沥青路面长期性能研究的经验与挑战

汪双杰¹, 马涛^{2*}, 张伟光², 高英²

1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075;

2. 东南大学交通学院, 南京 211189

* 联系人, E-mail: matao@seu.edu.cn

我国沥青路面长期性能研究总体可以分为四个阶段, 即初期的自发分散式研究、原交通部/交通运输部资助的一期和二期科技项目研究以及当前基于北京足尺环道的集中式研究, 在机理揭示、材料开发、结构形式、性能测试、施工技术、检测方法、评价指标、性能预估与养护手段等方面取得了良好成效与进展。但是, 我国不同区域的沥青路面使用寿命差异较大、实际寿命达不到设计寿命的情况依然普遍存在, 主要原因在于我国长期性能研究多集中于小规模试验路段, 全国覆盖率偏低, 气候分区宽泛。此外, 课题研究缺乏国家层面的协调与规划, 时间短且连续性不足, 缺乏持续有效的长期性能监控。而且, 在长期性能预测模型方面, 较多依赖于室内试验, 存在环境因素单一、交通荷载与实际不匹配、长期破坏形式模拟受限等局限。我国沥青路面长期性能研究已经具备了良好的前期基础, 但在研究层次、全方位持续观测、高效开放型数据库建立以及面向寿命的长期性能预测等方面还存在着诸多挑战。建议从国家层面开展深层次、大范围、长周期的路面长期性能观测与预测研究, 主体包括规模化补充完善全国范围长期性能实体工程, 打造全国统一、持续、长效的长期性能观测网, 针对不同区域的环境、交通、材料与结构条件, 建立适用的长期性能预测模型。

1 路面长期性能研究的必要性

路面长期性能涉及功能性、结构承载力与耐久性等多个方面, 表现为交通荷载、自然气候环境耦合作用下的路面性能变化规律, 如路表磨损、结构损伤与材料损伤等, 具有复杂性与漫长性^[1]。我国高速公路沥青路面的设计使用寿命为 15 年, 然而很多地区的沥青路面在达到设计使用寿命前就发生了破坏, 相比欧美发达国家 20~40 年的实际使用寿命仍有一定的差距^[2]。究其原因, 一是我国地域辽阔, 不同区域的沥青路面往往具有显著不同的实际使用寿命; 二是道路环境气候多样, 我国有 52 个二级自然区划^[3,4], 且极端气温频繁出现, 导致路面材料与结构应对不足, 影响其实际使用寿命^[5]。此外, 我国交通荷载状况复杂, 车辆组成不断向多轴化、大型化、重载方向发展, 交通量增长迅速且预估难度大, 显著影响路面结构的实际使

马涛 教授, 博士生导师, 东南大学交通学院副院长, 新型道路材料国家工程实验室副主任, 道路交通虚拟仿真国家级教学中心副主任, 道路基础设施长效服役与安全江苏省重点实验室主任。2019 年获国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金资助。先后获得教育部技术发明一等奖(2015 年)、江苏省科学技术

二等奖(2019 年)、中国公路学会科学技术一等奖(2017 年)等。

使用寿命^[6]。更重要的是, 沥青路面长期性能演变机理与规律具有典型的材料与结构依赖性, 各地的路面材料属性与结构形式各不相同, 而早期的设计理念偏重力学设计, 路面设计控制指标与路面实际性能以及破坏模式之间存在一定的脱节, 导致路面设计与长期性能之间未能建立良好的关联, 由此也使得路面结构的设计寿命与实际使用寿命并不完全相符^[1]。

然而, 随着我国经济的飞速发展以及对快速、高效、舒适、安全交通运输需求的不断提升, 有效保持路面结构的长期使用性能, 显著延长路面结构的使用寿命, 已成为我国路面结构发展的重大需求和必然趋势^[6]。因此, 长寿命沥青路面技术在我国受到愈加广泛的关注, 成为未来道路工程领域发展的重要方向之一。严格地讲, 路面寿命并不等同于其长期性能, 寿命是路面设计和保持的目标与结果, 而长期性能是路面寿命设计的理论依据及其在实体工程中的具体表现。路面的设计寿命依赖于对其长期性能的准确把握; 路面的使用寿命依赖于其长期性能的保持; 路面使用寿命的保持与延长依赖于其长期性能的预估、监测以及有效预警与维护。因此, 准确掌握长期性能的内在机理与规律, 实现长期性能的精准预估与有效监测, 是实现路面结构长寿命设计与保持的根本前提与基础手段^[7]。

具体而言, 在复杂环境与交通荷载动态耦合作用下, 准确分析和实时掌握路面材料与结构的长期性能响应, 是路面寿命准确设计与有效保持的前提^[8,9]; 精准揭示和准

确预估路面材料与结构的长期性能演变机理与发展规律,是路面寿命准确设计与有效保持的核心;及时干预和有效维护路面材料与结构的长期性能蜕化与衰变,是路面寿命有效保持和高效提升的关键^[10]。然而,如图1所示,与欧美发达国家相比,我国沥青路面结构基础理论、技术体系与工程实践发展起步相对较晚,缺乏路面长期性能的长周期综合系统研究,使得我国在沥青路面长期性能的演变机理与发展规律方面存在基础理论薄弱、实体工程积累不足、室内试验与现场性能匹配性不足、理论与实际关联性不强等问题,再加上我国复杂的地域条件、环境气候以及交通组成,直接导致精准可靠设计、精确维养理论与全寿命周期管理方法的缺乏,严重制约路面长期性能的保持与使用寿命的提升^[11]。

与此同时,尽管我国现代化道路建设与发展起步相对较晚,但是经过多年的研究与实践,已经具备了扎实的研究基础,积累了丰富的工程经验,不仅逐步形成了适用于我国的先进技术体系,而且总体建设规模也处于世界前列。在此基础上,进一步开展路面长期性能研究,可为打造具备中国特色的长寿命沥青路面技术体系提供坚实支撑,推动公路高质量发展。

2 美国路面长期性能的研究发展

美国路面设计寿命和使用寿命较长的核心保障之一,是其基于长期性能研究的设计和维养理念以及世界领先的 MEPDG 力学-经验设计方法^[12,13]。基于系统的理论研究和实体工程长期性能的持续跟踪观测,针对不同类型的路面病害与破坏模式,美国在其设计方法中提出了适用性的服役性能指标,建立了力学-经验预估模型^[14],在设计阶段实现了结构力学分析与长期性能演化相结合的目标,也为其及时有效的维养奠定了良好基础^[15,16]。同时,对其设计

方法进行大量的区域校正,即在考虑基础模型的前提下,根据当地的材料、气候、交通等条件进行模型系数的修正与调整,使其在进行当地路面结构设计和长期性能预估时更具有指向性和准确性^[17]。美国路面结构设计方法及其路面实际使用寿命能够处于国际领先水平的坚实支撑,来源于其在国家层面持续开展的公路战略研究计划(Strategic Highway Research Program, SHRP)与路面长期性能研究计划(Long-Term Pavement Performance, LTPP)^[18]。

从1986年开始,美国多个州联合实施初期投资超1.5亿美元的SHRP计划,以改善道路的长期使用性能和耐久性。因此,在其材料评价与设计以及路面结构设计方法中均融入了长期性能的理念,并在SHRP计划启动之初就将路面长期性能列为重要的研究内容。SHRP计划充分考虑了实际使用条件,从长期性能评价角度重点开发沥青、集料及沥青混合料的室内检测方法,提出了与性能挂钩的检测指标^[19];初步揭示了典型沥青路面结构及材料的破坏机理,给出了路面长期性能的力学-经验预估模型,形成了SUPERPAVE™设计指南及AASHTO™成套测试方法^[15,20-22]。美国各州参与的测试路段数及代表性成果见图2。当前,美国仍在进行SHRP计划的第二阶段研究工作,投入了大量资金对第一阶段的成果进行验证,同时针对近20年来涌现的新结构与新材料的使用,对模型进行不断的完善,如倒装路面结构、半柔性路面结构、聚合物改性沥青、温拌沥青、橡胶沥青、再生料等。

1991年,美国重点启动了LTPP计划并一直持续至今。LTPP对SHRP计划进行了重要补充:对基于SHRP沥青混合料设计方法的现场道路进行了全国范围的性能调研,用于指导设计方法的改进;增加了气候信息的收集,为区域道路设计过程中的材料选取提供了依据。该计划初期投资超1亿美金,持续收集近8000个气象点信息,包括大气温

图1 (网络版彩色)我国道路研究发展的主要节点

Figure 1 (Color online) Main keystones of road research and development of China

图 2 (网络版彩色)美国 SHRP 计划. (a) 各州参与的测试路段数; (b) 代表性成果^[22]

Figure 2 (Color online) SHRP of USA. (a) The involved local agencies with the numbers of test roads; (b) representative products^[22]

度、太阳辐射、降雨量、风速、地下水位等,为材料力学性能随服役年限的变化、温度应力以及高温材料变形的准确预估提供了重要基础^[23,24];跟踪观测近 3000 条路段,收集了混合料设计信息,包括沥青与集料种类、级配、沥青含量与混合料强度等结果^[25],以及路面长期性能服役状况,包括裂缝、车辙、平整度、结构承载力等信息^[26,27]. 美国 LTPP 计划道路现场使用性能测试示意图及测试站点分布见图 3. 上述工作为其设计方法中的长期性能模型完善以及路面病害及时有效维修养护奠定了坚实基础^[28]. 经过近 30 年的不断完善,其建立的长期性能数据库每年有 400~500 GB 的数据下载,有效服务上千家科研、设计、施工机构,产生的直接经济效益超 20 亿美元^[18].

美国永久沥青路面技术就是其长期性能研究尤其是实体工程长期性能跟踪观测的重要技术产物之一. 美国提出的永久沥青路面技术使用寿命可达到 50 年以上,其核心原理就是基于不同结构层的关键性能响应与需求进行结构与材料匹配设计,并将结构长期性能演化控制在可接受范围之内且使之趋于稳定. 如针对沥青路面结构表层,不仅要求同时兼具长效的抗高温、抗低温和水稳定性性能,还要求具有良好的抗磨耗性能和车辆行驶舒适性;针对路面结构中层,重点研究和提高其长期抗高温变形能力,保证结构整体在长期使用过程中不产生过量永久变形^[29];针对沥青路面结构底层,重点研究其长期抗疲劳性能,保证

结构整体在长期使用过程中不发生疲劳开裂,从而提高路面结构整体耐久性^[30,31].

3 我国路面长期性能的研究发展

我国针对路面长期性能的研究可分为四个阶段:第一阶段为初期自发分散式研究,代表性成果包括初步提出了结构设计方法、材料测试方法与指标,以及施工验收指标;第二阶段为原交通部资助的一期科技项目,代表性成果包括初步建立了我国长期使用性能研究框架体系、长期性能观测体系,以及全寿命周期经济分析方法^[11];第三阶段为交通运输部资助的二期科技项目,代表性成果包括 300 多条路段的服役性能观测、性能优越的沥青路面典型结构挑选^[32],以及路面设计(养护)方法优化措施的提出;第四阶段为基于足尺环道的集中式研究,代表性成果包括基于 2000 万累计轴次加载的结构依赖性、材料非线性性的路面行为机理.

初期的自发分散式研究对单个工程项目的质量保障起到了良好成效,但是研究主要集中于小规模试验路段,长度较短且区域相对集中,对施工与材料的变异性、地质与气候的差异、交通状况的组成等因素考虑不足,限制了研究成果与施工经验的大范围推广. 此外,初期不同项目的研究目标、研究手段以及研究方案均有较大差异,尽管对我国路面的规范设计和标准化施工起到了良好支撑和

图 4 我国前期长期性能路面研究总体思路

Figure 4 Framework of early long-term pavement performance study of China

析、长期性能跟踪观测等。在道路工作人员持续的探索研究和工程实践推动下,借鉴美国先进的力学分析与长期性能相结合的设计理念,我国在 2017 年出版的路面设计规范中,基于国内典型的高速公路结构、材料、交通与气候条件,建立了与永久变形、表面开裂以及疲劳特性相关的性能和寿命预估模型^[35~38]。如表 1 所示,形成了以限制路面病害程度为导向的结构与材料设计方法,实现了我国沥青路面设计体系质的飞越^[41]。但是,其长期性能预测模型对室内试验仍有较大依赖,相关系数的验证是基于有限的现场路段、交通条件与气候条件,对不同地域实际使用条件的反映仍有不足,亟需国家层面进行长期系统的实体工程数据支撑与验证^[42~44]。因此,其实用性、适用性以及预估模型的准确性还有待进一步的修正与完善,尤其在长寿命沥青路面的设计和指导方面仍难以发挥精准的指导作用^[45]。

基于新的发展起点,面向新的发展需求,我国也进一步启动了基于足尺环道的集中式研究,目标是支撑我国形成新一代的长寿命路面技术体系。足尺环道研究具有环境

明确、荷载可控、结构多样与测试周期短等优势,有利于路面长期性能机理的揭示、规律的总结以及预测模型的建立。我国目前的环道研究主要集中在建设全寿命周期路面多元服役行为信息系统^[44]、研发基于性能的新一代路面材料设计方法、基于服役性能的路面建养设计方法,以及在役路面残余寿命的评估体系与指标等方面^[34]。但同时,基于环道的研究也存在环境因素单一、交通荷载与实际状况不完全匹配、长期破坏形式模拟受限、验证周期短等局限,基于足尺环道的研究成果仍然需要不同地区的规模化实体工程加以验证与完善^[32,46]。因此,足尺环道与实体工程构成相辅相成的长期性能研究体系才能够真正支撑长寿命技术体系的建立。

4 我国路面长期性能的发展挑战

我国路面长期性能的发展还存在诸多挑战:结构形式方面,我国半刚性基层沥青路面修筑路线长、工程经验丰富,但半刚性基层沥青路面能否实现长寿命目标、如何

表1 中美沥青路面设计方法关键性能指标对比^{[4,39,40]a)}Table 1 Comparison of key performance indicators of asphalt pavement design method between China and USA^[4,39,40]

关键性能指标	美国 MEPDG 设计方法	中国 2017 版设计方法
平整度	$IRI = IRI_0 + 40(RD) + 0.4(FC_{Total}) + 0.008(TC) + 0.015(SF)$	
永久变形	$\Delta_{p(HMA)} = \varepsilon_{p(HMA)} h_{HMA} = \beta_{1r} k_z \varepsilon_{r(HMA)} 10^{k_{1r}} n^{k_{2r} \beta_{2r}} T^{k_{3r} \beta_{3r}}$	$R_{ai} = 2.31 \times 10^{-8} k_{Ri} T_{pef}^{2.93} P_i^{1.80} N_{e3}^{0.48} \left(\frac{h_i}{h_0} \right) R_{oi}$
表面开裂	$TC = \beta_{t1} N_{[z]} \left[\frac{1}{\sigma_d} \log \left(\frac{C_d}{H_{HMA}} \right) \right]$	$CI = 1.95 \times 10^{-3} S_i \log b - 0.075(T + 0.07 h_a) \log S_i + 0.015$
疲劳寿命	$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\varepsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}}$	$N_{f1} = 6.32 \times 10^{1.596-0.29\beta} \times k_a k_b k_{Ti}^{-1} \left(\frac{1}{\varepsilon_a} \right)^{3.97} \left(\frac{1}{E_a} \right)^{1.58} (VFA)^{2.72}$

a) 表中符号含义如下: IRI, 沥青路面平整度(in/mile, 1 in/mile=0.01578 m/km); IRI₀, 施工后初始平整度(in/mile); RD, 平均车辙深度(in); FC_{Total}, 疲劳裂纹的面积占总车道面积的百分比(%); TC, 温度裂缝指数(ft/mi); SF, 现场系数, 按公式 $SF = Age^{1.5} \{ \ln[(Precip+1)(FI+1)P_{02} + (Precip+1)(PI+1)P_{200}] \}$ 确定, 其中 Age 为建成后时间(年), PI 为土壤塑性指数, FI 为年平均冰冻指数, Precip 为年平均降水量(in), P₀₂ 为通过 0.02 mm 筛的百分比(%), P₂₀₀ 为通过 0.0075 mm 筛的百分比(%). $\Delta_{p(HMA)}$, 沥青混合料永久变形量(in); $\varepsilon_{p(HMA)}$, HMA 层中累积的永久或塑性轴向应变; $\varepsilon_{r(HMA)}$, HMA 子层底弹性应变; h_{HMA} , HMA 或子层厚度(in); n , 轴载作用次数; T , 路面温度(°F); k_{1r} 、 k_{2r} 、 k_{3r} 、 β_{1r} 、 β_{2r} 、 β_{3r} 、 β_{t1} 、 k_{f1} 、 k_{f2} 、 k_{f3} 、 β_{f1} 、 β_{f2} 、 β_{f3} , 修正系数; k_z , 深度限制因子; $N_{[z]}$, 以 [z] 评估的标准正态分布; σ_d , 路面裂缝深度对数的标准偏差(in); C_d , 裂缝深度(in); H_{HMA} , HMA 层厚(in). N_{f-HMA} , 沥青混合料层疲劳开裂寿命(轴次); ε_t , 沥青混合料层底拉应变(in/in); E_{HMA} , 沥青混合料动态压缩模量(psi); C , 按公式 $C=10^M$ 确定, 其中 $M=4.84[V_{be}/(V_a+V_{be})]-0.69$, V_a 为 HMA 混合物的空隙率(%), V_{be} 为有效沥青含量(%); C_H , 厚度校准系数, 对自下而上裂缝按公式 $C_H=1/[0.000398+0.003602/[1+\exp(11.02-3.49H_{HMA})]]$ 确定, 对自上而下裂缝按公式 $C_H=1/[0.01+12.00/[1+\exp(15.676-2.8186H_{HMA})]]$ 确定. R_{ai} , 沥青混合料永久变形量(mm); k_{Ri} , 综合修正系数; T_{pef} , 沥青混合料层永久变形等效温度(°C); P_i , 沥青混合料层第 i 层顶面竖向压应力(MPa); N_{e3} , 设计使用年限内或通车至首次针对车辙维修的期限内, 设计车道上当量设计轴载累计作用次数; h_i , 第 i 分层厚度(mm); h_0 , 车辙试验试件的厚度(mm); R_{oi} , 车辙试验永久变形量(mm). CI, 沥青面层低温开裂指数; T , 路面低温设计温度(°C); S_i , 表面层沥青弯曲梁流变试验加载 180 s 时蠕变劲度(MPa); h_a , 沥青结合料类材料层厚度(mm)(低温开裂公式); b , 路基类型参数(对应低温开裂公式). N_{f1} , 沥青混合料层疲劳开裂寿命(轴次); k_{Ti} , 温度调整系数; ε_a , 沥青混合料层底拉应变(10^{-6}); E_a , 沥青混合料 20°C 时的动态压缩模量(MPa); k_a , 季节性冻土地区调整系数; k_b , 疲劳加载模式系数, 按公式 $k_b=\{[1+0.3E_a^{0.43}(VFA)^{-0.85}\exp(0.024h_a-5.41)]/[1+\exp(0.024h_a-5.41)]\}^{1.33}$ 确定, 其中 VFA 为沥青混合料的沥青饱和度(%), h_a 为沥青混合料层厚度(mm)(疲劳寿命公式); β , 目标可靠指标, 根据公路等级取值

图5 (网络版彩色)我国环道测试. (a) 测试段示意图; (b) 测试结构与材料分布

Figure 5 (Color online) Circular test track of China. (a) Test section layout; (b) sections paved with varied structures and materials

实现, 其关键技术难点尚不完全明确^[47]; 材料方面, 即使同一个指标参数, 也普遍存在不同的力学测试条件, 导致路面材料参数的不确定性和主观经验性^[33], 而且当前材料的开发过程多是“尝试”得出的, 而不是从微观结构角度“设计”出来的; 设计方法方面, 如何进行结构与材料组合协同优化, 形成路面损伤程度的深度递减效应, 从根源上避免深层结构损伤的产生及其复杂修复过程; 性能预估方面, 存在各个环节假设条件过多、理论预估与实测值差异

性大等问题, 因此科学预估存在较大挑战; 养护决策方面, 存在主管部门养护意识较为淡薄、缺乏稳定资金来源, 以及养护管理普遍存在智能化、科学化不足的挑战; 数据共享与融合方面, 设计、检测等方面的先进经验规模化速度慢、先进智能化技术应用严重不足, 存在不同机构的检测数据与分析结果对比性差、管理与溯源低效等难题, 亟须提供规范化的检测手段、传感器标定、数据处理与评价指标. 此外, 如何在提升路面使用寿命的同时降低资源消耗,

避免生态环境破坏,也是需要重点思考的挑战。

5 总结与展望

综上所述,我国的路面长期性能预测与观测研究具备了良好的前期研究基础,依托实体工程开展了考虑实际环境与交通因素的典型路面结构与材料研究,形成了良好的研究框架,初步搭建了长期性能数据平台。但在研究层次、研究方位、研究周期、全方位持续观测、数据质量把控与标准化、高效开放型数据库建立以及面向寿命的长期性能预测等方面还存在着诸多的挑战,亟需突破。

长期性能研究首先需要探讨和解决的关键科学问题包括:路面寿命、性能与状态的科学定义;路面寿命、性

能与状态的科学关联;准确反映路面在长期性能不同阶段的科学指标体系;路面长期性能测试方法的科学原理;路面长期性能实时、动态、高精度感知的科学原理;路面长期性能大数据的定义、内涵;路面长期性能数据库的科学架构与智能化分析与应用。

在此基础上,需要从国家层面开展深层次、大范围、长周期的路面长期性能预测与观测研究,主体包括:在现有研究与布局基础上,规模化补充完善全国范围长期性能实体工程;打造全国统一、持续、长效的长期性能观测网;建立包含建设、运营和养护一体化的路面全寿命周期标准化数据库;针对不同区域的环境、交通、材料与结构条件,建立适用的长期性能预测模型。

推荐阅读文献

- 1 Long-term asphalt pavement performance (in Chinese). Project Report, Construction Technology, Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2018 [沥青路面长期使用性能研究. 交通运输部建设科技项目报告, 2018]
- 2 Huang X M. Subgrade and Pavement Engineering (in Chinese). Beijing: People's Communications Press, 2019 [黄晓明. 路基路面工程. 北京: 人民交通出版社, 2019]
- 3 Ministry of Communications of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement (clause Explanation Attached): JTG D50-2006 (in Chinese). Beijing: People's Communications Press, 2006 [中华人民共和国交通部. 公路沥青路面设计规范(附条文说明): JTG D50-2006. 北京: 人民交通出版社, 2006]
- 4 Ministry of Communications of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement (clause Explanation Attached): JTG D50-2017 (in Chinese). Beijing: People's Communications Press, 2017 [中华人民共和国交通部. 公路沥青路面设计规范(附条文说明): JTG D50-2017. 北京: 人民交通出版社, 2017]
- 5 Huang X M, Gao Y. Principle and Method of Pavement Design (in Chinese). Beijing: People's Communications Press, 2018 [黄晓明, 高英. 路面设计原理与方法. 北京: 人民交通出版社, 2018]
- 6 Huang X M, Wang S J. Theory and Practice of Modern Asphalt Pavement Structure Analysis (in Chinese). Beijing: Science Press, 2013 [黄晓明, 汪双杰. 现代沥青路面结构分析理论与实践. 北京: 科学出版社, 2013]
- 7 Zhang H L, Kang Y Z, Zhang Y M. Analysis of mechanical properties of long-life asphalt concrete pavement anti-fatigue layer (in Chinese). Highway, 2008, (5): 161–165 [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. 公路, 2008, (5): 161–165]
- 8 Wang S J, Huang X M. Theory and Practice of Road Design in Permafrost Area (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012 [汪双杰, 黄晓明. 冻土地地区道路设计理论及实践. 北京: 科学出版社, 2012]
- 9 Xu X Q, Wu C H, Zhou Y, et al. Research on application of multilayer displacement meter in dynamic response test of long life asphalt pavement (in Chinese). Highway, 2016, (8): 7–11 [许新权, 吴传海, 周勇, 等. 多层位移计在长寿命沥青路面动态响应测试中应用研究. 公路, 2016, (8): 7–11]
- 10 Wang S J, Wu Q B, Liu Y Z. Change of thermal stability and thermal thawing sensitivity of frozen soil under asphalt pavement (in Chinese). J Highw Transp Res Dev, 2003, 20: 20–22 [汪双杰, 吴青柏, 刘永智. 沥青路面下冻土热稳定性和热融敏感性的变化. 公路交通科技, 2003, 20: 20–22]
- 11 Wang Y Z, Shan J S, Lei Q Q. Analysis method of life cycle cost of asphalt concrete pavement structure (in Chinese). Highway, 2015, (7): 7–10 [王勇智, 单景松, 雷庆强. 沥青混凝土路面结构全寿命周期费用分析方法. 公路, 2015, (7): 7–10]
- 12 AASHTO. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC, 2008
- 13 Read J, Whiteoak D. The Shell Bitumen Handbook. 5th ed. London: Thomas Telford Publishing, 2003
- 14 ARA, Inc., ERES Consultants Division. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report, NCHRP Project 1-37A. Transportation Research Board of the National Academies, Washington DC, 2004
- 15 Pan Q X, Zheng J L. Mechanical calculation method and analysis of asphalt pavement considering different modulus in tension and compression (in Chinese). China Civil Eng J, 2020, 53: 110–117 [潘勤学, 郑健龙. 考虑拉压模量不同的沥青路面力学计算方法与分析. 土木工程学报, 2020, 53: 110–117]
- 16 Miller J, William Y. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program. No. FHWA-RD-03-031, 2003

- 17 Williams R, Shaidur R. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Calibration for Pavement Rehabilitation. Final Report, SPR 718, Federal Highway Administration, Washington DC, 2013
- 18 FHWA. LTPP Manual for Falling Weight Deflectometer Measurements Operational Field Guidelines Version 3.1. Federal Highway Administration, Washington DC, 2000
- 19 Bower N, Wen H, Wu S, et al. Evaluation of the performance of warm mix asphalt in Washington State. *Int J Pavement Eng*, 2016, 17: 423–434
- 20 Said S F. Aging effect on mechanical characteristics of bituminous mixtures. *Transp Res Rec*, 2005, 1901: 1–9
- 21 Lee S. Long-term performance assessment of asphalt concrete pavements using the third scale model mobile loading simulator and fiber reinforced asphalt concrete. Doctor Dissertation. Raleigh: Graduate School of North Carolina State University, 2004
- 22 Glover C, Martin A, Chowdhury A, et al. Evaluation of Binder Aging and Its Influence in Aging of Hot Mix Asphalt Concrete: Literature Review and Experimental Design. Report FHWA/TX-08/0-6009-1, Texas Department of Transportation, Austin, 2009
- 23 Zhu T Y, Ma T, Huang X M. Calculation of effective temperature for pavement rutting using numerical simulation methods. *J Southeast Univ*, 2016, (32): 362–367
- 24 Ma T, Huang X M, Mahmoud E, et al. Effect of moisture on the aging behavior of asphalt binder. *Int J Miner Metall Mater*, 2011, 18: 460–466
- 25 Wold S, Ruhe A, Wold H, et al. The collinearity problem in linear regression—The Partial Least Squares (PLS) approach to generalized inverses. *J Scient Stat Comput*, 1984, 5: 735–743
- 26 Zhang W G, Shen S H, Basak P, et al. Development of predictive models for initiation and propagation of field transverse cracking. *Transp Res Rec*, 2015, 2524: 92–99
- 27 Malan G W, Straus P J, Hugo F. A field study of premature surface cracking in asphalt (with discussion). *Assoc Asphalt Pav Technol*, 1989, 58: 142–162
- 28 Lytton R L. Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays. No. Project 01-41. 2010, 2010
- 29 Mejías S M, Doyle J D, Rushing J F. Accelerated pavement testing of warm-mix asphalt for heavy-traffic airfields. *Transp Res Rec*, 2014, 2456: 11–20
- 30 Morian N, Hajj E Y, Sebaaly P E. Significance of mixture parameters on binder aging in hot-mix asphalt mixtures. *Transp Res Rec*, 2013, 2370: 116–127
- 31 Li X, Marasteanu M, Turos M. Study of low temperature cracking in asphalt mixtures using mechanical testing and acoustic emission methods. *Assoc Asphalt Pav Technol*, 2007, 76: 427–453
- 32 Jiang L. Typical pavement structure based on the concept of long-life pavement under heavy-load traffic (in Chinese). *J Highw Transp Res Dev (Appl Technol Ed)*, 2012, (12): 181–182 [蒋亮. 重载交通下基于长寿命路面理念的典型路面结构. *公路交通科技(应用技术版)*, 2012, (12): 181–182]
- 33 Cui P, Shao M H, Wang G Y, et al. Long life based on usage performance indicators combination analysis of pavement structure (in Chinese). *Highway*, 2007, (11): 110–114 [崔鹏, 邵敏华, 王国英, 等. 基于使用性能指标的长寿命路面结构组合分析. *公路*, 2007, (11): 110–114]
- 34 Wang Q K. Technical measures for long life test roads of coastal expressways in Hebei Province (in Chinese). *J Highw Transp Res Dev (Appl Technol Ed)*, 2011, (6): 79–81 [王庆凯. 河北省沿海高速公路长寿命试验路的技术措施. *公路交通科技(应用技术版)*, 2011, (6): 79–81]
- 35 Zhang W G, Shen S H, Wu S, et al. Effects of in-place volumetric properties on field rutting and cracking performance of asphalt pavement. *J Mater Civ Eng*, 2019, 31: 1–11
- 36 Pan Q X, Zheng J L, Yang B, et al. Mechanical response of asphalt pavement under driving conditions by fiber bragg grating optical sensing technology (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2017, 50: 125–132 [潘勤学, 郑健龙, 杨博, 等. 基于光纤光栅传感技术的沥青路面行车工况下力学响应研究. *土木工程学报*, 2017, 50: 125–132]
- 37 Zheng J L. New structure design of durable asphalt pavement based on life increment (in Chinese). *China J Highw Transp*, 2014, 27: 1–7 [郑健龙. 基于结构层寿命递增的耐久性沥青路面设计新思想. *中国公路学报*, 2014, 27: 1–7]
- 38 Ping S J, Shen A Q, Li P. Research on fatigue limit of long life pavement asphalt mixture (in Chinese). *China J Highw Transp*, 2009, 22: 34–38 [平树江, 申爱琴, 李鹏. 长寿命路面沥青混合料疲劳极限研究. *中国公路学报*, 2009, 22: 34–38]
- 39 Wang X C, Hou R G. Long life pavement structure design (in Chinese). *J Traff Transp Eng*, 2007, 7: 46–49 [王选仓, 侯荣国. 长寿命路面结构设计. *交通运输工程学报*, 2007, 7: 46–49]
- 40 Advanced Asphalt Technologies, LLC. NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2011
- 41 Shao C Q, Liao G Y, Li Z H, et al. Modification of asphalt pavement design parameters in china based on AASHTO 2002 (in Chinese). *J Highw Transp Res Dev*, 2015, 32: 35–40 [邵财泉, 廖公云, 李植淮, 等. 基于 AASHTO 2002 的我国沥青路面设计参数修正. *公路交*

通科技, 2015, 32: 35–40]

- 42 Zeng S, Huang X L. Investigation analysis and forecast of long-term performance of SMA pavement (in Chinese). J Changsha Univ Sci Technol (Nat Sci Ed), 2010, 7: 12–17 [曾胜, 黄雄立. SMA路面长期性能的调查分析及预测. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2010, 7: 12–17]
- 43 Zhu L, Li Q. Observation and analysis of long-term performance of asphalt pavement based on different bases (in Chinese). J China Foreign Highw, 2016, 36: 60–62 [朱磊, 李强. 基于不同基层沥青路面长期性能观测与分析. 中外公路, 2016, 36: 60–62]
- 44 Hu X G, Hao D L, Wang B G. Research on long-term performance information management system (in Chinese). J China Foreign Highw, 2001, 21: 39–42 [胡霞光, 郝大力, 王秉纲. 路面长期性能信息管理系统研究. 中外公路, 2001, 21: 39–42]
- 45 Lytton R, Tasi F, Lee S, et al. NCHRP Report 669: Models for Predicting Refelction Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2010
- 46 Li F, Sun L J, Hu X. Summary of design methods and practices of long life asphalt pavement (in Chinese). Highway, 2005, (7): 122–127 [李峰, 孙立军, 胡晓. 长寿命沥青路面设计方法与实践综述. 公路, 2005, (7): 122–127]
- 47 Zeng F, Wang X D. Practice test of semi-rigid base long-life asphalt pavement (in Chinese). Highway, 2016, (12): 1–6 [曾峰, 王旭东. 半刚性基层长寿命沥青路面的实践检验. 公路, 2016, (12): 1–6]

Summary for “沥青路面长期性能研究的经验与挑战”

Experience and challenges of long-term performance research on asphalt pavement

Shuangjie Wang¹, Tao Ma^{2*}, Weiguang Zhang² & Ying Gao²

¹CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

²School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China

* Corresponding author, E-mail: matao@seu.edu.cn

The long-term performance of China's asphalt roads has exhibited significant improvements in the past decades. The material-performance testing methods are being gradually established, the structural thickness-design method has been constructed, and construction technologies and quality-control methods have been developed. Additionally, hundreds of field-test sections were monitored, and accelerated-loading tests were conducted to identify the significant determinants that could potentially affect field performance, including the surface friction, permanent deformation, transverse crack, and fatigue crack. Field-distress-detection method and equipment have been developed to quickly obtain the performance information and provide critical feedbacks to road designers. The mechanisms that correspond to the most observed distresses in China were explored, and predictive models with varied performance in field roads were accordingly developed and validated. Road maintenance strategies were established, and materials that fit the varied field distresses were developed to improve maintenance quality. Despite the aforementioned efforts, asphalt pavements in different regions in China exhibit dramatically varying service lives, and we can see that the service life of roads is commonly lower than the design life. The main reasons are that the long-term performance studies mostly concentrated on small-scale test sections that could not fully represent the full-scale field-pavement sections, and the field test of roads were too concentrated in specific areas to include the effects of key parameters such as the variation in climatic conditions, traffic loads, water table, and local material properties. Furthermore, most research lacked national-level coordination and planning with short time duration, and obtaining the research reports online was difficult. In addition, the long-term performance-prediction models relied more on laboratory tests and lacked diversity and continuity. They were limited to single environmental factor, mismatched traffic loads and actual conditions, limited simulation of long-term-failure forms, and insufficient field validation. Thus, using these models as a guide to effectively design pavements with reasonable durability is difficult. In general, the long-term performance research of asphalt pavement in China has good preliminary foundations, and most policy makers and researchers possess the enthusiasm and confidence to design and construct better roads. However, many challenges remain to be solved in terms of performance prediction with higher prediction accuracy, research orientation, research duration, all-round continuous observation, data quality control and standardization, and establishment of open database. We recommend carrying out nationwide deep-level, large-scale, and long-term pavement-performance observation as well as prediction research. The main subjects of these studies include but are not limited to the following: (1) Scaling to supplement and improve nationwide long-term performance field projects based on existing research and layout; (2) building a national unified, continuous, and long-term performance-observation network; (3) establishing a road life-cycle standardized database that includes design information, raw-material resource, construction procedure, service condition, and maintenance strategy and effectiveness; and (4) constructing performance prediction models that consider both mechanical calculated response (i.e., stress and strain) and statistical analysis, factors that cover climatic condition (i.e., environmental factors from different areas), traffic loads, structural thickness, and materials.

asphalt pavement, life, long-term performance, durability, prediction, survey

doi: 10.1360/TB-2020-0229