



动荷载作用下 沥青路面响应及破坏分析

胡朋 / 著

Under Dynamic load
Response and Failure Analysis of
Asphalt Pavement

论丛



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

动荷载作用下 沥青路面响应及破坏分析

胡 朋 / 著

Under Dynamic load

Response and Failure Analysis of
Asphalt Pavement



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

内 容 提 要

本书是依据交通运输部应用基础研究项目“大型 MTS 模拟车辆动荷载激励下沥青路面动力响应及破坏机理研究”和“基于双轴加速加载试验的沥青路面疲劳损坏演变规律研究”所取得成果编写而成。本书从理论和试验两个方面系统分析了车辆动荷载特征,在此基础上采用大型 MTS 和加速加载设备进行了典型沥青路面动态响应试验和沥青路面疲劳破坏研究,分析了动荷载作用下沥青路面的动态响应,提出了变应变条件下的沥青路面疲劳破坏方程,给出了车辙预测模型。

本书提供了大量的试验数据和新颖的试验研究方法,对试验过程中的细节描述较多,对从事沥青路面动力响应、沥青路面疲劳破坏研究的技术人员具有一定的参考价值。可供从事公路工程行业的研究人员和工程技术人员及高校教师和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

动荷载作用下沥青路面响应及破坏分析/胡朋著

—北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.3

ISBN 978-7-114-13761-7

I. ①动… II. ①胡… III. ①轴载—作用—沥青路面—冲击响应—载荷分析 IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 080169 号

书 名:动荷载作用下沥青路面响应及破坏分析

著 作 者:胡 朋

责任编辑:王 霞 李 娜

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.ccpress.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:北京市密东印刷有限公司

开 本:720×960 1/16

印 张:9.75

字 数:170 千

版 次:2018 年 3 月 第 1 版

印 次:2018 年 3 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-13761-7

定 价:48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

序

PREFACE

高等级公路上行驶的车辆速度高,在其路面结构响应分析时,应该考虑动荷载和路面材料的时间效应。20 世纪 80 年代开始欧美道路工作者就试图建立动荷载作用下路面设计理论和方法,近 20 年来,国内研究者也开展了这方面的研究工作。鉴于问题的复杂性,至今还没能建立全面考虑荷载动态特性的路面设计规范。

动荷载是随机的、交变的,具有瞬态性和次序相关性。路面材料的动态特性和破坏特性与行车速度密切相关。研究动荷载下沥青路面的结构行为,首先应通过简单的假设建立起理论框架,通过严谨的逻辑推理,推导出合理的结论;然后精心设计试验进行材料动态参数测试和动强度测试,最后结合大量现场实时观测资料把理论和工程实践有机地结合在一起。把车辆与道路作为一个整体进行研究,既可以优化路面设计,也可以优化车辆设计。研究不同动荷载作用下的沥青路面结构响应,有助于建立考虑荷载动态特性的路面设计方法。

青年学者胡朋博士对道路工程研究充满热情,敢于创新,认真踏实,经过不懈努力,在动荷载和动荷载作用下沥青路面结构响应分析及测试方面取得了系列成果,经悉心整理,著作成册。书中理论分析和试验研究并重,概念展开循序渐进,叙述清晰,编排合理,结构严谨,系统全面,其研究成果将裨益于道路工程技术人员和研究人员理解动荷载的特性及动荷载作用下沥青路面结构行为。可以相信,本书的出版将对道路工程专业教学及科研工作产生推动作用。

郑传超

2017 年 2 月于西安

前言

FOREWORD

改革开放以来,我国高速公路发展迅速,仅用短短十几年的时间就赶上了国外发达国家将近半个世纪的建设业绩。根据交通运输部发布的 2015 年交通运输行业发展公报,目前全国等级公路里程 404.63 万公里,高速公路里程 12.35 万公里,其中,国家高速公路 7.96 万公里,全国高速公路车道里程 54.84 万公里。

公路建设尤其是高速公路为车辆快速、高效、安全和舒适地运行提供了良好的条件,促进了汽车工业的迅猛发展。为满足日益增长的交通需求,车辆的超载超速现象也越来越普遍,许多地区运输车辆的轴重已远远大于国家的相关标准规定。车辆荷载是造成路面出现早期损坏、影响路面使用寿命和服务能力的关键因素之一。这种影响主要表现在两个方面:超载和动态荷载。超载引起路面的破坏已经引起足够的重视,而且也进行了大量的研究,然而对动荷载及其破坏效应却研究不足。

本书是依据交通运输部应用基础研究项目所取得成果编写而成,侧重于试验研究方法和研究过程的介绍,兼顾理论研究。利用自主研发的车辆轮轴动荷载测量仪测试了货车的轮轴竖向振动特征,进行了频谱分析,给出了车辆轮轴竖向振动在频域内的特征。在《基于双轴加速加载试验的沥青路面疲劳损坏演变规律研究》研究项目中,利用自主研发的加速加载设备进行了路面加速加载试验,分析了动荷载作用下沥青路面的动态响应,提出了变应变条件下的沥青路面疲劳破坏方程,给出了车辙预测模型。然而,加速加载试验周期长,耗用经费高,广泛推广应用难度较大。我们尝试使用大型 MTS 进行路面结构动态响应和疲劳破坏的研究方法,进行了不同路面结构的动态响应,得到了一些研究成果和结论。为了将这些研究成果和广大同行进行交流和探讨,才有了编写本书的初衷。

本书共分 7 章。第 1 章为绪论,主要介绍我国公路建设中出现的早期病

害,形成的原因分析;第2章为路面不平度引起车辆动荷载的研究,主要从理论上进行分析车辆竖向振动特征,研究动荷载大小;第3章为车辆轮轴竖向振动特征试验研究,主要开展了大型货车和小型货车的车辆轮轴竖向振动特征试验研究,分析了其时域和频域特征;第4章为模拟车辆动荷载作用下沥青路面动态响应研究,主要利用大型 MTS 模拟车辆动荷载进行不同路面结构的动态响应研究;第5章为加速加载条件下半刚性基层沥青路面动态响应研究,主要利用加速加载设备进行路面结构动态响应研究和疲劳破坏试验研究;第6章为基于加速加载试验的沥青路面疲劳模型研究,主要是针对柔性基层的加速加载试验成果进行分析,提出了变应变条件下的沥青路面疲劳破坏模型;第7章为车辆动荷载作用下路面动态响应仿真分析,本章中建立了有限元模型,利用材料的动态模量,仿真分析了动荷载作用下沥青路面结构响应。本书第1章、第2章由山东交通学院胡朋编写,第3章由山东交通学院胡朋和烟台市莱州公路管理局李岩涛编写,第4章由山东交通学院胡朋、赵之仲编写,第5章由山东交通学院胡朋和烟台市莱州公路管理局刘晓编写,第6章、第7章由山东交通学院胡朋、庄传义编写。

本书在完成过程中,得到交通运输部应用基础研究项目《大型 MTS 模拟车辆动荷载激励下沥青路面动力响应及破坏机理研究》和《基于双轴加速加载试验的沥青路面疲劳损坏演变规律研究》课题组的大力支持和帮助,在此向课题组的主要成员唐勇、李晋、邢德进、赵之仲、郭德栋、庄传义表示衷心感谢。

限于作者水平有限,书中错误在所难免,同时本书编写初衷也是以交流探讨为目的,希望广大读者批评指正。

编 者

2017 年 2 月于济南

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 我国沥青路面发展面临的问题	1
1.2 车辆动荷载	7
1.3 动荷载国内外研究现状	8
本章参考文献	10
第2章 路面不平度引起车辆动荷载的研究	12
2.1 路面平整度的定义及测评方法	12
2.2 随机振动与车辆振动模型	16
2.3 二自由度车辆振动模型及动荷载的计算	21
2.4 五自由度车辆振动模型及动荷载的计算	25
2.5 考虑动荷载影响的当量轴载换算理论分析	35
2.6 本章小结	39
本章参考文献	40
第3章 车辆轮轴竖向振动特征试验研究	43
3.1 车辆轮轴竖向振动加速度和动荷载的关系	43
3.2 车辆轮轴动荷载测量仪	44
3.3 车辆轮轴振动测试	46
3.4 轮轴振动时域特征分析	47
3.5 车辆轮轴振动加速度频域分析原理	53
3.6 车辆轮轴振动加速度功率谱密度	53
3.7 基于车辆轮轴竖向振动现场试验的当量轴载换算分析	58
3.8 本章小结	60
本章参考文献	61
第4章 模拟车辆动荷载作用下沥青路面动态响应研究	63
4.1 路面结构模型	64
4.2 传感器选型与埋设	76

4.3	模型安装与加载压头设计	78
4.4	压头接地面积和接地压强	79
4.5	加载方案与数据采集	81
4.6	试验数据	83
4.7	荷载大小对沥青面层应变的影响	86
4.8	荷载大小对基层层底拉应变的影响	88
4.9	荷载频率对面层层底应变的影响	89
4.10	温度对沥青面层应变的影响	91
4.11	纵横向应变的差异分析	92
4.12	本章小结	92
	本章参考文献	92
第5章	加速加载条件下半刚性基层沥青路面动态响应研究	94
5.1	加速加载设备	95
5.2	半刚性基层沥青路面试验路方案与铺设	97
5.3	试验现场检测	98
5.4	路面(层底)应变响应规律研究	101
5.5	沥青路面抗滑性能变化规律	103
5.6	车辙变化规律及车辙模型预测	104
5.7	本章小结	111
	本章参考文献	111
第6章	基于加速加载试验的沥青路面疲劳模型研究	116
6.1	沥青混合料疲劳试验方法	116
6.2	影响沥青路面疲劳的因素	117
6.3	柔性基层沥青路面疲劳破坏研究	123
6.4	本章小结	129
	本章参考文献	129
第7章	车辆动荷载作用下路面动态响应仿真分析	132
7.1	模型的建立	133
7.2	路面材料动模量	134
7.3	理论仿真结果与试验结果的对比分析	140
7.4	动静荷载工况组合	141
7.5	仿真分析结果	142
7.6	本章小结	143
	本章参考文献	144

第1章 绪 论

1.1 我国沥青路面发展面临的问题

1.1.1 沥青路面的病害

改革开放以来,我国公路发展迅猛,仅用短短十几年的时间就赶上了国外发达国家将近半个世纪的建设业绩。由于沥青混凝土路面具有较好的行车舒适性、施工简单、噪声低、修复容易等优点,多年来被我国广泛采用。

根据交通运输部发布的 2015 年交通运输行业发展公报,目前全国等级公路里程 404.63 万公里,等级公路占公路总里程 88.4%。其中,二级及以上公路 57.49 万公里,占公路总里程 12.6%。全国高速公路里程 12.35 万公里,其中,国家高速公路 7.96 万公里,全国高速公路车道里程 54.84 万公里。如图 1-1、图 1-2 所示。

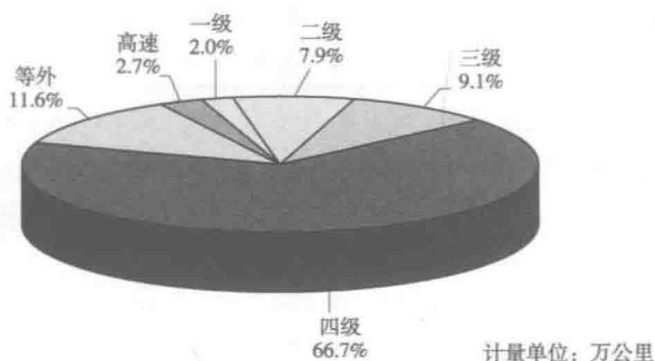


图 1-1 我国公路等级组成

我国经济发展日新月异,随着交通量和交通荷载的不断增长,公路建设里程也迅速增加。路面在长期交通荷载反复作用下会产生疲劳破坏,从而导致整个路面结构失效。国外经验表明,大规模公路建设之后将是更大规模的公路养护维修,这一规律将在我国高速公路上表现得尤为突出。我国公路建设中,沥青类路面占据

了主流地位,沥青类路面的常见病害多而复杂。沥青类路面的主要病害有裂缝、车辙、坑槽、拥包等,表 1-1 为山东省部分高速公路路面病害类型^[1]。



图 1-2 2011 ~ 2015 年全国高速公路里程

山东省部分高速公路路面病害类型

表 1-1

公路名称	使用时长 (年)	主要病害
京福高速公路 DQ 段	3	横向裂缝、沉陷、龟裂、车辙、纵向裂缝和坑槽
京福高速公路 JD 段公路	3	网裂、横向裂缝、纵向裂缝、坑槽
济聊高速公路	4	横向裂缝、纵向裂缝、块裂、松散、唧泥等
济青高速公路	4	横向裂缝、网裂、沉陷等
京福高速公路 JT 段	3	横向裂缝、纵向裂缝、车辙、表面层网裂
济南西外环高速公路	8	裂缝、坑槽和车辙等

张岩^[2]对长平高速公路下行(即四平至长春方向)K283 ~ K176 的路面状况进行了调查,发现路面典型的病害形式为裂缝(包括块状裂缝、纵向裂缝、横向裂缝)、坑槽、沉陷、车辙等,其中以轻型横向裂缝和轻型车辙最为严重。姬猛^[3]调查了福泉高速公路的病害,主要有裂缝、车辙、沉陷和水损害等。

裂缝是沥青类路面常见的一种破坏类型。裂缝的类型,主要以温缩裂缝和疲劳裂缝为主。疲劳开裂的特点是:路面无显著的永久变形,开始大都是形成细而短的横向开裂,继而逐渐扩展成网状,开裂的宽度和范围不断扩大。产生疲劳开裂的原因,主要是沥青结构层受车轮荷载的反复弯曲作用,使结构层底面产生的拉应变或拉应力值超过材料的疲劳强度,层底产生开裂,并逐渐向表面发展,从而导致面层破坏。

路面结构中某些整体性结构层在低温时由于材料收缩受限制而产生较大的拉

应力,当它超过材料相应条件下的抗拉强度时便产生开裂。由于路面的纵向尺寸远大于横向,低温收缩时侧向约束不大,这种开裂一般表现为横向间隔性的裂缝,严重时才发展为纵向裂缝。在季节性冰冻地区,沥青面层和用无机结合料稳定的整体性基层,冬季都有可能出现这种温缩裂缝。

车辙是沥青类路面又一种主要病害形式,它是沥青路面在长期车辆重复荷载作用下,沥青面层产生的永久变形的累积。这种变形出现在行车轮迹带处,即形成路面的纵向带状凹陷。车辙是高级沥青路面的主要破坏形式。因为这类路面的使用寿命较长,即使每一次行车荷载作用产生的残余变形量很小,但是多次重复作用累积起来的残余变形总和也会较大,以至于影响车辆的正常行使。

1.1.2 我国沥青路面设计理论

沥青路面设计方法可分为理论法和经验法。经验法主要是通过试验路或使用性能调查、分析而得,如 CBR 法、AASHTO 法。理论法实际上是理论与经验相结合的半经验半理论法,多数是以弹性层状体系理论为基础并通过实践验证而提出的,如比利时、壳牌石油公司、英国运输部、澳大利亚、南非、美国沥青协会等。

我国新建公路沥青路面设计采用双圆垂直均布荷载作用下的多层弹性层状体系理论,以设计弯沉值为路面整体刚度的设计指标。对沥青混凝土面层和半刚性材料的基层、底基层,应进行层底拉应力的验算。在城市道路中,由于汽车在交叉路口、车站等地的沥青面层上频繁起动、制动,常常引起面层表面产生推挤和拥起等剪切破坏,因而我国城市道路设计规范规定在弯沉和拉应力两项指标之外,增加一项剪应力指标。在进行沥青面层的剪切验算时,要求面层在车轮垂直荷载与水平荷载共同作用下,其破坏面上可能产生的剪应力 τ_a ,不应超过材料的容许剪应力 τ_R 。

各类沥青路面的破损形式不尽相同,现行规范设计针对性不强,如果以相同的指标控制各类沥青路面破损的发生,显然不尽合理,也就不能从真正意义上杜绝高速公路普遍存在的早期破损发生。

1.1.3 半刚性基层路面弯沉检测

路面弯沉值的大小,反映了路面整体刚度强弱,过大的塑性变形导致路面下沉变形,产生车辙。当路面在车辆荷载反复作用下不断地弯曲,使变形积累、增大到某种程度时,路面结构产生了疲劳开裂。在目前路面质量评价指标中,弯沉是非常重要的指标。然而在山东省内多条新旧道路的弯沉检测(表 1-2)中发现,半刚性基层沥青路面代表弯沉值均能满足设计弯沉值要求,甚至在有些已经破损的路面上也基本能达到设计弯沉值的要求。

山东省部分道路弯沉检测与设计值

表 1-2

序号	道路名称	面层类型	基层类型	道路等级	设计弯沉值 (0.01mm)	检测代表弯沉 值(0.01mm)	道路状况
1	济南市高新区康虹路	沥青混凝土	水泥稳定碎石+石灰土	城市次干路	22.0	16.8	旧路质量评定
2	济聊高速公路	沥青混凝土	二灰碎石+二灰土	高速公路	21.2	13.6	旧路质量评定
3	省道 S104 王晋村附近段	沥青混凝土	水泥稳定碎石+水泥稳定砂砾	二级公路	—	14.0	旧路质量评定
4	济南长清长孝路	沥青混凝土	水泥稳定碎石+石灰土	三级	29.7	20.2	新路验收
5	省道 S312 孤滨线	沥青混凝土	水泥稳定碎石+石灰土	二级公路	21.7	15.7	旧路质量评定
6	济南长清燕博路	沥青混凝土	水泥稳定碎石+水泥稳定碎石	三级公路	18	10.1	新路验收
7	省道 S237 东滨线	沥青混凝土	二灰碎石+石灰土	二级公路	23	23.7	旧路质量评定

半刚性基层整体呈现整体性强、刚度大、弯沉值小的特点。然而,我国半刚性基层沥青路面在使用多年后,甚至在出现了各种病害的情况下,代表弯沉值也接近设计弯沉值,仅有少部分出现不满足设计弯沉值的情况。对这些地点进行取样,发现凡是弯沉值较大、不满足要求的都是半刚性基层破损导致的。在弯沉值满足要求的情况下,沥青路面仍会出现各种病害现象,如车辙、裂缝、坑槽等。因此,我国沥青路面设计指标除了考虑弯沉指标之外,还应考虑更多设计指标。此外,弯沉的测定都是采用标准轴载进行的,对超载和动荷载对路面的破坏效果无法衡量。

1.1.4 超载现象

高速公路的建设为车辆快速、高效、安全和舒适地运行提供了良好的条件。同时,高速公路的快速建设还促进了汽车工业的迅猛发展。为满足日益增长的货运市场需求,车辆的超载超速现象也越来越普遍,特别是在我国及其他一些发展中国家,许多地区运输车辆的轴重已远远大于国家的相关规定。

交通部令 2000 年第 2 号明文规定超限认定标准见表 1-3。

超载超限认定标准

表 1-3

轴 型	每侧单轮 (kN)	一单轮—双轮 (kN)	每侧双轮 (kN)
单轴	60		100
双联轴	100	140	180
三联轴	120		220
总质量	单车、半挂列车、全挂列车车货总质量 400kN 以上;集装箱半挂列车车货总质量 460kN 以上		

邵伟^[4]对连霍高速公路民权收费站、国道滕庄收费站、国道刘口收费站以及京珠高速公路新乡收费站 4 个典型路段进行了交通量调查和轴载谱分析,目的是考察高等级公路上的轴载分布情况和超载情况。见表 1-4 ~ 表 1-7。

连霍高速公路民权收费站车辆超载

表 1-4

序号	载质量 (kN)	总车辆数 (辆)	超 载 车 辆		分布频率 (%)
			频数(次)	实际载质量(kN)	
1	40	210	175	60 ~ 120	83.33
2	50	165	140	60 ~ 120	84.85
3	60	110	75	80 ~ 100	68.18
4	80	175	120	100 ~ 160	68.57
5	100	165	115	150 ~ 180	69.70
6	150	240	195	180 ~ 270	81.25
7	200	340	255	260 ~ 490	75.00
8	250	640	585	300 ~ 580	91.41
9	300	875	815	420 ~ 700	93.14
10	400	65	60	500 ~ 780	92.31
合计		2985	2535		84.92

国道 310 线滕庄收费站车辆超载状况

表 1-5

序号	载质量 (kN)	总车辆数 (辆)	超 载 车 辆		分布频率 (%)
			频数(次)	实际载质量(kN)	
1	40	108	66	60 ~ 80	61.11
2	50	144	96	60 ~ 100	66.67
3	60	144	126	80 ~ 100	87.50
4	80	144	102	100 ~ 160	70.83
5	100	150	132	150 ~ 180	88.00

续上表

序号	载质量 (kN)	总车辆数 (辆)	超 载 车 辆		分布频率 (%)
			频数(次)	实际载质量(kN)	
6	150	318	222	180 ~ 270	69.81
7	200	198	144	200 ~ 300	72.73
8	250	324	246	240 ~ 400	75.93
9	300	228	174	240 ~ 370	76.32
10	400	72	36	320 ~ 400	50.00
合计		1830	1344		73.44

国道 105 线刘口收费站车辆超载状况

表 1-6

序号	载质量 (kN)	总车辆数 (辆)	超 载 车 辆		分布频率 (%)
			频数(次)	实际载质量(kN)	
1	40	195	140	60 ~ 80	71.79
2	50	180	110	60 ~ 100	61.11
3	60	150	95	80 ~ 100	63.33
4	80	295	165	100 ~ 160	55.93
5	100	315	250	150 ~ 180	79.37
6	150	345	295	180 ~ 270	85.51
7	200	350	330	200 ~ 300	94.29
8	250	475	415	240 ~ 400	87.37
9	300	440	345	240 ~ 370	78.41
10	400	255	185	320 ~ 400	72.55
合计		3000	2330		77.67

京珠高速公路新乡收费站车辆超载情况

表 1-7

序号	载质量 (kN)	总车辆数 (辆)	超 载 车 辆		分布频率 (%)
			频数(次)	实际载质量(kN)	
1	40	1060	804	60 ~ 80	79.1
2	50	1523	1308	60 ~ 100	85.9
3	60	846	613	80 ~ 100	72.5
4	80	3239	2770	100 ~ 160	85.5
5	100	762	655	150 ~ 180	86.0
6	150	149	110	250 ~ 300	73.8

续上表

序号	载质量 (kN)	总车辆数 (辆)	超 载 车 辆		分布频率 (%)
			频数(次)	实际载质量(kN)	
7	200	32	31	350 ~ 450	96.9
8	250	66	44	380 ~ 550	66.7
9	300	50	3	400 ~ 800	82.0
10	400	4	6379	500 ~ 1000	75.0
合计		7687			83.0

从以上4条道路可以看出我国道路车辆超载的严重程度,这对路面是一个极大的考验。目前沥青路面设计过程中仍然采用车辆的额定荷载,对超载引起路面破坏效应明显考虑不足。

1.2 车辆动荷载

超载引起路面的破坏已经引起专家学者足够的重视,而且进行了大量的研究,然而对动荷载及其破坏效应却研究不足。从高速公路的功能来讲,车辆以一定速度行驶是必然事件,静止则是偶然事件。实际动行中的车辆都是重载高速车辆,其施加于路面的是动态荷载,是一种幅值大小和作用空间都随机变化的动力荷载。由于动态荷载的存在,使得静力荷载模式与车辆行驶过程中对路面的实际作用力之间的差异较大,对于现有的设计理论和设计方法是无法从根本上加以解决的。若不能阐明这些实际上是由动力效应产生的破坏的机理,将会给路面结构的设计、施工、养护和改建带来很大的影响。路面结构的损伤和破坏与超载超限重型车辆产生的动态荷载密切相关,这种动态荷载是随机由路面不平度激励产生的,其特性与车辆本身结构形式、载质量、车速等因素有关,但由于随机荷载在建模及数值计算方面非常复杂,大部分学者从不同的角度的出发,对其进行了各种各样的简化,这使得对动载作用下路基路面动态响应的研究很不成熟,理论研究远远落后于实际工程要求。工程设计人员在设计时对动荷载的变化把握不准,要么偏于保守,造成投资浪费,要么有所欠缺,使路面结构在短时间内发生破坏。研究动荷载对路面的破坏效应,将会有助于找出我国沥青路面过早疲劳破坏的真正原因。正如邓学钧教授所指出的:“如能对运动车辆随机荷载及其激励下的路面动力响应理论进行系统的、深入的研究,而取得重大突破,不仅能使我国在该领域的研究居于世界领先水平,而且对于路面结构整个设计方法和体系的根本性变革在理论上具有重大

的科学意义,对今后工程实际也会有十分重要的应用价值。”

1.3 动荷载国内外研究现状

1.3.1 车辆动荷载特征研究

目前国内外学者对车辆动荷载的研究还是以理论研究为主,围绕车辆分析动荷载的大小及特征开展。在国内钟阳、王哲人和张肖宁(1992)把汽车分别简化为二自由度模型,初步分析了车辆载荷与行车速度的关系^[5],开创了路面动荷载理论研究的先河。之后,东南大学在这一方面做出了突出贡献:黄晓明(1993)从理论上分析了路面平整度与路面所受动荷载间的关系,然后通过实例计算分析了轮胎刚度、汽车速度及路面平整度对冲击系数的影响^[6];孙璐和邓学钧(1996)以研究简报的形式将车辆简化为具有双自由度的四分之一车辆模型,初步介绍了路面功率谱密度和动荷载之间的关系,并提出路面平整度的反算方法^[7];邓学钧(2002)再次发文,将车辆与地面结构视为综合体系,用数学模型描述车辆与地面结构接触面的平整度,建立路面不平度随机场,研究了在随机振动激励下发生的车辆对地面结构的各种运动荷载^[8]。此后我国更多的学者也开始动荷载特征的理论研究:张洪亮(2005,2010)、宋一帆(2007)、姚时音(2008)、郑仲浪(2009)建立了更多自由度的车辆—地面模型研究车辆—地面动力学^[9-13]。国外进行车辆动荷载研究的起步更早一些,Dodds 和 Robson(1973)^[14]将路面不平度视为行车偏离实际平坦路面的二维随机函数,开始用功率谱密度函数方式描述路面的不平度,并计算了动荷载大小。Todd(1987)^[15]研究了 1/4 货车模型,1/2 货车模型和 1/2 拖挂车模型,并在计算机上模拟了行驶质量和路面荷载应力。Hunt(1991)^[16,17]在其研究中将道路交通引起的地面振动看作一种随机过程,提出了计算地面振动功率谱的理论模型,能较好地预测那些由随机地面不平度引起的车辆振动。随着研究的深入,动荷载的研究开始考虑路面局部缺陷时引起车辆振动的情况,Watts(1984~2000)^[18,19]通过大量的长期的试验观测,分析了路面上存在坑洞、裂缝等缺陷时的车辆振动规律。这些研究成果为车路协同作用下的车辆动荷载特征提供了理论基础,但目前的研究还是停留在理论阶段。在交通运输部应用基础研究项目“大型 MTS 模拟车辆动荷载激励下沥青路面动力响应及破坏机理研究”和“基于双轴加速加载试验的沥青路面疲劳损坏演变规律研究”中作者将结合重载车辆和路面实际情况进行动荷载数据采集,进一步分析车辆动荷载特征。

1.3.2 动荷载对路面破坏机理研究

国内外关于车辆动荷载特征的研究并未涉及动荷载对沥青路面的疲劳破坏机理。本人^[20](2011)通过建立二自由度车辆模型,计算出动荷载系数功率谱密度,从而求得动荷载的大小及分布概率。依据沥青路面设计规范的轴载换算方法,从理论上推导出了考虑动荷载后的当量轴次增长幅度。然而动荷载对路面的疲劳破坏受到多种因素的影响,存在动荷载效应问题,需要进行大量的试验研究。国内有部分学者进行了动荷载作用下沥青路面结构响应的试验研究,王晖^[21]在常张高速公路的现场试验表明,满载车辆当速度从60km/h增加到100km/h时,后轮轮下应变峰值减小约42.0微应变;董忠红^[22]在西宝高速公路的试验路段的研究表明,在14t后桥轴重车辆荷载作用下,速度为50km/h时产生的拉应变相当于5km/h时的44%。车速的增大却减弱了沥青路面层底的拉应力,这无法解释沥青路面在动荷载作用下的疲劳破坏,因此需要通过试验研究动荷载对沥青路面疲劳破坏的机理。

1.3.3 沥青路面疲劳破坏研究

沥青路面疲劳破坏机理的试验研究方法,可分为室内试验和加速加载试验两大类。沥青混合料室内小型疲劳试验的方法较多,主要有弯曲疲劳试验、直接拉伸疲劳试验、间接拉伸疲劳试验等。其中弯曲疲劳试验应用较广,试件也多以矩形小梁试件为主^[23-25]。室内试件的试验方法,主要研究沥青混合料试件的疲劳特性,脱离了路面实际受力状态和环境的影响,所以试验结果和实际情况相差较大,因而能更加真实模拟路面实际受力状态的加速加载试验就应运而生。加速加载试验在国外起步较早,很多学者从多方面采用加速加载试验对沥青路面疲劳破坏进行了研究,其中取得成果最多的当属SHRP(Strategic Highway Research Program)计划(1987~1993)。美国在为推广SHRP计划研究成果,制订热拌沥青路面性能规范和试验性能预测模型收集资料时进行了长达2年的环道试验,试验期间主要对破坏裂缝、弯沉、表面摩擦系数等指标进行了测量和采集。

由于加速加载设备数量的限制,国内仅有个别学者采用加速加载设备对沥青路面的疲劳性能进行研究,由于加速加载设备耗资巨大,加载周期长,在推广应用中受到了一定的限制^[26]。

大型多功能MTS试验机,可模拟车辆运动荷载并且可以将荷载直接施加在室内修筑的等厚度路基路面模型上,实现路面结构的快速疲劳破坏试验。这种试验方法具有加载速度快、试验费用低、周期短的特点。由于国内大型MTS设备数量很少,多数用来进行结构工程的疲劳破坏试验研究,用来进行路面结构疲劳破坏试