



沥青路面损伤行为 及其结构寿命的合理匹配

Damage Behavior and Structural Life
Reasonable Matching of Asphalt Pavement

刘福明 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

沥青路面损伤行为及其结构 寿命的合理匹配

刘福明 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书根据国外长寿命沥青路面设计理念,分析了我国高速公路沥青路面结构状况,着重阐述了沥青路面的损伤行为及有关结构设计问题,围绕长寿命沥青路面的材料参数、疲劳极限、路面结构响应及损伤等问题,系统地对长寿命沥青路面结构进行分析,并结合国内外长寿命沥青路面设计思想提出了沥青路面结构寿命匹配设计理念。

本书可供从事公路、城市道路工程设计、施工、研究及养护管理技术人员使用,亦可供高等院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面损伤行为及其结构寿命的合理匹配 / 刘福明著. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2014.12

ISBN 978-7-114-11965-1

I. ①沥… II. ①刘… III. ①沥青路面-路面衰坏-研究 IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 311787 号

书 名:沥青路面损伤行为及其结构寿命的合理匹配

著 作 者:刘福明

责任编辑:郑蕉林 牛家鸣

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:720×960 1/16

印 张:10.5

字 数:172千

版 次:2015年3月 第1版

印 次:2015年3月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11965-1

定 价:35.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

随着我国公路建设,特别是高等级公路建设事业的蓬勃发展,对沥青路面的使用品质和功能提出了更高的要求,沥青路面的损伤及使用寿命也越来越受到道路工作者的重视。近些年来,国内外长寿命沥青路面的研究受到了人们广泛的关注。长寿命沥青路面的实质就是路面在设计使用寿命期间不会发生结构性破坏,路面的损坏仅发生在路面的上层,维修时不需要进行结构性处理,只需将表层混合料铣刨,并换成等厚度的新混合料即可,维修十分方便。其理念是通过对比沥青路面结构的优化,合理设置路面各结构层的位置和层厚,从而延长沥青路面使用寿命,使其成为长寿命和较低维修成本的路面结构。而近些年来,随着我国道路荷载的不断增加,特别是重载交通对我国沥青路面提出了新的挑战。按传统的设计体系和设计标准设计的路面,通常不到设计年限就出现了损坏,经常需要进行大修,由此造成的交通拥挤或堵塞,给高速公路、城市间的重要干道造成极大的压力。因此,为了提高高速公路沥青路面的整体质量,减少路面的维修,节约能源资源,提高公路的经济社会效益,并为沥青路面结构设计提供一定的理论参考,本书在对我国现行沥青路面结构分析的基础上,对影响长寿命沥青路面结构性能的参数指标、损伤破坏形式等进行了分析,并结合国内外长寿命沥青路面设计思想对沥青路面结构进行了优化。

本书的撰写得到了华南理工大学王端宜教授、张肖宁教授和长安大学张登良教授等专家学者的指导和帮助,南昌工程学院王瑜老师做了大量的工作,在此表示衷心的感谢!

本书的出版受到了江西省自然科学基金项目(20122BAB206003)、江西省交通运输厅项目(2012C0022)及南昌工程学院科研成果专项经费的资助。

由于时间仓促,加之作者学识水平有限,书中论述难免存在偏颇甚至谬误之处,恳请各位专家、学者和读者不吝指正。

作者

2014年7月

目 录

第1章 引论	1
1.1 沥青路面的发展现状及存在的问题	1
1.2 国内外研究综述	7
1.3 存在的问题	17
第2章 沥青路面结构、主要破坏类型及分析	19
2.1 沥青路面结构形式与分析	20
2.2 沥青路面的损害类型及分析	28
2.3 沥青路面病害的传递函数	32
2.4 长寿命沥青路面损害模式	36
第3章 长寿命沥青路面材料参数及相关指标确定	39
3.1 沥青混合料动态模量的确定及预估方程的验证	40
3.2 土基、粒料层及无机结合料稳定基层模量	50
3.3 沥青混合料的抗疲劳能力	54
3.4 沥青混合料疲劳极限的确定	59
第4章 长寿命沥青路面结构响应及损伤分析	71
4.1 材料特征	72
4.2 隐式—动态分析原理	73
4.3 路面结构有限元分析模型	79
4.4 路面响应分析	81
4.5 长寿命沥青路面结构损伤分析	98

第5章 沥青混合料损伤的多尺度模拟分析	104
5.1 Top-Down 疲劳裂缝(TDC)细观力学解释	106
5.2 永久变形	109
5.3 基于多尺度模拟的沥青混合料损伤分析	112
第6章 沥青路面结构层寿命的合理匹配	129
6.1 结构设计基本思想	130
6.2 路面结构层寿命匹配分析	130
6.3 路面结构寿命合理匹配分析	144
参考文献	151

第 1 章 引 论

1.1 沥青路面的发展现状及存在的问题

新中国成立以来,我国的公路建设大致可以划分为三个阶段,每个阶段都是与当时交通量的大小、轴载大小和经济发展需求相适应的。为适应交通快速发展的需要,路面结构也在不断完善。在这三个阶段里,代表性路面结构的发展经历了由适应轻交通的泥结碎石路面和级配砾石路面,到适应中型交通的渣油表面处治路面和石灰土基层路面,直到目前适应重交通的半刚性基层沥青混凝土路面和水泥混凝土路面的过程;基层的发展也经历了手摆片石基层、级配碎砾石基层、石灰土基层、水泥稳定砂砾基层、二灰碎石基层、水泥稳定碎石基层等形式^[1-2]。

20 世纪 80 年代中期以来,由于交通量大增,轴载和重车比例增大,对路面的整体强度和平整度提出了更高的要求,相应地,对基层的要求也提高到了一个更高的水平。于是普遍采用无机结合料稳定粒料(土)类基层,即将一定比例的水硬性材料(石灰、水泥、粉煤灰或其他工业废渣等结合料)与水及土、砂、石等筑路材料拌和后,产生一系列的理化反应,经摊铺压实养生后形成路面基层,其具有较高的强度、刚度及良好的板体性、水稳性,并具有一定的抗冻性,大大提高了路面的承载能力。由于具有水硬性结合料处置层的沥青路面的力学性能明显不同于仅用粒料基层和底基层的沥青路面,在 1983 年召开的第十七届世界道路会议上,将具有水硬性结合料处置层的沥青路面正式命名为“半刚性路面”。在 1987 年 9 月的第十八届世界道路会议上,专门设立了“半刚性路面”这一议题^[3]。

20 世纪 90 年代末,随着国民经济的不断发展,我国公路交通状况发生了明显的变化,交通量增长迅速,重载车数量显著增加,超载车辆普遍存在,新交通状况对路面基层提出了更高的要求。为适应交通量日益增加和车辆荷载逐渐增大的需要,采用半刚性基层路面已成为当时突出的趋势,半刚性基层沥青路面几乎成为我国新建高等级公路唯一的可选路面结构。此时的半刚性基层沥青路面设计规范、施工规范日趋完善,施工单位的施工机械、施工技术比以前有了较大的进步;与此

同时,道路沥青进口数量继续飙升,路面造价居高不下,成为发展沥青路面的重大障碍。半刚性基层沥青路面继续在“强基薄面”的思想下发展,成为我国沥青路面结构的主要形式,并几乎成为包括高速公路在内的唯一的结构形式^[4]。

随着我国经济的快速发展,公路交通建设以一个前所未有的速度向前发展,到2013年底,我国高速公路通车总里程已经达到10.4万km。随着高速公路建设里程的不断增加,交通量以及车辆荷载的剧烈增长,其所暴露出来的问题也十分严重。特别是由于重车的数量和尺寸的剧增,容许轴载的增加,以及汽车和轮胎制造的新发展趋势,传统沥青路面已经逐渐不能满足要求;沥青路面初期破坏非常严重,初期损坏的发生频繁,这引起了我国道路部门的普遍重视,许多研究人员对沥青混凝土路面的损坏状况进行了一些调查。调查表明,通车仅2~3年的高速公路沥青混凝土路面已经出现大面积破坏,有些高速公路通车仅几个月就开始出现破坏迹象,不到一年就由于大面积破坏严重而不得不将原沥青混凝土面层铣刨后重新铺筑。我国90%以上的高速公路是新建沥青混凝土路面,这就使逾万公里的道路面临着初期损坏的威胁,现行的沥青路面技术也同样遇到了强有力的挑战。初期损坏的发生不仅降低了道路使用性能,而且增加了路面寿命周期成本,给道路建设和养护造成了巨大的经济损失。沥青路面耐久性差、使用寿命短的问题已成为阻碍我国道路建设发展的主要问题之一^[5]。

为了提高沥青混凝土路面的质量,近些年来,在我国的高等级公路沥青路面实践中采用了许多新技术,如多碎石沥青混合料技术、Superpave混合料设计技术、SMA路面技术、聚合物改性沥青和纤维改性沥青技术等。这些技术的应用虽然在一定程度上改善了路面质量,但路面初期损坏现象依然存在^[6]。

这些问题的存在与我国长期以来采用沥青层较薄的半刚性基层沥青路面结构、设计理论以及施工技术等方面的原因有关。依据水泥稳定基层在使用过程中的疲劳损坏性状和半刚性基层沥青路面结构设计理论,路面损坏分为两个阶段:水泥稳定基层出现疲劳损坏阶段和沥青面层出现疲劳损坏阶段。路面结构的总寿命为两阶段疲劳寿命总和。第一阶段设计建立在基层开裂成大块的前提下,第二阶段设计时基层实际上已经成为碎块。按我国规范的方法计算也表明,在沥青层与基层的连续界面条件下,沥青层不会出现拉应力;在滑动界面条件下,沥青层底会出现拉应力。出现拉应力当然会对沥青路面的寿命产生不利影响。但即使这样,由于沥青层的应力与强度比所相应的疲劳损耗有可能低于半刚性基层,其疲劳寿命可能仍大于半刚性基层,即半刚性基层经常是早于沥青面层先达到设计标准而出现疲劳开裂破坏。也就是说,当沥青层较薄时,半刚性基层沥青路面结构设计受控于路面底部的疲劳开裂破坏,沥青面层底面的拉应力验算指标不会对结构厚度

起控制作用。由于半刚性基层的强度、模量、抗疲劳性能等会因为重复荷载的作用及环境(干湿、冻融等)的影响而不断衰减,总是有一定使用寿命的,只要到了设计寿命,将会逐渐丧失功能,需要重铺。因此,半刚性基层沥青路面的使用寿命不可能无限期的延长下去。另外,由于半刚性基层比较致密,渗透性差,温度敏感性强,这使得半刚性基层沥青路面容易出现反射裂缝及水损害等病害,甚至会过早地出现路面结构性破坏。这种结构性破坏,无法通过沥青面层的维修得到解决,往往成为“开膛破肚”式的大修作业,这是我国目前大部分半刚性基层沥青路面结构所面临的严峻问题^[4]。这种问题致使路面服务性能降低较快,路面的服务年限缩短,许多道路设计使用寿命15~20年,实际服务年限却为5~8年,有的甚至出现了通车一两年内即进行大修的现象。路面使用寿命的降低,造成了极大的经济损失和不良的社会影响。

随着社会经济的发展,道路和人们生活的联系更加紧密,对经济发展产生越来越大的影响。道路维修产生的废旧材料造成的环境污染和自然资源的消耗,已成为重要的社会问题;道路性能的降低,使服务质量下降,影响人们的行驶舒适性。人们期盼着使用更加耐久、平整、安全、舒适及服务水平更高的道路。

因此,高速公路沥青路面的早期损坏问题,已经不是单纯的技术问题,已成为一个社会问题。在当前交通轴载和交通量迅猛增长的情况下,现有的路面结构形式和设计理论已经难以解决目前高速公路路面工程的建设问题。

近些年来,人们对长寿命沥青路面这个新概念产生了很大的兴趣。长寿命沥青路面(Long-life Asphalt Pavements)的概念出现在20世纪60年代,当时一些国家开始修建全厚式沥青混凝土路面(Full-depth Asphalt Pavement)和高强度厚沥青路面(Deep Strength Asphalt Pavement),其目的是要使路面的使用寿命大大延长^[7]。全厚式沥青路面直接修筑在路基上,而高强度厚沥青层路面是铺筑在相对薄(4~6in, 1in=0.0254m)的粒料基层上。这种路面结构的一个主要优点是整个路面部分比铺筑在厚粒料基层上的路面薄,这种路面还有一个优点是,通过减小沥青层底拉应变显著减小潜在的疲劳开裂。该设计理念是要建造一个不会发生结构性破坏且表面层材料可以很容易地根据需要进行修复的路面结构。“长寿命路面”是一种路面使用年限较长的结构设计与维护概念。美国沥青路面协会(APA)^[8]认为:长寿命路面(美国习惯称之为永久性路面,Perpetual Pavements)是指设计年限达50年的沥青路面,在设计年限内无结构性修复和重建,仅需根据表面层损坏状况进行周期性的修复。另外,美国国家沥青技术研究中心(NCAT)的一项研究认为,当车辙出现在厚式路面时,它可能局限于路面结构上部2in范围。当这种现象发生时,一个较为经济的处理方案是铲除结构上部层材料并用同样水平的材料取代。欧洲

长寿命路面研究小组(ELLPAG)^[9]对长寿命路面采用了一个相似的功能性定义:经过合适的表面维护,路面基础和基层在使用中不会出现明显损坏的路面叫长寿命路面。这个定义主要避免了一个寿命长度,如30年、40年或50年。长寿命路面在维护和修复条件良好的情况下,应可以使用40年以上。Michael Nunn^[10]在1998年指出,即使是低强度的柔性路面,在承受很大的交通荷载长时间冲击时也不会破坏;他还指出,现有的超过370mm厚的面层几乎可以在不产生疲劳开裂或车辙等破坏情况下承受无限次的轴载作用,这些高强度厚路面只在表面观测到贯穿裂缝和车辙。图1-1为2002年AASHTO(美国国家高速公路和交通运输协会)新设计指南研究成果^[11],为沥青层底开裂引起的路面开裂率随沥青层总厚度变化的关系。从图1-1中可以看出,对于不同的开裂率来说,沥青层厚度在2~4in(5~10cm)范围内开裂最为严重,而当沥青层的厚度大于8in(20cm)时,沥青路面的开裂率一般都能控制在5%以内。

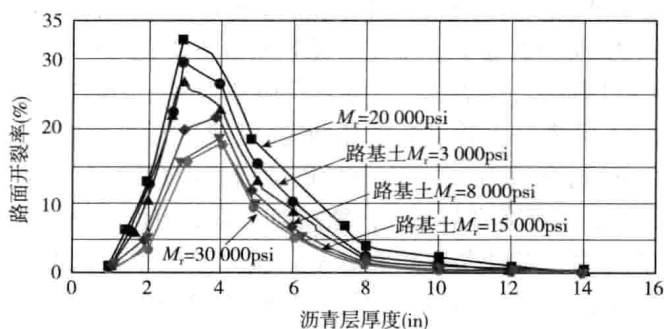


图1-1 沥青层底开裂引起的路面开裂率随沥青层总厚度变化情况

注: M_r 表示回弹模量。1psi=0.06895MPa;1in=0.0254m。

因此,要尽可能降低沥青路面开裂,必须加厚沥青层的厚度,当沥青层的厚度超过20cm时,沥青路面开裂率会大大减小。但如果这些表面裂缝和车辙在对下层路面结构产生损害前就进行适时处理,路面的寿命将大大延长。研究人员基于这一原则并结合路面材料研究建立了一个基本的长寿命路面结构的概念。这个概念就是在较强路面基础上铺筑三层热拌沥青混合料(HMA)厚沥青层,每层在路面使用过程中发挥着不同功能。

长寿命路面是一个服务寿命超过40年且在该服务期内没有主要结构性修复或重建的耐久性厚沥青路面结构,通常为重交通路面结构设计^[12]。然而,由于路面上面层的表面病害,它们都受到定期表面维修和/或重建;认为不存在诸如疲劳裂缝和/或车辙等深层次的结构性病害,如果存在,也是很小的。就这些路面结构

而言,病害和维修活动仅局限于易受影响和容易更换的路面表面层部分。因此,当表面病害达到临界水平时,通常较经济的解决方法是更换或在表面层上进行简单的罩面。这对重交通公路尤其重要,因为公路交通延误及交通封锁的成本太高。总而言之,长寿命路面的好处主要包括^[13]:

- (1) 对大交通量和重载具有较高的承受能力。
- (2) 使用寿命长且不需对主要结构进行修复或重建。
- (3) 较小的交通延误、重建及寿命周期成本。

由于长寿命路面明显较厚或结构层较多,因此可以推测,长寿命路面的初期建设费用比常规沥青路面可能要高。然而,上述的好处,一般可能会等同或超过这一影响;特别是长寿命路面能够作为解决公路交通荷载日益增加问题的解决方案。

长寿命路面在结构设计合理的情况下,通过精心施工,其结构寿命将比设计寿命长,同时能承受较大的交通荷载。为了达到上述要求,长寿命路面结构必须满足:①有足够的结构强度来抵抗诸如疲劳裂缝、永久变形或车辙等结构病害;②有足够的耐久性来抵抗交通荷载和环境(如水损害)所带来的损伤。因此,长寿命路面设计应包括:①设计具有足够刚度、抗车辙性能的路面上部结构层;②设计足够的总路面厚度;③设计具有一定柔韧性的沥青底层以避免由下而上疲劳裂缝的发生。像其他一些路面结构一样,一个坚实稳定的基础是支撑长寿命路面结构、交通荷载及减小由于环境影响所引起的季节性变化(冻融和含水率)的关键。目前国外长寿命沥青路面的力学设计过程主要是基于以下两个极限响应标准^[14]:

- (1) 沥青底层的层底水平拉应变 $\varepsilon_l \leq 70\mu\varepsilon$ 。
- (2) 路基顶部的垂直压应变 $\varepsilon_v \leq 200\mu\varepsilon$ 。

符合这些路面响应标准的永久性路面结构,可以被认为在结构上足以抵抗疲劳开裂和车辙。否则,层厚和材料特性就需要进行修改。美国的 Timm D. H 等人^[15]开发的 PerRoad,一个基于数值软件的力学—经验法通常用于结构分析和层厚设计。

通常,长寿命沥青路面结构包括但不限于防渗、耐久、耐磨的上部结构层,一个抗车辙、结构强度大的厚中间层和一个铺筑在稳定及高强度基础上的抗疲劳柔性底层。层厚依据交通荷载、环境位置 and 材料(混合料)设计而变。然而,抗车辙层是最厚的结构层,以便提供足够的承载能力。图 1-2 所示的是一个长寿命路面典型结构和一些推荐的层厚。

目前对于长寿命路面的设计寿命,国内外尚无统一标准,各国对长寿命路面的期望值为 30~50 年不等(表 1-1)^[9];但都认为这种厚式沥青路面在材料和工程质量达到要求的前提下,不管是交通荷载还是环境条件都不会引起路基和路面基层

的破坏,任何可能发生的破坏只与面层有关,避免了传统的沥青混凝土路面疲劳开裂和永久变形这两类最主要的破坏形式。

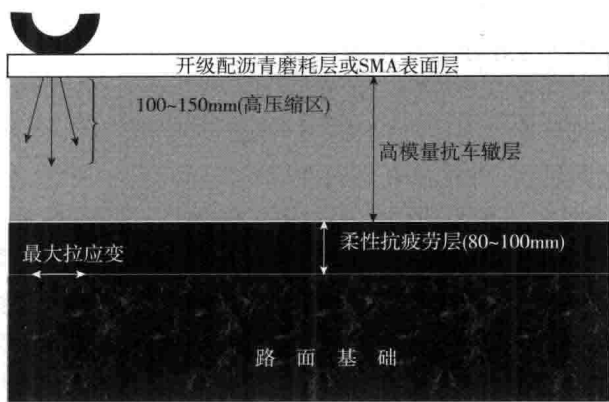


图 1-2 长寿命沥青路面典型结构

世界各国、地区或机构长寿命路面的设计寿命 表 1-1

国家、地区或机构	西弗吉尼亚州	堪萨斯州	俄亥俄州	华盛顿州	威斯康星州	犹他州	加利福尼亚州
年限	40	30	35	40	50	30~50	35
国家、地区或机构	科罗拉多州	伊利诺斯州	夏威夷州	AASHTO	俄勒冈州	FHWA	西班牙
年限	40	40	30~50	30~50	30~35	不小于 35	30
国家、地区或机构	德国	英国	法国	南非	日本	加拿大	澳大利亚
年限	30~40	40	30~40	30~40	20~40	30~40	20~40

从上面的分析可知,长寿命沥青路面的实质就是路面在设计使用寿命期间不会发生结构性破坏,它并不是一直不破坏,而是指路面的损坏仅发生在路面的上层,维修时不需要进行结构性处理,只需将表层混合料铣刨,并换成等厚度的新混合料即可,维修十分方便;其理念应该是通过对沥青路面结构的优化,合理设置路面各结构层的位置和层厚,从而延长沥青路面使用寿命,使其成为长寿命和维修成本较低的路面结构。

我国高速公路沥青路面建设与研究尽管已有 20 多年的历史,但与西方发达国家相比仍有较大的差距。现行的设计理论、方法、参数都是建立在传统的低等级公路基础上,而应用于当前的高速公路建设,特别是重载作用下的高速公路沥青路面设计与施工指导还存在较大的局限性。因此,为了提高公路沥青路面的整体质量,减少路面的维修,提升公路路面服务水平,降低原材料消耗,节约能源资源,提高公路的经济社会效益,很有必要更新我国现行的沥青路面设计理念,借鉴发达国家先进的技术经验,改进设计方法,调整路面结构,延长路面使用寿命。

1.2 国内外研究综述

1.2.1 国外的研究

发达国家沥青路面经过了近百年的发展,到今天其技术已经相当成熟,且沥青路面结构形式多样,主要以柔性基层沥青路面为主,组合式基层路面结构、刚性基层路面结构、半刚性基层路面结构等为辅,路面可选方案较多(表 1-2)^[16]。各国根据各自矿料资源、主要气候环境、交通状况以及经济条件来选定经济、合理的沥青路面结构。在各种路面结构中,厚沥青层的沥青路面虽然也同样承受着大交通量和重荷载的作用,但却仍然保持着良好的使用性能。

西方国家高速公路采用的沥青路面结构(单位:cm)

表 1-2

国 家	沥青面层及厚度	基层及厚度	底基层及厚度
美国	沥青混凝土(4+9)	沥青贯入(17.5)+水泥碎石(16)	砂砾(25)
	沥青混凝土(5)	沥青碎石(19)	砂砾(15)+加固层(15)
	沥青混凝土(7)	沥青碎石(12)	级配砂砾(75)
德国	浇筑沥青混凝土(3.5)+ 沥青混凝土(3.5+5)	砂砾沥青混凝土(18)	贫混凝土(15)+防冻层(30)
	沥青混凝土(4+3+5)	沥青稳定碎石(18)	级配砂砾(15)+防冻层(30)
	沥青混凝土(12以上)	水泥结粒料	
法国	沥青混凝土(3+4)	沥青碎石(16)+水泥处治 粒料(10~35)	砂底基层(15)
荷兰	沥青混凝土(4+4)	沥青稳定砂砾(12~18)	水泥稳定砂砾(15~40)
瑞士	沥青混凝土(3+4)	沥青碎石(11)	砂砾(30)+水泥处治砂砾 (20)
瑞典	沥青混凝土(5)	沥青碎石(7.5)	水泥稳定砂砾(18)
波兰	中粒式+粗粒式沥青混凝土 (3+7)	沥青碎石(8)+水泥石屑 (27)	水泥石屑(路拌)(12)+砂 砾(50)
澳大利亚	沥青混凝土(7.5)	级配碎石(15)+石灰稳定 砂(30)	补强层(25)
日本	中粒式+粗粒式沥青混凝土 (10)	沥青碎石(15)	水泥稳定碎石(25)

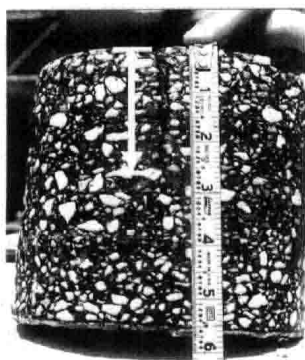


图 1-3 现场钻芯试件的表面
Top-Down 裂缝

调查发现^[17],较厚的沥青层、精心施工的柔性沥青路面不会发生结构性损坏,其病害为非结构性损坏,如车辙和开裂,仅限于路面顶部(图 1-3),即厚沥青层道路不会出现沥青基层由下至上的疲劳裂缝或来自于路面结构深层的变形,此时的车辙和裂缝不表示道路的整体结构不足,只要通过罩面修复就能使基层结构保持良好。这些路面性能的调查为各国长寿命沥青路面设计理念的发展提供了重要的理论依据。

厚沥青层沥青路面的良好性能在很多国家重载交通道路上被证实^[18-20]。如英国高速公路 M62、M5、M1、M4 及 M25 等,德国 A5、Hamburg 高速公路,法国 Periphérique 高速公路、Stered 高速公路,意大利 Del Sole 公路,奥地利 Brenner 公路以及美国各州的很多高速公路,这些道路都是重载交通,沥青层厚 20~35cm,一直都处于良好的使用状态。

1) 欧洲国家的长寿命路面研究

英国在 20 世纪 60 年代初期修筑了多条设计寿命为 20 年的试验路,在分析这些试验路路面性能的基础上, Powell 等人于 1984 年提出的设计理论,主张道路使用 20 年后通过对原路面的补强来实现 40 年的设计寿命,并提出了以计算结构层中临界位置的响应为理论基础。早期这种方法假设路面结构损坏源于车辆的重复荷载作用,不管面层有多厚,开裂或者结构性的车辙最终将不可避免^[21]。然而, Nunn 等人在 1997 年发现,沥青路面面层存在一个厚度极限,在施工良好的道路中层厚超过这个厚度值,由下到上的疲劳开裂和结构性的车辙都可避免;他们认为,当累计标准轴载作用次数(ESAL)超过 8 000 万次时,沥青面层厚度不再需要增加^[10]。这意味着交通量的增大并不需要沥青面层厚度的无限增加。这是因为在沥青面层层底存在一个极限弯拉应变水平,当层底应变处于这个水平以下时疲劳损坏就不会发生,再增加厚度是多余的,而这一应变水平即为疲劳极限。

在英国提出了长寿命设计理念后,迅速传遍欧洲,此后,法国、德国、意大利等发达国家先后各自提出了长寿命路面的理念。欧洲国家的长寿命路面理念可归纳为以下几点。

(1) 使用寿命:大于 40 年。

(2) 裂缝:裂缝产生于沥青面层表面并由上向下发展(Top-Down 裂缝),绝大多数为纵向裂缝,位置在轮迹两侧,也有横向表面裂缝,但很少见。

(3)车辙:Nunn^[10]等人发现,厚沥青路面存在一个厚度极限,超过这个限值,自下而上的疲劳开裂和结构性车辙都不会发生,即只会发生表面层车辙。

(4)疲劳寿命:数据统计分析表明,90%多的残余寿命差别是由沥青用量和沥青硬度的不同而引起的,沥青的老化则是疲劳寿命差异的主要影响因素。

(5)沥青的养生:主要结构层的逐渐硬化对道路有利,确切地说,沥青的老化是一种养生过程,但不希望磨耗层过度老化,否则会导致路面从表层开裂。

研究表明,基层使用的沥青针入度为100(0.1mm),20年后其针入度会降至20(0.1mm)甚至更低。英国道路运输研究所(TRL)对沥青混凝土养生研究表明,道路在使用期间,沥青碎石基层劲度会逐渐增长至原来的4倍或者更高,这种变化对长寿命路面的设计有重大意义^[22]。

(6)路面强度:沥青在养生作用下道路劲度随时间增加,路表弯沉随时间而减小;施工良好的厚沥青路面荷载扩散能力提高,沥青基层不会出现因交通诱发的破坏。

(7)材料选择:采用刚度更大的基层材料,如HMB15、HMB25、HMB35三种高模量沥青混合料^[23]。英国将硬质沥青与长寿命路面结构的使用相结合。

另外,欧洲还专门成立了长寿命路面研究小组,主要报道欧洲长寿命路面的研究现状,特别是关于如何设计、建造和养护长寿命路面,以及如何使柔性路面的结构寿命较长^[9]。他们的研究目标是:

- (1)确定不发生结构破坏的路面设计、施工、评估和养护的最佳方法。
- (2)更好地理解长寿命路面正确施工和养护的经济可行性。
- (3)更好地理解路面的破坏机能和路面分类,特别是长寿命路面。
- (4)鼓励使用长寿命路面设计和养护方法。

沥青面层或沥青碎石基层在层底拉应变很小时,可以承受相当大数量的荷载作用而不发生疲劳破坏;沥青混合料的疲劳应变小于“应变下限”时,材料内部将不发生疲劳损坏的累积。

2) 美国的长寿命路面研究

早在20世纪70年代,沥青路面的车辙便首次成为美国西部一些州路面早期损坏的主要问题,而此时在东部一些州路面车辙现象则不明显;到了20世纪80年代,东部一些州的路面车辙现象逐渐严重起来,沥青路面过早损坏引起了美国普遍关注。通过对沥青路面进行大量研究,美国普遍认为调整路面结构和提高沥青混合料性能完全可以解决沥青路面因交通量和交通荷载增加而产生的车辙损坏问题。一直以来,美国注重积累大量的长期路用性能数据,通过对长期路面性能的分析,逐渐发现采用厚沥青层的全厚式沥青路面或者厚沥青层下卧粒料底基层的柔

性结构具有最优越的结构性能。在此基础上,美国联邦公路局(Federal Highway Administration,简称 FHWA)逐渐提出了一项永久性沥青路面(即欧洲的长寿命沥青路面)计划,拟修建能满足消费者的安全需要、成本效益好并能有效维持其长寿命的路面^[15]。工作重点集中在先进的路面设计体系、先进的质量评估体系以及改善路况和行驶质量上,这实际上是欧洲长寿命路面设计理念的发展。在努力修筑不需要在未来进行结构性修复和重建的耐久性路面方面,美国一些州在他们的重交通公路上采用了长寿命路面。实际上,一些州,如加利福尼亚州、伊利诺斯州、堪萨斯州、肯塔基州、密歇根州、新泽西州、俄亥俄州、俄勒冈州、宾夕法尼亚州、得克萨斯州、弗吉尼亚州、华盛顿州和威斯康星州已经用长寿命路面理念修筑了在服务的路面结构或试验路^[20]。其长寿命路面通常采用柔性结构,路基强度较高时,可以采用全厚式沥青路面;路基强度不足时加铺粒料基层或沥青碎石基层。以下是美国一些州的长寿命(永久性)沥青路面的实践概况。

(1) 美国加利福尼亚州^[24-25]。

加利福尼亚州在 I-710 州际公路上修筑了一条长寿命(永久性)沥青路面。这条公路被称作 Long Beach 高速路,设计年限 40 年,累计轴载作用次数 1 亿~2 亿次。旧的路面结构由上到下为:200mm 水泥混凝土层,100mm 水泥处治材料层,100mm 粒料基层,200mm 底基层。新的设计要求对大部分旧水泥混凝土面层打碎并与基层材料紧密接触,其上铺筑 200mm 的 HMA 和 25mmOGFC。主要采用了全厚式和复合式两种路面结构。

其中,全厚式路面结构 HMA 部分总厚度为 300mm。采用 75mm 的抗疲劳层,该层的沥青用量超过最佳用量 0.5%,达到了 5.2%,增加的沥青用量用于提高 HMA 的疲劳寿命。150mm 厚的中间层所用材料的级配和沥青与 HMA 基层相同,但沥青含量为 4.7%。中间层采用针入度较低的沥青将有助于抵抗车辙。上部 75mm 的面层结构采用聚合改性结合料 PBA-5A,上覆 25mmOGFC。

复合式路面结构的 HMA 总厚度为 200mm,不再包括抗疲劳底层。与基层材料紧密接触的旧水泥混凝土层为沥青层提供了刚性基础,并能防止过大的弯拉应力造成的由下而上的疲劳开裂。

除此之外,用于复合式路面结构的材料与全厚式路面结构的材料完全相同。和全厚式路面结构一样,磨耗层采用 25mmOGFC。所设计全厚式沥青路面结构是否合理,可根据单轴载为 80kN 时 HMA 沥青层的弯拉应变是否小于 $70\mu\epsilon$,及路基顶面垂直应变是否小于 $200\mu\epsilon$ 来判定。同时还需观测 HMA 表面层的剪切应力,以确保 HMA 层不发生车辙、推移等剪切破坏。该工程于 2001 年夏开工,2002 年夏竣工。

(2) 得克萨斯州长寿命沥青路面典型结构^[19,25,28]。

2001年3月,得克萨斯州交通局(TxDOT)针对超过3 000万当量轴次的重交通公路发布了一个建议使用全厚式沥青路面的备忘录。这对应付日益增加的交通和尽量减少结构修复(重建)的次数及费用是必要的。迄今为止,得克萨斯州自2001年以来大约铺筑了8个长寿命沥青路面项目。

得克萨斯州的长寿命沥青路面主要由6个路面结构层组成。第4层是抗车辙硬层(如,25℃时模量 $\geq 500\text{ksi}$, $1\text{ksi} = 68.95\text{MPa}$),为了确保有足够的荷载扩散能力,其最小厚度应不小于8in(20cm);第5层是具有一定柔韧性的、典型的高沥青含量抗疲劳层,由于其特有的高沥青含量,因此这层一般被定义为富沥青底层(RBL);第3层是一个过渡性的承载层;第1层(PFC)和第2层(SMA)是路面磨损、风化、热裂缝、抗车辙性、防渗水性、安全性和耐久性等特性的补充层。总之,上部结构层(受到最严厉的交通和气候条件影响)为了防止车辙,一般采用较高的沥青结合料PG等级来设计;而最底层(RBL)为了满足抗疲劳性能,采用相对较低的沥青结合料PG等级。第6层和路基主要是为路面提供支撑的基础。显然,得克萨斯州长寿命沥青路面理念比传统的长寿命路面理念(图1-2)更保守,其包含更多的层次且路面总厚度更厚。理论上,得克萨斯州长寿命沥青路面预计会有更好的结构能力,然而,最终的实际性能却包括材料、混合料设计及施工等许多变量的函数。

得克萨斯州长寿命沥青路面目前的结构(厚度)设计和分析是在力学—经验法的基础上,采用基于Windows的柔性路面设计系统软件版本19(FPS-19W)进行的。为了满足所需设计的检验标准,根据用户提供的组合层厚度范围和材料性能,FPS-19W软件利用WESLEA线弹性分析系统对力学—经验法(M-E)结构响应进行分析;同时利用PerRoad软件来检验长寿命路面的设计。

(3) 美国密歇根州^[14,30]。

密歇根州沥青路面协会与Fugro-BRE有限公司合作,开发出一种用于长寿命路面结构设计的程序。VonQuintud运用力学方法并使用ELSYM5计算机程序来计算路面结构的应力和应变。这种方法提供了一种观念,即设计年限超过40年的面层结构的选择决定于累计损坏。VonQuintud采用了这一方法来确定长寿路面各结构层厚度的合理范围。密歇根州路面基层由1m厚的抗冻层及上覆盖层构成。当设计年限为20年,设计累计标准轴载作用次数为300万~1 000万次时,上覆层为碎石集料底基层;当设计累计标准轴载作用次数为2 000万~3 000万次时,上覆层采用碎石基层。其面层总厚度范围为290~425mm。VonQuintud建议HMA基层需保证3%的间隙率以缓解由下而上的疲劳开裂。面层混合料的选择根据设计年限20年累计标准轴载作用次数进行选择,在累计标准轴载作用次数为300万~