

# 土工合成材料改善沥青路面结构性能研究进展

杜杰贵<sup>1</sup>, 赵云萍<sup>2</sup>, 张浩楠<sup>1</sup>, 邱龙平<sup>2</sup>, 王伟<sup>3\*</sup>

(1. 昭通市宜昭高速公路投资开发有限公司, 云南 昭通 657000; 2. 昭通市宜昭高速公路项目指挥部, 云南 昭通 657000; 3. 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 土工合成材料由高分子材料经化学加工制成, 可有效地改善沥青路面的力学性能。为有效指导土工合成材料应用设计, 提升沥青路面结构性能并延长寿命, 文章系统归纳现行土工合成材料类型及应用场景, 凝练界面力学增强、多尺度应力调控、环境-力学耦合防护、能量耗散等作用机制, 提出土工合成材料应用设计方案和路面性能提升效果评价方法, 总结现有研究不足及发展方向。土工合成材料在沥青路面性能优化中优势显著, 未来应重点发展与智能感知、环保材料等新兴技术相结合的智能施工体系, 为道路工程可持续发展提供支撑。

**关键词:** 土工合成材料; 高分子聚合物; 沥青路面; 性能评价

中图分类号: TQ317

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0208-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.037

## Research Progress on Improvement of Structural Performance of Asphalt Pavement by Geosynthetic Materials

DU Jiegui<sup>1</sup>, ZHAO Yunping<sup>2</sup>, ZHANG Haonan<sup>1</sup>, QIU Longping<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>3\*</sup>

(1. Zhaotong Yizhao Expressway Investment Development Co., Ltd., Zhaotong 657000, China; 2. Zhaotong Yizhao Expressway Project Command Center, Zhaotong 657000, China; 3. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** Geosynthetic materials, manufactured through chemical processing of polymer materials, can effectively enhance the mechanical properties of asphalt pavements. To provide effective guidance for the design of geosynthetic applications, improve the structural performance of asphalt pavements, and extend their service life, the article systematically reviewed the current types of geosynthetics and their application scenarios. It summarized their functional mechanisms, including interfacial mechanical reinforcement, multi-scale stress regulation, environment-mechanics coupled protection, and energy dissipation. The article proposed design schemes for geosynthetic applications and evaluation methods for assessing pavement performance improvement. It also summarized the shortcomings of existing research and future development directions. Geosynthetics demonstrated significant advantages in optimizing asphalt pavement performance. Future efforts should focus on developing intelligent construction systems that integrate emerging technologies such as smart sensing and environmentally friendly materials, thereby providing support for the sustainable development of road engineering.

**Keywords:** Geosynthetic materials; High molecular polymers; Asphalt pavement; Performance evaluation

土工合成材料是一类广泛应用于土木工程、公路工程、水利工程等领域的合成材料, 通常由聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚酯(PET)、聚氯乙烯(PVC)等高分子材料经化学加工制成, 具有强耐腐蚀性、高抗拉强度和长耐久性等

特征<sup>[1-3]</sup>, 可有效地改善沥青路面的力学性能, 降低沥青路面中的各种病害问题。沥青路面现为我国高等级公路的主要路面类型, 具有行车舒适度高、工期短等优点。然而, 沥青混合料作为一种温敏性的黏弹塑性材料, 夏季高

收稿日期 Submitted date 2025-04-04; 修回日期 Revised date 2025-05-18; 录用日期 Accepted date 2025-06-12

基金项目: 云南省交通运输厅科技创新及示范项目(云交科教便[2021]58号)

\*联系人, 1055069099@qq.com

引用本文: 杜杰贵, 赵云萍, 张浩楠, 等. 土工合成材料改善沥青路面结构性能研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 208-213.

Citation: DU J G, ZHAO Y P, ZHANG H N, et al. Research progress on improvement of structural performance of asphalt pavement by geosynthetic materials[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 208-213.

温时沥青路面刚度和强度下降,行车荷载作用下易发生车辙等剪切变形病害;冬季低温时沥青变脆,易产生开裂等破坏性病害。此外,由于新旧路基不均匀沉降,还会发生沥青路面的龟裂和局部沉降<sup>[4-5]</sup>。对于沥青路面病害,现行处理方法是对病害位置进行铣刨后铺筑新沥青混合料,不仅维修费用高,影响交通,而且在维修过程中会产生大量废料和废气,污染环境。土工合成材料具有稳定的物理和化学属性,在沥青路面结构中铺设可持续发挥加筋作用,具有提升沥青路面承载力、抗车辙、抗反射裂缝、抗疲劳等效果<sup>[6-7]</sup>,能够有效提高沥青路面路用性能,增加路面通行舒适度,延长路面服役寿命。相比增加面层厚度、使用高性能改性沥青等措施,土工合成材料具有明显的成本优势。因此,通过土工合成材料加筋沥青混合料,对主动预防路面病害、减少路面维修频率具有重要意义。

本文从土工合成材料的特性出发,对当前土工合成材料的作用机理及分析手段、应用设计方法、性能评价现状进行总结,提出当前研究的不足和未来发展方向,以期为

未来土工合成材料的应用设计提供一定参考。

## 1 土工合成材料的工程特性

### 1.1 土工合成材料的类型

土工合成材料按组成材料和加工方法可分为土工布、土工格栅、土工复合材料等类型,主要由高分子材料加工制成。土工布由PET纤维、PP纤维等通过针刺、编织等方法制成;土工膜由PE、PVC等高分子聚合物制成;土工格栅一般由PP、PE等高分子材料经挤出、拉伸等工艺制成<sup>[8-11]</sup>。土工合成材料凭借其多样化功能在公路工程中广泛应用,但不同材料类型的土工合成材料因物理特性、施工工艺及环境适应性的差异,在实际工程中表现出显著的优缺点分异。在抗拉强度方面,土工格栅要优于聚酯玻纤布和土工布;在耐久性方面,玻璃纤维格栅耐久性最佳,土工布寿命最短;在经济性方面,无纺土工布价格最低,聚酯玻纤布最昂贵。不同类型土工合成材料有不同的注意事项,如土工布需要注意长期紫外线防护;土工格栅需要关注节点强度和施工搭接;聚酯玻纤布需要严格控制施工温度和黏结质量。表1为土工合成材料优缺点。

表1 土工合成材料优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of geosynthetic materials

类型	优点	缺点
无纺土工布	透水性强,防止路基细颗粒流失;隔离不同土层,减少不均匀沉降;低成本,适用于大面积铺设	抗拉强度低,易被施工机械损坏;长期受车辆荷载易疲劳老化;紫外线降解问题需覆盖保护
有纺土工布	高抗拉强度,提升路基整体性;耐磨损,适用于重载交通区域;尺寸稳定性好,减少变形	透水性差,需配合排水设计;节点强度不足时易发生局部破坏;成本高于无纺布
塑料格栅	高抗拉强度与加筋效果,提升路基承载力;耐化学腐蚀,适应复杂地质条件;轻质易铺设,施工效率高	高温环境下(如沥青摊铺)易软化变形;长期蠕变可能导致加筋效果下降;节点强度不足时易发生界面滑移
玻璃纤维格栅	高模量,有效分散车辆荷载应力;耐高温(>200℃),与沥青混合料兼容性好;抗老化性能优异,寿命长	脆性大,施工中易断裂;需要专用设备固定,施工成本高;与沥青之间的黏结不充分时易脱层
聚酯玻纤布	高抗拉强度与抗裂性能,显著延缓反射裂缝;耐高温(沥青摊铺温度下稳定);环保无毒,符合道路可持续发展需求	施工依赖热沥青黏结,工艺要求严格;价格昂贵,经济性较差;柔韧性不足,复杂地形适应性弱

### 1.2 土工合成材料的应用场景

土工合成材料的种类与功能随着材料的推广逐步细化,相关研究人员进行土工合成材料类型比选,确定不同土工合成材料类型的应用场景,为土工合成材料的定向加筋设计提供参考<sup>[12-16]</sup>。受材料特性、环境适应性及施工条件制约,土工合成材料在实际工程中表现出显著的优缺点

分异。例如,土工布虽具备优异的隔离与排水性能,但其抗拉强度较低,难以满足高填方路基的加筋需求;而土工格栅虽能显著提升土体抗剪强度,却易受紫外线老化影响,长期耐久性需进一步验证。本文总结各类型土工合成材料的特点。表2为土工合成材料在公路工程领域的应用场景。

表2 土工合成材料在公路工程领域的应用场景

Tab.2 Application scenarios of geosynthetic materials in field of highway engineering

类型	应用场景
无纺土工布	路基隔离层、排水层、软基处理;沥青路面裂缝防治(作为应力吸收层)
有纺土工布	高填方路基加筋、路面基层增强
塑料格栅	软土地基加固、路基加筋、边坡防护;防止反射裂缝(铺设于基层与面层间)
玻璃纤维格栅	沥青路面增强(防治车辙和反射裂缝);旧路改造中的结构层加强
聚酯玻纤布	旧沥青路面加铺层抗裂;水泥路面“白改黑”中的应力吸收层;桥面防水层

## 2 土工合成材料性能的提升机理

### 2.1 机理研究方法

土工合成材料作用机理一般通过建立加筋沥青混合料的本构模型进行理论分析,或者进行数值模拟获取内部相关力学数据。仿真多采用扩展有限元仿真和离散元仿真,从细观结构角度分析内部应力与结构位移之间的联系。在本构模型基础上,进行数值模拟可以更有效地得到加筋沥青路面内部应力特征。土工合成材料的加筋作用能够降低裂缝尖端的应力集中,同时与结构层联结完全,形成隔离层有效阻止裂缝扩展<sup>[17-18]</sup>。

BERTULIENE等<sup>[19]</sup>构建土工合成材料对沥青路面影响作用的理论模型,通过试验验证加筋沥青混合车辙深度降低40%。李林健<sup>[20]</sup>采用二维和三维有限元模型分析聚酯玻纤布在沥青层防治反射裂缝的作用机理,指出聚酯玻纤布与沥青层结合好,延伸率低,可以起到桥联作用,降低反射裂缝扩展速率。韦刚<sup>[21]</sup>基于表面能理论证实聚酯玻纤布和沥青具有良好的黏结性,构建聚酯玻纤布沥青混合料复合路面结构有限元模型,计算应力强度因子。复合路面结构应力强度因子显著降低,证实土工合成材料加筋沥青混合料阻止开裂的作用机理。徐良杰<sup>[22]</sup>采用土工格栅/土工布-钙质砂的界面试验获取相关力学数据,提出土工格栅对界面的作用机制,基于统计损伤力学建立界面本构模型,解释土工格栅加筋作用机理。刘盼<sup>[23]</sup>采用断裂力学理论分析聚酯玻纤布各项指标与沥青混合料防治反射裂缝的关系,构建有限元模型计算应力强度因子,从应力强度因子角度阐述聚酯玻纤布加筋沥青混合料的作用。王先镛<sup>[24]</sup>建立离散元模型,发现土工合成材料会提高沥青混合料内部除粗骨料之外各组分之间的黏结力,约束整体侧向位移。

### 2.2 土工合成材料的作用机制

土工合成材料作为高分子材料具有较强的抗拉特性,铺设于沥青混合料中构成路面结构整体,可有效吸收裂缝尖端剩余应力,降低沥青层底部应力集中,阻止发射裂缝从基层传递,达到沥青路面受载过程中的加筋效果。沥青路面在形成车辙时土工合成材料会发生变形,对沥青混合料施加约束力,降低路面沉降和横向应变,因此加筋沥青路面的承载力和抗车辙能力会提升。基于弹性力学、断裂力学、复合材料理论等分析土工合成材料提升路面力学性能的作用机理,主要包括以下几种作用机制。

#### 2.2.1 界面力学增强机制

土工格栅通过肋条与沥青混合料的机械嵌锁及界面摩擦形成复合结构,提升层间抗剪强度。基于弹性层状理论,格栅的高模量可抑制沥青层剪切滑移,降低界面剪应力;土工布的纤维孔隙可吸附沥青形成“沥青-纤维”互穿网络,增强层间黏结并通过柔性变形吸收局部应力集中;三维土工网的网孔结构对集料形成物理约束,构成“骨架-网孔”互锁体系,限制混合料侧向流动,并通过应力重分布

降低沥青层底部拉应变。

#### 2.2.2 多尺度应力调控机制

土工合成材料作为高模量夹层,通过“薄膜效应”将轮载应力由垂直向转为水平向扩散,降低基层顶面压应力及沥青层底部拉应力;在反射裂缝扩展路径中,格栅通过桥接作用抑制裂缝尖端应力奇异性,延缓裂缝贯穿速率;土工布纤维网络通过裂纹偏转和纤维拔出耗能,阻碍微裂纹合并为宏观裂缝。

#### 2.2.3 环境-力学耦合防护机制

土工膜阻断液态水侵入,同时放行水蒸气,杜绝层间湿度积聚诱发的黏结失效;高导热土工格栅匀化层间温度梯度,抑制热胀冷缩造成的界面脱黏;表面改性土工合成材料耐除冰盐、燃油等化学侵蚀,长期保持界面性能;含抗氧化剂格栅吸收紫外光子,减缓光氧化对抗拉强度的削弱。

#### 2.2.4 动态荷载下的能量耗散机制

土工布夹层凭黏弹性吸收车辆冲击能,降低沥青层动态疲劳损伤;格栅-沥青复合结构因波阻抗差异反射/散射应力波,减少振动向基层传递。

## 3 土工合成材料的应用设计

### 3.1 设计原则

土工合成材料加筋沥青路面设计是一项复杂的系统工程,应综合考虑各方面因素,在实际工程中通过合理运用土工合成材料优化沥青路面结构,提高路面的使用性能和寿命。土工合成材料的铺设位置、层数和搭接方式等应与路面结构层相匹配,确保加筋层与沥青层之间的良好黏结和协同工作,形成一个整体受力体系;选用的土工合成材料应与沥青路面的使用环境相适应,具有良好的耐久性、抗拉强度和抗老化性能;材料类型和规格应根据路面的使用要求和荷载条件进行合理选择;在满足性能要求的前提下,应充分考虑加筋设计的经济性。对比分析不同加筋方案和材料成本,选择性价比高的设计方案,实现经济效益与工程质量的平衡;加筋设计方案应考虑到施工的可行性和便利性,便于施工人员操作,应尽量减少施工过程中的材料浪费和环境污染;加筋设计应确保沥青路面的安全性和可靠性,提高路面的承载能力和抗裂性能,减少路面损坏和交通事故的发生。

综上所述,土工合成材料应用设计具体原则要考虑结构整体性、材料适配性、经济合理性、施工便利性和安全可靠。

### 3.2 铺设位置

沥青路面服役过程中同时存在多种类型病害,土工合成材料不同的铺设位置对沥青路面的整体加筋作用存在区别,可达到不同的防治效果。抗拉刚度和抗弯刚度与加筋材料布置相关,确定不同路面病害的最佳加筋位置进行针对性铺设有助于提升加筋效果。KHODAII等<sup>[25]</sup>发现,在沥青层底部加筋防治反射裂缝效果最强,反射裂缝扩展

速率最低。SOBHAN等<sup>[26]</sup>将土工合成材料置于沥青混合料的不同深度,控制应力比来分析沥青混合料的疲劳寿命,证实相同应力比条件下中部加筋沥青混合料抗疲劳效果最强。MOUNES等<sup>[27]</sup>对土工合成材料加筋沥青混合料的抗剪切流动性能进行分析,指出土工格栅铺设在沥青层中部的效果好于底部。FLUTCHER等<sup>[28]</sup>比较不同加筋位置的沥青混合料车辙深度,发现在沥青层1/3处加筋的沥青混合料车辙变形最小,高温性能最佳。

### 3.3 层间黏结力研究

高分子聚合物和沥青混合料之间材料特性不同,因此土工合成材料与沥青层的界面接触会形成黏结薄弱区域,导致界面黏结力下降而破坏沥青路面的整体结构性,影响实际加筋效果,甚至会加速沥青路面病害产生,过早出现开裂和层间分离现象。施工设计中需要平衡加筋沥青路面力学性能和层间黏结力二者关系,将层间黏结力作为加筋沥青路面的重要控制指标。RAAB等<sup>[29]</sup>指出土工合成材料类型和用量、施工温度、黏结层种类会耦合影响层间黏结效果。SUDARSANAN等<sup>[30]</sup>指出土工合成材料的拉伸模量升高会改善黏结强度,温度升高会导致黏结强度显著降。而YANG等<sup>[31]</sup>设计直剪试验,认为土工格栅拉伸模量增加对黏结效果提升有限,层间黏结力与土工格栅的网格尺寸、材料类型等因素相关。NOORY等<sup>[32]</sup>试验证实温度为影响土工合成材料界面黏结的最重要因素,增大土工格栅的网格尺寸可提高不同沥青层之间的黏结力。MORAES等<sup>[33]</sup>研究发现,黏结层中的黏结剂与沥青混合料的黏结剂越接近,黏结效果越佳,黏结强度与沥青黏结剂刚度接近线性比例。

## 4 沥青路面性能改善效果评价方法

土工合成材料改善沥青路面结构性能具有明显的效果,现行研究一般基于“试验方法-数值模型-现场监测”多维评价体系,从高温性能、防治反射裂缝、抗疲劳性能3个方面对改善效果进行量化评价。

### 4.1 高温性能

高温性能为沥青混合料的基础路用性能,沥青路面的高温性能不佳易发生车辙病害,需要分析土工合成材料对沥青混合料高温性能的影响。LAURINAVICIUS等<sup>[34]</sup>采用车辙试验分析,认为土工格栅加筋可以使沥青混合料形成整体结构受载均匀进而提高抗车辙性能,高温时由黏性控制,低温时受弹性影响。刘丹<sup>[35]</sup>研究认为,土工格栅可有效降低沥青车辙深度,而自身模量对车辙影响较小,非重点考虑因素。CORREIA等<sup>[36]</sup>研制加载装置,测试土工格栅加筋沥青混合料的抗车辙性能。测量数据证实,土工格栅加筋后的沥青层车辙深度较普通沥青混合料下降40%,层底应变下降55%。周天璧<sup>[37]</sup>设计12种加筋方案进行室内车辙试验,发现土工格栅的增强效果优于土工格栅,中层加筋优于下层加筋。QADIR等<sup>[38]</sup>对刚性和柔性两种土工格栅加筋沥青混合料的车辙性能进行对比,借助多

元线性回归量化二者区别,证实土工格栅加筋可有效提高沥青混合料的车辙性能,且柔性效果优于刚性。

### 4.2 反射裂缝防治

沥青路面反射裂缝由底部基层结构裂缝由下而上延伸,土工合成材料可有效提高沥青混合料模量,降低裂缝尖端应力集中,延缓反射裂缝扩展。GONZALEZ-TORRE等<sup>[39]</sup>对土工合成材料沥青混合料进行三点弯曲动态加载试验,认为抑制反射裂缝与土工合成材料的刚度及黏附力相关,刚度越大,效果越好,黏附力与材料表面黏结层相关,黏结层会促进加筋沥青混合料成为一个整体提高抗裂性能。NEJAD等<sup>[40]</sup>基于响应面法分析温度、裂缝宽度、土工合成材料类型等影响因素对阻裂效果的影响,提出温度影响最大,其次是土工合成材料类型,裂缝宽度影响最小。乔建刚等<sup>[41]</sup>对聚酯玻纤布加筋沥青混合料进行有限元建模,基于灰熵分析分析聚酯玻纤布厚度等因素对沥青层抗裂效果的影响,认为基层模量和层间黏结对加筋沥青混合料防裂影响最大。周刚等<sup>[42]</sup>分析不同影响因素下复合土工材料阻裂作用,发现玻纤格栅主要作用于裂缝萌生阶段,聚酯玻纤布作用于裂缝扩展阶段。

### 4.3 抗疲劳性能

沥青混合料的抗疲劳性能评价土工合成材料加筋效果的重要指标,高分子聚合物加工成土工合成材料铺设于沥青路面结构中会有效提升沥青路面服役寿命,延缓沥青混合料疲劳开裂失效时间。加筋后的沥青混合料抗疲劳寿命的提高可有效降低路面养护维修费用,带来可观的经济效益<sup>[43]</sup>。SUDARSANAN等<sup>[44]</sup>借助数字图像相关分析方法展示了疲劳加载下不同土工合成材料加筋沥青混合料中损伤界面,测量了不同试件的裂纹区域,指出不同类型失效模式各异,选择材料类型取决于路面条件、土工合成材料特性及黏结层特性。SUBAIDA等<sup>[45]</sup>施加循环荷载分析土工织物加筋沥青路面效果,土工织物加筋会提升整体抗疲劳性能,疲劳寿命和路面厚度相关,沥青路面越厚影响越小,效果越不明显。ABDESSEMED等<sup>[46]</sup>测试土工格栅加筋机场道面的应力应变,发现土工格栅会增强路面承载力刚度,提升抗疲劳性能。ARSENIE等<sup>[47]</sup>证实土工格栅加筋后能阻止疲劳裂纹扩展,疲劳寿命最高提升50%,温度和加筋位置为最主要影响因素。LING等<sup>[48]</sup>自行开发了仿真装置发现反射裂缝为阶梯增长,而通过土工织物加筋可以延缓扩展速率。

## 5 结论

土工合成材料物理、化学性能稳定,耐久性良好,应用于沥青路面结构可有效提高路面服役质量,减少路面病害发生率,降低公路养护费用,具有显著的社会效益和经济效益。目前土工合成材料的工程应用研究存在下列问题:(1)实际工程环境条件考虑不完全。土工合成材料加筋沥青路面的研究多集中在材料性能和加筋效果方面,与实际工程环境的结合相对较少,缺乏系统的环境适应性评价。

(2)材料相容性研究薄弱。界面行为的微观机制(如纤维-沥青分子相互作用)尚未完全阐明,现有模型多基于宏观力学假设,尚未形成统一的评价标准和方法,难以指导实际工程应用。(3)长期性能监测与评估体系不完善。当前研究多侧重于短期性能测试,对于长期性能变化的追踪与分析相对较少,多数研究基于实验室加速试验,缺乏对加筋沥青路面的长期性能监测与评估。

土工合成材料改善沥青路面作为一种创新且高效的路面建设技术,在沥青路面改扩建工程中具有广阔的应用前景。未来发展应与新兴技术相结合,实现路面的智能化管理和环保性能提升。未来发展方向应立足于以下几个方面:(1)材料创新与绿色环保。新型土工合成材料应具备更优异的抗拉强度、耐腐蚀性、耐久性,和沥青路面之间应具有更高的融合度;应更加注重环保性能,使用可回收材料或可生物降解材料。(2)智能化与自动化。通过嵌入传感器和数据分析,实现实时监测、预警和自适应调整;重点发展融合多物理场耦合机制的数字孪生设计平台,构建涵盖材料功能定制、结构参数优化及全生命周期性能演变的智能决策系统,推动土工合成材料从“被动增强”向“主动调控”的设计模式转型。(3)标准化与规范化。土工合成材料加筋沥青路面的设计和施工将更加标准化和规范化,更多研究集中于长期性能监测和评估方面,及时发现并解决潜在问题,延长路面的使用寿命。

### 参考文献

- [1] 王清明,徐超,沈盼盼,等.土工合成材料加筋土桥台变形特性的离心模型试验[J].同济大学学报(自然科学版),2025,53(3):338-347.
- [2] SHIL T, PAL S K. Load-sharing mechanism and performance of geosynthetic-reinforced soil under external loading: A review[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2024, 19(5): 895-914.
- [3] 赵崇熙,徐超,王清明,等.土工合成材料加筋土桥台极限承载力的离心荷载试验[J].岩土力学,2024,45(6):1643-1650.
- [4] 王先镛,景钦霆.土工格栅加筋沥青混凝土制备与抗裂性能研究[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2024,38(3):114-120.
- [5] 王旭东,杨光,钱振东,等.基于亿次加载试验的长寿命沥青路面性能演化规律及设计体系研究[J].中国公路学报,2024,37(12):197-209.
- [6] 李乔一.沥青路面反射裂缝扩展机理及碳纤维土工格栅抗开裂抗疲劳性能研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2023.
- [7] 徐超,陈铭铭,杨阳,等.基于生产过程实测的土工合成材料碳排放因子[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2025,44(1):1-7.
- [8] 赵世涛,杨蕾.塑料土工格栅对高填方边坡的加固特性研究[J].塑料科技,2020,48(12):67-70.
- [9] 者东梅,朱天戈,刘玉春.土工合成材料耐久性能影响因素[J].塑料工业,2023,51(2):13-16.
- [10] 庄亚芳,武鹏,者东梅.聚丙烯长丝土工织物的耐久性能[J].塑料,2023,52(3):126-129.
- [11] 曹炜强,李良勇,张青松,等.椰壳纤维增强环氧树脂合格格的制备及性能研究[J].中国塑料,2023,37(3):13-18.
- [12] 李昊楠.光氧化对土工布/土工膜界面剪切强度的影响机理试验研究[D].南昌:南昌大学,2024.
- [13] KUMAR V V, ROODI G H, SUBRAMANIAN S, et al. Installation of geosynthetic interlayers during overlay construction: Case study of Texas State Highway 21[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 43: 101127.
- [14] KUMAR N, KUMAR R. Performance of geosynthetic-encased stone columns in sandy soils subjected to vertical cyclic loads[J]. International Journal of Geomechanics, 2025, 25: 04024323.
- [15] PORTELINHA F H M, FIGUEIREDO P V C, ZORNBERG J G. Experimental evaluation of geosynthetic-modular block connection loads[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2024, 52(4): 574-584.
- [16] ZHANG B Q, LI J Y, CHEN F Q, et al. Analytical solutions for settlements of a pavement structure on geosynthetic-reinforced embankments overlying voids[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2025, 62(1): 11-19.
- [17] CARRUBBA P, CARRUBBA P. Laboratory evaluation of geosynthetic interface friction under low stress[J]. Polymers, 2024, 16(17): 2519.
- [18] CORREIA N S, SOUZA T R, SILVA M P S, et al. Investigations on interlayer shear strength characteristics of geosynthetic-reinforced asphalt overlay sections at Salvador International Airport[J]. Road Materials and Pavement Design, 2023, 24(6): 1542-1558.
- [19] BERTULIENE L, OGINSKAS R, BULEVICIUS M. Research of rut depth in asphalt pavements reinforced with geosynthetic materials[R]. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2011.
- [20] 李林健.聚酯玻纤布防反射裂缝力学机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.
- [21] 韦刚.沥青路面聚酯玻纤布层间阻裂机理与路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
- [22] 徐良杰.土工格栅加筋钙质砂界面相互作用机理研究[D].南宁:广西大学,2023.
- [23] 刘盼.聚酯玻纤布在沥青路面防裂中的研究与应用[D].天津:河北工业大学,2016.
- [24] 王先镛.土工合成材料加筋沥青混合料的力学行为研究[D].武汉:武汉理工大学,2021.
- [25] KHODAII A, FALLAH S, MOGHADAS NEJAD F. Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(1): 1-8.
- [26] SOBHAN K, CROOKS T, TANDON V, et al. Laboratory simulation of the growth and propagation of reflection cracks in geogrid reinforced asphalt overlays[C]//5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements-Mitigation, Risk Assessment and Prevention. Limoges, France: RILEM Publications SARL, 2004.
- [27] MOUNES S M, KARIM M R, KHODAII A, et al. Improving rutting resistance of pavement structures using geosynthetics: An overview[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014(1): 764218.
- [28] FLUTCHER S, WU J T H. A state-of-the-art review on geosynthetics in low-volume asphalt roadway pavements[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 7(4): 411-419.

- [29] RAAB C, GRENFELL J, HALIM A OABD EL, et al. The influence of age on interlayer shear properties[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2015, 16(6): 559-569.
- [30] SUDARSANAN N, KARPURAPU R, AMRITHALINGAM V. An investigation on the interface bond strength of geosynthetic-reinforced asphalt concrete using Leutner shear test[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 423-437.
- [31] YANG L, ROODI G H, ZORNBERG J G. Development of a shear test for unreinforced and geosynthetic-reinforced hot mix asphalt[C]// *Geosynthetics Conference 2019*. Houston, Texas: American Society of Civil Engineers, 2019.
- [32] NOORY A, MOGHADAS NEJAD F, KHODAII A. Evaluation of the effective parameters on shear resistance of interface in a geocomposite-reinforced pavement[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, 20(9): 1106-1117.
- [33] MORAES R, VELASQUEZ R, BAHIA H U. Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2011, 2209(1): 70-81.
- [34] LAURINAVICIUS A, OGINSKAS R, ZILIONIENE D. Research and evaluation of Lithuanian asphalt concrete road pavements reinforced by geosynthetics[J]. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2006, 1(1): 21-28.
- [35] 刘丹. 土工格栅减小软基路面车辙的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [36] CORREIA N S, ZORNBERG J G. Mechanical response of flexible pavements enhanced with geogrid-reinforced asphalt overlays[J]. *Geosynthetics International*, 2016, 23(3): 183-193.
- [37] 周天璧. 土工合成材料加筋沥青混合料抗车辙性能研究[J]. *交通科技*, 2024(1): 31-36.
- [38] QADIR A, GAZDER U, CHOUDHARY K U N. Statistical analysis for comparing and predicting rutting resistance of asphalt pavements with rigid and flexible geogrid layers[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 302: 124136.
- [39] GONZALEZ-TORRE I, CALZADA-PEREZ M A, VEGA-ZAMANILLO A, et al. Experimental study of the behaviour of different geosynthetics as anti-reflective cracking systems using a combined-load fatigue test[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2015, 43(4): 345-350.
- [40] NEJAD F M, ASADI S, FALLAH S, et al. Statistical-experimental study of geosynthetics performance on reflection cracking phenomenon [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(2): 178-187.
- [41] 乔建刚, 田亚磊, 张恒. 聚酯玻纤布防裂性能影响因素的灰嫡分析[J]. *材料科学与工程学报*, 2018, 36(2): 250-253.
- [42] 周刚, 李汝凯, 王火明, 等. 经编复合聚酯玻纤布防反射裂缝性能试验[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(2): 16-22.
- [43] YOO C. Geosynthetic solutions for sustainable transportation infrastructure development[J]. *Sustainability*, 2023, 15(22): 15772.
- [44] SUDARSANAN N, ZENG Z A, KIM Y R. Laboratory investigation into the crack propagation mechanism of geosynthetic reinforced asphalt concrete using digital image correlation technique[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2023, 24(1): 2251079.
- [45] SUBAIDA E A, CHANDRAKARAN S, SANKAR N. Laboratory performance of unpaved roads reinforced with woven coir geotextiles [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(3): 204-210.
- [46] ABDESSEMED M, KENAI S, BALI A. Experimental and numerical analysis of the behavior of an airport pavement reinforced by geogrids [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94: 547-554.
- [47] ARSENIĆ I M, CHAZALLON C, DUCHEZ J L, et al. Laboratory characterisation of the fatigue behaviour of a glass fibre grid-reinforced asphalt concrete using 4PB tests[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2017, 18(1): 168-180.
- [48] LING J M, WEI F L, GAO J H, et al. New test method for measuring reflective cracking in hot-mix asphalt overlay pavements[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2019, 2673(6): 327-336.