

## 刚柔复合式路面结构与材料发展趋势

刘朝晖<sup>1</sup>, 黄优<sup>1,2\*</sup>, 余时清<sup>1</sup>, 刘靖宇<sup>1,3</sup>, 李盛<sup>1</sup>, 柳力<sup>1</sup>, 潘宇<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学 道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心, 湖南 长沙 410114; 3.湖南省高速公路集团有限公司, 湖南 长沙 410005)

**摘要:**刚柔复合式路面作为一种耐久性路面结构,广泛应用于重载交通、特殊地质条件、桥隧铺装等工程。为进一步推动耐久性刚柔复合式路面的应用,明确研究中的关键问题及发展方向,该文综述了国内外刚柔复合式路面的相关研究进展。在梳理刚柔复合式路面结构设计理论及施工技术的基础上,首先阐述了刚柔复合式路面的结构力学行为特征,分析了沥青面层和刚性基层的荷载应力、温度应力及其交互影响,刚性基层上的沥青面层一方面直接承受荷载和环境作用,另一方面可以改善下卧结构层的应力场和温度场,是影响刚柔复合式路面服役性能及使用寿命的关键;明确了刚柔复合式路面的病害主要出现在沥青面层,由于沥青面层与刚性基层之间的模量差异巨大,刚性基层上的沥青面层更倾向于产生压剪破坏,刚性基层的开裂以及刚-柔层间的结合状态对沥青路面的性能也有着显著影响;最后,分别从沥青面层抗剪、基层板整体性、刚-柔层间结合3个方面归纳了刚柔复合式路面性能的提升技术。基于刚柔复合式路面的结构力学特性,开展结构-高性能材料一体化设计是提升刚柔复合式路面使用性能和耐久性的有效途径。

**关键词:**道路工程;刚柔复合式路面;结构力学特性;压剪破坏;结构材料一体化;综述

**中图分类号:**U416

**文献标志码:**A

## Structure and Material of Rigid-Flexible Composite Pavements and Development

LIU Zhao-hui<sup>1</sup>, HUANG You<sup>1,2\*</sup>, YU Shi-qing<sup>1</sup>, LIU Jing-yu<sup>1,3</sup>, LI Sheng<sup>1</sup>, LIU Li<sup>1</sup>, PAN Yu<sup>1</sup>

(1.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2.Engineering Research Center of Catastrophic Prophylaxis and Treatment of Road & Traffic Safety of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3.Hunan Provincial Expressway Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410005, China)

**Abstract:** The rigid-flexible composite pavement, as a kind of durable pavement structure, has been widely used for heavy-duty traffic, special geological conditions, bridge tunnel paving, etc. In order to promote the application of durable rigid-flexible composite pavements and clarify the key research issues and development directions, relevant research progress of rigid-flexible composite pavements in China and abroad was reviewed. Based on the structure design theory and construction technology of rigid-flexible composite pavements, the structural mechanical behavior characteristics of rigid-flexible composite pavements were described, and the stress induced by load and temperature of asphalt surface layer and rigid base layer, as well as their interactions were analyzed. The asphalt surface layer on the rigid base layer was directly subjected to the load and environmental effects and improved the stress and temperature fields of the underlying structural layer. It was the key factor influencing the performance and service life of rigid-flexible composite pavements. It was identified that diseases of rigid-flexible composite pavements mainly appeared in the asphalt surface layer. Due to the huge modulus difference between the asphalt surface layer and the rigid base layer, the

收稿日期:2024-04-16(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2021YFB2601000);国家自然科学基金资助项目(编号:52278437,52378436);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2022JJ40479);湖南省交通运输厅科技创新计划项目(编号:202236);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(编号:kfj210401)

作者简介:刘朝晖,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:liuzhaohui@csust.edu.cn

\*通信作者:黄优,男,博士,副教授.E-mail:hyzju@csust.edu.cn

asphalt surface layer on the rigid base layer was more prone to produce compression-shear failure. The cracking of the rigid base layer and the bonding state between rigid and flexible layers also played an important role in the performance of asphalt pavements. Finally, the technology of improving the performance of rigid-flexible composite pavements was summarized from three aspects: shear resistance of asphalt surface layer, integrity of base panel, and bonding between the flexible and rigid layers. It was an effective way to improve the performance and durability of rigid-flexible composite pavements by conducting integrated structure-high-performance material design based on the structural mechanical characteristics of rigid-flexible composite pavements.

**Keywords:** road engineering; rigid-flexible composite pavement; structural mechanical characteristics; compressive-shear failure; structure-material integration; review

## 0 引言

过去 30 年,伴随着改革开放的步伐,中国道路基础设施建设取得了长足进步。2019 年,国务院颁布的“交通强国”纲要,坚持了交通在国民经济中的“先行官”地位,明确了增强交通设施耐久性和可靠性的战略需求。2022 年,交通运输部发布的《公路“十四五”发展规划》进一步要求推动基础理论和前沿关键技术研发:“提高公路基础设施耐久性和可靠度,降低全寿命周期成本。”可见,发展耐久可靠的公路交通基础设施是保障国家经济活力、提升人民生活水平的基础。

刚柔复合式路面是指在刚性基层上铺筑沥青面层的路面结构,是中国重载交通耐久性路面结构形式之一<sup>[1-2]</sup>,广泛用于新建刚性基层沥青路面、旧水泥路面加铺改造、机场混凝土道面加铺、桥隧铺装、山区短路基段等路面结构,尤其在矿区运输通道、南方湿热多雨、喀斯特岩溶、地质状况不良等特殊环境有着较好的应用。刚柔复合式路面具有整体强度高、行车舒适性好、使用寿命长、维修费用低等优点,随着运营年限的增长,全寿命周期的经济效益更加显著<sup>[3]</sup>。其中,刚性基层一般采用普通水泥混凝土板(PCC)、碾压混凝土板(RCC)、贫混凝土板(LCC)、连续配筋混凝土(CRC)等,具有优良的承载能力,是主要承重结构;沥青面层(AC)则起到扩散荷载应力、缓解温度应力和防止雨水下渗等作用,从而进一步提升路面的使用性能和服役寿命。刚柔复合式路面综合利用了刚性路面承载力高和柔性路面行车舒适的优点,并减少对中国石油资源的依赖;在保障路网畅通和通行质量、提高公路承载能力和可靠度、提升

道路耐久性方面具有优势。随着国家“全面小康”战略的开展以及在“合理利用土地和保护环境”基本国策的影响下,中西部山区以及东部平原地区高桥隧比公路基础设施的建设不断增加,加大了对刚柔复合式路面结构的需求。因此,深入研究刚柔复合式路面结构与材料,进一步完善和推广刚柔复合式路面技术,不仅有助于推动中国长寿命路面的发展,而且具有显著的经济和社会效益。

刚柔复合式路面在欧美发达国家研究起步较早且已经得到了较广泛的应用<sup>[4]</sup>。早在 20 世纪 30 年代英国就开始将沥青混凝土加铺在连续配筋混凝土上形成刚柔复合式路面结构,并在 20 世纪 40~50 年代应用于城市道路。美国于 20 世纪 50 年代开始采用加铺沥青层的方式来修复旧水泥路面和连续配筋混凝土路面,通常采取加铺 5~15 cm 沥青混合料,形成刚柔复合式路面结构来改善原水泥混凝土路面的使用性能,既提高了行驶的舒适性,又充分利用了旧水泥路面板的剩余承载能力<sup>[5-6]</sup>。西班牙于 1984 年至 1989 年修筑了总面积达 30 万 m<sup>2</sup> 的碾压混凝土基层复合式路面,并作为高等级干线公路。1988 年日本在 1990 年 6 月出版的《碾压混凝土路面技术指南(草案)》中记录了这种路面结构形式,2012 年 4 月 14 日开通的新东名(东京—名古屋)高速公路,71% 的路段和所有的隧道内均采用了复合式路面结构。随着对复合式路面研究的不断开展,为解决路面耐久性问题,加拿大、法国、澳大利亚等国也倾向于修筑刚柔复合式路面结构<sup>[7]</sup>。

20 世纪末,随着中国公路建设的大规模开展,开始研究复合式路面结构的相关技术,并在中国一些新建公路和旧路改造中得到应用<sup>[8-10]</sup>。2004 年江苏

省在沿江高速公路新修建了两段CRC+AC复合式路面结构试验路,其中沥青面层厚度为10 cm的试验路段长620 m,沥青层为6 cm的试验路段长度为580 m。2005年,河南省许尉高速采用了“柔刚柔”路面结构,该路面结构第三层沥青防水联结层可以黏结刚性层和土基,同时防止下渗水对刚性层的侵蚀,消除不均匀支撑。2005年京昆高速G5河北石家庄段一期40 km新建路采用了28 cm CRC+6 cm AC刚柔复合式路面结构,自2008年完工通车以来,路面服役性能至今保持良好。2013年,内蒙古准兴重载公路建成通车,在主线桩号K145~K155路段采用了“柔刚柔”路面结构,该路段行车安全舒适且降低了水损坏的现象。2014年,复合式路面技术应用于武汉市三环线南段野芷湖立交至庙山立交段,路面性能优良。从2021年底开始,CRC+AC的长寿命路面技术已在武汉东湖高新区大规模推广应用,应用道路总长超过200 km。

CRC+AC刚柔复合式路面在旧路提质改造工程中的应用也越来越多,尤其是南方湿热地区。2003年湖南省长潭高速改造项目选用CRC+AC复合式路面结构完成了44.76 km的改造工程,相对于直接加铺沥青面层的改造方案,不但节省了维修和养护费用,而且路面使用性能优良。2006年长永高速黄花至永安段旧路改造中修建了8 km的CRC+AC复合式路面。2011年7月至2012年8月,湖南省长益高速公路大修改造中铺筑了57.3 km的CRC+AC复合式路面。2012—2013年间,京港澳高速公路湘潭至耒阳段、耒阳至宜章段提质改造工程均采用了CRC+AC刚柔复合式路面结构,总里程达到226 km。

尽管复合式路面已经获得了较好的推广应用,但是在长期的服役过程中,其路用性能在交通荷载及环境作用的综合影响下不可避免出现衰减。然而,目前有关刚柔复合式路面的结构设计、服役性能预测、材料要求、养护维修等方面仍然存在一些不足,对复合式路面各结构层的力学行为、性能演化规律等认识也不够全面。现行规范没有基于刚柔复合式路面结构受力特性和破坏模式有针对性地提出复合式路面的结构设计方法及材料性能要求,结构设计及材料性能指标主要借鉴传统水泥路面或沥青路

面加铺设计方法。本文总结当前刚柔复合式路面各结构层主要力学响应特点,分析各影响因素的作用机制,厘清复合式路面的破坏模式及其病害特征,并总结了相应的结构优化和材料改良技术。研究结果对正确理解刚柔复合式路面结构力学行为、提升刚柔复合式路面性能具有重要意义,有利于刚柔复合式路面的推广和应用。

## 1 刚柔复合式路面结构力学行为特征

刚柔复合式路面是重载交通长寿命沥青路面结构的发展方向之一,其刚性基层一般采用水泥混凝土板,具有良好承载力;面层一般采用沥青混合料,典型刚柔复合式路面结构如图1所示。水泥混凝土的弹性模量一般为30 000 MPa左右,而沥青混合料的动态模量随温度和加载频率的变化而变化,为500~10 000 MPa,二者的模量相差甚远,导致刚性基层与沥青面层之间巨大的刚度差,造成刚柔复合式路面具有其独特的结构力学行为。

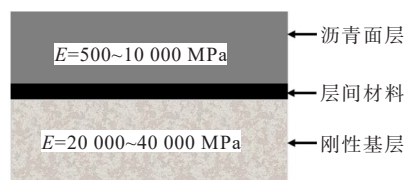


图1 典型刚柔复合式路面结构

Figure 1 Typical rigid-flexible composite pavement structure

### 1.1 刚柔复合式路面结构设计理论及方法

刚柔复合式路面是在弹性半空间地基上的水泥混凝土弹性薄板加铺沥青混凝土的复杂结构。目前,刚柔复合式路面结构主要借鉴水泥混凝土板上加铺沥青面层的设计及施工。国内外复合式路面的结构设计主要有经验法与力学-经验法。经验设计方法的典型代表是厚度补差法,如式(1)所示。厚度补差法要求设计者先设计一个新的沥青路面,然后从这一厚度中减去刚性基层结构的有效厚度,进而得到沥青加铺结构层厚度。

$$h_{OL} = h_n - h_e \quad (1)$$

式中: $h_{OL}$ 为加铺层厚度; $h_n$ 为新路面厚度,而 $h_e$ 为刚性基层有效厚度。

力学-经验法需用力学方法确定路面中的应力、

应变、挠度、变形,并将其与加铺层厚度、设计寿命等路面性能经验模型相关联,试算调整后得到所需加铺结构层厚度。不同设计方法的关键要素包括路面力学响应计算模型、破坏模式、设计指标、设计参数

等。目前主流的力学响应计算模型仍然是弹性层状体系,设计方式包括图表公式以及逐渐成为主流的计算机设计程序<sup>[11]</sup>。表1列出了国内外主要的复合式路面设计方法。

表1 国内外复合道面加铺层设计方法<sup>[12]</sup>

Table 1 Design methods for asphalt overlay for composite pavements in China and abroad<sup>[12]</sup>

设计规范	损坏模式	设计指标	力学计算模型	计算方法
《公路水泥混凝土路面设计规范》 (JTG D40—2011)	疲劳开裂	荷载疲劳应力、 温度疲劳应力	小弹性薄板模型	图表、计算公式
《民用机场沥青道面设计规范》(MH/T 5010—2017)	轮辙、疲劳开裂	CDF	多层线弹性模型	计算公式
Airport Pavement Design and Evaluation(USA)	路基车辙、沥青层 疲劳开裂	CDF	F:LED R:LED+FEM	设计软件
Design for Pavement Maintenance(England)	永久变形、疲劳开裂	路基垂直应变	……	图表、计算公式
French Design Manual For Pavement Structures (Frence)	沥青层底疲劳损伤、 永久变形	D(damage values, 同CDF)	多层线弹性模型	设计软件
Guide to Pavement Technology Part 2:Pavement Structural Design (Australia)	路基顶部永久变形、 沥青层底疲劳开裂	CDF	多层线弹性模型	设计软件

注:CDF:Cumulative Damage Factor;F:Flexible Pavement; R:Rigid Pavement; LED:Layered Elastic Design; FEM:Finite Element Method。

从表1可以看出:现有对刚柔复合式路面设计方法的研究通常考虑两大类病害:沥青层的裂缝和车辙,对应考察的力学响应包括刚性基层层底拉应力、沥青层底部的水平应变、沥青层剪切应力、刚性基层与沥青层的层间剪应力,并且已将反映长期服役性能的疲劳应力和累计损伤纳入设计指标。

### 1.2 复合式路面沥青面层力学行为

复合式路面中水泥混凝土板(刚性基层)上的沥青层(柔性面层)经受着各种复杂应力作用,包括交通荷载应力、环境温湿度场变化等。国内外学者对复合式路面沥青面层荷载应力分布、温度场与温度应力特性做了大量工作,研究了复合式路面结构力学行为特点及其影响因素。

#### 1.2.1 沥青面层荷载应力

由于刚性基层与柔性面层之间模量的巨大差异,在三向非均布双轮荷载作用下,刚柔复合式路面主要由刚性基层承受弯拉应力,而沥青面层基本处于受压状态。且在刚性基层的限制和约束下,沥青面层的剪应力水平较高。因此有研究认为压剪应力成为复合式路面沥青层主要受力模式,这与传统柔性基层沥青面层底部受力是不相同的(图2、3)<sup>[13-14]</sup>。

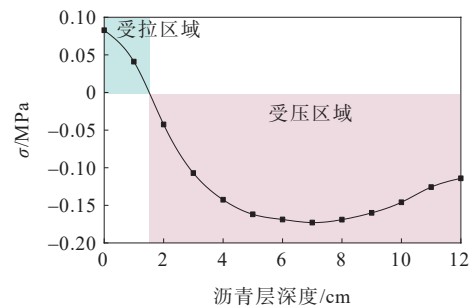


图2 沿深度方向复合式路面沥青层应力状态变化<sup>[13]</sup>

Figure 2 Changes in stress state of asphalt layer of composite pavement along depth<sup>[13]</sup>

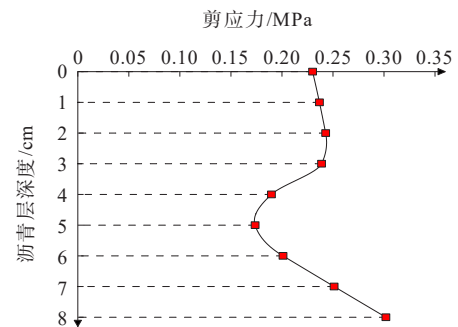


图3 沿深度方向复合式路面沥青层剪应力变化<sup>[14]</sup>

Figure 3 Changes in shear stress of asphalt layer of composite pavement along depth<sup>[14]</sup>

李盛等<sup>[15-16]</sup>对轮载作用下复合式路面沥青层底面的应力分布特征进行了分析,轮载作用下沥青层底剪应力与拉压应力分布如图4、5所示。

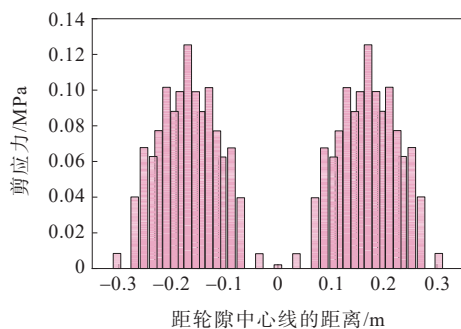


图4 垂直行车方向AC层底面剪应力分布<sup>[16]</sup>

Figure 4 Distribution of shear stress on bottom of AC layer in vertical traveling direction<sup>[16]</sup>

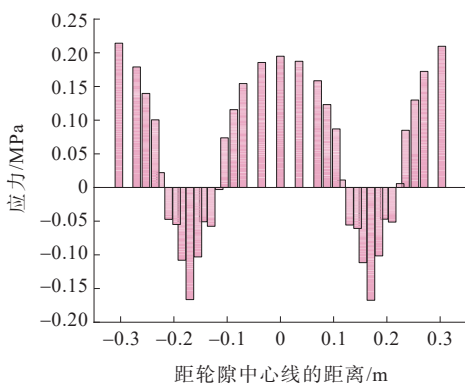


图5 垂直行车方向AC层底面纵向应力<sup>[16]</sup>

Figure 5 Longitudinal stress on bottom of AC layer in vertical traveling direction<sup>[16]</sup>

由图4、5可知:沥青层底面在轮载作用位置处主要受到剪切应力和压应力,在轮隙中心及轮胎边缘处沥青面层底面处于受拉状态。沥青面层剪应力与拉压应力在车轮荷载处关于轮隙呈对称分布,轮载中心线为剪应力与压应力不利位置,而轮隙中心线为拉应力不利位置。

复合式路面沥青层厚度、刚性基层表面状况以及刚柔层间结合状况是影响沥青层底受力状态的主要结构因素。合理设计沥青加铺层厚度、控制刚性基层裂缝宽度、改善刚柔层间结合状态,对改善复合式路面受力状况、减小复合式路面沥青层推移与反射裂缝等病害具有重大意义。相对于半刚性基层沥青路面、全柔式沥青路面,复合式路面沥青层厚度较小,一般在14 cm以内。沥青层厚度从6 cm增加到14 cm对表面剪应力影响较小,但是能显著降低底部

剪应力(图6)。基层裂缝宽度对沥青层底部应力状态影响较大,一般来说沥青层底面的剪应力随刚性基层裂缝(纹)宽度增加而增大(图7)。

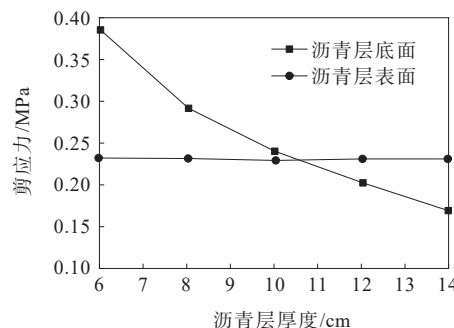


图6 沥青层厚度对剪应力的影响<sup>[16]</sup>

Figure 6 Effect of asphalt layer thickness on shear stress<sup>[16]</sup>

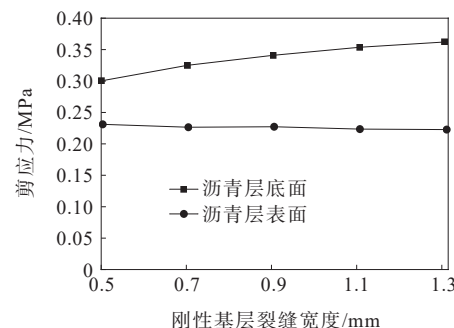


图7 基层裂缝宽度对剪应力的影响<sup>[16]</sup>

Figure 7 Effect of crack width of base layer on shear stress<sup>[16]</sup>

### 1.2.2 沥青面层温度应力

如图8所示,在服役过程中路面结构温度处于不断变化的过程,影响复合式路面结构温度场的环境因素主要有大气热交换、太阳辐射、基层与面层之间的热传递等。温度变化对复合式路面沥青层性能的影响主要表现在两个方面:热膨胀和收缩导致沥青加铺层与混凝土之间的不均匀形变,在接缝处沥青面层底部产生应力集中;另一方面,由于沥青结合料的黏弹性,沥青混凝土力学性能对温度极其敏感:冬季低温使沥青混凝土更硬、更脆,在温度荷载作用下裂缝更容易扩展<sup>[17]</sup>。

目前,复合式路面结构沥青面层主要考虑其功能性,相较于半刚性基层沥青路面、全柔式沥青路面等来说结构层厚度一般较薄,因而沥青层温度场和温度应力响应规律较普通沥青路面和刚性路面均有所不同,复合式路面沥青层温度应力日变化规律如图9所示。许路凯<sup>[14]</sup>、李盛等<sup>[16]</sup>研究了CRC+AC复合式路面结构温度场及温度应力规律,发现增加AC

层厚度可以有效地降低 AC 层和 CRC 层的最大温度应力。增加 AC 层厚度对其底面的最大温度应力降低效果最显著。AC 层模量对 AC 层温度应力也有较大影响,模量从 1 200 MPa 增加到 1 800 MPa 后,AC 层表面最大温度应力增加了 25.9%,AC 层底面最大温度应力增加了 33.1%。

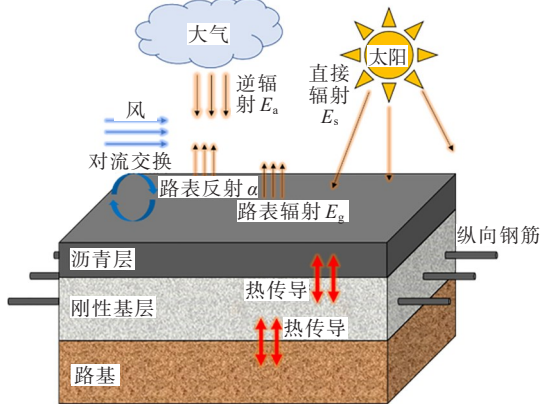


图 8 复合式路面结构环境温度示意图

Figure 8 Ambient temperature of composite pavement structure

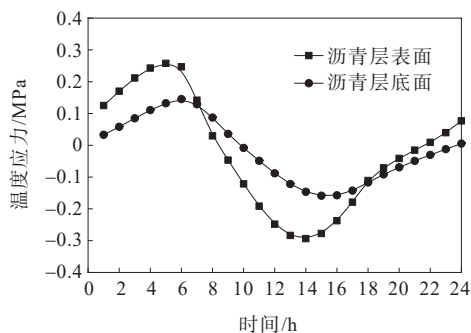


图 9 复合式路面沥青层温度应力变化规律<sup>[14]</sup>

Figure 9 Temperature-induced stress change rule of asphalt layer of composite pavement<sup>[14]</sup>

沥青混合料作为一种温度敏感性材料,考虑沥青层的温度依赖特性,黄优等<sup>[18]</sup>研究发现温度和沥青加铺层厚度是影响复合式路面沥青层压剪强度的两个主要因素,主要原因在于沥青混合料是一种典型的黏弹性材料,力学性质受温度、荷载模式、加载时间的影响最为显著。沥青路表温度收缩产生的疲劳损伤演化呈非线性衰减规律,采用黏弹性连续损伤理论可以有效模拟沥青在恒定温度及变温条件下材料内的损伤演化<sup>[19-20]</sup>。

### 1.3 复合式路面刚性基层力学行为

#### 1.3.1 沥青加铺层对刚性基层力学响应影响

由于沥青面层的分散荷载、保温、隔热作用,复

合式路面的刚性基层温度场以及温度应力、荷载应力与普通水泥混凝土路面有较大的不同<sup>[21]</sup>。复合式路面刚性基层的力学分析主要考虑两个方面:① 沥青加铺层对刚性基层荷载应力扩散的作用,如图 10 所示;② 沥青加铺层对刚性基层温度应力及温度翘曲应力的影响,如图 11 所示。一般认为,刚性基层上加铺的沥青层可以有效地降低温度日变化和季节性变化引起的混凝土板的温度场变化,从而减轻刚性基层接缝或裂缝两侧混凝土板产生热运动,但是细微的相对热运动仍然存在。

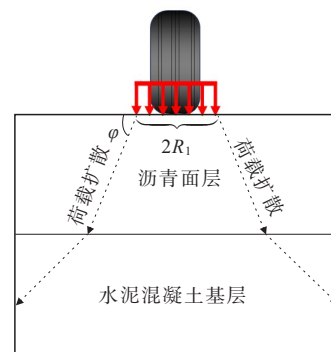


图 10 沥青面层荷载扩散作用示意图

Figure 10 Load spreading effect of asphalt surface layer

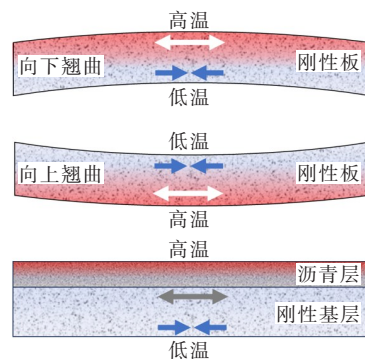


图 11 温度作用下刚性板翘曲变化示意图

Figure 11 Curling changes of rigid plate induced by temperature

混凝土板的翘曲会在沥青面层和刚性基层的界面上产生拉应力和剪应力,再加上交通荷载的作用,可能会导致界面的黏结失效以及沥青层的破坏,如坑洞、滑移和疲劳开裂等,靠近接缝或混凝土板裂缝的沥青面层反射裂缝传播也会加剧<sup>[21-22]</sup>。研究发现,沥青面层厚度增加可以有效降低路面结构温度梯度(图 12),且沥青面层厚度显著影响复合式路面刚性基层温度应力(图 13)。在实际工程中,可适当增加

沥青面层厚度以减小沥青层的温度梯度,降低应力水平,提高复合式路面使用性能。

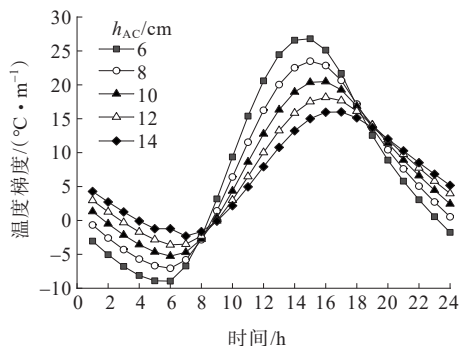


图12 AC层厚度对刚性基层温度梯度的影响<sup>[13]</sup>

Figure 12 Effect of AC layer thickness on temperature gradient of rigid base<sup>[13]</sup>

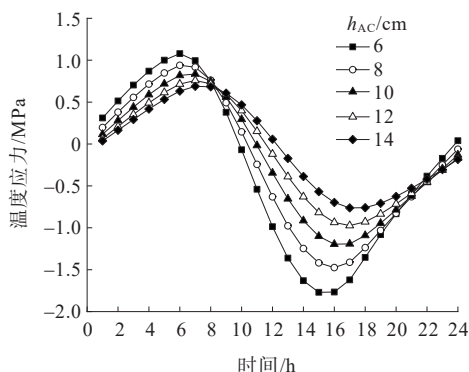


图13 AC层厚度对刚性基层最大温度应力的影响<sup>[13]</sup>

Figure 13 Effect of AC layer thickness on maximum temperature-induced stress of rigid base<sup>[13]</sup>

### 1.3.2 连续配筋混凝土及其端部处理技术

连续配筋混凝土基层复合式路面(CRC+AC)由于混凝土板内配置了纵向连续钢筋,能够有效控制基层的裂缝间距及裂缝宽度,是目前使用越来越广泛的刚性基层结构。钢筋密布的横向肋纹可以为结构提供机械咬合作用力,使CRC能保持良好的表面形态与力学性能,因此CRC基层具有承载能力强、刚度大、耗能能力强、滞回曲线丰满等优点。CRC基层芯样内部钢筋横向肋纹与混凝土咬合效果如图14所示。

由于AC层的“控温”效应,使得CRC+AC复合式路面结构与连续配筋混凝土路面(CRCP)结构的配筋设计也有所不同。在中国的CRC+AC复合式路面设计中,一直按普通CRCP的配筋设计方法进行CRC层的配筋设计,所采用的纵向钢筋应力计算公式见式(2)。连续配筋混凝土路面的纵向配筋设计

主要取决于钢筋和混凝土的材料参数及所在地区的日平均最高气温与最低气温之差 $\Delta T$ ,实际上,由于AC层的存在, $\Delta T$ 相应减少,CRC层的配筋率也可以相应减少<sup>[23]</sup>。



图14 CRC基层钻芯试样图

Figure 14 Drilled core specimen of CRC base layer

$$\sigma_s = E_s (\alpha_c \Delta T \lambda_{st} + \alpha_s \Delta T) = 320 \text{ MPa} < f_{sy} \quad (2)$$

式中: $\sigma_s$ 为钢筋应力; $E_s$ 为钢筋弹性模量; $\alpha_c$ 为混凝土线膨胀系数; $\Delta T$ 为所在地区的日平均最高气温与最低气温之差; $\lambda_{st}$ 为钢筋温度应力系数; $\alpha_s$ 为钢筋线膨胀系数; $f_{sy}$ 为钢筋屈服强度。

CRC板横向裂缝状态对复合式路面沥青层影响较大,但传统的道路结构计算程序无法分析CRC层带缝状态下复合式路面结构的力学响应,可以采用有限元方法研究带裂缝的刚柔复合式路面结构。顾兴宇等<sup>[24]</sup>对刚柔复合式路面的瞬态温度场进行了分析,研究了沥青面层厚度对CRC板温度场和裂缝间距的影响规律,利用解析法推导了裂缝控制指标的计算公式。李盛等<sup>[23]</sup>、刘朝晖<sup>[25]</sup>利用空间等参元构造了CRC+AC刚柔复合式路面的有限元分析模型,依托长潭高速、长永高速和325国道广东恩平段3条公路的大修工程,进行了CRC+AC温缩应力与工程实际的应用研究,依据规范分析了裂缝的最佳间距(1.5~2.0 m)和裂缝的合适宽度(0.7~1.0 mm),并提出AC厚度、CRC厚度、钢筋直径与间距、路面材料等CRC+AC设计指标。

CRC+AC刚柔复合式沥青路面的刚性基层有两种配筋方式:一种是在刚性基层全横断面上均配置纵向钢筋,此时端部在横断面上的变形与位移协调一致,没有位移差,一般不会产生纵缝处两边CRC板变形不协调的破坏现象;另外一种方式从经济性出发,只在刚性基层行车道位置处配置钢筋形成CRC板,而硬路肩处采用素混凝土板,不配置纵向钢筋,或者减少配筋率(为行车道配筋率的50%),路面

结构也是安全的,可节约近 1/3 的钢筋用量,从而节约投资。

但由于温度变化会产生温度变形,而 CRC 板和素混凝土路肩板变形特性不同,采用第二种配筋方式存在 CRC 板和硬路肩素混凝土板之间变形不协调的问题,见图 15。由于 CRC+AC 路面结构不设胀缩缝,CRC 板受环境温度变化影响会产生较大的变形,尤其是在端部,年温度变化条件下的端部自由位移最大,有可能超过 5 cm。端部位置的素混凝土路肩板中拉杆承受的剪应力与拉应力最大,因此对端部的处理十分重要。

刘朝晖<sup>[26]</sup>将地基摩阻力及路肩边板不配筋时纵缝拉杆对 CRC 板的阻碍作用考虑在内,分析了 CRC 板在温度变化下产生的变形,并推导了不同情况下 CRC 板端部与滑动区位移公式(表 2)。主要的结论如下:① CRC 板端部位移随着地基摩阻力的增大而

逐渐减小;② 由于纵缝拉杆的约束作用,有纵缝拉杆的 CRC 板端部位移在相同的地基摩阻力下小于普通 CRC 板的端部位移;③ 由于受到各方面的影响与约束,CRC 板端部实际位移量为 2~3 cm,与现场测试结果相符合。

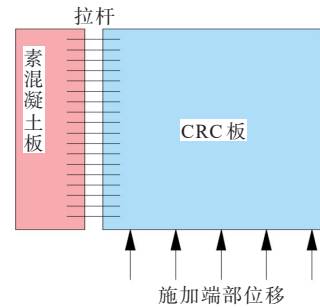


图 15 硬路肩不配纵向钢筋时示意图

Figure 15 Hard shoulder without longitudinal steel reinforcement

表 2 CRC 板端部位移分析模型<sup>[26]</sup>

Table 2 CRC plate end displacement analysis model<sup>[26]</sup>

类别	计算公式
不受拉杆影响的 CRC 板端部位移公式	$u = \frac{1}{2} \times \left( \frac{\gamma f}{E_1} \right) x^2 + \left( \alpha \Delta T - \frac{\gamma f}{E_1} L_1 \right) x$
CRC 板在边板不配筋时纵缝拉杆的约束下, 端部位移计算公式	$u = \frac{1}{2} \times \frac{(b_1 + b_2) \gamma f}{b_1 E_1} x^2 + \left[ \alpha \Delta T - \frac{(b_1 + b_2) \gamma f}{b_1 E_1} L_1 \right] x$
考虑边板纵缝拉杆约束条件下滑动区长度 $L_1$ 的计算公式	$L_1 = \frac{\alpha E_1 \Delta T}{\gamma f} \times \frac{b_1}{(b_1 + b_2)}$

注:  $u$  为端部自由位移;  $\gamma$  为混凝土板重度 ( $\text{N/m}^3$ );  $f$  为摩阻系数;  $E_1$  为 CRC 板 I 方向 (路面行车方向) 弹性模量;  $\alpha$  为 CRC 板温度线膨胀系数;  $\Delta T$  为温度差;  $L_1$  为滑动区长度;  $b_1$  为微分单元体宽度 (CRC 板);  $b_2$  为素混凝土板宽度。

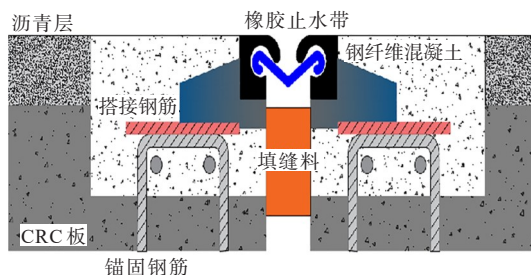
刘朝晖<sup>[26]</sup>研究了凸形钢筋混凝土锚梁锚固结构、宽翼缘工字钢梁和桥梁伸缩缝端部滑动结构 3 种方式应用于 CRC+AC 端部处理的适用性, 结果发现: 凸形钢筋混凝土锚梁端部锚固结构及宽翼缘工字钢梁端部滑动结构均存在接缝过多或接缝处变形量大等问题, 影响复合式路面使用寿命。通过将桥梁伸缩缝端部滑动结构应用于复合式路面端部处理的工程实践发现 (图 16), 这种方式可有效控制端部裂缝数量和宽度, 其适用性较强, 可根据端部变形量选用不同的型号, 具有施工技术成熟、使用质量好、使用寿命较长等优点。

#### 1.4 复合式路面层间应力响应

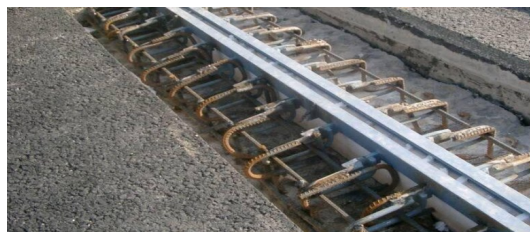
沥青混合料是一种随机颗粒集合体, 其空隙率会导致界面处存在非接触点和不可预测的潜在损

伤。因此, 刚柔复合式路面的沥青面层与刚性基层的层间状态并不是理想的完全结合。柔性面层和刚性基层之间的层间状态对刚柔复合式路面的力学响应和结构状态影响很大。良好的层间结合, 能够更有效地传递面层与基层之间的荷载与变形, 一定程度上缓解表面 bottom-up 裂纹的产生。而当层间黏结不足时, 上下两个结构层相互滑移, 并导致应力、应变的突变, 从而加剧界面滑移、沥青面层开裂及推移、压实困难等问题。

为了研究刚性基层与沥青面层之间的层间结合状况, 国内外学者开展了大量室内试验及数值仿真计算来研究复合式路面的刚-柔层间界面剪应力, 并研发了一系列的剪切强度及剪切疲劳性能试验装置以评价层间界面性能, 典型层间剪切强度曲线如图 17 所示。



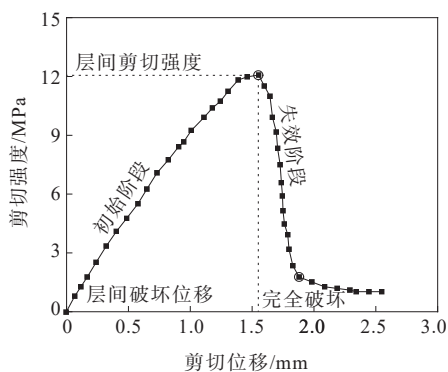
(a) 示意图



(b) 施工图

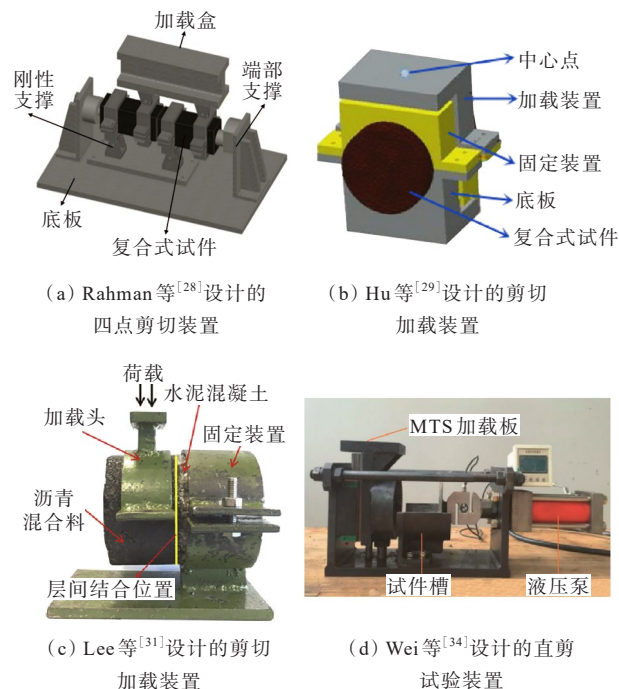
图16 CRC+AC复合式路面端部伸缩毛勒缝结构

Figure 16 End Maole expansion joint structure of CRC+AC composite pavement

图17 典型界面剪切强度变化曲线<sup>[27]</sup>Figure 17 Typical interfacial shear strength change curve<sup>[27]</sup>

Rahman等<sup>[28]</sup>开发了四点剪切试验装置测试沥青路面层间界面黏结的疲劳性能,与大多数现有剪切试验设备相比,这种装置具有以下优点:使用典型的梁形试样,消除界面处的弯矩并施加纯剪切载荷以及有效利用加载系统来施加剪切力;Hu等<sup>[29]</sup>自行设计了用于测试双层结构试件抗剪强度的装置,该装置利用万能试验机UTM提供的加载室和温度室,实现了测定不同温度下的界面剪切强度;Sun等<sup>[30]</sup>制备了不同预设裂纹类型的复合式路面试件,通过三点弯曲破坏试验和三点弯曲疲劳试验评价高黏沥青砂应力吸收层(HVASAL)和橡胶沥青应力吸收层(RASAL)的抗裂性能,并探讨了3种类型裂纹的扩展机理;Wei等<sup>[31]</sup>、Zhao等<sup>[32]</sup>设计了可同时施加正应

力和剪应力的直剪试验装置,对影响复合式试件界面黏结强度的因素进行了一系列试验研究;Nian等<sup>[33]</sup>设计并组装了沥青路面层间剪切疲劳试验装置,研究了剪应力比、加载频率、温度、冻融循环等因素对层间剪切疲劳的影响规律。几类典型的室内剪切试验加载装置如图18所示。

图18 剪切试验加载装置<sup>[28,29,31,34]</sup>Figure 18 Shear test loading device<sup>[28,29,31,34]</sup>

剪切试验装置及大量的室内试验为探明复合式路面层间力学性能提供了数据支撑。在沥青层和刚性基层交界面,由于材料属性的巨大差异,很容易发生剪切破坏,而层间结合状态是影响层间剪切应力的重要因素,黄优等<sup>[35]</sup>对不同层间状态复合式路面剪应力分析的结果表明层间完全连续时剪切应力最小,而层间结合不良时剪切应力水平更高且在层间位置出现应力突变(图19)。

关于温度对复合式路面层间抗剪性能的影响已形成共识,多数研究结果都表明随着温度的升高,界面剪切强度逐渐降低<sup>[28]</sup>,如图20所示。一般来说,复合式路面层间界面疲劳寿命和剪切模量随着加载频率的增加而增加,随剪切应力水平的增加而减小,且在较低的温度下降低更明显。复合式路面试件的层间剪切疲劳寿命对应力水平的变化和加载频率非常敏感,剪切疲劳寿命与应力水平在双对数坐标下呈线性关系<sup>[33]</sup>。温度在复合式路面层间界面失效

模式中起主导作用,具体而言,复合式路面层间材料的黏附力在高温下会显著降低<sup>[36]</sup>,主要原因在于沥青为温度依赖性材料,这也意味着脱黏现象经常发生在夏季高温时刻,不同季节下层间拉应力变化规律如图 21 所示<sup>[37]</sup>。与此同时,界面黏结在高温下更容易发生塑性破坏,而在低温下更容易发生脆性破坏<sup>[31-32]</sup>。

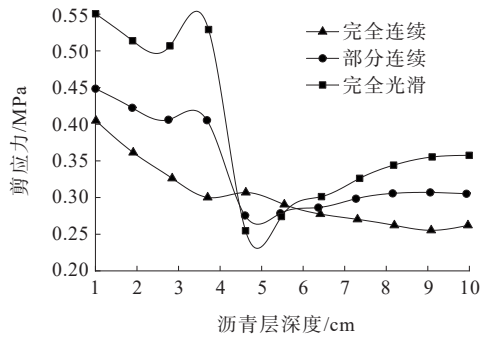


图 19 不同层间结合状态下沥青面层剪应力分布<sup>[35]</sup>

Figure 19 Distribution of shear stress in asphalt surface layer at different interlayer bonding states<sup>[35]</sup>

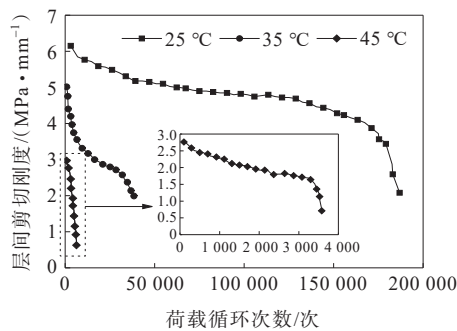


图 20 3种试验温度下界面剪切刚度随加载循环次数的变化规律<sup>[28]</sup>

Figure 20 Evolution of interfacial shear stiffness with number of loading cycles at three test temperatures<sup>[28]</sup>

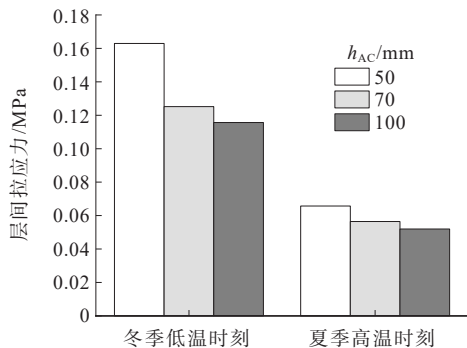


图 21 不同季节下沥青厚度对层间界面拉应力的影响<sup>[37]</sup>

Figure 21 Effect of asphalt thickness on interlayer interfacial tensile stress in different seasons<sup>[37]</sup>

通过合理的层间处理技术(构造基层表面纹理、铺设应力吸收层)可以提高层间抗剪强度并减小剪应力与应力突变,能有效地避免层间剪切破坏。增加沥青层厚度也能一定程度上缓解层间受力,提高复合式路面服役水平<sup>[34]</sup>。

## 2 刚柔复合式路面破坏模式

刚柔复合式路面在长期服役过程中,受严酷环境及重载交通影响,不可避免地出现各种破坏。刚柔复合式路面设计指标的选取应该考虑其破坏模式。由于刚柔复合式路面的刚性基层具有很高的强度和刚度,相比传统的沥青混凝土路面路表弯沉值很小;同时刚性基层与沥青面层的模量比很大,沥青面层层底大部分处于受压和剪切状态。因此,继续沿用路表弯沉和沥青层底拉应力作为刚柔复合式路面沥青面层的控制指标不再合适,需对刚柔复合式路面破坏模式展开针对性的研究。图 22 为复合式路面常见几类破坏形式。

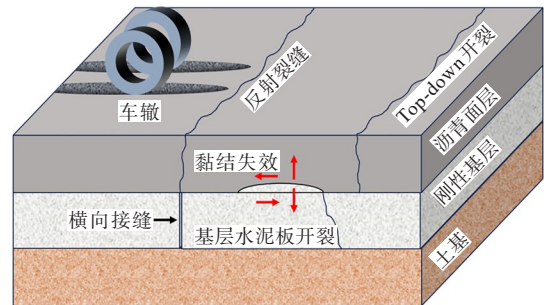


图 22 复合式路面典型病害

Figure 22 Typical diseases of composite pavement

### 2.1 反射裂缝

#### 2.1.1 复合式路面反射裂缝扩展机理

反射裂缝是指沥青面层在刚性基层接缝、裂缝位置及其附近出现的早期裂缝,因此,反射裂缝一般出现在旧水泥路面加铺、带接缝的普通水泥混凝土基层复合式路面。反射裂缝产生及扩展的原因比较复杂。有观点认为:温度应力引起反射裂纹的产生并参与了反射裂纹的初始发展<sup>[38]</sup>,而荷载应力则加速了反射裂纹的发展<sup>[39-40]</sup>。对于不含初始裂缝的路面,温度降低产生的温度收缩应力对沥青面层裂缝的影响要比车辆荷载产生的影响更大<sup>[41]</sup>。Liu 等<sup>[42]</sup>对反射裂缝形成机理进行了分析,如图 23 所示。

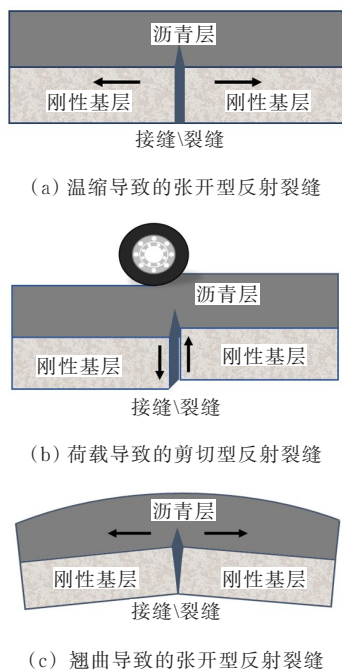


图23 反射裂缝形成机理

Figure 23 Reflection crack formation mechanism

通过控制反射裂缝防治复合式路面劣化已成为各国众多学者关注的焦点<sup>[43]</sup>。在工程应用中,采用连续配筋混凝土、钢纤维混凝土、玄武岩纤维混凝土作为刚性基层,能有效减小刚性基层的裂缝宽度,因此显著降低反射裂缝发生的概率<sup>[5]</sup>。研究发现在一定范围内增加沥青面层厚度,也可以降低沥青加铺层底部的拉应力,起到减缓裂缝起裂及扩展的作用<sup>[44]</sup>。此外,设置应力吸收层可以降低混凝土节点位移引起的临界应力,起到耗散断裂能或吸收应力的作用,应力吸收层良好的受力和形变特性确保其可以更好地在刚柔复合式路面中发挥裂缝反射预防功效。Liu等<sup>[42]</sup>分别对直接加铺沥青混合料层、铺装浸渍非织造土工布层和增设抗裂调平层3种层间抗裂材料类型的复合试件进行了单点载荷下的弯曲疲劳试验和偏心载荷下的剪切疲劳试验,推荐使用抗裂调平层来防止反射裂缝。

断裂力学与计算机技术的发展推动了复合式路面沥青层反射裂缝扩展仿真分析与机理研究。Xie等<sup>[38,44]</sup>采用修正的Paris公式及J积分描述裂纹萌生和扩展阶段的特征取得了较好的效果;Uzan等<sup>[45]</sup>基于断裂力学理论,采用有限元方法分析了沥青路面反射裂缝的扩展机理;Dave等<sup>[46]</sup>利用有限元软件分析了沥青层内裂缝尖端范围内的温度应力分布,研

究了轮载作用下反射裂缝扩展规律;葛辉等<sup>[47]</sup>使用有限元软件建立含裂缝的沥青路面模型,并分析计算裂缝的动态应力强度因子,发现增加面层及基层厚度可以减缓反射裂缝扩展的速度;Luo等<sup>[41]</sup>建立了预设裂缝的连续配筋混凝土复合式路面三维有限元模型,分析了反射裂缝的不利荷位,研究了AC层的预裂纹深度比、瞬时温度变化、横向裂纹荷载传递能力对反射裂缝的影响。

### 2.1.2 刚性基层状况评价方法与病害控制

刚柔复合式路面的刚性基层状况变差、混凝土板接缝或裂缝的传荷性能不足是影响反射裂缝扩展的重要因素。评价混凝土板裂缝或接缝处的传荷性能,常用的设备有落锤式弯沉仪(Falling Weight Deflectometer, FWD)和交通速度弯沉计(Traffic Speed Deflectometer, TSD)。交通速度弯沉计TSD可以正常车速向前移动并收集1.0 m分辨率的路面结构内部数据,获取基层支撑与板底脱空信息。目前,更多地使用落锤式弯沉仪(FWD)量测横向裂缝两侧面层板边缘弯沉(挠度),采用挠度传荷系数表征水泥混凝土路面裂缝/接缝的传荷能力,如图24所示。

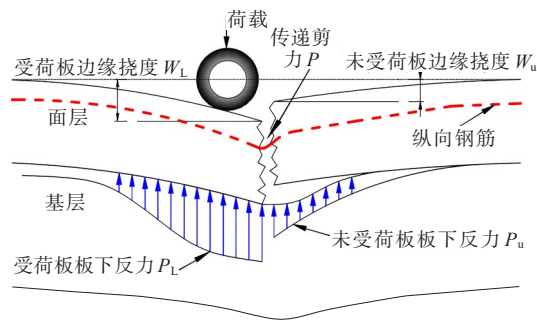


图24 刚性基层横向裂缝传荷机理图

Figure 24 Load transfer mechanism of transverse cracks in rigid base layer

FWD测试接缝处的荷载传递评估,一般直接在混凝土板进行测试,这导致FWD测试主要在旧路加铺之前和沥青覆盖层铣削后进行,限制了其在复合式路面病害监测中的应用。Al-Abbasi等<sup>[48]</sup>通过量化沥青加铺层对挠度测量、荷载传递效率和空隙检测结果的影响,提高了FWD对评估复合式路面中混凝土接缝状况的准确性;Wang等<sup>[49]</sup>根据路面接缝传荷效率降低的真实情况,建立了考虑接缝传荷效率的沥青加铺层有限元模型,研究了复合式路面沥青加

铺层参数对沥青层底力学响应的影响,提出了水泥混凝土板接缝破损情况下的沥青加铺层结构设计方案。目前,有研究采用1.0 m分辨率的交通速度弯沉计TSD能精确捕获刚性基层接缝/裂缝处对施加载荷的响应,但是数据的噪声水平较高,因此Scavone等<sup>[50]</sup>基于BP神经网络的去噪原理,提高了从TSD检测数据中对刚性基层接缝/裂缝处内部缺陷识别的效率。

## 2.2 Top-Down 裂缝

### 2.2.1 复合式路面 Top-Down 裂缝形成机理

Top-Down开裂是在车辆荷载和温度应力共同作用下产生的,主要是表面温度疲劳开裂以及高应力水平下的剪切疲劳开裂,也是沥青路面多种病害的诱因。Top-Down裂缝产生后,由于复合式路面的沥青面层普遍较薄,裂缝易贯穿整个沥青层,直接影响沥青层的使用寿命。Top-Down裂缝扩展机理如图25所示。

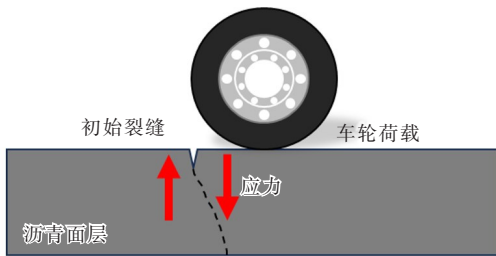


图25 Top-Down裂缝扩展机理图

Figure 25 Top-Down crack propagation mechanism

国外学者普遍认为轮载附近的局部应力集中、温缩应力、沥青混合料老化及离析等是Top-Down开裂的主要原因<sup>[51]</sup>。梁悦等<sup>[52]</sup>使用断裂力学和有限元方法对Top-Down裂缝的产生及扩展机理进行分析,认为Top-Down裂缝是路表微裂缝在温度疲劳应力作用下不断扩展形成的。李盛等<sup>[13,53,54]</sup>通过建立非均布三向荷载模型模拟轮胎对复合式路面沥青层的实际作用,发现轮胎边缘处与路面的接触应力较大,使得沥青混合料表面初始缺陷容易发展成Top-Down裂缝。

复合式路面中交通荷载引起的Top-Down裂缝疲劳形态主要为复合型开裂,Top-Down裂缝对沥青面层疲劳寿命的影响主要集中在面层上部。适当减小沥青层模量和增加沥青层厚度可以有效地减缓Top-Down裂缝在沥青面层内部的疲劳扩展速率(图26、27)。Rith等<sup>[55]</sup>的研究结果表明:水平荷载对复合

式路面结构的Top-Down开裂也有显著影响:随着水平荷载的增长,沥青层表面的拉应变显著增加,并建议在路面设计中考虑水平荷载。

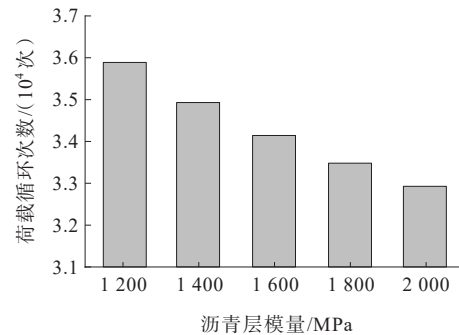


图26 不同沥青层模量下裂缝贯穿面层所需的荷载循环次数<sup>[56]</sup>

Figure 26 Number of load cycles required for cracks to penetrate surface layer under different asphalt layer moduli<sup>[56]</sup>

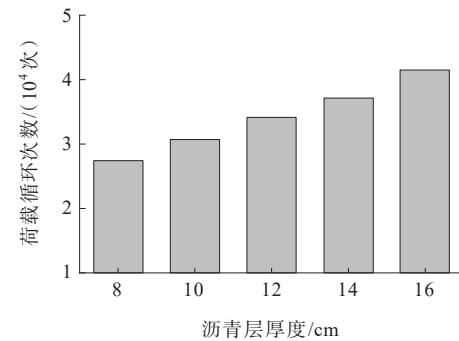
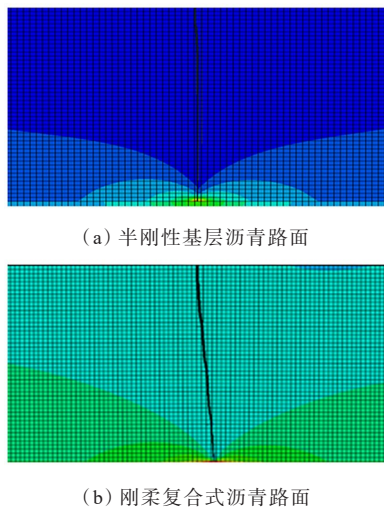


图27 不同沥青层厚度下裂缝贯穿面层所需的荷载循环次数<sup>[56]</sup>

Figure 27 Number of load cycles required for cracks to penetrate surface layer under different asphalt layer thickness<sup>[56]</sup>

### 2.2.2 复合式路面 Top-Down 裂缝扩展特征

通过长期对复合式路面沥青层服役状况跟踪观测,结合Top-Down裂缝扩展进行仿真分析发现,复合式路面Top-Down裂缝一般在服役3年左右出现,裂缝位置主要在车轮轮迹处;裂缝特征与半刚性基层沥青路面具有明显差异:与半刚性基层沥青路面相比,刚柔复合式沥青路面Top-Down裂缝发展方向倾斜向下(图28的仿真计算和图29的钻芯取样结果基本吻合),扩展路径较长。在沥青层厚度相同时,刚性基层沥青路面Top-Down裂缝扩展完成所需荷载循环次数较半刚性基层沥青路面更多,换言之,相比半刚性基层沥青路面结构,刚柔复合式路面结构能在一定程度上延缓Top-Down裂缝扩展<sup>[56]</sup>。

图28 Top-Down裂缝扩展路径<sup>[56]</sup>Figure 28 Top-Down crack propagation path<sup>[56]</sup>图29 长潭高速公路钻芯试样<sup>[56]</sup>Figure 29 Drilled core specimen of Changsha-Xiangtan expressway<sup>[56]</sup>

基于上述研究现状分析,交通荷载和温度应力共同作用是导致 Top-Down 开裂与扩展的主要原因。刚柔复合式沥青路面在延缓 Top-Down 裂缝扩展方面相对于半刚性基层沥青路面具有一定优势。大量 Top-Down 裂缝开裂方面的研究可以为复合式路面设计与研发提供理论基础,但是由于复合式路面结构和材料的特殊性及其复杂性,仍需结合计算仿真和实体工程观测等手段,进一步提出沥青面层 Top-Down 裂缝的防治方法。

## 2.3 沥青面层车辙

### 2.3.1 车辙成因分析

车辙作为沥青路面的一种常见破坏形式,主要表现为轮迹带范围内的路面下凹,也可伴随轮迹带边缘的隆起。在城市道路中的公交车站、红绿灯路口、高速公路上收费站前以及长大纵坡路段、渠化交通以及车辆频繁启动制动等,会对路面造成严重的

车辙和推移等破坏。根据成因的不同,沥青路面车辙主要分为3类:① 沥青面层的剪切失稳变形;② 路基顶部竖向变形;③ 沥青层表面磨耗。对于刚柔复合式沥青路面而言,由于基层的刚度很大,显著降低了路基的压缩变形,因此,车辙的主要原因是沥青面层在重复荷载作用下的剪切流动变形,如图30所示。

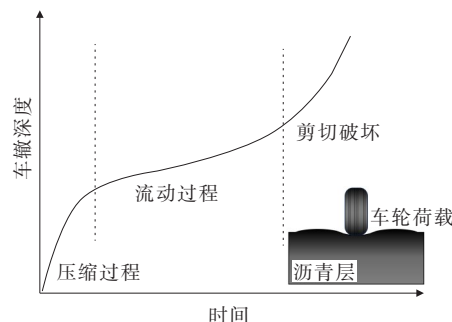


图30 复合式路面沥青层车辙形成过程

Figure 30 Formation process of rutting in asphalt layer of composite pavement

车辆轴载、车速对沥青车辙的产生影响较大,沥青面层的厚度和混凝土板的厚度变化对车辙的产生也具有一定影响。通过全尺寸加速路面试验(APT)对复合式路面结构沥青层车辙进行研究,试验结果表明:温度、行车状态和界面黏结条件的变化显著影响复合式路面沥青层车辙特征,车辙深度与温度和荷载循环次数呈幂函数关系、与轮胎压力和覆盖层厚度呈线性关系<sup>[57]</sup>。周刚等<sup>[58]</sup>通过室内大型足尺环道路面加速加载试验证明了沥青路面车辙变形主要局限于20 cm 沥青层内;徐世法等<sup>[59]</sup>以轮辙试验、环道试验和蠕变试验为基础,分析路面车辙的影响因素,提出了防治车辙的有效措施;袁明<sup>[60]</sup>对工程中常采用的两种黏结层材料:稀浆封层、橡胶沥青碎石封层的复合式路面试件进行了室内车辙试验及浸水车辙试验,比较分析了温度、湿度等因素对复合式路面抗车辙性能的影响。

开展车辙试验是分析沥青路面车辙的有效手段,但成本较高,且不适合进行多变量分析。采用有限元法可以较好地模拟各类材料性能、温度和动态载荷等,是对路面车辙研究的有效补充。李盛等<sup>[61]</sup>采用有限元软件模拟连续变温条件下CRC+AC复合式路面的温度场,分析一定温度场下的车辙厚度与结构层厚度的关系,认为车辙深度随着AC层厚度

的增加而递增;关宏信等<sup>[62]</sup>基于 Burgers 模型模拟沥青混合料的黏弹性及分析路面沥青层温度应力的变化取得了较好的效果;Walubita 等<sup>[63]</sup>采用三维有限元方法分析了轮胎与路面的接触压力,认为汽车的减速对坡道或者交叉口沥青路面的推移和拥包影响显著。

### 2.3.2 车辙控制

为了防治沥青路面的车辙病害,研究人员在提高沥青混合料的抗变形能力方面做了大量研究。有研究提出通过提高沥青层模量、适当降低沥青层厚度以及提高基层厚度等方式来缓解沥青层车辙的产生,但是实际工程应用效果有限<sup>[64]</sup>。田小光<sup>[7]</sup>提出当车辙深度不超过 25 mm,且长度为 20~160 m 时,可直接采取微表处进行养护;沥青面层厚度偏薄、伴随横向裂缝,且抗滑性能偏低的路段,宜先采用微表处进行车辙填补,再使用超薄磨耗层技术;任少博等<sup>[65]</sup>研究了高温条件下不同水泥混凝土路面界面处理及黏结剂组合方式对复合式路面抵抗车辙和侧向推移性能的影响,结果表明:当界面具有较好的构造深度、纹理更密的十字刻槽以及刻槽间距较小的密刻槽时,采取适当措施改善层间接触条件,对防止车辙变形和侧向推移病害较为有效,整体抗变形能力明显提高;谢卓群<sup>[66]</sup>通过分析车辆在匀速行驶和制动状态下对复合式路面结构的影响,认为合理设计路面坡度、控制超载现象等能有效减缓车辙的产生。

## 2.4 复合式路面剪切破坏

### 2.4.1 刚柔层间剪切破坏

水泥混凝土基层和沥青面层的材料属性存在巨大差异以及层间黏结性能不佳是复合式路面层间剪切破坏的主要原因。水泥混凝土基面和沥青混凝土层间黏结不佳使得层间在车轮荷载的反复作用下易形成界面间相对滑移,从而导致层间剪切破坏。沥青面层厚度也会影响层间剪切状况,较厚的沥青层具有较好的应力扩散作用,从而一定程度上降低了层间剪切应力。其他主要影响因素包括水损害和交通荷载。路面经受雨水冲洗与浸水后,雨水会慢慢侵入沥青层底部,造成层底沥青黏结剂和水泥混凝土之间的黏结失效。在重载交通路段、长大纵坡路段、紧急刹车频发路段,车轮荷载水平分量较大,也使得复合式路面层间易产生剪切破坏。

复合式路面层间剪切破坏也是其他几类病害形成的重要诱因。Rith 等<sup>[55, 64]</sup>建立了四轴八轮组移动载荷作用下大刚度基层沥青路面的三维有限元模型,结果表明:层间水平剪应力大幅增加了沥青面层产生 Top-Down 开裂的概率。大量工程实践也表明:增强层间黏结、提高层间抗剪强度,对防止车辙变形和侧向推移病害也具有较好效果。Li 等<sup>[67]</sup>设计了刚柔复合式试件层间剪切试验,模拟了综合考虑水平和竖向荷载对路面结构层的剪切作用,研究发现层间抗剪强度的增加改善了复合式试件沥青层抗裂性能。

### 2.4.2 沥青面层压剪破坏

有研究表明:刚性基层上沥青面层在车辆荷载的三向应力作用下主要发生压剪组合破坏。Xu 等<sup>[27]</sup>研究发现复合式路面试件四点弯曲梁试验中  $L/4$  跨和支点的层间界面均发生压缩破坏,而跨中处层间界面呈现出剪切破坏特征;Nian 等<sup>[68]</sup>研究了不同工况下沥青路面结构应力分布规律,发现当层间完全连续时,最大剪应力主要集中在面层的上、中层,且沥青上面层主要承受压缩-剪切荷载耦合作用。万晨光等<sup>[69]</sup>选择桥面铺装结构作为研究对象,发现桥面铺装结构层间表现出压剪组合破坏,层间结构最不利剪切荷位并不是所受层间剪应力最大位置,还与其受到的压应力有关。

针对大刚度基层上沥青面层的力学响应特征,黄优等<sup>[18]</sup>研发了一种测试刚性基层上沥青面层压剪强度和疲劳性能的局部压剪加载装置(图 31、32),能充分考虑压应力和剪应力对沥青面层的影响,发现各因素对复合试件压剪强度影响从强到弱依次排序为:温度、沥青层厚度、层间处置状态、刚性基层强度。继而从能量和损伤的角度对复合式试件开展试验研究,探索重复压剪作用下沥青面层能量耗散及累计损伤变化规律(图 33),并提出了复合式试件的压剪强度模型和压剪疲劳方程。

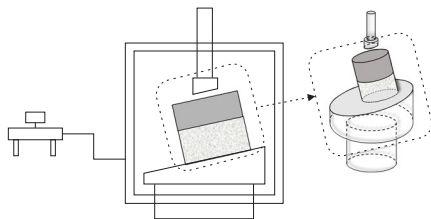
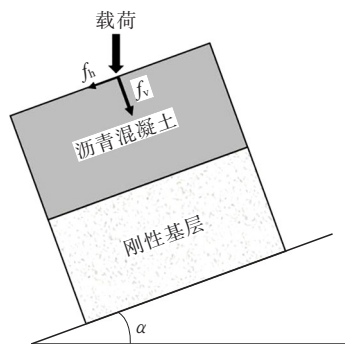
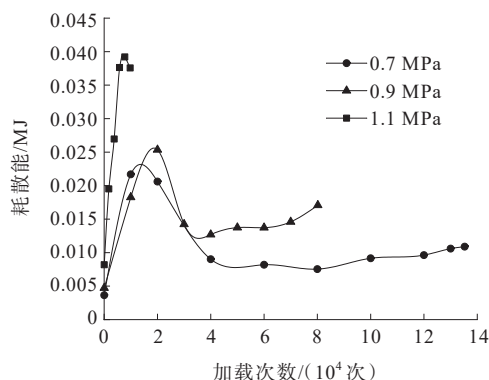
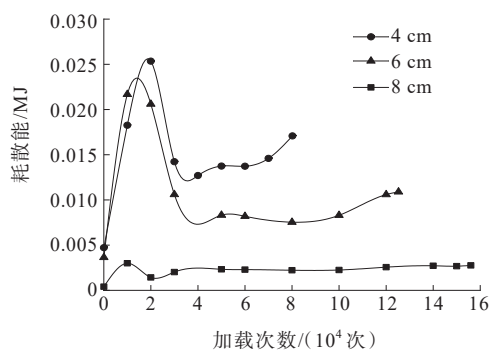


图 31 压剪试验装置示意图

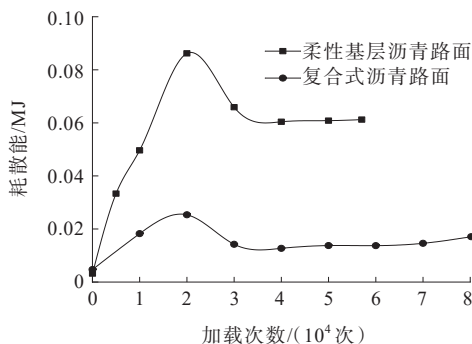
Figure 31 Compression-shear test device

图32 复合式试件压剪试验原理<sup>[18]</sup>Figure 32 Principle of compression-shear test for composite specimen<sup>[18]</sup>

(a) 应力水平对耗散能的影响



(b) 面层厚度对耗散能的影响



(c) 结构类型对耗散能的影响

图33 复合式试件耗散能演化规律<sup>[18]</sup>Figure 33 Dissipated energy evolution law for composite specimen<sup>[18]</sup>

### 3 刚柔复合式路面新材料与技术

复合式路面的刚性基层主要起结构承重作用,沥青面层一方面提供舒适的行车体验;另一方面对下卧基层提供保护,兼具结构层和功能层的双重角色,对整个路面结构的服役状态和使用寿命起着至关重要的作用。如前所述,刚柔复合式路面的结构力学行为和破坏模式具有其自身的特点,因此对路面材料提出了新的要求。

#### 3.1 高性能抗剪沥青面层材料

刚柔复合式路面的刚性基层与沥青面层之间的刚度差异很大,根据温度条件的不同,沥青面层模量为水泥混凝土基层模量的1/60~1/3,过大的刚度差异造成刚性基层上沥青面层内的剪切应力水平较高,基本处于压剪状态。因此,改善沥青面层剪切性能是防止刚性基层上沥青面层破坏的主要措施之一。目前主要有两个改进方向:①通过添加纤维进行改性或复合改性,提高沥青混合料的抗剪切性能;②采用高模量沥青混合料或半柔性路面材料,实现基层-面层的刚度过渡。

##### 3.1.1 纤维改性沥青混合料

纤维作为一类沥青混合料添加剂和稳定剂,主要起加筋、吸附、稳定、增黏的作用,能有效改善沥青路面的各项性能指标,延长沥青路面的使用寿命。纤维在沥青混合料中能吸附沥青,并与矿粉及细集料共同形成三维空间网状结构,这种空间网状结构起到较好的应力扩散作用,在裂缝尖端处纤维还能起到桥接作用,使得混合料抗剪、抗裂性能得到提升,如图34所示。

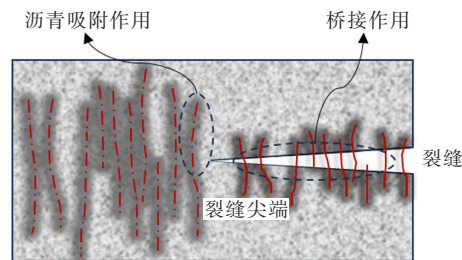


图34 纤维在沥青混合料中的吸附与桥接作用

Figure 34 Adsorption and bridging of fibers in asphalt mixtures

为了更好地提高纤维改性沥青的路用性能,国内外学者对不同类型的纤维改性沥青混合料进行了

大量研究。玄武岩纤维具有很高的强度、弹性模量、抗老化性能和耐高温等优点,是纤维改性沥青混合料的研究重点。Liu等<sup>[70]</sup>将不同掺量的玄武岩纤维(BF)引入到橡胶粉改性沥青结合料中,并通过室内试验发现玄武岩纤维能在沥青中形成较好的网状结构,增大沥青承受荷载应力的能力,使得沥青结合料抗裂性能得到提高;Qin等<sup>[71]</sup>研究不同长度和掺量的纤维对沥青的性能影响,发现掺量为5%~7%的6 mm玄武岩纤维对沥青抗裂效果改善最明显。杨程程等<sup>[72]</sup>通过模拟玄武岩纤维的空间随机分布,研究了玄武岩纤维长径比对增强沥青混合料弯拉性能的影响规律,发现长径比越大的纤维加筋效果越好。界面性能不足是限制玄武岩纤维对沥青混合料增强效果的因素之一,现阶段多采用接枝KH550型硅烷偶联剂对BF表面进行改性,以增强玄武岩纤维与沥青的界面黏附特性,从而增强纤维的加筋作用<sup>[73-74]</sup>,如图35所示。

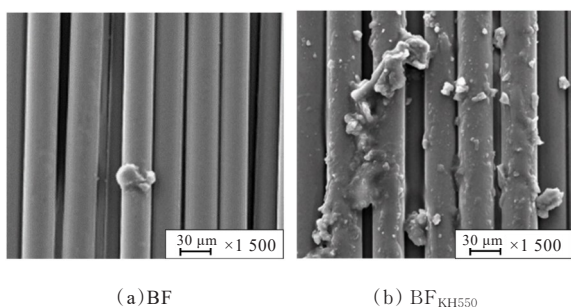


图35 玄武岩纤维BF和接枝KH550玄武岩纤维BF<sub>KH550</sub>的电子显微镜扫描图<sup>[73]</sup>

Figure 35 Electron microscope scanning of BF and grafted BF<sub>KH550</sub><sup>[73]</sup>

玻璃纤维韧性好、强度高,具有较高的模量,而且高温稳定性较好,在沥青路面施工阶段和服役阶段能更好地发挥纤维的增强效果。玻璃纤维可以有效改善沥青混合料的高温抗剪性能和抑制沥青混合料裂纹的扩展。张争奇等<sup>[75]</sup>研究不同类型沥青封层材料发现,相对于SBS乳化沥青、环氧沥青,玻璃纤维的加入有效改善了沥青的抗剪切性能和黏结性能,极大地提高了沥青混合料的抗疲劳性能。根据纤维的加筋作用和增韧机理可知,玻璃纤维长度对沥青混合料的强度和模量起决定性作用。Zarei等<sup>[76]</sup>、Luo等<sup>[77]</sup>研究发现,在实际工程中使用玻璃纤维的长度不宜超过12 mm,在沥青混合料中的最佳掺量范围为0.2%~0.6%。

木质素纤维可以有效吸附沥青,防止混合料因沥青含量高而析漏,提高沥青的黏度和内聚力,增强沥青混合料的热稳定性、抗剪强度和疲劳寿命,在沥青混合料中有较好应用<sup>[78-79]</sup>。Norgbey等<sup>[80]</sup>、Liu等<sup>[81]</sup>通过测试不同木质素纤维掺量的沥青混合料试件马歇尔稳定性、抗压回弹模量、抗压强度和黏度等指标,发现木质素纤维能有效降低沥青胶黏剂的温度敏感性,进而改善高温抗车辙能力,但过高的纤维掺量对低温性能存在不利影响。因此,在实际工程应用中应选择合适纤维掺量。Huang等<sup>[82]</sup>研究了同时掺加“玄武岩纤维+木质素纤维”的复合改性沥青面层材料,并推荐了两种纤维的复配方案;关宏信等<sup>[83]</sup>也提出了采用5% SBS与15%橡胶粉复合改性沥青,并掺加质量比为1:1的木质素纤维与玄武岩纤维复合改性沥青混合料。

### 3.1.2 高模量沥青混合料

复合式路面的刚性基层模量高、刚度大,对路面结构的整体强度是有利的,但对沥青层的剪切性能提出了更高要求。当基层模量远远大于面层模量时,会显著提高沥青面层内的最大剪应力;而当沥青面层材料模量与基层材料模量接近时,沥青面层结构的受力处于相对较好的状态<sup>[84]</sup>。因此设置合理的刚度过渡对改善刚柔复合式路面结构力学性能、提高复合式路面耐久性具有一定的理论意义和实际价值,如图36所示。

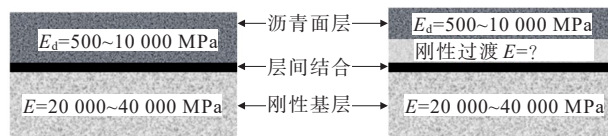


图36 复合式路面刚度过渡机制

Figure 36 Stiffness transition mechanism of composite pavement

高模量沥青通常由硬质沥青、岩沥青改性和聚烯烃改性制成。由高模量沥青作为胶结料制备的高模量沥青混合料具有良好的抗车辙性能、抗疲劳性能,除此之外,高模量沥青混合料的应用降低了由车轮传递到路基的荷载<sup>[85]</sup>。因此,可以将高模量沥青混合料应用于复合式路面结构的过渡层,协调沥青面层和大刚度基层之间的刚度差异,减缓并消除刚柔界面的模量突变。

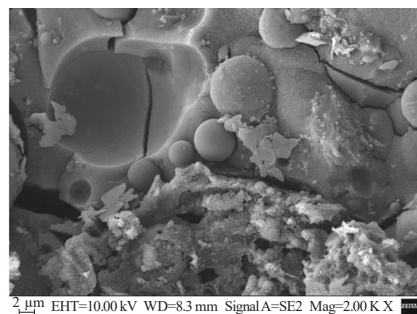
为了推动高模量沥青混合料在路面工程中的应

用,国内外在高模量沥青混合料制备、改性方法及力学性能方面进行了大量的研究。Yan等<sup>[86]</sup>、Wang等<sup>[87]</sup>研究了几种不同高模量沥青混合料路用性能,发现相对于硬质沥青、岩沥青改性等,高模量添加剂制备的高模量沥青混合料各方面性能更加平衡,但是几种方法制备的高模量沥青混合料低温性能均无明显提升;刘朝晖等<sup>[88]</sup>研究发现玄武岩纤维(BF)的加入使得高模量沥青混合料的低温抗裂性能得到有效提升,并通过微观试验和室内力学试验分析了其作用机理;Wang等<sup>[89]</sup>、Moreno-Navarro等<sup>[90]</sup>采用胶粉和丙烯酸纤维、超高分子量聚合物(UHMWP)等材料作为添加剂制备高模量沥青混合料,结果表明:所选添加剂均能显著提高混合料的高温性能和疲劳性能;Zhu等<sup>[91]</sup>研究了再生沥青路面高模量沥青混合料的路用性能,针对再生沥青级配不一致、高模量沥青与老化胶结料黏结不良等问题,提出了改进的再生方法;Zou等<sup>[85]</sup>、Si等<sup>[92]</sup>从细观尺度分别研究了不同添加剂对高模量沥青的改性机理以及高模量沥青混凝土路面结构在荷载作用下的细观力学特性。

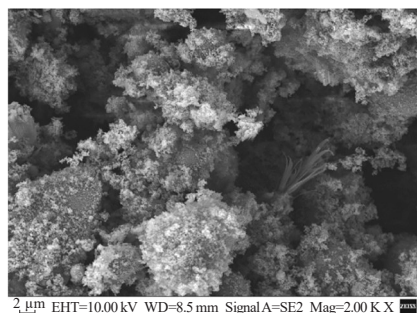
### 3.1.3 半柔性路面材料

半柔性路面材料是一种骨架-填充结构,通常由水泥灌浆料填充到开级配基体沥青混合料中所构成。如图37所示,半柔性路面材料结合了沥青路面柔韧性和水泥混凝土路面刚性的特点,具有高强度、高耐久性、抗渗性较好等优点,能够提升路面抗车辙、耐腐蚀等性能,适用于重载交通路段。半柔性路面材料性能主要受基体沥青混合料的级配组成、沥青及矿料性能特点以及灌浆料的流动度、体积稳定性、强度等影响。虽然相较于传统沥青混合料具有更好的高温稳定性以及水稳定性,但是由于灌注浆体的主要成分是脆性水泥基材料,因而导致其低温抗裂性能较差。

为解决半柔性路面材料低温抗裂性能,姜舜君<sup>[93]</sup>引入了水泥-乳化沥青砂浆作为灌浆材料,并使用生物沥青对其进行改性,从而降低了灌浆材料的脆性,改善了低温抗裂性能;王黎明等<sup>[94]</sup>研究发现苯丙乳液可显著降低半柔性路面材料的动态模量、提高动稳定度、改善低温抗裂性、提高抗水损害能力;郭庆林等<sup>[95]</sup>研究了不同基体沥青对半柔性路面材料的影响,研究发现:使用SBS改性沥青和高黏沥青的混合料稳定度升高,空隙率减小,同时能提升路面的



(a) 未掺聚合物乳液



(b) 掺聚合物乳液

图37 半柔性路面材料界面微观结构图

Figure 37 Microstructure of interfaces of semi-flexible pavement materials

水稳定性、高温稳定性和强度;田瑞乾等<sup>[96]</sup>对不同灌浆材料类型进行了研究,结果表明:抗裂型灌浆材料可提高后期低温抗裂性能和水稳定性,普通型灌浆材料适用于暖热多雨气候区,超早强型灌浆材料适用于昼夜温差大的气候区;熊子佳等<sup>[97]</sup>研究了养护温度对半柔性路面材料性能的影响:强度较高的普通型浆料需待沥青混合料基体摊铺温度降到室温时灌注;早强型浆料可在沥青混合料基体摊铺后尚有余热时灌注。

在荷载作用下,半柔性路面混合料更容易从孔隙处、灌浆料浆体与基体沥青混合料界面以及地聚合物内部薄弱区产生破坏。因此可以通过改善半柔性路面混合料的界面黏结性能进而提高半柔性路面性能。王业等<sup>[98]</sup>发现当聚合物乳液脱水可形成连续的聚合物膜,起到封闭孔洞与微裂纹的作用,而且灌浆料水化产物与聚合物膜能够形成互相交错的网络结构,起到“微纤维”的作用;程培峰等<sup>[99]</sup>研究发现硅烷偶联剂能够在水泥基灌浆材料与沥青混合料之间发生一系列化学反应,从而通过改变水泥-沥青界面的形态,有效改善水泥-沥青界面稳定度并减少水泥-沥青界面裂缝。

3.2 刚性基层性能提升技术

从改善受力的角度,刚性板的小尺寸划分可以大幅度减小板底荷载应力,而且要比常规尺寸板块的水泥混凝土路面温度翘曲应力明显减小,是减小荷载应力、温度应力的有效方法,并在准兴高速公路、许尉高速公路、国道 324 线(福昆线)漳浦三古段等工程中得到推广应用<sup>[100]</sup>。但是小尺寸划分降低了刚性基层板整体性,板块之间的缝隙和错台成为沥青面层受力的薄弱环节,增大了沥青面层发生反射裂缝的风险,对刚柔层间处置提出了更高的要求。

复合式路面的刚性基层出现裂缝、错台等病害会引起沥青面层的反射开裂、减弱层间结合,因此除了要求具有较好承载力之外,复合式路面的刚性基层板在干缩、温度和冲击荷载作用下还应具有良好的抵抗裂缝扩展、保持板体整体性的能力。对刚性基层进行配筋处理是提高复合式路面耐久性的有效方法,相对于普通素混凝土板,配筋混凝土中的钢筋可以调节水泥混凝土材料在降温 and 干缩作用下产生的横向裂缝宽度及间距,提高横向裂缝处荷载的传递能力。

连续配筋混凝土(CRC)是在纵向设置连续钢筋、横向不设接缝的结构,由 CRC 和沥青层组合的 CRC+AC 结构是刚柔复合式路面重要结构类型之一。由于 CRC+AC 复合式路面结构受力特征与连续配筋混凝土路面(CRCP)存在差异,因此刚性基层

的配筋设计和优化是 CRC+AC 路面结构的研究重点之一。在连续配筋混凝土路面基础上发展出了先进配筋混凝土路面(Advanced Reinforced Concrete Pavement, ARCP)、部分连续配筋混凝土路面(Partially Continuous Reinforced Concrete Pavement, PCRCP)及双层连续配筋混凝土路面等不同配筋形式的路面。其中 ARCP、PCRCP 具有节约钢筋用量、路面横向裂缝规则等优点,但是配筋方式复杂增加了施工难度。双层连续配筋混凝土路面具有整体强度高、耐久性强、行车舒适性高的特点,在适应重载交通方面优势明显,但是双层配筋增加了施工成本。纵向钢筋的配筋率同样是 ARCP、PCRCP 及双层连续配筋混凝土路面的重要设计指标,但在中国此类配筋路面工程实践较少,其纵向钢筋仍属于超规范设计,多参考单层 CRCP 配筋指标计算公式采取保守设计。

纤维增强复合材料筋(Fiber Reinforced Polymer Rebar, FRPR)可以替代混凝土中的钢筋组成纤维筋连续配筋路面。FRPR 具有重量轻、强度高和耐久性好等优点,能解决传统钢筋混凝土路面结构中钢筋的锈蚀问题,但也存在黏结性能相对较差等不足。为提高 FRPR 与普通混凝土之间的黏结性能,通常对 FRPR 表面进行预处理,如用纤维束在其表面缠绕形成一定高度的“肋”、通过切割形成螺纹形的凹槽或黏附砂粒等。表 3 为几类刚性路面配筋技术及其结构特点。

表 3 刚性路面配筋技术及其结构特点

Table 3 Rigid pavement reinforcement techniques and structural characteristics

路面类型	配筋特点	主要优点	主要缺点	典型工程应用	文献
单层连续配筋路面 (Continuously Reinforced Concrete Pavement, CRCP)	面层配置横向钢筋和纵向连续钢筋,不设胀、缩缝	整体性和平整度好;承载能力高;耐久性好,养护费用低	早期投资较大;对土基的稳定性要求高;难以控制不规则横向裂缝	长湘高速公路 CRC+AC 复合式路面;长潭高速公路 CRCP 复合式路面	[101]
双层连续配筋路面	对纵向钢筋进行双层配筋设计及布置,同时配有一定数量横向钢筋	整体强度高、耐久性强;养护费用低;减少板底脱空和断板概率	施工成本与施工难度高	武汉市黄陂区 S108 长轩岭至姚家集段双层 CRC+AC 复合式路面	[102-104]
玄武岩纤维筋连续配筋路面 (Basalt Fiber Reinforced Polymer Continuously Reinforced Concrete Pavement, BFRP-CRCP)	用玄武岩纤维筋代替 CRCP 结构中的钢筋	绿色环保;耐腐蚀性能好;	抗剪强度低,需控制路面横截面剪跨比	张石高速石家庄段 BFRP 筋连续配筋混凝土复合式路面;浙江某国道 BFRP 筋连续配筋混凝土复合式路面	[105-106]

续表 3

路面类型	配筋特点	主要优点	主要缺点	典型工程应用	文献
先进配筋混凝土路面 (Advanced Reinforced Concrete Pavement, ARCP)	整体纵向连续配筋,主动诱导裂缝处布局部短钢筋	钢筋用量少、裂缝规则均匀,路面行驶舒适性好	局部钢筋端部易发生应力集中,增加微裂纹萌生的可能性和开裂的风险	韩国 1 号高速公路 ARCP 试验段	[107]
部分连续配筋混凝土路面(Partially Continuous Reinforced Concrete Pavement, PCRCP)	在 ARCP 基础上,将局部短钢筋的末端通过对角钢筋与纵向连续钢筋连接,形成独特的六边形结构	横向裂缝传荷能力好,改善了混凝土板的收缩性能	增加对角钢筋,早期成本增加;配筋模式复杂,施工难度增大	暂无	[108]

3.3 复合式路面层间抗裂材料

20 世纪 30 年代以来,国内外学者结合实体工程进行的大量理论和试验研究表明铺设应力吸收层结构、使用土工织物、格栅或改性沥青制备的抗裂夹层材料对复合式沥青面层抗裂性能提升最为显著<sup>[109]</sup>。为改善刚-柔性复合路面层间剪切黏结强度和疲劳性能,提高复合式路面沥青层抗裂性能,道路工作者们在应力吸收层材料及抗裂夹层材料的研发上进行了大量探索,积累了丰富的研究成果。

3.3.1 应力吸收层结构

应力吸收层主要分为洒布式和摊铺式两种,洒布式沥青应力吸收层采用特定的洒布车在洒布沥青的同时撒布单一粒径碎石;另外一种形式的洒布式应力吸收层由专用设备同步喷洒两层乳化沥青(底层、上层)及铺设一层纤维(中间层),再立即撒布一层碎石集料,随即采用胶轮压路机进行碾压,如图 38、39 所示。

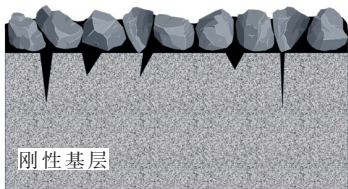


图 38 单层洒布式应力吸收层

Figure 38 Single-layer sprayed stress-absorbing layer

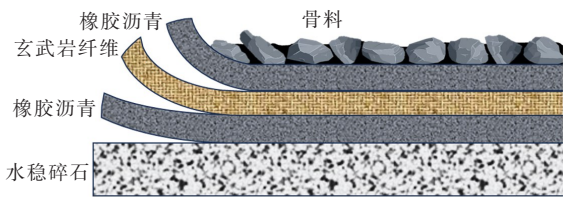


图 39 多层洒布式应力吸收层<sup>[110]</sup>

Figure 39 Multi-layer sprayed stress-absorbing layer<sup>[110]</sup>

摊铺式应力吸收层由改性沥青和矿料按一定配比组成的细粒式改性沥青混合料,在施工时采用与普通沥青混合料一样的施工机械,经过摊铺碾压而成的一种薄层结构。目前应用较多的应力吸收层材料主要有 STRATA、SAF、Sand Mix 沥青混合料和 RCRI 沥青混合料。摊铺式应力吸收层沥青混合料一般由大量的细集料、矿物填料和高含量聚合物改性沥青胶结料组成,具有模量较小、变形能力强及良好的疲劳性能等特点,摊铺厚度通常为 $(2.5\pm0.5)$  cm。

通过设置应力吸收层,极大地分散了由水泥混凝土开裂传递到沥青面层底部的荷载,使沥青面层临界点处的应力状态更加安全,从而改善整个覆盖层沿深度方向的应力分布,缓解基层裂缝/接缝处的应力集中,防止反射裂缝的产生和发展(图 40)。

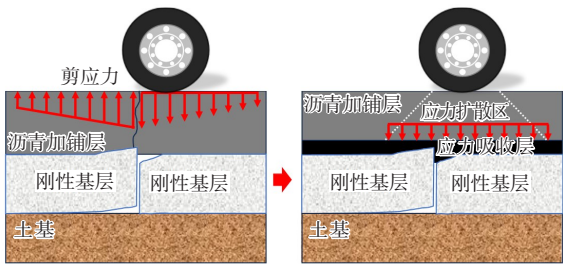


图 40 应力吸收层作用机理

Figure 40 Mechanism of stress-absorbing layer

3.3.2 层间抗裂材料

层间抗裂材料应具备良好的抗裂调平作用,抗裂夹层材料所用的胶结料,必须具备优良的抗疲劳性能和变形恢复能力,同时还应提供优良的黏结力。复合式路面抗裂夹层主要有土工格栅和各种改性沥青,抗裂夹层材料可增加沥青面层与刚性基层之间的黏结、协调基层与面层之间的变形,吸收来自交通荷载和温度变化引起的弯拉应力和剪切

应力,减少基层裂缝和错台导致的沥青层底面应力集中等<sup>[111-112]</sup>,从而有效减缓反射裂缝的产生和扩展<sup>[113]</sup>。表4总结了不同层间抗裂材料组成特点、主要技术指标。

表4 不同层间抗裂材料特点  
Table 4 Characteristics of different interlayer anti-cracking materials

材料名称	材料特点	主要技术指标	主要优点	文献
水泥基复合材料 ECC	掺入聚乙烯(PVA)纤维制得的水泥基复合材料,具有超高延性	抗拉强度为9.4 MPa(7 d,20 ℃); 抗压强度为62.8 MPa(7 d,20 ℃)	具有超强韧性、多点开裂、应变硬化的高延性特征	[114]
土工合成材料	原料大多为高分子聚合物,种类较多,主要包括聚丙烯、聚酯、聚乙烯、聚氯乙烯等	不同土工合成材料具有不同的抗裂效果,抗裂贡献率为0.15~0.5	良好的加筋作用及延缓裂缝向上层传递的作用	[115]
橡胶/SBS复合改性沥青	在基质沥青中加入橡胶粉、SBS改性剂制得的复合改性沥青	抗剪强度0.265 MPa(60 ℃); 抗拉强度0.198 MPa(60 ℃)	弹性恢复性能和疲劳性能较好,能有效预防路面反射裂缝	[116]
高密度聚乙烯(HDPE)-橡胶粉改性沥青	在基质沥青中加入橡胶粉、高密度聚乙烯制得的复合改性沥青	温缩系数:高温区平均值 $-42\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , 低温区平均值 $-30\times10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	高、低温性能突出,弹性恢复能力较强,可有效预防由温缩引起的反射裂缝	[117-118]
环氧乳化沥青	主要由环氧树脂、固化剂和乳化沥青按一定的比例组成	最佳洒布量0.8 kg/m <sup>2</sup> ,最佳配方为环氧树脂:固化剂:乳化沥青=16:4:80;抗剪强度1.29 MPa(20 ℃,0.8 kg/m <sup>2</sup> );抗拔强度0.75 MPa(20 ℃,0.8 kg/m <sup>2</sup> )	具有较强的黏结力、高温稳定性,弹性恢复能力好,在沥青层与水泥板之间起到层间黏结作用	[119]

4 结论

为了进一步推进刚柔复合式路面的研究,本文综述了国内外学者在刚柔复合式路面设计理论、材料研发、施工工艺等方面的研究现状。刚柔复合式路面已经取得了较好的工程应用,但是相应的结构理论和材料指标体系仍不够完善。主要结论如下:

(1) 当前国内外主要的刚柔复合式路面设计方法仍然是基于层状弹性理论体系,设计方法一般参考相似路面结构:刚性基层主要参考水泥路面设计,柔性面层主要参考水泥路面沥青层加铺设计;缺乏针对刚柔复合式路面结构特点的设计理论和方法,尤其对于刚性基层上的沥青面层,仅仅将其简单视为功能层而缺乏专门的设计。

(2) 刚性基层是复合式路面的主要承重结构层,由于上面铺设了沥青面层,对刚性基层的荷载应力、温湿度场等均起到了一定改善作用,有利于延长路面结构使用寿命;但是刚性基层的开裂、接缝等,会降低基层板的整体性、影响层间结合状况、加速沥青

面层开裂,因此有效控制基层板的裂缝宽度和间距、提高刚性基层板的整体性,同样十分重要。

(3) 刚性基层-柔性面层之间的层间结合,一直是刚柔复合式路面质量控制的重点,只有良好的层间结合,才能有效传递层间应力、协调层间形变;有关学者开展了大量室内试验研究,结合数值仿真,从设置层间结构和研发复合改性层间材料两个角度来改善刚-柔界面状况,取得了比较丰硕的成果。

(4) 复合式路面的沥青面层兼具功能层和结构层的双重作用,对提升刚柔复合式路面的服役性能和使用寿命至关重要;由于基层与面层之间巨大的刚度差异,刚性基层上的沥青面层主要产生压剪破坏,并衍生出 Top-Down 裂缝、剪切失稳车辙等病害;因此,必须对刚性基层上的沥青面层进行专门的结构设计和材料研发,实现刚性基层-柔性面层的合理刚度过渡及沥青面层抗剪能力的提升。

(5) 刚柔复合式路面的结构力学行为和服役状态受刚性基层和柔性面层交互作用的影响,未来必须综合考虑刚性基层和沥青面层的结构力学特点和破坏方式,有针对性地开展路面结构-材料一体化研

究,系统提升刚柔复合式路面的服役能力,助力刚柔复合式路面的推广应用,并推动道路设计理论的发展。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 李祖仲,王伯禹,陈拴发.轴载对复合式路面应力吸收层荷载应力的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2012,32(1):20-25.  
LI Zuzhong, WANG Boyu, CHEN Shuanfa. Impact of axle load on load stress of stress absorbing layer in composite pavement[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2012, 32(1): 20-25.
- [2] 张磊,黄卫,王斌,等.考虑温度与荷载耦合作用的连续配筋混凝土复合式路面损伤分析[J].土木工程学报,2011,44(1):108-114.  
ZHANG Lei, HUANG Wei, WANG Bin, et al. Analysis of the damage of CRCP+AC composite pavement under thermal-mechanical coupling conditions by FEM[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 108-114.
- [3] FANG N R, LI H, LI Q Q, et al. Study on asphalt layer of composite pavement temperature shrinkage stress considering stress relaxation[J]. Materials and Structures, 2021, 54(1): 32.
- [4] ZAREI B, TALEBSAFA M, ALI SHAFABAKHSH G. Comparative evaluation of dynamic responses of RCC composite pavement under different moving axles[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2023, 50(6): 498-509.
- [5] SHABBIR HOSSAIN M, NAIR H, CELIK OZYILDIRIM H. Construction of a composite pavement (asphalt over concrete) in Virginia[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2022, 2676(10): 251-264.
- [6] 刘志胜,孙晓龙,崔东霞,等.刚柔复合式路面裂缝反射预防材料开发及结构表征[J].材料导报,2016,30(S1):449-453,457.  
LIU Zhisheng, SUN Xiaolong, CUI Dongxia, et al. Research and structural characterizations of crack-reflection preventing material for rigid-flexible composite structure [J]. Materials Reports, 2016, 30(S1): 449-453, 457.
- [7] 田小光.武黄高速公路复合式路面车辙形成机理与处治对策研究[D].武汉:武汉工程大学,2014.  
TIAN Xiaoguang. Composite pavement of Wu-Huang expressway research on the mechanism and treatment measures of rutting[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2014.
- [8] 刘鹏程,翁兴中,张广显.机场环氧沥青混凝土加铺复合道面荷载应力分析[J].材料导报,2015,29(20):148-152, 156.  
LIU Pengcheng, WENG Xingzhong, ZHANG Guangxian. The load stress analysis of epoxy asphalt concrete overlay on airport composite pavement[J]. Materials Review, 2015, 29(20): 148-152, 156.
- [9] 翁兴中.机场道面加铺沥青面层的荷载应力分析[J].中国公路学报,1994,7(4):20-25.  
WENG Xingzhong. Load stress analysis of asphalt overlay on airport pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 1994, 7(4): 20-25.
- [10] 颜祥程,翁兴中,杨立耀.机场水泥混凝土道面加铺层结构接缝传荷能力分析[J].公路,2015,60(8):46-50.  
YAN Xiangcheng, WENG Xingzhong, YANG Liyao. Analysis of load transfer efficiency for airport cement concrete pavement overlay structure[J]. Highway, 2015, 60(8): 46-50.
- [11] 李盛,刘朝晖,李宇峙.CRC+AC复合式路面荷载应力分析[J].公路,2013,58(4):95-99.  
LI Sheng, LIU Zhaohui, LI Yuzhi. Load stress analysis of CRC+AC composite pavement[J]. Highway, 2013, 58(4): 95-99.
- [12] GARG N, MOUNIER D. Comparison of US (FAA) and French (DGAC) airport pavement HMA[J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14(sup1): 242-261.
- [13] 李盛,张豪,程小亮.非均布三向应力作用下CRC+AC复合式路面动力响应分析[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):971-982.  
LI Sheng, ZHANG Hao, CHENG Xiaoliang. Dynamic response analysis of CRC+AC composite pavement under non-uniform three-way stress[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 971-982.
- [14] 许路凯.连续配筋混凝土刚柔复合式路面热力耦合下的力学行为[D].长沙:长沙理工大学,2021.  
XU Lukai. Mechanical behavior of continuously reinforced concrete rigid-flexible composite pavement under thermal and mechanical coupling[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021.
- [15] LI S, SUN Y, XU L K, et al. Asphalt layer cracking behavior and thickness control of continuously reinforced concrete and asphalt concrete composite pavement[J]. Buildings,

- 2022,12(8):1138.
- [16] 李盛,孙煜,许路凯.热力耦合下CRC+AC复合式路面沥青层力学响应分析[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(1):183-196.
- LI Sheng, SUN Yu, XU Lukai. Mechanical response analysis of CRC+AC composite pavement asphalt layer during thermo-mechanical coupling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(1): 183-196.
- [17] LING J M, WEI F L, ZHAO H D, et al. Analysis of airfield composite pavement responses using full-scale accelerated pavement testing and finite element method[J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 596-606.
- [18] HUANG Y, LIU Z H, LIU J Y, et al. Laboratory study on mechanical properties of composite pavement under partial compression-shear load[J]. Construction and Building Materials, 2022, 356: 129240.
- [19] KESHAVARZI B, KIM Y R. A viscoelastic-based model for predicting the strength of asphalt concrete in direct tension[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 721-727.
- [20] 李盛,李宇峙,刘朝晖.刚柔复合式路面沥青层温度疲劳损伤及开裂研究[J].工程力学,2013,30(10):122-127.
- LI Sheng, LI Yuzhi, LIU Zhaohui. Research on temperature fatigue damage and cracking in asphalt layer of rigid-flexible composite pavement[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 122-127.
- [21] SOK T, CHHAY L, LEE S W, et al. Insulation effects of asphalt concrete overlay on concrete pavement temperature[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2023, 47(4): 2521-2531.
- [22] BERENJI SHOKATABAD M, SARKAR A. Temperature curling and gradient of roller-compacted concrete composite pavements[J]. Construction and Building Materials, 2022, 353: 129008.
- [23] 李盛,刘朝晖,李宇峙.CRC+AC复合式路面的合理配筋率[J].公路交通科技,2012,29(2):1-6.
- LI Sheng, LIU Zhaohui, LI Yuzhi. Reasonable reinforcement ratio of continuously reinforced concrete composite asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(2): 1-6.
- [24] 顾兴宇,倪富健,董侨.AC+CRCP复合式路面温度场有限元分析[J].东南大学学报(自然科学版),2006,36(5):805-809.
- GU Xingyu, NI Fujian, DONG Qiao. Thermal analysis for AC+CRCP composite pavement using finite element methods[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2006, 36(5): 805-809.
- [25] 刘朝晖.连续配筋混凝土复合式沥青路面[M].北京:人民交通出版社,2012.
- LIU Zhaohui. Continuously reinforced concrete composite asphalt pavement[M]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [26] 刘朝晖.连续配筋混凝土刚柔复合式沥青路面研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
- LIU Zhaohui. The research on rigid-flexible continuously reinforced concrete composite asphalt pavement[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.
- [27] XU Y L, FAN W, CHENG P F, et al. Mechanical characterisation of interface shear strain of multi-layer composite pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(9): 1116-1122.
- [28] RAHMAN A, HUANG H W, AI C F, et al. Fatigue performance of interface bonding between asphalt pavement layers using four-point shear test set-up[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 121: 181-190.
- [29] HU X D, LEI Y, WANG H N, et al. Effect of tack coat dosage and temperature on the interface shear properties of asphalt layers bonded with emulsified asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 86-93.
- [30] SUN Y Z, YAN T, WU C Y, et al. Analysis of the fatigue crack propagation process of the stress-absorption layer of composite pavement based on reliability[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2093.
- [31] WEI F L, CAO J F, ZHAO H D, et al. Laboratory investigation on the interface bonding between Portland cement concrete pavement and asphalt overlay[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 8831287.
- [32] ZHAO H D, CAO J F, ZHENG Y. Investigation of the interface bonding between concrete slab and asphalt overlay[J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 18 (sup3): 109-118.
- [33] NIAN T F, GE J G, LI P, et al. Influence of multiple factors on the shear fatigue resistance of asphalt pavement interlayer adhesive materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(9).

- [34] LEE S L, MANNAN M A, WAN IBRAHIM W H. Shear strength evaluation of composite pavement with geotextile as reinforcement at the interface[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(3): 230-235.
- [35] 黄优, 刘朝晖, 李盛, 等. 不同层间结合状态下刚柔复合式路面的剪应力分析[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(6): 32-38, 61. HUANG You, LIU Zhaohui, LI Sheng, et al. Analysis of shear stress of rigid-flexible composite pavement under different interlaminar bonding conditions[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(6): 32-38, 61.
- [36] KIM Y K, RITH M, LEE S W. Bond strength recovery of tack coat between asphalt concrete surface and roller-compacted concrete base in composite pavements[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(10): 3750-3757.
- [37] RITH M, KIM Y K, LEE S W. Estimation of stress at interface of asphalt surface and rigid base of composite pavement[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 2021, 174(6): 345-353.
- [38] XIE P Y, WANG H. Finite element analysis of thermal-induced reflective cracking in composite pavement with mitigation strategies[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 266: 108396.
- [39] HARSINI I, HAIDER S W, BRINK W C, et al. Investigation of significant inputs for pavement rehabilitation design in the Pavement-ME[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2018, 45(5): 386-392.
- [40] WANG X C, SU Z Y, XU A M, et al. Shear fatigue between asphalt pavement layers and its application in design [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135: 297-305.
- [41] LUO Y H, TIAN B, NIU K M. Numerical analysis of reflective cracking of continuous reinforced composite pavement under multifactor coupling[J]. *Mobile Information Systems*, 2021, 2021.
- [42] LIU L, LIU Z H, LIU J Y, et al. Fatigue performance of interlaminar anticracking material for rigid-flexible composite pavement[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(10): 1-6.
- [43] DHAKAL N, ELSEIFI M A, ZHANG Z J. Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements-a synthesis[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2016, 9(3): 228-239.
- [44] XIE P Y, WANG H. Analysis of temperature variation and thermally-induced reflective cracking potential in composite pavements[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2020, 2674(10): 177-188.
- [45] UZAN J, SIDES A, PERL M. Viscoelastoplastic model for predicting performance of asphaltic mixtures[J]. *Transportation Research Record*, 1985, 9(2): 78-89.
- [46] DAVE E V, BUTTLAR W G. Thermal reflective cracking of asphalt concrete overlays[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2010, 11(6): 477-488.
- [47] 葛辉, 王宏畅. 动荷载作用下沥青路面基层底裂缝扩展研究[J]. *林业工程学报*, 2016, 1(4): 141-148. GE Hui, WANG Hongchang. Study on crack propagation at bottom of base course in asphalt pavement under dynamic vehicle loads[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, 1(4): 141-148.
- [48] AL-ABBASI A, SHALABY A. Evaluation of composite pavement joints using the falling weight deflectometer[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 2021, 147(2).
- [49] WANG K F, WANG K, ZHU Y S, et al. Study of structural characteristics of asphalt overlays on airport pavement with damaged load transfer efficiency of joints[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2022, 2676(4): 27-40.
- [50] SCAVONE M, KATICHA S, FLINTSCH G. Identifying weak joints in jointed concrete and composite pavements from traffic speed deflectometer measurements by basis pursuit[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2021, 35(2): 1-11.
- [51] RITH M, KIM Y K, LEE S W. Reflective cracking from thermal loading in asphalt-concrete composite pavements [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 2022, 175(3): 178-186.
- [52] 梁悦, 邹晓翎. 沥青路面 Top-Down 裂缝成因研究综述 [J]. *中外公路*, 2021, 41(3): 58-65. LIANG Yue, ZOU Xiaoling. Review on cause of Top-Down cracks in asphalt pavements[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2021, 41(3): 58-65.
- [53] 李盛, 张豪, 孙煜, 等. 连续配筋混凝土刚柔复合式路面 Top-Down 开裂分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(6): 2300-2310. LI Sheng, ZHANG Hao, SUN Yu, et al. Top-Down crack analysis of continuously reinforced concrete and asphalt concrete composite pavement[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(6): 2300-

- 2310.
- [54] 李盛,孙煜,余时清,等.基于双模量理论的连续配筋混凝土复合式路面沥青层表损伤分析及Top-Down开裂控制[J].土木工程学报,2024,57(4):111-128.
- LI Sheng, SUN Yu, YU Shiqing, et al. Top-Down fatigue crack control and damage analysis of continuous reinforced cement concrete composite asphalt pavement base on bi-modulus theory[J]. China Civil Engineering Journal, 2024,57(4):111-128.
- [55] RITH M, KIM Y K, HONG S J, et al. Effect of horizontal loading on RCC-base composite pavement performance at heavy duty area[J]. Construction and Building Materials, 2017,131:741-745.
- [56] 李盛,余时清,张豪,等.连续配筋混凝土复合式沥青路面Top-Down裂缝疲劳扩展研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(11):4473-4484.
- LI Sheng, YU Shiqing, ZHANG Hao, et al. Research on fatigue propagation of Top-Down cracks on continuously reinforced concrete composite asphalt pavement[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022,53(11):4473-4484.
- [57] LING J M, REN L, TIAN Y, et al. Analysis of airfield composite pavement rutting using full-scale accelerated pavement testing and finite element method[J]. Construction and Building Materials, 2021,303:124528.
- [58] 周刚,周进川,华斌,等.沥青路面结构永久变形环道试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(2):187-192.
- ZHOU Gang, ZHOU Jinchuan, HUA Bin, et al. Study on perpetual deformation of asphalt pavement structures by circular track testing[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008,36(2):187-192.
- [59] 徐世法,李泽,房聪,等.基于单轴贯入试验的沥青混合料抗车辙性能影响因素研究[J].北京建筑大学学报,2022,38(4):9-15.
- XU Shifa, LI Ze, FANG Cong, et al. Research on the influential factors of the rutting resistance performance of asphalt mixture based on uniaxial penetration test[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022,38(4):9-15.
- [60] 袁明.复合式路面永久变形及界面粘结强度变化规律研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- YUAN Ming. Research on the variation of the composite pavement's permanent deformation and interlayer cohesiveness[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [61] 李盛,刘朝晖,李宇峙. CRC+AC 复合式路面结构层厚度对温度效应及车辙变形的影响[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1):21-28.
- LI Sheng, LIU Zhaohui, LI Yuzhi. Influence of structure layer thickness of CRC+AC composite pavement on temperature effect and rutting deformation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012,25(1):21-28.
- [62] 关宏信,郑健龙,张起森. 沥青混合料的黏弹性疲劳损伤模型研究[J]. 力学与实践, 2007, 29(2):50-53.
- GUAN Hongxin, ZHENG Jianlong, ZHANG Qisen. Viscoelastic fatigue damage model of bituminous mixture [J]. Mechanics in Engineering, 2007,29(2):50-53.
- [63] WALUBITA L F, LING M, PIANETA L M R, et al. Correlating the asphalt-binder MSCR test results to the HMA HWTT and field rutting performance[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2022,148(3).
- [64] RITH M, KIM Y K, LEE S W. Behavior of RCC-base composite pavement for heavy duty area[J]. Construction and Building Materials, 2018,175:144-151.
- [65] 任少博,王浩,邹晓龙,等. 复合式路面沥青面层车辙和侧向推移试验研究[J]. 公路, 2019, 64(11):6-13.
- REN Shaobo, WANG Hao, ZOU Xiaolong, et al. Experimental study on rutting and lateral slippage of asphalt layer on composite pavement[J]. Highway, 2019,64(11):6-13.
- [66] 谢卓群. 高速公路复合式路面车辙分析[D]. 长沙:湖南大学, 2018.
- XIE Zhuoqun. Rutting analysis of composite pavements for expressway[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [67] LI S, LIU X W, LIU Z H. Interlaminar shear fatigue and damage characteristics of asphalt layer for asphalt overlay on rigid pavement[J]. Construction and Building Materials, 2014,68:341-347.
- [68] 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.
- [69] 万晨光,申爱琴,郭寅川. 桥面铺装调平层与沥青面层层间剪切行为[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(7):1355-1360.
- WAN Chenguang, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan. Shear behavior of leveling layer and asphalt pavement of bridge deck pavement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017,51(7):1355-1360.

- [70] LIU L, HUANG Y, LIU Z H. Laboratory evaluation of asphalt binder modified with crumb rubber and basalt fiber[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8841378(1-10).
- [71] QIN X, SHEN A Q, GUO Y C, et al. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 159: 508-516.
- [72] 杨程程, 刘朝晖, 柳力, 等. 玄武岩纤维增强沥青混合料弯拉性能多参数敏感性分析[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(11): 1-7.
- YANG Chengcheng, LIU Zhaohui, LIU Li, et al. Analysis on multiparameter sensitivity of flexural-tensile performance of basalt fiber reinforced asphalt mixture[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(11): 1-7.
- [73] YANG C C, LIU L, LIU Z H, et al. Study on the mechanism of bond strength generation and debonding failure between basalt fiber and asphalt based on molecular dynamics[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 19: e02493.
- [74] LOU K K, XIAO P, TANG Q, et al. Research on the micro-nano characteristic of basalt fiber and its impact on the performance of relevant asphalt mastic[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318: 126048.
- [75] 张争奇, 雷宗建, 杨博. 玻璃纤维沥青桥面防水黏结层的性能研究[J]. *公路*, 2011, 56(9): 34-37.
- ZHANG Zhengqi, LEI Zongjian, YANG Bo. Study on performance of waterproof adhesive layer of glass fiber asphalt bridge deck[J]. *Highway*, 2011, 56(9): 34-37.
- [76] ZAREI A, ZAREI M, JANMOHAMMADI O. Evaluation of the effect of lignin and glass fiber on the technical properties of asphalt mixtures[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44(5): 4085-4094.
- [77] LUO D, KHATER A, YUE Y C, et al. The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209: 377-387.
- [78] XING X Y, CHEN S H, LI Y, et al. Effect of different fibers on the properties of asphalt mastics[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120005.
- [79] SHENG Y P, LI H B, GUO P, et al. Effect of fibers on mixture design of stone matrix asphalt[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(3): 297.
- [80] NORGBEY E, HUANG J Y, HIRSCH V, et al. Unravelling the efficient use of waste lignin as a bitumen modifier for sustainable roads[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230: 116957.
- [81] LIU K F, LI T, WU C F, et al. Bamboo fiber has engineering properties and performance suitable as reinforcement for asphalt mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 290: 123240.
- [82] HUANG Y, LIU Z H, LIU L, et al. Hybrid modification of stone mastic asphalt with cellulose and basalt fiber[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 5671256.
- [83] 关宏信, 于凯辉, 徐英杰, 等. 不同纤维及沥青复合改性BK-10混合料路用性能[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20(5): 76-83.
- GUAN Hongxin, YU Kaihui, XU Yingjie, et al. Pavement performance of BK-10 mixtures modified with different fibers and asphalts[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2023, 20(5): 76-83.
- [84] 孙立军. 路面行为力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2021.
- SUN Lijun. *Mechanics of behavior of asphalt pavements* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2021.
- [85] ZOU X L, SHA A M, JIANG W, et al. Modification mechanism of high modulus asphalt binders and mixtures performance evaluation[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 90: 53-58.
- [86] YAN J H, LENG Z, LING C, et al. Characterization and comparison of high-modulus asphalt mixtures produced with different methods[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237: 117594.
- [87] WANG C, WANG H, ZHAO L D, et al. Experimental study on rheological characteristics and performance of high modulus asphalt binder with different modifiers[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 26-36.
- [88] 刘朝晖, 朱国虎, 柳力, 等. 玄武岩纤维与高模量外掺剂复合增强沥青混合料性能[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(5): 2147-2155.
- LIU Zhaohui, ZHU Guohu, LIU Li, et al. Performance of asphalt mixture reinforced by basalt fiber and high modulus admixture[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(5): 2147-2155.
- [89] WANG C H, ZHOU X L, YUAN H Z, et al. Preparation and performance of UHMWP modified asphalt and its high modulus mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294: 123629.
- [90] MORENO-NAVARRO F, SOL-SÁNCHEZ M, RUBIO-GÁMEZ M C, et al. The use of additives for the

- improvement of the mechanical behavior of high modulus asphalt mixes[J]. Construction and Building Materials, 2014,70:65-70.
- [91] ZHU J Q, MA T, FAN J W, et al. Experimental study of high modulus asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121447.
- [92] SI C D, ZHOU X D, YOU Z P, et al. Micro-mechanical analysis of high modulus asphalt concrete pavement[J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 128-141.
- [93] 姜舜君. 生物基半柔性路面材料的制备及性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- JIANG Shunjun. Preparation and performance research of semi-flexible pavement material based on bio-asphalt[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022.
- [94] 王黎明, 隗海文. 苯丙乳液改善灌入式半柔性路面材料性能的试验研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(1): 27-32.
- WANG Liming, JUAN Haiwen. Experimental study on improving performance of infused semi-flexible pavement by styrene-acrylic emulsion[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(1): 27-32.
- [95] 郭庆林, 张博昊, 高颖, 等. 不同种类沥青对灌入式半柔性材料的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13550-13555.
- GUO Qinglin, ZHANG Bohao, GAO Ying, et al. Influence of different types of asphalt on semi-flexible materials[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(31): 13550-13555.
- [96] 田瑞乾, 王伟赫, 刘逢涛, 等. 灌浆材料类型对半柔性路面路用性能影响研究[J]. 公路交通技术, 2023, 39(5): 45-53.
- TIAN Ruiqian, WANG Weihe, LIU Fengtao, et al. Research on the influence of grouting material types on the performance of semi-flexible pavement[J]. Technology of Highway and Transport, 2023, 39(5): 45-53.
- [97] 熊子佳, 龚明辉, 邓成, 等. 不同养护条件对半柔性路面材料性能的影响[J]. 公路交通科技, 2023, 40(9): 37-44.
- XIONG Zijia, GONG Minghui, DENG Cheng, et al. Influence of different maintenance conditions on performance of semi-flexible pavement materials[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(9): 37-44.
- [98] 王业, 张垚, 吴正光, 等. 半柔性路面材料强度形成机理及强化研究[C]//中国科学技术协会, 交通运输部, 中国工程院, 湖北省人民政府. 2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(公路工程篇). 武汉, 2022: 309-316.
- WANG Ye, ZHANG Yao, WU Zhengguang, et al. Research on strength formation mechanism and reinforcement of semi-flexible pavement materials[C]//China Association for Science and Technology, Ministry of Transport of the People's Republic of China, Chinese Academy of Engineering, Hubei Provincial People's Government. Proceedings of the World Transportation Conference 2022 (WTC2022) (Highway Engineering). Wuhan, 2022: 309-316.
- [99] 程培峰, 马广涛, 张展铭, 等. 硅烷偶联剂对半柔性路面材料性能增强机理研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(7): 37-44.
- CHENG Peifeng, MA Guangtao, ZHANG Zhanming, et al. Performance enhancement mechanism of silane coupling agent on semi-flexible pavement materials[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2023, 42(7): 37-44.
- [100] 王选仓, 于伟, 冯治安, 等. 重载水泥混凝土路面极限轴载计算方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(5): 21-27.
- WANG Xuancang, YU Wei, FENG Zhian, et al. Calculation methods for ultimate axle load on cement concrete pavement under heavy load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(5): 21-27.
- [101] 李盛, 杨帆, 曹前, 等. 连续配筋混凝土路面结构优化及性能评价[J]. 土木工程学报, 2017, 50(7): 122-128.
- LI Sheng, YANG Fan, CAO Qian, et al. Structure optimization and performance evaluation of continuously reinforced concrete pavement[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(7): 122-128.
- [102] 李盛, 杨帆, 刘萌, 等. 新型双层CRCP结构及在城市道路中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 983-989.
- LI Sheng, YANG Fan, LIU Meng, et al. Structure of continuously reinforced concrete pavement with double-layer reinforced and its application in urban road[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(4): 983-989.
- [103] 吴瑞麟, 王巍, 杨梅梅, 等. 基于实测数据的双层CRCP横向裂缝研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 1-5.
- WU Ruilin, WANG Wei, YANG Meimei, et al. Research on transverse cracks of bilayer CRCP based on actual data[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(1): 1-5.
- [104] 杨帆, 李琛琛, 李盛, 等. 温缩作用下双层连续配筋混凝土

- 路面配筋率设计参数对比分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(4):1122-1132.
- YANG Fan, LI Chenchen, LI Sheng, et al. Numerical simulation of continuously reinforced concrete pavement with double-layer reinforcement under effect of temperature shrinkage[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2023,53(4):1122-1132.
- [105] 戴逸清,陈阳利,顾兴宇,等.玄武岩纤维筋连续配筋混凝土路面力学分析[J].公路交通科技,2016,33(6):15-19.
- DAI Yiqing, CHEN Yangli, GU Xingyu, et al. Mechanical analysis on BFRP continuously reinforced concrete pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2016,33(6):15-19.
- [106] 冀志远,王骁帆,周舟.BFRP-CRCP配筋设计方法和参数敏感性分析[J].公路交通科技,2022,39(12):60-66.
- JI Zhiyuan, WANG Xiaofan, ZHOU Zhou. Analysis on reinforcement design method and parameter sensitivity of BFRP-CRCP[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2022,39(12):60-66.
- [107] KIM S M, CHO Y K, LEE J H. Advanced reinforced concrete pavement: Concept and design[J]. Construction and Building Materials,2020,231:117130.
- [108] LIU K X, ZHANG X, WANG Y B, et al. Laboratory investigation on early-age shrinkage cracking behavior of partially continuous reinforced concrete pavement[J]. Construction and Building Materials,2023,377:131125.
- [109] ZHANG H, GAO P W, ZHANG Z X, et al. Experimental study of the performance of a stress-absorbing waterproof layer for use in asphalt pavements on bridge decks[J]. Construction and Building Materials,2020,254:119290.
- [110] 刘燕燕.非连续短纤维增强乳化沥青碎石应力吸收层性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- LIU Yanyan. Properties research on non-continuous fiber reinforced emulsified asphalt gravel stress absorbing layer [D].Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2013.
- [111] XUE Y C, QIAN Z D, ZHANG M, et al. Reflective cracking resistance improvement of the asphalt concrete overlay on an airfield pavement[J]. Strength of Materials,2020,52(1): 149-159.
- [112] 蔡燕霞.橡胶沥青应力吸收层结构行为与路用性能研究[D].西安:长安大学,2016.
- CAI Yanxia. Research on the structure behavior and road performance of rubber asphalt stress absorbing layer[D]. Xi'an:Chang'an University,2016.
- [113] 柳力,刘朝晖,李盛.刚柔复合式路面层间抗裂材料疲劳性能研究[J].公路,2016,61(3):7-11.
- LIU Li, LIU Zhaohui, LI Sheng. Research on fatigue performance of interlaminar anti-cracking material for rigid-flexible composite pavement[J]. Highway,2016,61(3): 7-11.
- [114] 张倩倩,吴德芬,何文,等.接缝修补材料对复合式路面AC层抵抗反射裂缝的试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(1):136-142.
- ZHANG Qianqian, WU Defen, HE Wen, et al. Experimental research on reflection-crack resistance of composite pavement with different joint repair materials[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2016, 47(1):136-142.
- [115] 田源.土工合成材料对沥青路面抗裂性能的影响[J].中国科技论文,2019,14(12):1305-1310.
- TIAN Yuan. Influence of geosynthetics on crack resistance of asphalt pavement[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(12): 1305-1310.
- [116] 李林涛.复合改性橡胶沥青及其应力吸收层性能研究[J].交通科学与工程,2018,34(4):6-10.
- LI Lintao. Study on the performance analysis of composite modified rubber asphalt and its stress absorbing layer[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2018,34(4): 6-10.
- [117] 程培峰,史书铨,洪海.HDPE-橡胶粉复合改性沥青及其应力吸收层混合料性能[J].公路交通科技,2014,31(2):32-36.
- CHENG Peifeng, SHI Shuquan, HONG Hai. Composite modified asphalt with HDPE and rubber powder and its performance of mixture for stress absorbing layer[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2014,31(2):32-36.
- [118] 洪海.HDPE-橡胶粉改性沥青混合料应力吸收层防治反射裂缝研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.
- HONG Hai. Study on HDPE-rubber powder modified asphalt mixture stress absorbing layer to prevent and rehabilitate reflection crack[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2016.
- [119] 常艳婷,陈忠达,张震,等.桥面沥青铺装环氧乳化沥青粘结层性能研究[J].材料导报,2015,29(18):103-107.
- CHANG Yanting, CHEN Zhongda, ZHANG Zhen, et al. Study of epoxy emulsified asphalt binder layer performance of asphalt bridge deck pavement[J]. Materials Review,2015,29(18):103-107.