

# 水泥混凝土桥面铺装层间黏结性能研究综述

吕松涛<sup>1,2,3</sup>, 杨叮玲<sup>1,2,3\*</sup>, 鲁巍巍<sup>1,2,3</sup>, 段海辉<sup>1,2,3</sup>

(1. 长沙理工大学 交通学院, 湖南 长沙 410114; 2. 公路养护技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410114;  
3. 极端环境绿色长寿命道路工程全国重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为明确水泥混凝土桥面层间黏结性能对桥面铺装耐久性的影响, 该文系统梳理了提升层间黏结性能的技术方法、研究挑战及未来发展趋势, 综述了国内外桥面铺装层间黏结性能的研究进展。首先, 总结了现有桥面铺装层间黏结状态的表征模型与黏结失效模式, 剖析了层间黏结性能的影响因素及其作用机理; 其次, 探讨了层间黏结性能评价方法与指标, 指出当前方法的局限性; 最后, 归纳了层间黏结性能提升的有效措施, 并展望了未来研究方向。结果表明: 现行层间接触模型较简单, 难以准确表征复杂的层间黏结状态; 温度和层间界面粗糙度是影响层间黏结性能的关键因素; 现行的层间黏结性能评价方法多依赖破坏性剪切试验, 发展可重复的快速无损检测技术是重要趋势; 目前国内外尚无统一的层间黏结性能评价标准或规范, 各评价指标间一致性不足。建议将层间黏结性能评价纳入桥面铺装设计体系, 以提升桥面铺装耐久性并保障桥梁长期服役性能。

**关键词:** 桥面铺装; 层间黏结性能; 黏结失效; 界面粗糙度; 无损检测; 耐久性; 设计体系; 评价体系  
**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A

## Review of Study on Performance of Interlayer Bonding of Concrete Bridge Pavements

LYU Songtao<sup>1,2,3</sup>, YANG Dingling<sup>1,2,3\*</sup>, LU Weiwei<sup>1,2,3</sup>, DUAN Haihui<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Transportation, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. National Key Laboratory of Green and Long-Life Road Engineering in Extreme Environment, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** To clarify how interlayer bonding performance of cement concrete bridge decks affects the durability of bridge deck pavements and to identify the technical methods, research challenges, and future development trends for improving interlayer bonding performance, the research progress on the interlayer bonding performance of bridge deck pavements in China and abroad was reviewed. First, the characterization models and bond failure modes of the existing interlayer bonding state of bridge deck pavements were summarized, and the influencing factors of interlayer bonding performance and their working mechanisms were analyzed. Second, current evaluation methods and indices for interlayer bonding performance were discussed, and their limitations were pointed out. Finally, effective measures for improving interlayer bonding performance are outlined, and future research directions are proposed. The results show that the current interlayer contact models are relatively simple and have difficulty accurately characterizing complex interlayer bonding states. Temperature and interlayer interface roughness are the key factors affecting interlayer bonding performance. Existing interlayer bonding performance evaluation methods mostly rely on destructive shear tests, and the development of repeatable and rapid non-destructive testing technologies is an important trend. At present, there is no unified evaluation standard or specification for interlayer bonding performance at home and abroad, and the consistency among different evaluation indices is insufficient. It is recommended that the evaluation of interlayer bonding performance be incorporated into the bridge deck pavement design system to improve pavement durability and ensure the long-term service performance of bridges.

收稿日期: 2025-01-13 修回日期: 2025-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 52225806); 中电建路桥集团有限公司科技项目(编号: LQKY2022-02)

作者简介: 吕松涛, 男, 博士, 教授. E-mail: lst@csust.edu.cn

\*通信作者: 杨叮玲, 女, 硕士研究生. E-mail: yangdingling@stu.csust.edu.cn

**Keywords:** bridge deck pavement; interlayer bonding performance; bonding failure; interface roughness; non-destructive testing; durability; design system; evaluation system

## 0 引言

根据交通运输部发布的《2023年交通运输行业发展统计公报》,截至2023年底,中国公路总里程543.68万km,公路桥梁107.93万座/9528.82万延米。其中,水泥混凝土桥梁以强度高、耐久性突出的优势,在公路桥梁中占有较大比例。然而,中国公路建设正面临着交通量高、重载车辆多以及服役环境恶劣复杂的多重考验,使桥面层间滑移病害频发。相关研究表明,层间黏结性能不足是导致滑移病害的主要原因:良好的层间黏结可将交通荷载有效传递至下部结构,而层间黏结不良则会大大增加各层层底拉应力和应变,引发车辙、推移、拥包等早期病害,从而降低桥面耐久性和使用寿命,严重时破坏桥梁的整体结构<sup>[1-2]</sup>。因此,增强桥面铺装层间黏结性能,使层间趋向完全连续状态,是提升桥面服役质量和使用寿命的关键。

水泥混凝土桥面铺装结构通常采用“水泥混凝土桥面板+透层+防水黏结层+保护层+沥青混合料铺装层”多层式组合结构<sup>[3]</sup>,由于水泥混凝土和沥青混合料模量差异大,需通过防水黏结层提供层间黏结作用,连接桥面板和铺装层形成统一结构,共同承担车辆荷载。早在20世纪40年代,英国就意识到防水层的重要作用。随着桥梁工程的迅速发展,人们越来越重视桥面铺装技术的研究。20世纪70年代,美国国家公路合作研究计划从147种防水材料中筛选出最具前景的5种材料<sup>[4]</sup>,后续针对防水材料性能提出抗拉强度、抗高温、抗损害、抗渗性等评价试验。20世纪80年代后期,英国运输和道路研究所对防水黏结材料自身性能进行了较为深入的研究,发现防水材料在高温下易损坏,建议在防水黏结层上设置保护层。20世纪90年代,美国材料与试验协会在总结相关研究的基础上,编制了一套防水材料的试验标准,并制定评价指标及评价方法。1997年,中国《公路沥青路面设计规范》(JTJ 014—97)指出桥面铺装结构应当设置黏结层、防水层。国内外经过长期研究,证明了防水黏结层对桥梁质量和服役寿命的重要性。

国内外研究人员通常采用剪切强度、拉拔强度、扭剪强度、断裂能、刚度以及剪切疲劳寿命等定性指

标评价桥面铺装层间黏结性能<sup>[5]</sup>。研究多采用剪切强度、拉拔强度作为评价指标,这些指标变化比较显著,能够评估不同条件下的层间黏结性能。然而,桥面铺装层在服役期间,层间黏结强度和剪切强度受多种因素影响,包括温度、界面粗糙度、防水黏结层类型与用量、层间水、加载速率及外加荷载等。在层间黏结性能检测方面,国内外学者已开发多种检测方法,包括剪切试验、拉拔试验和扭剪试验等。其中,剪切试验因其破坏模式更接近桥面铺装结构实际层间破坏,得到广泛应用。此外,考虑到上述测试方法在现场测试中对桥面铺装存在破坏性,进一步开展了快速无损检测试验(Non-Destructive Tests, NDT)。但是,各类测试方法检测原理不同导致结果存在差异,且国内外尚无关于层间黏结评价的统一标准或规范。

为此,本文综述了国内外对水泥混凝土桥面铺装层间黏结性能的相关研究进展。首先总结了桥面铺装层间黏结状态的表征模型与黏结失效模式,分析了层间黏结状态描述模型表征复杂层间黏结状态存在的问题;随后,剖析了层间黏结性能的影响因素及其作用机理,并归纳了层间黏结性能评价方法与评价指标;最后,概述了层间黏结性能提升的有效措施,提出了层间黏结性能面临的挑战及未来发展趋势。

## 1 桥面铺装层间黏结机理与失效模式

### 1.1 层间黏结状态描述模型

现有路面结构设计方法普遍应用弹性层状体系理论<sup>[6]</sup>,假定各结构层层间黏结状态为完全连续,但实际层间黏结状态并不能处于完全连续和完全光滑等理想接触状态<sup>[7]</sup>,而是介于两种状态之间。如何通过定量定性描述指标搭建理论基础与试验结果之间的桥梁显得尤为重要。因此,亟须建立能精准刻画层间黏结的半连续半光滑状态的模型。表1总结了目前国内外层间黏结状态描述模型分类及其表征指标和特点。当前研究主要采用黏结系数模型、摩擦系数模型和剪切弹性柔量等,尽管各模型的表征指标以及表征指标对层间黏结状态的界定不同,但均以单个参数作为表征指标,能够简单有效地表征层间黏结状态。

表1 层间接触模型

Table 1 Interlayer contact models

| 分类   | 模型          | 表征指标      | 特点            |
|------|-------------|-----------|---------------|
| 主要模型 | 黏结系数模型      | $K$       | 理论上可行,实际位移值难求 |
|      | 摩擦系数模型      | $\mu$     | 直观,大多应用在数值模拟中 |
|      | 剪切弹性柔量      | $K_{AK}$  | 便捷,大多应用在数值模拟中 |
|      | 夹层模型        | 模量        | 模型考虑不全面       |
|      | 黏结层失效系数     | $R_{TFR}$ | 未上升到理论层面      |
| 其他模型 | 层间黏结百分率     | $\beta$   | 黏结系数模型的推广应用   |
|      | 线性弹簧模型      | 柔度系数      | 弱黏结系数确定不够准确   |
|      | 部分连续双层梁力学模型 | 层间接触系数    | 需通过试验结果推导     |

### 1.1.1 黏结系数模型

经典古德曼(Goodman)力学模型<sup>[8]</sup>认为在多层沥青路面结构体系中上层与下层之间发生的相对位移与层间剪应力线性相关,如公式(1)和图1所示。

$$\tau = K\Delta u \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为层间界面处的剪应力; $K$ 为层间抗剪模量或层间黏结系数; $\Delta u$ 为层间界面处的相对位移。

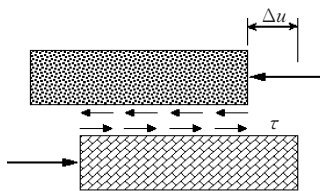


图1 古德曼模型

Figure 1 Goodman model

黏结系数模型以古德曼力学模型为基础,采用 $K$ 定义层间接触状态, $K$ 值越大,表明层间结合越佳,层间黏结性能越好, $K=0$ 说明层间完全光滑, $K \rightarrow \infty$ 说明层间完全连续。Uzan等<sup>[9]</sup>基于此模型发现当层间黏附力增加,层间界面从完全光滑逐渐变成完全连续时,层底的径向拉应变会逐渐降低,并从拉应变变成压应变,表明路面结构应力应变的分布受到层间接触状态的显著影响。Al Hakim<sup>[10]</sup>发现当 $K$ 接近 $1 \times 10^4 \text{ MN/m}^3$ 时,路面寿命缩短20%,完全脱黏时,路面寿命甚至缩短到50%。关昌余等<sup>[11]</sup>在此基础上

进一步扩展,提出多层弹性体的层间接触条件:

$$\tau_{zri} = \tau_{zri+1} = K_i(u_{i+1} - u_i) \quad (2)$$

式中: $\tau_{zri}$ 、 $\tau_{zri+1}$ 分别为第 $i$ 个层间接触面上、下两层之间的剪应力; $u_i$ 、 $u_{i+1}$ 分别为同一点上、下两层位移值; $K_i$ 为层间抗剪模量。

根据上述分析,黏结系数模型在理论上是可行的,层间黏结系数的变化能够反映层间黏结状态和应力分布的转变,但由于不同剪切设备之间存在差异,使用单一设备难以精准测量出真实位移,且不同设备测量相同黏结状态的桥面铺装结构时,可能出现不同位移值,层间黏结系数模型难以准确评价,在实际工程中应用困难,需进一步改进和完善。

### 1.1.2 摩擦系数模型

摩擦系数模型以摩尔库仑定律为基础,定义层间接触界面的作用为垂直接触面的法向作用和平行于接触面的切向作用,采用摩擦系数 $\mu$ 的大小表征摩擦作用的强弱。当切向剪应力等于或超过其极限剪应力值时,层间会发生相对滑动。

$$\tau_{lim} = \mu P + b \quad (3)$$

$$|\tau| \leq \tau_{lim} \quad (4)$$

式中: $\tau_{lim}$ 为极限剪应力; $\mu$ 为摩擦系数,在0~1之间取值; $P$ 为法向接触压力; $b$ 为接触黏聚力,可通过试验获得; $\tau$ 为等效剪应力。

研究人员主要采用Abaqus、Ansys等有限元软件的应用摩擦系数模型,通过罚函数公式,设置结构层之间的摩擦系数,模拟不完全连续的层间接触状态。包龙生等<sup>[12]</sup>通过Abaqus中的罚函数定义桥面铺装的层间切向接触,设置摩擦系数在0~1之间变化,发现摩擦系数增加有利于应力从上层传递到下层,相比连续模型,接触模型更贴近桥面实际工作状态。摩擦系数能够比较容易地在有限元软件中定义,不同 $\mu$ 值的大小即可表示不同强弱的摩擦作用,不同层位之间也可设置不同的 $\mu$ 值,有限元模型越接近实际服役情况,越能够有效分析桥面结构力学响应,越能准确预测桥面开裂、车辙等病害的发生,及时进行养护。这种模型不仅简化了摩擦系数的计算过程,而且提高了分析的准确性和可靠性,故应用较为广泛,在桥面铺装结构设计中更为合理。

### 1.1.3 剪切弹性柔量

壳牌公司(Shell)基于弹性层状体系研发了沥青路面设计软件Bisar 3.0,用于计算不同层间接触状态的路面力学响应,其设计者引入了弹性剪切柔量,以

说明层间完全或部分滑动问题,弹性柔量表示强度,分为标准弹性剪切柔量 $K_{AK}$ 和简化弹性剪切柔量 $K_{ALK}$ , $K_{AK}$ 和 $K_{ALK}$ 之间可以相互转换。

$$K_{AK} = \frac{\text{层间相对水平位移}}{\text{表面应力}} \quad (\text{m}^3/\text{N}) \quad (5)$$

$$K_{AK} = K_{ALK} \cdot \frac{1 + \nu}{E} \quad (6)$$

$$K_{ALK} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot r \quad (7)$$

式中: $\nu$ 为剪切面上层结构的泊松比; $E$ 为弹性模量; $\alpha$ 为摩擦参数; $r$ 为荷载半径。

当 $K_{ALK} = 0$ , $\alpha = 0$ ,层间处于完全连续状态;当 $K_{ALK} = 100r$ , $\alpha = 0.99$ ,层间可以看作完全滑动。摩擦参数 $\alpha$ 不是经典的摩擦系数,它与施加荷载的直径有关。Nian等<sup>[13]</sup>分析了不同接触状态下不同因素对三维沥青路面抗剪强度的影响,通过摩擦参数和荷载半径设置 $K_{AK}$ 或 $K_{ALK}$ 的取值,从而表征层间完全连续、完全光滑、半连续半光滑3种层间接触状态,结果表明:从完全连续到完全光滑,最大剪应力值逐渐增大。与摩擦系数模型类似,剪切弹性柔量能够以数值表征层间黏结状态,主要应用于Bisar软件,模拟层间接触半黏结状态,但Bisar局限于静力作用下路面结构的力学响应,不能模拟动载作用下路面不同层间接触状态下的力学响应。

#### 1.1.4 其他模型

Kruntcheva等<sup>[14]</sup>通过有限元二维模型,在面层和黏结层之间建立了一个厚5 mm、完全连续且具有弹性材料特性的软夹层,模拟层间部分黏结,当软夹层模量超过100 MPa时,其力学参数与完全连续状态下的结果没有显著差异,由此认为层间半连续半滑动状态能够以5 mm的软夹层和模量小于100 MPa来模拟,进而研究其路用性能。但夹层模型应用并不广泛,它仅考虑了界面法向刚度的影响,忽略了界面切向刚度。

李东华等<sup>[15]</sup>提出了黏结层失效系数 $R_{TFR}$ ,即上层沥青层的估算模量与下层沥青层的估算模量的比值, $R_{TFR} = 1$ 表示层间完全连续; $R_{TFR} = 0$ 表示层间完全光滑。值得注意的是,该研究的前提是两结构层材料为同一种,不同结构组合的滑移效果与 $R_{TFR}$ 的相关方程不同。

冯德成等<sup>[16]</sup>引入了层间黏结百分率 $\beta$ 来评价设计指标反映的层间黏性。

$$\beta = \frac{\lambda_k - \lambda_s}{\lambda_c - \lambda_s} \quad (8)$$

式中: $\lambda_k$ 为层间黏结系数不同时计算所得的设计指标值; $\lambda_s$ 、 $\lambda_c$ 分别为路面面层与基层间完全滑动和连续状态下计算所得的路面设计指标值。

梅朔华<sup>[17]</sup>应用线性弹簧模型描述层间弱黏结状态,用柔度系数表示,其值增大表明上层与下层之间滑移性增大,趋向于完全光滑。

万晨光等<sup>[18]</sup>基于部分连续双层梁力学模型推导出层间接触系数 $\beta$ 的表达式,双层梁弯曲试验测出抗弯刚度可计算出 $\beta$ ,将其作为评价指标。测算不同沥青洒布量及层间处理方式下的双层梁, $\beta$ 能够反映不同的层间接触状态。

上述模型均能说明层间接触状态的变化显著影响桥面铺装力学响应,但仅用1个参数值的变化表征复杂的层间相互作用仍有所欠缺,需要更精准地确立层间黏结状态表征模型。

### 1.2 层间黏结失效模式

根据断裂力学基本理论,层间破坏形式可参考裂缝扩展模式<sup>[5]</sup>,按照破坏的外部形式进行分类。层间黏结失效模式如图2所示,分为以下3种类型:剪切破坏、拉拔破坏及剪切和拉拔混合破坏,其中剪切破坏为主要破坏<sup>[19]</sup>。

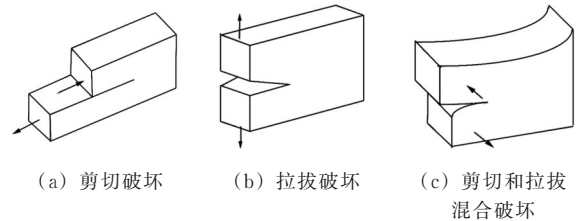


图2 层间黏结失效模式<sup>[5]</sup>

Figure 2 Interlayer bonding failure modes<sup>[5]</sup>

#### 1.2.1 剪切破坏

层间剪切破坏是指在交通荷载和温度作用下,铺装层和桥面板之间发生水平方向上的相对滑动位移。在桥面铺装结构设计中,考虑到剪切破坏,提出以抗剪强度为设计指标,铺装层、桥面板及铺装层间可能产生的最大层间剪应力应当小于黏结层容许剪应力,其计算公式如下:

$$\tau_m \leq \tau_R = \frac{\tau_s}{K_r} \quad (9)$$

式中: $\tau_m$ 为桥面铺装层间最大剪应力; $\tau_R$ 为设计年限内,桥面铺装黏结层容许最大剪应力; $\tau_s$ 为试验得到的极限层间抗剪强度; $K_r$ 为层间抗剪强度结构系数。

桥面发生剪切破坏的诱因众多,但究其原因还是层间剪应力过大,超出了其容许范围。车辆行驶过程中,桥面产生的剪应力受车辆荷载和制动力系数的影响。一般匀速行驶过程中,水平荷载较小可忽略不计。但在一些特殊路段,高速公路上下坡处、收费站、市政道路交叉口、停车场和其他车辆行驶缓慢的地方,车辆容易发生制动,制动力系数最大可达0.5,施加给路面的水平力过大,路面更容易发生滑移、脱层等病害。

根据摩尔库仑定律,层间抗剪强度由黏结力和摩擦力共同组成,黏结力主要由黏结材料本身黏度以及沥青和集料之间的黏附力提供,仅受黏结材料类型和混合料级配影响;摩擦力则主要由沥青上层集料和混凝土下层集料之间的摩擦和嵌锁作用产生,层间界面越粗糙提供的摩擦力越大,抗剪强度也越大。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (10)$$

式中: $\tau$ 为桥面层间剪应力; $c$ 为层间黏聚力; $\sigma$ 为外界荷载正应力; $\varphi$ 为内摩擦角。

### 1.2.2 拉拔破坏

拉拔破坏是指铺装层和桥面板在外部荷载作用下上层与下层间的黏结位置在垂直方向上发生断裂分离现象。基于此,李嘉等<sup>[20]</sup>提出以拉拔强度表征抗掀起能力。

$$\sigma_{i, \max} \leq [\sigma_1]_d = \frac{\sigma_s}{K_s} \quad (11)$$

式中: $\sigma_{i, \max}$ 为桥面铺装层间最大拉应力; $[\sigma_1]_d$ 为设计年限内,桥面铺装黏结层容许最大拉应力; $\sigma_s$ 为试验得到的极限层间拉拔强度; $K_s$ 为层间抗拉强度结构系数。

从桥面发生拉拔破坏的角度出发,主要通过拉拔试验测试层间黏结性能。虽然剪切破坏较拉拔破坏更为频发,但在现场测试中,拉拔试验最简便快捷,因此在桥面质量验收中,拉拔试验较为常用。

### 1.2.3 剪切和拉拔混合破坏

当车辆荷载施加在桥面上时,沥青铺装层直接接触,处于受压状态,桥面板受层底拉应力作用,上下结构层应力状态不同,上层与下层之间存在能量差值,导致层间界面发生扭曲,即发生剪切和拉拔混合破坏,在实际工程中这种破坏现象少见<sup>[21]</sup>。

## 2 桥面铺装层间黏结性能影响因素

### 2.1 黏结层自身性能

防水黏结层能够增强桥面铺装的层间黏结,但受诸多因素影响,如防水黏结层材料类型、用量、养

护时间和老化时间等。

#### 2.1.1 黏结层材料类型

防水黏结层的性能直接影响桥面铺装的整体质量<sup>[22]</sup>。防水黏结层分为薄膜类、卷材类和结构类。实际工程中,常用沥青类、高聚物改性沥青类、合成高分子/反应型类,并搭配同步碎石封层使用<sup>[23]</sup>。国外最早使用阳离子乳液,但由于乳化沥青黏结力低、温度敏感性高,研究人员添加水性环氧树脂改性乳化沥青以提高黏附作用<sup>[24]</sup>。研究表明<sup>[25]</sup>,随着树脂含量的增加,层间黏结强度逐渐提升。Kong等<sup>[26]</sup>指出,水性环氧树脂能在乳化沥青中形成蜂窝网状结构,多孔结构相互交联吸附沥青,增强胶结料的抗剪切性能。针对黏层油的影响机制,Hou等<sup>[27]</sup>制备了一种不黏轮黏层油(Trackless Tack Coat Material, TTCM),发现当TTCM加热至温度超过Sasobit合成蜡熔点时,树脂和沥青质成分中的氢键减少,影响沥青质在沥青中的分散,导致黏度下降。冷却后,Sasobit合成蜡会重新结晶,增强摩擦力和分子的可见度,使沥青层黏附牢固。

不同类型的防水黏结层材料对层间黏结性能的提升效果存在差异。Ge等<sup>[28]</sup>对比了改性乳化沥青、改性沥青、玻璃纤维增强改性乳化沥青和玻璃纤维增强改性沥青对层间黏结性能的影响,结果表明,使用玻璃纤维增强改性沥青时,层间黏结性能最佳,测得其剪切韧性较大、疲劳寿命较长;Covey等<sup>[29]</sup>选用6种阳离子乳液CSS-1H进行流变性能试验,研究流变性能对层间剪切强度的影响,发现黏度越高的乳液,软化点也越高,渗透能力越弱,层间抗剪强度随着黏层油的旋转黏度、软化点、车辙因子的增加而增加;万晨光等<sup>[30]</sup>基于混合型多指标灰靶决策模型对4种防水黏结层材料的综合性能进行优选,测得SBS改性沥青综合性能最优,其抗疲劳性能也最优,SBR改性乳化沥青性能最差。

#### 2.1.2 黏层油用量

关于黏层油用量对黏结性能的影响已有大量研究。Ali等<sup>[31]</sup>测试了3种材料、5种黏层油涂抹量的抗剪强度,发现抗剪强度均随着黏层油涂抹量先升高再降低,说明黏层油存在最佳用量,最佳用量下的剪切强度最大,测得RC-70、RC-250和CSS-1的最佳用量分别为0.1 L/m<sup>2</sup>、0.2 L/m<sup>2</sup>和0.3 L/m<sup>2</sup>。究其原因,黏层油用量不足,会导致黏层油分布不均匀,层间结合不充分,进而不能提供足够的黏结强度以抵抗外力作用;而随着用量逐渐增加,超过了最佳用量,会起到润

滑作用,造成层间滑移,黏附强度降低<sup>[32]</sup>。

图3为国内外不同研究人员提出的黏层油最佳用量。由图3可知:黏层油最佳用量最高可达 $1.7\text{ kg/m}^2$ ,最低可至 $0.5\text{ kg/m}^2$ 左右。

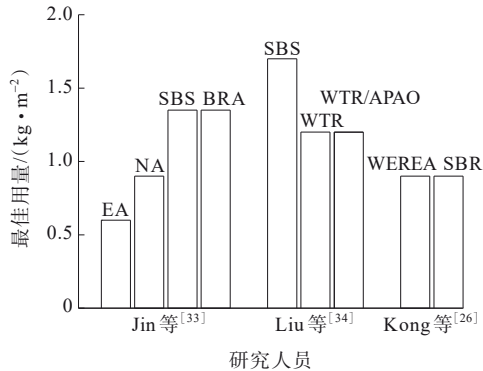


图3 不同黏层油最佳用量<sup>[26,33-34]</sup>

Figure 3 Optimum application rates of different tack coats<sup>[26,33-34]</sup>

Kong 等<sup>[26]</sup>的研究表明:水性环氧树脂改性沥青中,水性环氧树脂的增加,不影响黏层油最佳用量,但能够提高最佳用量下的抗剪强度和抗拉强度。黏层油的最佳用量并非固定,而与其他因素有关,如层间界面处理工艺、温度、黏结材料类型等;Jin 等<sup>[33]</sup>发现随着水泥混凝土板表面纹理的增加,黏层油最佳用量降低,而剪切强度提高。在不同条件下,中等温度下,黏层油用量对剪切强度起重要作用;较高温度下,由于高温对黏层油的影响,用量变化不再引起剪切强度的变化。

### 2.1.3 黏结层养护时间

黏结层养护时间<sup>[35]</sup>是指在黏结层施工完毕后,不能立即摊铺沥青层,此时的黏结层还未完全干燥,无法形成足够的黏结力<sup>[36]</sup>,需要给予黏结层一定时间。尤其是乳化沥青作为黏结材料,存在破乳时间,须在破乳完成后施工。不同类型黏结材料的固化时间不同,乳化沥青根据固化时间可分为速凝型、中凝型及慢凝型。一般施工中,偏向使用速凝型,能够节省施工时间,尽早通车。选择合适的铺筑时机,保证黏结层养护时间,能够促进沥青铺装层与桥面板层间黏结充分。Chen 等<sup>[35]</sup>和 Destrée 等<sup>[37]</sup>发现不同固化时间对黏结性能影响不大;Abouelsaad 等<sup>[38]</sup>指出温度较高时固化反应更快、固化时间更短,所有乳液在 $0.5\sim 1.0\text{ h}$ 完全或接近完全固化,而黏结强度主要取决于乳化沥青蒸发残留物含量和残留物性质。

### 2.1.4 黏结层老化

材料在受到热、光、氧等外界环境影响时,易发生老化,但黏层不直接受太阳辐射,老化对层间黏结性能的影响机理还存在疑问。Raab<sup>[39]</sup>针对沥青路面长期黏结性能开展了研究,指出交通造成的沉降和压实对黏结性能有积极影响;牟压强等<sup>[40]</sup>研究了黏结材料老化的影响,发现环氧沥青老化后黏结性能有所提升,而 SBS 改性沥青老化后性能显著下降,尤其是拉拔强度,其原因在于老化使环氧沥青进一步固化,降低了 SBS 沥青中的沥青质。

## 2.2 层间界面状况

层间界面是传递荷载的关键区域,与桥面铺装服役性能密切相关,研究人员针对层间水的存在、界面粗糙程度和污染情况等方面开展了相关研究。

### 2.2.1 层间水

水在层间界面会产生浸泡和冻融两种作用。在雨水天气时,水会不可避免地通过路面孔隙进入路表,在车辆荷载的反复作用下对桥面板进行挤压和泵吸作用,导致层间黏结力降低。桥面长期处于浸泡状态时,会降低沥青类防水黏结层与集料之间的黏附力。魏柱<sup>[41]</sup>发现浸水会降低层间抗剪强度的黏聚力和摩阻角,由于层间水分有润滑作用能够降低层间摩擦作用,浸水时的层间抗剪强度比无水时降低了 $9.8\%\sim 38.5\%$ ,其降低幅度会随着温度的升高而增大,但高温的影响比浸水更加显著。而在冰雪天气时,桥面层间的积水在温度下降时逐渐结冰,在温度上升时又逐渐融化,反复的冻融循环严重破坏桥面铺装的层间黏结,进而导致疲劳寿命的降低;You 等<sup>[42]</sup>研究了冻融循环对碎石封层耐久性的影响,发现不同材料层间黏结强度损失均大于 $40\%$ ,冻融循环的影响尤其显著,且随着循环次数的增加,层间黏结强度逐渐降低。还指出较少的空隙会减少因冻融循环期间空隙的冰膨胀造成的微观结构损伤,故细集料受冻融循环的影响比粗集料小。考虑到行车荷载作用下层间水的影响,黄明星等<sup>[43]</sup>模拟了不同水损条件下防水黏结层的拉拔强度和剪切强度,认为符合桥面实际服役情况的动水+浸泡对层间强度的削弱最强,推荐该条件用来评价防水黏结层的水稳定性。综合上述含水条件下层间黏结性能的变化,应当注意层间水的作用。

### 2.2.2 层间界面粗糙度

层间界面粗糙度是影响桥面铺装结构受力情况的重要因素之一,合适的粗糙度能够提高桥面层间

抗剪强度和拉拔强度。研究表明,水泥混凝土界面处理工艺(拉毛、刻槽、凿毛、抛丸、铣刨)能够消除桥面板表面浮浆,导致粗糙度发生显著差异<sup>[44]</sup>,进一步促进桥面板和铺装层之间的层间结合。研究人员通常采用2D/3D灰度值、摩擦系数和构造深度等指标来评价层间界面粗糙度。

Huang等<sup>[45]</sup>使用三维激光扫描仪研究6种路面结构的3D层间界面,发现算术平均曲率、偏斜度、均方根在99.9%置信区间对黏层破坏率的影响最为显著,这些参数可用于描述沥青路面层间黏结状态;Tang等<sup>[46]</sup>从界面粗糙度的角度出发,研究层间黏结性能,发现界面粗糙度参数(界面粗糙度、方形维数)与剪切强度线性正相关,随着表面粗糙度的增加,沥青最佳用量也增加,这是因为界面粗糙度越大,界面面积越大,消耗的黏性材料越多。不同界面类型的剪切强度也存在差异,如图4所示。任万艳等<sup>[47]</sup>通过对比不同层间界面类型来研究水泥混凝土桥面铺装层间抗剪性能,发现植石界面的内摩擦角和内聚力大于刻槽、毛面和光面,抗剪强度由丰富的表面纹理提供,具有良好的抗剪耐久性;党静<sup>[48]</sup>研究了不同界面处理方式对剪切强度和拉拔强度的影响,结果表明:与不处理相比,精铣刨的剪切强度提高了65.9%,拉拔强度提高了90.8%,但随着温度的升高,剪切强度和拉拔强度呈现出下降的趋势,综合考虑各因素影响程度为:温度>粗糙度>防水黏结材料。

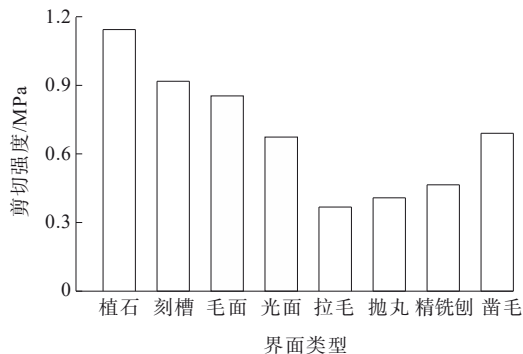


图4 不同界面类型下的剪切强度<sup>[34,47-48]</sup>

Figure 4 Shear strength under different interface types<sup>[34,47-48]</sup>

### 2.2.3 层间污染

层间污染源主要包括泥土、灰尘、油污等,层间界面一旦受到污染,将造成黏结不充分,引起桥面出现滑移、脱层等病害。

#### (1) 泥土

泥土污染主要来源于车辆轮胎,泥土对层间黏结状态的影响存在两种情况:无黏性的干土颗粒会

分散在层间黏结界面上,阻碍上下两层的黏结,在车辆荷载的作用下,层间摩擦力从静摩擦变成滑动摩擦;泥土遇水后变成泥浆,有一定润滑作用,导致路面层间黏结状态从完全连续变为半连续半光滑甚至完全光滑,加快层间破坏的速度。田荣燕等<sup>[49]</sup>发现泥土污染量越大,层间抗剪强度和拉拔强度越小,层间保持洁净有利于路面的层间整体性。

#### (2) 灰尘

由于天气原因和施工人员的影响,灰尘会裹入黏结材料中,降低黏附性。陈旭丹等<sup>[50]</sup>在黏结层表面上撒布一定量的矿粉,模拟灰尘对层间黏结的影响,指出灰尘对层间黏结性能有一定的削弱。

#### (3) 油污

油污主要为柴油和机油,来源于施工过程中,车辆或施工机械设备出现漏油。柴油和沥青的化学成分相似,主要为饱和烃,具有很强的渗透力和溶解力,能够溶解沥青;当柴油进入层间界面时,沥青的轻质油分含量增加,沥青质含量降低,导致沥青黏度降低。此外,机油在车辆荷载的作用下,在层间还会起到润滑作用,使层间黏结性能显著降低。艾长发等<sup>[51]</sup>指出水污染和土污染是影响层间黏结性能的不显著因素,但油污污染环境下的层间剪切强度明显降低。

因此,实际工程施工中,应当注意防范泥土、灰尘和机油对层间界面的污染,保持层间干燥、干净。

## 2.3 荷载条件

在剪切或拉拔试验中,除试件和黏层油会影响试验结果外,试验荷载条件也会对试验结果产生显著影响,主要包括温度荷载、行车荷载等。

### 2.3.1 温度

温度是影响层间黏结性能的重要因素。防水黏结材料大多是沥青类材料,沥青的温度敏感性高,室内试验能控制温度,但服役环境中温度变化大,不同地区的平均温度和温差有很大差异,温度的突变会影响黏结材料的性能。如图5所示,大量研究表明,当温度升高时,层间剪切强度和拉拔强度均呈下降趋势。由于黏层油在高温下会逐渐软化,提供的黏结作用减弱,抵抗剪切破坏的能力降低,导致夏季频繁出现层间剪切破坏和层间剪切疲劳破坏。此外,由于材料性质的差异,在温度作用下桥面铺装结构内部会产生温度应力,引起收缩膨胀变形,导致温度裂缝形成;Gong等<sup>[52]</sup>利用三维有限元研究复杂服役条件下的桥面铺装力学响应,发现在低温场下,桥面易出现拉应力集中,引发裂缝类病害,而在高温场

下,拉应力逐渐扩散均匀,应力集中现象减少,但高温会增大桥面的挠度,引发碾压密实型车辙。

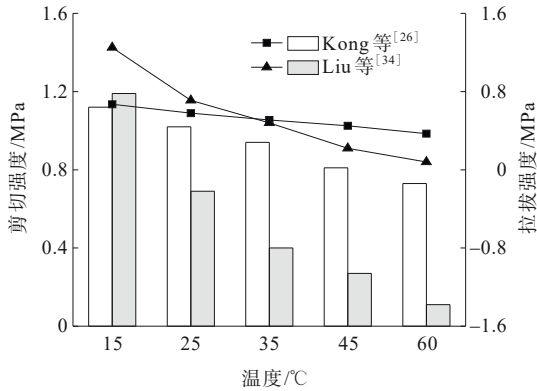


图5 不同温度下的剪切强度和拉拔强度<sup>[26,34]</sup>

Figure 5 Shear strength and pull-off strength at different temperatures<sup>[26,34]</sup>

根据相关研究,在桥面铺装层间黏结性能的众多影响因素中,温度对其影响程度最大。无论是制样方式不同,还是原材料不同,层间剪切强度和拉拔强度都会随着温度的升高逐渐降低。孔令云等<sup>[53]</sup>研究了温度和粗糙度的耦合作用对层间拉拔强度的影响,结果表明:20~28℃时,温度每升高1℃相当于每下降一个粗糙度当量值引起的拉拔强度变化,30℃以上粗糙度对层间拉拔强度不再产生影响。温度超过一定范围后,层间黏结性能主要由黏结材料的自身黏结性质决定,其他因素对其影响不显著。此外,温度对不同加载试验结果的影响程度也不同;颜可珍等<sup>[54]</sup>开展了不同温度条件下的拉拔试验、直剪试验和斜剪试验,发现直剪强度的温度敏感性高于拉拔强度和斜剪强度,这是因为沥青材料提供了黏结作用和抗剪作用,而斜剪试验中摩阻力占比高。

### 2.3.2 加载速率

剪切和拉拔试验的加载速率一般为0~50 mm/min。剪切试验的加载速率可与行车速度进行换算,以评估行车速度对层间黏结性能的影响。张占军<sup>[55]</sup>通过轮载作用时间及荷载作用下的相对位移将车速换算成剪切速率,数据回归分析发现剪切速率与黏聚力呈幂函数关系增加,剪切速率仅影响黏聚力。剪切速率较大时,试件受力时间较短,黏结材料表现出弹性,反之表现出塑性;曹明明等<sup>[56]</sup>发现斜剪试验测得的层间剪切强度与加载速率近似线性相关,拟合曲线的斜率能够评价层间剪切强度对剪切速率的敏感程度;李萍等<sup>[57]</sup>和牟压强等<sup>[40]</sup>都认为剪切速率较高

会导致试件受到外力作用产生层间破坏或开裂,测得剪切强度较大,剪切速率较低,外力作用导致的层间破坏或开裂得以充分发展,因此试件剪切强度降低;Liu等<sup>[58]</sup>分析了旧水泥路面沥青加铺层层间界面黏结破坏,发现不论黏层油种类如何,拉拔速率增加时拉拔强度均呈线性增加,但增幅不明显。其影响程度低,无实际意义,不能反映桥面服役过程中的实际工作状态,研究层间黏结性能时一般不考虑拉拔速率的影响。

### 2.3.3 法向荷载

在施加垂直荷载的剪切试验中,垂直荷载等效于车辆载重对层间黏结性能的影响。随着交通量的持续增长,路面超载超限的占比也逐年上升,超载会影响路面结构的应力应变分布,特别是在重载车辆的紧急制动作用下。超载导致桥面铺装各结构层的拉应力和剪应力大幅增加,桥面铺装内部出现应力集中,桥面板与铺装层之间的黏结界面易发生剪切破坏。压-直剪试验结果显示,在竖向荷载作用下,层间抗剪强度随着竖向荷载的增加而提高。其原因在于,竖向荷载在一定范围内,其抗剪强度满足摩尔库仑定律,垂直荷载越大,层间接触面所提供的摩擦力也越大,而同一黏结材料产生的黏结力是相等的,故抗剪强度也越大。

### 2.3.4 切向荷载

为研究层间黏结的法向作用,研究人员提出切-拉拔试验,即在拉拔试验的基础上沿水平方向施加切向荷载,以此模拟车辆制动力的作用。拉拔试验测试的是层间黏结力,切-拉拔试验测试的是路面在车辆荷载作用下层间结合部位整体不脱离能力。刘红坡等<sup>[59]</sup>设计了施加水平荷载的切-拉拔试验,发现同一温度下随着水平推力的增加,层间黏结强度逐渐降低,且温度越高,水平推力对黏结强度的影响越大。若是两者综合作用,黏结强度降幅更大。

## 3 桥面铺装层间黏结性能检测方法 with 评价指标

### 3.1 破坏性试验

研究人员针对不同应用场景(室内和现场)已开发多种测试方法及设备用于检测层间黏结性能,可分为破坏性试验和非破坏性试验。

#### 3.1.1 剪切试验

目前,剪切试验是测试层间黏结性能最常用的方法。表2列出了剪切试验的分类和代表性设备,剪

剪切试验可分为直剪试验和斜剪试验,直剪试验根据外加荷载分为无侧限直剪和有侧限直剪试验,其设备示意图如图 6 所示。

表 2 剪切试验设备分类<sup>[60-70]</sup>

Table 2 Classification of shear testing devices<sup>[60-70]</sup>

| 分类      | 设备类别 | 设备名称                                               |
|---------|------|----------------------------------------------------|
| Leutner |      |                                                    |
| 无侧限     |      | Layer Parallel Direct Shear Test (LPDS)            |
|         |      | Caminos Barcelona (LCB)                            |
| 直剪试验    |      | Florida Department of Transportation (FDOT)        |
|         |      | Modified Compact Shearing (MCS)                    |
| 有侧限     |      | National Center for Asphalt Technology (NCAT)      |
|         |      | Louisiana Interface Shear Strength Tester (LISST)  |
|         |      | Ancona Shear Testing Research and Analysis (ASTRA) |
| 斜剪试验    |      | 沥青混合料万能试验机(45°斜剪)                                  |
|         |      | Romanoschi 斜剪试验设备<br>复合式路面结构压剪测试装置(26°34')         |

最早的剪切试验可追溯到 1978 年,Uzan 等<sup>[9]</sup>对双层沥青混合料进行了剪切强度测试。最常使用的

剪切试验之一是 Leutner 剪切试验<sup>[60]</sup>,其装置简单,测试快速;LPDS 是经过改进后的 Leutner 剪切试验<sup>[61]</sup>;LCB 操作简单,测量上层相对于下层的剪切位移,适用于实验室和现场测试<sup>[62]</sup>;FDOT 采用应变控制模式,测试温度为 25℃,剪切压板之间的间隙宽度为 4.76 mm<sup>[63]</sup>;MCS 测试三层试件,两端固定,中间层施加荷载,优点在于对称施加荷载压力<sup>[64]</sup>;NCAT 由阿拉巴马州交通部(ALDOT)开发,通过万能试验机或马歇尔压力机进行加载,灵敏度高,实用性强<sup>[65]</sup>;LISST 同样适用于万能试验机<sup>[66]</sup>;ASTRA 试验通过两个剪切半盒和传感器,实现切向和法向荷载的同步施加<sup>[67]</sup>。尽管剪切试验操作简便,但存在剪应力分布不均匀的问题,需进一步优化以提高测试准确性。

目前,国内外学者针对斜剪试验的研究主要集中在斜剪倾角上,通过定制夹具将试件固定在万能材料试验机上,模拟实际路面的受力状态<sup>[71]</sup>,从而提高室内试验的真实性和可靠性。目前主要应用的倾角为 45°,此时竖向荷载沿剪切面分解为法向荷载和切向荷载,等效于车辆刹车时,路面同时承受车辆荷载和制动水平力,且两者大小相等。此外,李盛等<sup>[70]</sup>和刘朝晖等<sup>[72]</sup>提出了 26°34'的倾角,紧急制动时制动

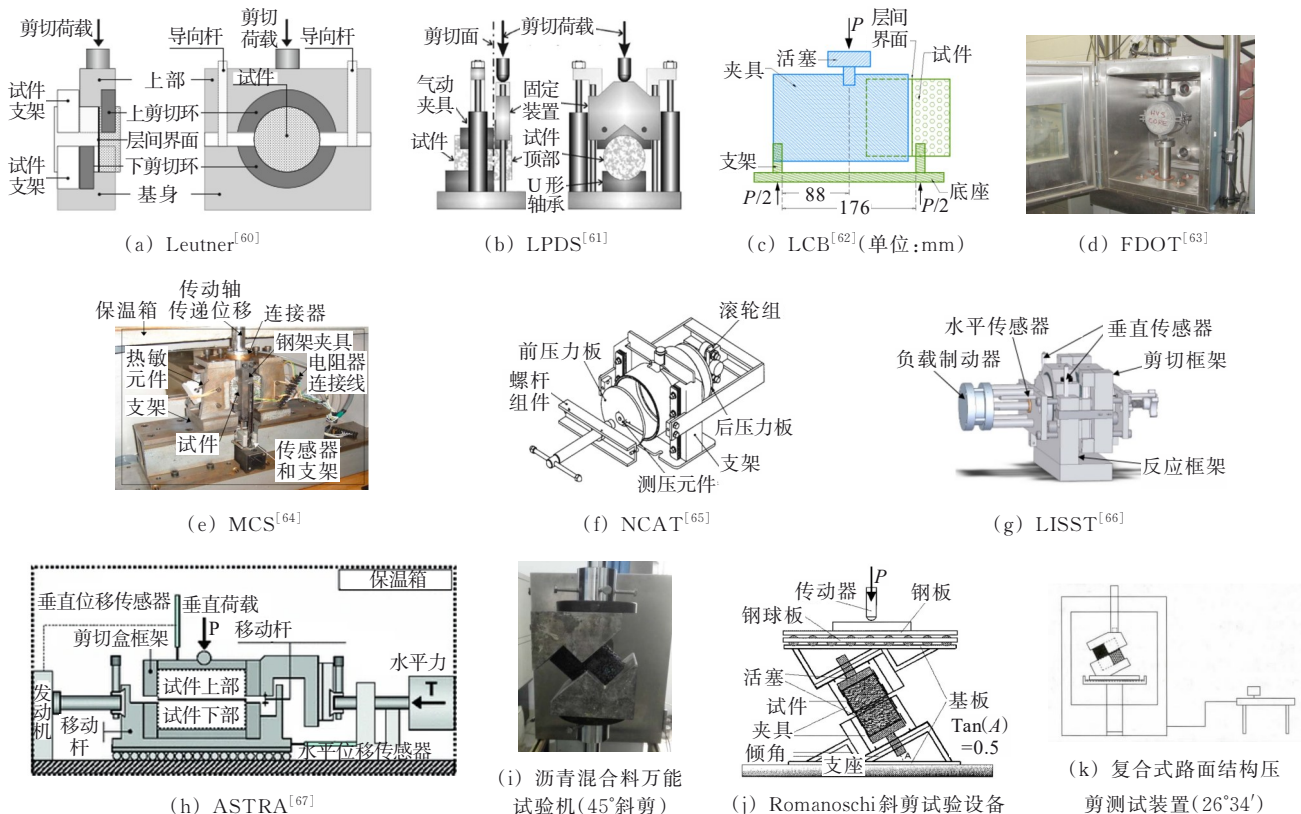


图 6 剪切试验设备示意图<sup>[60-70]</sup>

Figure 6 Shear testing devices<sup>[60-70]</sup>

力系数为0.5,即水平荷载与垂直荷载的比值为0.5。然而,行车荷载从路表向下传递,且随着深度的增加,应力会逐渐消散,有限元分析显示桥面铺装层间法向应力与剪应力相当,因此45°倾角更合理且应用更广泛。

上述直剪试验或斜剪试验仅考虑一次性剪切行为,而桥面铺装结构在服役期间会长期承受车轮荷载的反复循环作用。设计抗剪强度通常高于层间极限剪应力,一次荷载作用不会立即引发剪切破坏,但反复荷载是导致剪切疲劳破坏的关键。Isailović等<sup>[73]</sup>的研究表明,单调剪切试验不能全面反映实际使用状况,只能作为长期层间黏结性能的粗略指标,而循环剪切试验能更准确评估层间剪切疲劳性能(长期)。因此,采用层间剪切疲劳寿命作为层间剪切疲劳特性的评价指标是有必要的。

目前没有统一的桥面铺装层间剪切疲劳测试装备,大多使用剪切试验设备和万能试验机及自行设计的夹具。Ragni等<sup>[74]</sup>使用剪切疲劳试验评估沥青路面黏层的层间剪切疲劳性能,利用声发射(AE)技术分析剪切破坏的全过程。结果表明,AE发生的位置和数量可以表征层间损伤,经典疲劳失效准则不符合双层沥青混合料试件的临界破坏条件。此外,Ragni等<sup>[75]</sup>利用循环改良型沥青剪切试验机(Modified Asphalt Shear Tester,MAST)测试层间疲劳寿命,数字图像相关(Digital Image Correlation,DIC)测量试件层间位移,分为位移幅度扫描(Displacement amplitude sweep,DAS)和恒定位移幅度循环(Constant displacement amplitude cyclic,CDAC)两个阶段进行,结果表明该方法可行。

层间抗剪性能评价指标主要包括强度指标。曹明明等<sup>[76]</sup>的研究表明:不同层间糙化方式和防水黏结材料类型会导致强度残余阶段出现明显差异,建议结合层间相对滑动位移和残余剪切强度共同评价层间剪变特性;李嘉等<sup>[77]</sup>提出剪切断裂能,即层间剪切变形破坏所需要吸收的总能量,其反映了层间剪切强度和剪切位移量的综合作用,能全面表征层间抗剪性能;针对沥青类黏结材料,Hristov<sup>[78]</sup>提出层间剪切刚度指标,即最大剪切力与剪切位移的比值,反映层间应力应变关系;陈彬等<sup>[79]</sup>研究了这三类评价指标的侧重点和差异,发现强度指标变化比较明显,适用于评价各条件下的层间黏结性能,刚度指标的变化受防水黏结材料种类的影响较大,可用于评价不同黏层材料的性能差异,断裂能表征复合结构层

间破坏的全过程,适用于评价层间长期耐久性能;Yang等<sup>[80]</sup>研究了层间剪切强度、拉拔强度、弯曲强度和层间黏结系数,发现强度参数都与温度密切相关,并提出了基于剪切、拉拔、弯曲强度和层间结合率的界面结合性能评价方法,克服了单一指标的局限性。

### 3.1.2 拉拔试验

拉拔试验操作简单快速,既能在实验室进行也可在现场进行。表3列出了拉拔试验的分类和代表性设备,拉拔试验分为纯拉拔试验和施加水平应力的切-拉拔试验,其中纯拉拔试验分为直接拉伸试验和间接拉伸试验,其设备示意图如图7所示。

表3 拉拔试验设备分类<sup>[59,81-85]</sup>

Table 3 Classification of pull-off (tensile) testing devices<sup>[59,81-85]</sup>

| 分类     | 设备类别 | 设备名称                               |
|--------|------|------------------------------------|
| 纯拉拔试验  | 直接拉伸 | UTEP Pull-Off Devices(UPOD)        |
|        |      | ATacker                            |
|        |      | LTCQT(Louisiana Tack Coat Quality) |
|        |      | IBT(Interface Bond Test)           |
| 切-拉拔试验 | 间接拉伸 | 楔形劈裂试验[Wedge Splitting Test,WST]   |
|        | —    | 切-拉拔试验装置                           |

Eedula<sup>[81]</sup>开发了UPOD设备,用于铺设黏结界之前确定其质量。ATacker设备通过施加法向拉力,来测试层间拉拔强度和扭剪强度<sup>[82]</sup>。但UPOD和ATacker等手动操作设备存在不均匀加载和偏心加载的问题,导致结果离散性大。Mohammad等<sup>[83]</sup>在ATacker的基础上改进,研发了LTCQT设备,适用于现场测试,以区分不同黏结材料的拉拔强度,并建议现场测试在软化点温度进行。IBT采用断裂力学方法,可与数值模拟结合<sup>[84]</sup>。除了直接拉伸试验,Tschegg等<sup>[85]</sup>研发了间接拉伸试验,即楔形劈裂试验,以均匀加载速率将荷载垂直施加在带有凹槽和缺口的复合试件上。该方法不仅考虑了破坏时的最大强度,还考虑了开裂行为。该研究提出了断裂能与断裂面积(仅考虑水平投影面积)的比值即比断裂能,它比最大荷载更适合表征黏结力,因为比断裂能更能代表裂纹生长阻力。

层间拉拔强度为拉拔力峰值与拉拔面积的比值,作为层间抵抗拉拔破坏的评价指标。拉拔强度和剪切强度等强度力学指标能够直观表示黏结性能的变化,故普遍使用强度力学指标评价水泥混凝土桥面铺装层间黏结性能。然而,拉拔试验与桥面实际受力状况有较大差别,采用拉拔试验评价层间黏

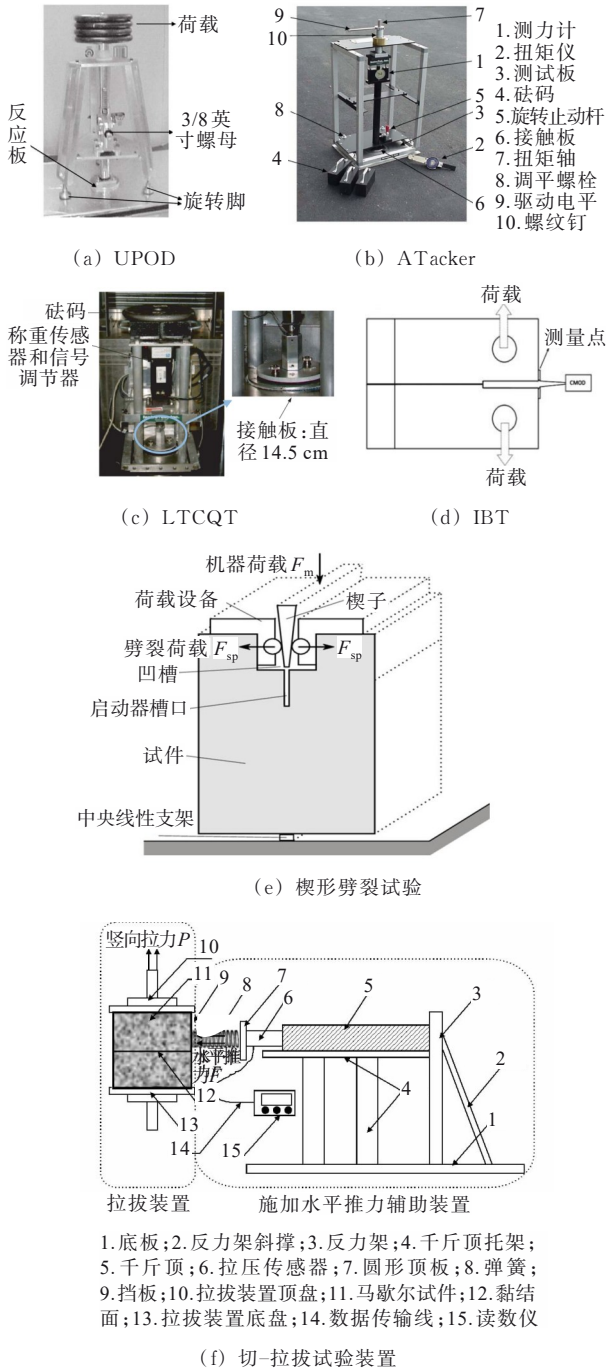


图 7 拉拔试验设备示意图<sup>[59,81-84,86]</sup>

Figure 7 Pull-off testing devices<sup>[59,81-84,86]</sup>

结性能不够全面。这主要是由于早期的拉拔试验设备需要手动操作,加载速率不均匀导致测得的结果比较分散;当层间抗拉强度高于材料的抗拉强度时,会出现试件材料破坏但层间未破坏的现象,导致试验结果不准确。故研究人员提出了拉拔刚度和拉拔断裂能,拉拔刚度为拉应力峰值与拉拔位移的比值;拉拔断裂能为极限抗拉能力下的总势能,从开始状态到极限承载力状态之间应变对应力的积分,拉

伸荷载-拉伸量曲线的包络面积。

### 3.1.3 扭剪试验

扭剪试验最初由瑞典研究人员开发,将试件黏贴在金属板上,凝固后置于夹具中并用螺丝固定,通过手动转动连接在金属板上的扳手施加扭矩直至试件破坏。试件直径通常为 100 mm,利于限制扭矩峰值大小。然而,早期的扭剪设备存在以下局限性:试件直径固定为 100 mm 或 150 mm;大多适用于现场使用,室内操作不便;易出现轴向弯曲;手动操作易导致扭矩率不准确;需要较大的力才能扭断试样。为克服这些局限性,研究人员开发了自动扭剪设备,其设备示意图如图 8 所示。Collop 等<sup>[87]</sup>开发了室内自动扭剪设备,能够进行单调和循环扭剪试验,发现使用扭矩率和旋转速率得到的扭剪强度相关性较强;Mahmoud 等<sup>[88]</sup>开发了俄勒冈现场扭剪试验仪(Oregon Field Torque Tester, OFTT),用于检测路面施工后的长期黏结性能。通过对比 OFTT 和实验室剪切结果,发现扭剪强度和剪切强度有很高的相关性,而且 OFTT 有效性高,实用性更强,破坏程度更小,成本更低。这些改进提高了扭剪试验的准确性和实用性,促进了层间黏结性能评估技术的发展。

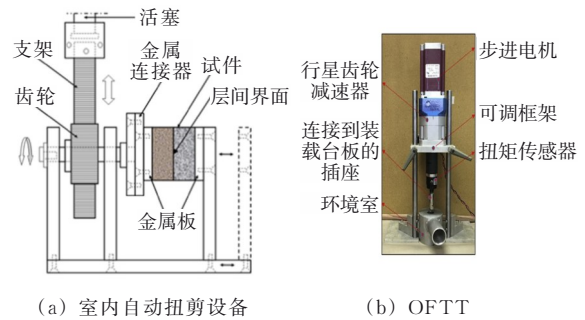


图 8 扭剪试验设备示意图<sup>[87-88]</sup>

Figure 8 Torsional shear testing devices<sup>[87-88]</sup>

表 4 列出了剪切试验、拉拔试验和扭剪试验等破坏性试验的优缺点。剪切试验最符合桥面实际破坏机理,但难以在现场进行检测,拉拔试验和扭剪试验则与之相反,均适用于现场操作,但不符合桥面实际破坏机理。综上所述,国内外均没有规定统一的层间黏结评价标准或规范,不同检测方法和设备的结果存在明显差异,且评价指标间缺少一致性,难以对比分析。因此,建议今后建立统一的评价规范和检测设备,增强不同试验结果的可比性。

表4 不同破坏性试验

Table 4 Destructive testing methods for interlayer bonding performance

| 试验 | 优点         | 缺点                     |
|----|------------|------------------------|
| 剪切 | 操作简单、方便、快速 | 不适用于现场检测               |
| 拉拔 | 直观、易于现场操作  | 偏心加载导致结果离散性大、破坏机理与实际不符 |
| 扭剪 | 易于现场操作     | 设备要求高、易出现轴向弯曲          |

### 3.2 非破坏性试验

剪切试验、拉拔试验、扭剪试验均具有破坏性,不能对同一试件进行重复性试验,且现场钻芯取样后容易造成桥面整体结构的损伤。因此,研究人员将无损检测技术应用到层间黏结性能的研究中,常见的无损检测技术主要有落锤式弯沉仪(Falling Weight Deflectometer, FWD)<sup>[89-90]</sup>、DIC<sup>[91-93]</sup>、三维探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)<sup>[94-96]</sup>、便携式路面分析仪(Portable Seismic Pavement Analyser, PSPA)<sup>[97]</sup>和红外热成像(Infrared Thermography, IRT)<sup>[98-100]</sup>等,各技术的优缺点及评价指标见表5。

表5 无损检测技术

Table 5 Non-destructive testing methods for interlayer bonding performance

| 非破坏性试验方法 | 优点            | 缺点        | 评价指标       |
|----------|---------------|-----------|------------|
| FWD      | 成本低、操作快速且检测量大 | 存在误差      | 黏结刚度系数     |
| DIC      | 描述破坏的全过程      | 测量区域有限    | 应变场、位移场    |
| GPR      | 快速、便捷         | 无法有效、及时评估 | 层间振幅强度     |
| PSPA     | 成本低、体积小       | 准确性易受影响   | 振幅频谱       |
| 红外热成像    | 非接触性、直观快速     | 局限于脱空病害   | 脱空及未脱空区域温度 |

由表5可知:无损检测技术评价层间黏结性能均通过其他指标侧面反映。

Al Hakim等<sup>[101]</sup>设计了一种新的反演方法,基于FWD的测试结果评估沥青层间黏结状况,层间黏结刚度 $K_s$ 小于 $10 \text{ MN/m}^3$ 为完全脱黏,大于 $1 \times 10^5 \text{ MN/m}^3$ 为完全黏结,但层间黏结不佳会导致反演结果存在误差;Le等<sup>[89]</sup>通过Matlab开发程序反演FWD挠度,剪切模量 $K_s \leq 0.1 \text{ MPa/mm}$ 完全光滑, $0.1 \text{ MPa/mm} < K_s \leq 100 \text{ MPa/mm}$ 部分连续, $K_s > 100 \text{ MPa/mm}$ 完全黏结,未来可在不同温度及荷载条件下应用;Ktari等<sup>[102]</sup>为了研究层间界面特性,应用DIC技术和标记

跟踪法计算双层沥青混合料直接拉伸试验中界面不同尺寸的纵向应变和纵向位移,发现应变场表征了界面脱黏和宏观断裂的过程,从界面构成定律中推导出界面刚度、损伤特征等界面参数;王大为等<sup>[103]</sup>基于GPR技术提出沥青路面层间接触状态评价方法,根据不同材料相对介电常数值差异,认为层间雷达图像的同相轴振幅越小接触越好,层间接触衰减速率呈先慢后快的规律。

便携式路面分析仪是一种快速的原位测试设备,能够采集不同深度位置的地震波模量数据,Li等<sup>[97]</sup>采用PSPA定性评价沥青路面层间黏结状况,但无法确定加铺层和中间层的模量。

红外热成像在其他领域的无损检测应用较广,材料的热传导率不同,辐射的红外线强度也不同,对红外热图进行分析对比,能够发现层间脱黏部分与黏结部分的差别<sup>[98]</sup>,脱空区域的热传导性能差,温度偏高,但该技术还存在局限性:在白天加热和夜间降温的交替时间段内无法识别脱黏区域,且最多检测到50 mm的病害<sup>[100]</sup>。

上述无损检测技术均属于定性评价,但未来将着重研究量化的无损检测方法,通过新技术的研发、现有检测方法的改进以及破坏性试验来验证无损检测的准确性,广泛应用于现场测试。

## 4 层间黏结性能提升措施

提高层间黏结性能是确保桥面铺装结构耐久性和延长使用寿命的关键。随着技术的进步和材料性能的提升,在施工过程中,采取有效的措施来提升层间的黏结能力尤为重要。根据相关研究结果及分析,对层间黏结性能提升措施提出以下建议。

### (1) 选择合适的黏层油

根据道路工程所处地区及气候特点,选择合适的黏层油,如在湿热地区选择抵抗高温性能优良的沥青材料,同时黏层油用量应同时满足性能好成本低的要求。黏层与下封层综合使用,增强黏附力,使铺装层和桥面板黏结更紧密。

### (2) 处理层间界面

为提高层间界面的粗糙度,增强桥面板与铺装层之间的黏附力,对桥面板表面进行糙化处理,如凿毛、拉毛、精铣刨等工艺。糙化处理后、黏层油洒布之前,一定要保持层间界面干净、干燥,去除施工过程中的泥土、灰尘和油污等污染物,黏层养护期间也要保持干净,防止污染物在黏结形成过程中阻碍黏

附力的增强。此外,在防水黏结层施工前,以构造深度为检测指标对桥面板表面糙化效果进行检测控制。

### (3) 控制施工温度

层间黏结性能对温度尤为敏感,高温条件下抗剪强度会大幅降低,低温条件下黏层油还未完全融化,不便于洒布。因此,应当考虑施工期间的气温条件,确保黏层油在适宜温度下使用,避免黏层油在高温下性能急剧衰减,造成同步碎石掉落和抗剪强度降低。黏层油沥青应当在拌和站加热至180~200℃,运输途中需保温以保证沥青洒布时其温度在180℃以上。

### (4) 控制防水黏结层用量

沥青及碎石撒布量控制在设计标准允许的合理范围内。沥青洒布必须均匀且洒布量要严格控制,喷洒最大偏差量不应超过规定的 $\pm 0.2 \text{ kg/m}^2$ 。单粒径碎石喷撒最大偏差量不应超过设计标准的5%。严格控制沥青和碎石的用量,表面要喷洒均匀。

### (5) 定期层间处治质量检测

按照《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)中的层间黏结强度测试方法在现场随机选择测试点进行检测,确保层间黏结强度大于规定值。检测应注意避开高温时段,将检测温度控制在35℃以下。

## 5 挑战与未来发展

国内外关于层间黏结性能的研究已历经数十年的发展,在影响因素机理、检测方法与评价指标等方面取得了一定成果,但针对桥面铺装层间黏结性能的研究仍需进一步深入。

(1) 现有研究虽已建立以参数变化表征层间接触状态的描述模型,但桥面板-黏结层-铺装层体系的黏结机理仍需深入探究。未来应着力构建更精确的层间黏结表征模型,建立黏结状态演变的力学行为方程,以更准确地描述层间黏结状态。

(2) 界面粗糙度作为层间黏结性能的关键影响因素,其作用机理研究亟待加强。一方面,需探究多因素耦合作用下界面纹理的贡献机制,特别是其对层间摩擦效应的影响;另一方面,应考虑上下结构层骨料相互嵌挤的三维效应,从空间维度完善纹理影响理论。

(3) 在层间黏结性能评价方法方面,传统破坏性检测将逐步被快速、高精度的无损检测技术取代。

为适应复杂服役环境,亟须建立定量化评价指标体系,最终实现延长桥面使用寿命的目标。

(4) 目前,层间处治技术缺乏标准化指导,国内外仅有原则性规定。对于实际工程的指导,需要建立统一的检测评价体系,以提升工程质量,改善路面的耐久性,延长路面使用寿命。

## 6 结论

为明确水泥混凝土桥面铺装层间黏结性能对桥面铺装耐久性的影响,本文系统综述了相关研究进展,重点分析了层间黏结性能的影响因素、评价方法和提升措施。主要研究结论如下:

(1) 层间黏结机理具有复杂性,现有表征模型以层间接触的法向和切向接触的共同作用为主,均表明层间接触状态显著影响桥面力学响应,但仅用单一参数变化表征复杂的层间相互作用仍存在不足。

(2) 层间黏结性能受多重因素影响,包括黏结层材料性能、界面状况及荷载条件等。其中,温度是最关键的影响因素——黏结材料多为温度敏感性材料,高温环境下,会逐渐发生软化,此时其他因素影响相对减弱。

(3) 现行层间黏结评价方法以破坏性试验为主,其中剪切试验因操作简便且符合实际破坏模式而被广泛采用。未来,无损检测技术因其科学性将成为现场工程评价的未来发展趋势。

目前,层间黏结性能研究缺乏统一的标准或规范,中国仅提出现场层间黏结强度测试方法,但工程应用效果欠佳。因此,亟须建立规范的层间处治设计控制指标及标准化评价体系。

### 参考文献:

#### References:

- [1] AL-JARAZI R, RAHMAN A, AI C F, et al. Development of a novel prediction model for interface shear strength in asphalt pavement using the CART model[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2024, 28(8): 3246-3256.
  - [2] KOMARAGIRI S, DRIMALAS T, HAZLETT D, et al. An in situ method to evaluate the interlayer bond between hot-mix asphalt and Portland cement concrete surface[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134648.
  - [3] 黄晓明. 水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J]. *交通运输工程学报*, 2014, 14(1): 1-10.
- HUANG Xiaoming. Research status summary of asphalt pavement technology on cement concrete bridge deck[J].

- Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 1-10.
- [4] MANNING D G. Waterproofing membranes for concrete bridge decks[M]. Washington: National Academies Press, 1995.
- [5] YANG K, LI R. Characterization of bonding property in asphalt pavement interlayer: A review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021, 8(3): 374-387.
- [6] PETIT C, DIAKITÉ M, MILLIEN A, et al. Pavement design for curved road sections fatigue performance of interfaces and longitudinal top-down cracking in multilayered pavements[J]. Road Materials and Pavement Design, 2009, 10(3): 609-624.
- [7] 王勋涛. 基于粘弹性和层间接触的桥面沥青铺装层响应分析[D]. 西安: 长安大学, 2018.  
WANG Xuntao. Response analysis of bridge deck asphalt pavement based on viscoelasticity and interlayer contact [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [8] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1968, 94(3): 637-659.
- [9] UZAN J, LIVNEH M, ESHED Y. Investigation of adhesion properties between asphaltic-concrete layers[J]. Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 1978, 47:495-521.
- [10] AL HAKIM B. An improved backcalculation method to predict flexible pavement layers moduli and bonding condition between wearing course and base course[D]. Liverpool: Liverpool John Moores University (United Kingdom), 1997.
- [11] 关昌余, 王哲人, 郭大智. 路面结构层间结合状态的研究[J]. 中国公路学报, 1989, 2(1): 70-80.  
GUAN Changyu, WANG Zheren, GUO Dazhi. A study of contact conditions of interfaces in pavement layers[J]. China Journal of Highway and Transport, 1989, 2(1): 70-80.
- [12] 包龙生, 樊乾玉, 兰皓, 等. 基于层间接触的空心板梁及桥面铺装的双轴移动荷载下的力学响应分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 491-499.  
BAO Longsheng, FAN Qianyu, LAN Hao, et al. Analysis of mechanical response of bridge deck pavement under two-axis moving load based on interlayer contact[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36(3): 491-499.
- [13] NIAN T F, LI S W, LI P, et al. Mechanical response of interlayer structural shear performance of asphalt pavement with functional layer considering interlayer contact state[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01934.
- [14] KRUNTCEVA M R, COLLOP A C, THOM N H. Effect of bond condition on flexible pavement performance[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(11): 880-888.
- [15] 李东华, 郝培文. 沥青路面层间接触的评价[J]. 中外公路, 2005, 25(5): 38-41.  
LI Donghua, HAO Peiwen. Evaluation of interlayer contact of asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25(5): 38-41.
- [16] 冯德成, 宋宇. 沥青路面层间结合状态试验与评价方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 627-631.  
FENG Decheng, SONG Yu. Study of test and evaluation method on interfacial combining state of asphalt pavement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(4): 627-631.
- [17] 梅朔华. 循环低温环境下沥青路面温度应力分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
MEI Shuohua. Analyze the thermal stress of asphalt pavement in circular low temperature environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [18] 万晨光, 申爱琴, 郭寅川, 等. 桥面铺装混凝土调平层与沥青面层接触状态研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 262-266.  
WAN Chenguang, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, et al. Interlayer contact state between concrete leveling course and asphalt surface on bridge deck pavement[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 262-266.
- [19] FANG M J, WANG X, LIU J J, et al. A new method of interlayer shear performance evaluation for permeable composite pavement (PCP) in laboratory[J]. Construction and Building Materials, 2023, 408: 133652.
- [20] 李嘉, 袁鹏, 黄聪. 轻型组合桥面超薄磨耗层层间黏结性能研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(11): 39-48.  
LI Jia, YUAN Peng, HUANG Cong. Study on interfacial bonding performance of ultra-thin wear layer on light composite bridge deck[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(11): 39-48.
- [21] MUSLICH S. Assessment of bond between asphalt layers [D]. Nottingham, East Midlands, UK: The University of Nottingham, 2010.
- [22] WANG Y B, PEI Z S, WANG G J, et al. Study on the influence factors on the design and road performance of high-performance waterproof adhesive material for concrete bridge decks[J]. Construction and Building Materials, 2024, 413: 134838.
- [23] 李艳, 张成雪, 邱业绩, 等. 开普封层层间黏结性能及其影响因素研究[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 70-73.  
LI Yan, ZHANG Chengxue, QIU Yeji, et al. Study on interlayer bonding properties and influence factors of cape seal[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 70-73.
- [24] SHI S, ZANG D D, CHEN X, et al. Preparation and properties of a novel waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2023, 371: 130767.
- [25] 李秀君, 惠致富, 严慧忠, 等. 水性环氧树脂改性乳化沥青黏结性能试验分析[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 160-166.

- LI Xiujun, HUI Zhifu, YAN Huizhong, et al. Experimental analysis of adhesive performance of waterborne epoxy modified emulsified asphalt[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(1): 160-166.
- [26] KONG L, SU S N, WANG Z L, et al. Microscale mechanism and key factors of waterborne epoxy resin emulsified asphalt enhancing interlayer bonding performance and shear resistance of bridge deck pavement [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 419: 135570.
- [27] HOU D H, HAN M Z, MUHAMMAD Y, et al. Performance evaluation of modified asphalt based trackless tack coat materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 385-394.
- [28] GE Z S, WANG H, ZHANG Q S, et al. Glass fiber reinforced asphalt membrane for interlayer bonding between asphalt overlay and concrete pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 918-925.
- [29] COVEY D, COLERI E, MAHMOUD A. Tack coat rheological properties and the effects on interlayer shear strength[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(11): 04017221.
- [30] 万晨光, 申爱琴, 赵学颖, 等. 基于综合性能的桥面铺装防水黏结层灰靶决策[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(3): 406-410.
- WAN Chenguang, SHEN Aiqin, ZHAO Xueying, et al. Grey target optimization of waterproof adhesive materials for bridge deck pavement with comprehensive performance[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20 (3): 406-410.
- [31] ALI M H, KHALIL A H, WANG Y. Experimental study of the effect of tack coats on interlayer bond strength of pavement[J]. *Sustainability*, 2023, 15(8): 6600.
- [32] CEN F, ZHONG J J, GAO P W, et al. Multiscale evaluation of the effect of corrosive media on bitumen waterproof layer adhesion[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 423: 135630.
- [33] JIN T, LIU L P, YANG R K, et al. Investigation of interlayer bonding performance between asphalt concrete overlay and Portland cement concrete using inclined shear fatigue test[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 400: 132681.
- [34] LIU W Y, YAN K Z, JI H Y. Bonding performance evaluation on WTR-APAO composite modified asphalt as waterproof adhesive layer for concrete bridge[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 349: 128667.
- [35] CHEN J S, HUANG C C. Effect of surface characteristics on bonding properties of bituminous tack coat[J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2180(1): 142-149.
- [36] 周昌栋, 代明净, 赵明宇, 等. 二阶热固性环氧沥青桥面铺装黏层黏结性能试验研究[J]. *中外公路*, 2024, 44(3): 129-136.
- ZHOU Changdong, DAI Mingjing, ZHAO Mingyu, et al. Experimental study on adhesive performance of second-order thermosetting epoxy asphalt in bridge deck pavement[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(3): 129-136.
- [37] DESTREE A, DE VISSCHER J, PIÉRARD N, et al. Field study to investigate the impact of conditions of application of tack Coats on the interlayer bond strength [C]//Dordrecht: Springer Netherlands: 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, 2016: 347-358.
- [38] ABOULSAAD A, SWIERTZ D, BAHIA H U. Study of factors affecting curing of asphalt emulsion tack coats[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2019, 2673(12): 619-627.
- [39] RAAB C, PARTL M N. Investigation into a long-term interlayer bonding of asphalt pavements[J]. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2008, 3(2): 65-70.
- [40] 牟压强, 郭大进, 孙武云, 等. 水泥混凝土路面-环氧沥青超薄罩面层间黏结性能试验研究[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(5): 1-9.
- MOU Yaqiang, GUO Dajin, SUN Wuyun, et al. Experimental study on bonding performance of interlayer between cement concrete pavement and epoxy asphalt ultra-thin overlay[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(5): 1-9.
- [41] 魏柱. 多雨冰雪条件下水泥混凝土桥面沥青铺装结构分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- GUO Zhu. Analysis of asphalt pavement structure on the concrete bridge deck under rainy and ice-snow conditions [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018.
- [42] YOU L Y, YOU Z P, DAI Q L, et al. Investigation of adhesion and interface bond strength for pavements underlying chip-seal: Effect of asphalt-aggregate combinations and freeze-thaw cycles on chip-seal[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203: 322-330.
- [43] 黄明星, 陈栩, 曹超飞, 等. 动水作用下水泥混凝土桥面防水黏结层的水稳定性研究[J]. *公路交通科技*, 2023, 40 (5): 65-71.
- HUANG Mingxing, CHEN Xu, CAO Chaofei, et al. Study on water stability of waterproof bonded layer of cement concrete bridge deck considering dynamic water action[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(5): 65-71.
- [44] 计红颜, 颜可珍, 袁建, 等. WTR/APAO复合改性沥青层间黏结性能研究[J]. *中外公路*, 2023, 43(2): 178-182.
- JI Hongyan, YAN Kezhen, YUAN Jian, et al. Interlayer bonding performance of WTR/APAO composite modified asphalt[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43 (2): 178-182.
- [45] HUANG H W, ZHAN Y, TAO Y L, et al. Three-dimensional characterization of bonding features for asphalt pavement interface using a novel interlayer

- isolation film[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 311: 125301.
- [46] TANG Z P, HUANG F L, PENG H. Effect of 3D roughness characteristics on bonding behaviors between concrete substrate and asphalt overlay[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121386.
- [47] 任万艳, 韩森, 李俊, 等. 植石混凝土桥面沥青铺装层间抗剪性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(1): 111-116.  
REN Wanyan, HAN Sen, LI Jun, et al. Research on interlaminar shear properties of bridge deck asphalt pavement on chip-sprinkling cement concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(1): 111-116.
- [48] 党静. 混凝土桥面铺装层间粘结性能影响因素[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.  
DANG Jing. Interlayer bonding performance of concrete bridge deck pavement influencing factors[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [49] 田荣燕, 李莉斯, 王文奇, 等. 泥土污染对复合式路面界面层性能影响的试验研究[J]. *公路交通技术*, 2015, 31(4): 6-8, 17.  
TIAN Rongyan, LI Lisi, WANG Wenqi, et al. Experimental research on influences of soil pollution on performance of interface layer of compound pavement[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2015, 31(4): 6-8, 17.
- [50] 陈旭丹, 粟海涛, 钱振东. “下层EA+上层SMA”桥面铺装施工效应对复合结构层间粘结性能影响研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2020, 16(9): 302-305.  
CHEN Xudan, SU Haitao, QIAN Zhendong. Effect of “EA+SMA” bridge deck construction on the interlayer bonding performance of composite structures interlayer bonding performance of composite structure[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 16(9): 302-305.
- [51] 艾长发, 刘一鸣, 任东亚. 基于压-直剪试验方法的沥青路面层间污染特性[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(5): 21-29.  
AI Changfa, LIU Yiming, REN Dongya. Interlayer pollution characteristics of asphalt pavement based on compression-direct shear test method[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(5): 21-29.
- [52] GONG M Y, ZHOU B C, CHEN J Y, et al. Mechanical response analysis of asphalt pavement on concrete curved slope bridge deck based on complex mechanical system and temperature field[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 276: 122206.
- [53] 孔令云, 黄麟钦, 代笠, 等. 温度、粗糙度对混凝土桥面沥青铺装层间拉拔强度的耦合作用[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(2): 21-29.  
KONG Lingyun, HUANG Linhuo, DAI Li, et al. Coupling effect of temperature and roughness on the pull-out strength of concrete bridge deck inter-layer[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(2): 21-29.
- [54] 颜可珍, 黄顺欣, 葛冬冬, 等. 水泥混凝土桥面铺装层间黏结性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(7): 23-32.  
YAN Kezhen, HUANG Shunxin, GE Dongdong, et al. Study on interlayer bonding performance of cement concrete bridge deck[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(7): 23-32.
- [55] 张占军. 混凝土桥桥面防水系统性能及设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.  
ZHANG Zhanjun. Research on performance and design method of waterproofing system on concrete bridge decks [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [56] 曹明明, 陆阳, 黄晚清, 等. 复合式路面层间界面剪切滑移特性[J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(4): 1-11.  
CAO Mingming, LU Yang, HUANG Wanqing, et al. Interlaminar interface shear slip characteristics of composite pavement[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(4): 1-11.
- [57] 李萍, 念腾飞, 张雅莉, 等. 基于斜剪试验的水泥砼桥面沥青铺装层抗剪切性能研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37(11): 48-53.  
LI Ping, NIAN Tengfei, ZHANG Yali, et al. Study on anti-shearing property of asphalt pavement for concrete bridge deck based on oblique shear test[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37(11): 48-53.
- [58] LIU K, WANG F, KANG X. Black and white interlaminar instability failure of asphalt overlay on old cement slab[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 12(5): 1-12.
- [59] 刘红坡, 艾长发, RAHMAN Ali, 等. 基于切-拉拔试验的沥青路面层间黏结性能研究[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(3): 16-23.  
LIU Hongpo, AI Changfa, RAHMAN Ali, et al. Characterization of interlayer bonding in asphalt pavement based on direct tension test with horizontal loading[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2017, 37(3): 16-23.
- [60] WANG J Y, XIAO F P, CHEN Z, et al. Application of tack coat in pavement engineering[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 856-871.
- [61] RAAB C, PARTL M N. Interlayer bonding of binder, base and subbase layers of asphalt pavements: Long-term performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(8): 2926-2931.
- [62] RECASENS R M, MARTÍNEZ A, JIMÉNEZ F P. Evaluation of effect of heat-adhesive emulsions for tack Coats with shear test[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2006, 1970(1): 64-70.
- [63] SHOLAR G A, PAGE G C, MUSSELMAN J A, et al. Preliminary investigation of a test method to evaluate bond strength of bituminous tack coats[J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2004, 73: 771-806.
- [64] DIAKHATE, PHELIPOT, MILLIEN & A, et al. Shear

- fatigue behaviour of tack coats in pavements[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2006, 7(2): 201-222.
- [65] WEST R C, ZHANG J, MOORE J. Evaluation of bond strength between pavement layers[R]. Auburn: Auburn University, 2005.
- [66] DAS R, MOHAMMAD L N, ELSEIFI M, et al. Effects of tack coat application on interface bond strength and short-term pavement performance[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 2633(1): 1-8.
- [67] CANESTRARI F, FERROTTI G, GRAZIANI A. Shear failure characterization of time-temperature sensitive interfaces[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2016, 20(3): 405-419.
- [68] 李一鸣. 复合式沥青路面水泥混凝土基层面层处理技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
LI Yiming. Research about the treatment of the cement concrete base course in composite asphalt pavement[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [69] ROMANOSCHI S A, METCALF J B. Characterization of asphalt concrete layer interfaces[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, 1778(1): 132-139.
- [70] 李盛, 刘朝晖, 李宇峙. 南方地区混凝土基层沥青路面层间抗剪强度结构系数研究[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(4): 28-33.  
LI Sheng, LIU Zhaohui, LI Yuzhi. Research on shear strength structure coefficient of concrete base asphalt pavement in Southern China[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(4): 28-33.
- [71] GUNGOR A G, SENGUN E, YILMAZ Y, et al. Enhancing bonding performance in two-layer roller-compacted concrete pavements: Bridging laboratory insights with field performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 418: 135469.
- [72] 刘朝晖, 刘靖宇, 黄优, 等. 刚柔复合式路面结构室内抗压强度试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(6): 1130-1135.  
LIU Zhaohui, LIU Jingyu, HUANG You, et al. Experimental study on compressive-shear strength of rigid-flexible composite pavement structure[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(6): 1130-1135.
- [73] ISAILOVIĆ I, WISTUBA M P. Asphalt mixture layers' interface bonding properties under monotonic and cyclic loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 168: 590-597.
- [74] RAGNI D, TAKARLI M, PETIT C, et al. Use of acoustic techniques to analyse interlayer shear-torque fatigue test in asphalt mixtures[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 131: 105356.
- [75] RAGNI D, SUDARSANAN N, CANESTRARI F, et al. Investigation into fatigue life of interface bond between asphalt concrete layers[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 23(10): 3371-3385.
- [76] 曹明明, 黄晚清, 陆阳, 等. 复合式路面层间剪切性能试验和评价方法[J]. *公路交通科技*, 2018, 35(4): 40-48.  
CAO Mingming, HUANG Wanqing, LU Yang, et al. Test and evaluation method of interlaminar shear property of composite pavement[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 35(4): 40-48.
- [77] 李嘉, 张坚, 董亮, 等. 超高性能轻型组合桥面沥青磨耗层界面抗剪性能研究[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(7): 73-80, 113.  
LI Jia, ZHANG Jian, DONG Liang, et al. Shear performance between asphalt wearing layer and UHPC for ultra-high performance lightweight composite deck[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(7): 73-80, 113.
- [78] HRISTOV B. Influence of different interface properties on the interlayer bond shear stiffness[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 365: 032056.
- [79] 陈彬, 黄启刚, 闫亚鹏. “下层EA+上层SMA”桥面铺装复合结构层间力学特性评价[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(3): 96-104.  
CHEN Bin, HUANG Qigang, YAN Yapeng. Evaluation on interlayer mechanical behavior of “lower EA + upper SMA” deck pavement composite structure[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(3): 96-104.
- [80] YANG K, LI R, YU Y, et al. Unified laboratorial evaluation of interlayer bond property in asphalt pavements based on strength parameters[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 121738.
- [81] EEDULA S R. Tackcoat acceptance criterion[D]. El Paso, TX, USA: The University of Texas at El Paso, 2007.
- [82] BUCHANAN M S, WOODS M E. Field tack coat evaluator [atacker (trademark)][J]. *Emulsions*, 2004.
- [83] MOHAMMAD L N, BAE A, ELSEIFI M A, et al. Evaluation of bond strength of tack coat materials in field [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2126(1): 1-11.
- [84] HAKIMZADEH S, KEBEDE N A, BUTTLAR W G, et al. Development of fracture-energy based interface bond test for asphalt concrete[J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2012, 13(sup1): 76-87.
- [85] TSCHEGG E K, KROYER G, TAN D M, et al. Investigation of bonding between asphalt layers on road construction[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1995, 121(4): 309-316.
- [86] TSCHEGG E. Equipment and appropriate specimen shapes for tests to measure fracture values[J]. Patent AT-390328, 1986.
- [87] COLLOP A C, SUTANTO M H, AIREY G D, et al. Development of an automatic torque test to measure the shear bond strength between asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(2): 623-629.
- [88] MAHMOUD A, COLERI E, BATTI J, et al. Development

- of a field torque test to evaluate in situ tack coat performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135: 377-385.
- [89] LE M T, NGUYEN Q H, NGUYEN M L. Numerical and experimental investigations of asphalt pavement behaviour, taking into account interface bonding conditions[J]. *Infrastructures*, 2020, 5(2): 21.
- [90] SPADONI S, INGRASSIA L P, PAOLONI G, et al. Influence of geocomposite properties on the crack propagation and interlayer bonding of asphalt pavements [J]. *Materials*, 2021, 14(18): 5310.
- [91] BIRGISSON B, MONTEPARA A, ROMEO E, et al. An optical strain measurement system for asphalt mixtures[J]. *Materials and Structures*, 2009, 42(4): 427-441.
- [92] BUTTLAR W G, HILL B C, KIM Y R, et al. Digital image correlation techniques to investigate strain fields and cracking phenomena in asphalt materials[J]. *Materials and Structures*, 2014, 47(8): 1373-1390.
- [93] JIAO Y B, DU W L, YANG H, et al. Low temperature failure behavior analysis of fiber reinforced asphalt concrete under indirect tension test using acoustic emission and digital image correlation[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02720.
- [94] SUDYKA J, KRYSIŃSKI L, ZOFKA A, et al. High frequency impulse ground penetrating radar application in assessment of interlayer connections[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 163: 02005.
- [95] ZHANG W W, NIU L, WANG S S, et al. Study on the interlayer bonding state of an asphalt pavement based on the stacking peak ratio method[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2023, 11: 1277817.
- [96] ZHU H R, WEI G F, XU H, et al. The influence of interlayer bonding conditions on the propagation laws of reflective cracks in semi-rigid base pavement based on the DEM and GPR[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 442: 137547.
- [97] LI M X, ANDERSON N L, SNEED L H, et al. An assessment of concrete over asphalt pavement using both the ultrasonic surface wave and impact echo techniques [J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2016, 21(4): 137-149.
- [98] 张永健, 张川. 红外热成像法在路面检测中的应用[J]. *建材世界*, 2013, 34(5): 53-55.  
ZHANG Yongjian, ZHANG Chuan. Application of infrared thermography on the road detection[J]. *The World of Building Materials*, 2013, 34(5): 53-55.
- [99] 张华, 申远洋, 王曙光, 等. 道路质量的红外热成像检测现状[J]. *无损检测*, 2019, 41(9): 11-15.  
ZHANG Hua, SHEN Yuanyang, WANG Shuguang, et al. Status of infrared thermal imaging test of road quality[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2019, 41(9): 11-15.
- [100] VYAS V, PATIL V J, SINGH A P, et al. Debonding detection in asphalt pavements using infrared thermography[J]. *Transportation Research Procedia*, 2020, 48: 3850-3859.
- [101] AL HAKIM B, CHEUNG L W, ARMITAGE R J. Use of FWD data for prediction of bonding between pavement layers[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 1999, 1(1): 49-59.
- [102] KTARI R, MILLIEN A, FOUCHAL F, et al. Pavement interface damage behavior in tension monotonic loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106: 430-442.
- [103] 王大为, 吕浩天, 汤伏蛟, 等. 基于三维探地雷达的沥青路面层间接触状态智能诊断技术[J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48(6): 572-579.  
WANG Dawei, LYU Haotian, TANG Fujiao, et al. Intelligent detection technology of contact state between asphalt pavement layers based on 3D ground penetrating radar technology[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2022, 48(6): 572-579.