

重载条件下胶粉-SBS 复合改性沥青混合料路用性能研究

曹承品¹ 李石坚²

1.安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司 安徽 合肥 230088

2.公路交通节能环保技术交通运输行业研发中心 安徽 合肥 230088

【摘要】：针对重载沥青路面应力损伤突出、单一改性沥青混合料高温性能失衡、长期服役易结构破坏问题，分析重载力学损伤规律与单改性材料短板，采用胶粉-SBS 复合改性沥青体系，阐释两种改性剂微观协同增效原理，围绕改性剂配比、集料骨架、混合料稳定性完成材料结构优化，全面验证重载条件下路用性能。结果显示该复合改性可互补性能优势、优化沥青胶体结构，显著提升混合料高温抗车辙、低温抗开裂及抗水损害能力，延缓重载下性能劣化，适配重载路面受力工况，可为重载道路沥青选材提供技术依据。

【关键词】：重载路面；胶粉-SBS 复合改性沥青；微观机理；骨架结构；路用性能

DOI:10.12417/2811-0528.26.19.007

1 引言

公路重载交通常态化发展，大幅加剧沥青路面复合受力损伤，车辙、结构性裂缝、层间滑移及水损害等病害频发，严重影响道路通行安全与服役寿命。当前单一 SBS 改性沥青与胶粉改性沥青均存在固有性能缺陷，难以兼顾高温抗变形、低温抗裂与长期抗疲劳性能，无法适配重载道路复杂多变的受力工况。为破解单一改性材料应用瓶颈，依托微观结构与流变特性分析，探究胶粉与 SBS 改性剂协同改性机理，优化混合料组成设计与内部骨架结构，分析其重载环境下路用性能变化规律，为重载沥青路面长效建设提供理论支撑与技术参考。

2 重载道路沥青路面现存病害及性能痛点研判

2.1 重载荷载对沥青路面结构力学损伤特征

持续性重载车辆通行会改变沥青路面原有应力分布状态，相较于标准轴载，重载荷载会大幅提升路面结构内部竖向压应力与横向拉应力峰值，应力作用深度进一步延伸至路面中下面层以及半刚性基层位置。沥青混合料面层在反复挤压剪切作用下，集料与沥青胶浆的界面粘结状态持续劣化，内部微小空隙逐步贯通形成隐形内部裂缝。路面结构层之间的层间粘结界面承受持续剪切作用，层间粘结强度不断衰减，出现层间脱离与滑移现象。基层底部长期处于超限拉应力环境，刚性基层材料易产生不可逆疲劳微裂纹，裂纹顺着应力扩散方向逐步向上反射至沥青面层，最终诱发路面整体性结构破坏，各类早期路面病害随之持续发育扩张。

2.2 单一改性沥青混合料重载服役失效诱因

SBS 单一改性沥青里的高分子改性剂，在高温拌合施工及路面长期高温服役过程中容易出现降解现象，改性剂形成的交联网络逐步断裂瓦解，沥青胶结料黏结强度显著下降，混合料

抵御竖向挤压变形的性能持续弱化，难以承受重载车辆高频往复碾压带来的持续作用。胶粉单一改性沥青本身存在胶体相容性不足的先天问题，胶粉颗粒与沥青基体界面结合强度偏低，在行车荷载剪切扰动下界面极易产生剥离空隙，破坏混合料内部整体结构完整性^[1]。两种单一改性模式都难以同步平衡高温抗车辙、低温抗开裂及抗疲劳等多项核心路用性能，在重载交通复合应力持续作用下，混合料内部微裂缝不断产生、延伸直至相互贯通，加速路面内部结构损伤演化，最终引发路面整体快速失效破损。

2.3 现有改性沥青材料应对重载工况适配短板

常规 SBS 改性沥青高温弹性恢复能力存在明显局限，长期经受重载车辆反复碾压带来的高应力与大应变循环作用，沥青内部高分子链段容易出现不可逆断裂，胶体整体结构逐步松散退化，难以有效抑制路面永久变形累积发展；低温工况下材料柔韧性能偏弱，遭遇温度剧烈波动时易产生脆性开裂，抗裂性能不足。单一胶粉改性沥青虽高温稳定性相较于基质沥青有所提升，但改性体系储存稳定性欠佳，在加工拌合环节胶粉颗粒极易沉降离析，直接降低沥青混合料整体性能均匀性。两种单一改性方案均无法统筹兼顾高低温综合路用指标，抗疲劳损伤性能偏弱，难以适配重载道路高频往复、荷载幅值大、长期持续受力的复杂服役工况，不能从原材料层面遏制车辙、温缩裂缝等各类重载路面早期病害萌生与持续发展。

3 胶粉-SBS 复合改性沥青材料增效作用机理剖析

3.1 双改性剂共混体系微观结构耦合机制

胶粉颗粒与 SBS 改性剂在沥青基体中发生多级微观结构耦合反应，两类改性组分依托自身分子结构特性实现界面相融与网络互补（见图 1）。SBS 线性嵌段聚合物可在沥青内部形

成连续弹性网状骨架，填充沥青轻质组分流失产生的微观空隙，约束沥青基质分子的无序流动。胶粉三维弹性颗粒均匀分散于 SBS 网状结构间隙中，依托自身橡胶弹性体结构填充网络内部缺陷，弥补单一 SBS 改性沥青网络应力集中的微观短板。两相改性组分在沥青胶体界面发生分子链缠结与界面吸附作用，弱化改性相与沥青基质之间的界面分界，消除相分离带来的结构缺陷。复合体系依托连续高分子网络与离散弹性颗粒的双向耦合，构建致密且具备弹性缓冲能力的复合微观结构，适配重载交通反复荷载带来的微观形变作用。

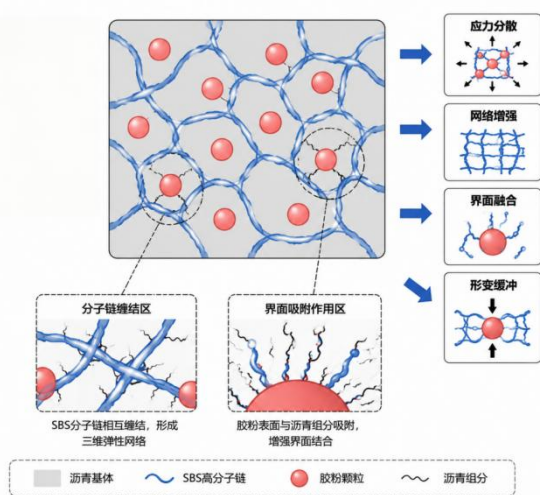


图1 胶粉-SBS 复合改性沥青微观结构耦合机制示意图

3.2 复合改性沥青胶结料流变性能改良原理

胶粉与 SBS 改性剂复配后可重构沥青内部胶体体系结构，依托两相改性组分差异化的分子结构实现沥青黏弹组分的动态调控，完成胶结料流变性能的全方位优化^[2]。高温服役环境下，线性 SBS 分子链构建连续弹性网状骨架，废旧胶粉颗粒填充网状结构内部孔隙，弥补单一 SBS 改性沥青网状结构受热松弛、骨架溃散的缺陷，提升胶结料高温抗剪切变形能力，抑制重载交通反复剪切荷载下的永久形变积累。中温交变荷载作用下，复合体系内部多重分子缠结结构可耗散外部交变应力带来的多余能量，弱化沥青基体滞后损耗，优化胶结料疲劳流变特性。低温环境中，弹性胶粉颗粒分担基体温度收缩应力，缓解 SBS 分子低温链段硬化脆性问题，改善胶结料低温应力松弛能力，平衡沥青胶结料高温刚性与低温韧性之间的性能矛盾。

3.3 复合体系弥补单一改性材料性能缺陷路径

单一 SBS 改性沥青低温韧性不足，低温环境下内部改性胶体易出现界面应力集中，沥青胶结料脆性提升，极易产生微裂纹并逐步扩展，无法适配低温地区路面的变形需求。单一胶粉改性沥青高温稳定性偏弱，胶粉颗粒与沥青基体界面相容性较

差，高温荷载反复作用下颗粒易发生剥离沉降，削弱沥青整体结构强度。胶粉与 SBS 复配后可依托两相改性组分空间网状结构互补作用优化沥青内部微观形貌，SBS 连续网状结构强化沥青高温抗流变能力，约束沥青基体高温流动形变，废旧胶粉颗粒填充于网状结构空隙内部，缓冲低温环境下沥青内部应力变化，优化两相界面结合状态，消除单一改性体系内部结构薄弱区域，同步改善沥青高低温性能失衡、界面结合不良两类核心问题。

4 重载适配型胶粉 SBS 复合改性沥青混合料技术优化

4.1 改性剂复配比例靶向优化技术

结合重载交通路面长期承受高频次、大轴载碾压以及剪切变形、车辙损伤的实际工况，依托沥青胶体结构相容机理开展复合改性剂复配比例的靶向调控，聚焦胶粉与 SBS 改性剂两相组分在沥青基体中的分散均匀性、界面结合状态开展精细化适配调控。依托沥青高温流变性能、低温抗裂性能以及抗疲劳损伤性能的内在协同机制，匹配重载路面全温度区间服役需求调整两类改性剂组分占比，规避单一改性剂用量失衡引发的沥青体系相分离、弹性恢复能力衰减、粘结附着力下降等缺陷。依托复合改性沥青内部网络交联结构的成型规律，针对性强化沥青基体抗永久变形能力与集料界面粘附稳定性，适配重载荷载反复作用下混合料内部应力集中变化规律，提升复合改性沥青自身结构稳定性，从原材料改性层面消除混合料在重载工况下出现早期病害的结构隐患。

4.2 混合料内部骨架嵌挤结构调控方法

针对重载交通反复荷载作用下沥青混合料易出现骨架松散、集料滑移及结构整体失稳的病害问题，依托间断密级配设计思路开展混合料内部骨架嵌挤结构精细化调控^[3]。依托粗集料形成主支撑骨架体系，依托不同粒径细集料填充粗集料之间的大空隙，消除骨架内部无效空隙与应力集中点位。结合胶粉颗粒弹性回弹特性与 SBS 改性沥青粘结性能，优化沥青胶浆填充骨架微空隙的比例，提升集料接触界面的粘结强度与抗剪切变形能力。调整集料颗粒接触点位分布模式，强化集料点对点、点对面的多重嵌挤咬合效应，优化荷载在混合料内部的竖向与横向传导路径，削弱重载碾压带来的结构挤压破坏作用，适配长期重载行车荷载下的结构受力需求，提升整体骨架结构的整体性与抗永久变形能力。

4.3 复合改性沥青混合料稳定性提升技术路径

针对重载交通反复碾压、竖向压应力与水平剪切应力叠加引发的混合料松散、推移、水损害等病害，依托胶粉与 SBS 双改性体系自身黏弹优势，从内部骨架结构、界面粘结体系以

及成型压实状态三个维度优化混合料内在稳定性能。依托间断密级配骨架嵌挤结构优化集料颗粒组成,提升粗集料之间的咬合锁固能力,抵御重载荷载带来的剪切变形。优化复合改性沥青与集料界面粘附体系,依托胶粉颗粒的填充增韧作用弥补 SBS 改性沥青低温刚性缺陷,强化沥青胶浆对集料表面的包裹效果,阻断水分沿集料界面侵入内部结构。匹配重载道路专用压实工艺调控混合料内部空隙分布,减少连通空隙占比,削弱动水压力对混合料内部结构的冲刷破坏,全方位改善混合料高温抗变形能力与抗水损害耐久性能。

5 复合改性沥青混合料重载工况下服役适配性评价

5.1 混合料高温永久变形抵抗能力适配分析

重载交通路面长期承受大吨位车辆持续竖向荷载与水平剪切力耦合作用,夏季高温环境下沥青胶结料软化会直接降低混合料内部骨料嵌挤稳定性,进而诱发车辙、推移等不可逆路面病害^[4]。胶粉颗粒凭借自身高弹性特质填充混合料内部细微空隙,优化沥青砂浆整体韧性,弱化高温环境下沥青基体流动形变趋势。SBS 改性剂可重构沥青内部胶体结构,提升沥青胶结料高温黏度,约束骨料颗粒相对滑移。复合改性体系能够协同两种改性材料优势,强化混合料整体骨架结构的抗剪切与抗挤压性能,适配重载路段高频次、大荷载的行车受力环境,抑制荷载往复作用下混合料内部结构逐步松散、累积塑性形变持续扩张的问题,匹配高温重载路段长期通车的结构受力需求。

5.2 混合料抗裂抗水损害综合服役适配水平

重载车辆反复碾压作用下,路面长期承受循环弯拉应力与剪切变形,再叠加昼夜温差诱发的温度应力耦合作用,持续破坏沥青混合料内部集料与沥青胶浆的粘结界面,逐步引发材料内部损伤^[5]。胶粉与 SBS 双改性组分能够优势互补,同步优化沥青胶浆高低温流变特性,提升胶结料柔韧度与集料裹覆粘结能力,有效遏制混合料内部微裂纹萌生、扩展,延缓交变荷载作用下裂缝贯通并演变为结构性裂缝。雨水、融雪剂易沿路面孔隙侵入混合料内部,经重载挤压产生动水压力,冲刷剥落集料表面沥青膜,诱发沥青剥离、集料松散等水损害病害。该复合改性体系可优化混合料孔隙结构,缩减连通孔隙占比、封堵水分下渗通道,强化沥青-骨料界面黏结强度,削弱动水冲刷与水荷载协同破坏作用,适配重载道路干湿交替受力工况,保障

路面长期稳定服役性能。

5.3 长期重载作用下混合料路用性能衰减规律

长期重载作用对胶粉-SBS 复合改性沥青混合料的路用性能产生显著衰减效应。依托安徽省宣城市在 G318 沪聂线宣南段首次应用的高强复合改性沥青工程实践,该材料基于废胶粉平台,通过低标号硬质沥青、胶粉与 SBS 复合改性制得,旨在提升重载交通条件下的路面耐久性。室内试验数据表明,掺入 4%SBS 的复合改性胶粉沥青混合料,其动稳定度较未改性胶粉沥青(470 次/mm)提升了 10.45 倍,达到 5000 次/mm 以上,高温抗变形能力改善效果显著。在抗水损害性能方面,掺入 4%SBS 后混合料冻融劈裂强度比(TSR)由母液沥青的 76.4% 提升至 93.9%,冻融前后劈裂强度分别提高 81%和 122%,水稳定性得到有效增强。复合改性通过 SBS 弹性网络与胶粉颗粒填充效应的协同作用,显著延缓了重载反复作用下混合料内部结构的渐进性损伤与性能衰减,见表 1。

表 1 复合改性胶粉沥青混合料性能试验结果

指标	动稳定度	冻融劈裂强度比(TSR)	25℃针入度
单位	次/mm	%	0.1mm
母液胶粉沥青	470	76.4	126.8
SBS 掺量 3%	约 2400	91.5	74.7
SBS 掺量 4%	5000 以上	93.9	约 70

6 结语

胶粉与 SBS 双改性组分可借助微观结构互补,改善单一改性沥青高低温性能不均衡、界面相容性不佳、抗疲劳性偏弱等短板,形成兼具弹性缓冲与结构约束效应的复合胶体网络,全面增强沥青混合料高温抗车辙、低温抗开裂及抗水损害性能。调整改性剂掺配比例、集料骨架结构与压实工艺,能够更好适应重载道路受力条件,减少路面早期病害。但长期反复荷载作用下,改性网络易局部受损、界面粘结下降,路用性能逐步衰减,后续可依据实际交通荷载优化改性配方与混合料级配,充分挖掘该复合改性材料在重载道路中的应用潜力。

参考文献:

- [1] 文冲,张赞鹏.胶粉/SBS 复合改性沥青优化设计及路用性能研究[J].交通世界,2025,(31):25-27.
- [2] 李其星.微纳胶粉/SBS 复合改性高粘沥青及其混合料性能研究[J].四川水泥,2025,(10):253-254+258.
- [3] 陈梦,李文良,张涛,等.胶粉/SBS 复合改性沥青抗老化性能与机理研究[J].中国塑料,2025,39(5):43-49.
- [4] 王智,武金莲,祁帅,等.胶粉/SBS 复合改性沥青混合料路用性能[J].内蒙古公路与运输,2025,(2):14-18.
- [5] 韩波.胶粉与 SBS 复合改性沥青技术研究[J].交通科技与管理,2025,6(4):55-57.