

拜耳法赤泥粉胶比对沥青胶浆流变、疲劳性能及微观形貌的影响

孙俊锋^{1,*}, 孙程², 陈文博², 刘立欣², 邓朝蓬¹, 邵建文³

1. 东北林业大学, 土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨, 150040

2. 黑龙江省交通规划设计研究院集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨, 150080

3. 鲁东大学, 水利土木学院, 山东 烟台, 264025

摘要: 为明确拜耳法赤泥粉胶比对沥青胶浆高低温流变、疲劳及微观形貌的影响, 以粉胶比 1.0 的石灰岩矿粉胶浆为参照, 制备粉胶比分别为 0.8、1.0 和 1.2 的拜耳法赤泥沥青胶浆, 开展动态剪切流变、弯曲梁流变、线性振幅扫描、扫描电镜及原子力显微试验。结果表明, 64 °C 时三种赤泥胶浆的车辙因子较石灰岩矿粉胶浆分别提高 31.9%、85.0% 和 122.8%; -12 °C 时蠕变劲度分别提高 1.9%、26.9% 和 42.1%, 蠕变速率分别降低 5.2%、8.5% 和 9.2%。在 2.5% 应变下, 三种赤泥胶浆的疲劳寿命较石灰岩矿粉胶浆提高 45.0%、55.5% 和 28.9%; 应变增至 15% 后, 其疲劳寿命较基质沥青分别降低 2.4%、18.1% 和 24.6%。拜耳法赤泥的细颗粒和多孔团聚结构扩大了沥青接触面积, 胶浆断面形成较连续的过渡区; 二维原子力形貌显示蜂状结构细化、表面起伏减弱。综合高低温与疲劳响应, 粉胶比 1.0 具有较好的性能协调性。

关键词: 拜耳法赤泥; 沥青胶浆; 粉胶比; 流变性能; 疲劳寿命; 微观形貌

Effects of Bayer Red Mud Filler-to-Binder Ratio on the Rheological, Fatigue Properties and Micromorphology of Asphalt Mastic

Junfeng Sun^{1,*}, Cheng Sun², Wenbo Chen², Lixin Liu², Zhaopeng Deng¹, Jianwen Shao³

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

2. Heilongjiang Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd, Harbin 150080, China

3. School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai, 264025, China

Abstract: The effects of the filler-to-binder ratio of Bayer red mud on the high- and low-temperature rheological behavior, fatigue response, and micromorphology of asphalt mastic were investigated. Limestone-powder mastic with a filler-to-binder ratio of 1.0 was used as the reference, and Bayer-red-mud mastics were prepared at ratios of 0.8, 1.0, and 1.2. Dynamic shear rheometry, bending beam rheometry, linear amplitude sweep testing, scanning electron microscopy, and atomic force microscopy were conducted. At 64 °C, the rutting factors of the three red-mud mastics were 31.9%, 85.0%, and 122.8% higher than that of the limestone-powder mastic. At -12 °C, their creep stiffnesses increased by 1.9%, 26.9%, and 42.1%, while the creep rates decreased by 5.2%, 8.5%, and 9.2%, respectively. At 2.5% strain, their fatigue lives exceeded that of the limestone-powder mastic by 45.0%, 55.5%, and 28.9%; at 15% strain, the corresponding fatigue lives were 2.4%, 18.1%, and 24.6% lower than that of the base asphalt. Fine and porous agglomerates increased asphalt-filler contact, and the mastic developed a relatively continuous interfacial transition region. Two-dimensional atomic force microscopy showed refined bee-like structures and reduced surface fluctuation. A filler-to-binder ratio of 1.0 provided the best balance among the evaluated

properties.

Keywords: Bayer red mud; Asphalt mastic; Filler-to-binder ratio; Rheological property; Fatigue life; Micromorphology

赤泥是氧化铝生产过程中排放的强碱性固体废弃物，产量大、堆存占地及环境风险突出^[1]。其主要成分包括铁、铝、硅和钠等氧化物，细颗粒和活性表面使其具备替代道路工程矿物填料的潜力^[2-3]。已有研究表明，赤泥可提高沥青胶浆刚度、弹性贡献及沥青混合料的高温稳定性^[4-6]，但强化作用随赤泥来源、颗粒特征和粉胶比变化。

拜耳法赤泥粒径较细，Fe-Al-Na 相关组分含量较高，能够增大沥青与填料的接触面积；同时，过高粉胶比会增加结构沥青比例和颗粒间约束，使低温松弛及大应变疲劳性能受到影响。已有研究表明，填料类型与界面作用会改变沥青胶浆的疲劳损伤演化^[7]，AFM 可用于观察沥青表面峰状结构及其拓扑变化^[8]。现有研究多关注赤泥替代传统矿粉后的高温改善，对同一赤泥来源下粉胶比引起的高低温与疲劳性能权衡讨论不足。本文以石灰岩矿粉为参照，仅改变拜耳法赤泥粉胶比，分析 0.8、1.0 和 1.2 三种粉胶比下胶浆的高温流变、低温蠕变和疲劳响应，并通过填料及胶浆断面 SEM 和二维 AFM 解释性能差异。

1 材料与方法

1.1 原材料与试样制备

基质沥青为 90#道路石油沥青，25 °C 针入度、软化点、10 °C 延度和 135 °C 黏度分别为 89 (0.1 mm)、50 °C、不小于 120 cm 和 0.487 Pa·s。参照填料为石灰岩矿粉 (LSP)，试验填料为拜耳法赤泥 (BRM)。BRM 经 105 °C 烘干 24 h、研磨并通过 0.075 mm 筛后使用，其中位粒径 D50 为 1.047 μm，明显小于 LSP 的 44.820 μm。

试样分组见表 1。填料在 140 °C 预热 1 h，基质沥青加热至 140±5 °C。填料分 4~5 次加入沥青，每次间隔 2 min；先以 600 r/min 搅拌 5 min，再以 1000 r/min 搅拌 30 min。LSP 胶浆粉胶比固定为 1.0，BRM 胶浆粉胶比分别为 0.8、1.0 和 1.2。

表 1 沥青及胶浆试样分组
Table 1 Designation of asphalt and mastic samples

编号	试样类型	填料	粉胶比
AH	基质沥青	—	0
LSPM	石灰岩矿粉胶浆	LSP	1.0
8BRMM	拜耳法赤泥胶浆	BRM	0.8
10BRMM	拜耳法赤泥胶浆	BRM	1.0
12BRMM	拜耳法赤泥胶浆	BRM	1.2

1.2 试验方法

采用动态剪切流变仪进行温度扫描，25 mm 平行板间距 1 mm，角频率 10 rad/s，应变 2%，温度范围为 46~82 °C、间隔 6 °C，获得复数剪切模量 G*、相位角 δ 和车辙因子 G*/sinδ。弯曲梁流变 (BBR) 试验温度为 -6、-12 和 -18 °C，每组 3 个平行试件，采用 60 s 时的蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 评价低温响应，试验参照 JTG 3410—2025^[9]。

线性振幅扫描 (LAS) 试验在 25 °C 下进行：先在 1.25% 应变下开展 0.2~30 Hz 频率扫描，再以 10 Hz 加载 1000 s，应变由 0.1% 线性增至 30%，依据黏弹性连续损伤理论计算 2.5%、10% 和 15% 应变水平下的疲劳寿命 N_f^[10]。SEM 用于观察填料表面及液氮脆断后的胶浆断面。AFM 采用 PeakForce

QNM 模式, 扫描范围 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$; 选择粉胶比 1.0 的 LSPM 和 10BRMM 进行二维高度形貌对比。

2 结果与讨论

2.1 填料形貌特征

由图 1 可见, LSP 呈白色粉体, 颗粒以不规则块状或片状为主, 表面相对平滑、边界清晰; BRM 呈红褐色, 颗粒明显细化, 近球形细颗粒形成多孔团聚体, 团聚体之间保留微小孔隙。与 LSP 相比, BRM 颗粒尺寸较小且表面结构更为复杂, 可增加填料与沥青的实际接触面积, 为沥青组分的吸附提供更多作用位点。较小粒径和较大比表面积有利于提高沥青包覆程度并增加结构沥青比例, 但颗粒团聚及较强的吸附作用也会减少自由沥青含量, 使胶浆刚度随粉胶比增大而加快上升。

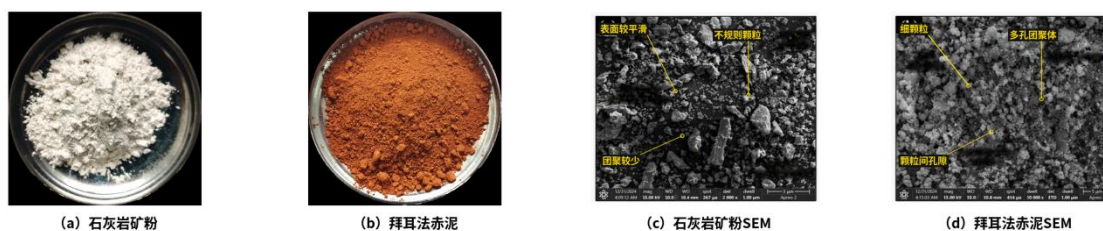


图 1 石灰岩矿粉与拜耳法赤泥的外观及 SEM 形貌

Fig. 1 Appearance and SEM morphologies of limestone powder and Bayer red mud

2.2 高低温流变性能

图 2 表明, 各胶浆的 G 和 $G'/\sin\delta$ 均随温度升高而下降, δ 逐渐增大, 表明体系由弹性响应逐渐向黏性流动转变。BRM 胶浆在相同温度下保持较高的模量和车辙因子, 且随粉胶比增加而上升。图 2 (a) 显示, 64°C 时 8BRMM、10BRMM 和 12BRMM 的车辙因子较 LSPM 分别提高 31.9%、85.0% 和 122.8%。粉胶比由 0.8 增至 1.0 时, 车辙因子提高 40.2%; 继续增至 1.2 时提高 20.4%, 表明 BRM 对胶浆高温性能的增强幅度逐渐趋缓。细颗粒填充、表面吸附及颗粒—沥青界面约束共同限制了高温剪切变形; 随着粉胶比增大, 颗粒间距进一步缩小, 胶浆内部的结构约束增强, 从而提高了高温抗变形能力。

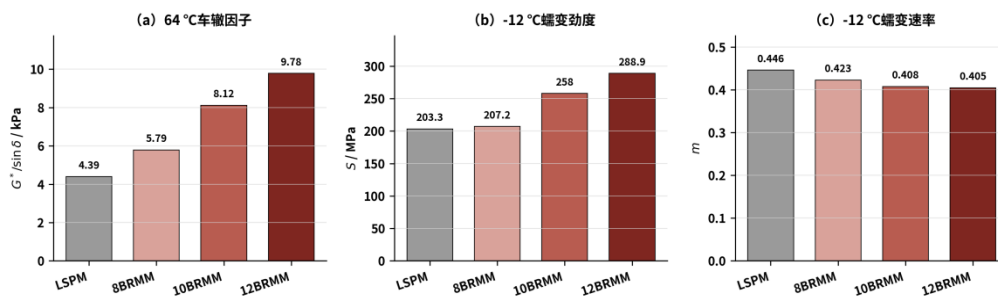


图 2 不同粉胶比胶浆在代表性温度下的流变指标

Fig. 2 Rheological indices of mastics with different filler-to-binder ratios at representative temperatures

BRM 对胶浆高温性能的增强同时伴随低温刚化。由图 2 (b) 和 (c) 可知, -12°C 时 8BRMM、10BRMM 和 12BRMM 的 S 较 LSPM 分别提高 1.9%、26.9% 和 42.1%, m 分别降低 5.2%、8.5% 和 9.2%。粉胶比由 0.8 增至 1.0 时, S 提高 24.5%; 继续增至 1.2 时增幅为 12.0%, 说明粉胶比达到 1.0 后, 颗粒对沥青基体的约束作用已较为明显。 m 随粉胶比增加而降低, 且粉胶比由 1.0 增至 1.2 后的变化幅度较小, 表明胶浆应力松弛能力的下降逐渐趋缓。总体来看, BRM 含量增加使胶浆刚度升高并延缓应力释放, 过量细颗粒对轻质组分的吸附及对沥青分子运动的限制会增加低温开裂风险。

2.3 疲劳性能

疲劳寿命对加载应变高度敏感。图3(a)显示,在2.5%应变下,8BRMM、10BRMM和12BRMM的 N_f 较LSPM分别提高45.0%、55.5%和28.9%,较AH分别提高27.8%、37.1%和13.6%。三种BRM胶浆中,10BRMM的疲劳寿命最高,表明低应变条件下疲劳性能并未随粉胶比增加而持续提高。适量BRM能够提高胶浆承载刚度并改善颗粒与沥青之间的界面过渡,使循环荷载作用下的损伤积累受到抑制;粉胶比增至1.2后,颗粒约束和局部团聚增强,胶浆变形能力下降,疲劳寿命的改善幅度随之回落。

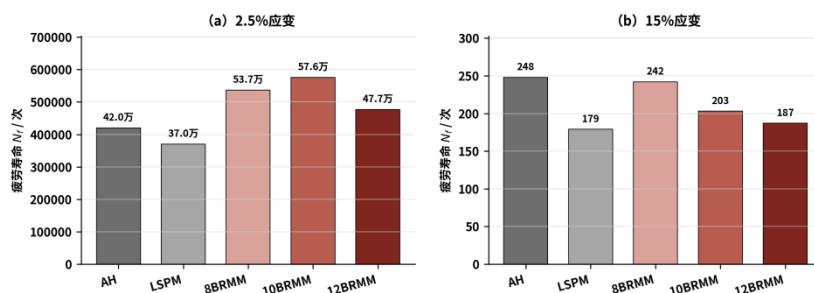


图3 不同沥青的BBR试验结果
Fig. 3 BBR test results of different asphalt binders

应变增至15%后,8BRMM、10BRMM和12BRMM的 N_f 较AH分别降低2.4%、18.1%和24.6%,且随粉胶比增加持续下降。其中,8BRMM的疲劳寿命与AH较为接近,而12BRMM的降幅最大,表明降低粉胶比有助于保留胶浆在大应变条件下的变形能力。此时,界面脱黏和颗粒邻域应力集中逐渐占据主导,填料增强带来的高刚度难以转化为疲劳寿命优势。与LSPM相比,三种BRM胶浆在15%应变下仍提高4.5%~35.2%,说明BRM胶浆的界面连续性优于普通矿粉胶浆,但其延性仍低于未填充沥青。10BRMM在低应变下的提升最为明显,同时其高应变疲劳寿命仍高于12BRMM,表现出较好的疲劳性能平衡。

2.4 扫描电镜分析

胶浆断面SEM形貌见图4。LSPM断面可见较清晰的颗粒边界和局部未充分浸润区,颗粒与沥青之间的界面连续性相对较弱;10BRMM中的细颗粒较均匀地嵌入沥青,相界面过渡较为平缓,断面整体更加连续。BRM细颗粒能够填充胶浆内部的局部空隙,并增加沥青与填料之间的接触范围,但断面中仍可观察到少量微孔和小范围颗粒团聚。上述形貌与BRM粒径较小、比表面积较大及表面活性位点较多有关,较大的实际接触面积有利于形成连续包覆结构,并改善胶浆内部的应力传递。

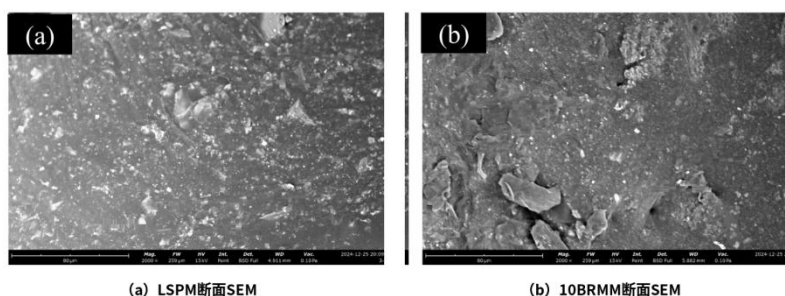


图4 LSPM与10BRMM的断面SEM形貌
Fig. 4 Fracture-surface SEM morphologies of LSPM and 10BRMM

2.5 AFM 形貌分析

LSPM 与 10BRMM 的二维 AFM 形貌见图 5。LSPM 表面仍保留较大尺度的蜂状结构，部分区域的形貌不完整，表面高度分布存在较明显差异；10BRMM 的蜂状结构数量增加、单体尺寸减小，表面起伏趋于均匀。与 LSPM 相比，10BRMM 的表面高度变化范围明显缩小，与粗糙度指标的变化规律一致。其算术平均粗糙度和均方根粗糙度较基质沥青均降低约 45%，表明 BRM 细颗粒的填充作用及沥青组分重排改变了胶浆表面形貌。结合断面 SEM 及流变结果，BRM 形成的细颗粒—沥青连续过渡结构有利于提高胶浆的高温性能，并延缓低应变循环荷载下的疲劳损伤。

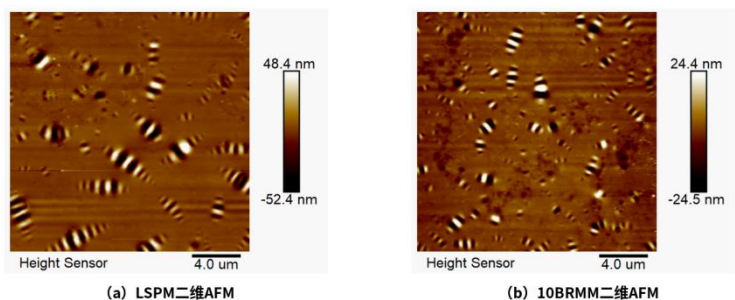


图 5 LSPM 与 10BRMM 的二维 AFM 形貌

Fig. 5 Two-dimensional AFM morphologies of LSPM and 10BRMM

3 结论

(1) 拜耳法赤泥显著提高胶浆高温抗变形能力。64℃时，粉胶比 0.8、1.0 和 1.2 胶浆的车辙因子较 LSPM 分别提高 31.9%、85.0%和 122.8%，增强幅度随粉胶比增加；

(2) BRM 使低温刚度上升、应力松弛减弱。-12℃时三种 BRM 胶浆的 S 较 LSPM 提高 1.9%~42.1%， m 降低 5.2%~9.2%；高温增强与低温性能损失具有同步性；

(3) 疲劳作用具有应变依赖性。2.5%应变下 BRM 胶浆的 N_f 较 LSPM 提高 28.9%~55.5%，其中 10BRMM 最高；15%应变下其 N_f 较 AH 降低 2.4%~24.6%，且高粉胶比下降更明显；

(4) BRM 细颗粒及多孔团聚形貌扩大沥青接触面积，10BRMM 形成较连续的断面过渡区，二维 AFM 显示蜂状结构细化和表面起伏减弱。综合高低温和疲劳响应，推荐粉胶比为 1.0。

参考文献

- [1] Khairul M A, Zanganeh J, Moghtaderi B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 141: 483-498.
- [2] Wu W, Jiang W, Yuan D, et al. A review of asphalt-filler interaction: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors[J]. Construction and Building Materials, 2021, 299: 124279.
- [3] Choudhary J, Kumar B, Gupta A. Bauxite residue: A viable filler for asphalt mix[J]. Građevinar, 2022, 74(6): 481-489.
- [4] Zhang J, Liu S, Yao Z, et al. Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture[J]. Construction and Building Materials, 2018, 180: 605-613.
- [5] Zhang J, Li P, Liang M, et al. Utilization of red mud as an alternative mineral filler in asphalt mastics to replace natural limestone powder[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117821.
- [6] Fu T, Zhang H, Qin F, et al. Sustainable utilization of Bayer red mud in asphalt materials: Multiscale performance enhancement mechanisms and economic feasibility evaluation[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 531: 146907.
- [7] Das A K, Singh D. Evaluation of fatigue performance of asphalt mastics composed of nano hydrated lime filler[J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121322.
- [8] Hung A M, Fini E H. AFM study of asphalt binder bee structures: Origin, mechanical fracture, topological evolution, and experimental artifacts[J]. RSC Advances, 2015, 5(117): 96972-96982.

- [9] 交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG 3410—2025[S]. 北京: 人民交通出版社, 2025.
- [10] American Association of State Highway and Transportation Officials. Estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep: AASHTO TP 101-14[S]. Washington, DC: AASHTO, 2014.

基金项目: 黑龙江省交通运输厅科技项目 (HLK2025B003); 黑龙江省交通运输厅科技项目: 黑龙江省高等级公路沥青路面典型结构与长期性能研究 (HJK2020A010); 黑龙江省交通运输厅科技项目: 旧沥青混合料用于寒区路面厂拌水泥稳定冷再生基层的研究 (HJK2019B017)。

第1作者&通讯作者简介: 孙俊锋 (1998-), 男, 博士研究生, 研究方向: 沥青路面结构与材料。
E-mail: junfeng6716@126.com。