

长寿命沥青路面研究现状及展望

徐希忠^{1,2}, 韦金城^{1,2}, 闫翔鹏^{1,2}, 张正超^{1,2}

(1.山东省交通科学研究院,山东 济南 250102;2.高速公路养护技术交通行业重点实验室,山东 济南 250102)

摘要:为了明确国内外长寿命沥青路面研究现状,对长寿命沥青路面的发展特点、路面结构、设计指标、路面材料、路面动力响应分析、疲劳性能预估等热点问题进行了综述,对比分析各国长寿命沥青路面的结构特点,总结路面材料设计与优化的成果,归纳沥青路面动力响应研究进展,最后论述长寿命沥青路面的发展方向。综合分析表明:长寿命沥青路面是未来沥青路面发展的趋势,当前长寿命沥青路面研究还存在设计指标不统一、力学响应预估模型精确度差、结构与材料设计针对性不强等方面的不足,需要从实体工程分析与验证、力学响应预估模型修正、结构与材料多尺度基因组分析等方面进一步深入研究。

关键词:长寿命沥青路面;结构与材料;动力响应;疲劳性能

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

沥青路面由于具备平整度高、无接缝、养护方便等优势,在中国高速公路建设和发展过程中,成为应用最为广泛的路面结构形式。随着社会经济的发展,中国的交通荷载也呈现出新的特点,原有的沥青路面结构分析方法已无法满足新形势下交通基础设施建设的需求,使中国沥青路面早期损害频繁发生,呈现出损坏时间早、范围广、程度严重等特点^[1-2]。近年来,如何防止高速公路路面早期损坏、延长其使用寿命已经引起道路工作者的高度重视,长寿命沥青路面技术是解决上述问题的有效途径之一。

长寿命沥青路面的概念起源于沥青路面全寿命周期最优化设计理念,是追求全寿命周期条件下路面设计、建设和养护最优化的技术对策。长寿命沥青路面是指路面设计寿命大于40年,设计使用期内,路面基层或基础没有严重的结构性破坏,且仅需表面功能性维修的沥青路面技术。长寿命沥青路面的应用与发展使得传统沥青路面普遍存在的早期病害严重、路面结构使用寿命短等问题得到一定程度的缓解。近年来,国内外道路工作者对长寿命沥青路面进行了大量研究,取得了许多研究成果,对长寿命沥青路面研究成果进行总结与展望,可进一步促进

长寿命沥青路面技术的发展。

本文对长寿命沥青路面发展的特点、路面结构、设计指标、路面材料、路面动力响应、疲劳性能预估等方面进行综述,旨在提出当前长寿命沥青路面发展存在的问题,明确长寿命沥青路面的发展方向。

1 长寿命沥青路面发展特点

一直以来,长寿命沥青路面都是道路工程界关注的热点问题,经过几十年的发展与完善,体现出新的发展特点,主要有以下6个方面:① 结构形式朝多元化方向发展,主要围绕柔性基层、半刚性基层、组合式基层等路面结构形式展开研究;② 新材料、新技术不断发展和应用,高模量沥青混凝土、自愈合路面材料、纤维改性沥青及多聚磷酸改性沥青等材料的应用促进了长寿命沥青路面的发展;③ 设计指标逐渐完善,逐渐由极限应变理论向结构疲劳抗力方向转变;④ 力学响应分析手段日趋成熟,路面结构分析手段由传统的弹性层状体系向多尺度、精细化仿真转变;⑤ 路面性能监测手段逐步多样化,对于路面长期性能检测,建立了野外观测站;⑥ 施工工艺朝智能

收稿日期:2021-12-13

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2018YFB1600100);山东省重点研发计划项目(编号:2019GSF109020);佛山市科技计划项目(编号:2018026)

作者简介:徐希忠,男,硕士,工程师.E-mail:846954711@qq.com

化方向发展,智能压实技术、宽幅大厚度施工技术亦促进了长寿命沥青路面的发展。

2 长寿命沥青路面结构

路面结构是承受交通荷载的主体,根据长寿命沥青路面设计要求,要实现路面在路面性能衰减到不可接受标准的时间不小于预期的结构寿命,就需要进行沥青路面结构分析与设计,选择合理的路面结构形式。当前,国内外长寿命沥青路面结构形式呈现出多元化特点。

2.1 欧洲长寿命沥青路面结构

长寿命沥青路面概念最早在欧洲(1980年)提出,欧洲有关长寿命沥青路面的研究取得了一定进展。其长寿命沥青路面结构形式主要为全厚式沥青路面^[3-5],即在处置或未处置的路基上直接铺筑热拌沥青混合料,也有部分欧洲国家对半刚性基层长寿命沥青路面进行了尝试^[6]。当前,欧洲较为典型的长寿命沥青路面结构形式如表1所示。欧洲长寿命沥青路面主要通过提升路面结构沥青混凝土层厚度以及路面材料模量来实现结构长寿命,并提出了沥青路面厚度临界值的概念。

表1 欧洲典型长寿命沥青路面结构^[7]

国家	道路名称	长寿命沥青路面结构组合
英国	M6	RA集料(3.8 cm)+粗粒式 AC(6.8 cm)+HRA集料(6.3 cm)+FDAC(19 cm)+级配砂砾(20 cm)
德国	A5	GA(3.7 cm)+AC(20 cm)+稳定底基层(15 cm)
法国	Perich	OGFC(40 cm)+HMB基层(22 cm)+原路面
奥地利	Brenner	细粒式 AC(27 cm)+粗粒式 AC(75 cm)+GRH(14 cm)+ATB(16 cm)
意大利	Del Sole	中粒式 AC(3 cm)+粗粒式 AC(7 cm)+ATB(15 cm)+级配砂砾(36 cm)

2.2 美国长寿命沥青路面结构

美国长寿命沥青路面,是欧洲长寿命沥青路面理论基础的发展。值得注意的是,美国早期路面未按照长寿命沥青路面设计,但其使用性能已达到了长寿命沥青路面的要求,例如美国大量使用的全厚式沥青路面及深厚式沥青路面。在美国长寿命沥青路面的结构设计中,最典型的特点是沥青混凝土层

厚、强度大、粒料层薄等^[8-9]。美国长寿命沥青路面普遍采用柔性基层,当路基状态良好,则选用全厚式沥青路面结构,当前美国应用范围较广、应用较多的长寿命沥青路面结构见表2^[10]。美国进行长寿命沥青路面结构设计时,充分考虑了工程所属区域的气候环境、交通状况等因素,并提出了层位分工理论,结构设计全寿命周期经济效益十分可观。

表2 美国典型长寿命沥青路面设计结构

应用范围	长寿命沥青路面结构组合
全美	40~75 mm 高品质沥青混凝土+100~175 mm 高模量沥青混凝土+75~100 mm HMA 或 70~110 mm 开级配沥青混合料(OGFC)
加利福尼亚州	2.5 cm OGFC+7.5 cm 聚合物改性沥青混凝土+15 cm 高模量沥青混凝土+20 cm 处置后的水泥破碎板+15 cm 水泥处治层
俄亥俄州州际	3.8 cm 聚合物改性沥青混凝土+22.9 cm 大粒径碎石混合料+10.2 cm 富沥青混凝土+15.2 cm 级配碎石
得克萨斯州	12 cm OGFC+5 cm PmB SMA+8 cm PmB SUP-19+25 cm PmB SUP-19+10 cm 沥青混合料基层
马里兰州	5 cm 沥青混凝土磨耗层+30.5 cm PmB SUP-19+15.2 cm 级配碎石

2.3 其他国家长寿命沥青路面结构

对于长寿命沥青路面,加拿大主要采用全厚式路面结构^[11],日本则采用连续配筋混凝土等刚性较大的基层,提升路基强度来抵抗沥青路面的结构性损坏^[12-13],韩国长寿命沥青路面结构注重承重层的设计,材料刚度以弹性模量表征,厚度经设计软件验算后给出^[14]。

2.4 中国长寿命沥青路面结构

在中国,受“强基、薄面、稳土基”设计思想的影响,最初的长寿命沥青路面结构为以沙庆林院士为代表的半刚性基层长寿命沥青路面^[15],随后出现了全厚式长寿命沥青路面结构^[16],复合式长寿命沥青路面结构^[17],柔性基层长寿命沥青路面结构^[18]等。也有学者对特定地域的长寿命沥青路面进行了研

究^[19-20],另外,长寿命沥青路面同样在市政快速路与主干道上得到了应用^[21]。中国长寿命沥青路面试验路结构汇总见表 3。

表 3 中国典型长寿命沥青路面试验路结构信息

科研单位	试验路名称	路面结构形式	路面总厚度/cm	路面沥青层厚度/cm
同济大学	云浮高速公路	组合式基层	72	32
		柔性基层	55	32
交通运输部公路科学研究院、东南大学	江苏沿江高速公路	刚性组合式基层	76	10
		柔性组合式基层	76	25
		全厚式	39	39
苏交科集团股份有限公司、同济大学、东南大学	沪宁高速公路	柔性基层	56	37
		半刚性基层	42	27
		刚性基层	58	12
山东省交通运输厅、山东省交通科学研究院	滨大高速公路	全厚式	50	50
		复合式基层	67	27
		刚性复合式	73.5	6
长安大学	陕蒙高速公路	半刚性基层	88	28
		柔性基层	98	38
		半刚性基层	74	18
辽宁省交通科学研究院	室内加速加载	柔性组合基层	74	30
			81	64
哈尔滨工业大学	鹤大高速公路	组合式基层	84	34
		半刚性基层	70	22
		复合基层	61	31
山东省交通科学研究院	青临高速公路	倒装结构	60	30
		复合基层	127	27
		复合基层	65	29
交通运输部公路科学研究院	试验环道	柔性基层	86	34
		结构类型一	72	12
		结构类型二	58	18
		结构类型三	68	28/24
		结构类型四	100	36/48/52
		结构类型五	72	18

由表 3 可见:中国长寿命沥青路面结构以组合式基层和半刚性基层为主,且沥青面层厚度都较常规沥青路面厚,尤其是全厚式沥青路面,但其路面结构总厚度较常规沥青路面结构有所减薄。

3 长寿命沥青路面设计指标与材料研究

当长寿命沥青路面结构组合、交通荷载及路面

材料参数确定后,要进行沥青路面结构厚度验算,需要明确设计控制指标。大量研究表明:路面材料耐久性是路面结构耐久性的保证,同时,路面材料是路面建设的物质基础。因此,有必要对长寿命沥青路面的设计指标和材料参数进行归纳。

3.1 长寿命沥青路面设计指标

3.1.1 设计寿命

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[22],高等级沥青路面设计年限为 15 年,长寿命沥青路面由于其特殊性和合理性,其设计年限有别于常规沥青路面,当前各国长寿命沥青路面设计年限见表 4,表 4 表明对于长寿命沥青路面,设计寿命均在 20 年以上,美国甚至达到了 50 年。

表 4 各国长寿命沥青路面结构设计年限

国家	设计寿命/年	标准轴载/kN
德国	30~40	100
英国	40	80
法国	30~40	130
南非	25	80
日本	20~40	49
加拿大	30~40	—
美国	50	80
澳大利亚	20~40	80
中国	30	100

3.1.2 设计控制指标

大量研究表明:长寿命沥青路面的破坏形式主要有疲劳开裂和永久变形两种^[23]。因此,当前长寿命沥青路面设计主要以车辙和疲劳开裂为控制对象,设计指标为沥青层层底拉应变、粒料层和土基竖向压应变,现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[22]构建了新的参数和多指标体系,也将土基竖向压应变指标纳入。对于长寿命沥青路面设计指标的具体数值要求,目前国内外尚未达成统一标准。当前,国外长寿命沥青路面设计指标一般为非改性沥青层层底拉应变为 60~70 $\mu\epsilon$,改性沥青可提高到 100 $\mu\epsilon$,路基竖向压应变为 200 $\mu\epsilon$ ^[24]。崔鹏等^[25]提出沥青层层底拉应变不大于 120 $\mu\epsilon$,路基竖向压应变不大于 280 $\mu\epsilon$ 的设计指标;徐鸥明^[23]则认为非改性沥青疲劳极限为 100 $\mu\epsilon$,改性沥青可提高到 100~200 $\mu\epsilon$,路基竖向压应变为 170 $\mu\epsilon$,半刚性基层沥青路面永久变形量不应大于 12 mm。

3.2 长寿命沥青路面材料研究

长寿命沥青路面各层材料设计与常规沥青路面类似。路基工程性质主要以 R_{CBR} 值(加州承载比值)和回弹模量表征,粒料类材料 and 无机结合料类材料以 R_{CBR} 值及回弹模量描述,沥青类材料参数主要有弹性模量、疲劳寿命等力学性能及常规路用性能。当前,针对长寿命沥青路面材料,刘福明^[26]系统研究了长寿命沥青路面各层材料参数和相关性能指标,并确定了沥青混合料的疲劳极限;平树江等^[27]分析了半刚性材料作为长寿命沥青路面基层的适应性,结果表明半刚性材料受水和温度的影响较大;张慧丽等^[28]进行了长寿命沥青路面耐疲劳层的力学行为分析,研究发现耐疲劳层模量对路面结构抗永久变形能力影响较大;朱建平^[29]、杨光^[30]分析了长寿命沥青路面沥青混合料的疲劳特性,获取了沥青混合料的疲劳阈值及疲劳方程;靳明洋^[31]探讨了环氧沥青混合料在长寿命沥青路面中应用的适应性,得出环氧沥青混合料具有减薄沥青层厚度和提升路面结构疲劳寿命的优势。

4 长寿命沥青路面动力响应

当前,国内外应用较为广泛的长寿命沥青路面动力响应分析方法为理论分析法、数值模拟法、现场实测法等。理论分析法是在弹性层状体系理论基础上将车辆荷载进行静态等效,采用系统动力学进行求解;数值模拟法则是利用有限元软件建立路面三维力学模型,以弹性模量和泊松比表征路面各层材料性能,对路面施加荷载进行分析;现场实测法是在路面建设过程中预埋传感器元件,在道路服役过程中进行动力响应数据采集,分析路面真实的力学性能演变规律。

4.1 沥青路面动力响应理论分析

由于计算机技术的限制,最初的力学响应分析大多基于经典力学理论,求解长寿命沥青路面在车辆荷载作用下力学响应的解析解。如基于弹性层状体系理论,采用积分变换方法求解受荷路面响应的解析解等^[33]。随着计算机技术的进步,有学者应用多刚体系统动力学,建立1/2车辆动力模型,分析不同路面结构的响应特征^[34]。Hardy^[35-36]在卷积积分的基础上,采用线性理论分析不同路面结构在车辆荷

载作用下的应力、应变、位移特征;SHI等^[37]应用振动系统理论,考虑路面不平度,对路面模型和车辆模型进行耦合,分析沥青路面动力响应影响因素。

4.2 沥青路面动力响应数值模拟

有限元技术的发展,为沥青路面动力响应分析提供了手段。近年来,中国学者对长寿命沥青路面在行车荷载作用下的动力响应进行了大量的数值模拟分析。崔鹏等^[38]基于实测轮胎荷载作用的长寿命沥青路面结构组合有限元分析,表明实现沥青路面长寿命的基本前提是增加沥青层厚度;黄文雄等^[39]研究分析了长寿命沥青路面在车辆荷载作用下力学响应的特点,结果表明路基竖向压应变对路面结构的稳定性有较大影响;周长俊^[40]结合辽宁省气候交通特点分析了3种典型长寿命沥青路面结构在不同轮组组合条件下的力学响应;凌天清等^[41]分析了刚性基层长寿命沥青路面层底接触应力,探讨了应力吸收层类型、路面结构层模量等对刚性基层长寿命沥青路面抗反射能力的影响;刘宁^[42]对比分析了半刚性基层长寿命沥青路面数值模拟和现场实测动力响应的特点;屈吕文等^[43]基于沥青混合料黏弹特性,在室内材料试验基础上进行了长寿命沥青路面力学响应的黏弹特性分析,发现沥青路面的黏弹特性和温度有很大关系;秦雨^[44]考虑坡度、超载、温度等因素耦合作用下复合式长寿命沥青路面动力响应特征,并基于细观力学方法进行了乳化沥青层的破坏机理分析。

4.3 沥青路面动力响应现场测试

沥青路面在实际交通荷载作用下,除了受车辆荷载及轮胎摩擦外,还承受环境因素的影响,在路面结构内部不断产生损伤,最终导致路面各种损坏的发生。虽然国内外学者考虑不同的影响因素建立了动态力学模型,但由于沥青路面所处地域的复杂性,模型与实际情况还存在较大差别。为了获取沥青路面尽可能真实的响应,许多道路科研工作者进行了动力响应现场实测分析。

国外对长寿命沥青路面的现场动力响应测试开展较早,技术比较成熟。俄亥俄州在铺设长寿命沥青路面时埋设了大量传感器元件,测试了不同温度状态长寿命沥青路面在动载作用下的动力响应特点^[45],提出提高疲劳容许值的建议;康星州美国运输部铺设了两段长寿命沥青路面试验段,提出下面层

应采用较低空隙率的材料^[46];Willis等^[47]采用应变计、土压力计等测试元件对NCAT试验路的沥青路面进行了车辆荷载作用下的动态响应测试和分析,表明路面的纵向应变读数略高于横向应变读数,是由于横向应变受车轮的影响较小;Chatti等^[48]同样在沥青路面中埋入沥青应变计实测车辆荷载下的路面响应,主要分析速度和胎压对路面应变响应的影响;Loulizi等^[49]采用土压力计、水平向应变传感器及热电偶采集路面信息,并基于现场实测数据建立不同车速和轴重下应力及应变响应幅值与温度之间的关系。

中国长寿命沥青路面的现场测试开展相对较晚,测试元件有引进的电学传感器和在土木工程中广泛应用的光纤光栅传感器^[50-51]。杨永顺等^[52]于滨州长寿命沥青路面内部布设传感器,实测荷载及环境作用下路面结构响应信息;董泽蛟等^[53]、温佳宇^[54]在鹤岗至大连高速公路通化至新开岭段埋设光纤光栅传感器,对车辆荷载作用下沥青路面结构动力响应进行了实测;陈少幸等^[55]利用焊接式和光纤式传感器对长寿命沥青路面动力响应进行了监测分析,结果表明光纤光栅传感器更适合沥青路面动力响应监测;也有学者^[56-57]根据路面结构层寿命递增的思想设计了3种长寿命沥青路面,并进行不同路面结构、轴载、速度、温度下沥青路面的响应分析,重点讨论了沥青混凝土的黏弹特性。

5 长寿命沥青路面疲劳性能预估

中国道路工程专家邓学钧教授定义路面材料在承受重复荷载作用时,可能在低于静载应力值荷载作用下产生破坏,这种现象称为路面的疲劳^[58]。Tigdemir等^[59]和Yeo等^[60]参考自然灾害分析的超声波法,将其应用到沥青路面疲劳性能预估,在保证精度的情况下可以实现无损检测;唐军等^[61]在分析国内外加铺层厚度的前提下,采用多指标方法对沥青路面加铺层的疲劳寿命进行了分析,提出沥青路面的破坏形态是研究其疲劳性能的切入点;刘浩等^[62]通过有限元分析得出,当半刚性沥青路面存在裂缝时,其疲劳寿命将会受到重要影响,因此在设计中应对其进行验算分析;孙宗杰^[63]、李生龙^[64]在对光纤光栅传感器进行室内标定的前提下,结合沥青路面监

测信息和室内材料参数,建立了长寿命沥青路面疲劳预估方程,对比了各结构疲劳寿命;孙策^[65]基于沥青混合料疲劳试验参数,建立了沥青混凝土材料疲劳预估模型,应用有限元软件分析了路面结构力学响应,并采用加速加载试验进行验证,反演得出长寿命沥青路面的疲劳设计指标。

6 香山科学会议概述

为深入贯彻落实《交通强国建设纲要》,增强中国路面工程的耐久性与可靠性,提升路面安全水平,2019年10月17—18日在北京香山饭店召开了以“中国长寿命关键科学问题及技术前沿”为主题的香山科学学术会议,会议提出中国长寿命路面发展分为两个阶段实现:第一阶段从现在开始到2035年,将中国公路路面使用寿命提升至35年;第二阶段从2035年至2049年,将路面使用寿命提升至50年。与会专家激烈讨论,并形成一系列长寿命路面创新成果专辑,分别从长寿命路面设计方法和体系^[66-68]、长寿命路面材料^[69-71]、长寿命路面结构^[72-73]、长寿命路面使用性能^[74]以及长寿命足尺环道验证^[75-78]等方面阐述了与会专家对长寿命路面的科学实践结论。

7 展望

通过对长寿命沥青路面发展的特点、路面结构、设计指标、路面材料、路面动力响应、疲劳性能预估等方面综述,表明长寿命沥青路面的研究取得了丰硕的成果,为提高路面结构试验性能及延长道路使用寿命奠定了理论实践基础,但这些研究尚存在一些待解决的问题,今后应主要从以下几个方面进行深入研究:

(1) 因地制宜开展长寿命沥青路面结构组合设计和材料设计。由于地域的差异,不同地区对长寿命沥青路面的需求不尽相同,因此,根据各地区的区域环境和料源以及具体层位的要求进行精准设计,并对长寿命沥青路面结构和材料进行多尺度研究,开展路面材料基因组研究,将有助于沥青路面寿命的延长。

(2) 选择可反映路面状况和破坏状态的设计标准和设计指标。长寿命沥青路面的设计标准和指标

对其结构验算和分析有重要作用,今后应在长寿命沥青路面长期观测基础上,选定与路面破坏相关的设计参数和指标,并检验指标的合理性与适用性,提出适合长寿命特点的设计指标体系。

(3) 采用实体工程验证和优化的方法,构建更加精确的力学响应预估模型,力学响应预估模型的精确度和可靠度研究工作开展不够系统和深入,需要进行道路服役性能的采集、积累,交汇分析,实现多源数据耦合分析与论证及路面疲劳寿命的准确评估。

(4) 对于路面材料,应当根据结构功能进行精准设计,由材料设计向设计材料转变,构建路面材料基因组体系,从细观机理分析中探寻路面材料性能提升途径。

(5) 应当采集长期的、全寿命周期的、体系化的、多元化的路面材料和结构服役性能演化数据,探明超长服役周期内的服役性能演化规律,构建性能衰变模型,并根据现场系统、体系化的数据验证并修正设计理论、设计模型,建立具有中国特色的长寿命路面技术体系。

8 结论

(1) 长寿命沥青路面是几十年沥青路面研究成果的总结,是一种保障道路结构安全和服役功能的技术对策,同时也体现了安全耐久、节能环保和可持续发展等先进路面结构设计理念,是沥青路面技术发展的必然趋势,必将成为未来主流的沥青路面结构形式,特别是在重载交通道路中的应用。

(2) 综述了长寿命沥青路面发展的特点、路面结构、设计指标、路面材料、路面动力响应、疲劳性能预估,提出当前长寿命沥青路面研究存在以下问题:典型结构普适性不强、设计标准和指标不统一、结构力学响应预估模型精确度差、多源异构长期性能观测数据缺乏完整性、研究成果无法快速验证等。

(3) 展望了长寿命沥青路面未来的发展方向,建议因地制宜开展长寿命沥青路面结构组合设计和材料设计、路面材料精准设计,选择可控制沥青路面破坏的设计标准和指标,进行沥青路面长期观测分析等方面的研究,积累长期的、体系化的、多元化的路面材料和结构服役性能演化数据,构建性能演化模

型。当然,结构力学响应预估模型的精确度评价与提升,相应的施工验收标准也亟待深入研究。

参考文献:

- [1] 沈金安,李福普,陈景.高速公路沥青路面早期损坏分析与防治对策[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 沙庆林.高速公路沥青路面早期损坏现象及预防[M].2版.北京:人民交通出版社,2008.
- [3] NUNN M, FERNE B W. Design and assessment of long-life flexible pavements[J]. Trl Annual Review, 1998: 39-47.
- [4] VON QUINTUS H L. Hot-mix asphalt layer thickness design for longer life bituminous pavements[J]. Transportation Research Circular, 2001:66-78.
- [5] THOMPSON M R, CARPENTER S H. Considering hot-mix-asphalt fatigue endurance in full depth mechanistic pavement design[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6):871-877.
- [6] 付军. 西班牙长寿命半刚性基层沥青路面设计指南[J]. 中外公路, 2018, 38(8):64-69.
- [7] 唐培培. 重交通高等级公路沥青面层合理厚度研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- [8] ST MARTIN J, HARVAY J T, LONG F, et al. Long-life rehabilitation design and consteuction I-710 freeway long beach, california[J]. Transportation Research Circular, 2001, 503:50-65.
- [9] GHUZLAN K, CARPENTER S H. Engery-detived damage based failure criteria for fatigue testing[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1723: 141-149.
- [10] OSCARSSON E. Mechanistic-empirical modeling of permanent deformation in asphalt concrete layers[D]. Lund:Lund University, 2011.
- [11] LANE B, BROWN A W, Tighe Susan. Perpetual pavements:the ontario experiment[C]//Ohio:International Conference on Perpetual Pavements, 2006:1-12.
- [12] Asphalt Pavement Alliance. Perpetual pavements a synthesis[Z]. Asphalt Pavement Alliance Order Number APA 101, 2002:2-10.
- [13] 周长俊. 辽宁省长寿命沥青路面重载作用下的结构响应分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- [14] 徐鸥明, 韩森. 韩国长寿命沥青路面层厚度确定方法[J]. 中外公路, 2006, 26(2):79-83.
- [15] 谭焯, 刘朝晖, 沙庆林. 重载交通长寿命半刚性基层沥青路面浅析[J]. 中外公路, 2007, 27(6):1-5.

- [16] 山东省交通科学研究院. 永久沥青路面设计方法研究[R], 2008.
- [17] 侯荣国. 复合式长寿命路面结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [18] 宋杨, 马士宾, 魏连雨, 等. 柔性基层耐久性沥青路面结构力学分析[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 94-98.
- [19] 罗峰. 季冻区公路长寿命沥青路面合理结构研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [20] 阿索格. 撒哈拉以南非洲地区长寿命路面结构组合设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [21] 李小满. 武汉市快速路与主干道长寿命路面结构研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2014.
- [22] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范: JTGD50—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [23] 徐鸥明. 长寿命沥青路面设计指标与设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [24] PARK H, KIM J, KIM Y, et al. Determination of the layer thickness for long-life asphalt pavement[J]. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005, 5: 791-802.
- [25] 崔鹏, 邵敏华, 孙立军. 长寿命沥青路面设计指标研究[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(3): 37-42.
- [26] 刘福明. 长寿命沥青路面损伤行为及其结构寿命的合理匹配研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [27] 平树江, 蒋亮, 申爱琴, 等. 半刚性材料作为长寿命沥青路面基层的适应性研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(4): 29-33.
- [28] 张慧丽, 康拥政, 张永满. 长寿命沥青混凝土路面抗疲劳层力学特性分析[J]. 公路, 2008, 53(5): 161-165.
- [29] 朱建平. 基于长寿命沥青路面设计理念的沥青混合料疲劳阈值研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [30] 杨光. 半刚性基层长寿命沥青路面典型沥青混合料疲劳性能研究[D]. 北京: 交通运输部公路科学研究院, 2011.
- [31] 靳明洋. 环氧沥青在长寿命路面中的应用研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.
- [32] 郭大智, 冯德成. 层状弹性体系力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- [33] 董忠红. 重型车辆沥青路面系统动力响应研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [34] 吕彭民, 董忠红. 车辆-沥青路面系统力学分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [35] HARDY M S A, CEBON D. Response of continuous pavements to moving dynamic loads[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 119: 1762-1780.
- [36] HARDY M S A, CEBON D. Importance of speed and frequency in flexible pavement response[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 120: 463-482.
- [37] SHI X M, CAI C S. Simulation of dynamic effects of vehicles on pavement using a 3d interaction model[J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(10): 736-744.
- [38] 崔鹏, 邵敏华, 胡晓, 等. 长寿命沥青路面结构组合的有限元分析[J]. 同济大学学报, 2008, 36(10): 1388-1395.
- [39] 黄文雄, 谭利英, 许成祥. 长寿命沥青路面结构力学性能的三维有限元分析[J]. 长江大学学报, 2008, 5(3): 279-283.
- [40] 周长俊. 辽宁省长寿命沥青路面重载作用下的结构响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [41] 凌天清, 赖辉, 韦刚, 等. 刚性基层长寿命沥青路面抗反射裂缝力学分析[J]. 重庆交通大学学报, 2010, 29(5): 714-719.
- [42] 刘宁. 半刚性基层长寿命路面力学响应的现场测试与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [43] 屈吕文, 曾志远, 王福建, 等. 长寿命沥青路面结构粘弹性力学响应分析[J]. 中外公路, 2015, 32(5): 66-71.
- [44] 秦雨. 耦合荷载下长寿命复合式路面力学响应与结构组合分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [45] SOLAIMANIAN M, STOFFELS S M, YIN H, et al. Superpave in-situ stress/strain investigation-phase II final report Vol. I: Summary report[R], 2009.
- [46] HORNYAK N J, CROVETTI J A. Perpetual pavement instrumentation project for the marquette interchange project-phase I final report[R], 2007.
- [47] WILLIS J R, TIMM D H. Repeatability of asphalt strain measurements under full scale dynamic loading [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008, 1247(1): 40-48.
- [48] CHATTI K, KIM H B, YUN K K, et al. Field investigation into effects of vehicle speed and tire pressure on asphalt concrete pavement strains[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2016, 1539(1): 66-71.
- [49] LOULIZI A, AL-QADI I L, ELSEIFI M. Difference between in situ flexible pavement measured and calculated stresses and strains[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 132(7): 574-579.
- [50] 陈凤晨, 谭忆秋, 董泽蛟, 等. 基于光纤光栅技术的沥青路面结构应变场分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(10): 9-12, 21.
- [51] 耿立涛. 沥青路面温度应力及超孔隙水压力计算[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [52] 杨永顺, 王林. 永久沥青路面设计方法研究[R], 2008.

- [53] 董泽蛟,李生龙,温佳宇.基于光纤光栅测试技术的沥青路面温度场实测[J].交通运输工程学报,2014,14(2):1-6.
- [54] 温佳宇.吉林长寿命沥青路面动力响应分析及性能预估[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [55] 陈少幸,张肖宁,徐全亮.沥青混凝土路面光栅应变传感器的试验研究[J].传感技术学报,2006,19(2):396-410.
- [56] 潘勤学,郑健龙,杨博,等.沥青路面蠕变响应现场预估方法与试验[J].中国公路学报,2017,30(9):10-17.
- [57] 杨毅.动载作用下半刚性基层沥青路面应变响应的演化规律[J].中外公路,2017,37(2):51-55.
- [58] 邓学钧.路基路面工程[M].北京:人民交通出版社,2010.
- [59] TIGDEMIR M, KALYONCUOGLU S F, KALYONCUOGLU U Y. Application of ultrasonic method in asphalt concrete testing for fatigue life estimation[J].NDT&E International,2005,37(8):579-602.
- [60] YEO I, SUH Y, MUN S. Development of a remaining fatigue life model for asphalt black base through accelerated pavement testing[J]. Construction and Building Materials,2008,22(8):1881-1886.
- [61] 唐军,曹光伦.沥青混凝土路面加铺层疲劳寿命分析[J].公路交通科技(应用技术版),2011(4):27-30.
- [62] 刘浩,黄开宇,邓蓉.考虑半刚性结构层横向贯通裂缝的沥青路面疲劳特性分析[J].公路工程,2012,37(2):162-166,171.
- [63] 孙宗杰.路面结构动力响应信息初步监测及分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [64] 李生龙.沥青路面结构信息监测及疲劳性能预估[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [65] 孙策.长寿命沥青路面疲劳模型及设计指标分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [66] 郑健龙,吕松涛,刘超超.长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J].科学通报,2020,65(30):3219-3227.
- [67] 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[J].科学通报,2020,65(30):3270-3286.
- [68] 王林,韦金城,张晓萌,等.“四个一体化”破解长寿命沥青路面技术瓶颈[J].科学通报,2020,65(30):3238-3246.
- [69] 唐伯明,丁勇杰,苏玥,等.基于自由体积理论的沥青分子模型黏度预测[J].科学通报,2020,65(30):3308-3317.
- [70] 陈长,梁远路,郭忠印,等.沥青路面结构层间接接触状况诊断新方法[J].科学通报,2020,65(30):3318-3327.
- [71] 沙爱民,蒋玮,王文通,等.面向智慧道路建造的新型路面材料设计与展望[J].科学通报,2020,65(30):3259-3269.
- [72] 胡玥,臧国帅,孙立军,等.沥青路面结构层模量反演最佳特征点的确定[J].科学通报,2020,65(30):3287-3297.
- [73] 王旭东,周兴业,关伟,等.沥青路面结构内部的力学响应特征及分析[J].科学通报,2020,65(30):3298-3307.
- [74] 黄晓明,蒋永茂,郑彬双,等.基于路表摩擦特性的无人驾驶车辆安全制动原理与方法[J].科学通报,2020,65(30):3328-3341.
- [75] 张蕾,周兴业,王旭东.基于RIOHTrack足尺加速加载试验的长寿命沥青路面行为研究进展[J].科学通报,2020,65(30):3247-3258.
- [76] 汪双杰,马涛,张伟光,等.沥青路面长期性能研究的经验与挑战[J].科学通报,2020,65(30):3228-3237.
- [77] 王旭东,肖倩.长寿命路面技术发展与实践[J].科学通报,2020,65(30):3217-3218.
- [78] 查旭东,樊小林,刘安辉,等.RIOHTrack中面层沥青混合料高温性能SPT试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(1):16-23.