

沥青

混合料力学

杨新华 白凡 尹安毅 著
叶永 曾国伟

*Mechanics
of asphalt mixture*



科学出版社

沥青混合料力学

杨新华 白 凡 尹安毅 著
叶 永 曾国伟

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是有关沥青混合料力学基本理论和研究方法的专著,是在作者近十年来研究工作基础上参考国内外有关研究文献撰写而成的。

本书主要内容包括:沥青混合料力学性能研究的理论、数值和实验方法,微分型和积分型黏弹塑本构模型,损伤本构模型,随机黏弹塑性本构模型,考虑老化等长期效应的修正的 Cross 黏弹性本构模型,考虑大变形的长期力学性能表征方法,基于细观力学模型的沥青混合料有效力学性质预测,骨料和基体之间界面效应的考虑,针对沥青混合料随机性和异质性的数值建模方法,开裂和车辙的数值模拟等。每章后都列有参考文献供读者查阅。

本书可供从事高等级公路设计、施工和研究的人员,以及大专院校力学、道路工程等相关专业的教师和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

沥青混合料力学/杨新华等著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-048004-0

I. ①沥… II. ①杨… III. ①沥青拌和料-材料力学 IV. ①U414.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 066183 号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:刘玉靖
责任印制:吕春珉 / 封面设计:一克米工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 13 插页: 2

字数: 249 000

定价: 70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(京华虎彩))

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026 (VP04)

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

沥青混合料是广泛使用的高等级公路路面材料，组成和内部结构十分复杂，主要由沥青、粗细骨料等构成，是一种典型的非均匀颗粒增强复合材料。各组材料性质差别很大。沥青属于黏弹塑性材料，其力学性能受温度影响特别显著。骨料形状通常为不规则的多面体，不同粒径的骨料在材料内部随机分布，构成相互嵌挤的内部骨架结构，抵抗轮载，形成有效的承载能力。碎石骨料类型、含量、级配和分布等对形成混合料内部结构有重要影响。因此，黏弹塑性、随机性和异质性是沥青混合料的主要特征。随着交通量和轴载的不断增加，沥青路面容易发生开裂和车辙等早期破坏，影响行车舒适性、威胁行车安全。因此，研究沥青混合料的力学性质和破坏行为，掌握其损伤破坏的机理和规律，对于提高路面设计、施工和管养水平具有非常重要的意义。

本书作者近十年来在国家自然科学基金资助下，围绕沥青混合料黏弹塑本构关系、考虑材料随机性和异质性的数值建模方法以及开裂和车辙变形行为的数值模拟等开展了大量的研究工作。本书就是对这些研究工作的总结，可供从事高等级公路设计、施工和研究的人员，以及大专院校力学、道路工程等相关专业教师和研究生参考使用。为了使读者查阅和引用方便，每章后都列出了与该章内容密切相关的参考文献。

作者特别感谢华中科技大学陈传尧教授对本书的贡献，他的很多研究思想都体现在本书的相关研究工作之中。同时，作者十分感谢吴俊、高虎、张川川、冯伟干、王习武、徐瑞、尚晋、杨圣枫、张晓明、陈龙、韩康文、唐鹏和程一磊等已经毕业或仍然在读的博士和硕士研究生们，他们的工作为本书有关章节提供了宝贵的材料。作者还要感谢华中科技大学力学系 2015 级的研究生，特别是胡健和江文凯，他们承担了书稿的一部分校对工作。

由于作者水平有限，不当之处在所难免，希望读者不吝指正。

作 者

2016 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 沥青混合料的基本力学性质	1
1.1.1 黏弹塑力学行为描述	1
1.1.2 长期力学性能表征	3
1.2 沥青混合料的破坏分析	4
1.2.1 开裂分析	4
1.2.2 车辙分析	9
1.3 本书的主要内容	10
参考文献	11
第 2 章 基本材料实验	15
2.1 实验材料和试件	15
2.1.1 实验材料	15
2.1.2 混合料类型	17
2.1.3 试件制作	19
2.2 主要实验设备	22
2.2.1 短期力学性能实验装置	22
2.2.2 长期力学性能实验装置	22
2.2.3 单轴拉伸实验装置	24
2.3 常应变率压缩实验	24
2.3.1 实验步骤	24
2.3.2 压缩性能评价指标	25
2.3.3 典型的载荷-变形曲线	25
2.3.4 理想级配沥青混合料和 AC-13C 沥青混合料压缩力学性能的比较	25
2.4 常应力简单蠕变实验	26
2.4.1 实验方法和步骤	26
2.4.2 蠕变特性评价指标	27
2.4.3 典型的简单蠕变曲线	27
2.4.4 理想级配沥青混合料和 AC-13C 沥青混合料蠕变特性比较	27

2.5	蠕变回复实验	28
2.5.1	实验方法	28
2.5.2	典型的蠕变回复曲线	29
2.6	直接拉伸试验	30
2.6.1	实验方法	30
2.6.2	典型的沥青砂拉伸应力-应变曲线	30
2.7	长期蠕变实验	32
2.7.1	实验方法	32
2.7.2	典型的长期蠕变应变曲线	32
	参考文献	33
第3章	微分和积分型的黏弹塑本构关系	34
3.1	描述材料黏弹塑性的三个基本元件	34
3.1.1	弹性元件	34
3.1.2	塑性元件	34
3.1.3	黏性元件	34
3.2	几个基本的黏弹性力学模型	35
3.2.1	Maxwell 模型	35
3.2.2	Kelvin 模型	35
3.2.3	Zener 模型	36
3.2.4	Burgers 模型	36
3.3	弹-黏弹-黏塑性本构模型	37
3.3.1	物理模型	37
3.3.2	模型 1	38
3.3.3	模型 2	39
3.3.4	模型 3	40
3.4	弹塑-黏弹-黏塑性本构模型	40
3.4.1	物理模型	40
3.4.2	本构方程	41
3.5	修改的 Schapery 模型	42
3.5.1	Schapery 非线性黏弹模型	42
3.5.2	修改的 Schapery 本构方程	43
3.5.3	数值求解方法	44
3.6	理想级配沥青混合料单轴压缩蠕变行为预测	46
3.6.1	实验设计	46
3.6.2	模型参数确定	46

3.6.3 模型预测及分析	53
参考文献	54
第 4 章 损伤本构关系	56
4.1 损伤的基本概念	56
4.2 基于 Uzan 模型的黏弹塑蠕变损伤本构模型	57
4.2.1 基本方程	57
4.2.2 参数确定	58
4.2.3 蠕变过程中的黏塑性应变和损伤演化	60
4.2.4 进一步的讨论	62
4.3 基于曹树刚模型的黏弹塑蠕变损伤本构模型	62
4.3.1 基本方程	62
4.3.2 参数确定	62
4.3.3 蠕变变形和损伤分析	63
4.4 低温下的三维弹脆性损伤本构模型	65
4.4.1 损伤本构关系	65
4.4.2 损伤演化模型	66
4.4.3 参数的确定	66
参考文献	66
第 5 章 随机黏弹塑性本构关系	68
5.1 基本模型	68
5.2 实验设计	70
5.3 模型参数的确定	72
5.3.1 非随机参数的确定	72
5.3.2 随机参数的确定	77
5.4 预测和验证	78
5.4.1 概率区间预测	78
5.4.2 模型验证	79
5.5 橡胶颗粒的改性分析	83
参考文献	84
第 6 章 长期力学性能表征	86
6.1 Cross 黏弹性本构模型	86
6.1.1 基本模型	86
6.1.2 时间-温度等效原理	87

6.1.3	应力-应变率主曲线	87
6.2	Cross 模型的验证	89
6.2.1	参数确定	89
6.2.2	模型验证	94
6.3	修正的 Cross 黏弹性本构模型	95
6.4	考虑大变形的长期力学性能表征	96
6.4.1	基本公式	96
6.4.2	参数确定	99
6.4.3	模型验证	103
6.5	配置法求解第二类 Volterra 积分方程	104
	参考文献	108
第 7 章	基于细观力学方法的有效力学性质预测	110
7.1	基本方法和思路	110
7.1.1	均匀化处理	110
7.1.2	弹性-黏弹性对应性原理	111
7.1.3	研究思路	112
7.2	Eshelby 等效夹杂方法	113
7.2.1	基本公式	113
7.2.2	预测与结果分析	115
7.3	自洽方法	118
7.4	广义自洽方法	119
7.5	界面效应的考虑	121
7.5.1	几种主要的界面模型	121
7.5.2	线弹簧界面模型	122
	参考文献	123
第 8 章	开裂和车辙实验	125
8.1	实验材料	125
8.1.1	沥青	125
8.1.2	集料	125
8.2	三点弯曲实验	126
8.2.1	试件制备	126
8.2.2	实验方法	126
8.2.3	实验结果	127
8.3	半圆弯曲实验	128
8.3.1	试件制备	129

8.3.2	实验方法	129
8.3.3	实验结果	130
8.4	直接剪切实验	131
8.4.1	实验装置设计	132
8.4.2	试件制备	132
8.4.3	实验方法	133
8.4.4	实验结果	134
8.5	室内往复车辙实验	136
8.5.1	试件制备	136
8.5.2	实验步骤	137
8.5.3	实验结果	137
	参考文献	139
第9章	数值建模方法	140
9.1	材料的简化	140
9.2	图像处理方法	141
9.2.1	基本方法	141
9.2.2	二维模型创建实例	142
9.3	三维随机格形模型	143
9.3.1	模型和方法	143
9.3.2	在沥青混合料有效力学性质分析中的应用	145
9.4	随机骨料生成和投放技术	145
9.4.1	骨料生成	145
9.4.2	骨料投放	147
9.4.3	实例	148
9.5	简化的随机骨料生成和投放技术	148
9.5.1	球形骨料的生成和投放	148
9.5.2	振荡过程	150
9.5.3	球形骨料向多面体骨料的转化	150
9.6	多尺度建模方法	152
	参考文献	154
第10章	开裂的数值模拟	156
10.1	开裂准则	156
10.1.1	最大周向拉应力准则	156
10.1.2	法向最大接触力准则	156

10.1.3	损伤断裂准则	157
10.1.4	黏聚带模型	158
10.2	单轴拉伸断裂	159
10.2.1	二维数值模拟	159
10.2.2	三维数值模拟	163
10.3	直接剪切断裂	167
10.3.1	计算模型	167
10.3.2	在 5℃ 下的开裂	168
10.3.3	在 -20℃ 条件下的开裂	172
10.4	三点弯曲断裂	173
10.4.1	宏观结合的多尺度模拟	173
10.4.2	与数字图像技术结合的离散元模拟	177
10.5	半圆弯曲断裂	180
10.5.1	计算模型	180
10.5.2	结果和讨论	180
	参考文献	183
第 11 章	车辙的数值模拟	185
11.1	黏弹塑性材料模型	185
11.2	数值求解方法	187
11.2.1	求解方法	187
11.2.2	有限元计算格式	188
11.3	温度和轮载对车辙变形的影响分析	189
11.3.1	计算模型	189
11.3.2	计算验证	190
11.3.3	温度对车辙变形的影响	191
11.3.4	轮载对车辙变形的影响	194
	参考文献	197

第 1 章 绪 论

近年来,随着国民经济的高速发展,我国公路交通建设也进入了史无前例的快车道。自 1988 年沈大高速公路与沪嘉高速公路建成通车以来,我国的公路交通建设跨进了以高等级公路建设为主的新时代。截至 2015 年年底,我国高速公路通车总里程达到 10.8 万 km,已远超美国,高居世界第一。

沥青路面具有良好的行车舒适性和优异的使用性能,易于建设和维护,因此在高速公路建设中,大量采用了沥青路面。作为路面建筑材料,沥青混合料的质量好坏决定着沥青路面的使用性能和寿命^[1]。众所周知,沥青混合料由沥青、矿粉和粗细骨料等拌合而成,成分分布随机,物理力学性质受温度影响大。沥青路面在长期的车载作用和环境影响下,容易发生早期破坏,如高温下的车辙和低温下的开裂,从而劣化材料路用性能,影响行车安全^[2]。因此,开展沥青混合料基本力学和破坏行为研究,合理优化沥青混合料的组成和结构,对于提高路面工程质量,改善行车舒适性和安全性,具有重要的科学和工程意义。

1.1 沥青混合料的基本力学性质

1.1.1 黏弹塑性学行为描述

作为多相混合材料,沥青混合料各组分材料类型及其配合比对其力学性质具有重要影响,如沥青类型、碎石骨料类型、骨料含量、骨料级配、孔隙率等。组分材料中,沥青是典型的黏弹塑性材料,其力学性能受温度的影响特别明显;而和沥青相比,骨料要硬很多,一般认为属于弹性或拟刚性材料。因此,沥青混合料的力学行为受温度的影响很大。在低温小变形范围内接近线弹性,在高温大变形范围内以黏塑性为主,而在通常温度的过渡范围内则主要表现为黏弹性。除此以外,加载速率对沥青混合料的力学行为也有重要的影响。

由于影响因素众多,对沥青混合料力学行为的研究难度很大。在国内,徐世法等^[3]较早采用了“四单元、五参数”的修正的 Burgers 模型,近似描述沥青混合料的受力变形规律,通过单轴蠕变实验确定模型中的系列参数,给出沥青路面车辙的经验或半经验预估方法。黏弹性的 Burgers 模型及其修正模型形式简单,非常方便实用,一直到最近仍然受到国内学术界和工程界的关注^[4-6]。但是由于这类模型只包含弹性和黏弹性两种变形行为,与沥青混合料的实验结果(特别是较高温度和低应变率下的实验结果)很难符合,其应用的可靠性值得怀疑。大量的实验

已经证实, 沥青混合料是一种黏弹塑性材料, 其力学行为需要采用黏弹塑本构关系进行描述。Sides 等^[7]通过对受压缩和拉伸循环载荷作用的沥青砂试样的残余应变分析, 认为材料的总变形可以根据时间依赖性和卸载过程中的可恢复性分解为弹性、塑性、黏弹性和黏塑性变形四个部分, 并且采用 Hooke 定律描述弹性变形, 采用应力和载荷重复次数的指数模型描述塑性变形, 采用带有不同参数的应力和时间指数模型分别描述黏弹性和黏塑性变形, 模型中的参数通过一系列重复的单轴蠕变和蠕变恢复实验确定。这种通过变形分解的方式建立沥青混合料本构关系的方法, 无疑使问题的复杂性大大简化, 为沥青混合料本构模型的研究提供了强有力的武器。在此基础上, Sousa 和 Weissman^[8]较早地考虑了影响沥青混合料车辙变形的多种因素, 如应变率、温度、拉伸和压缩响应差异、孔隙率等, 采用等向强化的 Mises 屈服准则, 提出了一个非线性黏弹塑本构模型, 并且通过一系列剪切实验确定模型参数, 最后采用有限元方法实现了沥青路面的车辙变形分析。分析结果表明, 这一模型可以解释车辙变形过程中的许多复杂现象。Lu 和 Wright^[9]采用 Sides 等的方法, 将塑性变形合并到黏塑性变形中, 从而把沥青混合料的变形分为弹性、黏弹性和黏塑性变形, 同样采用 Hooke 定律描述弹性变形, 采用应力和时间的指数模型描述黏弹性变形。但是与 Sides 不同的是, 他们采用 Perzyna 黏塑性理论描述黏塑性变形, 而这一理论与经典塑性理论的不同就在于采用率相关流动法则替换了经典塑性流动法则。Seibi 等^[10]采用单轴、三轴和模拟路面实验等研究了高加载速率下沥青混合料的变形规律, 将变形分解为弹性和黏塑性两部分, 采用带有 Drucker-Prager 屈服准则的 Perzyna 黏塑性理论描述黏塑性变形, 提出了一个适合描述高加载速率的沥青混合料本构模型。Huang 等^[11]同时考虑温度和加载速率的影响, 提出了一个热黏塑性模型, 并且通过在三种温度下的系列三轴蠕变实验, 确定模型中的材料参数。彭妙娟和许志鸿^[12]通过在广义的 Maxwell 模型基础上串联一个弹塑性模型, 提出了一个非线性的黏弹-弹塑性模型, 模型中采用 Mises 屈服准则和随动强化模型, 分析了不同沥青混合料的路面车辙深度, 并与相关文献的计算结果进行了比较。Gonzalez 等人^[13]也假设沥青混合料的响应具有强烈的应变率依赖性, 建立了一个黏塑性本构模型, 模型中的杨氏模量和黏性参数被假设是应变率和温度的函数, 函数的形式根据实验结果确定。利用有限元方法, 这一本构模型被成功应用于对柔性路面结构响应的模拟。上述关于沥青混合料黏弹塑本构模型的研究工作, 在国内沥青路面的车辙分析中已经开始得到应用。例如, 张久鹏等^[14]采用黏弹塑性本构关系, 建立了柔性基层沥青路面车辙分析的有限元模型, 初步研究了路面车辙发展的规律; 张洪信等^[15]也采用带有 Mises 屈服准则的黏弹塑本构模型研究了环胶州湾公路部分路段车辆一次通过时的车辙深度。

从上面的分析和总结可以看出, 有关沥青混合料黏弹塑本构模型的研究已经

并正在取得重要的进展。但是值得我们注意的是, 沥青混合料是多相复合材料, 骨料的形状及其在沥青中的空间位置分布都是随机的, 骨料体积比、骨料级配、骨料分布和骨料取向等组成和微结构因素对沥青混合料力学性质具有重要影响, 然而这些因素在上述模型中鲜有考虑。这主要因为上述工作都是以唯象描述方法为基础针对某种给定级配的沥青混合料开展研究, 不可能反映级配变化对材料力学性能带来的影响, 即使如 Masad 等^[16]关注到微结构的影响, 也只能通过引进单一的参数进行定性的描述, 不能较客观地反映复杂的真实情况, 所以建立的本构模型无法适用于沥青混合料骨料级配发生变化的情况, 难以在沥青混合料骨料级配优化设计上发挥作用。建立考虑材料随机性和微结构效应的本构模型显得非常重要。

1.1.2 长期力学性能表征

时间相关性是黏弹性材料力学行为的一个基本特征, 这一特征的本质在于黏弹性材料普遍存在一种内部时钟或特征时间, 这是以材料短期蠕变实验预测其长期力学行为的基础^[17]。时间-温度等效原理认为存在时间和温度在材料性能表征方法中的等效性, 对于同一个力学松弛现象, 既可以在较高的温度和较短时间的受力后观测到, 也可以在较低的温度和较长时间的负荷后表现出来。这表明延长加载时间和升高温度对力学松弛现象带来的效果可以是等效的。和时间温度等效的情况类似, 一些研究人员在随后的研究中发现并证实了时间-应力等效原理的存在^[18], 并进一步与时间-温度等效原理相结合, 发展了时间-温度-应力等效原理^[19]。随后, 这些原理在聚合物^[20]、混凝土^[21]等许多材料长期力学行为的研究和预测中获得了广泛的应用。

近年来, 为了能够定量地描述温度对沥青混合料力学性质的影响, 许多学者开始借助时间-温度等效原理建立考虑温度效应的沥青混合料黏弹塑性本构关系。例如, Chailleux 等^[22]对纯沥青和三种不同类型填充物的沥青结合料进行了不同温度条件下的动态剪切实验, 并由时间-温度等效原理, 构造了纯沥青和三种不同类型沥青结合料的复模量主曲线。Schwartz 等^[23]将沥青混合料的大变形分解为黏弹性变形、黏塑性变形和由损伤引起的变形三个部分, 通过不同类型的蠕变恢复实验证实时间-温度等效原理同样可以适用于描述大压缩变形 (大于 $100\mu\epsilon$) 条件下的沥青混合料的力学行为。这些工作拓展了时间-温度等效原理的应用领域, 同时表明, 借助时间-温度等效原理或者时间-温度-应力等效原理开展沥青砂长期蠕变行为研究是可行的。

采用短期实验结果预测的材料长期力学特性是否合理, 需要通过实验来进行检验, 这就需要开展材料的长期蠕变实验。因此尽管长期蠕变实验需要消耗大量人力物力, 有限的长期蠕变实验有时候仍然是必需的。值得关注的是, 日本材料

物质研究中心已经开展了许多材料的长期蠕变实验,其中大部分的实验都超过 10^5 小时(约 11.4 年),最长的达到 330 000 小时(约 37.6 年),以获取材料蠕变断裂和应变的数据。利用这些数据, Sawada 等^[24]检验了几种描述金属材料长期蠕变变形的方程,发现幂方程对几种钢材长期蠕变的所有三个阶段都拟合得很好。东京大学的 Okubo 等^[25]从 1994 年春季开始在浸水状态下对凝灰岩施加达到材料极限强度 30%的蠕变载荷,开展了两组分别长达 2.5 年和 12 年的单轴长期蠕变实验,并将实验结果与之前开展的高载荷(材料极限强度的 63%~82%)下的短期蠕变实验进行了对比,发现蠕变变形以与时间的 0.1 次幂成正比的趋势增长。董建新等^[26]报道了 Udimet500 合金在 800℃和 900℃高温以及 53MPa、69MPa、137MPa、156MPa、235MPa、274MPa 等不同应力条件下长达 20 000 多小时的长期蠕变行为,结合显微组织分析揭示了合金高温蠕变的内在机制。车辙变形反映的是沥青路面在轮载反复作用下积累的一种长期的永久变形,沥青混合料在不同温度和载荷条件下的长期变形特性才是决定沥青路面车辙抵抗能力的关键。因此,研究沥青混合料的长期力学性能及其行为表征,对于研究和解决沥青路面的车辙问题显得尤为重要。

1.2 沥青混合料的破坏分析

1.2.1 开裂分析

沥青路面具有无接缝、平整度好、噪声低、行车舒适、对交通工具磨损小、施工周期短、维修养护方便等优点,在我国高等级公路和城市道路中得到了广泛的应用。然而,随着使用年限的增长,沥青路面面层往往出现各种各样的灾害,包括路面开裂、泛油、面层离析、车辙等,严重影响道路的使用性能、服役寿命和管养成本。其中路面开裂是最主要的破坏形式之一,危害也最大,如何减缓、减少甚至消除路面开裂现象是理论和工程界所面临的亟待解决的重要问题。路面开裂的主要形式有:疲劳开裂,包括自顶向下和自底向上两种;温度开裂;反射开裂。这些裂纹可以归类为 I 型、II 型,以及 I、II 混合型裂纹三种。研究沥青混合料开裂行为,分析控制裂纹起裂和扩展的主要因素,掌握开裂发生发展的内在力学机制,是优化路面材料和结构设计、改善路面抗裂性能的一个关键步骤,近年来已经成为国内外一个重要的研究热点^[27]。

从 20 世纪 70 年代早期开始,一些学者开始关注到路面结构的开裂破坏问题,最直接和有效的研究工作当然是实验。由于材料的异质性和随机性,单轴拉伸加载条件下试件很容易在夹持部位发生破坏,采用直接拉伸加载方式实现沥青混合料 I 型裂纹扩展的实验难度比较大,目前还鲜有人开展。作为替代,单边切口梁成为沥青混合料 I 型断裂实验中最常用的一种试件。它有两个优点:一是试件尺

寸容易调整,以保证裂尖前沿拥有足够的包含断裂过程区的韧带区域。沥青混合料断裂过程区尺寸依赖于温度、载荷速率、最大骨料尺寸、空隙率、胶浆含量及其韧性等参数。为保证实验结果的统计有效性,试件尺寸的最小值一般要求是最大骨料粒径的3~4倍^[28]。二是通过控制切口位置比较容易实现I型裂纹(切口位于梁跨中)和I、II混合型裂纹(切口偏离梁跨中)的断裂行为研究。混合型断裂对于沥青混合料路面的断裂分析来说是非常重要的,因为路面结构承受的关键性载荷主要是温度载荷(拉伸)和轮载(弯拉和剪切)的组合。因此,混合型断裂测试是路面结构抗开裂研究所必需的,也是在未来的相关研究中需要重点发展的。为了得到沥青混合料的断裂性能,Wagoner等^[29]提出了一套单边切口梁的三点弯曲实验方案,在实验过程中较好地实现了对加载、测试和裂纹发展的控制,实验的可重复性也较好。Yin等^[30]设计了跨中切口、偏中20mm和偏中40mm切口等3组单边切口梁试件,在5℃条件下施加三点弯曲载荷,记录梁的荷载-位移曲线和裂纹扩展路径,分析了切口位置对裂纹扩展路径的影响。

由于制作简便,半圆弯曲试件通常被用来代替单边切口梁试件执行三点弯曲开裂实验。刘敬辉等^[31]在MTS系统上进行了3种级配的带预切口的沥青混合料半圆弯曲试件25℃条件下的三点弯曲实验,记录了荷载-位移曲线,再计算达到最大荷载时曲线下的面积,得到试件破坏时吸收的能量,进一步计算了沥青混合料的断裂韧度。Li和Marasteanu^[32]将声发射技术和半圆弯曲实验结合起来获得了沥青混合料断裂过程区域的一些相关信息。值得注意的是,Wagoner等^[33]的研究表明直径150mm的半圆弯曲试件可能存在断裂韧带较短的缺点,不利于获得材料可靠的断裂性质,而且裂纹扩展可能引起一种弓形弯曲效应,进一步缩减有效韧带区域面积,甚至可能导致测试结果无效。

紧凑拉伸也是沥青混合料断裂能的一种常用测试手段,并且以圆盘型紧凑拉伸试件比较常见,因为这种试件可以运用Superpave旋转压实器制备。Wagoner等^[33]在沥青混合料紧凑拉伸断裂实验方面做出了一些开创性的工作。他们在金属材料紧凑拉伸试件的基础上,通过增大试件厚度和减小切口深度增大试件韧带面积,同时通过适当调整加载孔位置以防止试件在加载孔附近失效,分别在-20℃、-10℃和0℃的温度条件,10mm/min、5mm/min、1mm/min和0.1mm/min的位移加载速率下开展了紧凑拉伸实验,获得了荷载-裂纹嘴张开位移曲线和裂纹扩展路径,进一步分析了不同试件开裂路径出现偏差的可能原因。

最近,陈拴发^[34]根据剪切型反射裂缝的形成机理,设计并开展了沥青混合料长方体试件的直接剪切实验。实验时,试件放在剪切试模内,保持左侧上下钢板右端在一条直线上,通过左侧顶部的螺栓固定钢板将试件压紧,试件右侧加载头通过钢板施加载荷。张舒畅^[35]设计了针对圆柱体试件的剪切加载装置,利用电液伺服疲劳试验机,在25℃条件下开展了沥青混合料层间剪切疲劳试验。

尽管实验研究可以提供对路面结构开裂机理的直观认识,并且已经取得很多成果,但是由于存在下面的缺点,单纯的实验研究还是存在很大的局限性:①试件制作成本高,实验周期长;②由于骨料分布、取向等的随机性,实验的可重复性不高;③断裂过程区域监测、裂纹萌生扩展细节观测等很困难;④受高成本限制,考虑材料随机性的统计分析非常困难。为此,需要在实验研究的基础上,发展适合沥青混合料材料特点的理论和数值分析方法,并将实验研究的结果和结论作为检验理论和数值分析方法可靠性的依据。

Majidzadeh 等^[36]较早将断裂力学的概念引入到路面领域,此后断裂力学理论和方法在刻画和预测路面开裂方面得到了广泛的应用。然而,传统的断裂力学方法在解决沥青混合料开裂问题时遇到了难以克服的困难。传统断裂力学理论以材料均匀连续假设为基础,而且由于采用弹性本构模型,在裂纹尖端不可避免地发生应力奇异现象。事实上如前所述,沥青混合料属于非均匀材料,在细观尺度上具有由沥青基质、粗细骨料等组成的复杂几何形态和内部结构,从而导致其在断裂过程区域的行为非常复杂,采用宏观均匀的材料模型常常给出不正确的甚至是错误的开裂路径和行为预测,而且在实验中也观察不到裂纹尖端的应力奇异现象。

为了克服采用传统断裂力学方法研究沥青混合料开裂问题所遭遇的困难,必须结合现代先进的实验和数值计算技术,研究和发​​展针对沥青混合料组成和结构特点的数值分析方法,以便更真实地模拟和刻画沥青混合料的断裂特征和行为。要实现这样的目标,首先需要解决考虑沥青混合料组成和结构特点的异质模型创建方法。目前,用于建立沥青混合料两相异质模型的方法主要有两种,即数字图像方法和参数化建模方法。

沥青混合料中细骨料(含矿粉)的体积分数虽然不大,但是其颗粒个数却是粗骨料的数万倍,甚至更多。如果考虑完全级配,不可避免地会出现模型真实性和计算效率之间的矛盾。因此必需对材料进行必要的简化。目前通行的做法是,把数量庞大的细骨料和沥青放到一起,组成一种被认为力学性质均匀的沥青砂,作为基体,而粗骨料则作为增强相,将沥青混合料看作是由沥青砂和粗骨料两种材料组成的两相复合材料。由此可以在数值模型中忽略细骨料,有效降低模型单元规模,大大减小计算量。

粗细骨料的界限根据图像识别的精度和数值计算的效率决定。Zhu 和 Nodes^[37]根据动态剪切流变实验的结果将粗细骨料的截断尺寸定义在 1.18mm。而 You 和 Buttlar^[38]在采用离散元方法分析给定温度和加载频率范围的沥青混合料拉伸/压缩复模量时,则建议将粒径小于 2.36mm 的骨料归类为细骨料。Bandyopadhyaya 等^[39]在采用实验并结合数字图像技术研究沥青混合料的受压破坏行为时,考虑到粒径小于 2.36mm 尺寸的骨料难以识别,也将粗细骨料的截断尺寸定义在 2.36mm。Li 和 Metcalf^[40]从计算效率的角度考虑,将粒径小于 4.75mm 的所有骨料作为细骨料,

采用数值方法预测了沥青混合料的有效模量，并与实验结果进行了比较。

数字图像方法根据数码相机、CT 设备等获取的沥青混合料断面照片、CT 影像等，采用图像识别和处理技术建立材料的二维或三维几何模型，通常包括图像获取、二值化处理和图像矢量化等步骤。彭勇等^[41]为了探讨沥青混合料均匀性的定量表征方法，采用数字图像处理技术对获得的一组沥青混合料试件截面照片进行图像识别和处理，研究了混合料中集料的分布状态。Kuo 等^[42]利用数字图像技术定量分析了几种不同种类型粗骨料的形态特征。近年来，数字图像技术常和离散元方法、有限元方法等数值计算技术结合起来，用于分析包含组成和内部结构信息的沥青混合料力学行为。Kim 等^[43]、Li 和 Marasteanu^[32]、Arogao 等^[44]就先后采用数字图像技术结合离散元方法研究和分析了沥青混合料的裂纹扩展行为。刘敬辉等^[31]则采用数字图像技术结合有限元方法分析了三点弯曲加载下带预切口的沥青混合料半圆弯曲梁的裂纹扩展行为。采用数字图像方法建立的几何模型来源于实验室制作的试件，非常真实，可以反映实际的骨料形状、分布和配比，然而早期的模型大多是二维的，开展力学行为分析需要假设问题满足平面应力或平面应变条件，而且骨料含量、分布等微结构信息严重依赖于所选取的断面，具有明显的局限性。近年来，人们开始尝试利用数字图像技术创建沥青混合料的三维数值模型。彭兴坤和琚晓辉^[45]利用专用的 CT 设备对制备的沥青混合料试件进行分层扫描，通过数字图像处理技术对试件冻融劈裂前后图像的变化进行分析，从空隙率、胶浆和粗骨料面积等几个方面揭示了试件内部冻融劈裂前后的微结构变化规律。You 等^[46]利用 X 射线 CT 数字图像技术获得试件中骨料、沥青砂空间位置分布等内部结构信息，以骨料弹性模量和实验获得的沥青砂动态模量为输入参数，通过二维和三维离散元数值模拟，预测了单轴压缩载荷下沥青混合料动态模量。Zhang 等^[47]也采用 X 射线 CT 数字图像技术建立了由粗骨料、沥青砂和气孔组成的沥青混合料三维数值模型，结合有限元方法模拟了沥青混合料的黏弹性行为。尽管随着计算机技术的快速发展，数字图像技术日益成熟，然而，采用数字图像技术创建沥青混合料随机的异质结构模型，需要事先在实验室制备出符合要求的沥青混合料试件，并进行多次切割获取断面照片或进行分层扫描获取 CT 影像，操作步骤非常复杂，耗费的时间太多，成本非常高。

如果能够通过给定一些组成和特征结构参数，自动完成随机骨料的生成和投放，获得满足预期要求的沥青混合料数值模型，就可以大大提高模型创建效率，而且还可以有效减少研究费用，这就是参数化建模方法。参数化建模方法的关键是要保证建立的几何模型能够准确反映沥青混合料的细观组成和结构信息，同时模型创建的成功率和效率也比较高。最简单的参数化建模方法是格形化方法^[48]。Yang 等^[49]借用该方法，将给定尺寸的试样模型划分为形状和大小完全相同的有限单元，每个单元看成是均匀的各向同性材料，根据体积比随机地将一部分单元投