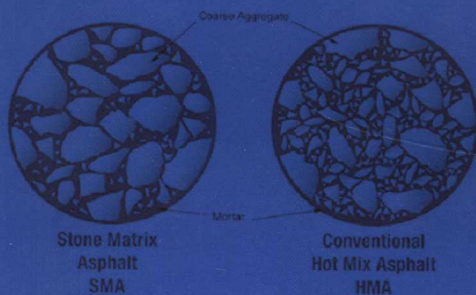


© 刘立新 著

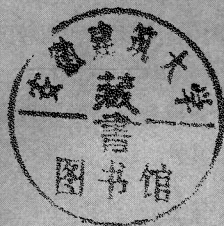
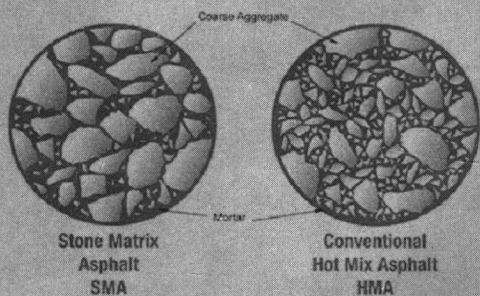
沥青混合料粘弹性力学 及材料学原理



人民交通出版社
China Communications Press

© 刘立新 著

沥青混合料粘弹性力学 及材料学原理



人民交通出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

沥青混合物粘弹性力学及材料学原理/刘立新著.
北京:人民交通出版社,2006.1
ISBN 7-114-05893-4

I. 沥... II. 刘... III. 沥青拌和料-粘弹性介质力学 IV. U414.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 157002 号

书 名: 沥青混合物粘弹性力学及材料学原理

著 者: 刘立新

责任编辑: 师 云

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.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯通印刷厂

开 本: 787 × 980 1/16

印 张: 11.25

字 数: 141 千

版 次: 2006 年 3 月 第 1 版

印 次: 2006 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-114-05893-4

定 价: 28.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

从材料构成来看,沥青混合料是一种多相复合材料。沥青是这种多相复合材料惟一的连续相,其它的材料皆为分散相,所以沥青是这种多相复合材料的基体材料。我们可以把沥青混合料看成是由“沥青胶泥+集料+空隙”构成的一种以沥青胶泥为连续基体的复合材料;而沥青胶泥又是由“沥青+矿粉+纤维”构成的一种复合材料。

从力学科学的角度来看,基体的力学行为构成了复合材料的基础力学行为。沥青是一种典型的粘弹性材料,因此,沥青胶泥与沥青混合料同样属于粘弹性材料,它们都将表现粘弹性力学行为。显然,研究沥青的粘弹性力学(**Viscoelastic Mechanics**)行为是研究沥青混合料宏观力学行为的基础。由于沥青混合料又是由“沥青胶泥+集料+空隙”构成的一种复合材料,我们必须研究这些构成元素之间的相互作用。研究这些组分之间相互作用的力学便是复合材料细观力学(**Composite Micro-mechanics**)。所以,惟有运用粘弹性力学与复合材料细观力学原理,我们方能把握和理解沥青混合料力学行为的本质,别无选择。

在研究清楚沥青混合料粘弹性力学与复合材料细观力学行为后,我们便要面对如何改善沥青混合料的材料参数或性能问题。这不可避免地要涉及组分的构成问题,也就是混合料级配、沥青用量及空隙率的设计问题;也要涉及组分本身的性能改善和控制问题,如集料的性能、矿粉的性能及沥青的性能;还需要研究掺加新组分的问题,如纤维;还要考虑组分间相互作用的问题等。只有这样,我们才能保证所设计的沥青混合料可以满足使用要求。笼统地讲,研究改善材料性能的科学便是材料科学。

这便是本书书名的来源,也是其研究目标。显然,沥青混合料设计跨学科而深奥复杂,靠经验是行不通的。

直到20世纪初,人们才开始注意粘弹性材料的力学行为,并将研究粘弹性材料的力学称为流变学(**Rheology**)。粘弹性材

料力学行为研究真正被人们重视是从第二次世界大战开始的,因为作为战争武器的火焰喷射器中所用的材料被发现是粘弹性的。从那时起,流变学开始了真正的发展,涉及的领域也愈来愈多,如食品、医药、生物及塑料等化工材料^[1,2]。此外,金属与合金材料在高温下也显示出了粘弹性特征,许多部件就是在高温下形成蠕变而破坏的,如蒸汽透平叶片^[3]。

没有粘弹性力学(流变学)为理论基础的沥青混合料研究只能基于经验。1969年 Jongepier 和 Kuilman^[4] 试图将流变学引入沥青混合料研究,首次将沥青胶泥视为粘弹性体。在低温时表现为短暂行为(高弹性模量和脆性),具有弹性体行为;在高温时则表现为长期行为,具有低弹性模量和高高的延展性,类似粘性体。但是,长期以来,人们并没有重视沥青混合料的粘弹性力学行为^[5,6]。20世纪80年代末期美国开展的 SHRP 计划第一次将粘弹性力学(流变学)应用于 Superpave 沥青混合料的试验中^[7],例如,它要求测量沥青的复数剪切模量,而这个参数就来源于粘弹性力学的动态分析。可以这样说,SHRP 计划是沥青混合料研究从经验开始走向科学的标志。

进入21世纪以来,以美国为首的西方国家已加速了沥青混合料设计与研究从经验走向科学的步伐。Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) 主设计体系于1992年完成,至今已有13年,但是其最核心和科学的部分沥青混合料性能的预测模型至今尚未出台。其根本原因便是必须透彻研究和理解沥青混合料的粘弹性力学及复合材料细观力学,否则一切都将从谈起。最近几年的有关研究迹象表明,他们在这两个方面已取得重要进展。例如,为研究集料的排列状况对沥青混合料材料性能的影响,他们已采用X线断层照相术及降低灰度的数字成像技术来获取混合料的微观组织信息,已达到分辨矿粉尺寸的分辨率水平,与现代材料科学技术研究方法已经完全一样^[8-11]。有限元、边界元及离散元数值分析技术也已被用来研究沥青混合料的线性与非线性粘弹性力学行为^[12-19]。不仅研究混合料的设计问题,更将路面层状厚度结构作为一个整体联系起来研究。可以预计,沥青混合料设计水平在不久的将来将得到巨大的提高。

自 1988 年沈大高速和沪嘉高速建成通车以来,我国高速公路建设发展迅猛。1999 年,我国高速公路通车里程突破了 1 万公里;2002 年突破 2 万公里;2004 年达 3.4 万公里;到 2005 年底有望突破 4 万公里,居世界第二位。但是与高速发展同步,我国沥青路面的早期破损问题同样显得非常突出,沥青路面普遍无法达到设计寿命。路面破坏问题的严重性引起了政府、学术界、工程界、企业界及道路使用者等社会各界的广泛关注^[20]。沥青路面的早期破坏有三个主要特点:(1)损坏时间早:有些路面建成后不久甚至在建成当年就出现严重的损坏现象;(2)损坏范围宽:全国各地都不同程度地存在早期损坏现象;(3)损坏程度重:有些损坏已不限于面层,也涉及到了基层,造成必须进行路面重建。沥青路面的主要破坏形式包括:车辙变形、路面裂缝及早期水破坏(松散、坑槽、网裂唧浆等)。

我国的沥青路面研究^[21,22]起步较晚、基础较差,但我国经济发展的现实需要又不允许我们坐等研究完善了再加以实施。所以,和我国的改革开放类似,要边干边学。在这么短的时间内,要把国外的技术都学到手,本身就是很不容易的,更何况工程任务量大,能用于学习和研究的人力和精力都是非常有限的。所以,当今沥青路面存在这样或那样的问题是很正常的,也是必然的,因为我们科学研究跟不上生产需要,也缺乏经验。

作者希望本文阐述的沥青粘弹性力学原理及材料科学原理有助于推动我国沥青混合料研究从经验走向深层次科学研究;更希望它能抛砖引玉,有助于大家启发思想、开阔视野,正确理解“路面使用环境—混合料力学性能—路面损害”之间的基本关系,以解决我们现实面临的路面早期损坏问题。

编者按

从复合材料科学的角度看,沥青混合料是一种多相复合材料。沥青是多相复合材料中惟一的连续相,其它的材料皆为分散相,所以沥青是多相复合材料的基体材料。从力学科学的角度来看,基体的力学行为构成了复合材料的基础力学行为。沥青是一种典型的粘弹性材料,因此,沥青混合料同样属于粘弹性材料。

根据粘弹性力学(也称流变学)的基本原理,本书论述了沥青、沥青胶泥及沥青混合料的基本粘弹性力学行为。模量、粘度、相位角、强度及断裂韧性这几个基本材料学参数决定了沥青及沥青混合料的各种力学行为及使用性能。与弹性体及牛顿液体不同的是,粘弹性体的模量和粘度不是常数,而是时间、温度、应变及剪切速率的函数,由此产生了如“蠕变”、“应力松弛”、“剪切变稀”、“应变变软”、“滞后耗散加热”、“法向迁移”及“挤出胀大”等一系列粘弹性现象。

沥青路面损坏的客观现实与材料科学的基本原理告诉我们,“沥青+纤维”复合材料化是沥青混合料不可避免の必然趋势。根据粘弹性力学与复合材料细观力学原理,作者分析了纤维与沥青混合料的粘度、模量、强度、韧性和相位角之间的基本关系。由于沥青混合料的这些材料参数与纤维加入量成线性正比关系,设计与控制沥青混合料性能以满足不同载荷与气候要求便成为现实可能。

在沥青混合料的粘弹性力学原理一节中,作者分析了沥青混合料的各种材料参数及其影响因素,阐述了悬浮结构和嵌挤结构沥青混合料在材料学原理与力学行为上的差别,并指出没有解决好强度问题的任何嵌挤结构沥青混合料都将是失败的。在粘弹性力学原理的基础上,作者也分析了现有沥青路面早期损害的形成原因与解决方案。

作者分析与研究了 Superpave 沥青混合料设计体系,认为它引入粘弹性动态分析参数复数剪切模量是科学的进步,但它忽视粘弹性材料最基本的材料参数粘度而无法预测永久变形量。其实,复数剪切模量是根据弹性—粘弹性对应原则而出现的一个可以由粘度和模量计算出来的综合粘弹性参数,但它是个变量,而弹性体对应的弹性模量是常数。Superpave 设计体系采用级配控制图是科学的,但可能没有透彻理解粘弹性力学或材料学原理,其级配图正面临着挑战。

在分析 SMA 级配特点的基础上,作者阐述了 SMA 在无意识中运用了粘弹性力学原理,是其获得巨大成功的根本原因。作者介绍了 SMA 在美国的一些应用经验,指出没有必要对 SMA 集料洛杉矶磨耗值过分苛刻要求,而应该从集料形状下功夫,这将有助于降低 SMA 的成本及在没有硬质料源的地区推广 SMA 的应用。

最后,作者提出了对沥青混合料进行粘弹性力学设计的想法并给出了基本设计模型。在低温下,作者采用弹性力学方法设计与检验混合料,用蠕变脆性断裂分析了沥青混合料的低温寿命,并指出了采用应力层来释放路基裂缝应力以减少路面混合料的应力作用时间或彻底释放路基裂缝应力的技术方案。在高温下,作者采用粘弹性变形力学模型建立了路面变形与工作环境及沥青混合料材料参数之间的基本关系,同时也根据蠕变变形提出了路面变形的蠕变力学模型。根据这些模型,路面变形是完全可预测的,我们完全可以通过调整混合料的材料参数设计出满足各种变形使用要求的沥青路面。关于沥青混合料疲劳寿命的设计,作者介绍了目前在沥青混合料研究中普遍采用的耗散能量法。由于耗散能量法不能确立材料参数与疲劳寿命之间关系的内在缺陷,作者介绍了疲劳寿命的力学损伤模型。力学损伤模型表明,沥青混合料的屈服强度和蠕变强度是决定其疲劳寿命的基本材料参数,这为我们提高沥青混合料的疲劳寿命指明了材料研究方向。作者也给出了级配与配合比粘弹性力学设计的基本思想与步骤,并简要提出了沥青路面厚度设计的思路。

作者仅希望本书有助于启发大家的思路,有助于推动沥青混合料的设计与研究从经验走向科学。本书难免有错误或偏颇之处,欢迎广大科技工作者批评指正。

本书可供沥青路面科研设计及管理人员使用,也适合高等院校路桥相关专业师生学习参考。

Abstract

From the view of composite material science, asphalt mixture could be regarded as a multi-phase composite, in which asphalt is the exclusive continuous phase and the matrix while others are dispersed phases. Based upon the principles of mechanics, the mechanical behavior of the matrix constitutes the basic mechanical behavior of the composite material. With asphalt being a viscoelastic material, asphalt mixture is naturally a viscoelastic composite material.

Following the fundamental principles of viscoelastic mechanics (also called as rheology), this book has studied the basic viscoelastic mechanical behavior of asphalt, asphalt mortar and asphalt mixture. All mechanical behaviors and usage properties for viscoelastic materials depend directly on the material parameters including modulus, viscosity, phase shift angle, strength and toughness. Different from elastic solids and Newtonian fluids, the modulus and viscosity for viscoelastic materials are not constants but functions of temperature, strain and shear rate, which bring out a series of viscoelastic phenomena such as creep, stress relaxation, shear diluting, strain softening, heating by hysteresis dissipations, vertical movement and expansion from the outlet.

The facts of the serious premature destruction of current asphalt pavements and the basic principles of materials science have expressed that fiber-reinforced asphalt is an inevitable tendency for asphalt mixture design. On the basis of viscoelastic mechanics and composite micro-mechanics, the author has investigated the basic relationships between reinforced-fibers and the asphalt mixture's material properties including modulus, viscosity, strength, toughness and phase shift angle. On account of these material properties

of asphalt mixtures being proportional to the fiber's content, the author has argued that it is feasible to design and control asphalt mixture to cater for different needs of loads and weather by the application of fibers.

In the section of viscoelastic mechanics of asphalt mixtures, the author has analyzed the various material parameters and their affecting factors, explained the difference in material principles and mechanical behavior between aggregate suspension structure and stone-to-stone contact structure, and pointed out that all asphalt mixtures with stone-to-stone contact structure will fail if not solving their strength problems. By applying viscoelastic mechanics, the causes for premature destruction patterns and their correspondent solutions have been discussed for asphalt pavements.

The Superpave design system has been reviewed and studied in this book. The author has highly thought of the application of the complex modulus in Superpave system being a great scientific progress, but we must keep in minds that the ignorance of viscosity in Superpave system will fail to predict the permanent deformation of asphalt mixtures. In fact, the complex modulus is just a comprehensive material parameter calculated from viscosity, modulus and shear frequency following the correspondence principles between elastic and viscoelastic materials. The complex modulus for viscoelastic materials is a variant while the modulus for elastic materials is a constant. The gradation control diagram proposed by Superpave is reasonable but is facing serious challenges at present due to lack of understanding of viscoelastic mechanics and materials science.

By studying the characteristics of SMA gradations, the author has given an insight into SMA's success which may be attributed to the unconscious application of viscoelastic mechanics. The SMA's application experience in USA has also been introduced in this part, one of which is that it is unnecessary to make too strict re-

quirements on aggregate's LA abrasion values but one should pay great attention to aggregate's shape. This may be meaningful for decreasing SMA's cost and promoting SMA's application especially in the areas without hard aggregate sources.

Finally, the author has proposed theoretical models for design of asphalt mixtures by applying viscoelastic mechanics. Under low temperatures, the author adopted elastic mechanics to design and test asphalt mixtures, predicted low-temperature life by creep and brittle crack analysis, and provided solutions for releasing or retarding the stress caused by cracks formed at road base. At high temperatures, the fundamental relationship among permanent deformation, working environment and material parameters is established by viscoelastic deformation mechanics. Meanwhile a model from the standpoint of creep deformation has also been proposed to predict the permanent deformation for asphalt pavements. Following these models, one should be able to calculate and predict the permanent deformation and to control asphalt mixture properties for different usage requirements. Regarding the design of fatigue life, the author has introduced the dissipated energy method prevailed in current asphalt studies and explained its disadvantages in failing to establish the relationship between the fatigue life and material properties. A model following continuum damage mechanics has been presented, which has explained that the tensile strength and creep strength are the material parameters to determine fatigue life of asphalt mixtures. This may direct our material research of asphalt mixture in the future. Furthermore, the design procedure for asphalt mixtures according to viscoelastic mechanics and a design idea for pavement thickness have been shown in this section.

The author hopes this book will be an aid to study asphalt mixtures with the help of viscoelastic mechanics and composite micro-mechanics and be helpful for readers to have a better understanding of the principles governing asphalt mixture's mechanical behavior

and usage properties.

This book is supposed to be suitable for study and reference by university teachers and students in civil engineering area, researchers, engineers and administrators related with highways and asphalt pavements.

致 谢

衷心感谢交通部公路科学研究所牛开民研究员、广东省高速公路有限公司舒翔教授级高工、广东省交通科学研究所梁锡三教授、华南理工大学交通学院张肖宁教授、河北省公路局总工程师王国清教授、河北省交通勘察设计院试验室王庆凯副主任、山东省公路局杨永顺副局长、山东省交通科学研究所王林主任、四川省交通厅副总工程师延西利博士、美国 TRB、SHRP、FHWA、ASSHTO 及 NCAT 会(委)员——乔治亚州交通部前总工程师 Ronald Collins 先生、美国福倍安公司(Fiberand Corporation) 总裁 Albert Elias 先生、台湾营建署材料试验室前主任胡文虎教授等。你们都是笔者的沥青路面科学启蒙老师,正是你们的耐心赐教及交流讨论,激发了笔者求知的欲望。

哈尔滨工业大学材料学院安阁英教授及加拿大麦克玛斯特大学(McMaster University)材料科学与工程系 J. S. Kirkaldy 教授曾对笔者悉心指导;哈尔滨工业大学材料学院雷廷权院士也曾抱病审阅本文;原哈尔滨工业大学校长杨士勤教授对笔者始终如一地支持与鼓励。笔者在此诚致敬意与感激。

同事们与我并肩努力,各界朋友予我信任与信心,一并谨表诚挚的感谢。

谢谢我的太太与女儿,你们的爱与付出,支持与鼓励,是本书写作的源动力。

最后,感谢人民交通出版社出版发行本书。

目 录

CONTENTS

第一章 沥青混合料的技术发展史	1
1.1 沥青混合料的诞生	1
1.2 Hubbard-Field 设计法	3
1.3 维姆(Hveem)设计法	3
1.4 马歇尔(Marshall)设计法	5
1.5 Superpave 设计法	9
1.5.1 Superpave 沥青结合料的评级体系	10
1.5.2 Superpave 沥青混合料的体积设计	13
1.6 典型及特殊级配混合料.....	15
1.6.1 SMA 沥青混合料	16
1.6.2 OGFC 沥青混合料	18
第二章 沥青的粘弹性力学与材料学原理	21
2.1 沥青的材料性质.....	21
2.2 低温沥青的准弹性力学行为与材料学原理.....	22
2.2.1 虎克定律.....	22
2.2.2 “弹性模量”与“韧性”矛盾的 材料科学原理.....	22
2.3 沥青非牛顿体的粘弹性力学(流变学)原理	23
2.3.1 粘度的物理概念.....	23
2.3.2 粘度与温度和压力的关系.....	24
2.3.3 粘度与剪切应变速率的关系 ——“剪切变稀”与高低牛顿区	25
2.3.4 剪切法向应力,“沥青爬杆迁移” 与“挤出胀大”效应	27
2.4 沥青粘弹性静态力学行为.....	28
2.4.1 拉伸应力—应变曲线:屈服行为 与应变软化.....	29

2.4.2	描述粘弹性变形的基本力学模型	30
2.4.3	蠕变与蠕变疲劳	32
2.5	沥青粘弹性动态力学分析	35
2.6	弹性与粘弹性材料的力学与材料学行为比较	39
2.6.1	弹性与粘弹性材料相似的材料学行为	39
2.6.2	弹性与粘弹性材料的力学行为区别	39
2.7	小结	40
第三章 “沥青 + 纤维”粘弹性力学与复合材料		
	细观力学原理	43
3.1	沥青为什么需要纤维?	43
3.1.1	“合金化”方法的材料学基本原理	43
3.1.2	沥青改性受到的限制	44
3.1.3	“沥青 + 纤维”复合材料化的必然性	44
3.2	“沥青 + 纤维”的粘弹性力学与 复合材料细观力学原理	45
3.2.1	增大粘度——爱因斯坦粘度理论	45
3.2.2	增大模量	48
3.2.3	增强作用	49
3.2.4	增韧作用——复合材料科学原理	50
3.2.5	提高疲劳耐久性	52
3.3	“沥青 + 纤维”与改性沥青的比较	53
3.3.1	增粘作用的比较	53
3.3.2	增弹作用的比较	54
3.3.3	增强增韧作用的比较	55
3.3.4	提高疲劳寿命作用的比较	56
3.4	小结	56
第四章 沥青胶泥的粘弹性力学与细观力学原理		
4.1	沥青胶泥的强度与韧性	58
4.2	沥青胶泥的粘度	60
4.3	沥青胶泥的模量	61
4.3.1	尼尔森(Nelson)流变学模型	62
4.3.2	哈辛(Hashin)弹性细观力学模型	64
4.4	沥青胶泥的相位角	64

4.5	基本结论	65
第五章	沥青混合料的粘弹性力学行为与路面损害	67
5.1	沥青混合料组织结构与力学行为之间的基本关系	68
5.1.1	悬浮结构与嵌挤结构的力学 与材料学原理差异	68
5.1.2	集料嵌挤结构与物质原子结构的比较	70
5.1.3	嵌挤结构集料级配的特点	71
5.2	沥青混合料的材料参数	71
5.2.1	沥青混合料的粘度与相位角	71
5.2.2	沥青混合料的模量(劲度)	72
5.2.3	沥青混合料的强度	75
5.2.4	沥青混合料的低温韧性	76
5.3	沥青混合料的两个微观力学行为	77
5.4	路面损害的形成原因与对策	78
5.4.1	路面变形	78
5.4.2	路面裂纹	79
5.4.3	路面早期水损害	81
5.5	小结	84
第六章	Superpave 限制区及粗型级配讨论	87
6.1	Superpave 级配控制图与限制区	87
6.2	Superpave 级配限制区面临的挑战	88
6.3	Superpave 级配限制区面临挑战的原因与解决方案	94
6.3.1	限制区面临挑战的原因	94
6.3.2	Superpave 粗型级配 BRI 的技术解决方案	95
第七章	SMA 混合料成功的秘诀	97
7.1	美国学习并发展了 SMA	97
7.2	SMA 在我国的应用	100
7.3	SMA 级配特点与粘弹性力学原理	105
7.3.1	SMA 级配的特点	105
7.3.2	SMA 级配的材料学与粘弹性力学原理	106
7.4	SMA 的成功 ——无意识但绝妙地运用了粘弹性力学原理	107
7.5	SMA 对集料料源要求果真那么高吗?	108