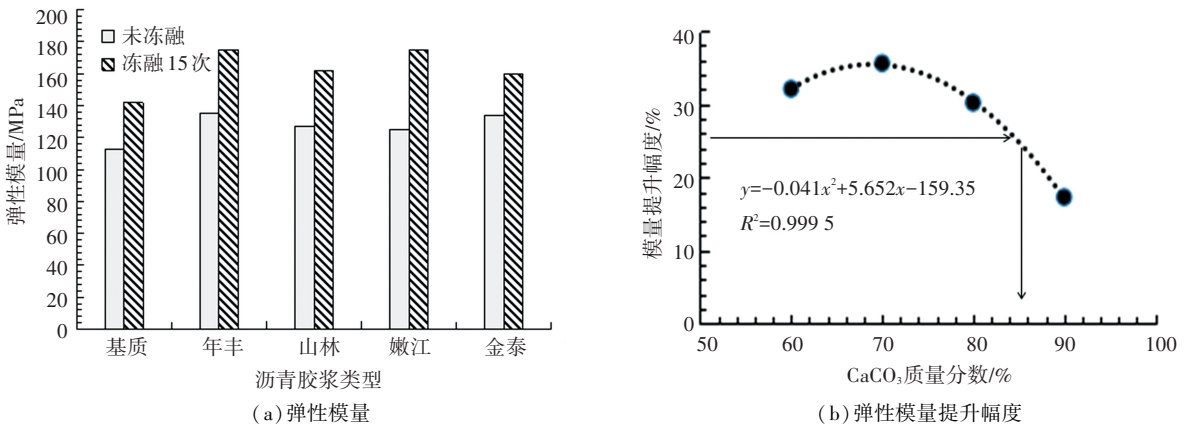


图 7 冻融循环前后沥青胶浆表面弹性模量及其提升幅度

Fig.7 Change and increase in elastic modulus of asphalt mortar before and after freezing and thawing

沥青与集料界面黏附性的好坏,除了与两种材料的表面形貌有关,还直接取决于其表面的黏附力^[15-17]。目前对沥青与集料表面黏附状态主要是通过宏观的物理实验来表征,例如水煮法、水浸法

等,但采用沥青胶浆表面的黏附力来评判矿粉的掺入对沥青的黏附性的影响更为科学。掺入矿粉后沥青胶浆的黏附力测试结果变化如图 8 所示。

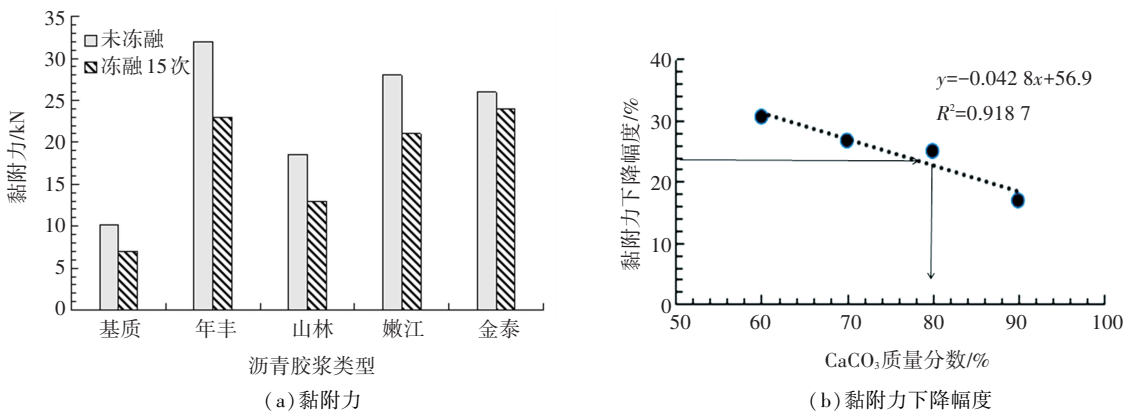


图 8 冻融循环前后沥青胶浆黏附力及其下降幅度

Fig.8 Variation of adhesion of asphalt mortar before and after freezing and thawing

从图 8(a)可以看出,在冻融前,矿粉的掺入,会大幅度增加沥青胶浆的表面黏附力,这是因为矿粉的加入使沥青内部分子排列更加紧密,会使沥青胶浆产生“加筋”效应,同时矿粉与沥青之间发生的化学反应,增加了沥青胶浆表面的黏附力,根据矿粉物理化学性质的不同,提升幅度在 75%~200%之间,平均提升 150%;山林矿粉的颗粒最粗,所以其加筋效果最弱,初始的黏附力也最小,而嫩江和年丰矿粉较细,所以初始的黏附力最高;经 15 次冻融循环作用后,各沥青胶浆的黏附力均有所降低,下降幅度在 17%~30%之间,平均幅度为 25%,其原因主要是由于沥青受到冻融损伤的影响,沥青的化学组成会发生变化,而沥青的物理性质受到化学组成的影响,冻融损伤后,沥青硬质组分增加,黏附性降低,所以其黏附力降低。从图 8(b)可以看出,冻融循环后沥青胶浆黏附力下降幅度与 CaCO₃含量成正比,CaCO₃含量越高,黏附力下降幅度越小;而细度也是影响下

降幅度的因素,嫩江、山林、年丰矿粉生成的沥青胶浆下降趋势相差不大,原因是由于在冻融循环作用下,矿粉细度对黏附力变化的影响变小,主要影响黏附力变化的是矿粉与沥青之间的化学反应,而嫩江矿粉与年丰矿粉的 CaCO₃含量均较低,所以矿粉与沥青的反应弱,山林矿粉则是因为比表面积影响到了其反应程度,金泰沥青胶浆变化幅度最小,是由于其较高的 CaCO₃含量和较大的比表面积,即细度或比表面积影响沥青与矿粉的反应速度,而 CaCO₃含量影响反应深度;当黏附力下降的幅度小于 25%时,矿粉的 CaCO₃含量不应小于 80%。

4 矿粉性质对沥青胶浆流变性能的影响

动态剪切流变仪 DSR 能够测量沥青或沥青胶浆在特定温度以及加载频率下的流变性能,主要指标有复数剪切模量、相位角和车辙因子。采用不同冻融循环次数的沥青胶浆进行 DSR 试验,以应变控

制模式, 温度扫描在 30 ~ 60 °C 之间, 温度步长为 10 °C, 角频率为 0.01 ~ 100 rad/s^[18]。

4.1 主曲线分析

复数模量 G^* 大小能够反映出沥青(胶浆)抵抗剪切和变形的能力, 复数模量越大, 其抵抗变形的能力越强, 高温稳定性就越好, 图 9 为典型沥青胶浆复数模量主曲线, 图 10 为不同沥青胶浆的复数模量和相位角变化曲线。

图 10(a) 是不同沥青胶浆在 60 °C、1 Hz 频率下的复数模量, 根据图形可以看出, 加入矿粉后, 无论冻融前后, 沥青胶浆的复数模量均匀很大的提升, 但由于矿粉的性质不同, 提升的状况也不尽相同。从复数模量曲线的纵向分布看, 根据 CaCO_3 的含量复数模量变化曲线可分为两类, 第 1 类当 CaCO_3 含量较高时(年丰和金泰矿粉的 CC 分别为 80% 和

90%), 其复数模量曲线处于高位, 第 2 类当 CaCO_3 含量较低时(山林和嫩江矿粉的 CC 分别为 60% 和 70%), 其复数模量曲线处于低位, 两类曲线复数模量平均相差 400 Pa, 说明矿粉 CaCO_3 含量对于提高沥青胶浆的流变性能至关重要。年丰与山林沥青胶浆在冻融循环次数较低的时候复数模量增加较小, 但是在冻融次数超过 10 次之后, 复数模量增加较大, 年丰矿粉形成的沥青胶浆增长的较快原因是因为其塑性指数较大, 所以其后面的增长速度较大, 山林矿粉变化大的主要原因是比表面积小, 与沥青之间的交互作用小, 难以阻碍沥青在冻融作用下沥青的老化。金泰沥青胶浆的复数模量增加幅度较小, 说明金泰沥青胶浆的耐冻融性较好。因此, 矿粉的化学性质、 CaCO_3 含量、比表面积和 IP 均对沥青胶浆的冻融循环稳定性均有较大的影响。

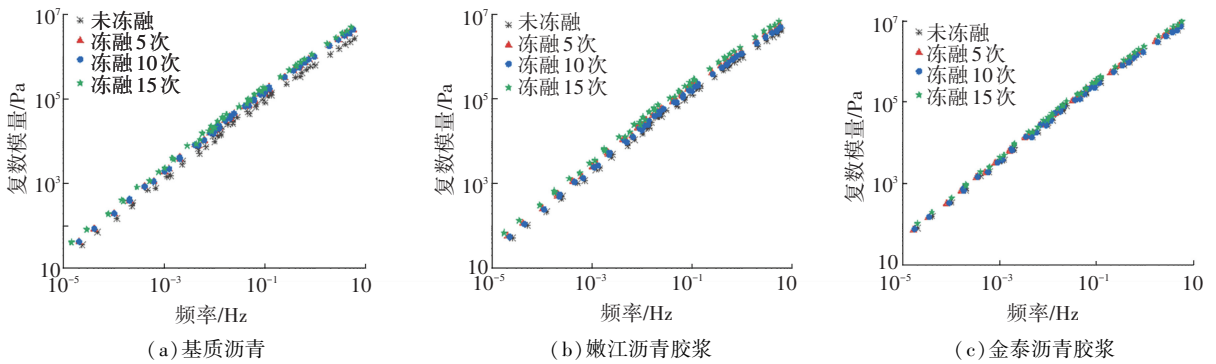


图 9 沥青胶浆冻融循环作用下的复数模量主曲线

Fig.9 Master curve of complex modulus of asphalt mortar under freezing-thawing cycles

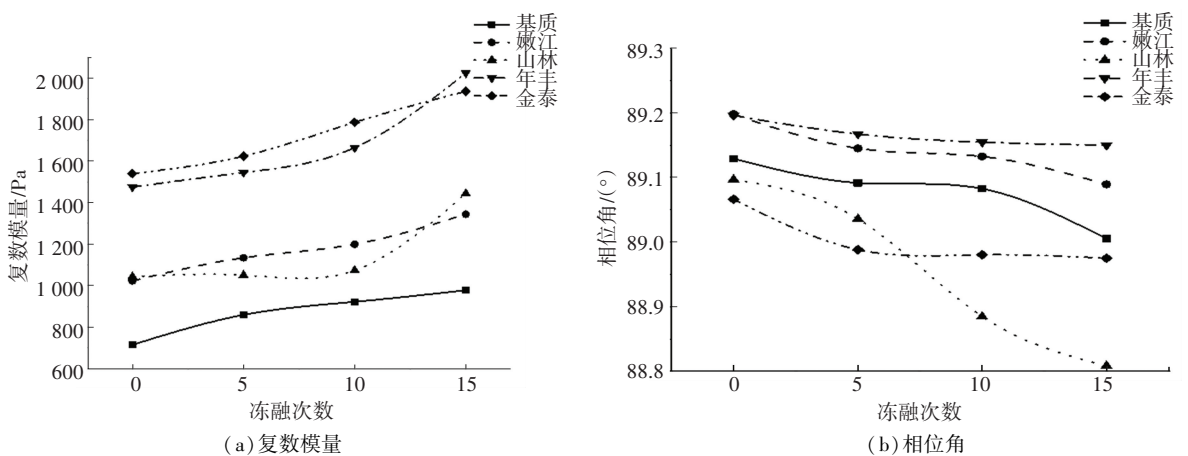


图 10 不同沥青胶浆的复数模量和相位角

Fig.10 Complex modulus and phase angle of different asphalt mortar

沥青材料中, 相位角 δ 反应了沥青胶浆的黏弹性成分比例, 相位角越大, 沥青胶浆的黏性成分越大, 当 δ 趋近于 90° 时, 表明此时的沥青已经是完全的黏性流体。沥青胶浆的相位角随冻融循环次数的变化规律如图 10(b) 所示, 可以看出, 经过冻融循环之后, 沥青胶浆基体变硬, 弹性成分增加, 因此相位角随之呈

现下降的趋势, 山林矿粉 5 次冻融循环后下降的幅度最大, 而金泰的减少幅度最小, 性能最稳定。

4.2 沥青胶浆的高温及疲劳性能分析

$G^* / \sin \delta$ 车辙因子是沥青的高温稳定性评价指标, 其数值愈大, 表明沥青或胶浆的抗高温能力越好, 对经过不同冻融次数的沥青胶浆进行频率扫描,

选取连续正弦交变荷载,得到 1 Hz 频率下 60 °C 的车辙因子、疲劳因子,所得结果图 11 所示。从图中可以看出,不同的沥青胶浆的车辙因子有所差异,而且沥青胶浆在经过长时间的冻融循环之后,抗高温

性能有所上升,但是趋势有所不同,也体现了矿粉性质对沥青胶浆性能变化的影响。车辙因子上升的主要原因是沥青在冻融作用后,其模量增加导致其抵抗变形的能力增强。

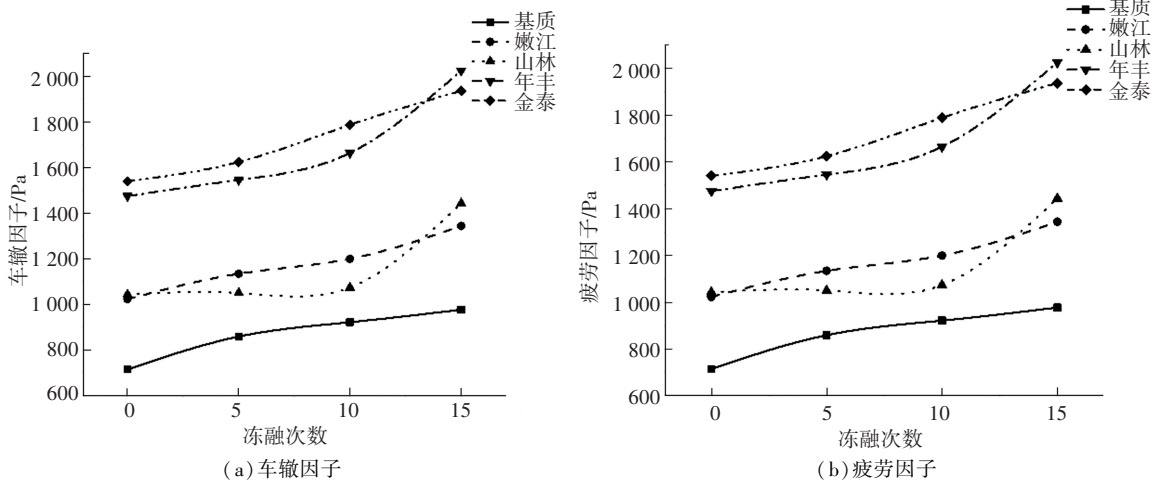


图 11 沥青胶浆 60 °C 车辙因子和疲劳因子变化

Fig.11 Variation of rutting and fatigue factors of asphalt mortar at 60 °C

同种沥青胶浆的疲劳因子与车辙因子的变化规律相同,均随着冻融次数的增多而增大。但是疲劳因子越大,沥青的抗疲劳特性越差,因此随着冻融次数的增多,虽高温稳定性有所增加,但抗疲劳性能呈现下降的趋势。其中山林和年丰矿粉沥青胶浆在冻融 10 次以后呈现明显的增大趋势,其余矿粉形成的沥青胶浆变化速率与基质沥青相当。

结合图 10、11 可以发现,沥青胶浆的复数模量、车辙因子、疲劳因子的变化规律基相同。矿粉的 SSA 和 CC 对胶浆的性能具有重要的影响,矿粉的 SSA 越大,CC 越高,胶浆的复数模量、车辙因子越大,高温性能越好,但抗疲劳性能和黏结性能会有所降低,说明矿粉增加矿粉的 SSA 和 CC 至关重要,现有的矿粉技术标准中,应增加这两项指标,以实现矿粉母岩 (CaCO₃ 含量) 选材和生产工艺 (比表面积) 的约束。

5 基于冻融循环的石灰岩矿粉技术标准

5.1 矿粉技术指标排序

利用随机森林方法^[19],采用 python 软件对矿粉的物理化学指标与胶浆性能的变化进行相关性分析,判断矿粉性质与沥青胶浆性能变化的关联性,以此提出矿粉技术指标排序。通过分析表明,矿粉指标重要性的排序结果:比表面积>CaCO₃ 含量>塑性指数>细度指标,且具有一致性。

根据排序结果可以看出,比表面积对沥青胶浆的耐冻融性影响最为显著,而 CaCO₃ 的含量次之,因为比表面积的大小直接决定矿粉与沥青的接触面

积,接触面积越大,短时间内产生的结构沥青越多,沥青胶浆的黏聚力就越强。沥青胶浆的粗糙度、黏附力与弹性模量等性能与矿粉中的 CaCO₃ 含量也具有很大的关系,CaCO₃ 含量越高,矿粉中的 Ca 离子就越多,能够与沥青产生化学吸附而形成较多的化学键,化学键结合力越大,进而影响到沥青的表面形貌以及微观力学性质变化,从而阻止沥青的组分在冻融循环的作用下产生冻融损伤,但这个化学过程较慢,短时间内的效果没有比表面积的作用效果显著。矿粉的细度指标以及塑性指数由于对沥青与矿粉的相互作用影响较小,对沥青胶浆的作用效果并不是特别明显。以上的分析表明,矿粉的 SSA 的越大和 CC 越大,沥青胶浆的耐冻融性越好,同时也应该控制矿粉的 IP 在一定的等级以上,且矿粉的 IP 必须与矿粉比表面积相对应。

5.2 季冻区沥青混合料矿粉技术标准

矿粉的特性主要由料源特性和加工特性两个方面决定。料源特性决定矿粉的岩性、密度、酸碱性、有效矿物含量等;但岩口的岩石材质不均匀并会有杂质,均会影响矿粉与沥青反应的深度;而加工特性会影响矿粉细度、比表面积和杂质的含量,这些会影响矿粉与沥青的反应速率。因此,矿粉的技术标准应包含对母岩和矿粉两部分要求。

在料源的基本要求方面,规范要求采用“石灰岩或岩浆岩强基性岩石等憎水性石料磨细的矿粉”,较为粗略,因此建议季冻区路用矿粉宜采用“石灰岩母岩且母岩的黏附性应达到五级”,原因有 3 点:一是石灰岩的分布广,便于开采,而强基岩浆

岩储量相对较少;二是石灰岩比较软,便于加工到规定的细度,而岩浆岩硬度相对较高,不易加工;三是石灰岩内 SiO₂ 的含量极少,属于碱性,而强基的岩浆岩 SiO₂ 含量一般为 30%~53%,接近中性。就矿粉而言,从亚砷基的生成来讲, CaCO₃ 含量不应小于 60%,从对胶浆表面力学性能影响上, CaCO₃ 含量不应小于 85%,有效成分要求越高,对母岩和加工工艺要求就越高,因此 CaCO₃ 含量的技术要求应结合公路等级按级别给出,以体现工程的经济原则。

矿粉的粒度分布是沥青混合料中细集料级配的进一步完善与延续,适当的粒度分布能够减小沥青混合料的空隙率,形成结构更加稳定的沥青混合料,以抵抗变形的影响。因此对矿粉的粒度分布有一定的技术指标要求。结合对矿粉的粒度分布的研究,将矿粉的粒度分布按照 90% 通过率的粒径作为指标进行分级。

由于来自不同产地的岩石的状态不同,采用的加工参数也有所不同,加工之后矿粉的表面粗糙度以及棱角性也会迥异;矿粉的比表面积是矿粉的粒度分布、粗糙度以及棱角性的综合体现,能够影响到矿粉与沥青的接触面积的大小,从而影响到沥青与矿粉的黏结性,因此有必要对矿粉的比表面积进行指标的分级。

矿粉的塑性指数不仅与所含杂质成分有关,还与矿粉的细度有关。矿粉在生产过程中,应该首先将岩石表面的覆盖物清理干净,特别是泥土。当泥土清理不干净时,生产出来的矿粉的塑性指数就会因为含有过多的亲水矿物而塑性指数偏大,因此应该对矿粉生产工艺严格控制。

图 12(a) 为塑性指数 IP 与 X₉₀ 的关系,而图 12(b) 为塑性指数 IP 与 SSA 的关系,从两张图上可以看出,塑性指数与二者呈线性关系,即 IP 随着细度 X₉₀ 的增加递减,IP 随着比表面积的增加而递增,这说明塑性指数 IP 并不是与矿粉中的杂质或者蒙脱石的含量呈单一关系,IP 是矿粉中的亲水物质、细度和比表面积的综合反映,在现行规范中,要求 IP ≤ 4% 的技术要求,应随着矿粉的细度或者比表面积的变化而调整,如当矿粉的比表面积增加时,IP 可适当增加,当矿粉的比表面积减少时,IP 可适当减小。

综合上述分析,结合矿粉中的 CaCO₃ 含量、比表面积对沥青胶浆冻融损伤的影响,将石灰岩矿粉分为 4 个等级,矿粉的综合分级标准见表 5,矿粉母岩要求 90 号基质沥青的黏附性不小于 5 级,为了方便矿粉生产企业控制细度,同时给出了不同等级矿粉的目数要求,其他技术指标则可遵循现行规范的技术要求。

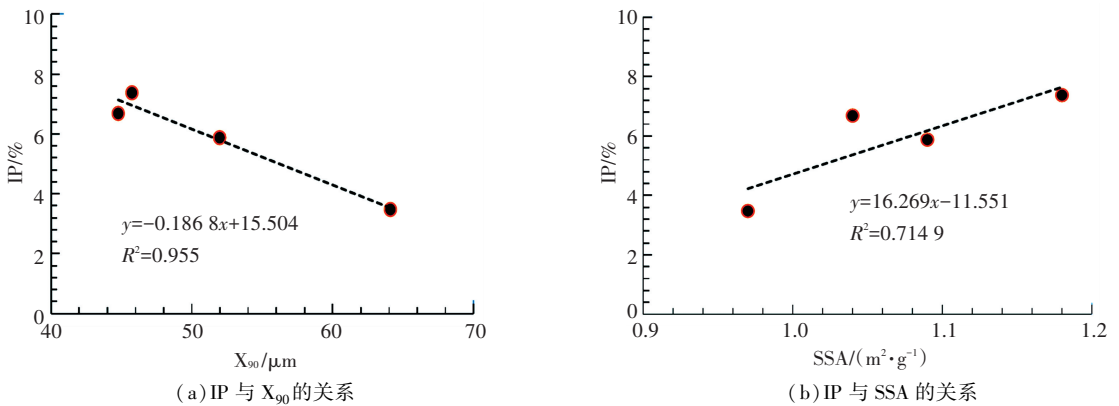


图 12 塑性指数 IP 与矿粉细度 X₉₀、比表面积 SSA 的关系

Fig.12 Relationship between plasticity index (IP), fineness index (X₉₀), and specific surface area (SSA)

表 5 矿粉的综合分级标准

Tab.5 Comprehensive classification standards of mineral powder

矿粉等级	CC/%	SSA/(m ² ·g ⁻¹)	IP/%	X ₉₀ /μm	目数
1	90~100	1.2~1.3	0~7	30~40	400~450
2	80~90	1.1~1.2	0~6	40~50	300~400
3	70~80	1.0~1.1	0~5	50~60	250~300
4	60~70	0.9~1.0	0~4	60~70	200~250

6 结 论

1) 矿粉的掺入能够改善沥青胶浆的冻融老化

性能,冻融循环后矿粉 CaCO₃ 含量与胶浆粗糙度下降幅度、表面模量提升幅度呈抛物线下下降趋势,与沥青胶浆黏附力呈直线下下降关系,矿粉的加入使冻融

循环后的高温稳定性和抗疲劳性能变化幅度降低,季冻区石灰岩矿粉的 CaCO_3 含量不应低于 85%。

2) 季冻区的沥青路面比非季冻区更容易发生水损害,为平衡季冻区和非季冻区的性能,季冻区比非季冻区矿粉平均增加 10% 的 CaCO_3 含量。

3) 随机森林方法分析表明,矿粉的物理化学指标对胶浆性能变化影响的重要性:比表面积 $> \text{CaCO}_3$ 含量 $>$ 塑性指数 $>$ 细度指标,比表面积影响沥青与矿粉的反应速度,而 CaCO_3 含量影响反应深度。

4) 基于矿粉物理化学指标对沥青胶浆冻融损伤的影响,提出了矿粉母岩要求与矿粉的综合分级技术标准。

参考文献

- [1] 李福普,李健. 沥青混合料高温强度影响因素及提高措施方法研究[J]. 石油沥青, 2013, 27(2): 1
LI Fupu, LI Jian. Research on affecting factors and improving methods of strength in high temperature of asphalt mixture[J]. Petroleum Asphalt, 2013, 27(2): 1
- [2] 李孟,曲恒辉,赵庆民,等. 石灰岩矿粉改性及其对沥青混合料高温性能的影响[J]. 山东交通学院学报, 2021, 29(2): 43
LI Meng, QU Henghui, ZHAO Qingming, et al. Modification of limestone powder and influence on high temperature performance of asphalt mixture[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2021, 29(2): 43
- [3] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specification for construction of asphalt pavements: JTG F40—2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004
- [4] 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
LI Tao, HU Huimin. Influence of mineral fillers on properties of asphalt mortar [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2013, 36(8): 983
- [5] 潘晓峰,祝鸿,石鹏程,等. 全气候沥青混合料中老化沥青的微观性能非线性模型[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 780
PAN Xiaofeng, ZHU Hong, SHI Pengcheng, et al. Nonlinear models of micro-properties of recovered asphalt binders in weathered asphalt mixtures[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5): 780
- [6] 朱亚明,高丽娟,赵雪飞,等. 净化沥青的傅里叶变换红外光谱分峰拟合定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(3): 765
ZHU Yaming, GAO Lijuan, ZHAO Xuefei, et al. Quantitative analysis of refined pitches by curve-fitting of Fourier transform infrared spectroscopy spectrum [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(3): 765
- [7] 向浩,张文武,刘鹏,等. 热氧老化沥青多次损伤-愈合性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 592
XIANG Hao, ZHANG Wenwu, LIU Peng, et al. Multiple damage-healing properties of asphalt under thermal oxygenation[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 592
- [8] 赵春花. 原子力显微镜的基本原理及应用[J]. 化学教育(中英文), 2019, 40(4): 10
ZHAO Chunhua. Principles and application of atomic force microscopy[J]. Chinese Journal of Chemical Education, 2019, 40(4): 10
- [9] YANG Jun, GONG Minghui, WANG Xiaoting, et al. Observation and characterization of asphalt microstructure by atomic force microscopy[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014, 30(3): 353
- [10] 郑健龙,张洪刚,钱国平,等. 水温冻融循环条件下沥青混合料性能衰变的规律[J]. 长沙理工大学学报, 2010, 7(1): 7
ZHENG Jianlong, ZHANG Honggang, QIAN Guoping, et al. Attenuated performance of asphalt mixture under freeze-thaw cycle with water and temperature [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2010, 7(1): 7
- [11] 张倩,李剑军. 沥青混合料冻融劈裂微观结构损伤特性分析[J]. 公路交通科技, 2010, 7(2): 10
ZHANG Qian, LI Chuangjun. Analysis of micro structural damage characteristics of freeze-thaw split asphalt mixtures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(2): 10
- [12] 赵军林. 冻融循环作用下沥青混合料低温性能及力学特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021
ZHAO Junlin. Low temperature performance and mechanical properties of asphalt mixture under freeze-thaw cycle [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021
- [13] 许勤. 基于分子动力学模拟的沥青再生剂扩散机理分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015
XU Meng. Analysis of the diffusion of rejuvenator into asphalt based on the molecular dynamic simulation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [14] 裴忠实. 基于 AFM 的老化沥青表面微观特征及影响因素分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016
PEI Zhongshi. Analysis of surface microscopic characteristics and influencing factors of aged asphalt materials based on the principle of AFM [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [15] 庞骁奕. 基于 AFM 与表面能原理的沥青与集料粘附特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015
PANG Xiaoyi. Asphalt and aggregate adhesion characteristics analysis based on the principle of AFM and the surface energy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015
- [16] AGUIAR-MOYA J P, SALAZAR-DELGADO J, BONILLA-MORA V, et al. Morphological analysis of bitumen phases using atomic force microscopy[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(S1): 138. DOI: 10.1080/14680629.2015.1029672
- [17] MENAPACE I, MASAD E, BHASIN A, et al. Microstructural properties of warm mix asphalt before and after laboratory-simulated long-term ageing[J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(S1): 2. DOI: 10.1080/14680629.2015.1029692
- [18] 李晓民,豆莹莹,徐慧宁,等. 冻融循环作用下沥青胶浆交互能力及流变性能的研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(5): 831
LI Xiaomin, DOU Yingying, XU Huining, et al. Interaction ability and rheological properties of asphalt mastic under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(5): 831
- [19] 周英,卓金武,卞月青. 大数据挖掘: 系统方法与实例分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 4
ZHOU Ying, ZHUO Jinwu, BIAN Yueqing. Using big data to build your business [M]. Beijing: China Machine Press, 2016: 4