

石墨尾矿掺量对沥青胶浆性能的影响

李秋实¹, 骆轩佩¹, 韩丹²

(1. 东北林业大学 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 黑龙江生态工程职业学院 工程技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要: 针对石墨尾矿资源化利用与道路工程填料可持续替代的双重需求, 研究石墨尾矿部分替代石灰石矿粉对沥青胶浆性能的影响机制及最优掺量。通过扫描电镜(SEM)分析石墨尾矿和石灰石矿粉的微观形貌, 制备不同掺量的石墨尾矿沥青胶浆, 开展高温流变、低温流变和抗疲劳性能测试。结果表明, 当石墨尾矿替代率达25%时, 沥青胶浆高温性能获得突破性提升。相较于石灰石沥青胶浆, 石墨尾矿沥青胶浆在135℃时的布氏黏度提升83.3%, 46℃时的动态剪切流变车辙因子增长63.2%, 抗疲劳性能通过线性振幅扫描试验测得峰值应力增长32.6%。SEM微观分析表明, 石墨尾矿的边缘多呈不规则锯齿状, 表面较为粗糙, 能够增强沥青-填料界面强度。石墨尾矿的加入导致沥青胶浆的低温性能衰减, 在-18℃时蠕变劲度较石灰石沥青胶浆增加17.7%, 蠕变速率下降22%。研究结论为石墨尾矿的高值化利用和可持续道路材料的开发提供依据。

关键词: 道路工程; 石墨尾矿; 掺量; 沥青胶浆; 流变; 微观形貌; 抗疲劳性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)01-0034-08

Effect of graphite tailings content on the properties of asphalt mastic

LI Quishi¹, LUO Xuanpei¹, HAN Dan²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. Institute of Engineering Technology, Heilongjiang College of Ecological Engineering,

Harbin 150025, China)

Abstract: Aiming at the dual needs of resource utilization of graphite tailings and sustainable replacement of road engineering fillers, the influence mechanism and optimal dosage of graphite tailings partially replacing limestone powder on the performance of asphalt mortar were studied. The microstructure of graphite tailings and limestone powder was analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The asphalt mastic with different content of graphite tailings was prepared, and the high temperature rheology, low temperature rheology and fatigue resistance test were carried out. The results show that when the substitution rate of graphite tailings is 25%, the high temperature performance of asphalt mortar is improved. Compared with limestone asphalt mastic, the Brinell viscosity of graphite tailings asphalt mortar at 135℃ increased by 83.3%, the dynamic shear rheological rut factor at 46℃ increased by 63.2%, and the peak stress measured by linear amplitude scanning test increased by 32.6%. SEM microscopic analysis shows that the edges of graphite tailings are mostly irregularly serrated and the surface is rough, which can enhance the strength of asphalt-filler interface. The addition of graphite tailings leads to the attenuation of the low temperature performance of asphalt mortar. At -18℃, the creep stiffness increases by 17.7% and the creep rate decreases by 22% compared with limestone asphalt mortar. The research conclusions provide a basis for the high-value utilization of graphite tailings and the development of sustainable road materials.

收稿日期: 2025-05-29 修回日期: 2025-07-03 接受日期: 2025-07-15 责任编辑: 焦丽

基金项目: 中央高校基本科研事业费专项资金项目(2572017BB05)

作者简介: 李秋实(1979-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授, 主要从事路基路面工程与道路工程材料方面的研究。E-mail: liquishi1016@163.com

Keywords: road construction; graphite tailings; content; asphalt mastic; mobility; microscopic morphology; anti-fatigue performance

0 引言

随着“双碳”目标的推进,石墨凭借在清洁能源技术迭代中的关键作用,需求量持续攀升^[1]。随着石墨资源的快速消耗,石墨矿石的开采量也逐年提高。石墨生产以浮选工艺为主^[2],石墨尾矿是排放的尾矿矿浆经自然脱水后形成的工业固体废弃物。石墨尾矿的大量堆积会污染环境、侵占耕地,更对矿区周边流域生态构成严重威胁,已成为制约中国石墨行业可持续发展的关键障碍^[3]。交通基础设施建设的持续推进,使沥青材料需求量逐年攀升。而传统沥青胶浆性能提升高度依赖石灰岩、玄武岩等天然矿物填料,这类不可再生资源正面临储量锐减的枯竭危机,其开采、加工全链条还伴随大量碳排放,形成双重发展压力。因此,开发环境友好、资源可持续替代的新型矿物填料,已成为道路工程领域亟待破解的瓶颈问题。

固废的资源化利用是促进可持续基础设施建设的重要研究方向之一。学者积极探索将生活与工业固废应用于沥青胶浆的方法,重点研究混合料的物理特性。季节等^[4]研究了煤直接液化残渣-沥青胶浆的流变性。杨博等^[5]探讨了牡蛎壳粉替代矿粉的可行性。朱兴龙等^[6]评估了垃圾飞灰对沥青胶浆与混合料性能的作用。姜兵等^[7]系统探究了不同掺量石墨尾矿对混凝土结构表观密度、抗压强度、抗腐蚀性能及XRD衍射峰的影响。刘洪波等^[8]聚焦于配合比优化对石墨尾矿砂浆收缩特性的调控,为预测实际结构体积变形奠定基础。ZHANG等^[9]研究了掺入复合玄武岩纤维的石墨尾矿水泥砂浆的多项性能指标。杨克龙等^[10]分析了石墨尾矿砂掺量对沥青混合料水稳定性的影响,阐明了石墨尾矿在沥青路面中的应用潜力。这些研究为石墨尾矿的建材化应用提供了重要依据。

综上,石墨尾矿在建筑行业的应用和研究多集中于水泥基材料,对沥青材料添加石墨尾矿的研究较少,其流变机理尚不明确。针对此问题,采用不同掺量的石墨尾矿粉替代石灰石矿粉制备成沥青胶浆,通过针入度、软化点、延度、黏度、动态剪切流变试验、多重应力蠕变恢复试验,以及线性振幅扫描试验和弯曲梁流变试验等,探究石墨尾矿对沥青胶浆性能常规性能和高低温流变性

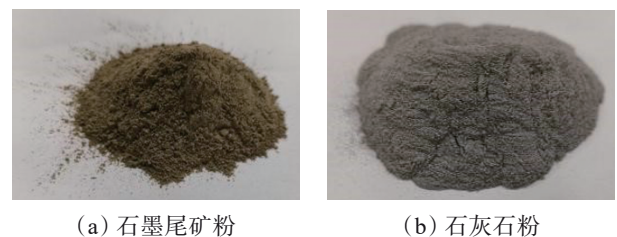
能的影响,确定石墨尾矿的最佳掺量。

1 试验原材料

试验采用70#基质沥青,测试方法与技术要求参见《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)^[11](以下简称《规程》)。试验所用的石墨尾矿粉来自某石墨采石场,对照组矿粉选择石灰石矿粉,2种填料的技术指标见表1,实物见图1。

表1 2种填料的技术指标
Tab.1 technical specifications of the two fillers

指标	石灰石粉	石墨尾矿粉	《规程》要求
表观密度/(g·cm ⁻³)	2.733	2.921	≥2.500
含水率/%	0.1	0.1	≤1.0
亲水系数	0.86	0.78	<1.00
粒径小于0.6 mm的颗粒占比/%	100.0	100.0	100.0
粒径小于0.15 mm的颗粒占比/%	99.9	99.8	90.0~100.0
粒径小于0.075 mm的颗粒占比/%	97.9	98.7	75.0~100.0



(a) 石墨尾矿粉

(b) 石灰石粉

图1 石灰石粉和石墨尾矿粉实物
Fig.1 limestone powder and graphite tailings powder

采用regulus8100扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)研究矿物填料的形貌。石墨尾矿粉和石灰石矿粉的微观形貌分别见图2。由图2(a)可见,石灰石矿粉主要由棱角分明的块状颗粒构成,颗粒尺寸均匀,且机械破碎特征明显,表现出密实堆叠趋势。石灰石矿粉表面较光滑,结构较致密,气孔较少。由图2(b)可见,石墨尾矿粉边缘多呈不规则锯齿状,表面较为粗糙,可见附着其上的解离矿物颗粒,局部可见微小孔隙。此类形貌与石墨的天然层状晶体结构相关,其断裂过程中易沿解理面剥离,形成薄片状颗粒。

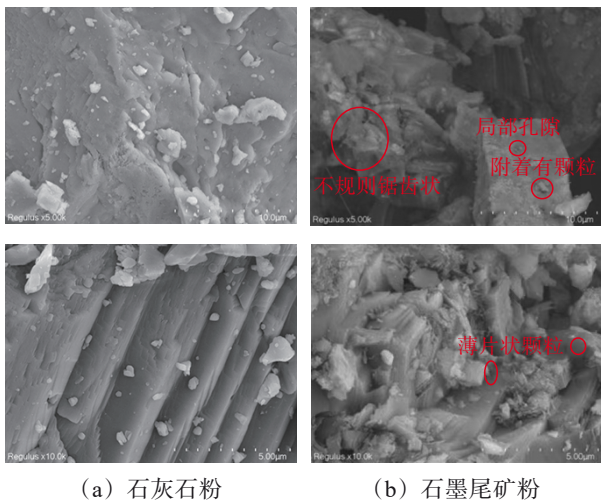


图2 填料SEM图

Fig.2 SEM images of fillers

2 试验方案设计

2.1 沥青胶浆制备

(1) 沥青胶浆配合比设计

制备多种沥青胶浆试样,其基本配合比为 $m(\text{沥青}):m(\text{填料})=1:1$ 。填料由石灰石矿粉和石墨尾矿

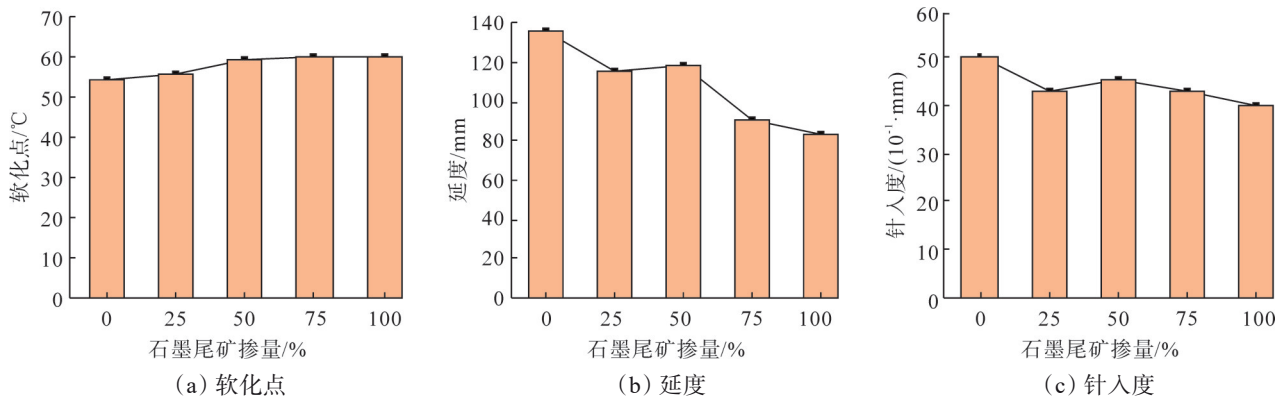


图3 不同石墨尾矿掺量下的沥青胶浆性能变化

Fig.3 performance change of asphalt mastics under different graphite tailings content

软化点是表征改性沥青温度敏感性的重要指标,软化点越高,相应改性沥青路面在高温环境中的抗变形能力越强^[14]。由图3(a)可见,随着石墨尾矿替代率的提升,沥青胶浆的软化点呈现显著增长趋势,可能是由于石墨尾矿表面粗糙多孔(见图2),大幅增加了填料-沥青的有效接触面积,阻碍了沥青分子链的自由迁移。这表明,石墨尾矿的掺入有效提升了材料的高温稳定性,且当掺量在25%~50%时,改性效果较为显著。

由图3(b)可见,随着石墨尾矿掺量的增加,沥青胶浆延展性持续降低,且所有试样均呈现脆性断裂特征,低温抗裂性能下降。沥青胶浆的低

粉组成。石墨尾矿粉按预定比例等质量替代石灰石矿粉,掺量(即石墨尾矿粉在总填料中的质量分数)设定为0%、25%、50%、75%和100%,共5组。

(2) 沥青胶浆制备方法

沥青胶浆的制备依据相关流程^[12-13]进行:①将70#基质沥青置于(160±5)℃的恒温烘箱中,持续加热直至沥青完全熔化流动;②按照替代比精确称量石灰石矿粉与石墨尾矿,在干燥环境中充分拌和均匀,将混合填料置于(150±3)℃的烘箱中预热,时间不少于2h;③将预热后的混合填料分3次加入熔融沥青中,并保持混合料体系温度为(150±3)℃;④使用高速剪切机对混合物连续剪切,剪切转速为(1000±50)r/min,时间为30min,获得均质的沥青胶浆试样。

2.2 常规试验结果

根据《规程》对制备的沥青胶浆开展25℃针入度试验、软化点试验和15℃延度试验,每组试验重复3次,取平均值。沥青胶浆性能的软化点、延度、针入度随石墨尾矿掺量的变化规律,见图3。

温拉伸行为可通过应变能理论来解释:温度降低使沥青临界应变能减小,可恢复弹性增加,拉伸会发生脆性断裂和回弹;加入石墨尾矿后,石墨尾矿的刚性导致沥青临界应变能进一步减小,拉伸时沥青胶浆内部密集分布的颗粒材料也改变了沥青本身的黏弹性。

沥青的针入度可用于评价沥青的软硬程度和稠度。由图3(c)可见,石墨尾矿替代率从0%上升到25%时,沥青胶浆的针入度明显降低,出现显著的硬化效应。这可能是由于低掺量的石墨尾矿显著增强了与沥青的机械互锁作用,限制沥青分子链的可动性。石墨尾矿替代率为25%~50%

时, 沥青胶浆的针入度升高。这可能是填料级配优化或石墨润滑效应等因素, 导致硬度出现短暂、小幅度缓解。尽管存在局部波动, 整体数据显示石墨尾矿替代传统矿粉后, 沥青胶浆的针入度呈下降趋势, 沥青胶浆变硬。

《规程》规定, 在软化点、延度及针入度试验中, 同一操作者重复试验的变异系数限值 C_v 分别为: $C_v \leq 1.2\%$ 、 $C_v \leq 10.0\%$ 和 $C_v \leq 1.2\%$ 。采用石墨尾矿替代石灰石矿粉制备的沥青胶浆试样, 上述 3 项指标的变异系数均满足规范限值要求, 详见表 2。

表 2 常规实验的标准差和变异系数
Tab.2 standard deviation and coefficient of variation of routine experiments

石墨尾矿掺量/%	延度		软化点		针入度	
	标准差/mm	变异系数/%	标准差/℃	变异系数/%	标准差/(10^{-1} ·mm)	变异系数/%
0	8.20	6.02	0.30	0.45	0.08	1.17
25	7.00	6.09	0.62	1.12	0.06	1.02
50	9.54	8.08	0.62	1.04	0.05	1.01
75	3.00	3.30	0.53	0.89	0.08	1.11
100	4.00	4.76	0.56	0.93	0.06	1.06

2.3 石墨尾矿沥青胶浆高温性能分析

(1) 布氏旋转黏度试验结果

布氏旋转黏度是表征流体类材料发生流动变形难易程度的有效指标^[15]。试验依据《规程》要求开展测试, 每组试验重复 3 次, 取平均值, 结果见图 4。

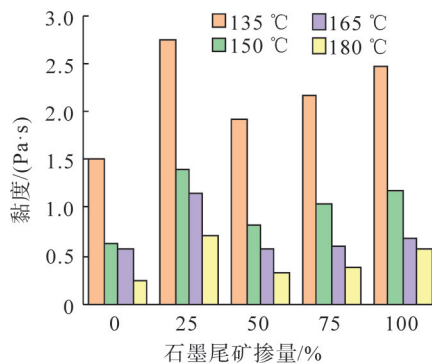


图 4 布氏旋转黏度试验结果

Fig.4 Brinell rotational viscosity test results

由图 4 可见, 石墨尾矿替代石灰石矿粉对沥青胶浆流变特性的影响显著, 黏度变化呈非线性。当温度从 135 °C 升至 180 °C 时, 所有试样的黏度均呈衰减趋势。石墨尾矿掺量为 25% 时, 180 °C 时沥青胶浆黏度较 135 °C 下降 74.1%, 这是因为温度升高后, 分子热运动动能增加, 沥青分子之间范德华力减弱, 黏度下降。在 135 °C、150 °C、165 °C 和 180 °C 下, 与石灰石沥青胶浆相比, 掺量为 25% 的石墨尾矿沥青胶浆黏度分别提升了 83.3%、55.0%、50.1%、67.5%。这是因为相对于石灰石矿粉, 石墨尾矿粒径较小, 比表面积较大, 能有效增加与基体间的有效接触面积, 从而显著提升分子间作用力。这一特性不仅增大了结构沥青膜厚度^[16], 还强化了对自由沥青的吸附与固定作用, 进而显著增强矿料间的黏结力, 最终使沥青胶浆的

黏度获得有效提升, 该结论与 SEM 实验中分析的结果相符合。石墨尾矿掺量为 25%~50% 时, 沥青胶浆黏度明显下降, 这是因为石墨尾矿表面粗糙度过高, 颗粒间摩擦加剧, 形成局部团聚。同时粗糙表面的高摩擦效应被石墨固有的片状润滑性部分抵消, 使黏度下降。石墨尾矿掺量超过 50% 时, 沥青胶浆黏度呈逐渐升高趋势。这是因为高掺量下, 石墨尾矿颗粒粗糙表面引起的摩擦使黏度升高。

综上, 不同掺量石墨尾矿沥青胶浆的黏度均高于石灰石矿粉沥青胶浆, 表明加入石墨尾矿可提高沥青胶浆的抗剪切变形能力。当石墨尾矿掺量为 25% 时, 对沥青胶浆的抗剪切变形能力提升效果最显著。

依据《规程》要求, 布氏旋转黏度试验中, 同一试样至少平行试验 2 次。当 2 次测定值的差值不大于平均值的 4% 时, 取其平均值作为试验结果, 对应的换算成变异系数限值不大于 1.5%。采用石墨尾矿替代石灰石矿粉制备的沥青胶浆试样, 其布氏旋转黏度的变异系数均满足《规程》规定的限值要求, 具体见表 3。

表 3 布氏旋转黏度试验变异系数
Tab.3 coefficient of variation of Brinell rotational viscosity test

石墨尾矿掺量/%	变异系数/%			
	135 °C	150 °C	165 °C	180 °C
0	0.93	1.02	0.86	1.36
25	1.23	1.15	0.89	1.42
50	1.26	1.21	0.95	0.97
75	1.31	1.16	1.42	0.85
100	1.15	0.97	1.35	1.27

(2) 动态剪切流变试验结果

动态剪切流变试验采用TA公司的动态剪切流变仪,参照《规程》要求开展。试验温度设为46℃~82℃,温度扫描间隔为6℃。将沥青胶浆制备成直径为25mm、厚度为1mm板式试样。每组动态剪切流变试验进行3次平行试验,取平均值用于后续分析。

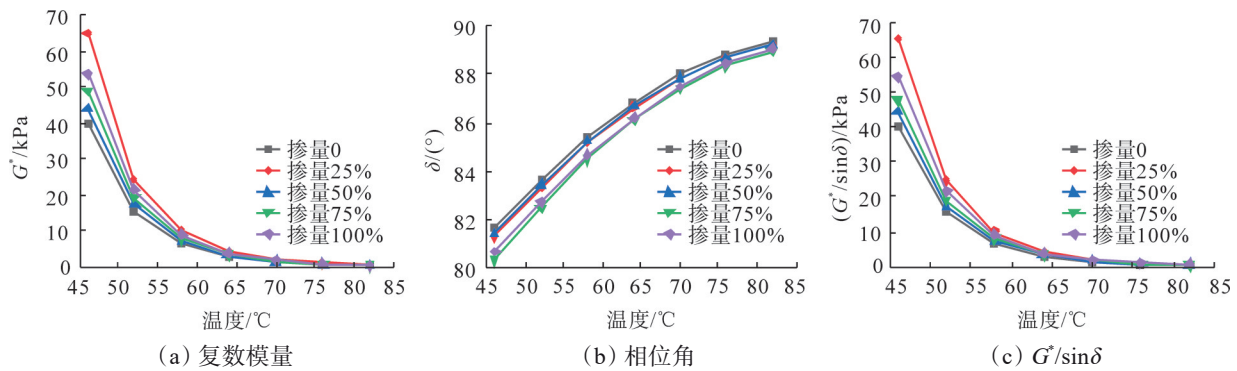


图5 石墨尾矿沥青胶浆动态剪切流变试验结果

Fig.5 dynamic shear rheological test results of graphite tailings asphalt mastic

由图5可见,沥青胶浆表现出明显的温度依赖性,即随着温度升高,沥青胶浆的 G^* 和 $G^*/\sin \delta$ 降低, δ 增大。此过程中,温度升高促进沥青分子链段的运动活化能降低,导致黏滞阻力减弱与抗变形能力下降,宏观上表现为 G^* 减小和 δ 增大,这也是沥青材料高温性能劣化的典型特征。试验表明,与石灰石沥青胶浆相比,石墨尾矿沥青胶浆的 G^* 和 $G^*/\sin \delta$ 均较大。温度为46℃、石墨尾矿掺量为25%时,石墨尾矿沥青胶浆的 G^* 和 $G^*/\sin \delta$ 达到最大值,与石灰石沥青胶浆相比,分别提高63.2%和63.4%。这可能是因为石墨尾矿通过物理交联与界面黏附作用增强了胶浆的抗剪切变形能力,其中尾矿内硅酸盐矿物形成的刚性骨架结构与分散的石墨片层协同实现了高效应力传递。在相同温度下,与石灰石沥青胶浆相比,石墨尾矿沥青胶浆的 $G^*/\sin \delta$ 值较大,说明石墨尾矿的加入能够改善沥青胶浆在高温下的抗变形能力,且石墨尾矿掺量为25%时,高温下对抗变形能力的提升最为显著。

依据《规程》要求,动态剪切流变试验中,同一试样至少平行试验2次,当2次测定值的差值不大于平均值的6.4%时,取其平均值作为试验结果,换算成变异系数限值为不大于2.3%。采用石墨尾矿替代石灰石矿粉制备的沥青胶浆试样,其动态剪切流变的变异系数均满足《规程》限值要求,具体数据见表4。

选取复数模量 G^* 、相位角 δ 和车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 作为表征沥青胶浆高温流变特性的参数。 G^* 表示沥青胶浆的抗变形性能; $\tan \delta$ 表示损耗模量与存储模量的比, δ 越小表示弹性恢复性能越好。 $G^*/\sin \delta$ 是评估沥青胶浆抗车辙性的关键参数^[17]。石墨尾矿沥青胶浆的动态剪切流变试验结果见图5。

表4 动态剪切流变试验的变异系数

Tab.4 coefficient of variation in dynamic shear rheology tests

石墨尾矿 掺量/%	变异系数/%						
	46℃	52℃	58℃	64℃	70℃	76℃	82℃
0	1.56	2.14	1.34	1.72	1.22	2.03	0.99
25	1.24	1.79	2.08	0.94	1.35	1.55	1.26
50	1.57	1.87	2.04	1.55	0.54	1.69	1.33
75	1.56	1.45	1.64	1.46	2.11	1.67	1.47
100	2.04	1.57	1.65	1.54	1.51	1.44	1.59

(3) 多重应力蠕变恢复试验结果

多重应力蠕变恢复试验用来评估沥青结合料在高温条件下的抗永久变形(车辙)能力和弹性恢复性能。变形恢复率和不可恢复蠕变柔量是分析车辆载荷作用下,沥青材料延迟弹性和平均不可恢复应变的重要参数^[18]。根据ASTM(美国材料与试验协会)D7405中MSCR试验^[19]要求进行多重应力蠕变恢复试验,每组试验重复3次,取平均值。沥青胶浆中石墨尾矿掺量与变形恢复率和不可恢复蠕变柔量的关系见图6,其中,0.1kPa和3.2kPa应力水平下,变形恢复率分别为 $R_{0.1}$ 和 $R_{3.2}$,不可恢复蠕变柔量分别为 $J_{nr,0.1}$ 和 $J_{nr,3.2}$ 。

由图6可见,随着石墨尾矿掺量的增加, $R_{0.1}$ 和 $R_{3.2}$ 均呈先升高后降低的变化规律,但石墨尾矿沥青胶浆的变形恢复率均超过石灰石沥青胶浆。相比于石灰石沥青胶浆,掺量为25%的石墨尾矿沥青胶浆, $R_{0.1}$ 增加了19.6%, $R_{3.2}$ 增加了45.6%,

这说明石墨尾矿可以提高沥青胶浆的弹性。原因可能是石墨尾矿颗粒边缘呈锯齿状且表面粗糙多孔, 这种结构特性显著增大了颗粒与沥青基质的有效接触面积和接触界面的复杂性, 粗糙界面形成更强的物理嵌锁作用, 使沥青分子链能更深入地“锚定”在缝隙和凸起中, 进而赋予沥青胶浆更强的抵抗塑性变形的能力。石墨尾矿沥青胶浆的不可恢复蠕变柔量均低于石灰石沥青胶浆。从宏观性能上看, 石墨尾矿的加入可以减少沥青胶浆的柔性变形, 提高沥青路面的抗车辙性能, 且在掺量为 25% 时提升效果最为显著。

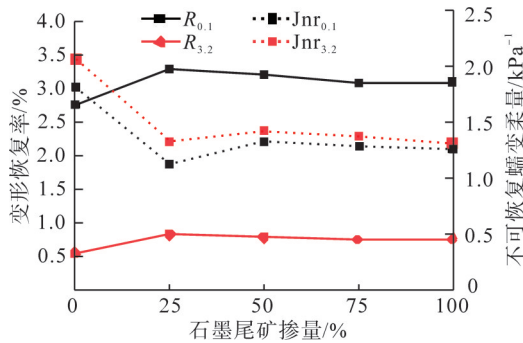


图 6 多重应力蠕变恢复试验结果

Fig.6 multiple stress creep recovery test results

依据《规程》, 多重应力蠕变恢复试验中, 同一试样需进行 2 次平行试验, 试验测得的不可恢复蠕变柔量差值不得超过平均值的 15%, 变形恢复率不得超过平均值的 8%, 取平均值作为试验结果。采用石墨尾矿制备的沥青胶浆试样, 不可恢复蠕变柔量的变异系数、变形恢复率的变异系数均满足《规程》的限值要求, 见表 5。

表 5 多重应力蠕变恢复试验变异系数
Tab.5 coefficient of variation of multiple stress creep recovery test

石墨尾矿掺量/%	变异系数/%	
	不可恢复蠕变柔量	变形恢复率
0	1.54	1.56
25	1.02	1.64
50	1.26	2.04
75	1.87	2.41
100	1.97	1.77

2.4 沥青胶浆抗疲劳性能分析

线性振幅扫描试验可表征沥青在载荷反复作用下的累积损伤发展, 确定沥青在不同应变水平下的疲劳特性。参照 AASHTO TP 101—12^[20] 中的要求, 采用线性振幅扫描 (LAS) 试验评估沥青胶浆的疲劳性能。将 LAS 试验获得的试件剪切应力峰值定义为屈服应力, 剪切应变峰值定义为屈服

应变^[21]。试验中, 应变由 0.1% 提升至 1%, 再由 1% 线性增加到 30%, 试验频率固定为 10 Hz, 单个应变扫描时间为 10 s, 总计扫描时间为 310 s, 试验温度为 25 °C, 每组试验重复 3 次, 取平均值。LAS 试验获得的应力-应变曲线见图 7。

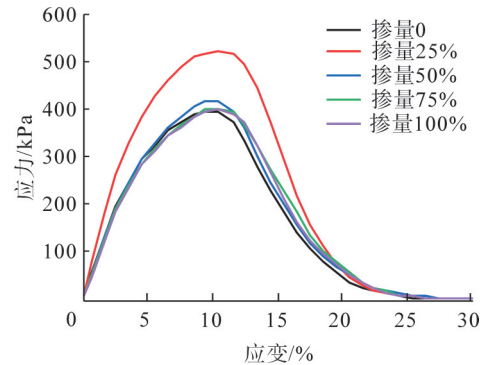


图 7 线性振幅扫描试验结果

Fig.7 linear amplitude scanning test results

由图 7 可知, 在石墨尾矿掺量为 25% 时, 石墨尾矿沥青胶浆的屈服应力最大, 相比于石灰石沥青胶浆增加了 32.6%。这是因为石墨尾矿中的矿物颗粒作为刚性填料分散在沥青基体中, 提高了沥青胶浆的整体刚度和模量。在相同应变水平下, 刚度增大材料承受的应力增大。石墨尾矿掺量为 50%、75%、100% 时, 石墨尾矿沥青胶浆和石灰石沥青胶浆的屈服应力相似, 这是因为填料过度密集, 沥青胶浆过度硬化, 脆性增大。随着石墨尾矿掺量的增加, 沥青胶浆峰值应力对应的屈服应变增大, 韧性增加。

2.5 沥青胶浆低温性能分析

低温开裂是沥青路面常见的病害类型之一。路面表层的裂缝会使水分更容易进入基层结构, 在车辆载荷的作用下, 将加速路面结构的破坏, 降低路面的服役性能, 缩短路面的使用寿命。对沥青胶浆进行低温弯曲流变试验, 探究其低温性能。依据《规程》要求, 采用弯曲梁流变试验研究沥青胶浆的低温特性。测试温度为 -18 °C ~ -6 °C, 间隔温度为 6 °C。将样品制备成尺寸为 127 mm × 12.7 mm × 6.35 mm 的梁式试件, 在乙醇水浴中保持试验温度, 然后进行测试, 每组试验重复 3 次, 取平均值。沥青胶浆的低温流变性能见图 8。采用石墨尾矿代替石灰石矿粉制备沥青胶浆时, 蠕变劲度更高。在 -6 °C、-12 °C、-18 °C 下, 与石灰石沥青胶浆相比, 石墨尾矿沥青胶浆的最高蠕变劲度分别提高了 16.2%、20.7%、17.7%, 说明石墨尾矿的掺入降低了沥青胶浆的低温性能。这是因为与石灰石矿

粉相比,石墨尾矿粉的比表面积更大,极大地增加了它与沥青的接触界面,对沥青轻质组分的吸附能力增强。而且石墨尾矿中含有的石墨对有机物质的吸附能力很强,尤其是对芳香族化合物的亲和力更强。这种吸附能力导致沥青中的硬质组分相对比例升高,整体胶结物的黏度增大、刚度提高、低温变形能力显著下降,使沥青胶浆在低温下更脆,临界

裂缝断裂温度升高。石墨尾矿表面呈化学中性(石灰石表面则为碱性),其难以与沥青中的酸性组分(如磺化多环芳烃)发生化学吸附作用,导致沥青-集料界面黏结强度降低,从而削弱混合料的抗裂性能。石墨尾矿沥青胶浆的蠕变速率均低于石灰石沥青胶浆,说明沥青胶浆在低温下分散应力能力和应力松弛性能有所降低。

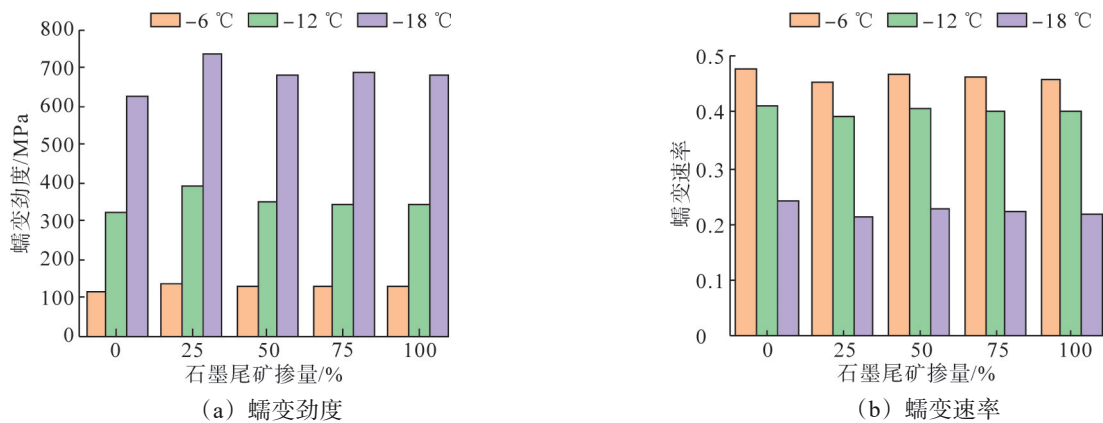


图8 弯曲梁流变试验结果
Fig.8 bending beam rheological test results

依据《规程》,弯曲梁流变试验中,同一试样至少平行试验2次,当2次测得的蠕变劲度差值不大于平均值的7.2%,蠕变速率的差值不大于2.9%

时,取其平均值作为试验结果。采用石墨尾矿替代石灰石矿粉制备的沥青胶浆试样,其弯曲梁流变试验的变异系数均满足《规程》限值要求,见表6。

表6 弯曲梁流变试验变异系数
Tab.6 coefficient of variation of bending beam rheology test

石墨尾矿掺量/%	变异系数/%					
	-6 °C 蠕变劲度	-6 °C 蠕变速率	-12 °C 蠕变劲度	-12 °C 蠕变速率	-18 °C 蠕变劲度	-18 °C 蠕变速率
0	2.13	0.94	2.11	0.88	2.25	0.84
25	2.13	0.84	2.01	0.79	2.41	0.86
50	2.45	0.87	1.78	0.96	2.13	0.79
75	1.98	0.75	2.34	0.84	1.96	0.89
100	1.97	0.78	1.86	0.79	2.06	0.87

通过微观形貌、常规性能及流变学表征证实,利用石墨尾矿替代传统石灰石矿粉是提升沥青胶浆高温性能与抗疲劳性能的有效途径。石墨尾矿的粗糙锯齿状表面及狭缝微孔结构,极大增强了与沥青基质的物理嵌锁与界面黏附强度。石墨尾矿掺量为25%时,其改性效果最优,沥青胶浆的高温稳定性、弹性恢复能力及抗疲劳能力均有提升,但低温性能衰减。当石墨尾矿掺量超过25%时,沥青胶浆的低温性能衰减更为显著。

3 结论

(1) 相较于石灰石矿粉,石墨尾矿粉具有更小的粒径、更大的比表面积及更粗糙的表面,这

些特性显著增强了其与沥青基质间的物理交互作用和黏附力。石墨尾矿粉含有丰富的狭缝微孔,呈现出较强的轻质组分(如脂肪族化合物)吸附性。该吸附行为一方面增加了重组分比例和沥青胶浆黏弹性网络的强度,从而显著改善了高温流变性能;但另一方面,过度吸附也导致了有效沥青胶体比例降低,削弱了材料的低温柔韧性,使得低温性能有所衰减。

(2) 在石墨尾掺量达到25%时,沥青胶浆的综合高温性能与抗疲劳性能获得了突破性提升。具体表现为布氏黏度、动态剪切流变车辙因子、MSCR弹性恢复率以及线性振幅扫描屈服应力等关键指标均较石灰石沥青胶浆大幅提高。

(3) 石墨尾矿的引入显著削弱了沥青胶浆的低温性能, 表现为蠕变劲度的系统性增大与蠕变速率的同步衰减, 使材料的低温应力松弛能力和抗开裂韧性减弱。未来研究需聚焦于缓解石墨尾矿沥青胶浆的低温脆性 (如添加增塑剂或界面改性), 以平衡综合路用性能, 拓宽其在寒区的应用潜能。

参考文献(References):

- [1] 杜常博,张程玮,梁冰,等.壳聚糖协同EICP固化/稳定化石墨尾矿性能及机制研究[J].岩土力学,2025,46(10):3143-3156.
DU Changbo, ZHANG Chengwei, LIANG Bing, et al. Performance and mechanism of chitosan-synergized EICP for solidification/stabilization of graphite tailings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(10): 3143-3156.
- [2] VASUMATHI N, VIJAYA KUMAR T V, RATCHAMBIGAI S, et al. Flotation studies on low grade graphite ore from eastern India[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2015, 25 (3):415-420.
- [3] 丁会敏,唐诗洋,杨光,等.石墨尾矿综合利用现状[J].化学工程师, 2024,38(1):57-60.
DING Huimin, TANG Shiyang, YANG Guang, et al. Current situation of comprehensive utilization of graphite tailings[J]. Chemical Engineer, 2024, 38(1): 57-60.
- [4] 季节,张梓源,董元帅,等.煤直接液化残渣复合改性沥青胶浆的流变特性[J].建筑材料学报,2024,27(9):853-860.
JI Jie, ZHANG Ziyuan, DONG Yuanshuai, et al. Rheological properties of direct coal liquefaction residue composite modified asphalt mortar[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(9): 853-860.
- [5] 杨博,周波,程逸寰,等.牡蛎壳粉沥青胶浆路用性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(1):26-30,45.
YANG Bo, ZHOU Bo, CHENG Yihuan, et al. Road performance of oyster shell powder asphalt mortar[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Sciences), 2024, 43(1): 26-30, 45.
- [6] 朱兴龙,薛艳华,薛逸阳,等.飞灰替代矿粉沥青胶浆及混合料的性能研究[J].交通科学与工程,2023,39(3):18-25.
ZHU Xinglong, XUE Yanhua, XUE Yiyang, et al. Study on the performance of fly ash instead of mineral powder asphalt slurry and mixture[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39 (3): 18-25.
- [7] 姜兵,张宇航,赵美美,等.石墨尾矿对混凝土性能的影响[J].黑龙江科学,2025,16(4):18-21,26.
JIANG Bing, ZHANG Yuhang, ZHAO Meimei, et al. Effect of graphite tailings on concrete properties[J]. Heilongjiang Science, 2025, 16(4): 18-21, 26.
- [8] 刘洪波,宋健,段厚瑞,等.掺石墨尾矿砂浆收缩性能试验研究[J].黑龙江大学学报(中英俄文),2024,15(4):81-88.
LIU Hongbo, SONG Jian, DUAN Hourui, et al. Experimental study on shrinkage performance of graphite doped tailings mortar[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2024, 15(4): 81-88.
- [9] ZHANG C, LI B, YU Y, et al. An investigation of the mechanical properties of basalt fibre-reinforced graphite tailings cement mortar [J]. Buildings, 2022, 12(12): 2106.
- [10] 杨克龙,李秋实,赵雪婷.石墨尾矿砂沥青混合料水稳定性研究[J].森林工程,2023,39(6):196-207.
YANG Kelong, LI Qiushi, ZHAO Xueting. Study on the water stability performance of graphite tailing sand asphalt mixes [J]. Forest Engineering, 2023, 39(6): 196-207.
- [11] 中华人民共和国交通运输部.公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社, 2011:10-12.
- [12] ZHANG J F, YAN Y, HU Z H, et al. Properties and hydration behavior of Ti-extracted residues-red gypsum based cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2019, 218: 610-617.
- [13] 欧力,朱洪洲,赵鸿铎,等.磷石膏替代矿粉对沥青胶浆流变性能的影响[J].公路交通科技,2025,42(9):37-43.
OU Li, ZHU Hongzhou, ZHAO Hongduo, et al. Influence of phosphogypsum instead of mineral powder on rheological property of asphalt mortar[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(9): 37-43.
- [14] 白昀.基于脱硫胶粉制备的高黏改性沥青配方与性能[J].黑龙江交通科技,2025,48(8):41-45.
BAI Yun. Formula and performance of high viscosity modified asphalt prepared with desulfurization rubber powder[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2025, 48 (8): 41-45.
- [15] 董娟,司有翔,谢巍,等.秸秆改性沥青胶浆的黏温特性及改性机理研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(12):37-44.
DONG Juan, SI Youxiang, XIE Wei, et al. Viscosity-temperature characteristics and modification mechanism of straw modified asphalt mortar [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(12): 37-44.
- [16] 徐文远,王晓春,曹凯,等.硅粉/SBS复合改性沥青改性机理[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2018,37(3):585-590.
XU Wenyuan, WANG Xiaochun, CAO Kai, et al. Modified mechanism of silica fume/SBS composite modified asphalt[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(3): 585-590.
- [17] 董营营,苏纪壮,张朝,等.硅烷改性钛石膏沥青胶浆性能研究[J].森林工程,2025,41(1):185-194.
DONG Yingying, SU Jizhuang, ZHANG Zhao, et al. Investigation of the characteristics of silane-modified titanium gypsum asphalt mortar [J]. Forest Engineering, 2025, 41(1): 185-194.
- [18] BI Y Q, WEN Y, PEI J Z, et al. Strain response regularity and viscoplastic model of asphalt binder and asphalt mastic based on repeated creep and recovery test[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(3): 833-842.
- [19] American Society of Testing and Materials. Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer: ASTM D7405-20[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2020: 3-4.
- [20] American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep: TP 101—12 [S]. Washington, DC: AASHTO, 2012: 5-6.
- [21] 毕研秋.基于多级分散体系的沥青混合料流变特性研究[D].西安:长安大学,2020:53-56.