

# 应力吸收层材料对沥青路面加铺结构层间抗剪性能的影响

王 杨<sup>1</sup>, 屈畅姿<sup>1</sup>, 朱崇政<sup>1</sup>, 刘 泽<sup>2</sup>, 姜 勇<sup>1</sup>, 黄永亮<sup>3</sup>, 包仕淳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>湘潭大学土木工程学院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

<sup>3</sup>中交一公局集团有限公司, 北京

收稿日期: 2026年4月21日; 录用日期: 2026年5月13日; 发布日期: 2026年5月22日

## 摘 要

为系统评估沥青路面加铺结构中不同应力吸收层的层间抗剪性能, 对环氧改性乳化沥青、环氧改性乳化沥青复合玄武岩纤维布、环氧改性乳化沥青复合不锈钢钢丝网及高性能应力吸收贴四种材料, 在20℃、40℃、60℃及水-热耦合工况下开展45°斜剪试验, 分析剪切强度与粘结能的变化规律。结果表明: 温度升高显著降低各材料的抗剪性能。高性能应力吸收贴综合性能最优, 20℃时剪切强度达469.53 kPa、粘结能8.76 J, 60℃时残余强度仍达24.19 kPa; 而掺入玄武岩纤维布或钢丝网因有效粘结面积减少与界面削弱, 抗剪性能低于纯环氧改性乳化沥青组, 水-热耦合条件下提前破坏。研究可为加铺工程应力吸收层的合理选材提供试验依据。

## 关键词

路面加铺, 应力吸收层, 层间抗剪性能, 斜剪试验, 粘结能

# Influence of Stress-Absorbing Layer Materials on Interlayer Shear Performance of Asphalt Pavement Overlay Structures

Yang Wang<sup>1</sup>, Changzi Qu<sup>1</sup>, Chongzheng Zhu<sup>1</sup>, Ze Liu<sup>2</sup>, Yong Jiang<sup>1</sup>, Yongliang Huang<sup>3</sup>, Shichun Bao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

<sup>3</sup>CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing

Received: April 21, 2026; accepted: May 13, 2026; published: May 22, 2026

文章引用: 王杨, 屈畅姿, 朱崇政, 刘泽, 姜勇, 黄永亮, 包仕淳. 应力吸收层材料对沥青路面加铺结构层间抗剪性能的影响[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 258-265. DOI: 10.12677/hjce.2026.155136

## Abstract

To systematically evaluate the interlayer shear performance of different stress-absorbing layers in asphalt pavement overlay structures, 45° oblique shear tests were conducted on four materials: epoxy-modified emulsified asphalt (EMEA), EMEA combined with basalt fiber fabric, EMEA combined with stainless steel wire mesh, and a high-performance stress-absorbing membrane. The tests were performed at 20°C, 40°C, 60°C, and under hydrothermal coupling conditions. The variations in shear strength and bonding energy were analyzed. The results indicate that elevated temperatures significantly degrade the shear performance of all materials. The high-performance stress-absorbing membrane exhibits the best overall performance, achieving a shear strength of 469.53 kPa and a bonding energy of 8.76 J at 20°C, while retaining a residual strength of 24.19 kPa at 60°C. In contrast, the incorporation of basalt fiber fabric or stainless steel wire mesh reduces the effective bonding area and introduces interfacial weakening, resulting in lower shear resistance than that of the pure EMEA group, with premature failure under hydrothermal coupling conditions. This study provides an experimental basis for the rational selection of stress-absorbing layers in overlay engineering.

## Keywords

Pavement Overlay, Stress-Absorbing Layer, Interlayer Shear Performance, Oblique Shear Test, Bonding Energy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在水泥混凝土路面加铺沥青面层的工程实践中，层间粘结性能是影响加铺结构整体使用性能和耐久性的关键因素。由于水泥混凝土板与沥青面层属于两种性质差异较大的材料，其层间界面在行车荷载和温度应力的反复作用下易产生剪切滑移破坏，导致路面出现推移、拥包、开裂等病害。应力吸收层作为设置于水泥混凝土板与沥青面层之间的功能层，其核心作用在于分散和吸收层间应力，延缓反射裂缝的扩展，同时提供可靠的层间粘结力。因此，科学评价不同应力吸收层材料在不同服役环境下的层间抗剪切性能，对于指导加铺工程的材料选择与结构设计具有重要意义。

在应力吸收层材料研究方面，国内外学者开展了大量探索。土工合成材料在防治反射裂缝方面具有一定效果[1]-[3]。与此同时，应力吸收层材料与沥青层间的粘结性能成为人们关注的问题，国内外学者进行了深入研究。黄立葵等[4]通过层间剪切试验，研究了不同加筋材料路面结构组合试件的层间抗剪切性能，发现玻纤格栅和自粘式应力布因层间接触面的隔离作用，对界面抗剪强度有不利影响。姜军等[5]通过剪切强度试验，研究了抗裂贴、聚酯玻纤布、玻纤格栅等材料的黏结性能，发现抗反射裂缝土工材料会使层间剪切强度和黏结能力下降。张明恒[6]针对碳纤维土工格栅在沥青混合料中的层间表现也进行评估，与其它层间抗反射裂缝土工合成材料进行了对比。Wang [7]等通过剪切试验研究了土工格栅类型对沥青路面结构层间剪切性能的影响，发现 RTL 值越大，DLTP 值越小，加固试件的层间剪切强度越高。

综上，当前沥青路面应力吸收层材料的研究中，在沥青路面层间使用的材料多数为土工材料，研究明确了传统土工材料在层间应用中的局限性，即用于反射裂缝防治的同时会降低层间黏结性能，为此开

发与应用能够协同提升抗裂与抗剪性能的材料提供了明确的理论依据和工程需求。

为此, 本文通过制备水泥混凝土-粘结层-沥青混凝土复合试件, 对玄武岩纤维布、钢丝网、高性能应力吸收贴等应力吸收层材料在常温、高温及水-热耦合工况下开展斜剪试验研究, 以为实际工程中应力吸收层材料的合理选择提供试验依据。

## 2. 试验材料及设计

### 2.1. 试验设计

为模拟路面实际服役环境, 设置四种工况: 工况 A 为 20℃ 恒温保温 4 h, 作为基准对照组; 工况 B 为 40℃ 恒温保温 4 h, 用以模拟夏季高温工作状态; 工况 C 为 60℃ 恒温保温 4 h, 考察极端高温下的性能表现; 工况 D 为 60℃ 恒温水浴 24 h 后转移至 40℃ 恒温保温 4 h, 模拟高温多雨地区水-热耦合最不利环境。试验采用 45° 斜剪加载, 加载速率设定为 5 mm/min。

### 2.2. 复合试件制备

试件结构由下层 50 mm 水泥混凝土板、中间粘结层及上层 50 mm AC-13 沥青混凝土组成, 成型后切割为尺寸 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件, 如图 1 所示。

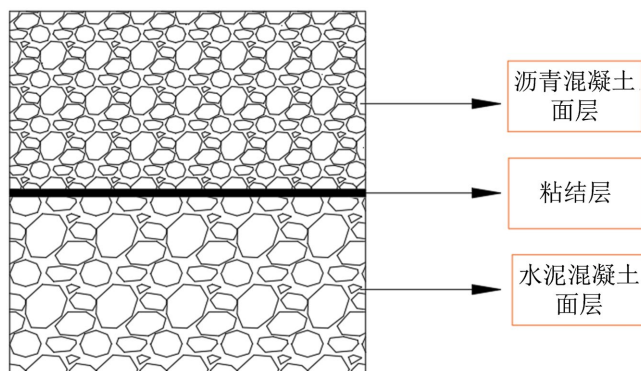


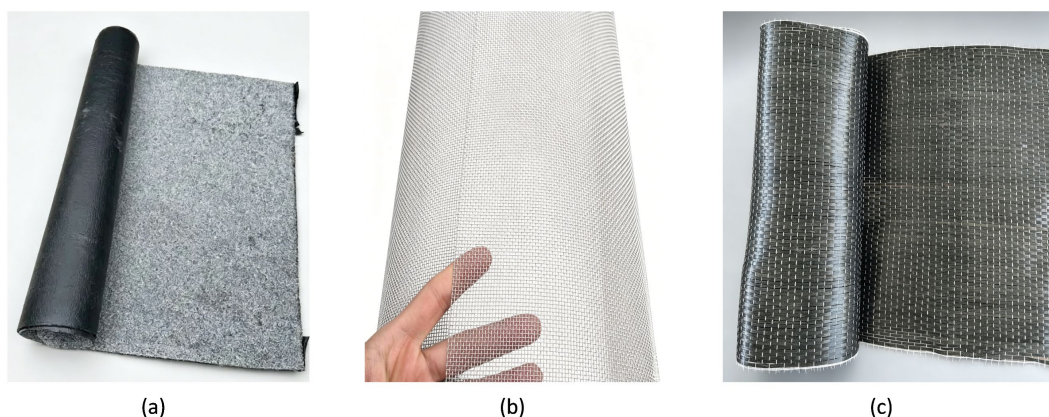
Figure 1. Schematic diagram of composite specimen  
图 1. 复合试件示意图

水泥混凝土板的设计强度等级为 C30。经配合比设计确定水灰比为 0.48, 砂率取 34%。每 m<sup>3</sup> 混凝土中各材料用量分别为: 水 184 kg、P-O42.5 普通硅酸盐水泥 383 kg、机制砂 624 kg、粒径 5~16 mm 碎石 363 kg 以及粒径 16~25 mm 碎石 846 kg。试件经振动成型后标准养护 28 d, 同期制备的标准立方体抗压试块实测强度满足 C30 等级要求。

沥青面层选用 SBS 改性沥青 AC-13 级配混合料。所采用的 SBS 改性沥青经检测, 其 25℃ 针入度为 41.26 (0.1 mm), 软化点为 73.4℃, 5℃ 延度为 23.6 cm, 各项技术指标均符合规范要求。矿料合成级配按通过率控制, 其中 13~16 mm 档占 4.3%, 9~13 mm 档占 25.4%, 4~9 mm 档占 28.9%, 2~4 mm 档占 12.1%, 1~2 mm 档占 5.4%, 0.6~1 mm 档占 5.5%, 0.3~0.6 mm 档占 4.7%, 0.15~0.3 mm 档占 4.4%, 0.075~0.15 mm 档占 3.9%。经马歇尔试验确定最佳油石比为 4.7%。所用矿粉为石灰岩矿粉, 实测含水率为 0.28%、亲水系数为 0.7, 加热安定性良好且无团粒结块现象, 测试结果均符合规范要求。

粘结层材料共选取四种类型, 具体如下: (1) 环氧改性乳化沥青, 采用外掺法制备。制备过程中水性环氧树脂掺量为 10%, 环氧树脂与固化剂的质量比为 1.9:1。(2) ZT-22 型高性能应力吸收贴。该材料整体单位面积质量不小于 2.7 kg/m<sup>2</sup>, 去除表面砂粒后的有效厚度不低于 1.8 mm。纵横向断裂强度均不低于 30

kN/m, 伸长率控制在 1%~10% 范围内, 梯形撕破强力纵横向均不低于 300 N。在 0.3 MPa 水压下保持 120 min 不透水, 70℃ 高温下不流淌滴落, -10℃ 低温下弯折无裂纹。(3) 304 不锈钢钢丝网, 其网格尺寸为 1.1 mm, 丝径 0.21 mm, 抗拉强度及屈服强度满足相关标准要求, 延伸率不小于 40%, 弹性模量约为 200 GPa。(4) 玄武岩纤维布, 厚度为 0.111 mm, 抗拉强度不小于 3400 MPa, 弹性模量不小于 240 GPa, 伸长率不小于 1.7%。三种粘结层材料如图 2 所示。



**Figure 2.** Bonding layer materials. (a) Stress-absorbing membrane; (b) Steel wire mesh; (c) Basalt fiber fabric  
**图 2.** 粘结层材料。(a) 应力吸收贴; (b) 钢丝网; (c) 玄武岩纤维布

粘结层施工时, 环氧改性乳化沥青的洒布量统一取为  $1.0 \text{ kg/m}^2$ 。对于复合增强类材料, 采用分层施工工艺: 先在水泥混凝土板表面均匀涂布总用量一半的环氧改性乳化沥青, 随即铺设玄武岩纤维布或钢丝网, 再涂布剩余用量的环氧改性乳化沥青。高性能应力吸收贴则直接铺设在处理后的水泥混凝土板表面。

### 2.3. 试验方法

将切割好的复合试件放入 UTM 试验机中进行保温, 4 h 后采用特制夹具对复合试件的位置进行调整, 复合试件下方设置滑移滚轮自由面。以  $5 \text{ mm/min}$  速率加载直至剪切破坏, 记录最大压力。试验结束后, 根据最大力加载值, 计算斜剪试验结果。试验现场如图 3 所示。



**Figure 3.** Schematic diagram of oblique shear test  
**图 3.** 斜剪切试验示意图

### 3. 剪切强度结果与分析

#### 3.1. 温度对抗剪切强度的影响

不同工况下复合试件抗剪切强度结果如图 4 所示, 可知, 所有材料的层间剪切强度均随温度升高呈现显著下降趋势, 表现出明显的温度敏感性。以环氧改性乳化沥青为例, 其剪切强度从 20℃时的 353.57 kPa 降至 60℃时的 9.68 kPa, 强度保留率仅为 2.8%, 降幅高达 97.2%。这一现象可归因于沥青材料固有的粘弹性特征, 随着环境温度升高, 沥青组分逐渐软化, 内部分子间作用力减弱, 导致抵抗剪切变形的能力急剧下降。

值得注意的是, 在粘结体系中引入增强材料并未带来预期的性能提升效果, 反而造成抗剪强度的进一步降低。在 20℃条件下, 复合玄武岩纤维布试件的剪切强度为 229.37 kPa, 复合钢丝网试件为 281.24 kPa, 均低于纯环氧改性乳化沥青组。分析认为, 玄武岩纤维布和钢丝网作为增强体本身不具备粘结功能, 其介入破坏了粘结层的连续性。致密的玄武岩纤维布在层间形成近乎封闭的隔离层, 严重阻碍了环氧改性乳化沥青与上下结构层的直接接触, 导致有效粘结面积大幅减小; 钢丝网虽为镂空结构, 但其网孔区域的粘结效率仍不及连续粘结层, 增强材料与沥青粘结层之间存在界面粘结强度不足的问题, 在荷载作用下容易发生界面分离。当温度升高至 60℃时, 两组增强复合试件的剪切强度均降至 10 kPa 以下, 降幅超过 97%。在水-热耦合工况下, 水分沿增强材料与粘结层之间的界面快速渗透, 加速了粘结失效过程, 致使试件在加载前即发生结构性破坏。

相比之下, 高性能应力吸收贴在各温度条件下均表现出优异的抗剪性能。20℃时其剪切强度达 469.53 kPa; 60℃极端高温下仍保持 24.19 kPa 的残余强度, 降幅为 94.8%, 均小于其余各组材料。这一优良性能得益于应力吸收贴的复合结构设计: 其内部高聚物改性沥青形成了三维交联网络结构, 在高温条件下仍能维持一定的粘弹性与粘结力; 同时内置的高强度增强基材起到骨架支撑作用, 有效抑制材料的整体流动变形。二者协同作用使得应力吸收贴在沥青组分高温软化的条件下仍能提供支撑力并分散剪切应力, 从而保持相对较高的残余抗剪能力。在水-热耦合工况下, 应力吸收贴试件仍保持 55.64 kPa 的剪切强度, 进一步验证了其良好的耐水损害性能。

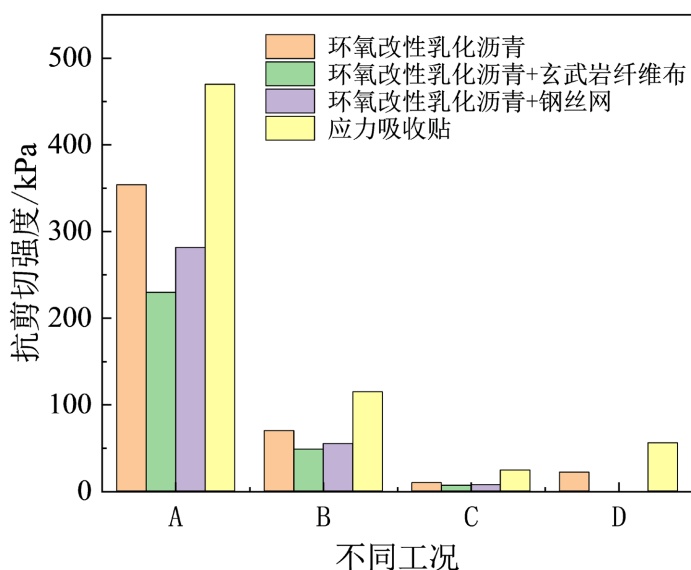


Figure 4. Shear strength test results of composite specimens  
图 4. 复合试件抗剪切强度结果

### 3.2. 粘结能分析

粘结能作为评价层间粘结性能的综合指标，能够反映界面从受力到破坏全过程的能量吸收能力。在本试验中，将 4 种不同复合试件在不同工况下的剪切力-实际相对位移曲线进行积分，可得各组试件在不同工况下的粘结能，计算结果如下。

在 20℃ 常温条件下，高性能应力吸收贴的粘结能最高，达到 8.76 J；环氧改性乳化沥青组次之，为 2.79 J，环氧改性乳化沥青复合钢丝网组为 2.21 J，环氧改性乳化沥青复合玄武岩纤维布组最低，仅为 1.85 J；当温度升至 40℃ 时，各材料粘结能均大幅衰减，应力吸收贴降至 2.21 J，环氧改性乳化沥青组降至 0.43 J，钢丝网与纤维布复合组分别降至 0.22 J 和 0.15 J；在 60℃ 极端高温条件下，仅应力吸收贴和环氧改性乳化沥青组可测得有效粘结能，分别为 0.60 J 和 0.015 J，增强材料组已无法完成有效测试；经水-热耦合处理后，应力吸收贴的粘结能为 1.11 J，环氧改性乳化沥青组为 0.13 J，其余两组试件提前破坏。

由图 5 可知，粘结能的变化规律与剪切强度具有高度一致性。高性能应力吸收贴在 20℃ 时的粘结能为环氧改性乳化沥青对照组的 3.1 倍，60℃ 时达到对照组的 40 倍，表明其在高温环境下仍具备较高的能量耗散能力。掺入玄武岩纤维布或钢丝网的复合试件，其粘结能在各温度条件下均低于纯环氧改性乳化沥青组，进一步证实了增强材料的引入因界面削弱效应导致试件破坏前可吸收的总能量减少。在水-热耦合条件下，增强材料与粘结层之间的界面成为水分渗透的快速通道，显著减小了粘结性能。

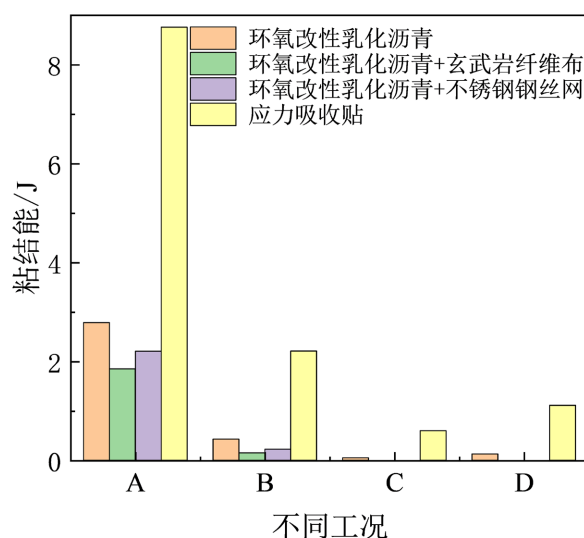


Figure 5. Bonding energy of different composite specimens  
图 5. 不同复合试件的粘结能

### 3.3. 不同粘结层试件的破坏模式分析

在不同环境条件下，采用环氧改性乳化沥青作为粘层油的试件表现出不同的破坏模式。经 20℃ 与 40℃ 环境保温处理的试件，在 UTM 试验机中加载至峰值应力后，呈现渐进式破坏特征，表现为层间粘结力逐步丧失，上下表面缓慢分离。与之形成对比的是，经 60℃ 高温处理及 60℃ 水浴养护的试件则表现出突发性破坏形态，当荷载达到极限值时，层间界面失效，上下表面随即分离。在 60℃ 高温环境中，环氧改性乳化沥青出现明显的材料流失现象，这一变化直接导致其粘结性能显著下降。

环氧改性乳化沥青-玄武岩纤维布复合试件表现出典型的界面粘结失效特征：其荷载达到峰值后迅速下降，且总加载持续时间明显少于环氧改性乳化沥青复合试件。当剪切力达到最大值时，试件上下层

即产生相对滑移，最终导致层间完全分离。

特别需要指出的是，经 60℃ 水浴处理 24 小时后，该组试件在未施加荷载前已出现层间分离现象，表明其界面粘结性能在水 - 热耦合作用下严重劣化。试件的界面形态如图 6 所示，可以发现，经 60℃ 水浴处理 24 小时后，下结构层的基层表面仅局部残留少量乳化沥青，无完整的粘层油膜留存，因此在未施加荷载前已出现层间分离现象。使用环氧改性乳化沥青 - 钢丝网作为层间粘结材料的试件抗剪切破坏模式与环氧改性乳化沥青 - 玄武岩纤维布的试验组破坏结果相似：在加载力达到最大时，试件上下表面发生相对滑移，加载力撤去后，沥青混合料板与混凝土板会继续发生相对滑移直至完全分离。且在经 60℃ 水浴处理 24h 后的试块在试验前就已破坏，无完整的粘层油膜留存。



**Figure 6.** Interlayer interface morphology. (a) Basalt fiber fabric; (b) Steel wire mesh  
**图 6.** 层间界面形态。(a) 玄武岩纤维布；(b) 钢丝网

以应力吸收贴作为层间粘结材料的复合试件，在抗剪试验中展现出最优的性能：当加载至峰值荷载时，该组所有试件的粘结层仍维持有效粘结状态，未发生其余三组试件所呈现的上下结构层完全分离失效现象，体现出良好的层间协同工作能力。此外，经 60℃ 水浴处理 24 h 后，复合试件仍保持相较于其余三组试件更优的抗剪强度，表明其在恶劣环境下仍能稳定发挥粘结作用，具备突出的抗老化性能与层间抗剪性能。该组试件的最终剪切形态如图 7 所示，其上下表面未发生分离。



**Figure 7.** Shear morphology of the composite specimen with stress-absorbing membrane  
**图 7.** 应力吸收贴复合试件剪切形态

## 4. 结论

在本研究采用的材料与试验条件下,通过对四种应力吸收层材料在多种环境工况下的层间抗剪切性能进行试验研究,得到以下主要结论:

(1) 四种材料的层间剪切强度与粘结能均随温度升高而显著降低,表现出明显的温度敏感性。其中,高性能应力吸收贴在各温度条件下均表现出最优的综合性能,其在 20℃时剪切强度达 469.53 kPa、粘结能达 8.76 J,60℃时仍保持 24.19 kPa 的残余剪切强度与 0.60 J 的粘结能,且在水-热耦合工况下仍维持较高的抗剪能力,体现出优异的温度稳定性与耐水损害性能。

(2) 在环氧改性乳化沥青中掺入玄武岩纤维布或不锈钢钢丝网等增强材料,并未实现预期的性能提升效果。由于增强材料导致有效粘结面积减小以及界面应力集中效应,复合试件的剪切强度与粘结能低于纯环氧改性乳化沥青对照组。在水-热耦合环境下,含增强材料的试件均发生提前破坏。

(3) 在高温及水-热耦合条件下,环氧改性乳化沥青及其复合玄武岩纤维布或钢丝网的层间粘结性能显著劣化,甚至加载前即发生层间分离;而应力吸收贴试件始终保持有效粘结,抗剪性能最优,展现出优异的层间协同工作能力与耐老化性能。

(4) 高性能应力吸收贴凭借其内部高聚物改性沥青与增强基材的协同工作机制,在高温及水-热耦合等严酷条件下仍能维持较高的残余抗剪强度与能量吸收能力,在对层间抗剪性能要求较高的沥青路面加铺工程中优先选用。

## 参考文献

- [1] Solatiyan, E., Ho, V.T., Bueche, N., Vaillancourt, M. and Carter, A. (2023) Evaluation of Crack Development through a Bituminous Interface Reinforced with Geosynthetic Materials by Using a Novel Approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2677**, 446-457. <https://doi.org/10.1177/03611981231166002>
- [2] Zhang, H., Sun, B., Li, Y. and Li, Y. (2022) Adhesive Property and Road Performance Evaluation of Asphalt Overlay Pavement with Geotextile Interlayer. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2022**, Article ID: 3084668. <https://doi.org/10.1155/2022/3084668>
- [3] Xiao, Q., Zhao, X., Li, Z. and Zhu, M. (2024) Performance Evaluation of Welded Galvanized Steel Wire Mesh Reinforced Asphalt Pavements. *Construction and Building Materials*, **455**, Article ID: 139178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139178>
- [4] 黄立葵, 冯晓东, 夏爱辉, 等. 沥青路面结构层间加筋性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 600-610.
- [5] 姜军, 彭良臣, 杨德胜. “白改黑”路面土工材料防反射裂缝试验及应用研究[J]. 公路交通技术, 2026, 42(1): 55-62.
- [6] 张明恒. 碳纤维土工格栅加筋沥青混合料层间剪切特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022
- [7] Wang, Z., Yang, G., Li, Q., Li, T., Xu, P. and Liang, X. (2024) Comparative Assessment of the Interlayer Shear Strength of Asphalt Concrete with Carbon Fiber Geogrid as Reinforcement. *Construction and Building Materials*, **450**, Article ID: 138593. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138593>