梯度功能复合路面设计原理与实现方法

冯德成*, 王东升, 易军艳, 张锋

哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090

* 联系人, E-mail: fengdecheng@hit.edu.cn

2020-02-29 收稿, 2020-04-02 修回, 2020-04-02 接受, 2020-04-03 网络版发表

国家自然科学基金(51878229, 51408154, 51408161)资助

摘要 路面是道路工程的主体结构, 由多个结构层和功能层组成, 它应同时满足车辆荷载、水、温度作用下的耐久性、行车安全性与舒适性要求。然而, 目前沥青路面的结构寿命和服役性能远未达到人们对路面长寿命和高性能的期望。其原因不仅仅是材料因素与施工质量问题, 还在于现有设计理论与指标体系尚不能满足长寿命路面设计的需要, 路面材料-结构-工艺一体化的设计原则也未得到有效贯彻。由于设计年限较短, 现有路面材料的力学性能与疲劳寿命很容易满足设计年限内重复荷载作用的要求。随着路面长寿命设计目标的提升, 构建新的路面设计理论体系也成为关键性科学问题。因此, 为探究路面结构的变革和发展, 本文首先从沥青路面的结构性破坏特征出发, 探讨了路面开裂类型及其产生的细观机制, 明确了路面材料组成特性和层状结构界面状态对开裂控制的作用原理; 其次, 在总结分析路面弹性层状理论体系的基础上, 提出了梯度功能复合路面设计理论与方法, 并推荐了梯度功能复合路面的结构组合和设计流程; 进而提出采用高性能功能复合材料, 并通过弱化或消除界面效应的层间处治技术来实现梯度功能复合路面; 最后, 结合梯度功能结构设计理念在桥面铺装工程的实践, 探索了梯度功能复合路面设计与施工中的关键技术环节。

关键词 沥青路面, 裂缝, 梯度功能材料, 梯度功能复合路面

路面是道路工程中直接承受交通荷载和气候环境作用的结构层, 服役期内除应满足稳定性和耐久性等结构性要求以外, 还应满足平整、抗滑、排水、降噪等功能性要求。我国沥青路面的设计寿命一般为12~15年^[1], 水泥混凝土路面的设计寿命一般为20~30年^[2], 这远未能达到人们对长寿命路面的期望。主要原因在于: 无论是沥青路面的层状弹性理论体系, 还是水泥混凝土路面的弹性地基板理论, 现有路面结构的设计寿命与设计年限内的累积轴载作用密切相关, 并没有基于长寿命路面要求进行设计, 路面材料力学性能和耐久性在路面结构服役期内也无法完全发挥其功效。所以, 摆脱传统设计理论的束缚, 探讨新的设计理论与方法,

或许能找到实现长寿命路面结构的设计理论和方法。而且, 高性能复合材料的不断涌现以及树脂基复合材料、纳米材料、纤维类材料的工业化发展, 也为长寿命路面的实现提供了可能^[3]。因此, 研究长寿命路面设计理论与开发高性能路面材料将成为道路工程领域的研究热点和前沿方向。

目前, 层状弹性体系力学依然是沥青路面结构设计的理论基础, 但是随着新结构与新材料的应用, 路面结构的破坏模式与特征呈现出多样性, 研究者开始寻求更加准确的力学模型来对路面结构进行不同层次和维度的设计。其中, 复合材料板理论被认为是最能反映沥青路面层状结构行为的理论模型。它是通过优化材

引用格式: 冯德成, 王东升, 易军艳, 等. 梯度功能复合路面设计原理与实现方法. 科学通报, 2020, 65: 3270~3286

Feng D C, Wang D S, Yi J Y, et al. Designation principle and method for functionally graded composite pavement (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 3270~3286, doi: [10.1360/TB-2020-0200](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0200)

料性能与结构组合的手段,实现在复杂荷载作用下,维持自身结构的完整性、耐久性与安全性^[4,5]。沥青路面作为一种典型的层状复合结构,与复合材料板理论的基本物理模型高度契合;而且,复合材料板理论的求解和设计方法已经日臻成熟,可以完整地引入到路面结构的设计中。同时,路面作为一种刚度梯度复合结构,也适合采用梯度功能材料(functionally graded materials, FGM)的设计原理与复合材料板理论相结合的方法,来构建路面结构设计的新体系。

所谓梯度功能材料,是指成分、组织结构、密度等理化性能沿某一方向连续或阶梯式变化^[4],是材料两端呈现截然不同性能或功能的材料(图1)。相比于均一材料和复合材料而言,梯度功能材料的界面结合强度较高,表现为组织和组分按一个特定的方向逐次转变,其物理、力学行为在不同区域也随之逐渐发生变化^[6]。因此,其材料内部不存在明显的界面,可最大程度地消除或者减小不同组分之间因外部因素作用产生的破坏作用。近年来,该类材料被广泛应用在航空航天、电子、化工、生物医药等领域。它的设计思想新颖、性能优良。借助复合材料板理论,将FGM结构和FGM技术与路面结构有机地结合起来,将会给路面工

程带来一场新的技术革命。

本文从路面的结构性破坏特征出发,分析路面开裂类型及其产生机制,明确路面材料组成特性和层状结构界面状态对于开裂的作用原理,提出通过采用材料优化技术和界面奇异问题消除方法,并根据复合材料板理论设计刚度连续的路面结构,从而抑制层状复合结构体系的开裂问题。然后,从高性能复合功能材料和界面消除技术两方面,讨论梯度功能复合路面(functionally graded composite pavement, FGCP)的设计方法及实现技术。最后,结合混凝土和钢桥桥面铺装工程实践,探索梯度功能复合路面结构的关键技术环节。

1 沥青路面结构的破坏模式

由于自然环境与荷载的耦合作用,沥青路面会出现结构性破坏和功能性破坏。其中,功能性破坏主要涉及路表抗滑性能衰减、平整性差及表面损坏等,与行车安全和舒适性密切相关;而结构性破坏则包括结构性车辙、反射裂缝、疲劳裂缝等,与路面结构使用耐久性紧密相关。根据近年来国内外倡导的长寿命沥青路面概念,需要保证在30~50年内沥青路面不出现结构性的破坏,仅每隔6~10年对路表面功能层进行一定的

图1 (网络版彩色)梯度功能材料的概念图^[6]。(a) 均质材料; (b) 双层复合材料; (c) 梯度功能材料

Figure 1 (Color online) Concept of functionally graded material^[6]. (a) Homogeneous materials; (b) double-layer composite materials; (c) functionally graded materials

维护和翻修,以维持较高的服务水平^[7].因此,在较长服役期内保持沥青路面结构的稳定性和耐久性,是建设长寿命沥青路面的技术关键.

在沥青路面结构设计流程中,变形和开裂是进行使用性能预测的主要指标.在早期的沥青路面结构设计和使用过程中,受原材料性能及混合料设计理论所限,沥青结构层的高温稳定性一直是关注的重点.但正如D'Angelo^[8]在美国沥青协会(asphalt institute, AI)会刊*Asphalt*上撰文指出,优质沥青结合料与高质量石料的应用,加上近30年来沥青混合料组成设计理论和实践的发展,变形问题已经得到了很好的解决,但开裂问题仍存在诸多疑问,目前仍缺少有效的评价体系及控制技术.

沥青路面开裂问题的复杂性在于其产生机制和表现形式的多样性^[9].沥青路面的开裂按照产生机制可分为荷载型裂缝和温度型裂缝,荷载型又可进一步细分为自上而下(top-down)开裂和自下而上(bottom-up)开裂,温度型包括温度疲劳和极端低温收缩开裂.除这两种裂缝外,我国由于无机结合料稳定类基层的使用,还存在大量的基层反射裂缝.按照表现形式分,又可分为

横向裂缝、纵向裂缝、块裂、龟裂等,其中每一种裂缝都有可能是多种因素联合作用的结果.

对于裂缝的不同开裂机制,其产生和扩展的时间规律有较大区别.例如,一般在路面服役1~5年内会出现均匀间距的低温裂缝,5年以后开始出现反射裂缝,而路面设计末期(12~15年)则呈现出明显的自下而上疲劳开裂.图2为哈尔滨西环高速公路自通车后数年内路面裂缝发展规律.通过对裂缝形态的现场观测可知,在早期出现的大多为上宽下窄且具有稳定间距的低温裂缝,而经过3~5年使用后,在部分低温裂缝周围,也开始出现了上窄下宽的横向裂纹,分析认为应是基层开裂导致的反射裂缝.根据这些裂缝的时间发展规律,即可以有针对性地提出减少裂缝产生、延缓裂缝扩展的技术措施.

按照断裂力学和材料损伤力学理论,材料和结构的开裂议题关键在于澄清裂纹在何处产生以及如何扩展,对应的抗裂技术也应从这两方面入手开展研究^[10].

裂纹的产生与材料自身密切相关.当沥青路面材料和结构承受交通或环境荷载时,不可避免地会在局部高应力区形成微小裂纹,并逐步扩展致断裂.沥青面

图2 哈尔滨西环高速公路观测路段裂缝发展规律

Figure 2 Cracks distribution in different years of Harbin west highway

层和无机结合料稳定类基层混合料均为典型的复合材料,具有多层次、多相夹杂的材料组成特点,即使外观看起来较为均匀的沥青结合料和水泥胶凝材料,实际上也是由物理和化学性质完全不同的多相成分构成。根据沥青面层混合料不同尺度下材料组成特点,从分子尺度到宏观尺度,沥青路面结构层材料内部均存在大量的原始缺陷(空隙、界面等),很容易形成局部高应力区^[11]。从材料设计角度出发,通过引入具有高模量和超弹性高性能复合材料,控制沥青路面各结构层材料的内部缺陷,将有助于提高沥青路面材料在承受外界荷载时的自身抗力,改善其抗裂性能。例如,树脂类结合料、聚合物改性类沥青在路面中的使用可以提高其与矿料的界面黏结性;振动拌和技术在无机结合料稳定类基层生产中的应用,则可以提升水泥和填料在混合料中的分布均匀性,减少空隙尺寸和数量,形成具有更好强度和耐久性的基层材料。

当然,即使在沥青路面结构层中采用高性能复合材料,由于交通和环境荷载下结构受力特点,沥青路面中仍将存在稳定的高应力区域,裂缝的出现将不可避免,由此如何延缓裂缝的扩展将决定着沥青路面结构的服役性能。以沥青层底的bottom-up开裂为例,按照多层结构裂纹扩展规律,当上下结构界面采用高性能黏结层时,不同沥青结构层间可视为连续状态,此时沥青面层整体承担荷载作用,将可以有效降低结构层底应力水平,延缓裂纹扩展(图3(a))。层间为非连续的滑动态时,裂纹向上扩展到界面层时,将改变扩展方向,形成沿结构层界面的多裂纹扩展态。由于层间滑动导致上结构层底弯拉高应力区重分布,将进一步加剧层

间多裂纹扩展,导致结构层性能劣化(图3(b))。当上下结构层力学属性相差较大时,以无机结合料稳定类基层开裂导致的向上反射裂缝为例(图3(c)),由于结构属性差异过大,此时宜从结构上着手,引入具有能量耗散作用且与上下黏结良好的功能层(如应力吸收层),降低裂纹前端的应力奇异性,并通过自身的均匀变形将扩展的裂纹分散至更大的区域中,避免裂纹的连通和失稳扩展,减缓裂纹扩展速率^[12]。因此,需要根据不同需求在结构层界面处设置合理的功能层。

2 梯度功能复合路面体系的构建

2.1 弹性层状理论体系的演化

早期沥青路面设计理论依据的是Boussinesq提出的集中荷载下弹性半空间体的应力和位移解。路面工程师们将路面和路基结构假设为均质、各向同性的单层弹性介质,获得了路面结构中的应力和变形分布,形成了柔性路面单层理论设计体系的雏形。然而,典型的柔性路面是由均质多层组成的(图4(a)),且路基的模量显著低于路面的模量,这将大大降低路基中的应力和变形。至1945年,Burmister^[13~15]将路面简化为水平无限大的有限厚度层,下层是水平和竖向无限大的弹性空间体,提出了圆形均布垂直荷载下双层弹性体系的理论解,并逐渐形成三层弹性体系的解析解。由此,层状弹性力学开始应用于沥青路面结构设计方法中^[16]。

我国1978版《公路柔性路面设计规范》(以下简称《规范》)采用双圆均布荷载作用下双层弹性体系理论作为力学模型,以荷载圆中心处的回弹弯沉值作为

图3 (网络版彩色)不同层间状态下裂纹扩展示意图。(a) 结构层间为连续状态;(b) 结构层间为滑动态;(c) 层间有应力吸收层
Figure 3 (Color online) Schematic of crack growth in different interface states. (a) Continuous interface; (b) sliding interface; (c) stress absorbing layer in interface

图4 均质多层路面(a)和梯度功能复合路面(b)示意图

Figure 4 Schematic of homogeneous multilayer pavement (a) and functionally graded composite pavement (b)

设计标准。郭大智和冯德成^[17]提出的“郭大智解法”为力学响应的计算提供了极大便利。为了适应沥青路面结构厚度不断变厚、层数也不断增多的需求,1997版《规范》将多层弹性体系作为力学模型,将设计初期的路表弯沉作为设计指标,以确定沥青路面结构层厚度。2006版《规范》同样以多层弹性体系理论作为力学模型,并完善了结构组合设计原则与设计参数确定方法。2017版《规范》仍以多层弹性体系理论作为力学模型,并采用沥青层疲劳与永久变形、无机结合料稳定类基层疲劳、路基永久变形等作为沥青路面结构的设计指标。

随着对沥青材料黏弹特性以及轮胎与路面接地应力研究的深入,也建立了层状黏弹体系计算理论^[18]体系。近年来, Kim^[19]在层状黏弹体系理论的基础上,结合层间结合条件及边界条件,完成了层状黏弹体系理论求解,并应用Laplace数值反演方法完成了层状黏弹体系理论力学响应的求解。Dong和Ma^[20]利用Galilean变换和Fourier变换求得了矩形移动荷载下层状弹性/黏弹性体系解析解。Chen等人^[21]在非轴对称荷载下层状弹性体系理论解的基础上,引入非对称垂直荷载,完成了非轴对称垂直荷载下层状弹性体系理论求解,并完成了程序的编写及验证。

可见,在沥青路面结构设计理论体系的发展过程中,尽管从单层、双层到多层体系更为接近真实结构,但设计时仍以结构承载要求为主要控制要点,以设计期末需要重建路面为主要实现目标,远远达不到长寿命的期望值。同时,路面结构设计过程中进行了大量的假设,对现场路面各结构层材料质量的较大变异性以及结构层间界面功能性失效的考量仍显不足,导致在现有的设计期内也常出现严重的早期损坏。因此,梯度功能复合路面概念的提出,可能会是一个有效的解决方案。

2.2 梯度功能复合路面设计体系的构建

梯度功能复合路面(图4(b))的设计是以复合材料层合板理论为基础,根据各结构层应该具有不同的功能需求,以刚度协调和调节为手段,以应力水平优化为目标,实现将沥青层状体系路面结构设计成梯度功能复合路面。梯度功能复合路面需要各结构层在规定服役期内保持优异的工作性,克服现有路面结构材料多层次、多相和非连续性所导致的混合料内部诸多天然缺陷,以及提高多层路面结构的整体抗裂性能。因此,在设计与实施梯度功能复合路面中,首先应选择满足结构层功能需求的高性能复合材料,在实现功能目标的同时,减少结构层间内部缺陷,提高结构抗裂能力。其次,应对各结构层间的界面进行优化设计,通过设置应力吸收层、高性能的界面黏结层,对刚度相近的结构层做到层间连续,对刚度差异大的结构层实现刚度的逐步过渡,调节路面结构受力状态,延缓裂缝扩展速率。通过以上材料与结构的设计优化,最终实现梯度功能复合路面在荷载、温度和水作用下的长期耐久性与结构安全性。

均匀化理论为梯度功能复合路面材料设计提供了理论基础。该理论主要是针对非均质复合材料分布特点,将相对于宏观尺度较小且能反映材料组成性质的单元看成均质单元(如集料),确定每个单元的材料性能,由此建立梯度功能材料整体性能模型,建立材料宏观性能与微观性能的联系,优化梯度功能材料性能(如模量、热膨胀系数等)的设计。均质化方法吸引了众多研究者的广泛关注^[22,23],并形成了几种经典的相互作用模型,如自洽方法^[24,25]、微分法^[26]、广义自洽方法^[27]、Mori-Tanaka方法^[28~30]和相互作用直推法^[31~34]。其中,最为简单的是非相互作用模型(non-interacting method)或者称为稀疏散解(dilute estimate)。该方法是将

夹杂体置入无限大的基体当中,用远场作用的荷载来估算夹杂体对基体的影响,并求得等效的材料参数.自洽方法是最简单的相互作用模型,对非相互作用模型进行了修正,并考虑了夹杂材料之间的相互影响.该方法认为夹杂或者缺陷是置于无限大待求的有效体中而非基体材料中,而实际验证结果表明此方法过高地估计了相互作用的影响.微分方法从数学本质上讲是自洽方法的增量形式,但是这一模型的解并不唯一,而是与填充路径有关.为了修正自洽方法过高地估计相互作用的影响,研究者又提出了广义自洽方法;但是广义自洽方法一般只适用于处理夹杂颗粒形状为圆形和圆柱形的几种典型情况.Mori-Tanaka方法相当于在处理非相互作用模型时,将无限远场荷载变换为近场基体中的平均应力,应用形式较为简单,并可以通过增加相互作用项来处理相互作用的问题.Hirsch^[35,36]和Zimmerman^[37]最早应用细观力学方法研究混凝土类材料的力学性能.Hirsch采用的是半经验-半理论法,并且主要针对水泥混凝土材料.Christensen等人^[38]基于Hirsch的细观力学方法研究了沥青混凝土材料在不同级配组成情况下的动态模量等一系列力学参数.Buttler等人^[39,40]和Lytton^[41]则是较早应用细观力学方法系统研究沥青混凝土材料性能的学者.也有一些学者^[42-44]利用经典的细观力学方法对沥青混凝土材料的动态模量进行了预测,其核心思想来自Hashin^[45]的多层夹杂理论以及细观力学的微分方法.

梯度功能复合路面结构的力学模型来源于复合材料层合板理论.在航空和航天结构方面,复合材料层合板理论为设计和优化航空航天运载系统提供了直接指导.在经过课题组多年研究并参考其他领域研究的基础上,我们完成了复合材料层合板理论与路面功能结构的类比和等效假设条件转化的工作,并且在引入材料设计方案的基础上将复合材料层合板理论与路面结构相互结合.在这一体系中,共包括三个方面的内容:结构理论模型、计算方法和材料设计分析.在结构理论方面,具体涉及基于复合材料层合板理论的刚度设计方法、强度设计方法、振动设计和优化方法、疲劳设计方法、层间应力分析方法和失效判据、热分析和热应力设计方法.梯度功能结构的计算方法包括各项异性层状体系的矩阵传递解析求解、非线性有限元求解技术、胎-路耦合动力学求解方法、多目标优化算法、扩展有限元技术、离散元求解方法、宏细观交互求解技术、分子动力学模拟和均质化理论等.梯度功

能材料的设计方法包括各向异性本构模型、黏弹性本构、黏弹塑性本构、黏弹性损伤模型、内聚力界面模型以及多尺度本构模型等.结构层的分析工具为复合材料层板力学模型,如Li等人^[46]借助有限元方法将路面等效为复合材料板体,并进行了模态的求解,得到了与实验一致的结果.Cao等人^[47]采用复合板理论对路面结构进行了等效,并使用有限元方法实现了胎-路耦合作用下的路面结构响应分析,仿真结构与实测结果吻合良好,并且优化了路面结构的刚度.张锋^[48]使用有限段方法对路面-基础结构进行离散,采用差分算法实现了车辆行进中的车辆-轮胎-路面-土基四者之间的耦合分析.其中,路面结构被离散成典型的多层板体模型.此外,文献^[49-53]中也提供了路面复合板理论解析和数值方法,这些方法为进行温度、湿度、疲劳等条件下路面结构的功能设计提供了工具.

梯度功能复合路面设计中,需要解决数值求解技术.相比传统路面结构的层状弹性体系,梯度功能的理论基础是复合材料层合板理论,对于这一理论求解,需要的解析和数值求解技术更加复杂.其中非线性有限元求解技术是梯度功能路面理论的求解核心,当进行路面刚度优化时,必须考虑材料的非线性对应力水平和分布的影响.采用非线性有限元方法求解路面结构响应的工作在国外已经得到了广泛的应用,但在国内还是相对滞后.因此,可以将复合材料领域的非线性有限元求解技术、路面非线性有限元求解方法,以及路面功能梯度设计方法进行融合.如Aubad等人^[54]采用有限元方法研究了材料性能梯度、规律功率指数和各种边界条件对功能梯度欧拉梁的自由振动和瞬态响应.Dave等人^[55]采用有限元方法对具有显著非均匀性的岩土和路面结构进行建模,应用广义等参有限元公式求解柔性路面内部的力学响应,分析了黏弹性功能梯度材料的固定裂纹尖端场和柔性路面的层间性能;同时,Dave等人^[56]考虑沥青路面由于温度和荷载引起沥青层的性能梯度,采用有限元方法分析了性能梯度对结构性能的影响.此外,裂纹扩展求解技术是梯度功能结构设计的一个重要指标,将求解裂纹扩展的数值技术引入到新型的求解体系中也是非常必要的.如Pathak^[57]耦合有限元及扩展元自由伽辽金方法研究了循环热荷载和机械荷载下梯度功能材料准静态疲劳裂纹扩展过程,从断裂韧性、裂纹扩展曲线和疲劳寿命等方面进行了详细分析.冯德成等人^[58]采用扩展有限元方法模拟了路面结构在重载作用下的竖向裂纹扩展问题.曹

鹏等人^[59]利用黏弹性模型和扩展有限元结合分析了沥青弯曲梁的疲劳裂纹扩展。

传递矩阵法在传统的层状弹性体系的理论模型中起到了至关重要的作用。老一辈路面结构科研工作者已经将矩阵传递方法发展成了具备中国自主知识产权的路面结构设计系统。这就包括郭大智等人^[17,18]通过消化、吸收并提升路面多层结构的解析求解方法,引入传递矩阵求解技术,将传统的4~5层路面层状体系的求解方法扩展到了不限制层数的阶段。并且,持续的鲁棒性和计算效率远高于国外同行业软件,这也促进了传递矩阵方法在求解路面层状体系的普遍应用。梯度功能路面结构的一个重要内在物理本质就是不同层,或者同一层内材料的刚度不再是一个定值,而是沿深度变化。如何对存在刚度变化趋势的路面功能梯度结构进行快速求解是实现路面结构功能梯度设计的核心问题,课题组在传承郭大智教授的任意层体系求解方法上做出了大量的工作和实际的工程应用。梯度路面结构一个最为接近实际的模型就是将所有的层离散为空间的二维板体体系,在每一层板体体系中其材料刚度为常数。当板体离散的数量足够多时,就会在空间上趋近连续变刚度梯度层的效果。老一辈科研工作者所开发的层状求解体系,为梯度功能路面结构设计提供了理论基础。

综上所述,梯度功能复合路面结构的设计与验算,有必要融合既有的路面结构设计方法与验算方法。图5给出了梯度功能复合路面设计与验算流程。主要包括:(1)设定梯度功能复合路面结构设计指标;(2)拟定梯度功能结构、几何参数、力学参数;(3)确定分析理论(弹性或黏弹性;静力或动力;是否多场耦合等);(4)检查分析结果,是否达成性能要求;(5)进行全寿命周期技术经济评价;(6)确定路面结构方案,并补充功能结构数据库。

2.3 梯度功能复合路面的结构组合

梯度功能复合路面结构设计中,刚度的梯度化控制是结构设计的关键,通过连续刚度的界面处理,解决界面应力集中问题。在路面结构中,刚度中性轴所在的高模量承重层决定了路面的结构寿命,中性轴向上的刚度梯度要满足功能层复杂高应力水平的材料强度屈服破坏要求;向下的刚度梯度应满足三向应力水平下整体结构层的弯拉破坏与粒料层的压缩破坏要求。针对路面铺装这类多层结构,由于沥青面层的刚度接近,

图5 梯度功能复合路面设计与验算流程

Figure 5 Flowchart of designation and validation of functionally graded composite pavement

因此界面处治应采用刚度接近且厚度可忽略不计的黏结层,弱化结构层界面,使上下结构形成整体;对于上下结构层刚度差异大的界面,如无机结合料稳定类基层沥青路面或桥面铺装,应设置一定厚度的刚度过渡层,实现梯度刚度连续变化的铺装结构。基于以上考虑,表1为推荐的梯度功能复合路面结构组合。路面表面层4 cm内是轮胎与路面的交互作用影响区;4~10 cm为高应力区,主要为剪切、压缩区;土基之上的整体材料弯拉、粒料材料受压。

在实际工程中,复合式路面结构更接近于这一结构(图6)。这一结构无法按照沥青路面或水泥混凝土路面设计规范设计,结构层内的应力应变分布规律也不适合采用层状弹性理论体系与弹性地基板理论进行分析。工程实现中,各界面层的联结技术与界面弱化性能是保证复合式路面结构耐久性的最重要手段。

3 梯度功能复合路面的实现

梯度功能复合路面的实现,依赖于各结构层高性

表 1 梯度功能复合路面的推荐结构组合

Table 1 Recommended structural combinations for functionally graded composite pavements

路面结构层	功能	刚度	主要应力特征	厚度(mm)	材料
功能性面层	抗滑	低	复杂应力区	20~40	可再生树脂类、纤维复合混凝土、SMA
联结层	抗剪、抗疲劳		高应力区	40~60	高模量、聚合物改性沥青、树脂类混凝土
结构性功能层	能量耗散、抗疲劳			20~40	改性沥青砂胶、砂粒式改性沥青混凝土等
	防水与界面结合			—	聚合物类、树脂类、改性沥青类
结构性面层	主要承重、抗疲劳	高	刚度中性轴	200~400	高性能混凝土、配筋混凝土、纤维混凝土
结构性功能层	应力吸收			20~50	改性沥青砂胶、砂粒式沥青混凝土
基层	次要承重		弯拉	200~400	沥青碎石、无机结合料稳定类
底基层	路基路面刚度过渡		压缩或弯拉	400~800	级配碎石或级配砂砾、无机结合料稳定类
路床	路面结构基础	低		—	砾料类或改善土类

图 6 典型复合式路面结构

Figure 6 Typical composite pavement structure

能复合功能材料及界面消除或弱化技术. 其中, 以提高沥青混合料性能为目标的高性能复合功能材料主要包括纤维复合材料、树脂材料、聚合物改性材料及纳米材料等. 以弱化或消除界面效应的层间处治的施工技术主要包括功能封层、环氧基黏结层、热接式层间处治工艺、路面结构的连续摊铺等.

3.1 高性能复合功能材料

3.1.1 纤维复合材料

纤维在沥青混合料中的主要功能是增强混合料的抗拉强度, 吸收疲劳开裂过程中的应变能, 以提高疲劳性能; 而且, 纤维能够对沥青起到吸收和稳定效应, 防

止筑路过程中沥青的流失. 因此, 通常情况下, 纤维在沥青玛蹄脂碎石(stone mastic asphalt, SMA)和开级配抗滑磨耗层(open graded friction courses, OGFC)中的应用较多^[60]. 常见的纤维种类有聚丙烯纤维、聚酯纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维、纤维素纤维及混合纤维等. 不同的纤维类型、纤维长度及掺量对沥青混凝土性能影响不同^[61]. 综合来讲, 纤维复合材料的优势主要体现在增强材料的抗裂和抗变形能力^[62,63]. 因此, 在梯度功能复合路面中, 纤维材料首先可以用于主要受拉的结构层, 如表1中高强高模量结构性面层, 以及受低温环境影响较大的表面层, 以提高结构抵抗荷载开裂能力. 其次, 纤维还可以作为界面功能层, 如纤维封层, 其作用主要在于发挥界面层刚度的调节, 延缓开裂的扩展.

3.1.2 树脂材料

树脂混凝土是通过聚合作用形成的一种复合材料, 可作为胶结剂与骨料混合, 其强度、耐水性、耐化学腐蚀性、抗冻性、减震阻尼性和电绝缘性等均优于普通的硅酸盐水泥混凝土. 制备树脂混凝土的常用树脂有环氧、呋喃、丙烯酸酯、不饱和聚酯等^[64,65]. 其中, 环氧树脂是一种热固性材料, 可弥补基质沥青的热塑性本质, 掺入沥青后制备的环氧沥青混凝土在钢桥面铺装中尤为常见. 相比于普通沥青, 环氧沥青混合料的路用性能表现为强度高、温度稳定性高、黏结能力强、抗疲劳性能好及耐久性良好^[66~68]. 然而, 环氧沥青的相容性与韧性较差, 可通过在环氧沥青中加入纳米颗粒添加剂^[69]、环氧化亚麻油^[70]或环氧端基超支化聚酯^[71]对环氧沥青进行增容增韧改性, 最终形成高性能

复合功能材料. 树脂材料由于其刚度较大, 与集料黏结好, 形成的混合料内部缺陷少, 尤其适用于钢桥/混凝土桥的桥面铺装结构. 当用作铺装结构层材料时, 可以减少与钢板/混凝土之间的刚度差异; 当用于钢板/混凝土基底与铺装结构的界面处治层时, 也可通过合理的材料性能设计, 形成刚度的梯度过渡层.

3.1.3 聚合物改性材料

聚合物改性材料在沥青改性中最为常用且种类繁多, 大体分为: (1) 热塑性聚合物, 如聚乙烯PE、聚丙烯PP、乙酸-醋酸乙烯酯EVA等; (2) 热塑性弹性体, 如苯乙烯-丁二烯-苯乙烯聚合物SBS、苯乙烯-异戊二烯-苯乙烯聚合物SIS等; (3) 热固性聚合物, 如环氧树脂、聚氨酯等; (4) 橡胶, 如天然橡胶、丁苯橡胶SBR、回收轮胎橡胶等^[72]. 其中, 热塑性聚合物改性沥青混合料抗车辙性能较好, 但低温性能较差^[73]. 热固性聚合物改性沥青混合料抗车辙性能和抗疲劳性能较好, 但因其自身快速硬化特性及价格昂贵在路面应用较少^[74]. 天然橡胶聚合物改性沥青混合料具有较好的抗车辙性能、抗疲劳性能且能够降低最佳沥青用量, 但天然橡胶是具有很高价值的生物材料, 而合成橡胶对沥青性能的影响因素繁杂^[75,76]. 相对来讲, 热塑性弹性体聚合物改性沥青性能更佳, 能同时改善沥青高低温性能^[77]. 根据以上不同聚合物材料特点, 可以在梯度功能复合路面不同层位发挥不同的功效, 如热塑性聚合物适用于有抗剪切和压缩需求的层位. 相对于基质沥青, 聚合物改性材料具有与集料更佳的结合性能, 内部缺陷少, 尤其是近年来应用较广泛的橡胶改性沥青, 由于其弹性恢复能力强, 用于刚度差异大的结构层界面进行刚度调控效果非常好. 吉林省在旧水泥混凝土路面板加铺沥青面层时, 即采用橡胶沥青加碎石的界面处治工艺, 通过碎石嵌入加铺沥青层, 形成界面位置的刚度梯度过渡层, 该工艺经历数年环境和重载的综合作用, 显示出了优良的使用效果.

3.1.4 纳米改性材料

纳米材料具有高温敏感性、高延展性、大比表面积等特性, 且呈现出自我清洁、修复、记忆和感知等智能特性, 已被用于路面工程中^[78,79]. 在沥青改性中, 应用较多的有纳米黏土(如蒙脱土)、纳米氧化钛、纳米氧化硅等. 而且, 分散性较好的纳米改性沥青具有较好的流变特性, 表现为较高的复数模量和较低的相位角^[80]. 当纳米黏土加入沥青中时, 沥青呈现良好的物理性能及耐老化性能, 但低温性能不足^[81]. 纳米氧化钛具

有较强的抗紫外线能力, 因而也可增强沥青的抗老化性能^[82]. 纳米氧化硅加入沥青中, 可提高其抗氧化能力、抗车辙性能及抗开裂性能^[83]. 因此, 纳米改性材料的使用主要为提升沥青基和水泥基材料自身的物理力学特性, 通过减少材料内部缺陷提高整体性能. 考虑其造价因素, 纳米材料主要应用于近地面的层位, 以最大程度发挥其抵抗环境和荷载作用的功效.

3.2 界面消除技术

3.2.1 功能封层

功能层可有效缓解环境及车辆荷载作用下的路面病害. 针对沥青路面夏季高温易产生严重车辙的问题, 采用热阻式封层降低沥青路面结构内部的温度, 减弱热能在路面内部的蓄积, 减轻路面车辙病害. 如冯德成和易军艳^[84]发现, 陶砂黏封层可有效降低中下面层的温度, 并且价格合适、性价比高. 防水黏结层是桥面铺装体系中的重要一环, 可使铺装体系与桥梁形成统一的整体, 显著影响桥梁的耐久性. 马涛等人^[85]采用层剪试验和拉拔试验分析了高剂量SBS改性沥青、环氧沥青、FYT3种防水黏结层与水泥混凝土桥面的黏结效果, 并推荐高剂量SBS改性沥青作为高速公路水泥混凝土桥面的防水黏结材料, 同时也可以提高层间黏结效果. 冯德成和宋宇^[86]发现, 沥青层间常温下若不洒布黏层油, 路面层间仅相当于具有60%左右的黏性, 而洒布黏层油后将使层间黏结提高约12%~21%; 沥青层与半刚性基层撒布黏层后, 路面层间相当于具有65%~78%的黏性. 刘朝晖和郑健龙^[87]分析了连续配筋混凝土+沥青混凝土复合式沥青路面层间处治工艺, 提出采用SBS改性沥青加铺土工布形式的层间黏结最佳. 可见, 功能封层的使用条件包括功能上(阻热隔温)和结构上(刚度差异大的结构层界面), 尤其是刚度相差较大的结构层, 如果不设置具有刚度梯度过渡的功能封层, 结构层界面会出现应力奇异, 极易导致微裂纹的产生.

3.2.2 环氧基黏结层

环氧基黏结层是一种高性能防水黏结层, 具有优良的层间结合能力、抗变形能力、防水能力等, 广泛应用于铺装防水黏结层中. 环氧沥青由A、B两组分组成, 其中A组分为环氧树脂, B组分为多组分混合物. A、B两组分经化学反应形成了不可逆的热固性材料. 环氧沥青开始应用于桥面铺装防水黏结层中, 众多学者对环氧树脂沥青的改性工艺、改性效果等方面进行大量研究. Luo等人^[88]开展了温拌环氧沥青混凝土和

热拌环氧沥青混凝土在大跨度钢桥面铺装的适用性研究,提出温拌环氧沥青混凝土适用于在干旱地区铺设的桥面铺装,而热拌环氧沥青混凝土更适用于交通繁忙的桥面铺装的维修和修复。Apostolidis等人^[89]发现亚砷类化合物可作为评价环氧改性沥青氧化硬化的指标,相位角可用于评价改性黏合剂的长期老化性能。众多研究表明^[90~92],环氧树脂沥青可显著提高桥面层间黏结性能,进而提高桥梁的耐久性。考虑到钢桥和混凝土桥与铺装层的刚度差异,环氧基黏结层可以最大限度地起到刚度梯度过渡作用,既能保证界面层连续,又能调节结构受力。

3.2.3 热接式层间处治工艺

热接式层间处治工艺是利用负压原理,有效提高防水黏结层与桥面的层间黏结,进而提高桥面铺装和桥梁的耐久性。首先对桥面进行预处理,采用抛丸工艺清除桥面的浮浆,磨耗掉表面的砂浆,露出水泥混凝土粗骨料,处理后构造深度在0.6~0.8 mm之间。接着采用高压鼓风方法,清除残留在桥面的石屑、尘土等污染物,并检查桥面板表面是否有油污、坑洞等缺陷,必要时进行修补。然后对水泥混凝土桥面板进行加热处理,主要是减少桥面板表面的含水率,提高桥面板的温度,提高桥面板与防水黏结层的黏结性能,可采用人工加热方式或自然加热方式(阳光照射),控制桥面板温度在50℃左右。采用同步碎石封层车,喷洒SBS热沥青,与桥面板有效结合,控制沥青撒布量与车辆行驶速度。其中SBS热改性沥青的喷洒剂量为1.5 kg/m²,预拌碎石在沥青混合料拌和锅中预先搅拌。在碎石封层之后,进行沥青胶砂防水保护层和桥面铺装层的施工。热接式层间界面工艺应用于富绥大桥的防水黏结层施工中^[93],其整体使用效果非常好。热接式的层间处治工艺原理与热拌沥青混合料类似,通过混凝土桥面板的加热,提高防水黏结材料与桥面板的黏结效果,达到界面连续的作用。

3.2.4 路面结构的连续摊铺

沥青混凝土路面常采用两层或者三层沥青混合料作为面层,并采用黏层油来增强层间黏结性能;水泥混凝土路面常采用两次摊铺而成。然而,在汽车荷载及环境因素的影响下,层间界面会由于损伤累积而发生破坏,严重影响路面耐久性。采用连续摊铺技术可消除层间界面薄弱问题。目前,沥青路面双层摊铺方法已在德国、瑞典等欧洲国家开始应用。1997年,瑞典戴纳帕克公司推出第一台双层摊铺机。我国的张石高速、洛商高速等工程曾采用双层摊铺进行试验路铺筑。王选仓

等人^[94]、杨育生等人^[95]、穆柯等人^[96]对双层摊铺的施工组织、施工工艺及层间效果进行研究,在单层摊铺的基础上增加一层沥青层施工,延长碾压时间至30~90 min,层间黏结性能提高了57%。双层水泥混凝土路面摊铺是将两层不同的新拌混凝土连续摊铺的新型路面^[97],一般表面层厚度约为4~8 cm,下面层为15~25 cm,摊铺时间间隔为30~60 min。美国自1891年在Ohio州第一次采用双层摊铺技术修建水泥混凝土路面后,在其他州推广了双层摊铺技术,积累了丰富的施工经验。欧洲德国、比利时、法国等也在水泥混凝土双层摊铺技术上积累了丰富的经验。路面结构的连续摊铺,实际上是针对刚度相近的结构层,通过连续作业达到消除界面的作用,形成界面连续的结构层。因此,该工艺适用于材料类型与组成结构类似的结构层施工。

4 梯度功能结构体系的工程实践

我国桥面铺装体系的成功就是梯度功能材料与结构设计理念的体现,尤其是特大型桥梁铺装结构。尽管桥面铺装结构不能按照路面结构设计方法对其进行设计与验算,但众多研究者采用数值分析方法确定了铺装层的应力、应变分布特征^[98~108]。而且,道路科技工作者也致力于开发高性能桥面铺装材料,关注大刚度梯度层次间的界面处治技术与施工工艺要求。经过大量的工程实践,我国已经形成了相对完善的桥面铺装体系、材料要求与工艺措施^[109~111],桥面铺装技术取得了创新性发展。下面以哈尔滨四方台大桥(混凝土桥)与沈阳后丁香大桥一号桥(钢桥)为例介绍其结构特点与施工关键技术。对于混凝土桥,考虑到混凝土与设计铺装用沥青混凝土的模量差异,采用聚合物改性沥青+沥青砂作为界面连续和刚度过渡的功能层。对于钢桥,采用刚度更大的树脂沥青混凝土作为铺装结构的组成部分,同时利用树脂基材料+碎石作为防水黏结层,以起到界面连续和刚度过渡的作用,提升服役性能和寿命。

4.1 混凝土桥桥面铺装体系

以哈尔滨四方台大桥为例,该桥为钢混叠合梁结构斜拉桥,全长1268.86 m,主桥桥面宽33.2 m。在桥面沥青混凝土铺装结构设计中,按各层的功能需求进行了优化设计,形成了梯度功能复合铺装结构。结构形式由上至下依次为铺装上层(40 mm的5%SBS改性聚酯纤维沥青混凝土,AC-16-I)、黏层(喷洒黏层油,用量为

1.3 kg/m²)、铺装下层(45 mm的5%SBS改性聚酯纤维沥青混凝土, AC-16-I)、防水层(15 mm的SBS改性沥青砂AC-5)、防水黏结层(喷洒5%的SBS改性沥青, 用量为1.3 kg/m²)。在桥面铺装的施工中, 合理处理桥面板和下铺装层之间的黏结状态可以显著提高桥面铺装层间黏结性能^[112]。魏文鼎^[93]基于室内拉拔试验和45°直剪试验, 研究了界面拉拔强度和剪切强度与混凝土桥面板温度和含水率间的定量规律(图7), 发现混凝土桥面板适合撒防水黏结层的临界含水率为0.5%, 而且当面板混凝土达到60°C时, 防水黏结层几乎不被剥落, 这种状态下黏结性能达到了防水黏结材料的最佳状态, 有助于铺装结构与桥面板的界面连续。

该桥2004年通车, 课题组每年均进行桥面裂缝调查, 发现其使用15年仍未出现各种形态的裂缝, 与大桥两侧高速公路路面裂缝分布形成了鲜明的对比。纤维增强改性沥青混凝土与良好的界面处理工艺可以有效控制梯度功能复合铺装结构的开裂问题。

4.2 钢桥桥面铺装体系

我国在钢桥面铺装工程中有很多经验教训, 课题组在沈阳绕城高速公路后丁香大桥一号桥工程中也开展了相关应用研究。该桥为钢箱梁桥, 跨径为38+61+38 m, 净宽为18.75 m。该桥铺装层采用树脂沥青组合体系, 厚度为70 mm。在结构组合设计中, 考虑到钢桥表面的构造形式和黏结材料的用量对桥面与黏结层之间的抗剪强度有显著影响, 刘秀^[105]研究了不同的钢板表面构造形式和不同的界面剂及其用量对界面剪切强度的影响(图8)。研究发现, 人字纹表面构造时的界面剪切强度最大, 但限于施工工艺和难易程度的影响, 桥面预处理仍采用机械喷砂的工艺。高黏沥青和SBS改性沥青最佳用量为0.9~1.1 kg/m², 在1 kg/m²左右剪切强度达到最大值, EBCL的材料用量为1 kg/m²时抗剪强度最佳; 相同用量下, EBCL防水黏结层的层间抗剪强度显著高于高黏沥青及SBS改性沥青。基于以上考虑, 提出了沈阳后丁香大桥一号桥桥面铺装结构, 结构形式由

图7 (网络版彩色)混凝土面板温度和含水率对界面拉拔强度和剪切强度的影响^[93]。(a) 拉拔强度; (b) 剪切强度

Figure 7 (Color online) Effects of temperature and moisture content of concrete slab on interfacial pullout strength and shear strength^[93]. (a) Pullout strength; (b) shear strength

图8 钢板表面构造和黏结层用量对剪切强度的影响^[105]。(a) 钢板表面构造; (b) 材料用量

Figure 8 Effects of surface structure of steel plate and amount of adhesive material on shear strength^[105]. (a) Steel plate construction; (b) material consumption

上至下依次为铺装上层(40 mm高黏沥青玛蹄脂碎石混合料 SMA-13)、黏层(热喷聚合物改性沥青, 用量为 $1.0\sim 1.3\text{ kg/m}^2$)、铺装下层(30 mm的树脂沥青混凝土, RA-05)、RA黏结层(RA胶结料, 用量 $0.3\sim 0.5\text{ kg/m}^2$)和防水黏结层(环氧黏结碎石抗滑层EBCL, 用量为 $0.9\sim 1.1\text{ kg/m}^2$)。

后丁香大桥一号桥桥面铺装过程中, 严格控制桥面板预处理和黏结层喷涂等工艺。由于高性能防水黏结层和黏层的使用, 桥面铺装结构形成了稳定的整体承载体系, 通车以来桥面无任何裂缝和其他病害。因此, 对于刚度差异较大的钢桥面铺装结构, 采用强度和刚度更大的树脂沥青作为铺装层材料将可以有效降低刚度差异, 同时辅以高强的环氧防水黏结层与树脂沥青黏结层, 可更好地消除钢桥面板与铺装层大刚度梯度界面的应力奇异问题, 提升铺装层的服役耐久性。

5 结语

我国沥青路面设计理论与指标体系随着公路建设

的发展而不断更迭, 一直发展到当今基于层状弹性体系力学理论的力学-经验法, 为我国高等级公路建设作出了重大贡献。但是, 也要看到我国沥青路面结构设计过度依赖层状弹性理论体系结构的力学响应分析, 过度依赖于传统沥青材料与无机结合料稳定类材料的现状并没改变。尽管《公路沥青路面结构设计规范》(JTG D50-2017)中提出了多指标验算方法, 即沥青面层的永久变形、沥青层疲劳开裂、无机结合料稳定类基层疲劳开裂、路面低温开裂以及路基永久变形等指标, 但在设计理论与结构破坏机理方面仍未有突破, 难以满足中国长寿命路面发展的需要。本文旨在尝试借鉴复合材料学的设计理论来构建新的路面设计方法, 引导道路科技工作者在关注设计理论的同时, 更要研究实现方法与施工工艺。随着3D打印技术不断成熟与应用, 路面工程实现真正的无界面化、连续刚度梯度结构已成为可能。我们希望在理论、原理方面前进的一小步, 能够助力路面工程耐久性飞跃的一大步, 最终建立高性能长寿命路面设计建造的中国方法。

参考文献

- 1 JTG D50-2017, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement (in Chinese). Beijing: People's Communications Press Co., Ltd., 2017 [JTG D50-2017, 公路沥青路面设计规范. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017]
- 2 JTG D40-2015, Specifications for Design of Highway Cement Concrete Pavement (in Chinese). Beijing: People's Communications Press Co., Ltd., 2015 [JTG D40-2015, 公路水泥混凝土路面设计规范. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015]
- 3 Feng D C, Xie X G. Environmental Friendly Pavement Technology (in Chinese). Beijing: Science Press, 2013 [冯德成, 解晓光. 环境友好型路面铺装技术. 北京: 科学出版社, 2013]
- 4 Shen G L. Mechanics of Composite Materials (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2013 [沈观林. 复合材料力学. 北京: 清华大学出版社, 2013]
- 5 Du S Y, Wang B. Micromechanics of Composite Materials (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998 [杜善义, 王彪. 复合材料细观力学. 北京: 科学出版社, 1998]
- 6 Zheng Z Q, Liang S Q. Research and prospect of functionally graded materials (in Chinese). J Mater Sci Eng, 1992, (1): 1-5, 16 [郑子樵, 梁叔全. 梯度功能材料的研究与展望. 材料科学与工程. 1992, (1): 1-5, 16]
- 7 Tarefder R A, Bateman D. Design of optimal perpetual pavement structure. J Transp Eng, 2012, 138: 157-175
- 8 D'Angelo J. Pavement cracking: What binder properties control. Asphalt, 2019, 34: 24-29
- 9 Al-Qadi I L, Scarpas T, Loizos A. Pavement cracking: Mechanics, modeling, detection, testing, and case histories. In: Proceedings of the 6th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, Taylor and Francis, Chicago, IL, 2008
- 10 Zheng J L, Zhou Z G, Zhang Q S. Theory and Method of Asphalt Pavement Crack Resistance Design (in Chinese). Beijing: China Communications Press, 2002 [郑健龙, 周志刚, 张起森. 沥青路面抗裂设计理论与方法. 北京: 人民交通出版社, 2002]
- 11 Cao P. Research on multi-scale mechanical analysis method and model of asphalt pavement (in Chinese). Doctor Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 [曹鹏. 沥青路面多尺度力学分析方法及模型研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014]
- 12 Cao P, Feng D C, Cao Y X, et al. Experimental study on fracture behavior of three point bending fiber reinforced concrete notched beam (in Chinese). Eng Mech, 2013, 30(S1): 221-225 [曹鹏, 冯德成, 曹一翔, 等. 三点弯曲纤维增强混凝土缺口梁的断裂性能试验研究. 工程力学, 2013, 30(S1): 221-225]
- 13 Burmister D M. The general theory of stresses and displacements in layered systems. I. J Appl Phys, 1945, 16: 89-94
- 14 Burmister D M. The general theory of stresses and displacements in layered soil systems. II. J Appl Phys, 1945, 16: 126-127
- 15 Burmister D M. The general theory of stresses and displacements in layered soil systems. III. J Appl Phys, 1945, 16: 296-302

- 16 Huang Y H. Stresses and strains in viscoelastic multilayer systems subjected to moving loads. Highway Research Record, 1973, 457: 60–71
- 17 Guo D Z, Feng D C. Mechanics of Layered Elastic System (in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001 [郭大智, 冯德成. 层状弹性体系力学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001]
- 18 Guo D Z, Ren R B. Mechanics of Layered Viscoelastic System (in Chinese). Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001 [郭大智, 任瑞波. 层状粘弹性体系力学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001]
- 19 Kim J. General viscoelastic solutions for multilayered systems subjected to static and moving loads. *J Mater Civ Eng*, 2011, 23: 1007–1016
- 20 Dong Z, Ma X. Analytical solutions of asphalt pavement responses under moving loads with arbitrary non-uniform tire contact pressure and irregular tire imprint. *Road Mater Pavement Des*, 2018, 19: 1887–1903
- 21 Chen S, Wang D, Du R, et al. Elastic multilayered pavement under an elliptical vertical load: Analytical solutions and program verification. *Road Mater Pavement Des*, 2019, 20: 297–315
- 22 Huang Y, Hwang K C, Hu K X, et al. A unified energy approach to a class of micromechanics models for composite materials. *Acta Metall Sin*, 1995, 11: 59–75
- 23 Castaneda P. On the homogenized yield strength of two-phase composite. In: Proceedings of the Zoological Society of London, 1992, 438: 419–431
- 24 Budiansky B. On the elastic moduli of some heterogeneous materials. *J Mech Phys Solids*, 1965, 13: 223–227
- 25 Hill R. A self-consistent mechanics of composite materials. *J Mech Phys Solids*, 1965, 13: 213–222
- 26 Norris A N. A differential scheme for the effective moduli of composites. *Mech Mater*, 1985, 4: 1–16
- 27 Christensen R M, Lo K H. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. *J Mech Phys Solids*, 1979, 27: 315–330
- 28 Mori T, Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metall*, 1973, 21: 571–574
- 29 Weng G J. Some elastic properties of reinforced solids, with special reference to isotropic ones containing spherical inclusions. *Int J Eng Sci*, 1984, 22: 845–856
- 30 Benveniste Y. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials. *Mech Mater*, 1987, 6: 147–157
- 31 Zheng Q S. A unified invariant description of micromechanically-based effective elastic properties for two-dimensional damaged solids. *Mech Mater*, 1996, 25: 273–289
- 32 Zheng Q S, Du D X. An explicit and universally applicable estimate for the effective properties of multiphase composites which accounts for inclusion distribution. *J Mech Phys Solids*, 2001, 49: 2765–2788
- 33 Zheng Q S, Du D X. Closed-form interacting solutions for overall elastic moduli of composite materials with multi-phase inclusions, holes and microcracks. *Key Eng Mat*, 1998, 479: 145–149
- 34 Zheng Q S, Hwang K C. Reduced dependence of defect compliance on matrix and inclusion elastic properties in two-dimensional elasticity. *Proc R Soc Lond A*, 1996, 452: 2493–2507
- 35 Hirsch T J. The Effects of the Elastic Moduli of the Cement Paste Matrix and Aggregate on the Modulus of Elasticity of Concrete. Agricultural and Mechanical College of Texas. 1961
- 36 Hirsch T J. Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate. *J Proceed*, 1962, 59: 427–452
- 37 Zimmerman R W. Elastic moduli of a solid containing spherical inclusions. *Mech Mater*, 1991, 12: 17–24
- 38 Christensen D, Pellinen T, Bonaquist R. Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. In: Technical Sessions of the Association-of-Asphalt-Paving-Technologists. *J Associat Asphalt Pav Technol*, 2003, 72: 97–121
- 39 Buttlar W G, Bozkurt D, AlKhateeb G G. Understanding asphalt mastic behavior through micromechanics. *Transport Res Board*, 1999, 1681: 157–169
- 40 Buttlar W G, Roque R. Evaluation of empirical and theoretical models to determine asphalt mixtures stiffnesses at low temperature. In: Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions. *J Associat Asphalt Pav Technol*, 1996, 65: 99–141
- 41 Lytton R. Materials property relationships for modeling the behavior of asphalt aggregate mixtures in pavements. Strategic Highway Research Program, Washington DC, 1990
- 42 Li G, Li Y, Metcalf J B, et al. Elastic modulus prediction of asphalt concrete. *J Mater Civil Eng*, 1999, 11: 236–241
- 43 Li Y, Metcalf J B. Two-step approach to prediction of asphalt concrete modulus from two-phase micromechanical models. *J Mater Civil Eng*, 2005, 17: 407–415
- 44 McLaughlin R. A study of the differential scheme for composite materials. *Int J Eng Sci*, 1977, 15: 237–244
- 45 Hashin Z. Thin interphase/imperfect interface in elasticity with application to coated fiber composites. *J Mech Phys Solids*, 2002, 50: 2509–2537
- 46 Li J B, Cao P, Zhang C. Composite solid plane to simulate the frequency response of pavement. In: 2012 Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation. IEEE, 2012. 285–288

- 47 Cao P. A 3D direct vehicle-pavement coupling dynamic model and its application on analysis of asphalt pavement dynamic response. *Math Probl Eng*, 2013, (12): 377–384
- 48 Zhang F. Dynamic response and permanent deformation of subgrade under heavy vehicle load in permafrost area in deep seasonally frozen regions (in Chinese). Doctor Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 [张锋. 深季节冻土区重载汽车荷载下路基动力响应与永久变形. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012]
- 49 Wang D, Roesler J R, Guo D Z. Innovative algorithm to solve axisymmetric displacement and stress fields in multilayered pavement systems. *J Transp Eng*, 2011, 137: 287–295
- 50 Gu X, Wang L, Cheng S, et al. Dynamic response of pavement under FWD using spectral element method. *KSCE J Civ Eng*, 2014, 18: 1047–1052
- 51 Liu P, Wang D, Hu J, et al. SAFEM-software with graphical user interface for fast and accurate finite element analysis of asphalt pavements. *J Test Eval*, 2017, 45: 1301–1315
- 52 Xu Q, Prozzi J A. A time-domain finite element method for dynamic viscoelastic solution of layered-half-space responses under loading pulses. *Comput Struct*, 2015, 160: 20–39
- 53 Varma S, Kutay M E. Viscoelastic nonlinear multilayered model for asphalt pavements. *J Eng Mech*, 2016, 142: 04016044
- 54 Aubad M J, Khafaji S O W, Hussein M T, et al. Modal analysis and transient response of axially functionally graded (AFG) beam using finite element method. *Mater Res Express*, 2019, 6: 1065g4
- 55 Dave E V, Paulino G H, Buttlar W G. Viscoelastic functionally graded finite element method with recursive time integration and applications to flexible pavements. *Int J Numer Anal Meth Geomech*, 2012, 36: 1194–1219
- 56 Dave E V, Paulino G H, Buttlar W G. Asphalt pavement aging and temperature dependent properties through a functionally graded viscoelastic model. Part-I: Development, implementation and verification. Trans Tech Publications Ltd, 2010, 631: 47–52
- 57 Pathak H. Three-dimensional quasi-static fatigue crack growth analysis in functionally graded materials (FGMs) using coupled FE-XEFG approach. *Theor Appl Fract Mech*, 2017, 92: 59–75
- 58 Feng D C, Tian L, Cao P. Analysis of longitudinal cracks in uneven settlement of subgrade based on extended finite element method (in Chinese). *Eng Mech*, 2011, 28: 149–154 [冯德成, 田林, 曹鹏. 基于扩展有限元方法的路基不均匀沉降纵向裂缝分析. 工程力学, 2011, 28: 149–154]
- 59 Cao P, Feng D C, Cao Y X. Numerical simulation of fracture path of asphalt concrete trabecular (in Chinese). *Highway*, 2012, (6): 92–95 [曹鹏, 冯德成, 曹一翔. 沥青混凝土小梁断裂路径数值模拟研究. 公路, 2012, (6): 92–95]
- 60 Chen H, Xu Q. Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder. *Fuel*, 2010, 89: 1616–1622
- 61 Zarei A, Zarei M, Janmohammadi O. Evaluation of the effect of lignin and glass fiber on the technical properties of asphalt mixtures. *Arab J Sci Eng*, 2019, 44: 4085–4094
- 62 Bonica C, Toraldo E, Andena L, et al. The effects of fibers on the performance of bituminous mastics for road pavements. *Compos Part B-Eng*, 2016, 95: 76–81
- 63 Mansourian A, Razmi A, Razavi M. Evaluation of fracture resistance of warm mix asphalt containing jute fibers. *Constr Build Mater*, 2016, 117: 37–46
- 64 Wang Y, Zhang B, Zhang K Q, et al. Research progress of resin concrete preparation and mechanical properties (in Chinese). *Bull Chin Ceram Soc*, 2013, (10): 149–153 [王贇, 张波, 张科强, 等. 树脂混凝土制备及力学性能研究进展. 硅酸盐通报, 2013, (10): 149–153]
- 65 Asmael N M, Waheed, M Q, Abdaljabbar A S. Investigate performance of polymer modified asphalt mixtures. *Electron J Faculty Civ Eng Osijek-e-GFOS*, 2019, 19: 36–49
- 66 Cong P L, Yu J Y, Chen S F. Effects of epoxy resin contents on the rheological properties of epoxy-asphalt blends. *J Appl Polym Sci*, 2010, 118: 3678–3684
- 67 Yang J, Lu H, Yuan D, et al. Evaluation of modification effect of epoxy resin based on performance of asphalt mixtures. *J Southeast Univ*, 2007, 23: 122–126
- 68 Cong P L, Chen S F, Yu J Y. Investigation of the properties of epoxy resin-modified asphalt mixtures for application to orthotropic bridge decks. *J Appl Polym Sci*, 2011, 121: 2310–2316
- 69 Kim B C, Park S W, Lee D G. Fracture toughness of the nano-particle reinforced epoxy composite. *Compos Struct*, 2008, 86: 69–77
- 70 Sahoo S K, Khandelwal V, Manik G. Influence of epoxidized linseed oil and sisal fibers on structure-property relationship of epoxy biocomposite. *Polym Compos*, 2018, 39: E2595–E2605
- 71 Flores M, Fernández-Francos X, Ramis X, et al. Novel epoxy-anhydride thermosets modified with a hyperbranched polyester as toughness enhancer. I. Kinetics study. *Thermochim Acta*, 2012, 544: 17–26
- 72 Porto M, Caputo P, Loise V, et al. Bitumen and bitumen modification: A review on latest advances. *Appl Sci-Basel*, 2019, 9: 1–35
- 73 Polacco G, Berlincioni S, Biondi D, et al. Asphalt modification with different polyethylene-based polymers. *Eur Polym J*, 2005, 41: 2831–2844
- 74 Pyshyev S, Gunka V, Grytsenko Y, et al. Polymer modified bitumen: Review. *Chem Chem Technol*, 2016, 10: 631–636
- 75 Wen Y, Wang Y, Zhao K, et al. The use of natural rubber latex as a renewable and sustainable modifier of asphalt binder. *Int J Pavement Eng*,

- 2015, 18: 547–559
- 76 Lo Presti D. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Constr Build Mater*, 2013, 49: 863–881
- 77 Airey G. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, 2003, 82: 1709–1719
- 78 Arivalagan K, Ravichandran S, Rangasamy K, et al. Nanomaterials and its potential applications. *Int J Chemtech Res*, 2011, 3: 534–538
- 79 Zhou X X, Zhang G F, Liu R M, et al. Molecular simulations of anti-aging mechanisms on nano-Ildhs modified asphalt. *Key Eng Mat*, 2014, 599: 198–202
- 80 Shafabakhsh G H, Ani O J. Experimental investigation of effect of Nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates. *Constr Build Mater*, 2015, 98: 692–702
- 81 Vargas M A, Moreno L, Montiel R, et al. Effects of montmorillonite (Mt) and two different organo-Mt additives on the performance of asphalt. *Appl Clay Sci*, 2017, 139: 20–27
- 82 Carneiro J O, Azevedo S, Teixeira V, et al. Development of photocatalytic asphalt mixtures by the deposition and volumetric incorporation of TiO₂ nanoparticles. *Constr Build Mater*, 2013, 38: 594–601
- 83 Yao H, You Z, Li L, et al. Rheological properties and chemical bonding of asphalt modified with nanosilica. *J Mater Civ Eng*, 2013, 25: 1619–1630
- 84 Feng D C, Yi J Y. Study on the mechanism and performance of thermal resistance adhesive seal of asphalt pavement (in Chinese). *J Highway Transp Res Dev*, 2009, 26: 1–5 [冯德成, 易军艳. 沥青路面热阻粘封层机理及性能研究. 公路交通科技, 2009, 26: 1–5]
- 85 Ma T, Huang X M, Ju H. Study on the performance of bridge deck waterproof bonding material (in Chinese). *J Highway Transp Res Dev*, 2007, (1): 43–46 [马涛, 黄晓明, 居浩. 桥面防水粘结材料性能研究. 公路交通科技, 2007, (1): 43–46]
- 86 Feng D C, Song Y. Study on test and evaluation method of asphalt pavement interlayer bonding state (in Chinese). *J Harbin Inst Technol*, 2007, (4): 627–631 [冯德成, 宋宇. 沥青路面层间结合状态试验与评价方法研究. 哈尔滨工业大学学报, 2007, (4): 627–631]
- 87 Liu Z H, Zheng J L. Experimental study on shear strength of interface bonding layer of CRC + AC composite asphalt pavement (in Chinese). *J China Foreign Highway*, 2007, (4): 46–49 [刘朝晖, 郑健龙. CRC+AC复合式沥青路面层间界面粘结层抗剪强度试验研究. 中外公路, 2007, 4: 46–49]
- 88 Luo S, Liu Z, Yang X, et al. Construction technology of warm and hot mix epoxy asphalt paving for long-span steel bridge. *J Constr Eng Manage*, 2019, 145: 04019074
- 89 Apostolidis P, Liu X, Erkens S, et al. Evaluation of epoxy modification in bitumen. *Constr Build Mater*, 2019, 208: 361–368
- 90 Xi L, Huang W R. Study on the application of epoxy resin in the waterproof layer of bridge deck pavement (in Chinese). *J China Foreign Highway*, 2016, 36: 292–295 [习磊, 黄维蓉. 环氧树脂在桥面铺装防水层中的应用研究. 中外公路, 2016, 36: 292–295]
- 91 Su R R, An Z J, Song X D. Experimental study on a new type of epoxy asphalt bridge waterproof adhesive layer (in Chinese). *Road Machin Construct Mechaniz*, 2015, 32: 84–86, 91 [苏忍让, 安中进, 宋绪丁. 新型环氧沥青桥面防水粘结层的试验研究. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32: 84–86, 91]
- 92 Zhang K, Luo Y. Interlaminar performance of waterproof and cohesive materials for concrete bridge deck under specific test conditions. *J Mater Civ Eng*, 2018, 30: 04018161
- 93 Wei W D. Research on key technology of hot joint waterproof adhesive layer for bridge deck pavement (in Chinese). Master Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 [魏文鼎. 桥面铺装热接式防水粘结层关键技术研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012]
- 94 Wang X C, Zhang T, Bao X Z, et al. Study on construction organization of double layer paving of asphalt concrete pavement based on flow process method (in Chinese). *Highway*, 2014, 59: 11–16 [王选仓, 张涛, 鲍薪竹, 等. 基于流水作业法的沥青混凝土路面双层摊铺施工组织研究. 公路, 2014, 59: 11–16]
- 95 Yang Y S, Mu K, Wang X C, et al. Study on the effect of double layer paving on asphalt pavement (in Chinese). *J Highway Transp Res Dev (Appl Technol Ed)*, 2012, 8: 57–58 [杨育生, 穆柯, 王选仓, 等. 沥青路面双层摊铺层间效果研究. 公路交通科技(应用技术版), 2012, 8: 57–58]
- 96 Mu K, Wang X C, Wang Z H, et al. Study on the temperature loss law of double layer paving (in Chinese). *Road Machin Constr Mechan*, 2012, 29: 32–34, 9 [穆柯, 王选仓, 王朝辉, 等. 双层摊铺的温度散失规律研究. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29: 32–34, 9]
- 97 Hu J, Siddiqui M S, David Whitney P E. Two-lift concrete paving-case studies and reviews from sustainability, cost effectiveness and construction perspectives. *TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers*. 2014
- 98 Huang X M, Wang J, Chen S Z. Stress analysis of long-span steel bridge deck pavement structure (in Chinese). *China Civ Eng J*, 1999, 32: 37–42 [黄晓明, 王捷, 陈仕周. 大跨径钢桥桥面铺装结构受力分析. 土木工程学报, 1999, 32: 37–42]
- 99 Nishizawa T, Himeno K, Nomura K, et al. Development of a new structural model with prism and strip elements for pavements on steel bridge decks. *Int J Geomech*, 2001, 1: 351–369
- 100 Li C, Deng X J. Dynamic response analysis of steel box girder bridge deck pavement (in Chinese). *J Southeast Univ (Nat Sci Ed)*, 2004, 34: 253–256 [李昶, 邓学钧. 钢箱梁桥桥面铺装层动态响应分析. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34: 253–256]
- 101 Huang W, Lin G P, Qian Z D. Fracture mechanics analysis of fatigue life of orthotropic steel deck pavement (in Chinese). *China Civ Eng J*, 2006,

- 39: 112–122 [黄卫, 林广平, 钱振东. 正交异性钢桥面铺装层疲劳寿命的断裂力学分析. 土木工程学报, 2006, 39: 112–122]
- 102 Chen T J, Qian Z D, Huang W. Study on dynamic response of pavement on long-span steel bridge deck (in Chinese). *J Highway Transp Res Dev*, 2008, 25: 68–72 [陈团结, 钱振东, 黄卫. 大跨径钢桥面铺装层动力响应研究. 公路交通科技, 2008, 25: 68–72]
- 103 Qian Z D, Liu L. Mechanical analysis of bond layer of steel deck under the coupling effect of whole bridge temperature heavy load (in Chinese). *J Southeast Univ (Nat Sci Ed)*, 2012, 42: 729–733 [钱振东, 刘隼. 整桥-温度-重载耦合作用下钢桥面粘结层力学分析. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42: 729–733]
- 104 Chen L, Qian Z, Wang J. Multiscale numerical modeling of steel bridge deck pavements considering vehicle-pavement interaction. In *J Geomech*, 2016, 16: B4015002
- 105 Liu X. Mechanical analysis and experimental research on asphalt concrete pavement system of steel bridge in cold region (in Chinese). Doctor Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 [刘秀. 寒区钢桥沥青混凝土铺装体系力学分析与试验研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016]
- 106 Wang L B, Hou Y, Zhang L, et al. A combined static-and-dynamics mechanics analysis on the bridge deck pavement. *J Cleaner Product*, 2017, 166: 209–220
- 107 Li M Q, Zhang F, Feng D C, et al. Study on dynamic response of steel bridge asphalt pavement under vehicle bridge coupling (in Chinese). *Eng Mech*, 2019, 36: 177–187 [李梦琪, 张锋, 冯德成, 等. 车桥耦合下钢桥面沥青铺装层动力响应研究. 工程力学, 2019, 36: 177–187]
- 108 Huang W. Design Theory and Method of Steel Deck Pavement of Long-span Bridge (in Chinese). Beijing: China Construction Industry Press, 2006 [黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计理论与方法. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006]
- 109 JTG T3364-02-2019, Specifications for Design and Construction of Pavement on Highway Steel Deck Bridge (in Chinese). Beijing: People's Communications Press Co., Ltd., 2019 [JTG T3364-02-2019, 公路钢桥面铺装设计与施工技术规范. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019]
- 110 JTG F40-2004, Technical Specification for Construction of Highway Asphalt Pavement (in Chinese). Beijing: People's Communications Press Co., Ltd., 2004 [JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2004]
- 111 CJJ T279-2018, Technical Standard for Construction of Paving Asphalt Concrete Urban Bridges Deck (in Chinese). Beijing: China Construction Industry Press, 2018 [CJJ T279-2018, 城镇桥梁沥青混凝土桥面铺装施工技术标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018]
- 112 Feng D C, Wei W D, Zhan S T. Influence of water content of cement concrete in bridge deck on bond performance of waterproof layer (in Chinese). *J Highway Transp Res Dev*, 2013, 30: 47–51 [冯德成, 魏文鼎, 詹苏涛. 桥面水泥混凝土含水率对防水层粘结性能的影响. 公路交通科技, 2013, 30: 47–51]

Summary for “梯度功能复合路面设计原理与实现方法”

Designation principle and method for functionally graded composite pavement

Decheng Feng^{*}, Dongsheng Wang, Junyan Yi & Feng Zhang

School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

^{*} Corresponding author, E-mail: fengdecheng@hit.edu.cn

Pavement is the main structure of road engineering, which consists of multiple structural and functional layers. During the service period, pavement should simultaneously meet the requirements of durability, driving safety and comfort under the combined effects of vehicle load, water and environment temperature. Normally, the design lives for asphalt pavement and concrete pavement are 12–15 and 20–30 years separately. The concept of perpetual pavement had been proposed in recent twenty years, which requires that pavement can resist structural fatigue distress for a long time (at least 50 years). Therefore, the service life and performance of the present asphalt pavement is far from meeting the requirements of perpetual pavement. The reason is not only the raw material and construction quality issues, but also that the existing design theory and design index cannot meet the needs of perpetual pavement design. In addition, the integrating design principles of material-structure-construction had also not been effectively implemented during the pavement design and construction. At present, as to the short design life, the requirements of mechanical properties and fatigue lives of existing pavement materials within the effect of repeated loading can be easily qualified. In order to achieve the perpetual pavement's design life, a new theoretical framework of pavement design may provide the potential solution. Therefore, in this study, the concept of the functionally graded composite pavement was proposed based on the definition of functionally graded materials, which consisted of structural layers with various stiffness. The functionally graded composite pavement could be realized by eliminating the weak adhesion between layers and optimizing the structural response of pavement. Firstly, the types and mechanisms of asphalt pavement cracking were analyzed based on the structural damage characteristics and developments of asphalt pavement, and the effects of the pavement material composition characteristics and the layered structural interfacial state on the cracking mechanisms were then clarified. Secondly, different from the popular elastic layered theory of asphalt pavement, the design theory and design method of the functionally graded composite pavement were proposed. The structural combination and design process of the functionally graded composite pavement were also recommended. Then the technical solutions, which include the development of high-performance functional composite materials and the good layered treatment to eliminate the interface effects, were proposed in order to realize the functionally graded composite pavement. Finally, bridge deck pavements on field concrete bridge and steel bridge were introduced to be as the case study of the functionally graded composite pavement. By employing new pavement materials and improving the interfacial mechanical behaviors, the functionally graded composite pavement on the concrete and steel bridge deck performs well in the service life. When comes to the future of the functionally graded composite pavement, as to the development and widely application of 3D printing technology, the functionally graded pavement with multiple functional, interfaceless and continuous stiffness graded layers could be more easily realized. It can be expected that a potential Chinese solution to realize the perpetual pavement could be presented and the service life of the pavement will be prolonged as to the application of the functionally graded pavement.

asphalt pavement, crack, functionally graded materials, functionally graded composite pavement

doi: [10.1360/TB-2020-0200](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0200)