



New views on Traffic Science and Technology of Highway

公路交通科技新论

道路水泥混凝土的

The Structure, Performance and Composition Design of Road Cement Concrete

结构、性能与组成设计

申爱琴 梁军林 熊建平 著



人民交通出版社
China Communications Press

公路交通科技新论

**The Structure, Performance and Composition Design of
Road Cement Concrete**

道路水泥混凝土的结构、性能与 组成设计

申爱琴 梁军林 熊建平 著

人民交通出版社

序

水泥混凝土路面具有承载能力强、稳定性好、料源充分、施工方便等优点，已成为路面结构的主要类型。截至2009年年底，我国水泥混凝土路面达到123.10万公里，约占有铺装路面的70%。但是，水泥混凝土路面在成功使用的同时，出现了不同程度的早期破坏，影响了运输效益发挥和行车安全舒适，甚至造成不良的社会影响。

水泥混凝土路面出现各类早期病害，除有路面设计施工不当的原因外，主要是对道路水泥混凝土的结构特性及工作环境综合作用缺乏深入的认识，现行道路水泥混凝土组成设计方法所采用的评价指标、设计参数未充分考虑真实工作环境下的道路水泥混凝土的路用性能要求。因此，开发针对不同使用条件、多指标和多参数、基于路用性能的道路水泥混凝土组成设计方法迫在眉睫。

鉴于此，本书作者承担了交通运输部西部交通建设科技项目“道路水泥混凝土组成设计研究”，开展了“道路水泥混凝土路用性能评价指标研究”、“原材料技术性质对道路水泥混凝土路用性能的影响研究”、“道路水泥混凝土路用性能设计与结构研究”、“道路水泥混凝土组成设计方法研究”4个专题的研究。取得的研究成果主要有：构建了基于不同交通等级的道路水泥混凝土耐久性气候分区；提出了不同分区条件下道路水泥混凝土应具备的施工性能、强度、耐久性和抗裂性的要求，及道路水泥混凝土路用性能评价体系；建立了包括原材料技术性质、路用性能与组成设计方法体系。研究成

果引入了系统论思想，建立分层次、分阶段设计的道路水泥混凝土组成设计新理念，提出基于路用性能的多指标、多参数控制的配合比设计方法，相关成果为规范的修订提供了科学的依据。

本书作者多年来一直致力于道路水泥混凝土的研究与应用，理论功底深厚，工程经验丰富。《道路水泥混凝土的结构、性能与组成设计》一书在内容上纳入了道路水泥混凝土性能研究、指标控制及参数选取的新理念及新方法，构建了道路水泥混凝土设计新体系，建立了道路水泥混凝土分层次体积设计方法，实现了目标设计、现场检验、竣工验收一体化；书中还就道路水泥混凝土的原材料控制技术及标准进行了阐述，补充完善了目前水泥混凝土路面施工规范相关内容的欠缺，并为原材料合理优选、精细控制提出标准，从源头上克服了道路水泥混凝土设计的盲目性。

本书不仅理念新，视角新，而且研究方法及测评技术均有新突破，是一本值得期待的道路水泥混凝土研究及应用领域的新专著。

相信《道路水泥混凝土的结构、性能与组成设计》一书的面世，必将使我国水泥混凝土路面领域的从业者重新认识道路水泥混凝土结构与性能，理解并掌握按照路用性能进行道路水泥混凝土组成设计的科学方法，为实现水泥混凝土路面科学化设计与施工提供理论及技术支持。

王秉纲

2010年12月

前 言

水泥混凝土路面 (Cement Concrete Pavement) 是我国高等级公路的主要路面结构形式之一。我国沥青资源相对匮乏,而水泥年产量连续多年居世界第一,且供大于求。因此,修筑水泥混凝土路面不仅符合我国发展循环经济、建设资源节约型和环境友好型公路交通的要求,而且可以拉动内需,促进地方经济的发展,因而得到较快发展。据统计,截至 2009 年年底,全国水泥混凝土路面达到 123.10 万公里,占全部铺装路面的比率提高至近 70%,成为世界上拥有水泥混凝土路面里程最多的国家。在未来数年内,全国各省份次骨架和县乡公路的建设进入高潮,水泥混凝土路面由于成本低及容易施工等特点,将成为地方公路的主要路面结构形式,预计还会得到更加迅猛的发展。

虽然水泥混凝土路面凭借强度高、耐久性优良、施工机械简单及材料来源广泛等优点,在全国各级公路中被广泛采用,但不少水泥混凝土路面在使用 2~5 年甚至更短的时期内出现了不同程度的开裂、断板、破损或地域性耐久性破坏,致使水泥混凝土路面的使用性能迅速衰减,难以达到设计的使用年限,有的甚至影响了交通安全,造成了不良的社会影响。

水泥混凝土路面出现早期破坏,除了有路面结构设计及施工质量控制的原因之外,主要是对道路水泥混凝土的结构特征以及工作环境综合作用缺乏系统深入的认识,在道路结构混凝土组成设计中未能充分考虑多种因素综合作用下的路用性能及其耐久性。众所周知,水泥混凝土路面的劣化是荷载、环境与道路混凝土内部物化反应综合作用的结果,而现有的道路水泥混凝土组成设计方法所采用的评价指标、设计参数及据此配制的道路水泥混凝土难以满足真实工作环境下的路用需要,这也是水泥混凝土路面出现早期破坏的重要原因之一。

针对水泥混凝土路面出现的上述问题,交通运输部西部交通建设科技项目管理中心于 2005 年立项“道路水泥混凝土组成设计研究”,由长安大学、广西交通科学研究所共同主持承担,西安市交通局、吉林省交通科学研究所、新疆高等级公路管理局、中交第一公路勘察设计院、惠州天虹道路桥梁工程监理有限公司等全国多家单位参与。该项目总的研究目标是通过认识水泥混凝土路面的真实工作

环境及其对道路水泥混凝土结构与性能的影响,研究原材料技术性质、材料组成参数与道路水泥混凝土宏观路用性能和微观结构的关系,建构基于路用性能的道路水泥混凝土组成设计方法和应用指南,并通过室内设计保证道路水泥混凝土的使用性能和延长其使用寿命,从而补充和完善现行水泥混凝土路面施工技术规范的相关条款,为设计、施工和养护单位提供使用技术依据。

该项目的研究过程历时近5年,室内试验总计3 000多组,耗费混凝土140多吨。经过项目参与单位的通力合作和研究者的不懈努力,项目于2008年年底通过了由交通运输部西部交通建设科技项目管理中心主持的项目成果鉴定验收,研究成果已经用于广西、广东、吉林、陕西等多个省份的水泥混凝土路面修筑。由于项目成果兼备创新性和实用性的特点,为提高我国道路水泥混凝土的应用技术水平提供了有力的支持和保障,具有显著的经济和社会效益。目前,该项研究获2009年陕西省科技进步一等奖以及中国公路学会科学技术奖一等奖。

多年来,作者一直致力于道路水泥混凝土的研究与应用,先后出版了《水泥与水泥混凝土》、《改性水泥与现代水泥混凝土路面》等专著。这本专著是在总结归纳作者多年来相关研究成果的基础上,主要结合交通运输部西部交通建设科技项目“道路水泥混凝土组成设计研究”的研究成果,通过有限的篇幅,系统论述道路水泥混凝土的结构、性能与组成设计,旨在为我国水泥混凝土路面领域的相关技术人员重新认识道路水泥混凝土结构与性能,按照路用性能进行道路水泥混凝土组成设计,为实现科学化施工提供理论基础及技术支撑。

本书引入了诸多道路水泥混凝土性能研究、指标控制及参数选取的新理念及新方法,构建了道路结构水泥混凝土组成设计的新体系,主要表现如下。

设计理念方面:引入系统论,首次建立了采用多指标和多参数体系控制、分层次、分阶段设计的道路水泥混凝土组成设计新方法,为道路水泥混凝土路用性能和耐久性设计提出了目标以及实现的途径;建立了耐久性气候分区以及综合自然环境、使用环境和施工环境的道路混凝土设计分区体系的基本框架,推荐了不同设计分区下的路用性能指标和材料组成参数的合理取值,填补了该研究领域的空白;首次提出了砂浆体积分量的概念,引入体积法设计理念,建立了道路水泥混凝土分层次体积设计方法,实现了道路水泥混凝土材料的结构设计,可对道路水泥混凝土全寿命阶段进行质量总控,提高了道路水泥混凝土设计的整体水平。

设计控制指标和测评方法方面:提出了新的综合多尺度、多影响因素的道路水泥混凝土抗弯拉强度设计评价指标及方法,建立了具有理论基础的强度指标关系模型,为强度—水灰比公式提供了理论基础;首次阐述了道路水泥混凝土的耐久性环境分类方法及分类指标,提出了抗侵入性、抗冻性和耐磨性测评方法,有效克服了传统耐久性评价指标的局限性;首次提出了模制劈裂强度指标,重新回

归了抗弯拉强度、模制劈裂抗拉强度和水灰比的相关关系式，完善了道路水泥混凝土强度设计指标体系，真正实现了目标设计、现场检验、竣工验收一体化。

原材料控制技术及标准方面：推荐了基于骨架密实结构的道路水泥混凝土粗细集料级配，首次提出了级配控制关键筛孔的概念并规定了相应的通过量；提出了不同使用条件下粗集料压碎值、最大公称粒径（NMPS）、针片状颗粒含量和细集料含泥量等指标的控制范围，并首次对针状和片状集料分别进行了规定；借助激光粒度分析技术，首次推荐了基于路用性能出发的道路水泥混凝土用水泥颗粒组成的合理分布范围；研究了机制砂道路混凝土，补充完善了目前水泥混凝土路面施工规范相关内容的欠缺，为原材料合理优选、精细控制提出标准，从源头上克服了道路水泥混凝土设计的盲目性。

本书共分为3篇。

第1篇为道路水泥混凝土的应用现状与发展趋势，共分为2章。第1章主要论述了道路水泥混凝土路面的发展机遇与挑战；第2章主要论述现代道路水泥混凝土的应用技术要求及实现途径。

第2篇为道路水泥混凝土的结构特征和性能要求，共分为3章。第3章主要分析论述了新拌及硬化道路水泥混凝土的宏观结构特征与影响因素，并探讨了其施工变异性；第4章主要剖析了道路水泥混凝土的微观结构特征及控制要求，分析了微观结构对宏观性能的影响，开发了基于图像分析技术的微观结构测试方法，并推荐了微观结构参数的合理选择与要求；第5章首先提出了基于环境要求的道路水泥混凝土路用性能要求及分阶段设计的新理念，同时构建了道路水泥混凝土设计分区的框架，界定了设计分区的特征，并确定了设计分区指标，提出了基于不同设计分区的道路水泥混凝土路用性能要求及多指标设计体系。

第3篇为基于路用性能的道路水泥混凝土组成设计方法，共分为4章。第6章主要介绍了道路水泥混凝土的分层次体积设计方法，包括砂浆的分层次设计及粗集料主骨架设计，还分析了砂浆—粗集料—道路水泥混凝土的层次结构组成，构建了分层次体积设计方法和设计流程；第7章通过大量室内试验，系统分析了道路水泥混凝土的原材料即水泥、粗集料、细集料（包括机制砂）以及外掺料对道路水泥混凝土技术性能的影响规律，并提出了不同使用条件下原材料的技术指标及要求；第8章论述了基于不同设计分区的道路水泥混凝土组成设计参数控制要求，按照不同设计分区的道路水泥混凝土的施工性能、力学性能以及耐久性要求，重点就水灰比、水泥用量、用水量、含气量以及矿物外掺量等重要参数进行了研究，并提出了相应的建议值；第9章介绍了道路混凝土配合比设计方法，并通过设计实例给出了设计流程及具体步骤，最后还介绍了道路水泥混凝土配合比设计软件及使用方法。

对于《道路水泥混凝土的结构、性能与组成设计》一书的顺利出版，作者要特别感谢西部项目中心的领导及同仁对“道路水泥混凝土组成设计研究”项目的重视和关切。在项目实施过程中，诸多专家对本项目的研究大纲都提出过有益的建议，项目合作单位即西安市交通局、吉林省交通科学研究所、新疆高等级公路管理局、中交第一公路勘察设计院及惠州天虹道路桥梁工程监理有限公司及其主研人员都给予了鼎力支持，特别是在全国资料收集、室内验证试验及试验路铺筑过程中都付出了艰辛，作者在此一并表示深深的谢意。在项目研究及报告撰写过程中，长安大学诸多博士及硕士研究生都付出了辛勤劳动，研究成果凝聚着学生们的智慧和汗水。在本书的撰写过程中，还要感谢研究生何俊辉、孟翔龙、刘太军、郭寅川等付出的辛苦劳动。

由于作者学识及水平有限，书中难免有疏漏及不足之处，敬请各位读者批评指正。

本书的编写及出版得到了交通运输部西部科技项目的经费支助。

作 者

2010 年 12 月

目 录

第 1 篇 道路水泥混凝土的应用现状与发展趋势	1
1 水泥混凝土路面的发展机遇与挑战	3
1.1 水泥混凝土路面的应用与研究现状	3
1.2 水泥混凝土路面的发展机遇	6
1.3 水泥混凝土路面面临的问题与挑战	10
1.4 道路水泥混凝土技术革新对水泥混凝土路面发展的促进作用	16
本章参考文献	16
2 现代道路水泥混凝土的应用技术要求	18
2.1 研究与应用现状	18
2.2 存在的问题与对策	22
2.3 新形势下的应用技术特点	25
2.4 现代道路水泥混凝土的提出及设计理念	28
本章参考文献	39
第 2 篇 道路水泥混凝土的结构特征和性能要求	41
3 道路水泥混凝土的宏观结构特征与影响因素	43
3.1 普通水泥混凝土的结构特征	43
3.2 道路水泥混凝土的结构特征	48
3.3 道路水泥混凝土结构稳定性的影响因素及施工变异性	56
本章参考文献	67
4 道路水泥混凝土的微观结构特征及控制要求	68
4.1 道路水泥混凝土的微观结构及表征手段	68
4.2 已有的研究结论	72
4.3 新型气孔结构参数测试方法的研发与应用	77
4.4 微观结构参数的合理控制要求	83
本章参考文献	106

5	道路水泥混凝土的路用性能要求	108
5.1	道路水泥混凝土的工作环境及性能要求	108
5.2	分阶段性能设计理念	125
5.3	设计分区的建立	129
5.4	基于设计分区的道路水泥混凝土多指标设计控制体系	136
	本章参考文献	144
第3篇	基于路用性能的道路水泥混凝土组成设计方法	147
6	道路水泥混凝土的分层次体积设计方法	149
6.1	粗集料—砂浆—水泥混凝土的层次结构组成	149
6.2	砂浆层次设计	151
6.3	粗集料主骨架设计	158
6.4	分层次体积设计方法	161
	本章参考文献	172
7	道路水泥混凝土对原材料的技术要求	173
7.1	水泥	173
7.2	粗集料	181
7.3	天然河砂	190
7.4	机制砂	193
7.5	外掺料	200
	本章参考文献	208
8	道路水泥混凝土对材料组成参数的控制要求	209
8.1	水灰比、水泥用量和用水量	209
8.2	含气量	217
8.3	净浆体积分量	221
8.4	粉煤灰用量	222
	本章参考文献	225
9	道路水泥混凝土的配合比设计方法	227
9.1	配合比设计方法	227
9.2	配合比设计软件	233
9.3	配合比设计示例	240
	本章参考文献	244



第 1 篇

道路水泥混凝土的应用现状与发展趋势

Part 1 The Application Status and Development Trend of Road Cement Concrete

1 水泥混凝土路面的发展机遇与挑战

国家西部大开发战略的实施给水泥混凝土路面的发展带来了新的机遇,但现代交通又对水泥混凝土路面提出了更高的要求。虽然水泥混凝土路面凭借强度高、耐久性优良、施工机械简单、抗水害能力强、材料来源广泛等优点,在全国各级公路中被广泛采用,但许多水泥混凝土路面早期损坏严重,影响了交通安全,造成了不良社会影响。究其原因,除了路面结构不合理外,水泥混凝土路面材料组成设计以及施工质量控制也存在着诸多问题。因此,我们有必要全面深入了解水泥混凝土路面研究与应用现状,抓住交通发展机遇,通过一系列科学研究和技术革新促进水泥混凝土路面的健康发展。

>>

1.1 水泥混凝土路面的应用与研究现状

自1865年英国修筑了世界上第一条水泥混凝土路面以来,水泥混凝土路面在近现代公路中的应用已有140多年的历史了^[1]。经过工程技术人员的不懈探索,水泥混凝土路面的结构、材料设计理论与方法日渐成熟,施工工艺及工法也取得了实质性的进展,水泥混凝土路面的研究与应用正趋于形成一门独立的技术类学科。

国外水泥混凝土路面的发展主要是在20世纪70年代以后,石油危机的阴影促使西方国家从国家资源战略利益考虑,增加了对水泥混凝土路面建设和研发的投入。这一时期水泥混凝土路面的设计、施工和养护技术均取得了长足进步,在各国干线公路网中的比重也越来越大^[2]。其中,如美国就是个典型的“黑白并举”国家,水泥混凝土路面在国家高速公路网中约占49%。英国1970年后修建的主干道中,有22%为水泥混凝土路面。法国自1972年以来,每年新建的干线公路中,水泥混凝土路面的比重约占10%。加拿大、日本的水泥混凝土路面占本国高级路面的比重近年来也有大幅提高,均超过10%。近30年来,西方各国对水泥混凝土路面应用技术一直在进行着总结和改进,大多数发达国家均形成了符合本国交通状况、环境气候、原材料特性和施工方式特点的水泥混凝土路面修筑技术。

图 1.1a)、b)分别为美国两条较为典型的采用水泥混凝土路面结构形式的高速公路和州际公路。



a)



b)

图 1.1 美国两条水泥混凝土路面结构形式的公路

我国修筑水泥混凝土路面已有 70 多年的历史(1924 年浙江省奉化市溪口镇采用日本进口水泥铺筑了第一条水泥混凝土路面公路)。在 20 世纪 80 年代末以前,由于我国水泥工业尚未形成规模化,原材料价格较贵,修筑的水泥混凝土路面里程并不多,绝大多数应用在二级或二级以下公路;同时由于缺乏成熟的设计方法,路面质量较差,早期损坏较快^[3]。直至 90 年代,随着国家对水泥混凝土路面建设和研究的重视,实施了以国家科委引导性项目“我国水泥混凝土路面发展对策及修筑技术研究”(“025 课题”)、国家“八五”科技重点攻关项目“滑模摊铺水泥混凝土路面修筑成套技术研究”(“八五”课题)等为代表的一大批基础性研究项目,其成果为我国水泥混凝土路面的建设提供了有力的技术指导^[4~6]。在该时期,水泥混凝土路面的施工也逐步走上了正规化、机械化和规模化道路,施工方式从以人工为主转变为小型机具、轨道、三辊轴和滑模等多种机械化摊铺方式百花齐放,路面质量也有了显著提高。我国在 20 世纪 90 年代新建了约 600km 的高速公路水泥混凝土路面,基本采用滑模摊铺施工,路面的主要性能指标已接近甚至超过了沥青路面^[5]。

图 1.2a)、b)分别为我国两条较为典型的采用水泥混凝土路面结构形式的高速公路和县乡公路。

进入 21 世纪以后,随着进口沥青价格的上涨和水泥工业供大于求情况的出现,出于建设成本和拉动地方经济考虑,我国水泥混凝土路面更是以前所未有的速度迅猛发展,在南方高温多雨地区和西部经济不发达地区尤为显著。截至 2009 年年底,我国已建成各类混凝土路面 123.10 万公里,比 1990 年增长了近 108 倍,目前每年在建里程已超过 25 000km,建设规模已达到了一个较高的水平。

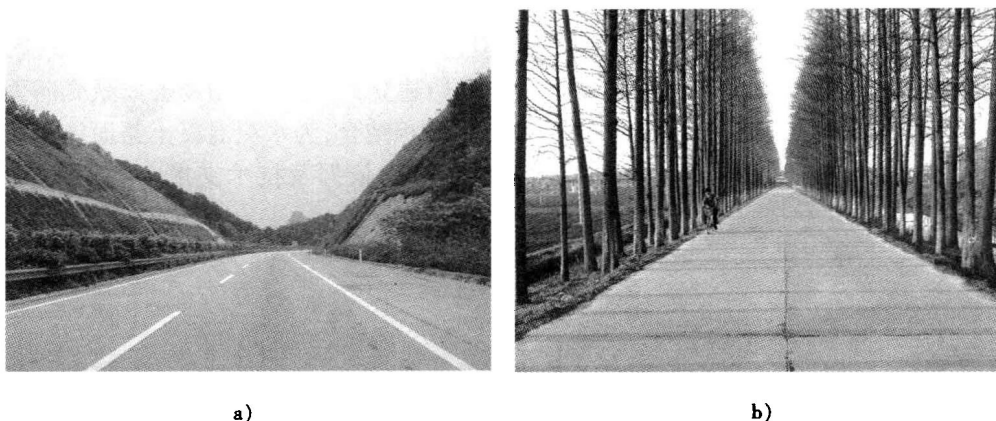
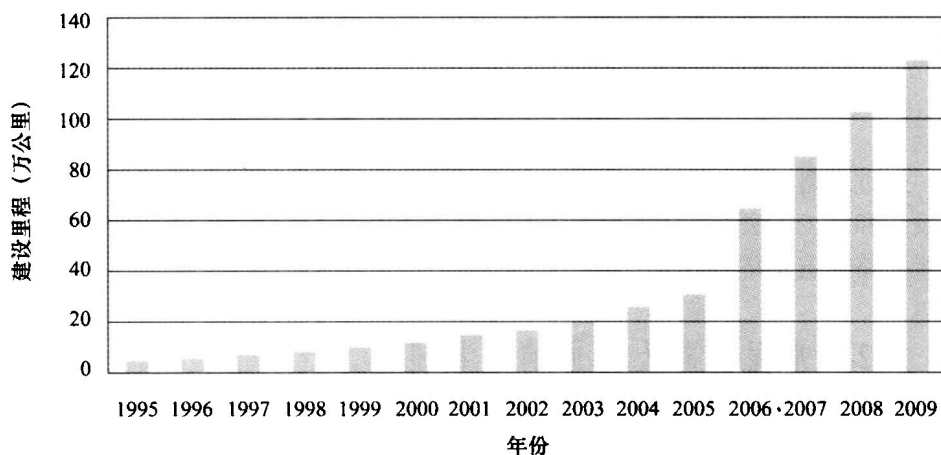


图 1.2 我国两条水泥混凝土路面结构形式的公路

我国水泥混凝土路面建设里程的增长情况如图 1.3^[7]所示。

图 1.3 我国水泥混凝土路面建设里程^[7]

在多年研究与实践的基础上,我国在水泥混凝土路面修筑技术方面已积累了丰富的经验,形成了符合我国气候、交通和施工特点的一大批原创性成果,部分达到了国际先进水平。在其基础上形成的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2002)、《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG F30—2003)等一大批技术规范的公布与实施,代表着我国混凝土路面技术框架体系已初步构建。

随着设计理论和方法的进步,我国在水泥混凝土路面的施工和检测水平方面同样有了质的飞跃。首先表现为施工机械逐步配备完善,虽然目前仍有较多低等级路面采用人工或小型机具的传统施工方法,但在二级以上公路中,使用自动化和

大型化摊铺机械的比率已较高,高速公路更是基本实现了滑模摊铺;其次,施工组织管理虽然与发达国家仍存在较大差距,但也逐步向规范化和程序化发展;最后,水泥混凝土路面的检测和跟踪监测体系已开始建立,先进的检测设备如激光断面仪、FWD 落锤式弯沉仪与传统的回弹、钻芯手段相结合,为水泥混凝土路面施工质量的检测判定和使用质量衰减的监测提供了有力依据及技术支持^[6],如图 1.4 所示。



a) 滑模摊铺方式



b) 进口小型平整度测试车

图 1.4 先进的水泥混凝土路面摊铺和检测方式

经过道路工程界技术人员多年来的不懈努力,水泥混凝土路面在结构设置、材料设计和施工方法等方面均有了快速发展,路面使用品质不断提高,已成为我国各等级公路的主要路面结构形式之一。

1.2 水泥混凝土路面的发展机遇

与西方国家相比,公路建设在当今我国国民经济中的地位更为凸显,扮演着促进地域发展、拉动内需和增加就业等多重角色^[8]。而水泥混凝土路面建设由于较为符合我国大部分地区的环境气候特点、原材料供应特性和地方经济结构特色,在我国经济受到全球经济危机的影响下,仍获得了良好的发展机遇。众所周知,公路建设对国民经济和地域发展有较大的促进作用,在我国加强、加快水泥混凝土路面建设还具备以下特定优势。

(1) 政治经济优势——拉动经济,解决就业,促进相关产业结构调整

公路建设在我国不但是一项经济行为,同时也是一项政治任务,是国家全面建设小康社会、促进经济发展和调整产业结构的重要战略手段之一^[9],而政治和经济上特有的巨大优势,为水泥混凝土路面的迅速发展提供了政策上的保障。

水泥混凝土最主要的原材料为水泥,而水泥产业近年来已发展成为我国国民

经济的重要基础性产业(图 1.5)。2008 年,国内水泥总产能达到 17 亿吨^[10],实现销售额 5 000 亿元,成为我国很多地区拉动地方经济、增加财政收入和解决就业的主要途径之一。但是,目前我国水泥供远大于求,每年有 3 亿多吨的过剩产能,市场恶性竞争愈演愈烈,导致了产业利润的急剧下滑和失业率的增长,更无多余资金进行产品升级换代。水泥混凝土路面建设需消耗大量水泥,可实现拉动地方经济发展、促进水泥产业结构调整和减少行业失业人口的目的。

与要求较高的沥青路面机械化施工程度相比,地方修筑水泥混凝土路面一般采用人工或小型机具施工方式,如图 1.6 所示。这需要更多的劳务人员,再加上配套服务设施,更能起到拉动当地经济、解决人口就业的作用。



图 1.5 我国的基础产业——水泥产业中的水泥生产厂实景



图 1.6 人工摊铺水泥混凝土路面

确保国际收支平衡是我国重要的政治经济方针,与重交通沥青大部分依赖于进口不同,我国道路混凝土用水泥基本上已实现国产化,从而既为国家节约了大量宝贵的外汇资源,也保证了国家的资源安全。

(2) 成本优势——缓解我国经济能力无法满足交通基础建设大发展的矛盾

建设成本上存在的巨大优势和我国经济能力薄弱的现状,为水泥混凝土路面在我国交通基础建设新高潮大背景下的迅速发展奠定了坚实基础。

为了早日实现全面建设小康社会奋斗目标,我国近年来加快了国家公路网的规划和建设。交通运输部在“十一五”期间制订了“7918”国家高速公路网规划,在 30 年内将建成总里程 8.5 万公里的高速公路网络^[11],如图 1.7 所示。同时,按照构建社会主义新农村的方针,我国未来每年要投资上千亿元建设农村公路,如再加上各地对省、市、县干道的建设与改造,我国每年的交通基建投资额度十分巨大。

但与之矛盾的是,我国目前国民经济实力仍较为薄弱,即使通过各类融资方式,也难以承担如此庞大的交通投资任务。因此,一方面要确保公路特别是路面的应有使用功能和耐久性,另一方面要尽量降低其造价成本,已成为我国公路建设不