

Rheology of Paving Asphalt

道路沥青流变学

王超著



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

Rheology of Paving Asphalt

道路沥青流变学

王超著



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

内 容 提 要

本书从宏观流变学的角度出发,基于流变测量学基本理论与方法,对道路沥青的黏弹—流变特性进行了系统介绍,初步建立了基于流变学方法表征、评价和预测道路沥青宏观路用性能的基本分析框架,为今后深入研究道路沥青路用性能提供了一种新思路。全书共分9章,分别阐述了道路沥青线黏弹—流变性能、道路沥青高温流变路用性能、道路沥青中温疲劳性能、基于黏弹性连续介质损伤力学理论的道路沥青疲劳模型、道路沥青自愈行为理论与方法、道路沥青低温流变路用性能、道路沥青损伤状态温度依赖特性及统一模型、道路沥青与路面性能相关的规范测评体系及应用等内容。

本书适用于从事沥青路面材料方向研究的科研人员,也可供高等院校相关专业高年级本科生及研究生作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

道路沥青流变学/王超著. —北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.12
ISBN 978-7-114-16096-7

I. ①道… II. ①王… III. ①道路沥青—流变学
IV. ①TE626.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第278264号

Daolu Liqing Liubianxue

书 名:道路沥青流变学

著 者:王 超

责任编辑:戴慧莉

责任校对:刘 芹

责任印制:张 凯

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:北京虎彩文化传播有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:10.25

字 数:234千

版 次:2019年12月 第1版

印 次:2019年12月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-16096-7

定 价:38.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

序

改革开放以来,我国交通基础设施建设实现了跨越式发展,其中道路工程基础设施,尤其是高速公路的大规模建设为我国社会经济的快速增长做出了重要贡献。截至2016年年底,全国公路总里程已达469.63万km,其中高速公路里程13.1万km。在目前公路网建设日趋完善、高速公路通车里程已居于世界前列的现实基础上,如何综合考虑技术、经济及环境影响更高要求,进一步提升道路工程基础设施的服务质量,尤其在已有“量”的条件下更加注重和突出“质”的重要性,贯彻实践“品质工程”理念,是今后很长时期内道路交通行业的重要历史使命。

沥青路面结构与材料已在全世界道路工程中得到了广泛的应用,积累了大量的理论和工程实践经验。但同时也必须认识到,沥青路面结构设计、材料设计以及“结构—材料一体化设计”等方法 and 理念仍较传统,亟须开展一系列基础理论研究工作并进行更深层次的思考与探索。沥青混合料性能参数是极其重要的沥青路面设计基础参数,直接影响着路面结构力学响应分析结果,而沥青的黏弹性特性对沥青混合料和路面结构的力学特性与力学响应有着极为显著的影响。我国目前主要采用传统的针入度指标进行道路沥青的技术分级,美国于20世纪90年代提出了基于流变学方法的沥青路用性能分级(PG分级)评价体系,但是大量国内外实践经验表明,相同针入度等级或PG分级的不同沥青材料,在应用于实际工程中仍然会体现出差异化的路面使用性能。因此,无论传统的“三大指标”,还是PG分级评价体系,目前也仅能从工程应用角度保证沥青原材料的基本质量,还做不到准确量化“沥青品质”以反映其在路面使用性能方面的贡献。

本书内容和成果即为今后测试和评价道路沥青路用性能提供了一些新的启迪和思路,基于流变测量学理论和方法分别对沥青的高温蠕变特性、疲劳—自愈特性、低温松弛特性以及温度敏感性等进行综合分析,提出和建立与路用性能相

关的规范试验方法和多指标评价体系,从而与《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)提出的沥青路面多指标设计体系实现对接。期待作者在本书研究成果基础上,进一步深入探索和发展“品质沥青”内涵和规范测评体系,有力支撑我国新时代道路基础设施建设和养护“品质工程”的不断实践!



2019年11月

前 言

沥青路面材料在室外服役过程中承受着环境与荷载等外在条件的多重作用,表现出复杂的材料力学行为。道路沥青作为沥青混凝土材料中的胶凝材料,其路用性能品质的优劣对于沥青路面结构与材料的耐久性有着极为重要的影响。同时,沥青作为典型的黏弹性材料,其诸多力学行为显著依赖于时间、温度及荷载条件,此黏—弹特性也是沥青路面材料复杂力学行为的重要来源。20世纪20年代末期,专门针对材料黏—弹特性研究的“流变学”正式作为一门独立的学科而创建,在近一个世纪的发展历程中,流变学理论与方法已在研究对象、研究内容及研究手段等方面取得了巨大的进步。随着各式各样高精度流变测量仪器的普及和多功能化,各种流变学参数可以快捷而准确地测试,材料在流动和变形过程中的力学响应可以精确地表征,流变学的研究手段和方法也日渐丰富,在石油化工行业、生物医学、食品加工等诸多领域都得到了非常迅速的应用和发展。尤其作为流变学重要学科分支的高分子材料流变学,其流变学设计已成为高分子材料分子设计、材料设计、产品设计及加工设计的重要组成部分。

在美国20世纪90年代初期完成的“战略公路研究计划(SHRP)”中,首次系统地运用流变学方法分析和评价了道路沥青的关键路用性能,建立了道路沥青路用性能分级(PG分级)规范试验方法、评价指标体系及技术等级标准,并在全世界范围内得到了很好的推广和应用。但是近30年的沥青路面工程实践经验表明,道路沥青PG分级技术标准只能保证沥青产品的基本工程质量,并不能很好地控制和保证沥青路面的优良使用性能。究其原因,PG分级试验方法是在沥青的线黏弹区范围内进行的无损测试,所得评价指标表征了沥青的线黏弹特性,而最终路面各类病害的产生及发展除了依赖于沥青材料的线黏弹性能,更是与沥青材料的损伤特性息息相关。因此,SHRP计划之后各种描述和表征道路沥青损伤及失效(破坏)特性的试验方法不断被研发和验证,例如,评价沥青高温抗车辙性能的多应力蠕变恢复(MSCR)试验、评价和预测沥青疲劳性能的线性振幅扫描(LAS)试验等。这些新的沥青路用性能试验方法极大地丰富了现有的PG分级测评体系,为进一步发展“与路面性能相关的规范(PRS)”打下了良好的技术基

础,而建立道路沥青 PRS 规范试验方法及技术标准则代表了未来道路沥青路用性能流变学研究及实践的新方向。

本书即从宏观流变学的角度出发,基于流变测量学基本理论与方法,对道路沥青的核心路用性能进行了系统介绍,初步建立了基于流变学方法表征、评价和预测道路沥青宏观路用性能的基本分析框架,为今后深入研究道路沥青路用性能提供了一种新思路。本书第 1 章对流变学理论与方法在道路沥青路用性能研究中的应用进行了介绍;第 2 章介绍了目前应用广泛的道路沥青线黏弹流变性能评价方法;而第 3 章至第 7 章则依次对道路沥青的永久变形、疲劳开裂及低温开裂三大核心路用性能进行了介绍,其中第 3 章介绍了基于蠕变恢复试验的道路沥青高温流变路用性能评价与预测方法,第 4 章和第 5 章分别介绍了目前道路沥青疲劳性能的研究方法和基于黏弹连续介质损伤力学理论的道路沥青疲劳模型,第 6 章则进一步介绍了道路沥青的疲劳—自愈性能,第 7 章对道路沥青的低温流变路用性能进行了介绍;第 8 章介绍了道路沥青损伤状态下的温度依赖特性;第 9 章作为全书主要内容的总结和提炼,介绍了道路沥青 PRS 测评体系及对特种改性沥青路用性能评价的应用。

需要指出的是,本书关于道路沥青流变学的介绍仅仅属于宏观流变学的研究范畴,即将沥青看作连续介质,运用连续介质力学理论与方法研究材料的黏弹性力学行为,由于这种研究方法不考虑材料内部微观结构特征,故亦称为唯象流变学;而微观流变学则从物质结构的角度出发,研究材料宏观流变性能与其微观结构(分子链结构、聚集态结构)的相关关系,亦称为结构流变学或分子流变学。随着日新月异的道路沥青新材料技术的不断发展,为了更好地理解和掌握道路沥青结构与性能的关系,仍需基于微观流变学方法对道路沥青微观结构进行更为深入的研究。

本书主要涵盖了作者攻读博士学位阶段赴美国北卡罗来纳州立大学访问交流期间的主要研究发现,以及后续博士后研究阶段的跟进研究成果。本书的出版得到了国家自然科学基金青年科学基金项目(51608018)和北京市自然科学基金青年科学基金项目(8174059)的大力支持,在此表示深深的感谢!

希望本书能为广大道路工程专业师生以及沥青路面材料方向研究人员提供启示和帮助。同时书中的疏漏和错误之处敬请同行和读者批评指正。

王超

2019年10月9日

目 录

第1章 绪论 /1

- 1.1 道路沥青路用性能 1
- 1.2 道路沥青流变学研究方法 3
- 1.3 道路沥青路用性能流变学研究进展 6

第2章 道路沥青线黏弹流变性能 /8

- 2.1 道路沥青动态力学性能 8
- 2.2 线黏弹性力学指标之间的等价转化 9
- 2.3 时间—温度等效原理 10
- 2.4 时间—老化等效原理 14

第3章 道路沥青高温流变路用性能 /19

- 3.1 沥青高温路用性能概述 19
- 3.2 多应力蠕变恢复(MSCR)试验的发展及应用 21
- 3.3 沥青黏塑性应变模型 27

第4章 道路沥青中温疲劳性能 /33

- 4.1 道路沥青疲劳路用性能概述 33
- 4.2 时间扫描疲劳试验 35
- 4.3 加速疲劳试验 36
- 4.4 其他沥青疲劳试验方法 38
- 4.5 沥青疲劳性能研究领域技术挑战 44

第5章 基于黏弹性连续介质损伤力学理论的道路沥青疲劳模型 /45

- 5.1 黏弹性连续介质损伤(VECD)力学模型 45
- 5.2 沥青的疲劳损伤 51
- 5.3 沥青的疲劳失效 55
- 5.4 统一的疲劳失效准则 62
- 5.5 疲劳失效准则的优化 63
- 5.6 基于LAS试验的“三阶段”沥青疲劳模型及应用 70

第6章 道路沥青自愈行为理论与方法 /76

- 6.1 沥青材料自愈行为概述 76
- 6.2 基于LASH试验的沥青自愈行为测试及表征 79
- 6.3 沥青自愈主曲线理论与方法 84
- 6.4 沥青自愈行为理论的实践应用 86

第7章 道路沥青低温流变路用性能 /93	
7.1 沥青低温路用性能概述.....	93
7.2 4mm DSR 技术	94
7.3 基于4mm DSR 沥青低温性能评价	99
第8章 道路沥青损伤状态温度依赖特性及统一模型 /101	
8.1 时间—温度等效原理在沥青混凝土损伤状态下的应用	101
8.2 时间—温度等效原理在道路沥青疲劳模型中的应用	102
8.3 黏弹性材料“内在特征时间”理论	107
第9章 道路沥青 PRS 测评体系及应用 /114	
9.1 道路沥青 PRS 测评分析框架及流程	114
9.2 特种改性沥青 PRS 路用性能评价	116
参考文献 /130	

第 1 章 结 论

沥青铺面技术在全世界范围内已有 100 多年的实践和应用历史,伴随着高等级道路的快速的发展,沥青路面结构凭借其优良的路用性能,已成为高等级铺面工程的首选结构。我国自 20 世纪 80 年代起高速公路建设进入跨越式发展阶段,除了部分多雨气候地区及特殊路段外,绝大多数高速公路的路面结构设计采用了沥青路面结构。在沥青路面结构与材料得到大规模生产和应用的同时,路面服役期限内出现的各种病害也开始制约其服务水平的发挥,因此,如何减少和预防沥青路面结构高温永久变形(车辙)、疲劳开裂、低温裂缝及水损坏等各类病害的发生显得尤为重要。路面病害的产生与发展主要受三方面的影响,即路面材料性能、路面结构设计以及外界的环境和荷载条件。作为核心环节的路面结构设计,其主要任务就是将不同类型的路面材料科学合理地设计于合适的路面层位,以满足在特定环境和荷载条件下的路面使用年限要求。其中,对于不同种类沥青路面材料性能的掌握是一项非常基础性的工作,路面材料设计及材料特性参数的选取直接影响了最终路面结构设计的科学有效性,而沥青材料作为沥青路面结构的主要铺面材料,其路用性能优劣更是有着举足轻重的地位和作用。

1.1 道路沥青路用性能

目前,石油沥青仍然是全世界范围内道路沥青材料的主要来源,铺面的沥青混凝土材料由沥青与一定级配的矿质混合料在高温下充分拌和而形成,经过适当的摊铺和碾压形成强度后可以承受外界的环境和荷载作用。而沥青路面结构在不同的温度区域范围内具有显著差异化的病害特征类型,主要包括:高温条件下,路面结构与材料稳定性不足导致在行车道轮迹带形成的永久变形(车辙);车辆荷载反复作用导致的路面疲劳开裂,进而形成的龟裂、块状裂缝;在低温环境下,温度骤降在路面结构与材料内部引起并积累的温度应力所导致的横向低温裂缝。以上三种沥青路面典型病害类型分别如图 1-1 ~ 图 1-3 所示。尽管沥青路面同样存在水损坏、泛油等其他病害类型,但高温永久变形、疲劳开裂及低温裂缝反映了道路沥青材料最基本的路用性能,也是沥青与沥青混凝土材料设计时应考虑的核心内容。

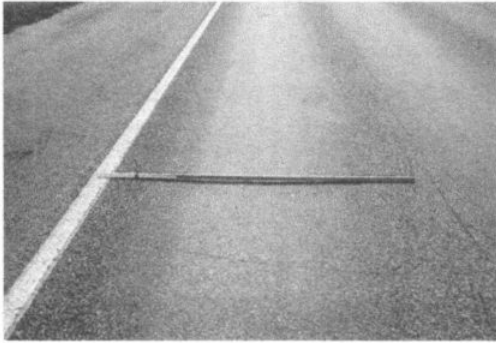


图 1-1 沥青路面典型车辙病害(与行车方向平行)

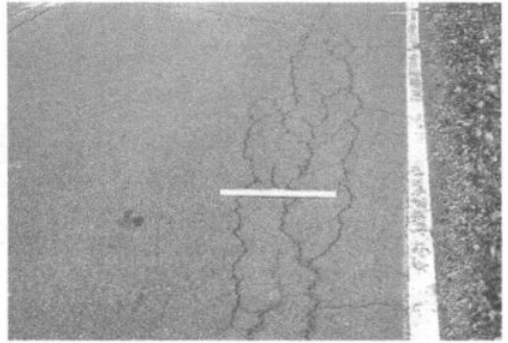


图 1-2 沥青路面典型疲劳开裂病害(与行车方向平行)

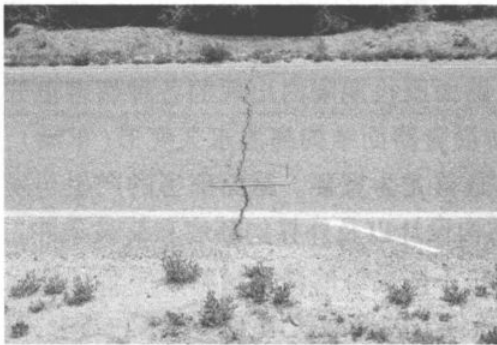


图 1-3 沥青路面典型低温裂缝病害(与行车方向垂直)

美国于 1988—1993 年实施并完成了“战略公路研究计划 (SHRP)”, 该计划第一次系统地对道路沥青材料的路用性能进行了深入研究, 其两大成果“高性能沥青路面 (Superpave) 沥青胶结料路用性能规范”和“基于旋转压实方法的沥青混凝土体积设计法”自颁布起在全球范围内产生了深远影响并得到广泛应用, 相关后续跟进研究至今仍然代表着道路沥青路用性能研究

领域的前沿方向。SHRP 计划中即以高温车辙、疲劳开裂及低温裂缝作为沥青与沥青混凝土路面三大核心路用性能进行分析并建立了沥青路面的性能预测模型^[1]。沥青路面由沥青混凝土铺筑而成, 而沥青混凝土则是由沥青、粗细集料及矿粉组成的多相体系, 其中沥青作为胶结材料对沥青混凝土及最终沥青路面结构的路用性能都有着至关重要的影响和贡献。SHRP 计划中首次将“流变学”理论与方法引入道路沥青路用性能分析之中, 详细研究了道路沥青在不同温度区域内的流变特性以及其与实际路面使用性能的关系, 最终建立了沥青路用性能规范试验方法及分级标准^[2-4] (Performance Grade, 以下简称 PG 分级)。SHRP 计划之后, 随着改性沥青在全世界范围内的大规模应用, 基于流变学方法的道路沥青路用性能研究又有了一系列新的发展, 各种新理论和方法的实践与应用将道路沥青路用性能与沥青混凝土及沥青路面结构使用性能更加有效地联系起来^[5-8]。美国联邦公路局曾利用加速加载试验设备对不同改性沥青的路用性能进行了论证分析和比较, 基于实测的路面车辙和疲劳裂缝数据对诸多道路沥青路用性能试验方法进行了综合对比, 很好地验证了沥青对路面结构使用性能的贡献率^[9]。

1.2 道路沥青流变学研究方法

1.2.1 流变学理论概述

流变学是一门研究材料“流动”与“变形”的科学。一般来讲,流动与变形是两个范畴内相对独立的概念,流动是液体材料的属性,而变形则是固体材料的属性。液体流动时表现出黏性行为,产生不可恢复的变形(永久变形)的同时耗散掉部分能量;而固体变形时表现出弹性行为,发生弹性变形的同时存储能量,外力撤除后变形恢复的同时还原能量。液体的流动通常遵循牛顿流动定律,即材料所承受的剪应力与剪切变形速率成正比,且材料流动具有时间依赖特性,是一个过程量;而固体的变形通常遵循胡克定律,即材料所承受的应力与应变成正比,且应力与应变之间的响应与时间无关,是一个瞬时响应。遵循牛顿流动定律的液体一般称为牛顿流体,而遵循胡克定律的固体一般称为胡克弹性体。牛顿流体与胡克弹性体实际上是两种被简化而抽象的材料行为,实际中的很多材料往往表现出更为复杂的力学行为。如石油、橡胶、化工原材料和种类各异的高分子材料及相关产品,它们既能流动、具有黏性,又表现出一定的弹性变形能力。对于这类兼备“黏性”与“弹性”的材料,其复杂力学行为的表征需要发展一门新的学科。尽管古代先哲早已有了“万物皆流”的思想启蒙,然而“流变学”真正成为一门独立的学科也仅仅有90年的历史。1928年,美国物理化学家 E. C. Bingham 教授正式命名了“流变学(Rheology)”的概念,英文词头取自古希腊语 rheo,为流动之意,词根 logy 有科学之意。次年成立了流变学会,并创办了流变学报(Journal of Rheology),它标志着流变学作为一门新生交叉学科的诞生并开始了发展历程。

流变学自诞生以来就是一门理论与实践并重,且涉及力学、物理学、高分子材料学等多学科交叉的实验科学。以流变学的重要分支高分子材料流变学为例,其研究内容与高分子物理学、高分子化学、高分子材料加工原理、连续介质力学、热力学理论等密切联系,其研究对象的力学、热学性质也相当复杂^[10]。而流变学的研究方法一般分为两种,即“宏观流变学”和“微观流变学”。宏观流变学将材料看作连续介质,运用连续介质力学理论与方法研究材料的黏弹性力学行为,由于这种研究方法不考虑材料内部微观结构特征,故亦称为唯象流变学;而微观流变学则从物质结构的角度出发,研究材料宏观流变性能与其微观结构(分子链结构、聚集态结构)的相关关系,亦称为结构流变学或分子流变学。本书围绕道路沥青路用性能所介绍的流变测量学方法,皆属于宏观流变学的范畴。为了更好地理解和掌握道路沥青结构与性能的关系,未来仍需基于微观流变学方法对道路沥青的微观结构进行更为深入的研究。

随着各式各样流变仪(如毛细管流变仪、旋转流变仪、拉伸流变仪等)和其他高精度测量仪器的普及及多功能化,各种流变学参数(黏度、模量、分子量等)可以快捷而准确

地测试,材料在流动和变形过程中的应力、应变响应可以精确地表征,流变学的研究手段和方法也日渐丰富,在石油化工行业、生物医学、食品加工等诸多领域都得到了非常迅速的应用和发展。作为流变学重要学科分支的高分子材料流变学,其流变学设计已成为高分子材料分子设计、材料设计、产品设计及加工设计的重要组成部分^[11-13]。

1.2.2 道路沥青流变测量学

道路沥青材料的流变性能测试通常采用剪切荷载作用下的旋转流变仪进行,图 1-4 所示列出了目前动态剪切流变仪(Dynamic Shear Rheometer,以下简称 DSR)常用的沥青材料试验模具类型。其中,同轴圆筒模具适用于高温环境下的液态沥青的流变性能测试;锥形板和平板模具适用于路面服役温度区域内的固态沥青流变学测量,平行板模具则是目前道路沥青路用性能流变学测试中普遍采用的试验模具类型;而扭摆模具目前主要应用于沥青砂浆的流变性能测试。表 1-1 汇总了目前常用的基于 DSR 平行板模具的道路沥青流变学试验方法,总体可分为静态试验和动态试验两大类。静态试验包括恒应力加载的蠕变试验/蠕变恢复试验以及松弛试验,动态试验则包括不同温度、频率及荷载振幅设计条件下的各类扫描试验。

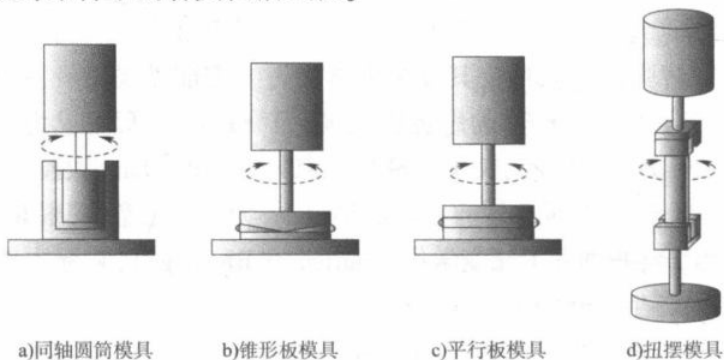


图 1-4 常用流变仪模具类型

道路沥青常用流变测量学方法

表 1-1

试验类型	试验名称	加载方法	主要评价指标
静态试验	蠕变试验及蠕变恢复试验	恒蠕变应力加载	蠕变柔量
	松弛试验	恒应变加载	松弛模量
动态试验	温度扫描	振幅、频率恒定	动态模量与相位角
	频率扫描	振幅、温度恒定	
	振幅扫描	温度、频率恒定	
	时间扫描	温度、频率、振幅恒定	

(1) 静态试验。

蠕变与松弛是典型的黏弹性材料行为,也是道路沥青材料诸多黏弹性力学行为的最基本力学行为单元。如图 1-5 所示,在恒定蠕变应力(τ_0)作用下,黏弹性材料的变形

(γ)不会像胡克弹性体一样瞬时完成,而是依赖于加载时间(t)逐渐增大和累积,其蠕变行为特性可以用蠕变柔量($J = \gamma / \tau_0$)进行评价,有时也会撤除蠕变应力以观测材料蠕变变形的恢复情况;而当黏弹性材料承受恒定应变(γ_0)作用时,其应力(τ)会随着时间的推移而不断消退松弛,如图1-6所示,其松弛行为特性可以用松弛模量($G = \tau / \gamma_0$)进行表征。

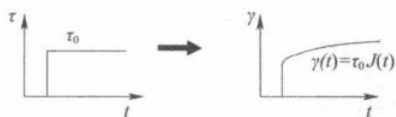


图 1-5 蠕变试验



图 1-6 松弛试验

此外,黏弹性力学行为还可以通过力学元件组合的方式进行表征。通常使用弹簧元件代表胡克弹性体,黏壶元件代表牛顿流体,将弹簧和黏壶两个基本力学元件进行并联或串联,可分别表征黏弹性材料的蠕变与应力松弛,在此基础上进一步串联或并联更多的弹簧和黏壶力学元件,可以表征更为复杂的黏弹性本构关系模型。张肖宁教授曾就弹簧和黏壶基本力学元件的数学描述及其在沥青与沥青混凝土黏弹性力学本构关系模型中的应用进行了充分讨论^[14]。

(2) 动态试验。

道路沥青的动态试验一般通过正弦波形式的交变荷载加载方式而完成,如图1-7所示,当对沥青材料施加一个剪切应变(或应力)控制的正弦波荷载时,根据其剪切应力(或应变)力学响应的测量,可以计算确定其一系列黏弹性力学指标,其中最重要的评价指标是动态模量($|G^*|$)和相位角(δ)。

温度扫描试验。道路沥青作为典型的黏弹性材料,其力学行为具有显著的温度依赖性。温度扫描试验即对沥青样品在不同温度下进行相同振幅、频率的动态试验,以获取黏弹性力学指标对试验温度的敏感性。美国SHRP计划所提出的道路沥青车辙因子和疲劳因子指标即分别在高温和中温条件下应用温度扫描试验而测试完成的。

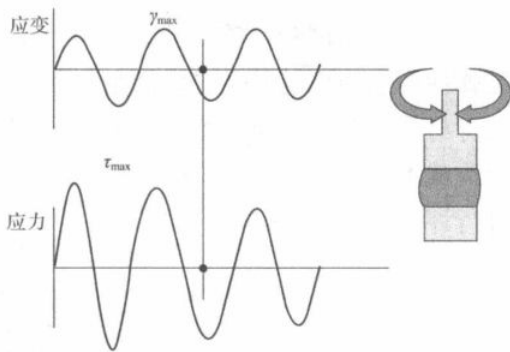


图 1-7 动态试验示意图

频率扫描试验。除了温度的影响,道路沥青的力学行为同样受到加载速率(加载时间)的影响。频率扫描试验即通过连续改变单一温度下恒定振幅的正弦波荷载加载频率(周期),以获取黏弹性力学指标对加载速率的依赖性,如图1-8所示。

振幅扫描试验。以上介绍的温度扫描试验和频率扫描试验一般均采用恒定的小振幅水平进行无损测试,以保证试验过程中沥青始终处于线性黏弹区范围内,即沥青的黏弹性力学指标不依赖于加载振幅的变化。有时为了更好地明确线性黏弹区的振幅水平界限,可通过控制应变或应力的振幅扫描试验而完成,如图1-9所示。在恒定温度和加载频率条件下,如果逐渐递增的振幅水平依然处于线性黏弹区,测得沥青的动态模量等

指标将保持不变,即沥青的线黏弹性力学响应;当所施加的振幅超过线性黏弹区,沥青的模量将发生衰减,一般以动态模量衰减至线黏弹性动态模量的 95% 或 90% 水平所对应的振幅数值作为该沥青在此特定温度和频率条件下的线性黏弹区临界振幅水平。此外,本书中后续介绍的沥青加速疲劳试验亦采取了振幅扫描的加载方式而完成。

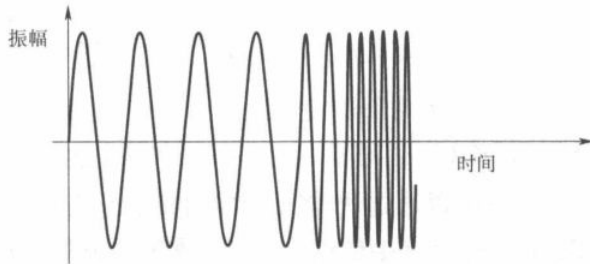


图 1-8 频率扫描试验

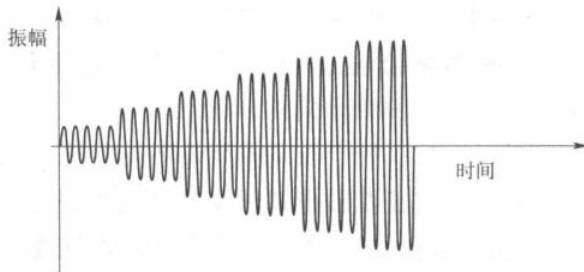


图 1-9 振幅扫描试验

时间扫描试验。该试验方法为在恒定的温度、振幅及加载频率条件下,观测沥青的黏弹性力学指标随着试验时间的累积而发生的变化,如图 1-10 所示。时间扫描是传统沥青材料疲劳试验所采取的加载方法,试验中将振幅设置为沥青材料所预期承受的疲劳荷载水平(一般处于非线性黏弹区),即可对沥青在疲劳荷载作用下的动态力学性能进行评价。

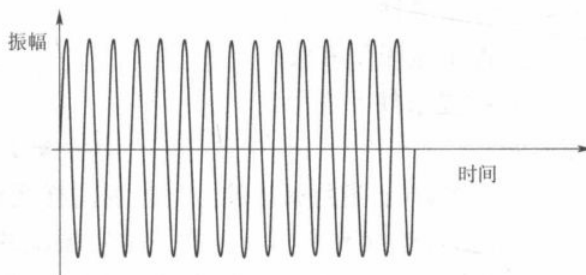


图 1-10 时间扫描试验

1.3 道路沥青路用性能流变学研究进展

Monismith 和 Jongepier 等早在 20 世纪 60 年代就将流变学分析方法分别应用于沥青

混凝土和沥青的动力性能研究中^[15-16],从而很好地模拟了车辆轮载对路面材料的动态力学效应。原交通部公路科学研究所沈金安研究员曾于20世纪80年代末连载发表了《沥青材料的流变学(一~五)》,首次针对道路沥青行业详细介绍和论述了流变学的概念、流变测量技术以及沥青与沥青混凝土的流变特性与本构模型^[17-18]。需要注意的是,尽管沥青混凝土的全部黏弹特性来源于沥青,但二者是两种不同的黏弹性材料。沥青是一种均质的黏弹性流体材料,而沥青混凝土则是一种颗粒性的黏弹性固体材料,二者的力学特性和流变模型既存在相似之处,又有着明显的差异。针对沥青混凝土的颗粒性材料特征,延西利等通过简单拉压试验,应用其尔库伦理论分析了这种颗粒性材料的强度构成特性及其内在参数 $c-\varphi$ 值,探讨了不同加载条件下材料的流变学行为差异,并应用线性流变模型对中温条件下沥青混凝土的黏弹力学行为进行了数值模拟^[19-20]。为了模拟沥青路面结构高温永久变形的发展过程,美国NCHRP 9-19课题提出了流动时间(Flow Time)和流动数(Flow Number)两个路用性能试验,来评价和分析沥青混凝土抵抗高温流动变形的能力,通过建立永久变形与加载时间或循环加载次数的关系来确定材料发生蠕变破坏的临界点^[21]。在沥青路用性能的流变学研究方面,Stastna等曾详细比较了常见的流变学模型应用于沥青流变分析的优劣^[22];延西利等通过剪切流变试验测试了沥青的动态黏度,建立了高温条件下的牛顿体流变模型,并和沥青混凝土的流变模型进行了深入的比较,发现沥青和沥青混凝土流变特性具有相似性,使得在路面力学计算涉及黏弹性问题时,可以建立相同的本构方程^[23-24];此外,道路沥青还具有黏弹性流体的很多特性(如触变性),这些特性对于其路用性能的影响也值得关注^[25-26]。

前文已提到,美国SHRP计划首次系统地运用流变学方法评价和分析了道路沥青的路用性能,并建立了相应的PG分级规范试验方法及评价指标体系,在全世界范围内得到了很好的推广和应用。但随着改性沥青材料的大规模应用以及近30年的沥青路面工程实践经验,发现SHRP计划所提出的沥青PG分级评价方法只能保证最基本的道路沥青产品质量,并不能很好地控制和保证沥青混凝土及路面结构的优良使用性能^[8-9,27]。究其原因,PG分级试验方法均是在道路沥青线性黏弹区范围内进行的无损测试,所得评价指标在某种程度上表征了沥青材料的黏弹特性,而最终路面病害的产生及发展除了依赖于沥青材料的黏弹性能,同样与沥青材料的损伤特性息息相关。因此在SHRP计划之后,各种描述和表征道路沥青损伤及失效特性的试验方法不断被研发和验证,如评价沥青高温抗车辙性能的多应力蠕变恢复(MSCR)试验、评价和预测沥青疲劳性能的线性振幅扫描(LAS)试验等。这些新的道路沥青路用性能试验方法极大地丰富了现有的PG分级评价体系,为进一步发展“与路面性能相关的规范(Performance Related Specification,以下简称PRS)”试验评价体系打下了良好的技术基础,而建立沥青PRS规范试验方法及技术等级标准则代表了未来道路沥青路用性能流变学研究及实践应用的新方向。

第 2 章 道路沥青线黏弹流变性能

道路沥青的线黏弹流变性能代表了沥青最基本的流变特性,基于动态试验测试而得的动态剪切模量与相位角指标也是目前应用最广泛的沥青路用性能流变学评价指标。本章从道路沥青动态力学性能、线性黏弹性力学指标间的相互转化,以及温度和老化对沥青线黏弹特性影响几方面介绍道路沥青无损伤影响下线黏弹性能表征及评价方法。

2.1 道路沥青动态力学性能

2.1.1 动态剪切模量与相位角

前文中已介绍了基于 DSR 平行板模具的道路沥青动态力学性能测试方法,如图 2-1 所示,对沥青样品在恒定温度和加载频率(f)条件下施加一个剪切应变振幅为 γ_0 的正弦波荷载输入,可以测得振幅为 τ_0 的剪切应力正弦波力学响应,则可按照公式(2-1)计算

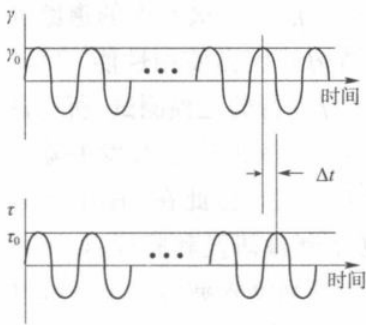


图 2-1 动态剪切模量试验示意图

此温度和频率工况下的沥青动态剪切模量 ($|G^*|$) 指标;同时,根据输入端剪切应变波形和响应端剪切应力波形之间的时间延迟 (Δt),可按照公式(2-2)计算此工况下沥青的相位角 (δ) 指标。对于纯弹性体,荷载输入端与响应端没有时间上的延迟,因此相位角为 0° ;而对于纯黏性体,相位角为 90° 。为了保证荷载输入端剪切应变振幅 (γ_0) 处于沥青的线性黏弹区内,可在动态模量试验之前先行完成相同温度和频率工况下的振幅扫描试验,以确定沥青的线性黏弹区临界荷载水平。

$$|G^*| = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \quad (2-1)$$

$$\delta = 2\pi f \Delta t \quad (2-2)$$

动态剪切模量与相位角综合反映了道路沥青在特定温度和频率工况下的线性黏弹