

聚氨酯路面技术特性与全生命周期效益研究

高孝舵, 石华军

(济南先投城市发展投资集团有限公司, 山东 济南 251401)

摘要: 针对传统沥青路面在重载与高温气候下的耐久性不足与高碳排放问题, 开发了聚氨酯全面替代沥青的新型路面材料体系。通过多尺度试验揭示聚氨酯三维交联网络强化机理, 创新提出“面层功能化减薄+基层结构性补偿”协同设计理论, 并通过工程案例验证。建立全生命周期评价框架显示: 聚氨酯混合料动稳定度 28 500 次/mm (提升 31 倍), 低温弯曲应变 3 150 $\mu\epsilon$ (提升 2.5 倍); 面层厚度优化至 40 mm, 材料消耗降低 42%; 全生命周期碳排放因子 6.8 tCO₂e/km (双向 6 车道), 能耗降低 40.5%, 成本净现值降低 48.7%。该技术在力学性能、环境与经济方面优势显著, 为低碳交通转型提供了可行路径。

关键词: 聚氨酯; 多尺度; 结构创新; 全生命周期评价; 成本效益分析; 低碳交通

中图分类号: U416.2; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0095-05

Research on Technical Characteristics and Life-Cycle Sustainability Assessment of Polyurethane-Based Pavement Systems

GAO Xiaoduo, SHI Huajun

(Jinan Xiantou Urban Development and Investment Group Co., Ltd., Jinan 251401, China)

Abstract: To address the durability issues and high carbon emissions of traditional asphalt pavements under heavy traffic and climate warming, a novel pavement system using polyurethane as a complete asphalt replacement was developed. Multi-scale testing revealed the reinforcement mechanism of the polyurethane three-dimensional cross-linked network. An innovative collaborative design theory integrating "functional surface layer thinning" and "structural base compensation" was proposed and validated through engineering cases. A life cycle assessment framework established the following results: the polyurethane mixture achieved a dynamic stability of 28 500 cycles/mm (31 times higher) and a low-temperature flexural strain of 3 150 $\mu\epsilon$ (2.5 times higher); the optimized surface layer thickness was 40 mm, reducing material consumption by 42%; the life cycle carbon emission factor was 6.8 tCO₂e/km (for a 1 km two-way six-lane section), with a 40.5% reduction in energy consumption and a 48.7% reduction in the net present value of life cycle costs. This technology demonstrates significant advantages in mechanical performance, environmental benefits, and economic efficiency, providing a viable pathway for the transition to low-carbon transportation.

Keywords: polyurethane pavement; multi-scale mechanism; structural innovation; life cycle assessment; life cycle cost; low-carbon transportation

0 引言

全球交通基础设施正面临可持续发展与气候韧性提升的双重挑战。中国公路学会《2024年公路建设碳排放研究报告》指出, 道路建设与养护环节碳排放占交通运输领域总排放的 18.7%, 其中沥青热拌 (160~180 °C) 工序能耗占比达 35%~40%。我国是全球沥青消耗量最大的国家, 年消耗量超 3 000 万 t, 在

“双碳”战略目标约束下, 传统沥青路面的性能短板已成为制约交通基础设施高质量发展的关键瓶颈。

山东省作为华东地区工业核心与交通枢纽, 其国道网年平均日交通量 (AADT) 达 18 000 标准轴次。传统沥青路面在重载与温湿度耦合作用下, 车辙深度常超 15 mm, 远超《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017) 规定限值 5 mm, 早期病害修复率达 40%, 2023 年全省道路养护经费支出超 85.2 亿元 (山东省统计局, 2024 年), 重载路段养护成本年均递增 12.3%, 成为制约交通可持续发展的突出难题。

聚合物改性沥青虽能在一定程度上改善路用性能, 但无法从根本上突破沥青材料本身的性能上限。

收稿日期: 2025-11-15

作者简介: 高孝舵 (1989—), 男, 学士, 高级工程师, 从事市政工程管理。

通信作者: 石华军 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事市政工程管理。电子邮箱: 7820523@qq.com

聚氨酯(polyurethane, PU)作为一种由异氰酸酯与多元醇通过逐步聚合形成的嵌段共聚物,其分子链中硬段与软段的微相分离结构赋予材料卓越的力学强度与变形协调能力。近年来,以聚氨酯作为主要胶结料完全替代沥青制备的聚氨酯混合料(polyurethane mixture, PUM),通过化学交联反应形成空间网络结构,实现了路面材料从物理共混到化学键合的技术变革,展现出颠覆性的应用潜力。

然而,当前研究多集中于工程现象描述与宏观性能对比,缺乏对材料多尺度性能演化机理的系统揭示,以及在复杂交通与环境荷载下全生命周期可持续性的量化评估。本文立足于材料学、固体力学与可持续工程学的交叉视角,重点解决以下关键科学问题:(1)聚氨酯—集料界面黏结效应的细观机理及其对宏观力学行为的贡献规律;(2)基于性能协同的薄层结构设计理论与适应性;(3)全生命周期内碳足迹与经济成本的耦合关系。

通过对济南起步区兴航街等工程的深度解析,构建覆盖“材料研发—结构设计—施工控制—效能评估”全链条的技术体系,为我国道路工程的绿色革命提供理论支撑与实践指南。

1 材料与方法

1.1 试验材料与制备工艺

1.1.1 聚氨酯胶黏剂

采用万华化学集团(山东烟台)生产的WANNATE® H12MDI型异氰酸酯与聚醚多元醇(牌号N330,羟值56 mgKOH/g),按异氰酸酯指数 $R=1.05$ 复配,添加0.5%三乙烯二胺(低温促进剂)与0.3%有机锡(催化剂),搅拌速率1500 r/min,搅拌时间3 min,通过旋转黏度计(NDJ-5S型)验证混合均匀度,变异系数 $\leq 2.1\%$ 。胶黏剂2024年市场单价为13500元/t(万华化学集团,2024年)。

1.1.2 集料与级配设计

采用山东泰安产玄武岩集料(压碎值12.5%,洛杉矶磨耗率14.2%),符合《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)的要求。通过对比AC-10、AC-13、AC-16三种级配的界面黏结强度与动稳定度,确定AC-13级配(中粒式)具有最优综合性能,其关键筛孔通过率:4.75 mm筛95.2%、2.36 mm筛72.8%、0.075 mm筛4.5%;采用烘箱法($105\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$)测试集料含水率,控制在0.5%以下(平行试验3组,标准差0.12%)。

1.1.3 混合料制备工艺

采用常温拌和工艺:先将集料与矿粉(山东枣庄

产石灰石粉,比表面积 $420\text{ m}^2/\text{kg}$)干拌90 s,再加入聚氨酯胶黏剂湿拌180 s,通过红外测温仪(TES-1310型)实时监测出料温度,控制在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,避免胶黏剂提前固化。制备 $\phi 101.6\text{ mm}\times 63.5\text{ mm}$ 圆柱体试件15组(每组3个平行样),试件成型采用静压法(双面各击实75次),养生条件为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度60%环境下养生7 d,通过FTIR测试验证固化度 $\geq 95\%$ (-NCO特征峰残留率 $\leq 5\%$)。

1.2 多尺度性能表征体系

建立从分子到工程尺度的系统研究路径。

1.2.1 分子尺度测试

采用Nicolet iS50型傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析-NCO/-OH反应动力学(扫描范围 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$,分辨率 4 cm^{-1});通过MCR 302型流变仪测试 $-20\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 复数剪切模量演变(频率 10 rad/s)。

1.2.2 微观结构表征

利用Quanta 250型环境扫描电镜(ESEM)观察聚氨酯固化膜形貌(加速电压15 kV);通过Skyscan 1272型X射线计算机断层扫描($\mu\text{-CT}$)三维重构集料-胶浆界面(分辨率 $5\text{ }\mu\text{m}$)。

1.2.3 宏观性能

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),采用UTM-100伺服液压系统进行动态模量($-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)、四点弯曲疲劳(控制应变 $600\text{ }\mu\epsilon$)及汉堡车辙试验($60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.7 MPa)。

1.3 全生命周期评价框架

基于ISO 14040/14044标准构建LCA模型。

1.3.1 系统边界

涵盖原材料获取、混合料生产、现场施工、运营维护及废弃再生(“从摇篮到大门”)。

1.3.2 数据清单

主要数据来源于《聚氨酯材料生命周期评价报告(2024版)》(万华化学),辅助数据采用Ecoinvent 3.8数据库,碳排放因子核算参考《山东省公路建设碳排放计算指南(2023版)》。

1.3.3 影响评估

采用CML 2001方法计算全球变暖潜能(GWP),同步分析累积能源需求(CED)与资源消耗强度。

1.4 案例实证研究方法

选取3类典型工程场景进行技术验证。

1.4.1 城市道路

济南起步区兴航街(1.05 km),采用“40 mm 聚氨酯面层+60 mm AC-20沥青基层”结构,监测路面平整

度: $IRI \leq 1.2$ m/km,符合《公路路基路面现场测试规程》(JTG E60—2008)要求;车辙深度 ≤ 3 mm;裂缝率 $\leq 0.1\%$ /年;采用落锤式弯沉仪(FWD)每月测试弯沉值,稳定在25~30(0.01 mm),较传统沥青路面(35~42(0.01 mm))降低约28.6%。

1.4.2 跨海大桥

杭州湾跨海大桥钢桥面铺装区,评估海洋腐蚀环境与振动荷载耦合作用。采用30 mm聚氨酯铺装层,监测海洋腐蚀环境(盐雾浓度35 mg/m³)与振动荷载(日均货车通行量850辆)下的层间剪切强度,每月测试结果保持2.4~2.6 MPa。

1.4.3 严寒地区

沈阳长青桥(-2℃施工),验证低温固化机理与层间黏结耐久性。采用40 mm聚氨酯面层,监测-20~25℃温度循环下的性能衰减,100次循环后强度保留率达94.7%。

2 结果与讨论

2.1 多尺度性能强化机理分析

2.1.1 分子链构效关系

通过FTIR分析显示,聚氨酯胶黏剂在25℃条件下4t内-NCO特征峰(2 270 cm⁻¹)强度衰减达92%,表明固化反应充分。流变测试表明,其60℃复数黏度(1 200 mPa·s)较SBS改性沥青(4 500 mPa·s)降低

73%,支撑了常温施工的可行性。动态热机械分析(DMA)揭示,聚氨酯在-30~80℃范围内损耗因子(tanδ)保持0.25~0.35,显著优于SBS改性沥青(-10~60℃,tanδ,0.3~0.45),宽温域阻尼特性突出。

2.1.2 界面黏结增强效应

通过μ-CT三维重构显示,聚氨酯在集料表面形成厚度为8~15 μm的连续包裹层,界面孔隙率仅1.2%,显著低于沥青混合料的4.8%。通过数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术追踪显示,微裂缝抵达聚氨酯—集料界面时平均偏转16.7°,证明界面区有效的应力重分布效果显著。拉拔试验测得界面黏结强度达6.8 MPa,为SBS改性沥青(2.1 MPa)的3.2倍,且冻融循环50次后强度保留率达89.2%。

2.1.3 宏观力学性能突破

系统测试表明(见表1),聚氨酯混合料关键指标实现量级提升:

抗永久变形动稳定度(60℃,0.7 MPa)达28 500次/mm,为AC-13沥青混合料(915次/mm)的31倍;

低温弯曲极限应变(-10℃)达3 150 με,较SBS改性沥青(1 250 με)提升152%;

在控制应变600 με条件下,疲劳寿命达1.2×10⁶次,实现3个数量级的跨越。

表1 聚氨酯混合料与SBS改性沥青混合料宏观力学性能对比表

性能指标	测试标准	聚氨酯混合料(PUM)	SBS改性沥青混合料(AC-13)	性能提升
动稳定度/(次·mm ⁻¹)	《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) T0719	28 500±1 250	915±85	31.1倍
低温弯曲应变(με)	《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) T0715	3 150±180	1 250±110	2.5倍
疲劳寿命/次	《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) T0739	1.2×10 ⁶ ±5.2×10 ⁴	1.0×10 ³ ±120	1 200倍
冻融劈裂强度比/%	《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) T0729	90.5±2.1	84.8±2.5	1.1倍
动态模量(20℃)/MPa	AASHTO T342	15 200±850	10 100±720	1.5倍

与国内外研究对比(见表2),通过优化异氰酸酯指数($R=1.05$)与掺入0.3%玄武岩纤维,动稳定度较吕伟华等(2023)^[5]提升42.5%,疲劳寿命较董军等(2023)^[8]提升26.3%,且显著优于国外同类研究(如Kim et al., 2024, 22 000次/mm)。

2.1.4 长期耐老化性能

紫外老化与热氧老化试验:经1 000 t紫外老化后,聚氨酯混合料动稳定度保留率92.3%,弯曲应变保留率90.1%;80℃热氧老化30 d后,强度保留率为88.5%,质量损失率仅0.45%,表明其具备优异的长期

表2 与国内外相关研究的聚氨酯混合料性能对比表

文献来源	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	低温弯曲应变(με)	疲劳寿命/次	核心创新点
吕伟华等 ^[5] (2023,中国)	20 000	2 800	8.0×10 ⁵	寒区低温施工技术
董军等 ^[8] (2023,中国)	22 500	2 950	9.5×10 ⁵	全生命周期环境效益分析
Kim等 ^[18] (2024,韩国)	22 000	2 750	7.8×10 ⁵	纤维改性聚氨酯混合料
(2025,中国)	28 500	3 150	1.2×10 ⁶	多尺度增强+山东地域适配技术

耐久性。

2.2 结构创新设计与工程适配性

2.2.1 “功能分层”设计理论

突破传统“厚而强”的设计惯性,提出基于分子链构效关系的“面层功能化减薄(40 mm 聚氨酯)+基层结构性补偿(60 mm AC-20)”协同设计方案。

在济南兴航街工程中,将传统 18 cm 沥青面层优化为“40 mm 聚氨酯功能层+60 mm 沥青承重层”复合结构,计算及实践表明:该结构表面最大拉应力(0.32 MPa)较传统 180 mm 沥青面层(0.39 MPa)降低 18.3%,基层顶面压应力(1.15 MPa)仅比传统结构(1.07 MPa)增加 7.2%,满足承载要求。同时,石料消耗降低 42%(约 1 150 t/km),道路纵断面标高降低 80 mm,显著减少土方开挖与路基材料用量。

2.2.2 特殊工况适配性

在杭州湾跨海大桥应用中,3 cm 聚氨酯铺装层成功替代传统 5 cm 环氧沥青体系。长期监测显示:在 8 级海风与车辆振动耦合作用下,层间剪切强度保持 2.4 MPa,满足钢桥面服役要求。盐雾加速老化试验(3 000 h)后,质量损失率仅 0.38%,彰显卓越耐腐蚀性。

沈阳长青桥-2℃施工实践表明,通过添加低温促进剂(0.5% 三乙烯二胺),体系凝胶时间控制在 45 min,完全固化后拉拔强度达 6.2 MPa,突破寒区路面快速修复的技术瓶颈。

2.3 全生命周期可持续性量化评估

2.3.1 环境效益解构

LCA 结果显示(见表 3),聚氨酯路面在全生命周期内展现出显著环境优势:聚氨酯路面全生命周期 GWP 为 6.8 tCO₂e/km(双向 6 车道),较传统沥青路面降低 43.3%;生产阶段减排 3.2 tCO₂e/km(占 60.4%,常温拌和),维护阶段减排 4.5 tCO₂e/km(占 29.3%,大修周期由 5 年延长到 12 年),再生阶段减排 0.8 tCO₂e/km(占 10.3%,骨料利用率 98.2%,再生工艺能耗 2.1 GJ/km);采用光伏电力拌和后,GWP 进一步降至 5.2 tCO₂e/km,减排率 56.7%。

2.3.2 经济性创新评价

构建考虑时间价值的动态 LCC 模型(贴现率 5%,分析期 30 年):

成本结构显示初始建设成本增加 32.5%(主要来自聚氨酯胶黏剂,新成本 482.5 万元/km,旧成本 364.1 万元/km),但养护成本降低 68.3%,用户社会成本(延误、油耗等)减少 54.7%。

表 3 聚氨酯路面与传统沥青路面全生命周期环境效益对比表

		单位:/km 路面		
评价指标与阶段		聚氨酯路面系统	传统沥青路面	变化率/%
全球变暖潜能 (GWP)	原材料阶段/tCO ₂ e	4.5	5.8	-22.4
	生产与施工阶段/tCO ₂ e	0.8	3.2	-75.0
	维护阶段(30 年)/tCO ₂ e	1.5	3.0	-50.0
	碳排放因子合计/(tCO ₂ e·km ⁻¹)GJ	6.8	12.0	-43.3
累积能源需求 (CED)	原材料阶段/GJ	28.5	30.1	-5.3
	生产与施工阶段/GJ	15.2	45.5	-66.6
	维护阶段(30 年)/GJ	10.5	21.0	-50.0
能耗强度合计/(GJ·km ⁻¹)		54.2	96.6	-43.9
资源消耗	天然骨料消耗/t	1 250	2 150	-41.9
	不可再生资源消耗(石油当量/t)	8.5	12.2	-30.3

全生命周期 NPV 降至 634.50 万元/km(降低 49.2%)。敏感性分析表明:贴现率 3% 时 NPV 优势扩大至 52.8%,聚氨酯价格下降 15% 时回收期缩至 5.2 年。

结合山东省 2024 年碳交易均价 92 元/tCO₂e,30 年碳资产收益 18.7 万元/km,IRR 从 8.5% 提升至 10.8%,环境价值显著转化为经济收益。

2.4 技术—环境—经济耦合机制估

聚氨酯路面依托分子层面三维交联网络实现力学性能跃升(动稳定度提升 31 倍),为结构层面面层减薄 40 mm 提供核心支撑,直接减少材料消耗 42%;通过常温拌和工艺降低生产阶段能耗 66.6%,叠加运营阶段养护周期延长(由 5 年延长到 12 年)效应,最终实现全生命周期碳排放降低 43.3%、全生命周期成本净现值(NPV)降低 49.2%,形成“材料性能提升→结构优化→环境经济双赢”的正向循环机制。

3 技术推广的系统性障碍与突破路径

尽管技术优势显著,但规模化推广仍面临多重壁垒(按 n=36,回收率 83.3% 考虑),具体及突破路径如下。

3.1 技术标准滞后

现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)缺乏聚氨酯材料专用设计参数与验收标准,导致设计保守系数 1.2~1.3,成本额外上升 10%~15%。

突破路径:率先制定团体标准,建立以性能为核心的规范体系。

3.2 产业链协同不足

聚氨酯胶黏剂单价(13 500 t/吨)为沥青(1 600 元/t)的 8 倍,且专用拌和设备普及率不足 30%,初始投资增

加32.5%,66.7%单位优先关注初始成本。

突破路径:通过规模化生产与技术迭代,目标3年内成本降低至8 000元/t;开发模块化改装套件(成本15~25万元/套,改装周期3~5d,适配LB1 000-LB4 000型间歇式拌和站),实现现有拌和站快速升级改造;当前山东、浙江等地对低碳路面设备改造给予50%专项补贴,企业可借力降低初期投入。

3.3 长期性能数据库缺失

国内聚氨酯路面最长服役年限仅5年,缺乏15年以上服役数据支撑超长寿命设计理论。

突破路径:建立更高层面聚氨酯路面性能监测网络,构建大数据驱动的使用寿命预测模型。

3.4 碳价值未能内化

当前碳收益未纳入项目审批指标,绿色金融工具应用率低(仅16.7%项目获补贴)。

突破路径:推动将聚氨酯路面纳入CCER方法学,建立“碳减排—补贴—绿色信贷”联动机制;纳入后项目还可参与碳交易,按当前山东92元/tCO₂e碳价,每公里年均可增碳资产收益超600元,提升投资回报。

4 结论与展望

通过多学科交叉研究,得出以下创新性结论:揭示了聚氨酯—集料界面纳米尺度增强机理,从本质上解释了其抗裂性与耐久性提升3~5倍的内在原因;建立了“功能分层”设计理论,成功将面层厚度减薄至40mm,为资源节约型路面结构提供新范式;量化了全生命周期内碳—成本协同效益,证实聚氨酯路面在环境与经济维度具备双重竞争力;构建了覆盖多场景的工程技术体系,为不同气候区与交通等级的工程应用提供定制化解决方案。

面向交通基础设施零碳转型的战略需求,后续研究应聚焦以下几个方面。

4.1 智能材料研发

开发碳纳米管自感应(监测精度 $\pm 5\mu\epsilon$)与异氰酸酯微胶囊自修复材料(修复效率 $\geq 80\%$),实现路面结构健康状态的实时感知与自主修复。

4.2 数字孪生应用

建立基于BIM+GIS的聚氨酯路面数字孪生平台,整合施工(温度、压实度)、监测(弯沉、裂缝)数

据,实现全生命周期精准管控与预测性养护。

4.3 循环经济融合

探索聚氨酯路面100%再生利用技术路径,闭环材料生命周期。

4.4 政策机制创新

设计“碳足迹—成本—性能”多目标决策模型,推动绿色采购与生态补偿政策落地。

聚氨酯路面技术不仅是材料领域的革新,更是推动道路工程向长寿命、低能耗、可循环方向发展的系统工程。通过持续的技术创新与制度保障,有望成为我国实现交通强国与“双碳”战略目标的关键技术支撑。

参考文献:

- [1] 张金喜,刘小明.中国道路工程可持续发展战略研究[J].中国公路学报,2021,34(10):1-16.
- [2] 罗蓉,冯德成,李立寒.聚氨酯改性沥青及其混合料研究进展[J].材料导报,2020,34(11):11081-11090.
- [3] JTG D50—2017公路沥青路面设计规范[S].
- [4] 肖晶晶,王选仓.基于LCA-LCC的沥青路面环境经济效益评价模型[J].交通运输工程学报,2022,22(4):39-51.
- [5] 吕伟华,谭忆秋,徐慧宁.寒区聚氨酯混凝土桥面铺装低温施工关键技术[J].中国公路学报,2023,36(2):45-56.
- [6] 贾永辉,周彤.基于微观CT的聚氨酯混合料损伤演化研究[J].材料研究学报,2022,36(6):401-410.
- [7] 马宏岩,郑伟.建筑固废再生骨料在聚氨酯混合料中的界面强化机理[J].硅酸盐学报,2021,49(8):1765-1772.
- [8] 董军,孙晓丽.基于LCA的聚氨酯路面环境影响评价研究[J].环境工程,2023,41(2):210-215.
- [9] 王志刚.“双碳”目标下我国交通基础设施低碳化发展路径研究[J].中国软科学,2021(7):78-88.
- [10] T/CCTAS 231—2025中国交通运输协会[S].
- [11] 沈卫国,吴少鹏.聚合物在路面工程中的应用与展望[J].高分子通报,2022(5):1-10.
- [12] 刘强,陈晓明.长寿命路面理论设计与工程实践[M].北京:科学出版社,2021.
- [13] 张小亮,王端宜.基于数字图像处理的沥青混合料细观结构研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(3):1-9.
- [14] 张凯,李宏波.建筑垃圾再生骨料在聚氨酯基路面基层复合材料中的性能评价[J].环境工程学报,2023,17(8):2850-2858.
- [15] 杨俊,王飞.再生混凝土骨料与聚氨酯改性沥青的界面黏结与力学性能[J].复合材料学报,39(4):1850-1858.
- [16] JTG/T 3360-01—2018公路工程项目经济评价规范[S].
- [17] 中国公路学会.2024年公路建设碳排放研究报告[R].北京:中国公路学会,2024.
- [18] Kim J H, Lee S H, PaRk J Y. Performance evaluation of fiber-Reinforced polyurethane asphalt mixture for heavy-duty pavements[J]. Construction and Building Materials, 2024, 412: 128-135.