

面向结构协同受力的超薄磨耗层层间粘结材料与性能研究进展

赵高伟¹, 熊金凤¹, 毛诗伟¹, 夏雨欣²

¹赣州康大高速公路有限责任公司, 江西 赣州

²湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年8月9日; 录用日期: 2026年8月30日; 发布日期: 2026年9月11日

摘要

超薄磨耗层是沥青路面预防性养护和表面功能恢复的核心技术, 其层间粘结状态直接决定路面结构协同受力、抗剪稳定性及长期服役寿命。本文系统梳理了普通乳化沥青、改性乳化沥青、橡胶沥青、环氧沥青、防水粘结层及纤维增强类材料的性能特点与适用场景; 归纳了剪切、拉拔、扭剪、疲劳和耐久性等多维度评价方法; 深度剖析了材料类型、洒布量、表面纹理、清洁度、温湿作用及施工工艺对粘结性能的影响机制。综述表明, 合理选择粘结材料并控制界面清洁、洒布均匀性、破乳成膜与碾压质量, 是提高层间粘结可靠性的关键。针对当前评价标准不统一、长期性能研究不足等问题, 未来应加强多因素耦合作用下的性能演化规律、现场快速无损检测及“材料-结构-施工”一体化设计研究, 为超薄磨耗层技术的工程应用与理论深化提供科学参考。

关键词

沥青路面, 超薄磨耗层, 层间粘结材料, 技术性能, 施工控制

Research Progress on Interlayer Bonding Materials and Performance of Ultra-Thin Wearing Courses Oriented to Synergistic Structural Force

Gaowei Zhao¹, Jinfeng Xiong¹, Shiwei Mao¹, Yuxin Xia²

¹Ganzhou Kangda Expressway Co., Ltd., Ganzhou Jiangxi

²School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: August 9, 2026; accepted: August 30, 2026; published: September 11, 2026

文章引用: 赵高伟, 熊金凤, 毛诗伟, 夏雨欣. 面向结构协同受力的超薄磨耗层层间粘结材料与性能研究进展[J]. 土木工程, 2026, 15(9): 54-66. DOI: 10.12677/hjce.2026.159223

Abstract

Ultra-thin wearing course serves as a core technology for preventive maintenance and surface function restoration of asphalt pavements, and its interlayer bonding condition directly governs the synergistic mechanical behavior, shear stability and long-term service life of pavement structures. This paper systematically sorts out the performance characteristics and applicable scenarios of conventional emulsified asphalt, modified emulsified asphalt, rubber asphalt, epoxy asphalt, waterproof bonding layers and fiber-reinforced materials. Multi-dimensional evaluation methods including shear test, pull-out test, torsion shear test, fatigue test and durability test are summarized. The influence mechanisms of material type, spreading dosage, surface texture, surface cleanliness, temperature-humidity effect and construction technology on bonding performance are deeply analyzed. The review reveals that reasonably selecting bonding materials and controlling interface cleanliness, spreading uniformity, demulsification and film formation as well as compaction quality are critical to improving the reliability of interlayer bonding. In view of existing problems such as inconsistent evaluation standards and insufficient research on long-term performance, future studies should strengthen research on performance evolution laws under multi-factor coupling effects, on-site rapid non-destructive testing, and the integrated “material-structure-construction” design. This work can provide scientific references for the engineering application and theoretical development of ultra-thin wearing course technology.

Keywords

Asphalt Pavement, Ultra-Thin Wearing Course, Interlayer Bonding Material, Technical Performance, Construction Control

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

我国公路交通已由大规模新建阶段迈入建养并重时期。受交通荷载、温湿变化、材料老化及水分侵入等耦合作用,沥青路面服役过程中易出现抗滑衰减、磨耗松散、裂缝及剥落等病害,及时有效的预防性养护对提升路面使用品质和降低全寿命周期成本具有重要意义[1]。超薄磨耗层作为典型的表面功能恢复技术,具备施工快捷、材料节约、开放交通迅速及标高影响小等显著优势,在高速公路、城市道路及桥面铺装中广泛应用。然而,超薄磨耗层厚度较薄、承载能力有限,其服役性能不仅取决于混合料本身材料特性,更高度依赖于与下承层之间的层间粘结状态。层间界面处于荷载、温度和水分共同作用的敏感区域,粘结良好时,路面结构可形成整体受力体系,有效传递并分散荷载;粘结不足则易引发层间滑移、推移、拥包及脱层等早期病害[2]。层间粘结材料作为实现上下层有效连接的核心介质,不同类型材料在黏附性、抗剪强度、防水性及耐久性方面差异显著。此外,粘结性能还受洒布量、界面纹理与清洁度、施工工艺等多因素综合制约。目前,国内外相关研究多集中于材料改性、界面强度评价及数值分析等方面,但由于试验条件与评价体系差异导致结果可比性不足,针对超薄磨耗层薄层界面的系统性研究仍需深入。本文系统梳理超薄磨耗层层间粘结材料及技术性能,剖析作用机理、材料体系、评价方法及多维影响因素,并提出未来发展方向,旨在为材料优选、施工控制和性能提升提供理论指导与工程参考。

本文的研究逻辑与技术路线如图 1 所示。

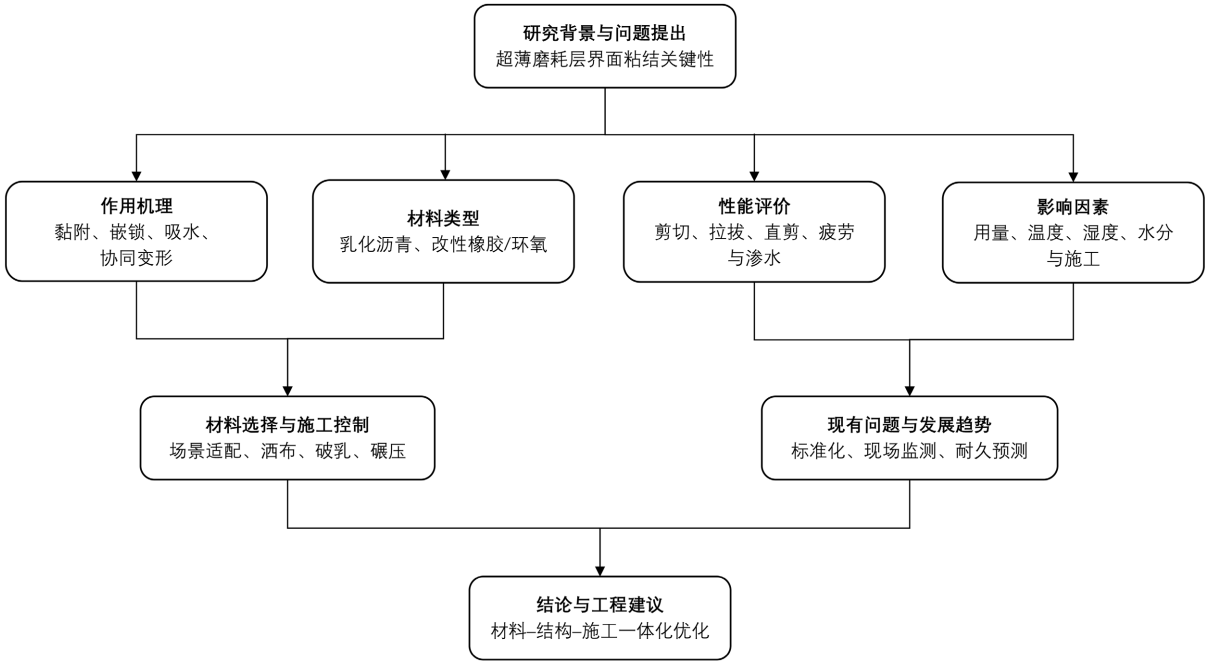


Figure 1. Flow chart of the research logic

图 1. 本文研究逻辑流程图

2. 层间粘结作用机理

沥青路面为多层复合结构，层间粘结直接影响荷载传递与变形协调。良好的粘结可使路面形成整体受力体系，减小裂缝与滑移风险；弱粘结则削弱结构连续性，加速早期损坏[3]-[8]。超薄磨耗层厚度薄、界面近路表，车辆水平力及环境作用更易集中于此，故粘结质量对结构力学响应的影响尤为突出。其作用机理与失效模式主要体现在如图 2 所示的四个维度。

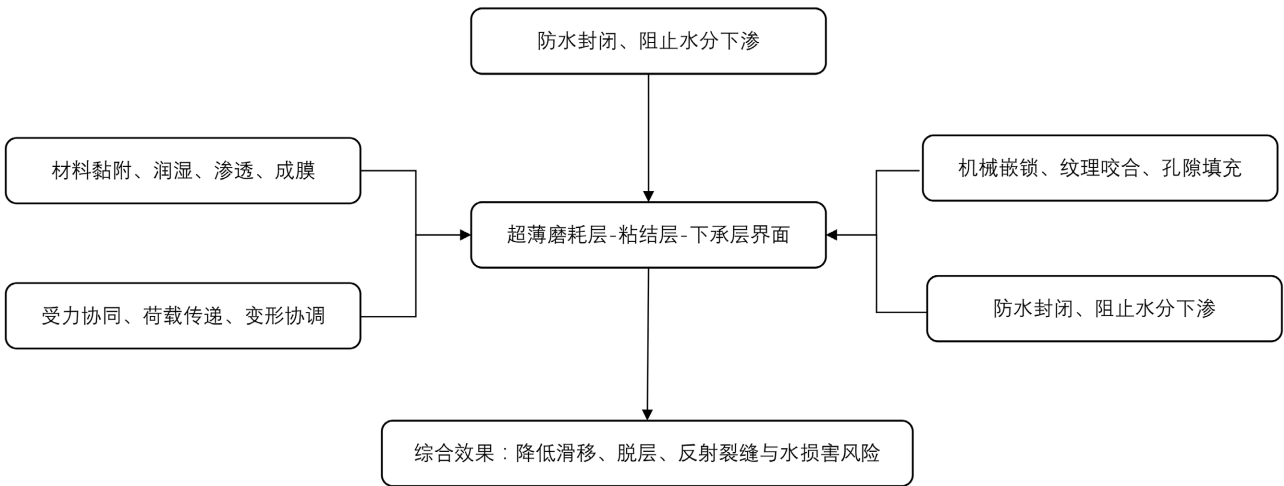


Figure 2. Schematic diagram of interlayer bonding mechanism of ultra-thin wearing course [3] [5] [8] [12]

图 2. 超薄磨耗层层间粘结作用机理示意图[3] [5] [8] [12]

(1) 受力协同与应力传递

完全粘结状态下上下层共同承受荷载，应力均匀传递，整体刚度和抗变形能力较高。粘结性能降低时，协同变形减弱，界面产生剪切滑移，高温重载下易诱发推移与脱层[3]-[8]。研究表明，层间完全滑动状态下路面使用寿命将大幅缩短，且路表弯沉、结构层底拉应力与剪应力显著增加，导致结构承载力快速衰减[2]。

(2) 材料黏附与界面结合

粘结材料通过润湿、渗透、破乳、成膜及固化等过程形成连接层。以乳化沥青为例，其水分蒸发后沥青颗粒聚结为膜，经摊铺碾压与上下层结合。其破坏模式可分为界面剥离(因润湿不足、污染或老化引起)与粘结层内聚破坏(因洒布过量、高温稳定性不足引起)[9][10]。沥青与集料界面的分子作用力及化学黏附是形成有效结合的基础[11]。

(3) 表面纹理与机械嵌锁

适当的宏观构造增加接触面积，使粘结材料进入表面孔隙，碾压后形成机械嵌锁，从而提高抗剪能力[5][12]。但若纹理过深或清扫不彻底，则会造成材料堆积或空隙夹层，反而不利。因此需同步控制构造深度、清洁度与洒布均匀性。

(4) 防水封闭与耐久保护

粘结层还承担着防水防渗功能。一旦层间不密实，水分和空气易沿弱粘结区域侵入，引起材料老化、沥青剥落及水损害[13][14]。排水型磨耗层及桥面铺装场景对防水抗渗能力有更高要求。

(5) 失效机理

层间失效是材料、施工和环境多因素综合作用的结果，分为界面黏附破坏、粘结层内聚破坏及混合破坏。失效具有显著的累积损伤特征：局部微滑移或微裂缝在荷载与温湿循环下不断扩展，有效粘结面积逐渐减小，最终导致宏观推移或脱层[12][15]。

3. 层间粘结材料体系及性能演化

粘结材料是实现层间有效结合的关键，其性能直接影响路面结构的抗剪、抗拉、防水及耐久能力。常用材料包括乳化沥青类、热态改性沥青类、防水粘结层、环氧沥青类、纤维增强类及新型复合材料等，不同材料的性能侧重不同(见表 1)。

Table 1. Types, performance characteristics and applicable scenarios of interlayer bonding materials
表 1. 层间粘结材料类型、性能特点及适用场景

材料类型	主要性能特点	局限性	适用场景	来源
普通乳化沥青/粘层油	常温施工、经济性好、应用广	对破乳、洒布量、表面状态敏感	一般沥青层间粘结、轻中交通路段	[3][9][12]
改性乳化沥青/高渗透乳化沥青	黏附性、高温稳定性和渗透固结能力较好	材料稳定性和施工窗口需控制	超薄磨耗层、半刚性基层与旧路界面	[16][17]
热态改性沥青/橡胶沥青	残留率高、防水和应力吸收能力较强	施工温度和用量控制要求较高	排水型磨耗层、重载或高温路段	[18]
防水粘结层/碎石封层	兼具抗剪、抗拉、防水封闭功能	碎石撒布、碾压和均匀性影响大	排水沥青、桥面铺装、旧路微裂缝路段	[18][19]
环氧沥青/树脂类材料	强度高、耐久性好、抗水损害能力强	成本高，固化时间和施工窗口严格	桥面铺装、急弯陡坡、重载高剪切场景	[8][20][21]
纤维增强/土工复合材料	抗裂、抗疲劳和应力吸收能力突出	可能降低层间剪切粘结，需复核抗剪	旧路加铺、反射裂缝控制	[22]-[24]

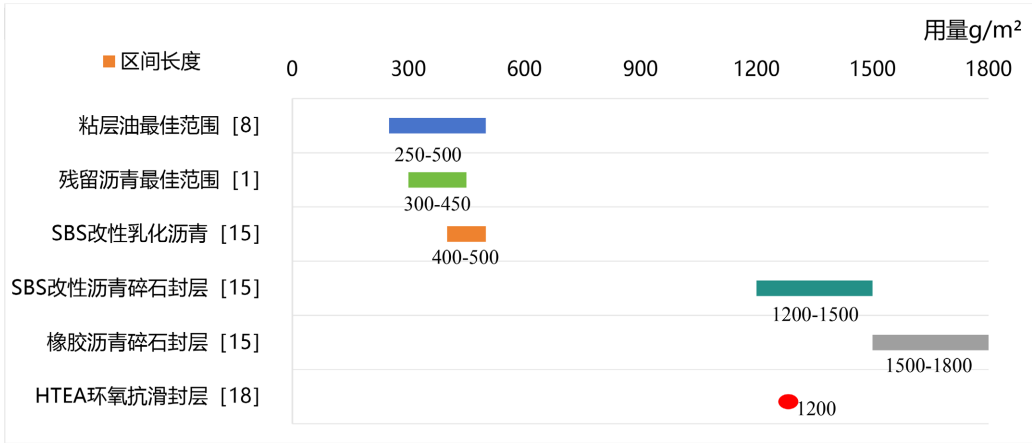
由表 1 可知, 普通乳化沥青应用最广, 具有常温施工、成本低等优点, 但其性能受洒布量、破乳时间及表面状态影响大[3][9]。改性乳化沥青通过掺加聚合物改善黏附性、高温稳定性和抗水能力, 高渗透乳化沥青强调“渗透-固结-粘结”综合作用, 适用于半刚性基层界面强化[16][17]。热态改性沥青及橡胶沥青因不需要破乳过程, 成膜快、残留率高, 适合防水及抗剪要求高的排水路面和薄层罩面[18]。防水粘结层兼具连接与封闭功能, 常用于桥面铺装及旧路加铺, 对施工均匀性和碎石撒布质量要求较高[18][19]。环氧沥青及树脂类材料强度高、耐水性和耐久性突出, 适用于钢桥面、重载交通及急弯陡坡等高剪切场景, 但施工窗口期和成本控制严格[8][20][21]。纤维增强与土工复合材料可提高抗裂和应力吸收能力, 但可能削弱层间抗剪, 需针对性校核[22]-[24]。新型复合改性材料(如低毒溶剂型沥青、纳米改性乳化沥青等)代表了环保化、高性能化方向, 但长期耐久性和评价标准尚需进一步验证[25]-[27]。不同工程场景下文献推荐的层间粘结材料用量范围如表 2 所示。

图 3 为层间粘结材料用量范围图, 由图 3 可以看出, 各类粘结材料推荐洒布量存在明显差异, 该结果并非孤立的数值范围, 而是与材料类型、下承层界面纹理状态紧密耦合。对于乳化类粘层材料, 乳化

Table 2. Dosage and construction parameters of interlayer bonding materials in representative literatures

表 2. 代表性文献中的层间粘结材料用量及施工参数

材料或结构	推荐参数	说明	来源
粘层油/乳化沥青	250~500 g/m ²	最大剪切强度对应粗糙度约 0.17 mm、用量 250 g/m ²	[12]
残留沥青用量	300~450 g/m ²	小于 300 g/m ² 效果较差, 过量可能造成层间滑移	[3]
排水沥青用 SBS 改性乳化沥青	0.4~0.5 kg/m ² (以纯沥青计)	以抗剪强度和抗拉强度作为评价指标	[18]
SBS 改性沥青碎石封层	沥青 1.2~1.5 kg/m ² ; 碎石 5~10 mm; 撒布面积 60%~70%	用于排水沥青路面防水粘结层	[18]
橡胶沥青碎石封层	沥青 1.5~1.8 kg/m ² ; 碎石 5~10 mm; 撒布面积 60%~70%	水分与温度适应性较好	[14] [18]
环氧沥青抗滑封层(EAS)	HTEA 1.2 kg/m ² ; 3~5 mm 玄武岩; ASR 100%; 胶轮碾压 20 遍	材料用量和温度对粘结强度影响显著	[21]



注: kg/m² 已换算为 g/m²; 不同材料体系不可直接横向等同, 仅用于展示文献推荐用量区间。

Figure 3. Range of dosage for interlayer bonding materials recommended in different literatures [3][12][18][21]

图 3. 不同文献推荐的层间粘结材料用量范围[3][12][18][21]

沥青、残留沥青以及 SBS 改性乳化沥青整体用量处于较低水平，这类材料主要依靠沥青浸润黏附实现界面结合；当界面平整、构造深度小且表面清扫干净时，可取用量区间的下限，避免多余粘结料发生滑移；若下承层铣刨后纹理粗糙、孔隙发达，则宜选取区间上限，补偿集料孔隙对粘结料的吸附损耗。

SBS 改性沥青碎石封层与橡胶沥青碎石封层的推荐用量显著增大，一方面是材料体系需要同时实现沥青黏附与集料嵌锁作用；另一方面该类材料多用于大构造深度的粗糙或排水型路面界面，更高的洒布量用以填充表面孔隙，保障防水封闭效果。环氧类抗滑封层给出单点设计用量，该材料以化学粘结为主，对界面粗糙度、清洁度十分敏感，仅适配经处理的刚性基面，用量波动空间很小。

综上，图 3 给出的用量区间不能作为固定取值直接套用，应当结合材料自身特性，根据实际工程的界面纹理、界面洁净程度做选取，光滑界面偏向区间低值，粗糙多孔界面偏向区间高值。

4. 层间粘结性能评价方法与指标体系

层间粘结技术性能评价是材料优选、参数确定和质量控制的重要依据。超薄磨耗层界面受力复杂，需采用多指标综合评价体系(见表 3)。

Table 3. Evaluation methods and representative parameters for technical performance of interlayer bonding

表 3. 层间粘结技术性能评价方法及代表性参数

评价方法	主要指标	代表性试验条件或特点	来源
剪切试验(直剪/斜剪/ SBT)	层间抗剪强度、峰值剪切应力	100 或 150 mm 试件; 0.5、5、50 mm/min; -10℃、5℃、20℃	[3] [4] [28]
拉拔/抗拉试验(TAT/原位拉拔)	抗拉强度、破坏位置	TAT 强度约为 SBT 的 1/2.2; 原位拉拔与室内直剪相关性较好	[4] [29]
扭剪/扭矩试验	扭矩、界面扭剪强度	用于模拟转向、制动等扭转剪切作用	[3] [28]
弯曲疲劳与粘结能评价	疲劳寿命、粘结能、断裂能	多角度斜剪可区分一次破坏与疲劳破坏	[22] [30]
环境耐久性试验	浸水/冻融后强度保持率	5℃、25℃、40℃、65℃及浸水 48 h 常用于温湿敏感性分析	[14]
现场检测与数值模拟	原位强度、弯沉、界面应力应变	拉拔/直剪现场筛查; CZM/FEM 分析层间退化与水平力	[29] [31] [32]

(1) 抗剪性能：最核心的评价指标，通过直剪、斜剪或便携装置施加水平剪切荷载，测定界面破坏时的最大剪切应力。需重点关注试验温度、法向压力和加载速率，不同材料对比时应保持条件一致[3][4][15][33]。

(2) 抗拉与拉拔性能：评价粘结材料抵抗垂直剥离的能力，更能反映黏附性能，适用于评价水损害和脱层风险。设备便携，适合现场快速筛查，但需注意破坏位置判定[12] [29]。

(3) 扭剪性能：通过施加扭矩使界面产生环向剪切应力，适用于交叉口、匝道等转向频繁区域，可作为抗剪试验的补充[3] [28]。

(4) 弯曲、疲劳与断裂性能：复合梁弯曲、四点弯曲疲劳及断裂能分析可评价材料在长期荷载下的损伤累积能力，该指标对旧路加铺和反射裂缝控制尤为重要[8] [22] [30]。

(5) 环境耐久性：包括不同温度、浸水、冻融循环和热老化后的强度试验，用于评价材料在服役环境下的性能衰减。由于超薄磨耗层界面距路表近，环境敏感性更突出，建议将常温初始强度与环境作用后残余强度结合进行评价[7] [13] [14]。

(6) 现场检测：包括取芯后室内试验、原位拉拔、扭剪及弯沉反演等。现场检测能反映施工污染、压实及开放交通的影响，建议采用“施工过程检测 - 取芯验证 - 服役期跟踪”模式[5] [29] [34]。

(7) 数值模拟：通过有限元及粘聚区模型分析不同粘结状态下的力学响应，以补充试验难以观察的结构内应力分布，辅助确定强度需求阈值[31] [32] [35]。

综上所述，综合评价体系应包含抗剪强度(抗滑移)、拉拔强度(抗剥离)、扭剪强度(转向稳定性)、疲劳寿命(损伤抵抗)及环境强度保持率(耐久性)，并结合现场检测与数值分析进行综合判定。

5. 层间粘结性能多维影响因素

超薄磨耗层层间粘结性能受材料特性、界面状态、施工工艺、环境条件和交通荷载等多因素共同影响，且对外部条件变化高度敏感，各影响因素的逻辑框架如图 4 所示。

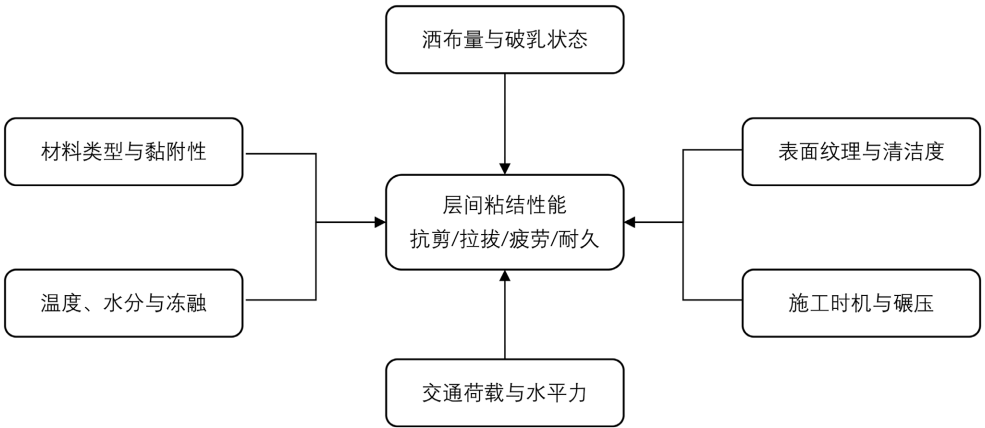


Figure 4. Framework of main influencing factors for interlayer bonding performance of ultra-thin wearing course [3] [4] [7] [12] [15] [31] [33]

图 4. 超薄磨耗层层间粘结性能主要影响因素框架[3] [4] [7] [12] [15] [31] [33]

(1) 材料类型与洒布量：材料类型决定了基本性能潜力[7][12][15]。洒布量是最关键的控制参数，不足时有效黏附面积低，过量时则形成富沥青软弱层从而降低抗剪性能。存在对应峰值强度的最佳洒布率，需通过试验予以确定[3] [8] [12] [28]。

(2) 下承层表面纹理与清洁度：适当宏观纹理增加接触面积和机械嵌锁，但纹理过深或污染物未清理会形成隔离层。灰尘、泥浆、油污及水分会显著削弱粘结，施工前须严格清扫并保持干燥[12][15][29][33]。

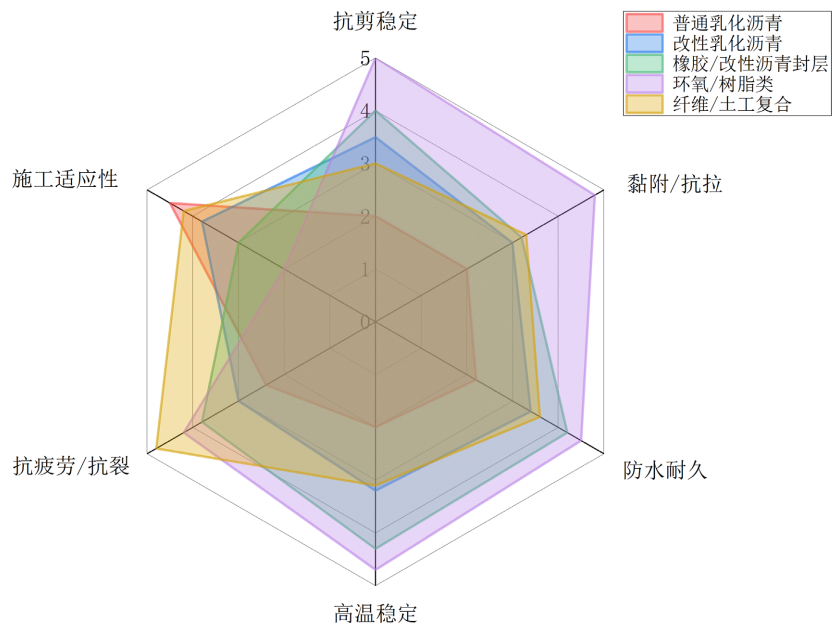
(3) 温度与水分：温度升高降低沥青黏度和抗剪强度，增加滑移风险；低温则可能引发脆裂。水分会削弱黏附作用，浸水和冻融循环亦造成强度衰减。排水型磨耗层和潮湿地区应重点关注抗水损害能力[4] [7] [14] [18]。

(4) 荷载条件：竖向压力可提高接触密实度，但制动、转向产生的水平力会显著增加剪切需求。重复荷载易造成疲劳损伤，加载速率影响黏弹性响应[4] [17] [28] [31] [33]。

(5) 施工工艺与时机：包括洒布均匀性、破乳时间、摊铺时机、混合料温度、碾压工艺及开放交通控制等环节。乳化沥青未充分破乳即摊铺会削弱粘结，暴露过久则易受污染。全过程控制是保证施工质量的关键[3] [5] [9] [31]。

(6) 下承层类型与老化：旧沥青路面、半刚性基层、水泥混凝土及钢桥面等材料差异大，界面结合机制不同，需针对性选择材料与评价指标[5] [20] [36]。粘结性能随服役时间逐步衰减，初始强度高不意味长期可靠，需重视老化与疲劳后的强度保持能力[14] [35]。

在上述多维度因素共同约束下，不同类型层间粘结材料在黏结强度、水稳定性、施工适应性、耐老化等方面表现存在明显差异，为直观对比各类材料的综合服役水平，绘制多维性能对比雷达图，如图 5 所示。



注：图中各指标得分分为基于试验表及相关文献的相对等级，用于方案筛选，不代表统一试验条件下的实测值。

Figure 5. Multi-dimensional performance comparison of typical interlayer bonding materials
图 5. 典型层间粘结材料多维综合性能对比

图 5 将材料选择由单一强度比较转化为多目标决策。普通乳化沥青施工适应性和经济性突出，但高温与耐水短板明显；改性乳化沥青综合均衡，适合多数超薄磨耗层；橡胶/改性沥青碎石封层在防水与抗裂方面占优；环氧/树脂类抗剪、黏附和耐久性能最高，但施工窗口和成本约束最大；纤维/土工复合材料的抗裂优势需要以层间抗剪复核为前提。雷达图评分为基于表 1 及相关文献的相对等级，适用于初筛，不替代同条件试验。

6. 工程场景适配性与施工控制技术

超薄磨耗层因厚度小、界面受力敏感，粘结材料选择与施工控制应建立“材料 - 界面 - 施工 - 检测”一体化体系。不同工程场景下的施工控制建议如表 4 所示。

Table 4. Material selection and construction control suggestions under different engineering scenarios
表 4. 不同工程场景下的材料选择与施工控制建议

工程场景	推荐材料方向	关键施工控制	检测重点	来源
一般旧沥青路面加铺	普通或改性乳化沥青	清扫干燥、控制破乳；洒布量随纹理调整	优先做试验段验证抗剪与拉拔	[3] [12]
排水型超薄磨耗层	SBS 改性乳化沥青或改性/橡胶沥青碎石封层	SBS 乳化沥青 0.4~0.5 kg/m ² ；碎石 5~10 mm、覆盖 60%~70%	重点检测抗剪、抗拉和浸水后强度保持率	[18] [14]
桥面铺装或刚性下承层	防水粘结层、环氧沥青或树脂类材料	加强喷砂/凿毛/水力破除等表面处理	采用拉拔和剪切联合评价	[19] [20] [29]
高温、重载、长大纵坡、交叉口	橡胶沥青、环氧沥青或高性能改性粘结材料	提高高温抗剪和扭剪控制要求	关注水平力、温度和开放交通时机	[7] [21] [31]
旧路裂缝明显或反射裂缝敏感	玻纤增强膜或土工复合材料配合粘结层	增强抗裂同时校核层间抗剪	避免增强层形成新的滑移界面	[22]-[24]

(1) 场景适配性材料选择：应满足抗剪、黏附、防水、耐久和施工适应性要求。普通乳化沥青适用于轻交通一般路段；改性乳化沥青适用于多数超薄磨耗层；橡胶沥青及碎石封层适合排水型和防水要求高的结构；环氧及树脂类用于桥面、重载和高剪切区域；纤维增强材料用于抗裂但需同步校核抗剪性能[8] [18] [20]-[22]。

(2) 下承层表面处治：施工前应调查并修补病害，清除松散颗粒、浮尘、泥浆，对刚性下承层进行粗糙化处理，保持界面洁净干燥，避免污染和水膜形成隔离层[12] [29]。

(3) 洒布量与均匀性：控制口径应统一为残留沥青量，并由材料残留率反算乳液洒布量。文献推荐的乳化沥青/粘层油最佳区间多为 250~500 g/m²；在特定组合中，构造深度约 0.17 mm、250 g/m² 对应最大抗剪强度。因此，应以试验段目标值为中心进行喷洒车标定，按单位面积承接盘/土工布增重法核验实洒量和横向均匀性；NCHRP 14-44 提出的施工指南草案采用相对试验段目标值 ± 5% 的控制思路，可作为项目级过程控制参考，但不应未经验证直接替代合同规范[3] [8] [12] [28]。

(4) 破乳、摊铺与碾压时机：乳化沥青应在颜色由褐转黑、表面水分基本消失且不粘轮后覆盖。已有对比显示，洒布后等待 30~60 min 再压实第二层的粘结强度优于仅等待 5 min，说明完全或部分破乳是形成有效膜层的前提；对于同步喷洒摊铺工艺，乳液含水量仍会显著影响层间质量，需按产品破乳特性与现场温湿风条件校核施工窗口。摊铺后碾压应在有效温度窗口内紧跟，避免低温造成难以嵌锁[5] [9] [31]。

(5) 温度、水分与特殊环境控制：一项现场试验中，混合料入场/摊铺温度由 150℃ 降至 110℃ 时层间粘结降低近 60%；另一组直剪试验中，相对 20℃，界面温度升至 30℃ 和 50℃ 时抗剪强度分别下降约 25%~42% 和 65%~80%，且 50℃ 时过量洒布更易形成润滑层。MIST 水损伤后，普通、聚合物改性和不粘轮粘层材料的抗剪强度分别下降 20%~24%、15%~16% 和约 6%。故高温重载段需提高残留膜高温等级并严控过量洒布，低温施工应提高混合料到场温度稳定性，多雨环境必须在无水膜状态下施工。上述数值受材料与试验条件限制，宜作为试验段设定和风险分级依据[7] [14]。

(6) 施工质量检测：建议采用“过程参数全覆盖 - 成层后无损筛查 - 少量取芯标定”的三级模式。过程阶段利用承接盘/土工布称量核查实洒量，利用机器视觉识别漏洒、条带和喷嘴异常，利用摊铺机载红外传感器条带连续生成二维温度图并指导碾压调整；成层后采用红外热像快速定位浅层脱粘，3D GPR 通过界面反射幅值或叠加峰值比进行车道级扫描，冲击锤 - 加速度响应适用于 10~50 mm 薄层界面筛查；最后仅在异常区和对照区布置取芯、剪切或拉拔试验完成阈值标定[29] [34]。

为使施工控制由原则性描述转化为可执行检查项，表 5 汇总关键参数的量化影响及建议的现场判据。表中“量化影响”均保留原研究材料、温度或试验方法边界，不作为跨项目统一验收阈值。

Table 5. Quantitative effects and field control points of key construction parameters
表 5. 关键施工参数的量化影响与现场控制要点

关键参数	研究边界	量化影响	现场控制/判据	来源
洒布量 × 纹理	乳化沥青/残留沥青；不同混合料表面	推荐 250~500 g/m ² ；构造深度约 0.17 mm、250 g/m ² 时抗剪峰值	按残留量统一口径；试验段建立纹理 - 用量曲线，过少防止缺膜、过多防止滑移	[3] [12]
实洒偏差/均匀性	NCHRP 14-44 拟议指南，项目试验段	相对试验段目标值 ± 5% 为拟议过程控制思路	喷洒车标定；承接盘/土工布称量；横向分区统计均值、极差和变异系数	[32] [36]
破乳/等待时间	乳化沥青，第二层压实前	等待 30~60 min 的强度优于 5 min；应在完全或部分破乳后覆盖	颜色褐→黑、无游离水、不粘轮；记录洒布 - 摊铺时间和温湿风条件	[12] [32]

续表

混合料温度	RC-70 粘层油现场试验; 150℃为对照	110℃较 150℃层间粘结降低近 60%	红外连续测温; 冷点优先补充碾压或按方案处置; 建立到场/摊铺最低温度	[37]
界面服役温度	5 类粘层材料直剪; 20℃为基准	30℃下降 25%~42%; 50℃下降 65%~80%	高温段提高残留膜高温等级, 避免过量洒布形成润滑层	[38]
水损伤	MIST 条件, 20℃直剪	普通乳化材料下降 20%~24%; 聚合物改性下降 15%~16%; 不粘轮材料约 6%	施工前无水膜; 潮湿/排水结构按湿态保持率选材并加强防水连续性	[38]

表 5 显示, 施工参数之间存在明显耦合: 纹理决定有效膜层需求, 破乳状态决定黏附膜能否形成, 而混合料温度与碾压时机共同决定机械嵌锁程度。现场控制不宜只记录单一平均洒布量, 而应同步保留“残留量 - 横向均匀性 - 破乳时间 - 温度轨迹 - 碾压遍数”的时空数据链。

针对上述关键施工参数的精细化管控需求, 工程中可采用对应的现场快速无损检测技术实现实时评价与质量把控, 各参数对应的检测方法如表 6 所示。

Table 6. Rapid field nondestructive testing techniques corresponding to construction parameters
表 6. 与关键施工参数对应的现场快速无损检测技术

技术	对应参数/问题	现场实施与输出	效率优势	局限与标定要求	来源
承接盘/土工布称量与纹理修正	实洒量、横向均匀性、纹理吸附	洒布前后称量; 分喷嘴/分车道布点; 与 MTD 或三维纹理联合标定	分钟级; 可在覆盖前即时复核	严格说属于无损取样式过程检测; 结果受蒸发和吸附影响	[32]
机器视觉/喷洒图像识别	漏洒、条带、重叠、喷嘴堵塞	车载相机+标定板; 提取覆盖率、灰度均匀度和条带宽度	全幅连续; 可联动车速、泵压与喷嘴状态	需用称量法校准, 光照和基面颜色会干扰	[36] [39]
摊铺机载红外传感器条带	混合料温度、温度离析、碾压窗口	连续二维温度等值图, 定位冷点并实时反馈碾压	高速、全覆盖、实时	热均匀不等于压实合格, 应与压实/密度数据联合	[39]
被动红外热像	浅层脱粘、空鼓与异常含水区	利用昼夜热交换造成的表面温差; 异常区定向复核	非接触、车载/步行快速扫查	受太阳辐射、风速、日温差和检测时段影响; 主要适合浅层	[40]
3D GPR/叠加峰值比	层间空隙、含水与脱粘空间分布	界面反射幅值或 SPR 成像; 多通道天线进行车道级扫描	连续、高效率、可输出平面异常图	薄层信号易与表面波混叠, 必须用正常段与少量取芯标定	[41]

图 6 可用于快速确定技术路线: 推移滑移优先采用直剪/斜剪并联查高温、水平力和洒布量; 竖向脱层优先采用拉拔, 成层后的空间定位则采用 GPR、红外或冲击响应; 疲劳与反射裂缝应采用疲劳/断裂方法, 并同步审查增强层是否引入新的滑移界面。由此形成“先按病害锁定主导受力模式 - 再选择评价方法 - 最后回溯材料、界面、施工和环境因素”的诊断链。

7. 现有问题与发展趋势

(1) 现有问题: ① 评价方法不统一, 不同试验条件差异导致结果可比性不足, 单一强度参数难以全面表征粘结状态[3][8]; ② 对长期服役性能和强度衰减规律研究不足, 多数评价集中于室内短期强度[14][35]; ③ 材料选择与结构需求匹配关系不清晰, 工程中常依赖经验, 缺乏针对性设计; ④ 室内试验与

失效问题 / 评价方法	直 / 斜剪	拉拔	扭剪	疲劳断裂	温湿耐久	红外热像	3D GPR	冲击响应	主导影响因素
高温重载剪切推移、层间滑移	优先	补充	适用	适用	补充	补充	适用	适用	高温环境、制动水平剪力、粘结料洒布过量、碾压嵌锁不足
界面污染/积水引发竖向剥离、脱层空鼓	补充	优先	补充	补充	适用	优先	优先	适用	下承层粉尘油污、施工积水、乳化沥青破乳不完全、材料本征黏附性差
交叉口、匝道转向扭剪破坏	适用	补充	优先	适用	补充	补充	适用	补充	车辆转向扭矩、摊铺混合料温度偏低、界面构造深度不足
反复荷载疲劳损伤、反射裂缝扩展	适用	补充	补充	优先	适用	补充	适用	补充	长期往复交通荷载、界面微滑移累积损伤、材料抗疲劳性能弱
浸水、冻融循环造成粘结强度衰减	适用	适用	补充	适用	优先	补充	适用	补充	雨水水分侵入、周期性冻融、粘结层防水改性能力不足
长期服役温湿老化、界面性能持续劣化	适用	适用	补充	适用	优先	补充	适用	适用	多年温湿循环老化、持续行车荷载、粘结材料长期耐久性短板

注: 单元格分级标准: 优先(该病害首选核心评价手段); 适用(可开展辅助验证); 补充(仅作次要参考, 不可作为核心判定依据); 表格最右侧列为诱发对应失效问题的主导控制因素。

Figure 6. Problem-evaluation method-influencing factor association matrix

图 6. 问题 - 评价方法 - 影响因素关联矩阵

现场服役状态存在差距, 现场快速检测方法效率和标准尚不完善[29]; ⑤ 纤维增强及土工复合材料在抗裂与粘结之间存在协调问题, 可能引入脱粘效应[23] [24]。

(2) 发展趋势: ① 向“材料 - 结构 - 施工 - 环境”一体化研究发展, 结合数值模拟明确不同场景下的界面强度阈值[31] [35] [42]; ② 材料高性能化、复合化和绿色化, 发展改性乳化沥青、橡胶沥青、环氧沥青、低毒溶剂型及纳米改性材料, 重点关注长期耐久性和工程经济性[25] [26]; ③ 建立多指标综合评价体系, 加强室内结果与现场实测数据的相关性研究[8] [34]; ④ 发展智能化和精细化施工检测, 利用智能洒布、红外测温、图像识别及现场快速检测技术实现实时反馈控制; ⑤ 加强多因素耦合作用下性能衰减规律研究, 建立强度衰减模型和寿命预测方法, 为养护决策提供科学依据。

8. 结论

(1) 层间粘结是保障超薄磨耗层长期服役性能的关键。其作用机理包括材料黏附、机械嵌锁、受力协同和防水封闭四个方面。良好的粘结可增强整体性、提高荷载传递效率、降低滑移、脱层和水损害风险。

(2) 粘结材料类型多样, 不同材料的性能差异显著。普通乳化沥青适用于一般路段; 改性乳化沥青综合性能更优, 是较为常用的材料; 橡胶沥青和碎石封层适用于防水抗裂需求; 环氧及树脂类适用于高剪切场景; 纤维增强材料需关注抗剪削弱问题。

(3) 层间粘结性能评价应采用多指标综合方法, 结合抗剪、拉拔、扭剪、疲劳、环境耐久性试验及现场检测和数值模拟等手段, 针对特殊场景增加针对性指标。

(4) 粘结性能受材料类型、洒布量、表面纹理与清洁度、温度水分、荷载条件、施工工艺、下承层类型及老化等多因素共同影响, 控制策略应从单一材料转向系统控制。

(5) 材料选择应遵循工程适配原则, 一般路段可采用普通或改性乳化沥青, 高剪切路段选用高温抗剪性能更好的材料, 排水磨耗层和桥面铺装重点关注防水粘结连续性, 抗裂增强材料需同步校核抗剪性能。

(6) 施工质量控制应围绕残留洒布量、横向均匀性、破乳状态、混合料温度和碾压窗口建立量化闭环。现有试验表明, 低温、未充分破乳、过量洒布及水膜均可显著削弱层间粘结; 工程应用中应通过试验手段确定项目阈值, 并采用称量、机器视觉和红外温度图实现过程全覆盖控制。

(7) 现场评价宜采用“红外/GPR/冲击响应无损筛查 - 异常区定向取芯 - 剪切/拉拔标定”的分级模式; 材料优选则可借助多维性能雷达图和问题 - 方法 - 因素矩阵, 避免以单一初始强度替代场景适配性与长期耐久性。未来需建立不同设备输出与界面强度、病害概率和寿命衰减之间的统一标定关系。

基金项目

江西省交通运输厅科技项目(项目编号: 2025YB046): 冷拌冷铺全玄武岩长效超粘磨耗层技术研究与应用。

参考文献

- [1] 徐鸥明, 曹志飞, 李明月, 等. 超薄罩面沥青混凝土应用与发展综述[J]. 中国科技论文, 2020, 15(4): 425-431.
- [2] 朱洪洲, 朱真景. 沥青路面层间结合状态对路面受力状态的影响综述[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 69-75.
- [3] Raposeiras, A.C., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A. and Rodriguez-Hernandez, J. (2013) Test Methods and Influential Factors for Analysis of Bonding between Bituminous Pavement Layers. *Construction and Building Materials*, **43**, 372-381. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.011>
- [4] Somé, S.C., Feeser, A., Jaoua, M. and Le Corre, T. (2020) Mechanical Characterization of Asphalt Mixes Inter-Layer Bonding Based on Reptation Theory. *Construction and Building Materials*, **242**, Article 118063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118063>
- [5] Hu, T., Zi, J., Li, J., Mao, L., Jin, S. and Zhou, W. (2017) Laboratory and Field Investigation of Interlayer Bonding between Asphalt Concrete Layer and Semi-Rigid Base Constructed by Using Continuous Construction Method. *Construction and Building Materials*, **150**, 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.011>
- [6] Xu, J., Li, N. and Xu, T. (2022) Temperature Changes of Interlaminar Bonding Layer in Different Seasons and Effects on Mechanical Properties of Asphalt Pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **15**, 589-605. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00039-9>
- [7] Middendorf, M., Kempf, D. and Böhm, S. (2023) Influence of the Application Method of Bitumen Emulsion on the Layer Bond. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **18**, 470-479. <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00357-0>
- [8] Yang, K., Li, R., Yu, Y. and Pei, J. (2021) Unified Laboratorial Evaluation of Interlayer Bond Property in Asphalt Pavements Based on Strength Parameters. *Construction and Building Materials*, **273**, Article 121738. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121738>
- [9] Raposeiras, A.C., Vega-Zamanillo, Á., Calzada-Pérez, M.Á. and Castro-Fresno, D. (2012) Influence of Surface Macro-Texture and Binder Dosage on the Adhesion between Bituminous Pavement Layers. *Construction and Building Materials*, **28**, 187-192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.029>
- [10] 李俊, 陆海珠, 李明亮. 温度和水分对多孔沥青路面层间粘结性能的影响[J]. 公路工程, 2021, 46(5): 144-148+155.
- [11] 王威娜, 徐青杰, 周圣雄, 等. 沥青-集料黏附作用评价方法综述[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2197-2205.
- [12] 罗志刚, 曾俊, 王随原. 界面污染对半刚性基层与沥青面层间粘结性能影响的试验研究[J]. 中外公路, 2011, 31(2): 47-50.
- [13] 裴旭东. 沥青面层与基层层间粘结强度和耐久性变化规律研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [14] 何锐, 武书华, 管勤, 等. 沥青路面层间粘结性能影响因素试验研究[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 272-276.
- [15] 刘国请. 良好的层间粘结剂——改性沥青乳液[J]. 公路, 1998(7): 48-50.
- [16] 徐磊. 基于高渗透乳化沥青的层间粘结研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [17] 段宝东, 李俊, 李明亮, 等. 基于层间粘结性能的排水沥青路面防水粘结层材料参数研究[J]. 公路工程, 2019, 44(2): 45-49+137.
- [18] 杨育生, 陈渊召, 汪日灯, 等. 沥青混合料桥面铺装层间工作状态确定及新型防水粘结材料研究[J]. 公路, 2009(4): 119-123.
- [19] 韦潇树. 环氧沥青钢桥面铺装结构层间粘结性能及影响试验研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [20] Wu, X., Xie, D., Chen, S., Ma, T., Huang, X. and Hu, Y. (2025) Formation, Failure Mechanisms, and Influencing Factors of Interlayer Bond Strength in Epoxy Asphalt Anti-Skid Sealing (EAS). *Construction and Building Materials*, **487**, Article 142043. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142043>
- [21] Ge, Z., Wang, H., Zhang, Q. and Xiong, C. (2015) Glass Fiber Reinforced Asphalt Membrane for Interlayer Bonding between Asphalt Overlay and Concrete Pavement. *Construction and Building Materials*, **101**, 918-925. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.145>

- [22] Spadoni, S., Ingrassia, L.P., Paoloni, G., Virgili, A. and Canestrari, F. (2021) Influence of Geocomposite Properties on the Crack Propagation and Interlayer Bonding of Asphalt Pavements. *Materials*, **14**, Article 5310. <https://doi.org/10.3390/ma14185310>
- [23] Khan, A.R., Goli, A., Ali, A., Mehta, Y. and Lein, W. (2024) Laboratory Cracking and Interlayer Bond Strength Performance Characterization of Full-Scale Accelerated Geosynthetic Reinforced Asphalt Concrete. *Construction and Building Materials*, **420**, Article 135628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135628>
- [24] 张祥瑞. 低毒溶剂型沥青基层间粘结材料研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [25] 周柳伶. 用于层间粘结的氧化石墨烯改性乳化沥青制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [26] 郑涛辉. 沥青路面装配式快速维修层间粘结材料试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(11): 182-184.
- [27] Somé, S.C. (2022) Effect of Tack Coat and Milk Lime on the Asphalt Mix Interlayer Bond Strength. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **15**, 1127-1138. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00077-3>
- [28] Komaragiri, S., Drimalas, T., Hazlett, D., Folliard, K. and Bhasin, A. (2024) An *In-Situ* Method to Evaluate the Interlayer Bond between Hot-Mix Asphalt and Portland Cement Concrete Surface. *Construction and Building Materials*, **411**, Article 134648. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134648>
- [29] 金思佳. 沥青混凝土桥面铺装层间粘结强度评价方法及指标研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [30] Gong, M., Zhang, H. and Wu, J. (2021) CZM Analysis and Evaluation of Influencing Factors on Interlayer Adhesion of Asphalt Mixture with Double-Layer Continuous Pave. *Construction and Building Materials*, **302**, Article 124211. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124211>
- [31] Hlupo, N.L. (2024) Mechanical Performance of Asphalt Pavement Considering the Degeneration Procedure of Interface Bonding. Master's Thesis, Yanshan University.
- [32] Raposeiras, A.C., Vega-Zamanillo, A., Calzada-Pérez, M.A. and Castro-Fresno, D. (2013) New Procedure to Control the Tack Coat Applied between Bituminous Pavement Layers. *Construction and Building Materials*, **44**, 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.004>
- [33] 陈明星. 沥青路面层间粘结检测方法及评价指标研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [34] Babiker, L.E.A., Jiang, X., Zhang, M., Cui, C., Lu, Y. and Qiu, Y. (2025) Comparisons of Asphalt Pavement Structure Interlayer Bonding Algorithms for Typical Computer Programs. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s42947-025-00663-9>
- [35] 周文, 陈志福, 熊志华, 等. 沥青混合料试件层间粘结剪切强度影响因素研究[J]. 中外公路, 2011, 31(6): 268-272.
- [36] Braham, A., Hicks, R.G. and Cheng, D. (2022) Proposed Guidance for the Construction of Slurry Seals, Scrub Seals, and Tack Coats: Part I—Research Report. National Cooperative Highway Research Program.
- [37] Chang, J.R., Chen, Y. and Lo, Y.Y. (2026) The Effect of Different Conditions on the Interlayer Bonding of Asphalt Tack Coat under Pipeline Construction. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, **30**, Article 100336. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2025.100336>
- [38] Alam, M.T. and Tarefder, R.A. (2026) Effects of Moisture Damage, and Temperature on Interface Shear Strength of an Asphalt Concrete. *Discover Civil Engineering*, **3**, Article No. 161. <https://doi.org/10.1007/s44290-026-00536-5>
- [39] Federal Highway Administration (2016) Tack Coat Best Practices. FHWA. Report No. FHWA-HIF-16-017. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/pubs/hif16017.pdf>
- [40] Vyas, V., Patil, V.J., Singh, A.P. and Anshuman, (2020) Debonding Detection in Asphalt Pavements Using Infrared Thermography. *Transportation Research Procedia*, **48**, 3850-3859. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.035>
- [41] Zou, L., Yi, L. and Sato, M. (2020) On the Use of Lateral Wave for the Interlayer Debonding Detecting in an Asphalt Airport Pavement Using a Multistatic GPR System. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **58**, 4215-4224. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2019.2961772>
- [42] Lu, Z., Feng, Z., Yao, D., Li, X., Jiao, X. and Zheng, K. (2021) Bonding Performance between Ultra-High Performance Concrete and Asphalt Pavement Layer. *Construction and Building Materials*, **312**, Article 125375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125375>