



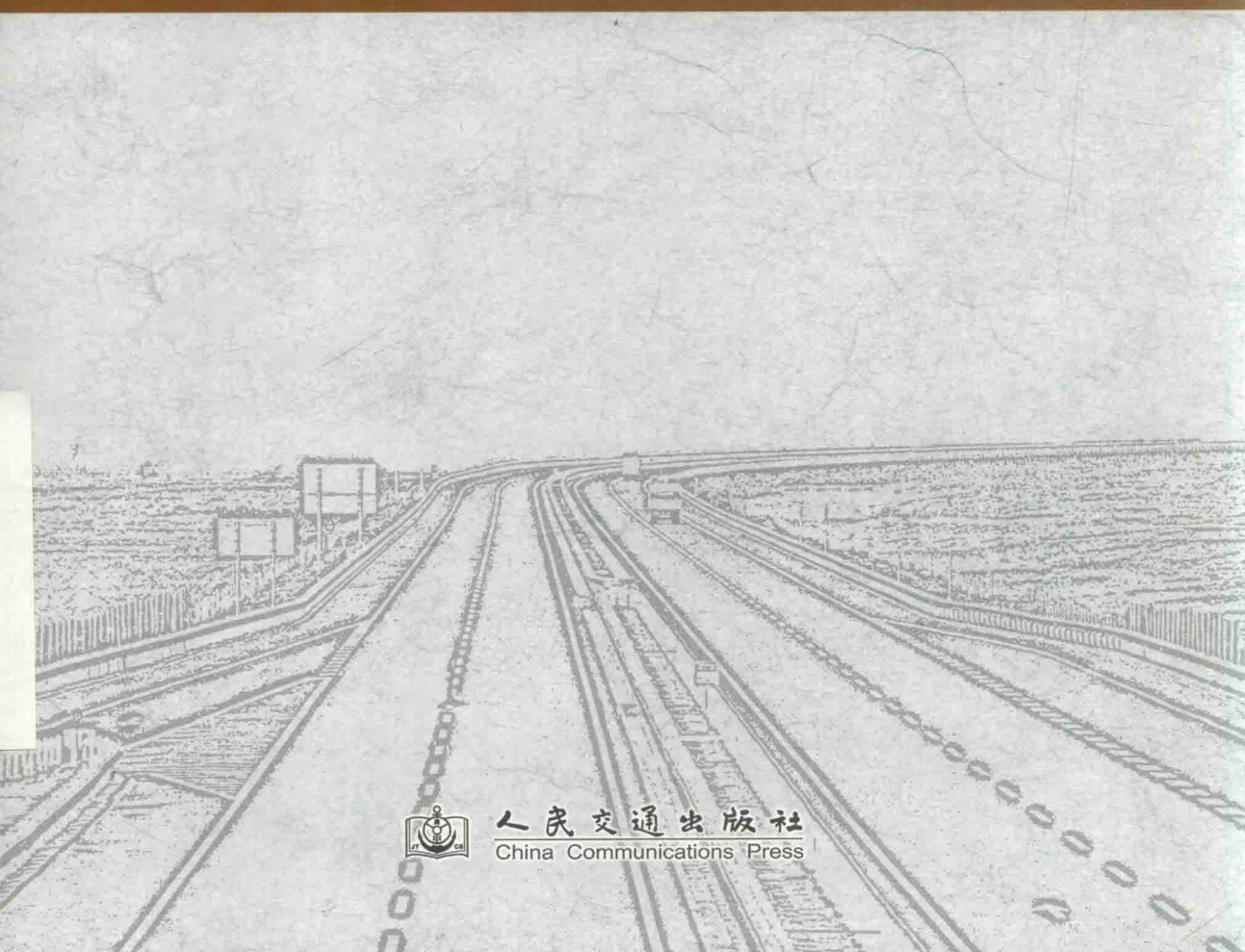
交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

刘云全 朱建平 著

# 高模量

High Modulus  
Hot Mix Asphalt Concrete

# 沥青混凝土



人民交通出版社  
China Communications Press



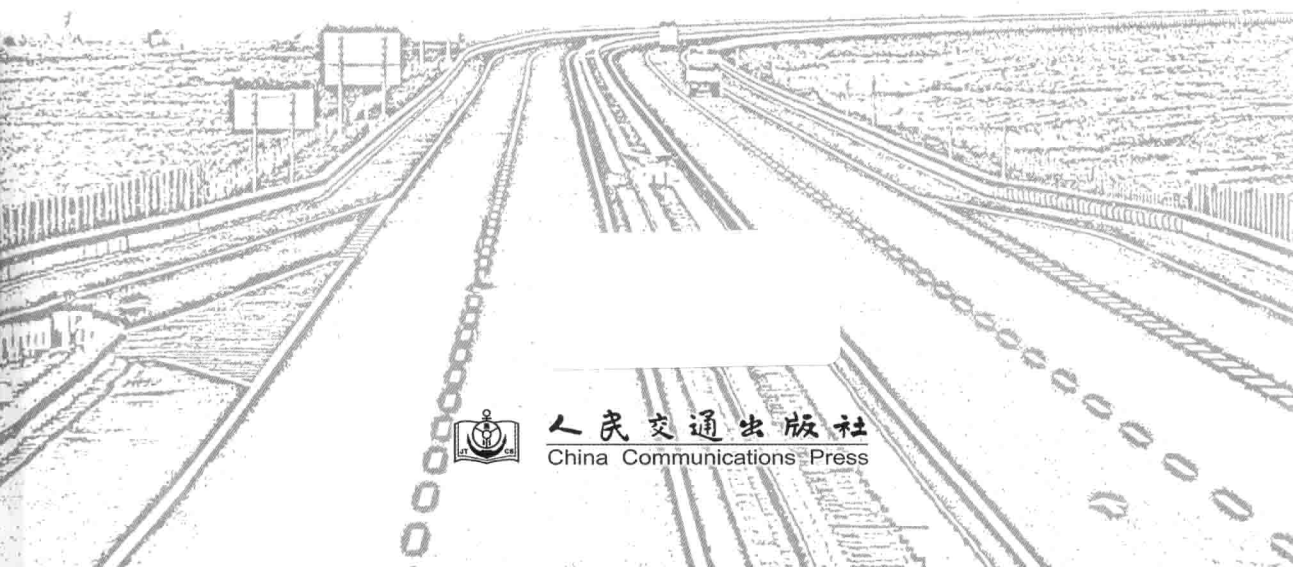
交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

刘云全 朱建平 著

# 高模量

High Modulus  
Hot Mix Asphalt Concrete

# 沥青混凝土



人民交通出版社  
China Communications Press

## 内 容 提 要

本书依据交通运输部2005年西部交通建设科技项目“高模量沥青混凝土应用技术研究”研究成果,总结推广使用经验,结合分析国外相关研究设计理论,阐述了高模量沥青混凝土的设计方法、应用范围以及在路面结构层中的作用,并对我国高模量沥青混凝土指标体系提出了建议。本书内容包括高模量沥青混凝土应用现状、路面温度场与路面结构层模量、高模量沥青混凝土力学特性、高模量沥青混合料路用性能、高模量沥青混合料对路面结构的影响、高模量沥青及外掺剂研究开发等。

本书适合从事公路工程路面材料研究的人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

高模量沥青混凝土 / 刘云全, 朱建平著. — 北京 : 人民交通出版社, 2014. 4

(交通运输行业高层次人才培养项目著作书系)

ISBN 978-7-114-11314-7

I. ①高… II. ①刘… ②朱… III. ①沥青混凝土  
IV. ①TU528.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 058123 号

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

书 名: 高模量沥青混凝土

著 作 者: 刘云全 朱建平

责任编辑: 周 宇 卢俊丽

出版发行: 人民交通出版社

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: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 7.75

字 数: 164 千

版 次: 2014 年 10 月 第 1 版

印 次: 2014 年 10 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11314-7

定 价: 32.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系  
编审委员会

主任：杨传堂

副主任：戴东昌 周海涛 徐光 王金付  
陈瑞生(常务)

委员：李良生 李作敏 韩敏 王先进  
石宝林 关昌余 沙爱民 吴澎  
杨万枫 张劲泉 张喜刚 郑健龙  
唐伯明 蒋树屏 潘新祥 魏庆朝  
孙海

## 书系前言

### Preface of Series

进入 21 世纪以来,党中央、国务院高度重视人才工作,提出人才资源是第一资源的战略思想,先后两次召开全国人才工作会议,围绕人才强国战略实施做出一系列重大决策部署。党的十八大着眼于全面建成小康社会的奋斗目标,提出要进一步深入实践人才强国战略,加快推动我国由人才大国迈向人才强国,将人才工作作为“全面提高党的建设科学化水平”八项任务之一。十八届三中全会强调指出,全面深化改革,需要有力的组织保证和人才支撑。要建立集聚人才体制机制,择天下英才而用之。这些都充分体现了党中央、国务院对人才工作的高度重视,为人才成长发展进一步营造良好的政策和舆论环境,极大激发了人才干事创业的积极性。

国以才立,业以才兴。面对风云变幻的国际形势,综合国力竞争日趋激烈,我国在全面建成小康社会的历史进程中机遇和挑战并存,人才作为第一资源的特征和作用日益凸显。只有深入实施人才强国战略,确立国家人才竞争优势,充分发挥人才对国民经济和社会发展的重要支撑作用,才能在国际形势、国内条件深刻变化中赢得主动、赢得优势、赢得未来。

近年来,交通运输行业深入贯彻落实人才强交战略,围绕建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通的战略部署和中心任务,加大人才发展体制机制改革与政策创新力度,行业人才工作不断取得新进展,逐步形成了一支专业结构日趋合理、整体素质基本适应的人才队伍,为交通运输事业全面、协调、可持续发展提供了有力的人才保障与智力支持。

“交通青年科技英才”是交通运输行业优秀青年科技人才的代表群体,培养选拔“交通青年科技英才”是交通运输行业实施人才强交战略的“品牌工程”之一,1999 年至今已培养选拔 283 人。他们活跃在科研、生产、教学一线,奋发有为、锐意进取,取得了突出业绩,创造了显著效益,形成了一系列较高水平的科研成果。为加大行业高层次人才培养力度,“十二五”期间,交通运输部设立人才培养专项经费,重点资助包含“交通青年科技英才”在内的高层次人才。

人民交通出版社以服务交通运输行业改革创新、促进交通科技成果推广应用、支持交通行业高端人才发展为目的,配合人才强交战略设立“交通运输行业



高层次人才培养项目著作书系”(以下简称“著作书系”)。该书系面向包括“交通青年科技英才”在内的交通运输行业高层次人才,旨在为行业人才培养搭建一个学术交流、成果展示和技术积累的平台,是推动加强交通运输人才队伍建设的重要载体,在推动科技创新、技术交流、加强高层次人才培养力度等方面均将起到积极作用。凡在“交通青年科技英才培养项目”和“交通运输部新世纪十百千人才培养项目”申请中获得资助的出版项目,均可列入“著作书系”。对于虽然未列入培养项目,但同样能代表行业水平的著作,经申请、评审后,也可酌情纳入“著作书系”。

高层次人才是创新驱动的核心要素,创新驱动是推动科学发展的不懈动力。希望“著作书系”能够充分发挥服务行业、服务社会、服务国家的积极作用,助力科技创新步伐,促进行业高层次人才特别是中青年人才健康快速成长,为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通做出不懈努力和突出贡献。

交通运输行业高层次人才培养项目  
著作书系编审委员会  
2014年3月

## 作者简介

Author Introduction



刘云全,教授级高级工程师,现任辽宁省交通科学研究院副院长,高速公路养护技术交通行业重点实验室(沈阳)学术委员会副主任,辽宁省公路学会副理事长,辽宁省交通行业青年科技专家,辽宁省百千万人才工程千人层次人选,享受国务院政府特殊津贴,曾获得辽宁省公路学会优秀工程师、交通运输行业优秀科技管理人员和交通运输部青年科技英才等称号。

先后在美国科氏(KOCH)材料公司、辽宁省交通科学研究院等单位从事沥青路面的设计、施工、监理、养护与管理等工作。近20多年来,主要从事沥青混凝土路面结构与材料方面的研究开发工作,在沥青碎石玛蹄脂(SMA)技术、沥青路面应力吸收层技术、超薄磨耗层技术、高模量沥青混凝土技术等方面取得了较多的研究成果。

作为主持人或主要技术负责人先后承担或参与了21项省部级科研项目;获得省政府科技进步二等奖4项,三等奖3项;荣获中国公路学会科学技术奖三等奖2项;在专业期刊和学术会议上发表学术论文20余篇,被SCI、EI等检索收录3篇;获得技术发明专利4项;参与出版著作1部,地方标准4部。

# 前 言

## Foreword

随着公路建设技术水平的进步,路面早期病害问题得到了有效解决,然而,车辙及路面耐久性问题却依然困扰着道路研究者和建设者。亟需探索一条途径,从提高路面结构承载能力出发,协调不同温度状态下沥青路面结构层荷载应力—应变水平,发挥沥青路面各结构层功能,从而提高沥青路面抗永久变形能力,延长其使用寿命。作者于2005年初主持原交通部西部交通建设科技项目管理中心立项的“高模量沥青混凝土应用技术研究”课题,有机会深入研究提高沥青混合料模量方法及其对路面结构的贡献,积累了一些经验,本不足以写书,然而近期时常遇到有同行将沥青混合料抗车辙材料作用与高模量沥青混凝土的路面结构改善作用混淆,作者感觉有责任将研究成果与同行分享,以便各地区依据当地气候条件设计路面结构层模量。

最初的高模量沥青混凝土的设想来源于对沥青路面温度场的调查。夏季高温时是车辙病害高发时段,路表温度可达 $60^{\circ}\text{C}$ 以上,路表下 $10\text{cm}$ 处有 $45^{\circ}\text{C}$ 左右;而春秋季节路表温度只有 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ ,路表下 $10\text{cm}$ 处仅有 $25^{\circ}\text{C}$ 左右,此时的道路并无车辙病害发生。采用普通沥青混合料时,两者的动态压缩模量相差近10倍,也就是说,相同荷载条件下,高温季节产生的应变量是常温季节的10倍,不但存在车辙病害风险,较大的应变损伤也大大降低了沥青路面的寿命。因此,高模量沥青混凝土应该具有如下特性:高温时具有与普通沥青混凝土 $30^{\circ}\text{C}$ 相近的模量和蠕变性能,较突出的抵抗竖向应力承载能力,较好的常温抗疲劳性能和低温抗开裂性能,适用于沥青路面的中下面层。

本书中作者想阐述的观点如下:

(1)路面结构设计应考虑不同季节环境温度产生的路面温度场对沥青混合料模量的影响,兼顾高、低温状态路面材料以及路面结构形式的选择。

(2)提高沥青混合料高温模量有益于高温季节路面结构受力状态,有效地减小路面结构的应变量,提高路面使用寿命。

(3)提高沥青混凝土高温模量的方法大体分为两类:一类是提高沥青胶结料模量;另一类是在混合料中添加外掺剂。本书中分别选用了硬质沥青和PE/



PP 外掺剂为代表进行分析,实际应用中并不限于此两种方法。

(4)提高沥青混凝土高温模量的同时应充分考虑材料的疲劳和力学性能。

在作者完成“高模量沥青混凝土技术应用研究”课题过程中,华南理工大学张肖宁教授在研究方案和研究路线方面给予了全面指导,在此表示感谢。本书内容汇集了近几年交通运输部高速公路养护技术交通行业重点实验室(沈阳)团队的部分研究成果,在此感谢我的同事范兴华、高明、张怀志、王波、李洪斌等。感谢大连理工大学赵延庆教授在黏弹力学分析方面的帮助。

作者从技术研发至本书编写历时近8年时间,总结了我国一段时间内的研究成果,至此汇集成本书,书稿中难免有不足之处,敬请读者批评指正!

2013年11月



# 目 录

## Contents

第 1 章 高模量沥青混凝土应用现状 .....	1
1.1 法国高模量沥青混凝土应用情况 .....	1
1.2 美国高模量沥青混凝土应用情况 .....	3
1.3 高模量沥青混凝土在中国应用情况 .....	4
第 2 章 路面温度场与路面结构层模量 .....	5
2.1 沥青路面温度场 .....	5
2.2 沥青路面温度场对沥青路面结构的影响 .....	15
2.3 小结 .....	20
第 3 章 高模量沥青混凝土力学特性 .....	21
3.1 高模量沥青混合料静态模量 .....	21
3.2 高模量沥青混合料动态模量 .....	22
3.3 高模量沥青混合料蠕变特性 .....	36
3.4 高模量沥青混合料强度特性 .....	43
3.5 小结 .....	45
第 4 章 高模量沥青混合料路用性能 .....	46
4.1 高模量沥青混合料高温性能 .....	46
4.2 高模量沥青混合料低温性能 .....	49
4.3 高模量沥青混合料抗水损害性能 .....	51
4.4 高模量沥青混合料抗疲劳性能 .....	55
4.5 高模量沥青混合料抗冻性能 .....	67
第 5 章 高模量沥青混合料对路面结构的影响 .....	72
5.1 改变模量时的路面应力应变响应 .....	72
5.2 加速加载试验验证 .....	81
第 6 章 高模量沥青及外掺剂研究开发 .....	92
6.1 低标号高模量沥青 .....	92
6.2 高模量沥青混凝土添加剂研发 .....	101
参考文献 .....	109

# 第1章 高模量沥青混凝土应用现状

在我国高等级公路的半刚性沥青混凝土路面结构中，对车辙病害产生影响最大的是中面层。通过长期观测，即使在北方地区，如果遇到高温持续时间长，将使沥青路面在重交通条件下迅速变形破坏，产生车辙。沥青作为黏弹性材料，在如此持续的高温下，沥青性能由弹性体向塑性体转化，沥青黏度随温度升高呈非线性指数倍数降低，动态剪切模量大幅度降低；相同应力条件下，其应变急剧增大，混合料的抗变形能力急剧下降。在高温状态下具有较高模量的沥青混凝土，将减小沥青混合料在荷载作用下的应变，增强沥青混合料的高温稳定性，加大中面层混合料向下传递荷载的扩散角，减小底面层的荷载作用，充分发挥路面各结构层功能，从而降低路面结构病害。在不降低沥青混合料抗低温性能、耐疲劳性能的同时，大幅度提高中面层沥青混凝土的高温稳定性，确保路面结构的服务功能，延长沥青混凝土路面的使用寿命，科学地解决路面建设先期投资与长期使用性能、长远经济利益的矛盾，并为我国建立在半刚性路面基层基础上的长寿命路面研究多提供一种技术选择方向。

一般来说，沥青路面在低温状态下不产生车辙变形，将沥青混凝土高温模量提高到普通沥青混凝土中等温度时的水平，会很好地解决沥青路面永久变形问题，但提高材料刚度会降低混合料的韧性，而抗裂性能是由“沥青的抗拉屈服强度或断裂韧性”<sup>[1]</sup>这两个材料学指标决定的，因此，低温问题无法通过提高模量来解决。复合材料法可以解决沥青混凝土的韧性问题。当沥青胶结料的研究遇到瓶颈，现存的基质沥青不能满足道路使用温度状态的性能需要时，道路工作者采用改性沥青或添加纤维的方式改善混合料性能，较普遍采用的是 SBS 改性沥青。

## 1.1 法国高模量沥青混凝土应用情况

根据法国 LCPC（法国道路试验中心）专家介绍，1960年前，法国采用的道路沥青针入度为 80 ~ 100（0.1mm）或 180 ~ 200（0.1mm），1960年开始用针入度为 40 ~ 50（0.1mm）或 60 ~ 70（0.1mm）的沥青，1968年，部分地区采用了针入度为 20 ~ 30（0.1mm）的沥青，但随后出现路面开裂问题。分析其原因为沥青生产过程中普遍采用了氧化工艺。20世纪80年代后期，溶剂脱沥青工艺以及新的评价沥青高低温方法的出现，使低标号沥青再次得到广泛使用，并在使用过程中通过提高沥青用量克服了路面开裂问题。近年在法国的使用量如下：

1990年——39000t；1995年——77000t；2000年——100000t；2005年——140000t。

在法国，硬质沥青主要用于中下面层、沥青碎石基层以及薄层罩面（1994年始，沥青含量大于6%）。表面层大部分仍然采用针入度为 50 ~ 70（0.1mm）的沥青。从表 1-1 所列的硬质沥青欧洲标准可以看到，法国的硬质沥青 60℃黏度远大于我国规范的要求<sup>[2]</sup>。



硬质沥青的欧洲标准 (EN 13924)

表 1-1

基本要求	代表特征	试验方法	单位	等级				
				1	2	3	4	5
中等服务温度一致性	25℃ 针入度	EN 1426	0.1mm	NPD	TBR	15 ~ 25	10 ~ 20	—
高等服务温度一致性	软化点	EN 1427	℃	NPD	TBR	55 ~ 71	58 ~ 78	60 ~ 76
	60℃ 动力黏度	EN 12596	Pa · s	NR	TBR	≥550	≥700	—
耐久性 (163℃ 时的抗力, EN 12607-1)	质量损失	EN 12607-1	%	NPD	TBR	≤0.5	—	—
	针入度	EN 1426	%	NPD	TBR	≥55	—	—
	增加的软化点, 最大值	EN 1427	℃	NPD	TBR	≤8	≤10	—
	增加的软化点, 和试验前针入度指数	EN 1427	℃	NR	TBR	≤10	≤10	—
IP		—	-1.5 ~ +0.7			≤-1.5	—	
其他特性	135℃ 黏度	EN 12595	mm <sup>2</sup> /s	NR	TBR	≥600	≥700	—
	Fraass 断裂点	EN 12593	℃	NR	TBR	≤0	≤3	—
	闪点, 最小值	EN ISO 2592	℃	—	—	≥235	≥245	—
	溶解度	EN 12592	%	NR	TBR	≥99.0	—	—

注: NR-不需要; NPD-无性能要求; TBR-供应商报告中给出的水平或范围。

法国对高模量沥青混凝土有严格的试验规程和指标, 混合料设计方法自成体系, 动态模量试验、车辙试验、疲劳试验等试验方法不同于欧洲其他国家, 见表 1-2。其主要设计思想是通过提高沥青模量的方法提高混合料模量, 通过提高沥青用量的方法提高混合料疲劳开裂性能<sup>[2]</sup>。混合料设计时同时考虑两方面性能。

法国高模量沥青混凝土指标

表 1-2

交通量等级			1	2
0/D			0/10 或 0/20	
水敏感性	I/C (r/R)	%	≥0.7	≥0.7
车辙 (大型设备) T = 60℃	厚度	cm	10	
	—	%	7 ~ 10	3 ~ 6
		—	30000	
		类型 1	≤7.5	≤7.5
		类型 2		
类型 3				

续上表

交通量等级			1	2
旋转压实	空隙率 $V$ (%)	最小	0/10; 80 转; 0/14; 100 转; 0/20; 120 转	
	旋转压实	—		
	空隙率 $V$ (%)	最小		
	旋转压实	最大	< 10	< 6
	—	—	0/10, 0/14	0/10, 0/14, 0/20
直接拉伸模量 15℃ 和 0.02s [MPa] 或复数模量 15℃ 和 10Hz [MPa]	类型 1	—	$\geq 14000$	
	类型 2	—		
	类型 3	—		
允许应变 $\varepsilon_6$ , 10℃ 和 25Hz [ $10^{-6}$ ]	—	—	$\geq 100$	$\geq 130$

在法国亦采用 SBS、EVA、SBR、PE 等改性沥青或在混合料中加入废旧 PE 的方法提高混合料模量，但要达到低标号高模量沥青混凝土的模量，除废旧 PE 外，都比较昂贵，掺加废旧 PE 的方法所得到的混合料抗车辙性能是最好的，费用比低标号沥青略高。欧洲对高模量沥青混合料试验段的研究表明，路面开裂与沥青标号的相关性并非很好，采用低标号沥青的试验段开裂现象各不相同，但对路面抗车辙问题有显著贡献。

## 1.2 美国高模量沥青混凝土应用情况

美国永久性路面中的高模量混合料与法国的高模量混合料有所不同，美国的高模量混合料是一种泛指概念，目前没有任何具体的设计方法和指标。美国的高模量混合料层下面有一个沥青含量很高的抗疲劳层，其永久性路面概念是高模量混合料和抗疲劳层的结合<sup>[3]</sup>；而法国的高模量混合料同时考虑了高模量和抗疲劳两个要求。美国则将高模量沥青用于长寿命路面结构的中面层，如图 1-1 所示，其提高模量的手段是通过改性沥青的方式。这一点也为我国开展在半刚性基层基础上的长寿命路面研究提供了新思路。美国采用动态压缩模量，也就是美国路面结构验算采用的模量。

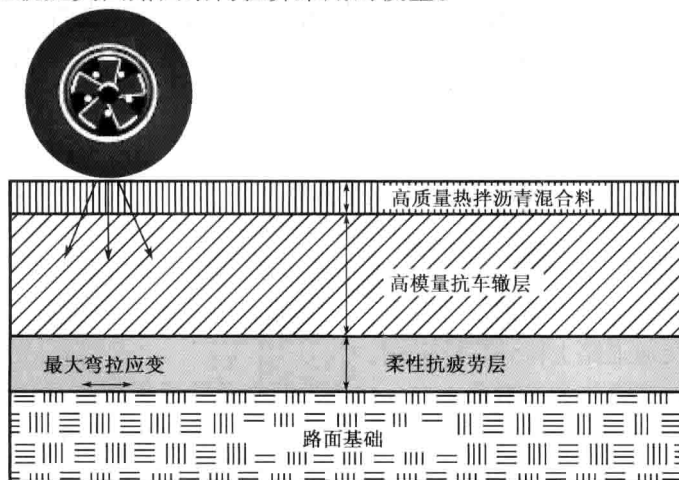


图 1-1 美国长寿命路面结构示意图

### 1.3 高模量沥青混凝土在中国应用情况

国内在高模量沥青混凝土研究方面刚刚起步,没有成熟的经验可以借鉴。部分地区采用低标号沥青(50号)抵抗路面车辙,仅满足国家规范要求,评价方法仍然沿用三大指标,相比较而言,软化点较90号沥青高近 $10^{\circ}\text{C}$ ,但老化后的延度降低迅速,其混合料抗低温能力略差,并不适合温差较大的地区,对低标号沥青的抗低温性能没有明确的指标控制,对相应的混合料设计没有形成成熟的方法。在我国,硬质高模量沥青尚无应用,其制约点在于道路工作者对于应用此项技术的混合料低温性能以及原油品质的特殊性和低标号沥青炼制工艺的复杂性很担心。相关的研究有效解决了混合料高温抗车辙问题,却面临着沥青混合料低温开裂问题,随着沥青炼制工艺的发展,沥青性能检验方法的进步,以及混合料设计方法的进步,硬质高模量沥青混合料低温开裂得到了较好的解决。近期,采用混合料外掺剂的方式在国内较广的地区铺筑了试验路,仅限于抗车辙层面。其中辽宁省交通科学研究院主要从研发高模量沥青混凝土外加剂和低标号沥青两个方面开展了相关研究,在此基础上进一步开展长寿命路面的探索;华南理工大学与科氏公司开展了“沥青路面车辙病害”课题,主要从SBS改性沥青分子量、改性机理方面开展了相关研究;长安大学从沥青混合料外加剂的方面进行试验研究。江苏省交通科学研究院在宁常高速公路上开展了高模量沥青混合料的应用;江苏省交通科学研究院结合阿尔及利亚东西高速公路展开了高模量沥青混合料研究。

国内相关研究表明,路面结构层中,中面层对车辙的贡献率最大。这就为研究提供了很好的切入点,如果采用一种抗车辙性能优良的沥青混凝土做中面层,减少车辙的深度或推迟车辙的出现,从而延长路面的使用寿命,这样可以在设计使用期内尽量减少路面因车辙原因导致的维修,保证道路良好的功能和正常服务质量,节约大量的维修资金,能够为我们带来较高的经济效益、社会效益和环境效益。

在相同荷载条件下,如何选择合适的材料、优化混合料的级配,以适当的工艺铺筑沥青混凝土路面来推迟车辙的出现,并大幅度降低车辙的深度,是摆在科研人员面前的一个难题。国外资料显示,沥青混合料动态模量在 $15^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{Hz}$ 条件下由 $9000\text{MPa}$ 左右提高到 $14000\text{MPa}$ 以上可以较好地解决这一问题。然而国内近期的研究表明,描述高模量混凝土应采用路面使用时的高温模量,既反映路面使用温度,又体现模量提高对路面结构的贡献。提高沥青混凝土模量主要有两种途径:混合料中胶结料采用优质低标号高模量沥青和(或)混合料中掺入合适的沥青混凝土外加剂。硬质高模量沥青研究初期,虽有效地解决了混合料高温抗车辙问题,却面临着沥青混合料低温开裂问题。随着沥青炼制工艺的发展,以及沥青性能检验方法的进步,高模量沥青混合料低温开裂得到了很好的解决。20世纪90年代,法国PRI工业公司开发了采用沥青混合料外加剂提高混合料模量的技术和相应的外掺剂,该产品在法国的用量以25%的速度增长,并在意大利、突尼斯、土耳其、德国等国家的重交通道路上得到广泛应用。

外掺剂形式的高模量沥青混凝土在辽宁的重载交通路段得到广泛应用,截至2012年,累计应用1400车道公里。硬质沥青高模量混凝土由于受炼制工艺的制约,只是在课题研究阶段铺筑1km试验路,通过观测,效果良好。

## 第2章 路面温度场与路面结构层模量

沥青混合料的黏弹特性以及沥青的感温性能决定了沥青路面的使用性能受路面温度场的影响，温度场的变化影响了沥青路面结构层模量，从而改变路面结构的受力状态。了解沥青路面温度场的变化，也可以帮助我们深入分析环境因素对沥青路面的损伤累积。

### 2.1 沥青路面温度场

经过实测路面温度场及路面材料相关热物性材料试验发现，沥青路面温度场与外界环境、内部热物性参数的相关性比较明确，因此通过经典理论分析，应用理论方法可以较为精确地建立半刚性基层沥青路面温度场解析解预估模型。理论模型物理意义明确，且不依赖大量实测数据校核，因此只要将所有影响因素的参数输入即可得到结果，适用性较广泛。为了简化温度场模型，确定解析解的数学表示，对层状体系路面结构温度场作如下假定：

- (1) 各层结构为均匀的各向同性体；
- (2) 不考虑路面结构温度场的横向分布，即假定热流沿垂直于路面方向一维传递；
- (3) 路面各层材料之间结合紧密，层间温度及热流连续；
- (4) 道路结构温度场以天为周期变化。

#### 2.1.1 半刚性基层沥青路面温度场的数学表达式及边界条件

设某层材料的热物性参数分别为：导热系数  $\lambda_i$ ，导温系数  $\alpha_i$ ，层厚为  $h_i$ ，温度函数为  $T_i(z, t)$ 。则  $n$  层体系的热传导方程为<sup>[4]</sup>：

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \quad \left( \sum_{j=0}^{i-1} h_j < z \leq \sum_{j=1}^i h_j \quad (h_0 = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n) \right) \quad (2-1)$$

式中： $z$ ——路表下的竖向深度 (m)；

$t$ ——时间 (h)。

假定层间接触良好，温度函数就满足连续条件，也就是层间接触面上有：

$$\left. \begin{aligned} T_i &= T_{i+1} \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} &= \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \\ z &= \sum_{j=0}^i h_j \end{aligned} \right\} \quad (h_0 = 0, i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2-2)$$

在已知进入路表的热流函数情况下，路表面满足的边界条件应为<sup>[5]</sup>：热流函数等于路

面吸收的辐射热与对流热之和。具体表达式为：

$$\left. \begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} &= B(T_a - T_1) + Q_1 \quad (z = 0, T_a \text{ 为气温}) \\ T_n(z, t) &= C \quad (z = \sum_{i=1}^n h_i) \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

式中： $Q_1$ ——辐射热；

$C$ ——常数；

$B$ ——路表发热系数。

此外，对于周期性边界条件的温度场而言，初始温度只是在温度场形成初期的有限时间内对其产生影响，之后温度场完全由边界条件决定，因此，此处不考虑温度场的初始条件。

### 2.1.2 半刚性基层沥青路面温度场解析解

对于任一结构层，热传导方程为：

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \quad (2-4)$$

$$\sum_{j=0}^{i-1} h_j < z \leq \sum_{j=1}^i h_j \quad (h_0, i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

用分离变量法求解，设温度场在复平面中解的形式为：

$$T_i(z, t) = Z_i(z) e^{j\omega t} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2-5)$$

式中： $j$ ——纯虚数；

$\omega$ ——角频率（rad/h）。

将式（2-5）代入式（2-4）中，得：

$$\frac{d^2 Z_i(z)}{dz^2} = \frac{j\omega}{\alpha_i} = -\beta_i^2 \quad (2-6)$$

得到特征方程的根

$$\beta = \pm \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha_i}}$$

又因

$$\sqrt{j} = \sqrt{\exp(\pi j)} = \exp\left(\frac{\pi j}{4}\right) = \cos \frac{\pi}{4} + j \sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} j$$

则

$$\beta_i = \pm \left( \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} + j \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} \right) \quad (2-7)$$

由式（2-7）可以得到  $Z_i(z)$  的表达式：

$$Z_i(z) = A_i \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} \cdot z + j \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}}\right) + B_i \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} \cdot z - j \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}}\right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

(2-8)



将式(2-8)代入式(2-6)有:

$$T_i(z,t) = A_i \exp\left(\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \left[ \cos\left(\omega t + \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) + j \sin\left(\omega t + \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \right] + B_i \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \left[ \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) + j \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \right] \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

其中,  $A_i$ 、 $B_i$  为待定常数。注意, 我们所研究的温度场的边界条件为实数, 因此仅取上式的实部作为导热方程的解, 即

$$T_i(z,t) = A_i \exp\left(\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \cos\left(\omega t + \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) + B_i \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

根据实际意义, 当深度  $z$  无限增大时, 温度不可能无限增大, 所以舍弃上式右端第一项, 得到各层导热方程基本解:

$$T_i(z,t) = B_i \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \quad \sum_{j=i}^{i-1} h_j \leq z \leq \sum_{j=i}^i h_j \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2-9)$$

此时可以发现  $B_i$  为路面结构层间导温系数, 它与材料导温系数有关。从式(2-9)可以看出, 导热方程的波动幅度随着深度的增加以指数形式衰减, 并且相位延迟量与深度成正比。这与我们以实际采集的数据分析结果相符合, 从而验证了从基本解出发时可以得到相对稳定精确的温度场预估模型。当结构为均质半无限大物体时, 式(2-9)成为<sup>[11]</sup>:

$$T(z,t) = B_i \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} z\right) \quad (0 \leq z \leq \infty) \quad (2-10)$$

因为各层材料的热物性参数 ( $\alpha_i$ 、 $\lambda_i$ 、 $C_{pi}$  等) 不同, 由此引起热流的衰减速率、传播速率不同, 这反映为导热方程中系数 (波幅、相位) 的变化, 故可将式(2-10)改写为:

$$T_i(z,t) = B_i \cdot \exp\left[-\sum_{j=1}^{i-1} \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_j}} h_j - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} \left(z - \sum_{j=1}^{i-1} h_j\right)\right] \cdot \cos\left[\omega t - \sum_{j=1}^{i-1} \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_j}} h_j - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} \left(z - \sum_{j=1}^{i-1} h_j\right)\right] \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2-11)$$

容易证明, 式(2-11)满足导热微分方程式(2-4)。

对于  $n$  层体系的路面结构而言, 式(2-11)还要满足层间条件式(2-2), 将式(2-11)代入则有:

$$B_i \cdot \exp\left[-\sum_{j=1}^{i-1} \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_j}} h_j - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} \left(\sum_{k=1}^i h_k - \sum_{j=1}^{i-1} h_j\right)\right] \cdot \cos\left[\omega t - \sum_{j=1}^{i-1} \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_j}} h_j - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_i}} \left(\sum_{k=1}^i h_k - \sum_{j=1}^{i-1} h_j\right)\right] = B_{i+1} \cdot \exp\left[-\sum_{j=1}^{i-1} \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_j}} h_j - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_{i+1}}} \left(\sum_{k=1}^i h_k - \sum_{j=1}^i h_j\right)\right] \cdot \cos\left[\omega t - \sum_{j=1}^{i-1} \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_j}} h_j - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha_{i+1}}} \left(\sum_{k=1}^i h_k - \sum_{j=1}^i h_j\right)\right]$$