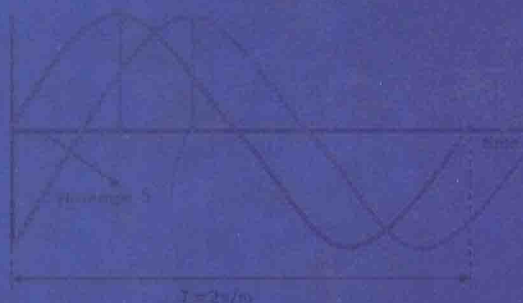
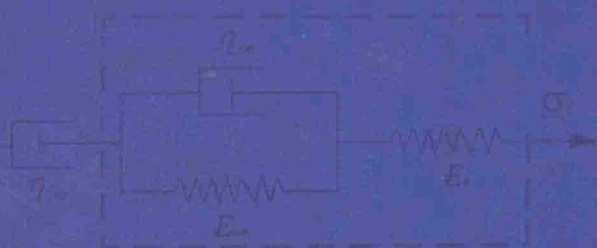
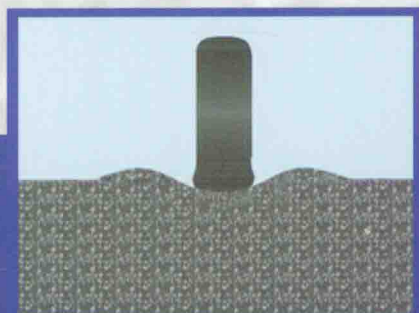


沥青路面黏弹性变形机理与车辙防治技术

张久鹏 毕玉峰 袁卓亚 著



科学出版社



沥青路面黏弹性变形机理与 车辙防治技术

张久鹏 毕玉峰 袁卓亚 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

车辙是沥青路面的一种典型病害,主要源自于沥青混合料的黏弹性变形,而高温、重载和慢速交通显然是加剧路面车辙产生的重要外因。本书结合试验研究、理论分析和数值模拟等方法,系统研究沥青和沥青混合料的黏弹变形特性,揭示沥青混合料的时间-温度-应力等效性,阐述重载慢速交通对沥青路面车辙的作用机理,重新认识超载、重载对沥青路面结构的影响,进而提出抗车辙沥青混合料的多层次优化设计方法、灌浆型半柔性路面材料和超大粒径沥青混合料及其组成设计方法,形成有效防治沥青路面车辙的综合技术体系。

本书可供从事道路工程教学、科研和设计人员参考,也可作为相关专业研究生的教材或学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

沥青路面黏弹性变形机理与车辙防治技术/张久鹏,毕玉峰,袁卓亚著. —北京:科学出版社,2014.10

ISBN 978-7-03-042159-3

I. ①沥… II. ①张… ②毕… ③袁… III. ①沥青路面-弹性变形-研究 ②沥青路面-车辙-防治-研究 IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 238935 号

责任编辑:余 丁 孙 芳 纪四穗/责任校对:胡小洁

责任印制:徐晓晨/封面设计:蓝 正

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2014 年 10 月第一次印刷 印张: 19 5/8

字数: 383 000

定价: 100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

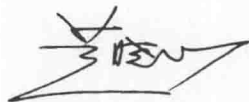
序

车辙是近十年来我国高速公路沥青路面领域最受关注的病害类型，其产生和发展不仅直接关系到路面的使用性能，更影响到道路运营的安全和耐久。以往的研究从不同的层次和视角试图切中病害根源，以提出问题的解决方案。这些研究虽没有从总体上彻底根治车辙，也没有扭转车辙产生的发展趋势，但为该书的研究奠定了基础。

车辙是表象，根源是变形，基础是材料的黏弹性。因此该书从沥青混合料的黏弹性变形机理出发，通过理论推导、试验研究、数值模拟综合应用，聚焦重载慢速交通、持续高温天气工况下沥青混合料的变形行为，揭示了沥青混合料的时间-温度-应力等效性，阐述了重载、慢速交通和高温对沥青路面车辙的作用机理。

车辙的产生根源是复杂的、多方面的，车辙的防治也应该是全方位的，是一项系统工程。防治结合，才能标本兼治。该书系统地发展了多层次优化沥青混合料、灌浆型半柔性路面材料、超大粒径沥青混合料的组成设计方法，提出了路面结构“由柔变刚”、沥青混合料公称粒径“由小变大”、中下面层“特别设计”、沥青混合料“外掺改性”和运营期“主动预防”等车辙防治思路，形成了有效防治沥青路面车辙的综合技术体系。

该书观点前沿、方法新颖，理论分析透彻，防治对策科学，反映了年轻一代学者在科学研究上的不拘一格、理论研究上的独树一帜、对策研究上的独辟蹊径。希望这些系统而深入的理论思考、经过现场检验的实践探索能够引起大家对车辙机理和防治的重新思考，幸莫大焉。



2014年7月1日

前 言

沥青路面以其良好的性能受到世界各国的青睐,在现代高等级道路建设中得到了广泛的应用。由于交通量激增、车辆重载和超载以及渠化交通运行,再加上持续高温天气频繁出现,导致沥青路面在建成2~4年甚至更短的时间内就出现了车辙等严重的早期损害。这不仅降低了道路的使用性能,而且缩短了道路的使用寿命,造成了巨大的经济损失和不良的社会影响。车辙是当前沥青路面病害的一种主要形式,制约了我国公路沥青路面的可持续发展。

几十年来,车辙问题的研究呈波动式前进,一方面,由于其研究涉及大量非线性固体力学理论而成为路面工程研究的难点之一;另一方面,更加苛刻的使用条件,对路面的性能要求也在不断地提高。为了解决车辙问题,研究人员从材料改善的角度,使用改性沥青、优化集料级配、局部修正设计指标和加强施工质量控制,以提高沥青路面的抗车辙性能,延长使用寿命。但是,我国普遍采用半刚性基层沥青路面结构,较少发生结构型车辙,而失稳型车辙是其主要形态。沥青路面失稳型车辙的形成机理与沥青混合料在荷载作用下的黏弹塑性密切相关,尤其是重载慢速交通、持续高温天气导致沥青路面车辙更加严重、中下面层流动性车辙的比例不断增加。对此,本书提出路面结构“由柔变刚”、沥青混合料公称粒径“由小变大”、中下面层“特别设计”、沥青混合料“外掺改性”和运营管理期“主动预防”等车辙防治思路,从全新的视角分析沥青和沥青混合料的黏弹变形特性,揭示沥青混合料时间-温度-应力等效性,阐述重载慢速交通对沥青路面车辙的作用机理,重新认识超载、重载对沥青路面结构的影响,进而提出抗车辙沥青混合料的多层次优化设计方法、灌浆型半柔性路面材料和超大粒径沥青混合料及其组成设计方法,形成有效防治沥青路面车辙的综合技术体系。

本书分为七章。第一章为绪论,在调查、调研的基础上提出沥青路面车辙防治的综合思路。第二章为重载慢速交通下沥青混合料的变形特性,分析重载慢速交通下沥青胶浆高温流变特性、沥青混合料的蠕变变形特性,提出沥青混合料的时间-温度-应力等效性。第三章为沥青路面车辙数值分析及其黏弹性变形机理,建立沥青路面车辙数值分析模型,模拟研究等效温度场下沥青路面车辙的发展规律。第四章为多轴重载交通作用下爬坡路段沥青路面力学响应分析,从爬坡路段车辆运行特性出发分析多轴车、悬轴车以及轴载不均匀分布条件下爬坡路段沥青路面的力学响应。第五章为抗车辙沥青混合料的多层次优化设计,从沥青胶结料流变行为、细集料填充效应和粗集料骨架效应等角度,提出抗车辙沥青混合料的

多层次优化设计方法。第六章为灌浆型半柔性路面材料组成设计与使用性能,提出母体多孔沥青混合料、流动性水泥灌浆材料、高性能流动性水泥灌浆材料等组成设计和优化方法,探讨半柔性路面的使用性能和解决车辙问题的适应性。第七章为超大粒径沥青混合料组成设计及其使用性能,系统研究超大粒径沥青混合料级配设计方法、沥青混合料成型方法及其体积特性研究,探讨超大粒径沥青混合料强度形成机理和抗车辙性能,提出基于不同层位需求的超大粒径沥青混合料优化设计流程和施工技术。

本书由张久鹏统稿、审核,袁卓亚参与撰写第六章的部分内容,毕玉峰参与撰写第七章的部分内容。

东南大学的黄晓明仔细审阅了书稿,对写作大纲和书稿提出了诸多宝贵的修改意见,并欣然为本书作序,在此深表谢意。长安大学的裴建中提供了大量的参考资料,并对书稿进行了修正、补充和润色,在此深表谢意。在写作过程中参考了党国兴、陈勇、陈祥峰、高文阳等的研究成果,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,望请国内外同行专家、学者和读者不吝赐教,批评指正。

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 沥青路面车辙成因及其分布特性	1
一、沥青路面车辙的成因和影响因素	1
二、沥青路面车辙的时间分布特性	5
三、沥青路面车辙的空间分布特性	9
第二节 沥青混合料永久变形的力学模型和车辙预估	15
一、沥青混合料永久变形的试验方法	16
二、沥青混合料永久变形的经验性模型	19
三、沥青混合料永久变形的黏弹性力学模型	21
四、沥青路面车辙预估方法	29
第三节 沥青路面车辙的防治思路	33
一、沥青路面结构与组合	33
二、沥青面层材料优化技术	37
三、运营期主动预防	45
第二章 重载慢速交通下沥青混合料的变形特性	49
第一节 沥青胶浆高温流变特性	49
一、粉胶比对沥青胶浆高温流变特性的影响	49
二、温度对沥青胶浆高温流变特性的影响	53
三、慢速荷载条件沥青胶浆高温流变特性	54
第二节 沥青混合料的蠕变变形特性	57
一、沥青混合料级配选择与试件制备	57
二、蠕变试验方案	58
三、蠕变试验结果分析	59
第三节 沥青混合料时间-温度-应力等效性	63
一、时间-温度-应力等效原理	63
二、时间-温度-应力移位因子的确定	65

三、蠕变主曲线的确定	67
第三章 沥青路面车辙数值分析及其黏弹性变形机理	68
第一节 基于车辙等效温度的沥青路面温度场分析	68
一、我国沥青路面结构汇总分析	68
二、基于车辙等效温度的路面温度场	69
第二节 沥青路面车辙分析模型	70
一、几何模型分析	70
二、材料模型分析	72
三、轮胎接地模型和荷载作用时间	75
第三节 沥青路面车辙模拟结果与分析	78
一、不同工况下路表永久变形	78
二、路面结构层永久变形分析	79
三、沥青面层剪应力和等效蠕变应变分析	81
四、黏弹性条件下应力响应与荷载作用时间的关系	83
第四节 行车速度对路面车辙的影响	85
一、速度对永久变形的影响	85
二、速度对路面应力分布的影响	85
三、速度对路面蠕变应变的影响	86
第五节 沥青路面车辙敏感性分析	86
一、交通参数敏感性分析	86
二、材料参数值敏感性分析	87
第四章 多轴重载交通作用下爬坡路段沥青路面力学响应分析	90
第一节 爬坡路段车辆运行特性与模拟	90
一、重载车辆运行特性分析	90
二、爬坡车辆移动荷载模拟	93
第二节 爬坡路段沥青路面的力学响应	99
一、不同行驶状态路面位移分析	99
二、不同行驶状态路面应力分析	100
三、不同行驶状态时间历程变化	106
四、移动荷载作用下速度影响规律	108
五、移动荷载作用下水平力系数影响规律	108
第三节 多轴车下路面力学响应数值分析	109
一、多轴车的数值模型与移动模拟	109
二、多轴车下路面力学响应的数值分析	111

第五章 抗车辙沥青混合料的多层次优化设计	117
第一节 沥青胶结料的优化设计	117
一、基于交通条件的沥青等级优选	117
二、基于模糊数学综合评判的抗车辙改性剂优选	118
第二节 细集料填充效应与优化设计方法研究	124
一、细集料填充方法研究	124
二、细集料填充效应研究	129
三、细集料填充优化设计方法	135
第三节 粗集料骨架效应与优化设计方法研究	136
一、粗集料骨架效应均匀试验设计	137
二、粗集料骨架形成体积参数识别	138
三、粗集料骨架稳定性评价	144
四、粗集料骨架优化设计方法	149
第四节 多层次优化沥青混合料的性能与路面车辙	150
一、掺加抗车辙剂的中面层混合料设计及其性能研究	150
二、下面层硬质沥青混合料组成设计及其性能研究	152
三、多层次优化后沥青路面的永久变形数值分析	154
第六章 灌浆型半柔性路面材料组成设计与使用性能	158
第一节 母体多孔沥青混合料设计	158
一、半柔性路面母体混合料设计步骤与流程	158
二、母体沥青混合料的级配和最佳油石比	160
三、母体沥青混合料的参数关系	163
第二节 流动性水泥灌浆材料组成设计方法	165
一、普通流动性水泥净浆材料组成设计	165
二、普通流动性水泥砂浆材料组成设计	174
三、普通净浆与普通砂浆的对比分析	181
第三节 高性能流动性水泥灌浆材料组成优化设计方法	185
一、高性能水泥净浆组成设计	185
二、高性能灌浆材料与普通灌浆材料的性能对比分析	193
三、高性能水泥净浆的工作性研究	198
第四节 半柔性路面的使用性能和解决车辙问题的适应性分析	202
一、半柔性路面力学强度特性	203
二、半柔性路面的路用性能	208
三、半柔性路面解决车辙问题的适应性分析	219

第七章 超大粒径沥青混合料组成设计及其使用性能	225
第一节 超大粒径沥青混合料级配设计	225
一、集料级配设计	225
二、集料级配合成	239
三、估算最佳沥青用量	245
第二节 超大粒径沥青混合料成型方法研究	246
一、基于旋转压实的 SLSM 成型方法研究	246
二、基于马歇尔大型击实的 SLSM 成型方法研究	247
三、基于振动成型的 SLSM 成型方法研究	248
四、不同成型方法的对比分析	250
第三节 超大粒径沥青混合料体积特性研究	252
一、SLSM-40 体积指标分析	252
二、SLSM-50 体积指标分析	261
三、SLSM 体积参数与级配组成关系研究	263
第四节 超大粒径沥青混合料强度形成机理及其使用性能	265
一、SLSM 强度形成机理研究	265
二、SLSM 的强度特性	270
三、SLSM 的模量特性	274
四、SLSM 的路用性能	279
第五节 基于不同层位需求的超大粒径沥青混合料优化设计	285
一、不同层位对 SLSM 性能的要求	285
二、基于不同层位需求的 SLSM 材料组成优化设计方法	287
第六节 超大粒径沥青混合料施工技术研究	289
一、SLSM 的施工工艺	289
二、集料细化研究	291
三、SLSM 离析控制	299
参考文献	303

第一章 绪 论

第一节 沥青路面车辙成因及其分布特性

一、沥青路面车辙的成因和影响因素

1. 沥青路面车辙的成因

沥青路面车辙包括沥青混合料的塑性剪切流动、土基与基层的变形以及一定程度的再压实作用和材料的磨损等。对于施工过程中压实良好的路面，以及具有良好土基和基层的路面，通常认为车辙是由沥青混合料的压密和剪切变形共同作用的结果，压密的影响主要表现在交通荷载作用的初始阶段，而后期主要表现为塑性剪切变形^[1]。

一般认为，沥青混合料是典型的弹黏塑性综合体，在低温小变形范围内接近线弹性体，在高温大变形范围内表现为黏塑性体，而在一般温度范围内则为黏弹性体。其力学特性既不同于传统的弹性固体材料又不同于传统的黏性流体材料，在某些特殊条件下又表现出与弹性固体和黏性流体相似的特征^[2]。

为了更明确沥青混合料高温流变中变形的组成，可以进行蠕变恢复试验^[3]，其应力、应变和时间的关系曲线如图 1.1 所示，其中， ϵ_e 为弹性应变，与时间无关，卸载后瞬时恢复； ϵ_p 为塑性应变，与时间无关，不可恢复； ϵ_{ve} 为黏弹性应变，与时间有关，随卸载时间的延长而逐渐恢复； ϵ_{vp} 为黏塑性应变，与时间有关，不可恢复。通过蠕变恢复试验研究表明，沥青混合料的变形由两部分组成：①可恢复的瞬时弹性变形和黏弹性变形；②不可恢复的黏塑性应变和瞬时塑性变形。其中不可恢复的黏塑性应变和瞬时塑性应变与车辙密切相关。

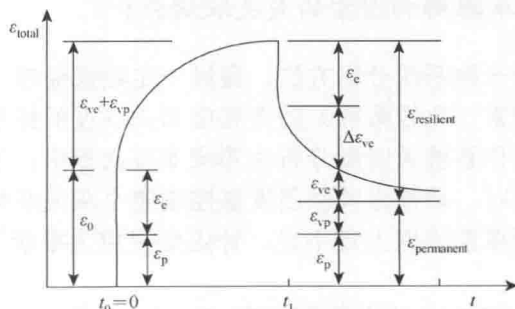


图 1.1 蠕变恢复试验典型的应力、应变和时间的关系曲线

2. 沥青路面车辙的影响因素

沥青路面车辙是在行车荷载反复作用下产生竖向永久变形的累积,是内在因素和外部条件综合作用的结果,如图 1.2 所示。内在因素主要反映在材料本身的性质上,而外部条件主要包括温度和荷载条件。此外,路基、路面基层和路面结构组成及其施工质量也会影响沥青路面的抗车辙性能。

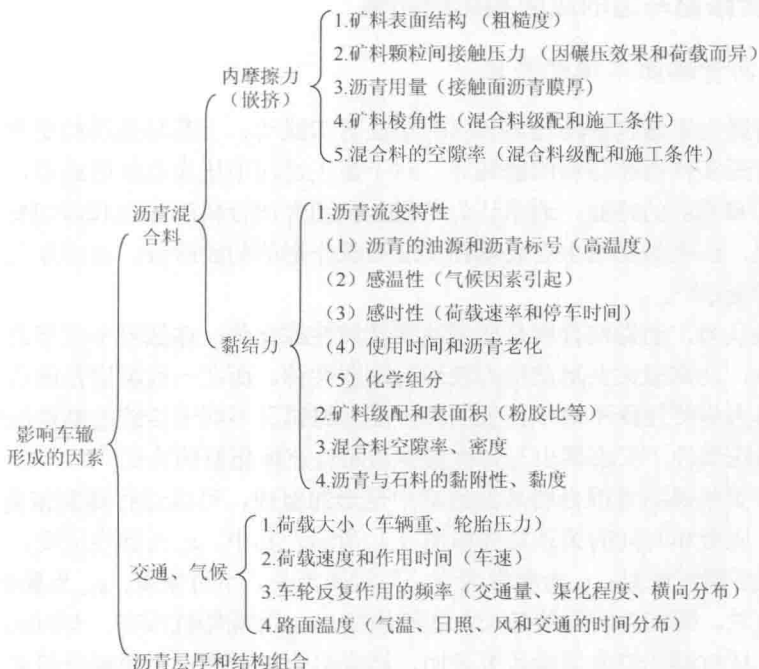


图 1.2 沥青路面车辙影响因素

3. 沥青路面车辙影响因素的灰关联熵分析

灰关联分析是一种系统分析方法,通过一定数据处理,计算目标值(参考数列)与影响因素(比较数列)的关联度和关联度的排序,寻求影响目标值的主要因素。灰色系统关联度分析由邓聚龙首次提出,但是一般灰关联分析在确定灰关联度时,局部点关联测度值控制整个灰关联倾向,并造成信息损失,而灰熵关联度能克服上述不足,评定结果更为准确^[4]。灰关联熵分析步骤如下。

设 $Y_0 = \{y_0(k), k=1, 2, \dots, r\}$ 为参考序列, $Y_j = \{y_j(k), k=1, 2, \dots, r\}$ 为比较序列,

其中 $j=1,2,\dots,n$ 。对每个序列进行初值化处理, 即

$$X_0 = \{x_0(k), k=1,2,\dots,r\} = \left\{ \frac{y_0(k)}{y_0(1)}, k=1,2,\dots,r \right\} \quad (1.1)$$

$$X_j = \{x_j(k), k=1,2,\dots,r\} = \left\{ \frac{y_j(k)}{y_j(1)}, k=1,2,\dots,r \right\} \quad (1.2)$$

式中, X_0 为初值化处理后的参考序列; X_j 为初值化处理后的比较序列。则有

$$r[x_0(k), x_j(k)] \triangleq \frac{\min_j \left[\min_k |x_0(k) - x_j(k)| \right] + \xi \max_j \left[\max_k |x_0(k) - x_j(k)| \right]}{|x_0(k) - x_j(k)| + \xi \max_j \left[\max_k |x_0(k) - x_j(k)| \right]} \quad (1.3)$$

$$r(X_0, X_j) \triangleq \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r r[x_0(k), x_j(k)] \quad (1.4)$$

式中, $r[x_0(k), x_j(k)]$ 为灰关联系数; ξ 为分辨系数, 取值为 $0 \sim 1$; $r(X_0, X_j)$ 为序列 X_j 的一般灰关联度。

为避免失真, 需保证比较序列始终在参考序列的上方或者下方^[5], 即规定对 $\forall X_j, j=1,2,\dots,n$, 恒有 $x_0(k) \leq$ (或者 $\geq$) $x_j(k)$, $k=1,2,\dots,r$ 。

设 $R_j = \{r[x_0(k), x_j(k)] \dots, k=1,2,\dots,r\}$, 则建立灰关联系数分布映射为

$$p_h \triangleq \frac{r[x_0(h), x_j(h)]}{\sum_{k=1}^r r[x_0(k), x_j(k)]}, \quad p_h \in P_j, \quad h=1,2,\dots,r \quad (1.5)$$

式中, P_j 为灰关联系数分布映射; p_h 为映射值, 满足 $\forall h, p_h \geq 0$ 且 $\sum p_h = 1$ 。

函数 $H(R_j) \triangleq - \sum_{h=1}^r p_h \ln p_h$, 称为序列 X_j 的灰关联熵, 其灰熵关联度为

$$E_r(X_j) \triangleq \frac{H(R_j)}{H_m} \quad (1.6)$$

式中, $E_r(X_j)$ 为序列 X_j 的灰熵关联度; H_m 为灰熵的最大值, $H_m = \ln r$ 。灰熵关联度越大, 表示影响越显著。

进行不同条件下沥青混合料车辙试验, 沥青混合料的级配组成如表1.1所示, 车辙变形量如表1.2所示。以变形量为参考序列, 各影响因素的灰关联熵如表1.3所示。

表 1.1 级配组成

编号	级配类型	下列筛孔每毫米通过率/%											
		26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
A	AC-13	—	—	100	96.3	70.1	42.1	29.6	21.0	16.4	11.2	8.1	6.4
B	AC-16	—	100	98.9	91.4	71.9	43.6	25.2	17.7	11.6	9.0	7.6	6.8
C	SMA-13	—	—	100	95.4	61.1	30	23.7	17.5	13.0	11.7	11.2	10.2
D	AC-20 改进型	100	95	86	75	64	45	31	21	14.5	10.5	7.5	5
E	AC-20I	100	97.5	82.5	71	62	48	37	27	21	15	10	6

表 1.2 不同条件下车辙试验结果

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
级配	A	A	A	B	B	B	B	C	D	D	D	E
沥青用量/%	4.7	4.7	4.7	4.8	4.8	4.8	4.8	5.9	3.8	4.3	4.8	4.2
空隙率/%	5.6	5.7	5.5	5.3	5.3	5.3	5.3	3.5	6	4.7	4	6
$P_{4.75\text{mm}}/\%$	42.1	42.1	42.1	43.6	43.6	43.6	43.6	30	45	45	45	48
粉胶比	1.36	1.36	1.36	1.46	1.46	1.46	1.46	1.73	1.30	1.16	1.05	1.43
荷载/MPa	0.89	0.78	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.78	0.7	0.7	0.7	0.89
温度/℃	60	60	60	45	55	58	60	60	60	60	60	60
公称最大粒径/mm	13.2	13.2	13.2	16.0	16.0	16.0	16.0	13.2	19	19	19	19
变形量/mm	4.870	3.669	2.849	1.002	1.443	1.571	3.361	2.420	1.706	1.469	1.922	3.750

表 1.3 各影响因素的灰关联熵

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
沥青用量/%	0.2786	0.2304	0.2066	0.1670	0.1744	0.1767	0.2178	0.2002	0.1845	0.1841	0.1716	0.2521
空隙率/%	0.2704	0.2198	0.2013	0.1664	0.1742	0.1767	0.2210	0.1680	0.1852	0.2117	0.2431	0.2143
$P_{4.75\text{mm}}/\%$	0.2811	0.2328	0.2089	0.1678	0.1752	0.1775	0.2181	0.1770	0.1728	0.1809	0.2379	0.2147
粉胶比	0.2816	0.2333	0.2093	0.1655	0.1726	0.1748	0.2137	0.1880	0.1935	0.2143	0.1728	0.2282
荷载/MPa	0.2598	0.2337	0.2198	0.1720	0.1812	0.1841	0.2389	0.1873	0.1818	0.1926	0.1941	0.2152
温度/℃	0.2775	0.2294	0.2056	0.1907	0.1830	0.1807	0.2197	0.1802	0.1758	0.1844	0.1951	0.2320
公称最大粒径/mm	0.2997	0.2513	0.2265	0.1700	0.1766	0.1786	0.2134	0.1645	0.1614	0.1674	0.2156	0.1977

各影响因素的灰熵关联度为 $E_{r,a}=0.9835$; $E_{r,v}=0.9868$; $E_{r,P_{4.75}}=0.9839$; $E_{r,f}=0.9850$; $E_{r,s}=0.9750$; $E_{r,p}=0.9902$; $E_{r,T}=0.9876$ 。其中, E_r 表示各影响因素的灰熵关联度; a 表示沥青用量; v 表示空隙率; $P_{4.75}$ 表示 4.75 mm 筛孔通过率; f 表示粉胶比; s 表示公称最大粒径; p 表示荷载; T 表示温度。研究表明, 各影响因素对沥青混合料车辙深度的影响大小为荷载→温度→空隙率→4.75mm 筛孔通过率→粉胶比→沥青用量→公称最大粒径。对实际路面, 温度不受人为因素影响, 可以认为荷载和空隙率是影响沥青路面抗车辙性能最重要的两个因素。

二、沥青路面车辙的时间分布特性

1. 沥青混合料变形的时间依赖性

根据弹性静力学的观点, 弹性材料的应变响应只与现时的应力状态相关, 而与应力状态的变化无关, 即在考察弹性体的变形时, 只需考察其当前的荷载状况, 而不需要了解其加载历史, 换句话说, 弹性材料的力学响应与时间无关。然而, 对于黏弹性材料, 在考察其当前的应变响应时, 以前的加载历史将对以后的变形产生影响。并且, 对黏弹性体所施加的作用离当前的时间间隔越长, 对现时响应所产生的影响越小。也就是说, 黏弹性材料的力学响应与时间弹性特征越显著, 而随着加载速度的减慢, 其黏性特征越来越明显, 黏弹性材料与加载速度的这种相关性实际上是时间相关性的另一种表现形式。

因此, 沥青混合料的变形可以描述为荷载作用时间的函数, 并且由瞬时弹性变形、黏弹性变形和黏性流动变形组成。卸载后弹性变形立即恢复, 黏弹性变形随时间延长而逐渐恢复, 黏性流动变形因为不能恢复而称为永久变形。对于某一种给定的沥青混合料, 弹性变形部分和永久变形部分的比例, 与应力、荷载作用时间和温度有关。在高温条件下, 或在长时间荷载作用下沥青混合料的行为响应接近黏性, 而在低温条件下或短时间荷载作用下则呈现弹性。

在静态荷载(重复荷载)作用下, 沥青混合料蠕变(永久)应变规律如图 1.3 所示。可以将其分为三个阶段^[6]: 第一阶段为迁移期, 蠕变(永久)变形在瞬间迅速增大, 但应变速率随时间迅速减小; 第二阶段为稳定期, 蠕变(永久)变形呈直线形稳定增长, 应变速率保持稳定, 该过程为总过程的主要部分; 第三阶段为破坏期, 蠕变(永久)变形和应变速率均急剧增大, 直至破坏。

应变速率随荷载作用时间(次数)的变化规律如图 1.4 所示。在较低的应力水平下, 材料主要表现出第一和第二阶段, 蠕变变形速率逐渐减小, 而总应变达到一定值; 在较高的应力水平下, 第二阶段的蠕变变形速率可能逐渐减小, 也有可能增大, 即发展到第三阶段。

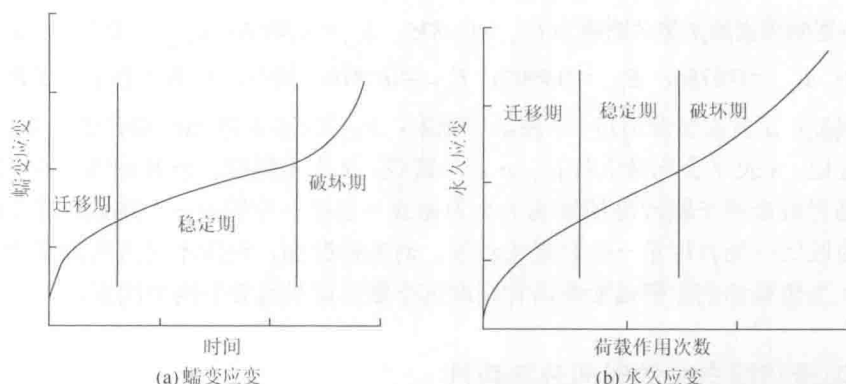


图 1.3 沥青混合料变形规律

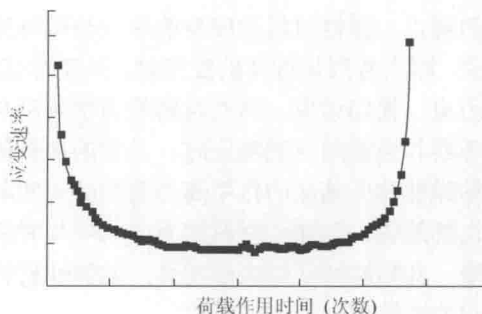


图 1.4 应变速率随荷载作用时间（次数）的变化曲线

2. 沥青路面车辙的时间分布特性

对实际新建或加速加载试验路面车辙的形成过程,可划分为三个阶段^[7]:①开始阶段的压密过程;②沥青混合料的流动过程;③矿质骨架的重新排列和矿质骨架的破坏过程。在开放交通初期,在车辆荷载作用下,混合料被压密,其变形有一个迅速增大的过程;但变形速率迅速下降,这与迁移期相对应;通车一段时间后,车辙变形速率趋于稳定,对应于稳定期;到路面使用后期,达到一定的标准轴次,辙槽处路面极易开裂破坏,最终导致其变形迅速增大,对应于破坏期。图 1.5 是在美国 WesTrack 试验路上实测的车辙深度与累计当量标准轴次(ESAL)的关系。

国内东南大学开展了环道车辙试验^[8],环道试验温度为 60℃,路面结构形式如表 1.4 所示,不同荷载次数作用下环道路面内外侧平均绝对车辙变化如图 1.6 所示。研究表明,六种路面结构均表现出三阶段的变形特性。

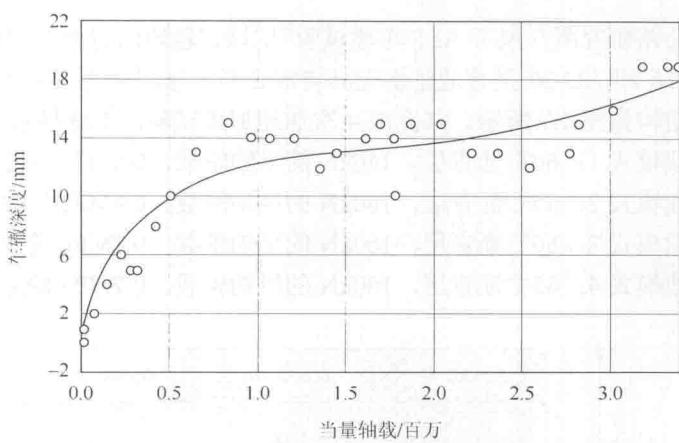


图 1.5 WesTrack Section 23 现场车辙与累计当量标准轴次关系

表 1.4 环道试验路面结构形式

结构类型	A	B	C	D	E	F
上面层 (4 cm)	AK-13A (SBS)	AK-13A (SBS)	SMA13 (SBS)	SUP13 (SBS)	AK-13A (SBS)	SMA13 (SBS)
中面层 (6cm)	AC-20I 改(SBS)	AC-20I 改 (AH70)	AC-20I 改 (SBS)	SUP20 (SBS)	AC-20I 改 (SBS)	AC-20I 改 (SBS)
下面层 (8cm)	AC-25I 改 (AH70)	AC-25I 改 (AH70)	AC-25I 改 (AH70)	SUP 25 (AH70)	AC-25I 改 (AH70)	AC-25I 改 (AH70)
基层 (36cm)	水泥稳定碎石	水泥稳定碎石	水泥稳定 碎石	水泥稳定碎石	沥青稳定碎石 (18cm)	水泥稳定碎石

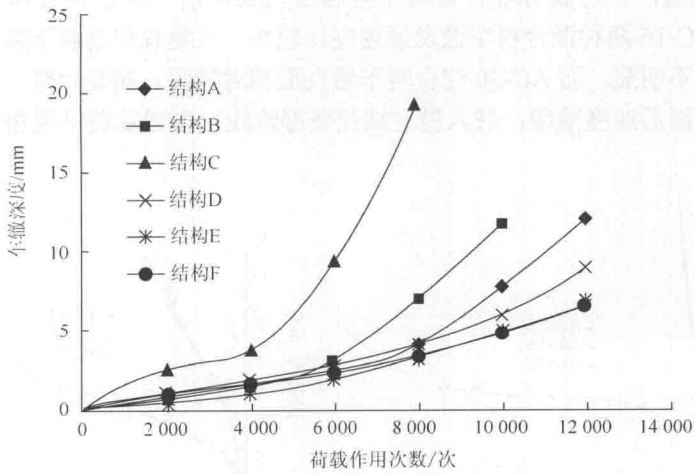


图 1.6 不同荷载作用次数后内外侧平均绝对车辙变化