

道路路面性能评价

理论及其应用

张金喜 ◎著



科学出版社

014060273

道路路面性能评价理论及其应用

张金喜 著



科学出版社

北京



北航

C1747449

U416.01
03

内 容 简 介

本书以与交通通行直接联系、对车辆行驶安全性和舒适性有重要影响的路面表面性能为核心,对路面性能的基本概念、基本检测设备和检测方法、评价方法、预测方法等,结合研究成果和工程应用进行了全面介绍。本书利用室内外驾乘试验研究了路面性能对驾乘舒适性和安全性的影响,提出了基于驾乘者心(生)理指标的路面性能评价理论和方法。在此基础上,提出了基于人性化的道路路面建设、养护管理和交通管理决策的方法。本书在传统路面性能类型基础上,初步探讨了路面噪声、路面明度、路面环境友好水平等功能性路面性能的检测和评价方法,具有较好的创新性。本书介绍了大量关于路面性能评价、预测的研究和工程资料,具有很好的参考和应用价值。

本书可供交通运输领域特别是道路与交通工程领域、交通管理部门的广大科研工作者、管理人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校道路工程、交通工程和交通运输专业高年级本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

道路路面性能评价理论及其应用/张金喜著. —北京:科学出版社,2014.7
ISBN 978-7-03-040010-9

I. ①道… II. ①张… III. ①路面性状-研究 IV. ①U416.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 041713 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:肖 兴 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 7 月第一次印刷 印张:22 3/4

字数:449 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

近三十多年来,我国国民经济的持续快速增长和经济总量的不断扩大,已带动全社会人员和物资流动总量的升级,导致全社会运输总需求量的不断增长,从而引发道路交通需求的持续增长。同时,城市化水平越来越高,人均出行需求越来越大,人员物资交流更加频繁,交通参与者在道路上的时间越来越长,因此要求道路交通运输必须向高效和优质服务的方向发展。此外,随着人民生活水平进一步提高,消费结构显著变化,交通参与者对道路的服务水平提出了更高的要求,并呈现多样性、个性化趋势,方便、快捷、舒适、安全、自主等价值取向明显增强。上述道路交通发展形势为我国的道路建设和养护管理提出了新的、更高的要求。

经过三十多年的建设,我国道路交通事业快速发展,道路基础设施数量迅速增长,高速公路里程已经达到世界第一。在新建道路基础设施持续增加的同时,道路养护维修工作日益繁重,道路养护维修将成为我国道路工程领域的主要工作内容。在道路设施质量管理方面,我国已经建立了比较完善的道路设施建设、养护维修的相关技术规范体系,保证了道路交通事业的稳定和持续发展。但也应看到,我国道路交通安全形势严峻,交通事故数量和损失仍是世界上最严重的国家之一,道路设施的技术状况和服务水平仍有待进一步提升,以提高道路的安全性和舒适性。

路面是道路设施的重要组成部分,是与交通通行直接联系的道路设施。路面表面性能既是路面设施技术状况的综合反应,又直接影响道路交通的舒适性和安全性,因此,对路面的表面性能进行科学、准确评价和预测,对于提高路面服务质量,进行路面养护维修决策具有重要作用。近年来,路面建设技术日新月异,温拌沥青混凝土技术、低噪声路面、透水路面、遮热型路面、防结冰路面、彩色路面、高识认性反光路面等环保型、人性化的道路建设技术,被逐渐开发出来并在工程上得到应用,使路面性能的含义更加广泛,路面性能评价正受到越来越多的关注。

在上述背景下,作者多年来在路面性能的评价、预测和应用等方面开展了广泛研究,对功能性路面性能的检测和评价方法进行了探讨。针对道路路面性能人性化的评价理论和方法问题,开展了基于驾乘者心(生)理反应的路面性能评价、养护维修决策和道路路面舒适性评价的研究。在此基础上,尝试了利用路面性能的反作用原理进行功能性路面建设的可能性。本书是对上述研究成果和工程应用的总结和介绍,希望本书能为相关研究和工程应用人员提供良好借鉴。

本书相关研究工作得到了国家自然科学基金项目“道路路面性能与交通安全的互动关系研究”(项目编号:50522201)、教育部高等学校博士学科点专项科研基

金项目“基于安全和舒适性考虑的路面性能评价理论和方法研究”(项目编号:20091103110008)、北京市交通委员会科技计划项目“北京市道路路面安全舒适性评价方法和标准研究”(项目编号:ky2009-19)等项目的支持,北京工业大学博士研究生王书云、硕士研究生杜艳花、刘利花、苏蕊葳、张晨、孔静静、崔亚萍、王利利等为本书提供了部分基础试验数据。在此,对上述提供研究资助和付出辛勤劳动的单位和个人一并表示衷心感谢。

路面性能的科学评价和预测是涉及多种因素的复杂问题,路面性能的含义和内容也在不断的变化中,目前国内外还鲜见专门全面论述路面性能的资料,本书在此方面做了尝试。但不论是深度还是广度方面,仍有大量的科学问题需要进一步研究,研究成果还需要在工程实践中不断完善与发展。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2014年1月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 路面性能的概念	1
1.2 路面类型与特点	2
1.3 路面性能的研究历史	14
1.3.1 国外路面性能研究简介	14
1.3.2 我国路面性能研究简介	17
1.4 研究内容	21
第 2 章 路面性能分类及检测	22
2.1 我国常用路面性能评价指标	22
2.1.1 路面破损程度	22
2.1.2 路面承载力	26
2.1.3 路面抗滑性能	27
2.1.4 路面平整度	33
2.1.5 路面车辙	36
2.2 路面功能性附加评价指标	39
2.2.1 路面轮胎噪声	40
2.2.2 路面明度	42
2.2.3 路面温度低减性能	43
2.2.4 路面振动性能	46
2.2.5 其他性能	52
第 3 章 路面性能评价	53
3.1 引言	53
3.2 我国公路路面性能评价方法	53
3.2.1 路面损坏状况指数	53
3.2.2 路面行驶质量	54
3.2.3 路面车辙	54
3.2.4 路面抗滑性能	55
3.2.5 路面结构强度	55
3.2.6 综合评价指标	56

3.3 沥青路面平整度分布的统计特征	56
3.3.1 路面状况与平整度数据检测	57
3.3.2 沥青路面平整度概率特性分析	57
3.3.3 沥青路面平整度分布正态性检验	58
3.3.4 基于偏态分布的平整度分布特征分析	59
3.4 水泥路面抗滑特征调查与分析	64
3.4.1 测试设备	64
3.4.2 水泥混凝土道路路面概况和路面性能测试方法	64
3.4.3 动态摩擦系数结果及其分析	65
3.4.4 摩擦系数随速度变化率与宏观构造关系	71
3.4.5 不同速度下摩擦系数与宏观构造关系	73
3.4.6 小结	75
3.5 沥青路面抗滑特征调查与分析	75
3.5.1 普通公路沥青路面抗滑特性	75
3.5.2 沥青路面雾封层预养护技术抗滑性能变化规律	82
3.6 沥青路面破损评价与分析	85
3.6.1 城市道路路面破损调查、评价与分析	85
3.6.2 公路路面破损调查、评价与分析	110
3.6.3 高速公路路面破损调查、评价与分析	115
第4章 路面性能预测	120
4.1 路面性能预测概述	120
4.1.1 确定型模型	120
4.1.2 概率型模型	121
4.2 高速公路沥青路面平整度预测模型的构建	121
4.2.1 平整度衰变影响因素分析	122
4.2.2 平整度预测模型建模方法的选择	123
4.2.3 基于时间序列的平整度预测模型建模方法	125
4.2.4 北京市高速公路路面平整度衰变模型的建立	127
4.3 公路路面性能预测模型	131
4.3.1 路面破损预测模型	131
4.3.2 平整度预测模型	132
4.3.3 公路路面的抗滑性能	132
4.4 基于综合指标的路面性能评价及预测	133
4.4.1 某高速公路路面技术状况	134
4.4.2 路段划分与路面性能指标计算	136

4.4.3	路面使用性能预测模型	144
4.4.4	路面使用性能预测	148
4.4.5	小结	153
第5章	功能性路面的路面性能	155
5.1	高识认性路面的研究	155
5.1.1	研究背景	155
5.1.2	国内外研究现状	156
5.1.3	技术路线	157
5.1.4	高识认性路面性能的室内试验研究	157
5.1.5	高识认性沥青路面试验路	180
5.1.6	沥青路面明度的调查和分析	189
5.1.7	小结	191
5.2	路面噪声特性研究	192
5.2.1	路面噪声概述	192
5.2.2	基于数字图像技术的路面特征测试方法	194
5.2.3	不同类型沥青路面吸声性能及机理	202
5.3	路面建设与碳排放量分析	213
5.3.1	日本道路路面建设碳排放计算	214
5.3.2	我国道路路面建设碳排放计算	220
5.3.3	小结	232
第6章	路面性能对驾乘舒适安全性的影响	234
6.1	引言	234
6.1.1	我国道路交通安全问题	235
6.1.2	交通运输中人本理念的提高	236
6.1.3	道路交通发展中的交通舒适性问题	236
6.1.4	基于驾乘者心(生)理反应的路面性能评价	237
6.2	抗滑性能对驾乘人员心(生)理反应的影响	239
6.2.1	概述	239
6.2.2	皮肤电	240
6.2.3	试验设备	241
6.2.4	试验方案	243
6.2.5	试验结果及讨论	245
6.2.6	小结	253
6.3	平整度对驾驶员心(生)理反应的影响	253
6.3.1	概述	253

6.3.2	心电指标	258
6.3.3	试验设备	264
6.3.4	室内驾乘试验	268
6.3.5	室外实际道路的驾乘试验	293
6.3.6	小结	317
6.4	路面破损程度对驾乘舒适性的影响	318
6.4.1	概述	318
6.4.2	路面破损状况数据整理	319
6.4.3	路面破损率与 RMSSD、LF/HF 关系	320
第 7 章	路面性能研究在养护管理决策中的应用	326
7.1	引言	326
7.2	路面养护管理决策	326
7.2.1	路面养护管理决策的目标	327
7.2.2	国内外发展现状	327
7.2.3	路面养护管理决策方法及优化	328
7.3	基于路面性能舒适安全特性的养护决策	331
7.3.1	路面性能与养护决策	331
7.3.2	基于平整度指标的路面养护维修决策	332
7.3.3	基于抗滑性能指标的路面养护维修决策	334
7.3.4	基于路面破损的路面养护维修决策	335
7.4	基于路面性能的道路运营管理	336
7.4.1	路面性能评价与道路运营管理	336
7.4.2	湿路面对道路运营安全的影响	337
7.5	速度抑制型波浪路面	344
7.5.1	研究背景	344
7.5.2	波浪形减速路面原理	345
7.5.3	速度抑制型波浪沥青路面断面设计	347
7.5.4	速度抑制型波浪沥青路面限速设计	348
7.5.5	速度抑制型波浪沥青路面材料和结构设计	349
7.5.6	速度抑制型波浪沥青路面施工工艺	350
7.5.7	速度抑制型波浪沥青路面指示标志设置	353
7.6	小结	353
	参考文献	355

第 1 章 绪 论

1.1 路面性能的概念

道路交通是人类最古老的交通方式之一,也是现代最便捷和常用的交通方式,在人类历史发展中发挥着重要作用。道路是道路的基础设施,道路设施的好坏决定道路的服务水平,因此,道路设施建设和管理水平对道路的运营具有重要影响。

通常来说,道路设施一般包括道路线形和道路路面两个主要部分。

道路线形指道路平面、纵断面和横断面的变化情况,主要评价指标包括道路的平曲线半径、纵曲线半径、坡度、道路宽度等。在此基础上,为保证现代道路机动车交通的快捷、舒适、安全运行,又衍生出平曲线线形特征、路面超高与加宽、横断面布置、平纵横协调等道路线形的评价指标。道路线形是道路设施的主要评价对象,道路线形指标的高低在某种程度上决定道路设施的技术等级、服务能力和水平。

道路路面宏观上来说是指导路设施的实体部分,包括路基、基层、面层和附属设施。道路路面设施的建设质量、建设水平、养护管理水平决定道路设施的使用寿命和服务质量。没有良好的道路路面设施,再好的道路线形也不能保证道路的高效运行。道路路面的各个部分是相互支持、相互作用的,良好的路基为路面提供稳定的基础,保证路面在不同的使用环境下都具有良好的使用性能;良好的基层为路面承担交通荷载提供坚实的基础;面层材料与自然环境接触,防止自然破坏因素对道路结构的侵蚀,同时为车辆运行提供舒适、安全的环境;附属设施则为道路设施提供保护,同时为道路交通提供安全保障。因此,现代道路路面的路基、基层、面层、附属设施是道路设施的必要组成部分,缺一不可,而且均须保持良好的技术状态。任何一个组成部分发生变化或出现劣化,都会使道路路面性能下降,进而影响道路的顺畅运行。

虽然道路路面的各个组成部分具有不同的性能和评价指标,但对于一个已经运行的道路路面来说,路基、基层、面层和部分附属设施性能的变化会通过路面表面性能的变化反映出来,路面表面性能的好坏可以综合反映道路路面设施的技术状况。因此,对于实际使用中的道路路面,一般通过“道路路面表面性能”的评定来评价道路路面设施的技术状况和服务水平。

道路路面表面性能也简称为路面性能或路面使用性能。20 世纪 60 年代,

Garey 和 Irick 首次提出了路面使用性能的概念,并将路面使用性能定义为“路面服务能力的演变历程”,按此定义提出了当前服务指数(present serviceability index, PSI)这一使用性能指标。1987 年,美国公路战略研究计划(Strategic Highway Research Program, SHRP)扩大了路面性能的含义,使其包含了路面行驶质量、损坏状况、结构的力学响应、行驶安全性及路面材料的疲劳、变形、开裂、老化特性等,成为一个泛指路面和材料各种技术行为的术语。进入 21 世纪以后,我国一些专家将路面性能与其形成内因联合在一起提出了“路面结构行为”的概念,其定义为“路面结构(和材料)的物理特征和力学特征在外界因素(荷载、环境)作用下的相互关系”,包括路面破坏、路面变形、材料特性、力学特性四个方面。

综合国内外大量相关文献,本书将路面性能定义为道路路面在预定的设计年限内,在规定的荷载和气候条件下,达到预期功能要求,实现和保障各类车辆安全、经济、舒适和快速行驶的能力与属性。本书主要对路面表面性能,即路面性能的检测、评价、预测和应用进行介绍。

1.2 路面类型与特点

根据路面面层材料的不同,目前路面类型主要包括砂土路面、无机结合料稳定路面、碎砾石路面、块料路面、水泥混凝土路面、沥青混凝土路面。

砂土路面是最原始的路面。为了便于人和车辆通行,人们把自然地面进行平整或将地面开挖至生土而形成道路路面,为提高该路面的性能,选用砂或碎砾石进行表面的稳定处理,即形成砂土或砂石路面。由于建设技术的缺乏,古代道路一般均为砂土路面。图 1-1 为秦直道的道路路面遗迹,其修筑大部分以“堑山”为主,即将山脊的一侧或两侧向下开挖,取平路面,挖取的土壤在山谷一侧,称为“堑谷”。



图 1-1 秦直道的道路路面遗迹

砂土路面为低等级路面,不能在高等级道路上使用,一般用于农村或临时性道路上(图 1-2)。砂土路面材料为松散颗粒,容易变形、飞散和移动,雨雪天容易出

现积水、淤泥现象,严重影响交通通行。因此,砂土路面的病害一般表现为松散、坑槽、车辙、飞散等。

砂土路面为颗粒类砂土修建的路面,强度低,易于产生变形和飞散,大风天气易引发尘土飞扬,雨雪天易产生积水和淤泥。为改善其性能,利用水泥、石灰、粉煤灰或其他无机类结合料对砂土路面表层进行稳定处理,通过摊铺、压实形成的路面称为无机结合料稳定路面。无机结合料稳定路面是在砂土路面基础上修建的路面,路面等级低,一般用于低等级公路或临时性道路上。无机结合料类型较多,除上述材料外,还可以使用电石渣等具有一定活性的材料。无机结合料稳定路面强度也较低,不能承担重载交通,路面也较容易产生变形、坑槽等病害。图 1-3 为某无机结合料稳定路面。



图 1-2 20 世纪初使用的砂土路面



图 1-3 某无机结合料稳定路面

碎砾石路面是一种在砂土路面基础上改进的较高等级的路面形式。1816 年,苏格兰工程师 Macadam 对碎石路面进行了研究,提出了使用两层碎石铺筑路面的马卡丹式路面结构。1858 年轧石机发明后,碎石路面得到广泛应用。现在碎砾石路面技术已与 19 世纪的碎石路面结构有较大不同,但一般来说,具有一定级配的碎砾石通过混合、摊铺和压实等工艺形成的路面均可称为碎砾石路面,施工中根据施工工艺的不同还有水结碎石路面和泥结碎石路面等不同的类型。典型的碎砾石路面如图 1-4 和图 1-5 所示。



图 1-4 20 世纪初的碎砾石路面



图 1-5 铺筑中的级配碎砾石路面

碎砾石路面具有较高的强度和良好的路面性能,养护管理得当可以使路面具有较长的使用寿命,为不同交通出行方式提供良好的服务。但碎砾石路面材料没有使用良好的胶结材料,颗粒材料之间主要通过嵌挤作用形成稳定的、具有一定强度的整体。如果路面某一部分发生松散,则将会引起路面的快速破坏,因此碎砾石路面的养护管理非常重要。碎砾石路面仍属于低等级路面,主要用于低等级公路、厂矿道路和临时施工便道。其主要病害类型包括松散、飞散、坑槽、车辙等。

也有些道路可将碎砾石用石灰、水泥类材料进行稳定处理,形成具有较高强度和稳定性的水泥稳定碎石或水泥稳定砂砾等路面。但一般情况下,这种材料主要用于路面基层的铺筑,称为半刚性材料,用于沥青路面基层,承担主要交通荷载。将半刚性材料直接作为路面材料使用的情况较少。

块料路面是利用规则的石块、烧制的或压制的黏土方砖、水泥混凝土方砖等块状材料,在经过处理的基层上铺筑形成的路面。块料路面具有较长的使用历史,公元前 400 年前后罗马帝国时期修建的罗马大道路面,大部分是由边长 1~1.5m 的石板镶嵌于灰浆之中形成的,有些道路路面是用方形大理石或厚 18cm 左右的琢石铺砌的。说明公元前 400 年前后,人们就已经通过对石料进行雕琢处理来修建规则的、高质量的道路路面。古罗马道路遗迹如图 1-6 所示。

近代机动化交通的发展,对道路路面性能提出了更高的要求。随着道路建设材料的改变和施工工艺的提高,块料路面也得到广泛应用。图 1-7 为 20 世纪初我国哈尔滨市石块砌筑的城市道路路面。图 1-8 为 20 世纪初英国伦敦市石块砌筑的城市道路路面。图 1-9 为 20 世纪初美国纽约市铺筑石块城市道路路面的情况。图 1-10 为 20 世纪初国外铺砌路面使用的方砖。



图 1-6 古罗马道路遗迹



图 1-7 20 世纪初哈尔滨市石块砌筑的城市道路路面

块料路面有大量的缝隙,雨水易于下渗造成路基强度下降,出现唧泥现象,影响道路的使用。因此,20 世纪初道路建设者采取在砌砖路面的缝隙中灌注水泥浆

或热沥青将缝隙堵塞的方式,部分减轻上述病害的发生,如图 1-11 和图 1-12 所示。

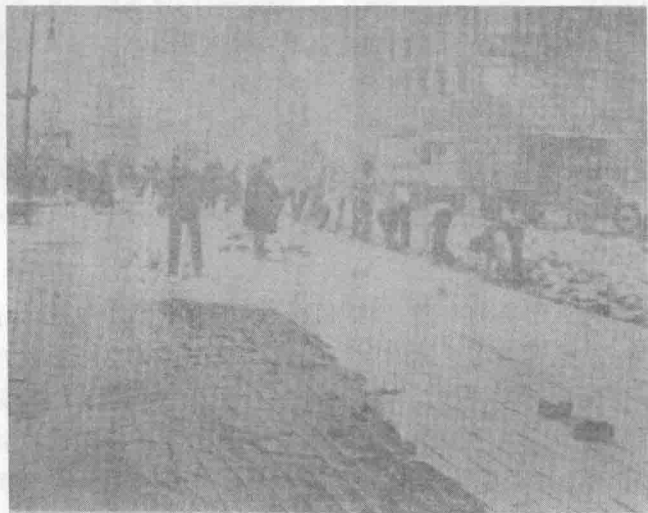


图 1-8 20 世纪初英国伦敦市铺筑的石砌路面

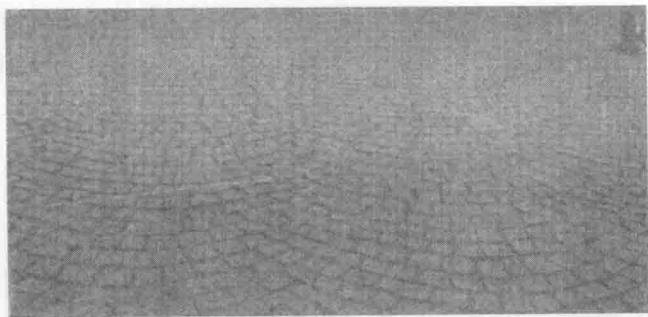


图 1-9 20 世纪初美国纽约市的石砌路面

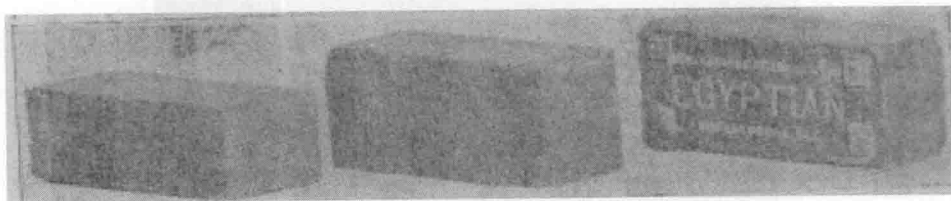


图 1-10 20 世纪初国外铺筑路面使用的方砖



图 1-11 铺砖路面缝隙中灌注水泥浆体的
施工情况



图 1-12 铺砖路面缝隙中灌注沥青的
施工情况

现在,块料材料类型更加多样,包括机械精确加工生产的规则石料、水泥混凝土生产的普通方砖、具有透水功能的混凝土方砖及各种颜色的彩色方砖,因而块料路面仍有较大的应用范围。目前,块料路面主要用于人行道路、广场道路、景区道路,经过专门材料和结构设计的路面也用于高等级的公路和城市道路。图 1-13 和图 1-14 为使用中的景区公路块料路面。块料路面的使用性能和寿命决定于材料的种类和类型,在具有足够强度的基层上铺筑规则、平整的块料可以形成高等级的道路路面,路面性能优良,用于高等级公路和城市道路建设;而基层强度较差,块料不规则或平整性较差,则只能铺筑出低等级路面,一般用于街区、广场、景区等道路,不适合快速交通通行。块料路面的病害主要包括雨水下渗引发的基层唧泥和基层强度下降、块料之间的错台引发路面平整度下降等问题。



图 1-13 使用中的景区公路块料路面



图 1-14 使用中的城市道路块料路面

水泥混凝土路面是高等级路面类型之一,在世界各国具有广泛的应用。水泥发明于 19 世纪 20 年代,水泥的发明使土木建筑行业发生了革命性的变化,建筑物的形状可以更加复杂、高度更高,桥梁的建设更加容易,桥梁跨度可以更大。水泥的英文名称为 cement,日本最初称水泥为“摄绵笃”,我国最早称水泥为“细绵土”,之后也称为“洋灰”。据文献介绍,我国最早的水泥厂诞生于 1889 年,坐落在唐山市,当时日产量不足 30t,年产量小于 1 万 t,如图 1-15 所示。1907 年该公司从丹麦史密斯公司购进 2 台 $\phi 2.1\text{m} \times 30\text{m}$ 回转窑,1908 年投产,成立了启新水泥公司,翻开了我国水泥工业发展史的第一页。2011 年我国水泥产量超过 20 亿 t,占全世界水泥产量的近 50%。目前,水泥材料不仅应用于房屋建筑、水电设施、桥梁等基础设施建设,也广泛应用于道路路面的建设。2009 年年底,我国有铺装的公路路面中,水泥混凝土路面约占 70%。图 1-16 和图 1-17 为某二级公路和高速公路的水泥混凝土路面。

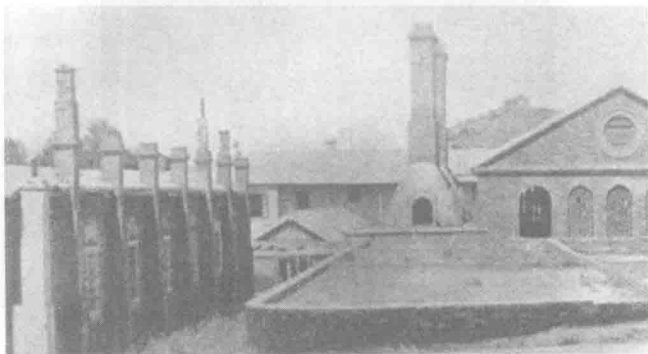


图 1-15 我国最早的水泥生产厂



图 1-16 某二级公路的水泥混凝土路面



图 1-17 某高速公路的水泥混凝土路面

经过多年的发展,水泥混凝土路面建设技术逐步提高。从结构形式上来说,有无配筋水泥混凝土路面、配筋水泥混凝土路面、连续配筋水泥混凝土路面;从施工工艺上来说,有普通水泥混凝土路面施工技术和水泥混凝土滑模摊铺施工技术;从路面表面构造上来说,有普通路面、刻槽路面、拉毛路面等。

水泥混凝土路面具有强度高、承载力大、稳定性好、耐久性好、识认性好等优点,有利于夜间行车,适合重载交通道路,因而在各种等级道路上均有广泛应用。水泥混凝土路面施工工艺和技术不同,路面性能也不同,良好的水泥混凝土路面的行车舒适性可以达到沥青混凝土路面的水平。但一般来说,水泥混凝土路面由于存在施工缝等各种接缝,容易产生颠簸,影响行车舒适性。路面行车噪声较大,长时间使用后路面抗滑性能下降。路面损坏后维修需时长,影响道路交通通行。图 1-18 为保存下来的秦皇岛市于 1959 年铺筑的水泥混凝土路面的局部状况。

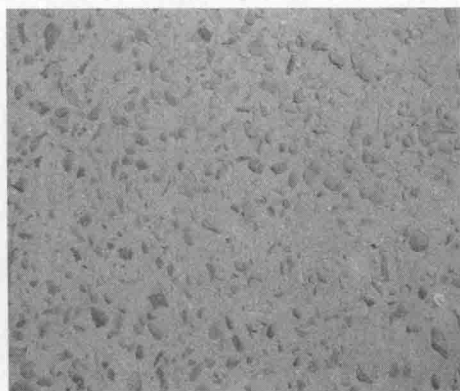


图 1-18 秦皇岛市 1959 年铺筑的水泥混凝土路面局部状况

水泥混凝土经过长时间的使用也会产生各种病害,主要包括断板、裂缝、错台、