

沥青与沥青混合料的 粘弹力学 原理及应用

LIQING YU LIQING HUNHELIAO DE
NIANTAN LIXUE YUANLI JI YINGYONG

张肖宁 [著]



人民交通出版社
China Communications Press

Liqing Yu Liqing Hunheliao de
Niantan Lixue Yuanli ji Yingyong

**沥青与沥青混合料的
粘弹力学原理及应用**

张肖宁 著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要介绍实验粘弹力学的基本原理及其应用,以一维数学模型描述沥青及沥青混合料的粘弹力学行为。全书共分十章,分别阐述了液体的粘性流动变形、线粘弹性的一般理论、粘弹性材料的动态力学响应、时间温度的等效效应以及沥青与沥青混合物粘流态力学行为的试验研究与应用等内容。

本书适用于从事实验粘弹力学及沥青与沥青混合物研究的科研人员,也可作为高等院校相关专业师生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用 / 张肖宁著.
北京:人民交通出版社,2006.1
ISBN 7-114-05924-8

I. 沥… II. 张… III. ①沥青-粘弹性理论-研究
②沥青拌和料-粘弹性理论-研究 IV. U414.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第004900号

书 名: 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用
著 者: 张肖宁
责任编辑: 夏 迎
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) 85285656, 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: 北京宝莲鸿图科技有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 15.75
字 数: 371 千
版 次: 2006年4月 第1版
印 次: 2006年4月 第1次印刷
书 号: ISBN7-114-05924-8
印 数: 0001~4000册
定 价: 35.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序言

PREFACE

自 20 世纪 80 年代中期我国进入高速公路时代以来,沥青路面技术发展迅速,满足了高速公路和数量巨大的公路与城市道路建设的需求。目前,我国正以前所未有的规模开展沥青路面相关技术的研究。但与发达国家相比,我国的沥青路面技术研究水平仍显落后。一方面,沥青路面技术具有经验性、实验性和实践性,沥青路面的技术研究必须适应工业化生产水平,依赖现有的技术积累与经验;另一方面,沥青路面技术是一个完整的研究领域,是众多相关学科技术发展的继承与综合,促进沥青路面技术进步,必须更好地依赖科学技术总体水平的提高,依赖应用基础理论研究的成果,改变沥青路面建设中过多依赖经验的现状。

随着沥青路面建设规模的不断发展,道路沥青及沥青混合料成为最重要的路面工程材料,依赖适宜的理论科学与科学的方法来不断提高沥青及沥青混合料的路用性能研究水平,对于促进我国道路建设事业的发展,缩小与发达国家的技术差距,具有不可估量的作用。数十年来的研究成果表明,实验粘弹性力学是研究沥青及沥青混合料力学性能与路用性能最恰当的方法与手段。

1981 年,作者在攻读硕士学位期间,曾翻译出版了介绍日本北海道大学菅原照雄教授关于沥青混合料粘弹性力学行为研究成果的《沥青混合料力学性能研究论文集》。其后,在师从菅原照雄教授从事沥青混合料研究的同时,作者曾经编著了一本以沥青和沥青混合料作为主要研究对象的《实验粘弹原理》(哈尔滨船舶工程学院出版社出版,1991 年)。这些工作曾经促进了我国沥青及沥青混合料研究水平的提高,但我国道路工程研究领域开始真正关注应用粘弹性力学方法研究沥青及沥青混合料路用性能的发端,应该说是对于美国 SHRP 研究成果的借鉴。

美国的公路战略研究计划 (Strategic Highway Research Program, 简称 SHRP) 在沥青及沥青混合料的研究工作中,不仅始终坚持采用粘弹性力学的方法与手段研究沥青及沥青混合料的路用性能,并最终将其转化为工程技术标准中的指标体系。自我国“八五”国家重点科技项目(攻关)“沥青及沥青混合料路用

性能研究”开始,我国的沥青路面材料研究人员也开始从工程角度出发,利用粘弹性力学的方法与手段研究沥青及沥青混合料的路用性能。近十年来,这类研究取得了较大进展,但仍未能够成为制订我国相关工程技术标准的主要依据。

正是面对这样的差距,本书力图描述实验粘弹技术与沥青及沥青混合料的路用性能的相互关系,介绍这类研究涉及的基础理论和基本方法。不同于《实验粘弹原理》一书,本书更加注重选择适宜的研究实例,在使用这些实例说明粘弹性力学方法与手段的同时,重点介绍实验粘弹力学在道路工程研究领域应用的重要成果。

本书主要介绍实验粘弹力学的基本原理,为了能使读者更好地理解这些内容,也以适当篇幅介绍了高聚物粘弹变形机理的基本内容。由于沥青及沥青混合料粘弹性力学行为的材料结构组成机理与高聚物不同,这些内容说到底仅仅是为了更加方便地叙述问题而引入的,希望读者在阅读本书时能够注意这一点。

另一方面,本书旨在介绍实验粘弹力学的基本原理及其应用,为使更多的读者容易地理解本书的主要内容,本书主要以一维数学模型描述沥青及沥青混合料的粘弹性力学行为。为了节约篇幅,有时对于一些并不重要的数学推演过程进行了简化。在第九章和第十章涉及的损伤力学与断裂力学内容,本书只做了必要的基本知识介绍。需要了解与此相关的更加全面的内容与方法的读者,可以自行参阅相关著作。

沥青及沥青混合料在施工温度范围内主要表现为粘性流动,这一粘性流动一般具有非牛顿流动特性。严格地说,非牛顿流体的流动变形并不属于粘弹性力学的研究范围。考虑到这一部分内容在路面工程研究中具有重要意义,在第二章中我们仍然详细地介绍了粘度测定原理和试验数据处理方法。这些内容可能会有助于读者更好地理解粘弹性变形中的非线性问题。

在有关粘弹性力学的著作中,一般仅叙述延迟弹性变形的基本规律,很少涉及到粘弹性材料的破坏现象。事实上,粘弹性材料的破坏与强度问题不仅在实际工程中具有非常重要的意义,而且由于粘弹性材料破坏过程中能量的损耗与其它材料相比表现得更加复杂,使得破坏成为一个依赖于温度与加荷速率的复杂现象。在第九章中我们介绍了沥青及沥青混合料破坏现象的一般原理与试验研究方法,在第十章中则比较详细地介绍了沥青混合料疲劳破坏的机理、影响因素、试验原理和试验数据的处理方法。相信这部分内容对读者更好地理解粘弹性材料力学行为的多样性会有一定的帮助。

本书涉及的实验粘弹力学研究实例主要是对于沥青或者沥青混合料的研究结果。这不仅是由于作者本人主要从事道路沥青材料的粘弹性力学研究工作,掌握一部分沥青与沥青混合料的研究成果,更重要的是,沥青及沥青混合料与其它工程材料相比具有非常显著的粘弹特性,而且将沥青混合料用于道路工程时,材料承受的荷载多种多样,遭遇的温度变化幅度也相当之大,这使

得沥青与沥青混合料的力学行为研究几乎包括了实验粘弹力学的全部内容。

由于近十年来 SHRP 及其后续课题的研究成果促进了应用粘弹性力学手段研究沥青及沥青混合料路用性能的技术发展,本书列举了相当数量的研究实例。这些实例包括作者本人近 20 年的研究成果,也包括国内外一些典型研究实例。选择这些研究实例主要用来说明实验粘弹力学研究的基本方法与手段,而不在于系统地描述沥青及沥青混合料的路用性能,希望读者在阅读本书时注意作者的编写意图。

在本书编写过程中,周进川研究员、谭忆秋教授曾经对于全书结构和主要技术观点给予作者重要的建议和意见,邹桂莲博士、徐伟博士、虞将苗博士、袁燕博士和在读博士研究生张丽娟、迟凤霞、孟拥军、詹小丽等帮助作者仔细校对了书中的公式、符号与图表,在此一并致谢。

人民交通出版社和郭思涛主任始终关心本书的编著和出版工作,给予作者许多帮助,特别表示感谢。

希望本书有益于读者,有益于我国的道路建设事业。

张肖宁

2005 年 9 月 2 日



CONTENTS

第一章 概述	1
第一节 沥青及沥青混合料.....	1
第二节 沥青及沥青混合料的路用性能.....	4
第三节 粘弹力学的基本原理.....	6
第二章 液体的粘性流动变形	10
第一节 液体的非牛顿流动特性	10
第二节 粘性流动对于温度、时间的依赖性.....	15
第三节 流动曲线的试验测定原理	21
第三章 线粘弹性的一般理论	31
第一节 输入与响应的基本分类	31
第二节 以模型描述的粘弹性本构方程	35
第三节 微分方程形式的本构方程	42
第四节 积分型本构方程和线性叠加原理	46
第四章 粘弹性材料的动态力学响应	51
第一节 振动荷载输入与响应	51
第二节 粘弹性特征函数的理论换算关系	57
第三节 粘弹性材料振动特性的测定方法	61
第五章 时间温度的等效效应	71
第一节 温度效应与时间效应的等效原理	71
第二节 关于移位因子的 WLF 公式.....	76
第三节 其他形式的时间—温度换算	80
第四节 一些特殊的时间温度换算的应用实例	82
第六章 沥青及沥青混合料粘流态力学行为的试验研究与应用	87
第一节 测定沥青粘度的常用方法	87
第二节 沥青的非牛顿流动特性的试验测试	97
第三节 沥青的粘温关系曲线.....	104

第四节	关于零剪切粘度	117
第七章	沥青混合料粘弹态力学行为的试验研究与工程应用	127
第一节	静态粘弹模型的参数拟合	127
第二节	粘弹特征函数的相互换算	132
第三节	动态粘弹力学试验方法及应用	139
第四节	动态剪切流变仪(DSR)	143
第八章	改性沥青的粘弹性力学行为	147
第一节	SBS 改性沥青的粘弹特性	147
第二节	重复蠕变回复试验	149
第三节	改性沥青的低温特性与工艺性能	158
第四节	改性剂对于改性沥青性能的影响	163
第九章	沥青混合料的强度与破坏	173
第一节	沥青混合料破坏的形态	173
第二节	沥青混合料不同破坏形态的机理解说	178
第三节	沥青混合料的损伤与蠕变衰坏	180
第四节	沥青混合料的低温断裂与路面低温开裂	186
第十章	重复荷载作用下的疲劳破坏	197
第一节	疲劳破坏	197
第二节	疲劳断裂	202
第三节	疲劳损伤	208
第四节	疲劳特性的统计性质与概率过程	217
第五节	沥青混合料疲劳特性的试验研究	221
参考文献		239

第一章

概 述

第一节 沥青及沥青混合料

一、道路石油沥青

沥青材料品种繁多,可以按照沥青材料的来源、炼制加工方法、工业用途、存在形态等分为许多种类。

按沥青的来源可将其分类为由石油炼制得到的石油沥青;以特立尼达湖沥青为代表的天然沥青;煤、木材、页岩等有机物质经碳化作用或在真空中分馏得到焦油沥青。按石油炼制方法分类,主要有直馏沥青、氧化沥青、溶剂沥青、调和沥青等。石油沥青可按原油蜡含量的多少,分类为石蜡基、中间基和环烷基。沥青的形态可以分类为粘稠沥青,液体沥青,乳化沥青。按沥青的用途分类,有用于铺筑路面的道路沥青;用于防水、防潮,也用于制造防水材料如油毛毡、沥青油膏的建筑沥青;大型水工结构物作为面板或芯墙防水防渗材料的水工沥青等。水工结构物要求极高的安全度,对沥青的性能要求也高于其他应用领域。

道路石油沥青是使用量最大,最具有典型性的沥青材料,本书主要以道路石油沥青及其改性产品作为主要研究对象。

道路石油沥青是由多种化合物组成的混合物,成分极其复杂。沥青的化学元素分析证明,沥青为碳氢化合物,主要由碳(C)、氢(H)两种化学元素所组成。沥青中也含有少量的硫(S)、氮(N)、氧(O)以及一些金属元素如钠、镍、镁和钙等,它们以无机盐或氧化物的形式存在,约占5%。

目前多使用四组分法将沥青分为沥青质、饱和分、芳香分和胶质四种组分。在沥青中,沥青质是分散相,油分是分散介质,沥青质与油分不能亲和。胶质与沥青质和油分均有亲和性,胶质包裹沥青质形成胶团,分散在油分中成为稳定的胶体。在胶团结构中,从核心到油分均匀而逐步递变,无明显的分界层。沥青各个组分的数量及胶体芳香化程度决定了沥青的胶体结构类型。当油分和胶质足够多时,沥青质形成的胶团全部分散,胶团能在分散介质的粘度许可范围内自由运动,这种沥青称为溶胶型沥青。当油分与树脂很少时,胶团浓度相对增加,相互之间靠拢较近,胶团会形成不规则的骨架结构,胶团移动比较困难,这种沥青称为凝胶型沥青。介于这二者之间的沥青就称为溶凝胶型沥青。

沥青的胶体结构决定了沥青的物理力学性能与应用特点。

近年来,经过科学研究及工程实践,SBS改性剂因其与沥青胶结料具有较好的相容性,生

产方法相对简单,能够全面地改善沥青路用性能,因而得到广泛应用。与其他改性沥青比较,SBS/SIS 约占世界市场总量的 44%,SB 约为 10%,EVA 约为 11%,废旧轮胎胶粉约为 9%,EPDM 约为 12%,PE 约为 3%,Betaplast 约为 7%,其他 4%,由此可见,SBS 改性剂占据了道路沥青改性剂的半数左右^[1]。

二、沥青混合料

沥青混合料由作为胶结料的道路石油沥青和砂、碎石、矿粉等矿质原料,按照一定比例(必要时也包括纤维等其他填料)共同组成,在沥青胶结料具有适宜粘度时,将沥青混合料充分拌和后摊铺、碾压成型,成为满足使用要求的沥青路面。沥青混合料种类繁多,大致可以分类如下:

按混合料拌和与摊铺温度分类。热拌热铺沥青混合料是将沥青和矿质集料加热至沥青获得较好流动性能的温度后拌制而成的路面材料,需要在较高温度下摊铺、压实成型。由于在高温条件下采用专用设备拌和,沥青与矿质集料形成良好的粘结,热拌热铺沥青混合料具有优良的路用性能,是目前沥青路面普遍使用的主要混合料类型。这类混合料在英语中称为 Hot Mixture Asphalt(HMA)。冷拌冷铺沥青混合料是采用乳化沥青、稀释沥青、或其他低粘度沥青胶结料,在常温下与矿质集料拌和得到的混合料,仅在常温下摊铺、碾压成型。热拌冷铺沥青混合料使用粘度较低的沥青与集料在热态下拌和成混合料,储存于常温条件下,使用时在常温下直接摊铺压实,一般用作沥青路面的养护材料。

按集料的最大粒径分类。可以将沥青混合料分成粗细不同类型,如粗粒式沥青混合料、中粒式沥青混合料、细粒式沥青混合料等。通常,粗粒式混合料用于沥青面层的中层或下层,中粒式混合料用于中层或上层,细粒式混合料用于上层。

按压实后混合料的密实分类。将集料颗粒成连续级配,与沥青拌和经摊铺压实后其剩余空隙率小于 10%的,称为密实式沥青混合料。其中剩余空隙率为 3%~6%的称为 I 型密实式沥青混合料,剩余空隙率为 4%~10%的称为 II 型密实式沥青混合料。压实后剩余空隙率为 10%~15%的混合料称为半开级配沥青混合料。剩余空隙率大于 15%时称之为开级配沥青混合料,由于空隙率大,常又称为多孔性沥青混合料。无论密实式还是开式沥青混合料,又都有粗粒式、中粒式和细粒式之分。

近年来,为了提高沥青路面表面功能,沥青玛蹄脂碎石(SMA)和排水性沥青混合料(OGFC)等也有较多应用。SMA 由高含量的粗集料形成骨架,用沥青、矿粉、纤维组成的玛蹄脂和少量细集料填充空隙形成密实结构,以提高沥青混合料的路用性能。OGFC 的空隙率通常大于 20%,用于加快路面排水能力,提高路面抗滑性能,降低行驶噪声。

沥青混合料中的矿质混合料是由粒径大小不等但按照一定比例组合的粗细集料组成,称为矿质混合料级配。不同级配的沥青混合料具有不同的物理力学性能,因而用途不同。级配主要分为连续级配和间断级配两类。连续级配中集料按粒径大小分级,由大至小逐级按一定的比例组合而成;间断级配则是将连续级配中某一级或几级去除,形成一种不连续的级配。

沥青混合料的强度由矿质集料颗粒之间的嵌挤力(内摩阻力)和沥青与集料之间的粘结力以及沥青的内聚力构成。根据级配类型差异和沥青混合料强度形成原理,沥青混合料可以划分成图 1-1 所示的悬浮密实型级配、骨架密实型级配和骨架空隙型级配三种。

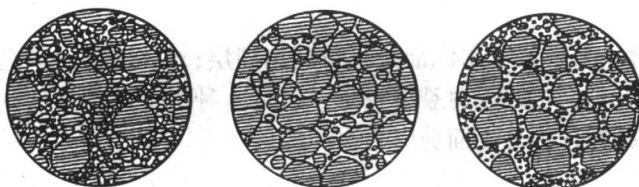


图 1-1 三种典型级配分类概念

三、沥青路面的常见病害

沥青混合料在制造、铺筑及压实之后,必须考虑它的路用性能。影响路用性能的因素包括车辆荷载、温度环境与降水、沥青材料的老化等。随着社会的发展,现代交通对于路面的质量要求日益提高,交通荷载也发生显著的变化。

1. 永久变形

沥青路面的永久变形主要指车辙变形和纵向推移引起的平整度劣化。永久变形主要发生在高温季节,与车辆轴载、行驶状态等因素有关。目前的沥青混合料设计方法主要根据高温抵抗永久变形的能力确定矿质混合料级配和沥青用量。

2. 低温开裂

在降温过程中道路结构约束了面层沥青混合料的温度收缩,导致沥青面层产生温度应力超过材料强度而开裂。低温开裂主要表现为垂直于道路中线的横向裂缝,裂缝处的承载力下降导致路面碎裂。低温开裂和极限温度与极限降温速度有关,也可能来源于重复的升降温过程。

3. 疲劳开裂

当沥青路面承受重复的车轮荷载时,沥青层底部产生拉应力和拉应变。如果路面结构强度储备不足,或者水的浸入改变了基层支撑状态,可能导致沥青层产生裂缝并发展为(鳄鱼皮状)碎裂。疲劳特性的预测及评估是目前沥青路面设计的主要依据。

4. 老化

沥青是一种高分子材料,沥青路面裸露在自然环境中必然发生老化。沥青的老化包括拌和摊铺过程中高温引起的老化,称之为短期老化;也可能包括长期使用过程中的热老化、光老化和氧老化,称之为长期老化。老化导致沥青混合料变得脆硬,损伤其抵抗疲劳和低温开裂的能力。

5. 松散磨损

沥青胶浆从间隙逸失导致道路表面出现磨损,严重时会发生松散。沥青混合料中沥青含量和压实程度是影响磨损与松散的主要原因。集料的逸失可能来源于沥青老化,集料表面沥青浆的粘结力丧失或者沥青膜脆裂。

6. 泛油

交通荷载作用使得沥青混合料内的集料不断嵌紧而空隙减少,最终将沥青胶浆挤压到路表发生泛油。泛油导致沥青路面滑溜而影响交通安全。除沥青含量偏高或空隙率偏小等原因外,沥青过软也是主要原因之一。

7. 反射裂缝

传统的反射裂缝主要发生于水泥混凝土路面加铺层,对于我国普遍使用的半刚性基层沥青路面结构,基层开裂也会引起反射裂缝发生。最近一种由上向下发展(top-down)的裂缝已被引起注意,这类裂缝被认为是表面剪应力引起的。

第二节 沥青及沥青混合料的路用性能

一、沥青及沥青混合料路用性能的基本特点

沥青路面与其他工程结构物一样,在不同类型的外荷载作用下必然发生变形。对于正常使用的路面结构来说,我们希望材料在外力作用下不产生过大的变形,并且希望取消外力后变形能够回复,材料的这种力学行为称之为刚性或弹性。同时,任何工程结构的构件都必须具有一定的几何形状,我们也希望材料在加工过程中具有一定的可塑性,也就是说材料应该具有流动成形的能力。材料的这种流动性能称之为塑性或粘性。

水泥混凝土类建筑材料是通过水泥的水化学反应获得强度。沥青路面使用的沥青及沥青混合料与其不同,其力学行为的变化与差异完全依赖于工艺温度与环境温度。

在足够的高温条件下,沥青像通常的液体一样具有流动变形能力,因此能够与碎石、砂、矿粉等均匀地混合并裹覆在集料颗粒表面。混合得到的沥青混合料仍然具有足够的流动变形能力,经过摊铺碾压之后获得规范的几何形状。能够保证沥青及沥青混合料施工性能的特性称之为工艺特性或者施工和易性。保证施工和易性的温度范围称为施工温度,对于多数沥青路面材料来说,施工温度可能在 100°C 以上。

在通常的自然环境和气候温度条件下,沥青混合料流动变形的能力逐渐由弹性变形替代,因而能够承受车轮荷载作用。在极端的低温条件下,沥青混合料的模量可以高达 30000MPa (-30°C , 10Hz),同水泥混凝土的弹性模量接近。此时沥青混合料完全丧失流动变形的能力,可能引起温度应力累积导致的低温开裂。为了防止低温开裂发生与发展,我们需要研究沥青及沥青混合料的低温抗裂性问题。

在大约接近 60°C 的温度条件下,沥青及沥青混合料仍然具有比较显著的流动变形能力。此时,在车轮荷载作用下产生的变形可能不会完全回复,因此将导致车辙变形或者剪切引起的推移拥包。因此,在这样的温度条件下,沥青及沥青混合料必须具有足够的变形抵抗能力,这样的能力通常称为沥青混合料的高温稳定性问题。

沥青路面在多数情况下工作于高温和低温之间的温度区域。此时沥青路面既具有一定的刚度,也具有一定的柔度,沥青路面在大量的重复荷载作用下容易产生疲劳破坏。相对于高温条件和极端低温条件,我们把沥青及沥青混合料易于发生疲劳破坏的温度区域称为中温区,并特别关注中温区内沥青及沥青混合料的疲劳性能。

沥青及沥青混合料的疲劳性能、高温稳定性和低温抗裂性是影响路用性能最主要的三个力学特性,自1972年在密歇根大学召开的第一届沥青路面结构国际会议将其确定为沥青路面三个重要技术研究目标以来,得到了全世界道路技术员的广泛注意,并为此付出了巨大的努力。

二、沥青及沥青混合料的性能规范

沥青及沥青混合料是铺筑沥青路面最重要的工程材料。控制沥青及沥青混合料的路用性能与施工质量,减少第一节中述及的路面损坏现象,是一个提高工业化水平的问题^[2],必须建立适应工业化水平的技术标准或者技术规范,来指导、控制、管理沥青及沥青混合料的技术性能,使其满足沥青路面建设的技术要求。

制定技术规范首先要适应工业化进程,同时也要具有可靠的科学技术依据。和其他工业领域一样,道路工程的规范标准正由经验型向理论性转变。例如,NCHRP Synthesis 212 (Chamberlin 1996)将关于道路工程有关的技术标准与技术规范划分为三个等级,并明确了各个等级的定义,给出了相应的介绍与说明。

性能规范(performance specification) 描述如何在规定时间内完成一个路面工程任务。这些规范的基础应该是路面性能项目(LTPP)长期的研究成果,结合一系列新的试验方法,保证路面在长期使用过程中满足道路的使用性能要求。这些新的试验结果应该与路面的性能直接相关,而不仅仅是沥青混合料的力学性质。

基于性能的规范(performance-based specifications) 描述基于工程性质的期望水平。这些基本的工程性质如回弹模量、疲劳特性等可以作为性能预测模型的变量预测路面的性能。基于性能的规范试图聚焦于以性能特性来改善现有的质量水平。然而,材料和施工过程质量特征的检测并不能及时为承包商提供相关信息,目前可能无法对施工过程进行调整。

与性能相关的规范(performance-related specification——PRS) 描述材料和施工诸因素的理想水平。已经发现这些因素与一些工程特性相关,并可以用来预测路面性能。同时这些因素可以在施工的过程中予以检测。与性能相关的规范试图通过确认施工项目的质量水平来实现成本和性能间的最佳平衡。与性能相关的规范常用的材料质量特征包括空隙率和沥青含量等。

NCHRP Synthesis 212 的报告是针对整个道路建设技术领域的,因此,这份报告认为推行性能规范为时尚早。但是,作为沥青和沥青混合料技术标准的研究,目前已经取得了一些重要的进展。

到20世纪末,道路石油沥青的产品分级标准主要有二类,即针入度分级和粘度分级。以沥青针入度分级的沥青标准源于1918年美国公路局确定的针入度分级,即按照25℃针入度划分沥青牌号并辅以其他技术指标来控制沥青的质量。1960年代提出粘度分级体系以适应使用量逐渐增加的氧化沥青。粘度分级是按真空毛细管测得的60℃粘度划分沥青的牌号并辅以其他技术指标来控制沥青的质量。我国的道路石油沥青技术标准一直采用针入度分级。针入度分级标准是典型的经验型标准,粘度分级标准虽然较针入度分级标准有所进步,但仍然具有经验性。

美国的公路战略研究计划(Strategic Highway Research Program,简称SHRP)提出了按照沥青路用性能分级(Performance Graded,简记为PG)的道路沥青技术标准。SHRP PG分级依赖于沥青的粘弹性进行分级,分别提出了施工温度范围、高温、中等温度和低温条件下与路面使用环境相关的流变特性指标。PG分级直接依据路面工作环境、交通荷载和设计温度评价沥青性能,并且充分考虑了沥青使用过程中热老化对于分级的影响。

经过 10 年努力,SHRP PG 性能分级作为一项新技术,已经在美国得到普遍的推广应用。尽管其后发现 SHRP PG 分级对于改性沥青的评价存在一些关键性的技术缺陷,美国联邦公路局组织有关技术专家继续采用粘弹力学方法研究 PG 分级的改进。通过美国国家协作研究项目 NCHRP9-10 课题研究,已经使得该成果对于改性沥青的适用性得到增强。尽管 PG 性能分级要求的技术指标大部分是过去经验型分级标准中从未有过的,需要采用专用的试验仪器和方法,目前尚未得到世界各国的采纳和应用,但 PG 分级成果促进各国纷纷修订自己的沥青技术指标。各国沥青技术指标修订的趋势是尽量采用具有明确粘弹力学依据的指标(例如 60℃ 动力粘度)来代替或简化针入度分级指标体系。

此外,尽管 SHRP 研究进行的大量沥青混合料性能评价方法研究,多数尚未能形成技术规范,但其中的大量研究成果如简单剪切试验(SST)、约束试件温度应力试验(TSRST)、弯曲疲劳试验、动态模量试验等,均在全世界引起强烈反响。这些研究全部采用粘弹性力学手段与方法研究或评价沥青混合料的力学性能与路用性能。随着 2004 AASHTO 路面设计指南编制的研究进展,美国正在加紧沥青混合料性能评价方面的研究,大力促进新的路面设计指南真正成为力学-经验型的设计方法。

综上所述,美国近 20 年在沥青及沥青混合料技术标准与技术规范方面的研究中,始终坚持采用粘弹力学的理论与方法作为应用研究基础,使得沥青及沥青混合料的技术标准与技术规范越来越接近性能规范的水平。

第三节 粘弹力学的基本原理

一、弹性、粘性与粘弹性

在经典力学中,描述物体弹性行为的是虎克定律,即施加外力时物体在瞬间产生变形,并不随时间增加而保持恒定的值,消除外力后变形可以瞬间回复。描述粘性流动的是牛顿定律,即变形速率与外力成比例,变形随时间增加,取消外力后变形不能回复。显然,弹性变形与粘性流动变形是互相对立的两种变形行为。

任何互相对立的事物都将在一定条件下向相反的方向转化,工程材料的力学行为也都在一定条件下具有满足使用要求的弹性,并在另外的条件下具有粘性流动的能力。对于工程技术人员来说,重要的是认识材料由粘性向弹性转化的条件以及产生这种转化的机理。

化学变化可以使物体改变自身的力学特性。例如,新拌制的水泥混凝土可以像液体一样被浇注在模板之中,也可以使用管道运送,但凝固之后的混凝土具有相当高的弹性,即使每平方米承受数千牛顿的荷载也不会产生过大的变形。这是因为凝固过程中混凝土内部发生了水化反应,使得原来具有粘性的材料成为一种新的弹性材料。

钢材、铸铁等金属材料在固定的温度下可以由固体变成液体,这样的现象叫做熔融,发生熔融的温度称为熔点。熔融过程是物质的一种热力学物理相变。相变是一种突变现象,只有具有晶体结构的固体才具有固定的熔点。

不具有明显晶体结构的状态称为无定形结构或玻璃质。具有无定形结构的物质可以不经过化学变化或者熔融过程实现由粘性流动状态向弹性变形状态的转变。与晶体结构不同,无

定形结构物质的这一转变是一个伴随温度变化或者外力作用时间长短的渐变过程。沥青的性能具有显著的无定形结构物特征,并影响了沥青混合料的力学行为。

二、温度对于变形形态的影响

变形随温度变化的过程可以用热机械曲线来描述。如图 1-2 所示,在不同温度下,给物体施加相同的荷载,经过同样时间后可以得到完全不同的变形行为。

当温度较低时,物体的变形很小(不大于 1%)并在瞬间完成,变形可以用虎克定律描述。由于这一阶段的变形可以完全回复,属于弹性变形,其特性与普通的弹性物质无异,故称之为普弹态或玻璃态。

当温度较高时,经过一个过渡阶段,物体的变形在较大的水平(可在 100% ~ 1000%)上保持稳定,外力消除后变形仍可以回复。此时物体的力学行为类似于橡胶,故称之为橡胶态或高弹态。

当温度继续升高时,物体的变形急剧发展,并开始粘性流动,这是物体的粘流态。

物体由普弹态向高弹态过渡的转变温度称为玻璃转移温度或玻璃态转移点,一般以 T_g 表示。高弹态向粘流态转移的温度称为粘流温度,一般用 T_f 表示。 T_g 和 T_f 是物体的固有温度,在研究材料的力学行为时,这两个温度具有极为重要的意义。特别是在发生玻璃态转移前后,不仅物体的力学行为将要发生较大的变化,而且如热膨胀系数、比热、热焓、光学性质、电学性质等许多性能也要发生变化。玻璃态转移不伴随物体性能的突变,并在一定程度上依赖于温度变化的速率。因此,玻璃态转移与代表热力学相变的熔点具有本质的不同。

在图 1-2 中的高弹区,变形不仅对于温度的依赖性不明显,而且高弹变形也具有瞬时性,因此高弹变形也称为平衡高弹。对于多数的物体,平衡高弹的温度范围比较窄,有些物体可能根本不存在平衡高弹现象。此时,物体的变形虽然可以完全或者部分得到回复,但这一回复可能是一个明显的时间过程。

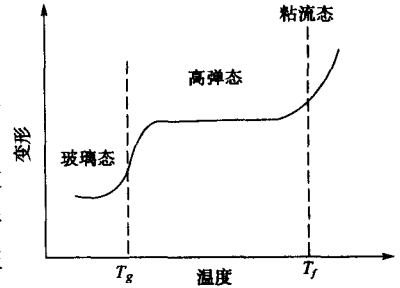


图 1-2 无定形结构物的热机械曲线

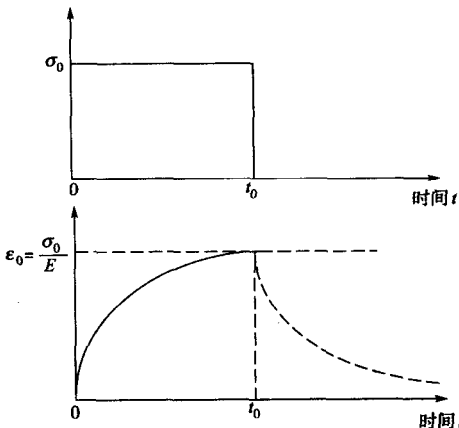


图 1-3 延迟弹性

三、延迟弹性

如图 1-3 所示,材料在外力作用下产生的变形缓慢增加,撤除外力后变形缓慢回复。这种加-卸荷过程中变形不随外力即时达到平衡而有所滞后的现象称为延迟弹性。

延迟弹性变形不仅是温度的函数,也是时间的函数。对于无定形结构物质,如果保持温度不变,观察一定外力作用下变形随时间发展,那么也可以得到类似于热机械曲线的变形-时间曲线(如图 1-3)。由于变形对于时间的依赖是粘性流动的固有特性,也称延迟弹性为粘弹性。

在图 1-3 所示的曲线上,也可以定义一个与玻璃态转移温度 T_g 类似的转移时间 t_g ,

$$\log E_r(t_g) = \frac{1}{2}(\log E_1 + \log E_2)$$

式中, E_1 为普弹模量; E_2 为平衡高弹模量。通常称 t_g 为示性松弛时间。

四、粘弹力学的研究方法

以延迟弹性行为作为主要研究对象的力学学科是粘弹性力学,这一学科是流变学的一个重要分支,也是现代科学的一个新兴领域。

与经典力学不同,粘弹性力学不仅研究物体宏观力学行为的一般规律,同时也研究导致物体宏观力学行为多种多样性的变形机理,因此,粘弹性力学的较新定义是“与可变形物体的机理有关的一个物理学分支”。换句话说,粘弹性力学不仅通过粘弹性变形这一特殊的运动形式来指导我们认识物质世界的宏观现象,更重要的是通过延迟弹性变形机理的研究,指导我们认识材料微观结构组成形式与材料宏观物质运动形式的内在联系,使我们从本质上了解材料力学行为的多种多样性。

在这一方面取得显著成果的是关于高分子合成材料聚合物的粘弹力学研究。在聚合物粘弹力学中,不仅可以根据分子的热物理特性来说明物体产生瞬时弹性、粘弹性及粘性流动的变形机理,还可以根据大分子的结构特点来说明一定条件下不同物体产生不同粘弹力学行为的变形机理。因此,粘弹性力学这一物理学分支的研究已经涉及到物体的分子结构理论、热物理学、分子热力学理论,并且与弹塑性力学、流体力学、断裂力学、损伤力学等现代力学的研究成果紧密相关。在这一意义上,可以说粘弹性力学是一门处于前沿地位的新兴边缘学科。

粘弹力学本身又是一门以实验为基础的学科。由于通常不得不采用唯象手段处理工程材料的粘弹性力学行为,实验研究就具有更加重要的实际意义。以实验作为基本手段的粘弹性力学研究方法称为实验粘弹力学,实验粘弹力学更侧重对于材料宏观力学变形规律的描述与预测。对于工程材料,实验粘弹力学的主要研究目的是通过适当的试验手段,根据生产活动中遇到的实际问题,模拟产生这些问题的应力条件、变形历程、温度及环境,建立经验或半经验-半理论公式来定量地描述材料的粘弹性力学行为。

由于粘弹性材料的变形行为依赖于温度和时间,在一些情况下还可能依赖于应力水平而表现出非线性,这类材料的试验研究设备一般比较精密,需要能够严格控制时间或变形速度、温度或者降温速度、稳态应力或者动态应力进行试验测定。近年来,由于动态加载设备得到广泛应用,采用动态力学分析(DMA)研究沥青及沥青混合料粘弹特性的方法得到了迅速发展,成为实验粘弹力学研究的重要手段。

五、沥青与沥青混合料的粘弹性力学行为

沥青及沥青混合料一般具有相当复杂的内部结构,尽管这些材料就微观结构而言并不存在像高聚物那样确定的造成延迟弹性的变形机理,但在一定的观测时间下,这些材料也表现出变形明显依赖于时间的力学行为。但在研究沥青与沥青混合料的粘弹性力学行为时,还必须注意沥青的材料结构与沥青混合料仍存在明显的差异。

沥青由多种化学成分极其复杂的碳氢化合物及其非金属元素的衍生物所组成,尽管其成

分极其复杂,沥青仍然具有无定形结构物的基本特征。沥青混合料则由作为胶结料的道路石油沥青和砂、碎石、矿粉等矿质原料,按照一定比例(必要时也包括纤维等其他填料)共同组成。它的力学特性既相似又有别于沥青和集料。

在宏观意义上讲,沥青是一种均质的粘弹性材料,沥青混合料是一种颗粒性的粘弹性材料。在沥青混合料中,沥青薄膜裹覆集料颗粒形成骨架,其强度来源于骨架的嵌挤和沥青的粘结。延西利^[3]曾经著文指出,沥青混合料的物理结构从总体上看是松散的,可以认为它是一种典型的颗粒性材料。一般说来,所有的颗粒性材料在宏观上都具有这样三个特征:材料由许多颗粒组成;颗粒的自身强度远大于其联结强度;在外力作用下,颗粒间发生相互错位移动。

由于这样的差别,与沥青材料粘弹性的研究方法不同,在研究沥青混合料时,必须注意以下问题:

沥青混合料的变形特性与破坏特性依赖于加荷方式,三轴试验、单轴压缩试验等方式有利于发挥集料之间的嵌挤作用。迄今为止沥青混合料力学特性研究的一个难题仍然是力学响应的第一象限(纯拉模式)与第三象限(纯压模式)的镜像影射不对称问题。

由于沥青材料的结构组成在宏观上可被认为是均质的,容易采用热力学、损伤力学、断裂力学等现代力学方法与手段研究沥青的力学行为。沥青混合料的宏观材料结构组成就很复杂,沥青与矿料的表面物理化学作用使得其微观或者亚微观的结构组成更加复杂,这些经典的研究手段很难不加以经验性地处理而直接用于沥青混合料的力学行为研究。

尽管沥青和沥青混合料均具有类似的粘弹性力学行为,由于沥青混合料仍具有颗粒材料的特点,其级配组成对于沥青混合料的粘弹性力学行为特征具有显著的影响。尽管一些研究人员或研究机构进行过许多努力^[4,5],我们仍然不能由作为胶结料的沥青性能准确地预测沥青混合料的力学行为。

最后,对于道路领域的研究人员来说,沥青混合料与沥青不同,其加工成型的条件相当复杂。不同的加工条件不仅导致沥青混合料中体积特性(如 VMA、空隙率、沥青膜厚度)的差异,而且会导致集料颗粒排列的显著不同^[6]。