

Material and Structure of
Eco-friendly Pavements

环保型路面 材料与结构

沙爱民 等 著



科学出版社

环保型路面材料与结构

Material and Structure of Eco-friendly Pavements

沙爱民等 著

科学出版社

北京

前 言

我开展环保型路面方面的研究始于 20 世纪 90 年代后期。记得留学回国后不久,西安当时沙尘天气多,城市又缺水,报刊对此报道较多。出于对城市环境的关注,在阅读国内外文献的基础上写了一篇涉及全透水路面材料和结构方面的论文,分析透水路面发展前景,并在 1998 年于清华大学召开的全国土木工程学会第八届年会上发表。记得当时有一位香港来的学者提问,认为这样的路面成本会非常高,很难有实用价值。我认为这取决于社会经济的发展 and 人们对路面功能的要求,而这些往往比预想的要快得多。2003 年我随当时的交通部技术考察团去欧洲进行大约一个月的考察,期间就发现多孔路面已经在荷兰、德国等应用。国内当时高速公路建设正如火如荼,人们更多的是在关心普通沥青路面的病害问题。后来去日本考察得知,日本的新修或改建的城市道路路面基本都已经采用排水路面。此后,国内有关部门学习国外新型路面结构,铺设了一些以开级配磨耗层为代表的排水路面,目的是提高路面的抗滑性能。

此后的十多年里,出于利用工业和生活废渣、提高路面抗水损害能力以及适应路面安全维护等需求,我先后开展了反光路面、排水路面、融冰雪路面等方面的研究,但是并未深入思考这些课题之间的相关性和系统性。而在此期间,国外尤其是日本等国在功能性路面方面商业材料的开发和应用发展得很快。

社会的变化永远快于人们的想象。本世纪初以来,缺乏环保意识的经济发展模式和基础设施建设方式使自然环境问题变得愈来愈突出,与此同时,人们对生活水平要求却愈来愈高。国家也适时地提出了建设资源节约、环境友好“两型”社会的发展方向,城镇化与城市发展成为国家中长期科技发展纲要的主要研究领域,城市基础设施功能提升成为该领域“十一五”期间研究的重要课题。在此形势下,我有机会以环保型道路建造和维护技术为主题,组织开展这方面的系统研究。在课题的研究中,我也在不断地思考**开展环保型道路研究的社会价值和科学意义的真正所在。**

道路的出现最初是为了满足人们便利、快捷的通行需要,而这种需要对现代社会的发展已经变得必不可少,同时这种便利与快捷的内涵也在不断地深化和更新。道路与人的关系越来越密不可分,其结果是公路、城市道路、厂区道路、机场、广场、停车场等正在遍及城市和连接乡镇。**路面不仅是汽车行驶、行人行走的通道,而且已经成为人们工作和生活的环境!**

传统路面作为道路结构中
与行车荷载和自然环境直接相作用的组成部分,对其提出的要求是承重、平整、安全、耐久。而现代路面除了要有上述从保证正常的道路行驶条件出发而提出的基本要求之外,还应该从作为人类环境的角度出发,提出的透水、降噪、低吸热、除冰雪、减小汽车尾气污染、诱导视觉等新的环境友好功能。

我认为这种**对路面从单一的通道功能到综合的通道加环境功能认识的改变,其意义不仅仅在于拓展路面的功能,而且是在于引发路面技术的变革。这将导致路面材料和结构技术设计理念的改变,乃至新一代路面设计理论和施工技术的形成,其中之一便是多孔路面的设计理论、材料制备以及结构建造和维护技术。**其结果将丰富和发展现代道路工程以及相关学科知识体系,带动现代道路工程技术进步和相关社会产业的发展。

在此认识的支配下,原本看似分散、关联性不大的理论和技术,很快形成了明晰的主线和一致的方向,也最后形成了这本书的整体架构和有机内容,并且从中可以看出尚有很多需要研究和发展的地带和空间。以环保型路面为题目撰写这本书籍,着实旨在推崇构建环保型路面技术体系,更新路面设计理念和**方法,丰富道路工程学科知识,适应社会发展要求。**

本书是我开展环保型路面研究以来,进行纵向和横向课题研究,指导博士和硕士论文研究等,尤其是主持开展国家“十一五”科技支撑计划课题“环保型道路建造与维护技术”研究所获成果的汇集。

全书共分 15 章,第 1 章综述技术背景和国内外相关技术状况;第 2、3 章是以透水路面为主题的透水沥青路面材料和沥青路面透水特性;第 4、5、6 章是以低噪声路面为主题的低噪声多孔沥青路面、低噪声多孔水泥路面以及沥青路面的吸声特性;第 7、8、9、10 章是以低吸热路面为主题的保水式路面、遮热式路面、热阻式路面以及沥青路面热效应;第 11、12、13 章是以除冰雪路面为主题的弹性除冰雪路面、微波融冰雪路面以及能量转化型热力融冰雪路面;

第 14 章是体现兼有提高视觉和废物利用功能的反光玻璃沥青混凝土路面;第 15 章是吸收分解尾气路面。

全书由长安大学的沙爱民教授组织策划、撰写(第 1、4、5、7~9、14 章)和统稿工作,其中参加具体撰写的人员有:长安大学的蒋玮博士(第 2、3 章)、齐琳博士(第 6 章)、赵昕博士(第 10 章)、郭德栋博士(第 12 章),以及合作研究的哈尔滨工业大学谭忆秋教授、徐慧宁博士和大连海事大学周纯秀副教授(第 11、13 章),中国建筑材料科学研究总院王晓燕高工和深圳市海川实业股份有限公司王守臣高工(第 15 章)。

参加相关内容研究的还有沙爱民教授指导的硕士李矗、万海峰、潘熙洋、刘莲馥、程诚、孙高峰、张冬梅、刘佳、汤琨、路俊杰、卢欣,以及其研究团队的长安大学裴建中副教授和胡力群副教授等,在此特别致谢。借此机会感谢科学技术部社会发展司和住房与城乡建设部科技司在“十一五”科技支撑计划课题的立项和执行过程中给予的支持和指导,感谢中国城市规划设计研究院马林总工程师对相关项目开展提供的指导和帮助。

由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,欢迎批评指正。

沙爱民

2011 年夏 于长安大学 西安

目 录

前言

| | |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 透水路面 | 1 |
| 1.1.1 问题的提出 | 1 |
| 1.1.2 透水路面的特点 | 2 |
| 1.1.3 透水路面技术状况 | 4 |
| 1.2 低噪声路面 | 8 |
| 1.2.1 问题的提出 | 8 |
| 1.2.2 低噪声路面的特点 | 12 |
| 1.2.3 低噪声多孔沥青路面技术状况 | 13 |
| 1.2.4 低噪声多孔水泥路面技术状况 | 14 |
| 1.3 低吸热路面 | 16 |
| 1.3.1 问题的提出 | 16 |
| 1.3.2 保水式路面技术状况 | 21 |
| 1.3.3 遮热式路面技术状况 | 22 |
| 1.3.4 热阻式路面技术状况 | 23 |
| 1.4 除冰雪路面 | 24 |
| 1.4.1 问题的提出 | 24 |
| 1.4.2 弹性颗粒除冰雪路面技术状况 | 28 |
| 1.4.3 热力除冰雪路面技术状况 | 28 |
| 1.4.4 微波除冰雪路面技术状况 | 30 |
| 1.5 反光路面 | 31 |
| 1.5.1 问题的提出 | 31 |
| 1.5.2 国内外研究状况 | 33 |
| 1.6 分解尾气路面 | 34 |
| 1.6.1 汽车尾气的主要成分及危害 | 34 |
| 1.6.2 汽车尾气污染治理方法 | 35 |
| 1.6.3 分解汽车尾气的路面材料国内外研究状况 | 36 |
| 参考文献 | 38 |
| 第 2 章 透水沥青路面材料 | 44 |
| 2.1 透水沥青混合料空隙特性与渗透规律 | 44 |
| 2.1.1 空隙细观几何特性 | 44 |
| 2.1.2 空隙渗透特性 | 49 |

| | | |
|------------|---------------------|------------|
| 2.1.3 | 空隙堵塞特性 | 52 |
| 2.1.4 | 集料粒径对空隙率的影响规律 | 56 |
| 2.1.5 | 空隙率预估模型 | 59 |
| 2.2 | 透水沥青混合料材料组成设计 | 61 |
| 2.2.1 | 基于DEM方法的混合料级配优化 | 61 |
| 2.2.2 | 沥青用量确定方法优化 | 69 |
| 2.2.3 | 透水沥青混合料设计流程 | 74 |
| 2.3 | 透水沥青混合料路用性能 | 76 |
| 2.3.1 | 水热性能 | 76 |
| 2.3.2 | 低温及抗冻性能 | 83 |
| 2.3.3 | 疲劳特性 | 85 |
| 2.3.4 | 热物性能 | 97 |
| | 参考文献 | 101 |
| 第3章 | 沥青路面结构透水特性 | 102 |
| 3.1 | 透水沥青路面结构设计系统 | 102 |
| 3.1.1 | 透水沥青路面结构分类 | 102 |
| 3.1.2 | 透水路面排水系统设计 | 104 |
| 3.1.3 | 透水沥青路面结构层厚度 | 107 |
| 3.1.4 | 透水沥青路面层间结合 | 121 |
| 3.1.5 | 美国透水性沥青路面结构形式分析 | 124 |
| 3.1.6 | 透水沥青路面结构类型推荐 | 128 |
| 3.1.7 | 透水沥青路面结构设计方法 | 138 |
| 3.2 | 透水沥青路面结构设计要求 | 140 |
| 3.2.1 | 透水设计 | 140 |
| 3.2.2 | 承载力验算 | 146 |
| 3.3 | 沥青路面透水功能设计 | 149 |
| 3.3.1 | 达西定律及其适应范围 | 149 |
| 3.3.2 | 透水系统模型 | 150 |
| 3.3.3 | 渗透系数 | 155 |
| 3.3.4 | 渗透试验 | 161 |
| 3.4 | 透水沥青路面降雨入渗模型与透水功能评价 | 166 |
| 3.4.1 | 降雨过程的数学模型 | 167 |
| 3.4.2 | 雨水入渗的物理过程 | 171 |
| 3.4.3 | 路面透水模型参数确定方法 | 172 |
| 3.4.4 | 路面透水模型的建立与透水功能评价 | 175 |
| 3.5 | 透水沥青路面结构层材料要求 | 199 |
| 3.5.1 | 透水面层 | 199 |
| 3.5.2 | 过滤层 | 202 |

| | | |
|------------|---------------------|------------|
| 3.5.3 | 透水基层 | 202 |
| 3.5.4 | 透水垫层和隔水层 | 208 |
| 3.5.5 | 隔离层 | 209 |
| 3.5.6 | 透水沥青路面结构层材料设计参数 | 212 |
| 3.6 | 透水沥青路面的养护与适用性 | 214 |
| 3.6.1 | 透水沥青路面的养护 | 214 |
| 3.6.2 | 透水沥青路面的适用场合 | 217 |
| 3.6.3 | 透水沥青路面的经济性 | 218 |
| 3.6.4 | 尚需进一步解决的问题 | 218 |
| | 参考文献 | 219 |
| 第4章 | 低噪声多孔沥青路面 | 224 |
| 4.1 | 低噪声多孔沥青混合料原材料要求 | 224 |
| 4.1.1 | 沥青 | 224 |
| 4.1.2 | 集料与填料 | 229 |
| 4.2 | 低噪声多孔沥青混合料组成设计 | 231 |
| 4.2.1 | 多孔沥青混合料设计方法 | 231 |
| 4.2.2 | 配合比设计 | 233 |
| 4.3 | 低噪声多孔沥青混合料性能 | 243 |
| 4.3.1 | 试验原材料性能 | 243 |
| 4.3.2 | 高温性能 | 244 |
| 4.3.3 | 低温性能 | 250 |
| 4.3.4 | 水稳定性 | 250 |
| 4.4 | 多孔低噪声沥青路面施工技术 | 253 |
| 4.4.1 | 试验路概况 | 253 |
| 4.4.2 | 施工关键工序 | 254 |
| 4.4.3 | 工程质量检测 | 256 |
| 4.4.4 | 降噪效果 | 258 |
| | 参考文献 | 259 |
| 第5章 | 低噪声多孔水泥混凝土路面 | 260 |
| 5.1 | 多孔水泥混凝土配合比设计方法与制备工艺 | 260 |
| 5.1.1 | 原材料性质和混凝土性能试验方法 | 260 |
| 5.1.2 | 多孔水泥混凝土配合比设计方法 | 263 |
| 5.1.3 | 制备工艺的比较 | 266 |
| 5.2 | 多孔水泥混凝土的强度 | 267 |
| 5.2.1 | 多孔水泥混凝土的强度组成特点 | 267 |
| 5.2.2 | 水灰比对多孔水泥混凝土强度的影响 | 268 |
| 5.2.3 | 孔隙率对多孔水泥混凝土强度的影响 | 269 |
| 5.2.4 | 聚丙烯纤维对多孔水泥混凝土强度的影响 | 269 |

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 5.2.5 矿质超细粉对多孔水泥混凝土强度的影响 | 273 |
| 5.3 多孔水泥混凝土的路用性能 | 277 |
| 5.3.1 抗冻性能 | 277 |
| 5.3.2 耐磨性能 | 278 |
| 5.3.3 降噪性能 | 280 |
| 5.3.4 透水作用 | 283 |
| 参考文献 | 285 |
| 第6章 沥青路面吸声特性 | 286 |
| 6.1 道路交通噪声的成因及多孔沥青路面声学特性 | 286 |
| 6.1.1 道路交通噪声组成 | 286 |
| 6.1.2 轮胎-路面噪声发生机制 | 288 |
| 6.1.3 轮胎/路面噪声影响因素及降噪措施 | 291 |
| 6.1.4 多孔沥青路面声学特性分析 | 291 |
| 6.2 孔隙结构特性对多孔沥青路面吸声性能的影响 | 293 |
| 6.2.1 材料吸声性能表征与影响因素 | 293 |
| 6.2.2 多孔沥青路面降噪性能 | 295 |
| 6.2.3 基于微观结构模型的多孔沥青路面孔隙结构参数特性 | 299 |
| 6.2.4 多孔沥青混合料电声学类比等效线路 | 304 |
| 6.2.5 孔隙结构参数对吸声性能的影响分析 | 308 |
| 6.3 基于有限元的多孔沥青混合料结构参数优化研究 | 314 |
| 6.3.1 有限元模型及参数 | 315 |
| 6.3.2 路面噪声特性与集料结构关系 | 315 |
| 6.3.3 基于降噪性能的沥青路面结构参数拓扑优化 | 319 |
| 6.4 多孔沥青路面近场噪声测试与评价研究 | 325 |
| 6.4.1 轮胎/路面噪声测量方法比较 | 325 |
| 6.4.2 近场噪声测试车的设计 | 327 |
| 6.4.3 现场近场噪声测试车试验 | 334 |
| 参考文献 | 342 |
| 第7章 保水式路面 | 345 |
| 7.1 保水式路面母体材料 | 345 |
| 7.1.1 保水性母体材料设计 | 346 |
| 7.1.2 OGFC 沥青混合料配合比设计 | 346 |
| 7.2 保水性材料的制备和评价 | 351 |
| 7.2.1 保水性浆体原材料的要求 | 351 |
| 7.2.2 保水性浆体的制备 | 356 |
| 7.2.3 保水性材料性能评价指标和方法 | 358 |
| 7.2.4 保水性材料性能变化规律 | 360 |
| 7.2.5 保水性材料组成 | 373 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| 7.2.6 保水性材料的保水机理 | 373 |
| 7.3 沥青路面保水性浆体灌注 | 375 |
| 7.3.1 保水性材料的灌注要求 | 375 |
| 7.3.2 保水性材料灌注量的测定和估算 | 377 |
| 7.4 保水性材料降温性能评价 | 377 |
| 7.4.1 保水性材料降温效果试验方法 | 377 |
| 7.4.2 保水性材料降温效果直接对比 | 381 |
| 7.4.3 保水性材料降温效果因素影响分析 | 381 |
| 7.5 保水式路面路用性能 | 385 |
| 7.5.1 水稳定性 | 385 |
| 7.5.2 高温稳定性 | 387 |
| 7.5.3 低温性能 | 388 |
| 7.5.4 承载能力 | 388 |
| 7.6 保水式路面施工工艺及经济效益 | 390 |
| 7.6.1 母体结构的铺筑 | 390 |
| 7.6.2 保水性材料的灌注 | 391 |
| 7.6.3 保水性路面的成本分析 | 393 |
| 7.6.4 保水式路面的适用场合 | 394 |
| 参考文献 | 394 |
| 第8章 遮热式路面 | 396 |
| 8.1 热辐射理论分析与遮热路面工作原理 | 396 |
| 8.1.1 物体热辐射 | 396 |
| 8.1.2 沥青路面的热辐射 | 400 |
| 8.1.3 遮热式路面工作原理 | 403 |
| 8.2 太阳热反射涂层材料组成设计 | 404 |
| 8.2.1 涂层材料的基本性质 | 404 |
| 8.2.2 太阳热反射涂层材料的技术要求 | 405 |
| 8.2.3 太阳热反射涂层材料组成成分 | 409 |
| 8.2.4 太阳热反射涂层材料的组成设计 | 413 |
| 8.2.5 太阳热反射涂料的工作性能 | 415 |
| 8.3 太阳热反射涂层降温效果试验 | 417 |
| 8.3.1 室内试验仪器及控制 | 417 |
| 8.3.2 室内降温效果试件制备 | 423 |
| 8.3.3 室内试验过程与结果分析 | 425 |
| 8.3.4 室外试验方法与结果分析 | 429 |
| 8.4 太阳热反射涂层的路用性能 | 434 |
| 8.4.1 太阳热反射涂层的抗滑性能 | 434 |
| 8.4.2 太阳热反射涂层的耐磨性能 | 439 |

| | | |
|-------------|-------------------|------------|
| 8.4.3 | 太阳热反射涂层的耐腐蚀性能 | 441 |
| 8.5 | 太阳热反射涂层施工 | 441 |
| 8.5.1 | 太阳热反射涂层材料的制备 | 441 |
| 8.5.2 | 太阳热反射涂层的施工工艺 | 442 |
| 8.5.3 | 太阳热反射涂层的经济成本 | 444 |
| 8.5.4 | 试验路段 | 444 |
| 8.5.5 | 太阳热反射涂层适用场合 | 448 |
| | 参考文献 | 449 |
| 第9章 | 热阻式路面 | 450 |
| 9.1 | 热传导理论基础和热阻式路面工作原理 | 450 |
| 9.1.1 | 热传导理论基础 | 450 |
| 9.1.2 | 热阻材料的选择 | 451 |
| 9.1.3 | 热阻路面工作机理 | 452 |
| 9.2 | 热阻路面降温测试要求 | 453 |
| 9.2.1 | 物体温度测试方法 | 453 |
| 9.2.2 | 热阻式路面降温效果测试系统构成 | 454 |
| 9.2.3 | 试验试件制备及控制要求 | 456 |
| 9.3 | 沥青蛭石混凝土路面的降温效果 | 457 |
| 9.3.1 | 蛭石特性 | 457 |
| 9.3.2 | 沥青蛭石混凝土路面降温试验 | 458 |
| 9.4 | 沥青煅烧铝矾土混凝土路面降温效果 | 460 |
| 9.4.1 | 铝矾土及煅烧铝矾土特性 | 460 |
| 9.4.2 | 集料全部采用煅烧铝矾土的混凝土路面 | 461 |
| 9.4.3 | 集料部分采用煅烧铝矾土的混凝土路面 | 468 |
| 9.4.4 | 煅烧铝矾土集料热阻式路面路用性能 | 474 |
| 9.5 | 施工控制要求与成本效益分析 | 474 |
| 9.5.1 | 施工控制要求 | 474 |
| 9.5.2 | 成本效益分析 | 475 |
| 9.5.3 | 热阻路面的适用场合 | 476 |
| | 参考文献 | 476 |
| 第10章 | 沥青路面热效应 | 477 |
| 10.1 | 路面传热方式与热物理参数 | 477 |
| 10.1.1 | 路面基本传热方式 | 477 |
| 10.1.2 | 路面热物理参数分析 | 479 |
| 10.1.3 | 热物理参数对路表温度的影响分析 | 489 |
| 10.2 | 沥青路面温度场模拟与变化规律 | 493 |
| 10.2.1 | 国内外路面温度场研究成果总结 | 494 |
| 10.2.2 | 路面温度场的理论预估方法 | 497 |

| | | |
|---------------|----------------------|------------|
| 10.2.3 | 基于有限元法的沥青路面温度场模拟 | 501 |
| 10.2.4 | 沥青路面温度影响因素分析 | 510 |
| 10.3 | 路面对环境的放热效应模型 | 517 |
| 10.3.1 | 气温及不同下垫面温度的日变化规律 | 517 |
| 10.3.2 | 沥青路面对环境产生的热效应 | 521 |
| 10.3.3 | 沥青路面热效应影响因素分析 | 527 |
| 10.4 | 沥青路面路表空气层温度模拟 | 532 |
| 10.4.1 | 路表空气层模型 | 532 |
| 10.4.2 | 路表空气层温度数值模拟 | 535 |
| 10.4.3 | 路表空气层温度的影响因素分析 | 541 |
| 10.4.4 | 路面对周围人体热舒适性影响分析 | 548 |
| 10.5 | 低吸热路面热效应分析 | 553 |
| 10.5.1 | 保水路面热效应 | 553 |
| 10.5.2 | 遮热路面热效应 | 554 |
| 10.5.3 | 热阻路面热效应 | 555 |
| 10.5.4 | 路面温度调节技术效果对比分析 | 557 |
| | 参考文献 | 561 |
| 第 11 章 | 弹性除冰雪沥青路面 | 564 |
| 11.1 | 弹性材料技术性质 | 564 |
| 11.1.1 | 原材料 | 564 |
| 11.1.2 | 弹性材料对混合料性能的影响 | 565 |
| 11.1.3 | 弹性材料技术标准 | 571 |
| 11.2 | 弹性除冰雪沥青混合料级配组成设计 | 572 |
| 11.2.1 | 弹性材料掺配方法的研究 | 572 |
| 11.2.2 | 弹性除冰雪沥青混合料级配组成设计 | 572 |
| 11.3 | 弹性沥青混合料成型工艺 | 583 |
| 11.3.1 | 拌和工艺 | 584 |
| 11.3.2 | 室内成型工艺 | 590 |
| 11.3.3 | 弹性材料路面施工工艺 | 596 |
| 11.4 | 弹性沥青路面除冰雪性能 | 599 |
| 11.4.1 | 弹性除冰雪沥青路面除冰雪机理 | 599 |
| 11.4.2 | 室内模拟试验 | 609 |
| 11.5 | 弹性除冰雪路面实体工程铺筑及应用效果评价 | 616 |
| 11.5.1 | 弹性除冰雪路面实体工程概况 | 616 |
| 11.5.2 | 弹性除冰雪路面的铺筑 | 617 |
| 11.5.3 | 弹性除冰雪路面使用性能观测 | 617 |
| | 参考文献 | 620 |

| | |
|---|-----|
| 第 12 章 微波融冰雪路面 | 622 |
| 12.1 磁铁矿沥青路面材料组成与结构设计 | 622 |
| 12.1.1 磁铁矿石与磁铁矿集料 | 622 |
| 12.1.2 磁铁矿沥青混合料组成设计及性能检验 | 624 |
| 12.1.3 磁铁矿沥青混凝土结构层特性 | 636 |
| 12.1.4 磁铁矿沥青路面结构组合设计 | 638 |
| 12.2 微波与磁铁耦合发热机理 | 641 |
| 12.2.1 微波及微波加热技术 | 642 |
| 12.2.2 磁铁矿微波发热机理 | 645 |
| 12.3 磁铁矿沥青路面微波除冰理论及仿真模型 | 652 |
| 12.3.1 磁铁矿沥青路面微波除冰理论 | 652 |
| 12.3.2 微波除冰仿真模型 | 657 |
| 12.3.3 微波除冰合理加热时间 | 661 |
| 12.4 磁铁矿沥青路面微波除冰效率 | 668 |
| 12.4.1 磁铁矿集料品位和用量对除冰效率的影响 | 668 |
| 12.4.2 环境温度对除冰效率的影响 | 675 |
| 12.4.3 冰层厚度对除冰效率的影响 | 679 |
| 12.4.4 微波发射频率与加热模式对除冰效率的影响 | 683 |
| 12.4.5 除冰效率与除冰成本比较 | 689 |
| 参考文献 | 691 |
| 第 13 章 能量转化型热力融冰雪路面 | 692 |
| 13.1 能量转化型道路融雪试验系统的开发 | 692 |
| 13.1.1 能量转化型道路融雪试验系统工作原理 | 692 |
| 13.1.2 能量转化型融雪路面及内部热管受力特性分析 | 693 |
| 13.1.3 能量转化型道路融雪试验系统的建设 | 700 |
| 13.1.4 能量转化型道路融雪系统的融雪效果 | 702 |
| 13.2 能量转化型道路融雪系统温-湿耦合融雪模型 | 710 |
| 13.2.1 基本假设 | 711 |
| 13.2.2 能量转化型道路融雪系统温度场 | 712 |
| 13.2.3 能量转化型道路融雪系统湿度场的研究 | 718 |
| 13.2.4 能量转化型道路融雪系统温-湿耦合融雪模型 | 723 |
| 13.2.5 能量转化型道路融雪系统温-湿耦合融雪模型的计算方法 | 723 |
| 13.3 能量转化型道路融雪系统温-湿耦合融雪模型的验证 | 728 |
| 13.3.1 能量转化型道路融雪系统融雪效果的评价方法 | 728 |
| 13.3.2 能量转化型道路融雪系统温-湿耦合融雪模型预测效果评价方法 | 729 |
| 13.3.3 能量转化型道路融雪系统温度场的验证 | 729 |
| 13.3.4 能量转化型道路融雪系统湿度场的验证 | 733 |
| 13.3.5 能量转化型道路融雪系统温-湿耦合模型的验证 | 736 |

| | | |
|---------------|------------------------------------|------------|
| 13.4 | 能量转化型道路融雪系统布设技术 | 738 |
| 13.4.1 | 我国降雪分布特点及代表性城市的选取 | 738 |
| 13.4.2 | 能量转化型道路融雪系统仿真分析方法 | 740 |
| 13.4.3 | 能量转化型道路融雪系统运行效果的影响因素研究 | 741 |
| 13.4.4 | 多地区多融雪目标能量转化型道路融雪系统单位面积设计热负荷 | 751 |
| 13.5 | 道路融冰雪实体工程铺筑及应用效果评价 | 755 |
| 13.5.1 | 能量转化型道路融雪系统实体工程结构设计 | 755 |
| 13.5.2 | 能量转化型道路融雪系统施工工艺 | 756 |
| 13.5.3 | 能量转化型道路融雪系统实体工程融雪性能观测 | 758 |
| 13.5.4 | 能量转化型道路融雪系统使用性能影响因素分析 | 760 |
| 13.5.5 | 效益分析及推广应用前景 | 763 |
| | 参考文献 | 764 |
| 第 14 章 | 反光玻璃沥青混凝土路面 | 766 |
| 14.1 | 玻璃沥青混凝土设计要求和方法 | 766 |
| 14.1.1 | 玻璃沥青混凝土设计要求 | 766 |
| 14.1.2 | 材料组成设计方法 | 768 |
| 14.2 | 玻璃沥青混凝土组成设计 | 771 |
| 14.2.1 | 原材料性质分析 | 771 |
| 14.2.2 | 级配选择 | 773 |
| 14.2.3 | 最佳沥青用量确定 | 778 |
| 14.3 | 玻璃沥青混凝土反光特性 | 782 |
| 14.3.1 | 反光原理 | 782 |
| 14.3.2 | 反光性能评价 | 782 |
| 14.4 | 玻璃沥青混凝土路用性能 | 790 |
| 14.4.1 | 高温稳定性 | 790 |
| 14.4.2 | 低温抗裂性 | 792 |
| 14.4.3 | 水稳定性 | 794 |
| 14.4.4 | 抗滑性能 | 796 |
| 14.4.5 | 渗透性 | 797 |
| 14.5 | 玻璃沥青混凝土路面施工 | 798 |
| 14.5.1 | 施工配合比 | 798 |
| 14.5.2 | 施工与检测 | 800 |
| | 参考文献 | 803 |
| 第 15 章 | 吸收分解汽车尾气路面 | 804 |
| 15.1 | 光催化净化尾气机理及改性技术 | 804 |
| 15.1.1 | 光催化剂净化机理 | 804 |
| 15.1.2 | 光催化剂改性技术 | 807 |
| 15.1.3 | 光催化剂的负载 | 810 |

| | | |
|--------|---------------------------------|-----|
| 15.2 | 耦合型吸收分解汽车尾气光催化剂和添加剂 | 812 |
| 15.2.1 | 试验设备及材料 | 812 |
| 15.2.2 | 纳米 TiO ₂ 分散 | 812 |
| 15.2.3 | TiO ₂ 浆料光催化性能 | 817 |
| 15.3 | 矿物负载型吸收分解汽车尾气光催化材料和添加剂 | 822 |
| 15.3.1 | 载体矿物的性能测试及选择 | 822 |
| 15.3.2 | 载体用量对光催化效果的影响 | 830 |
| 15.3.3 | 制备流程 | 832 |
| 15.3.4 | 海泡石负载纳米 TiO ₂ | 832 |
| 15.3.5 | 电气石负载纳米 TiO ₂ | 842 |
| 15.4 | 吸收分解尾气路面材料设计及其效果评价 | 850 |
| 15.4.1 | 无机钾水玻璃光催化涂料与丙烯酸光催化涂料的性能比较 | 850 |
| 15.4.2 | 水性无机涂料配方的优化 | 851 |
| 15.4.3 | 水性无机光催化涂料的配制 | 853 |
| 15.4.4 | 光催化涂料的性能 | 861 |
| 15.4.5 | 光催化涂料中试生产 | 864 |
| 15.5 | 吸收分解汽车尾气路面材料的实施效果 | 866 |
| 15.5.1 | 光催化涂料施工技术要求 | 866 |
| 15.5.2 | 吸收分解汽车尾气路面材料的路用性能 | 867 |
| 15.5.3 | 路面分解汽车尾气效果实测 | 869 |
| | 参考文献 | 871 |

第 1 章 绪 论

路面被定义为位于道路结构的最上部、与行车荷载和自然环境直接作用的组成部分。承重、平整、安全、耐久的路面是提供行车快速、安全、可靠的行驶条件的重要保证。因而，路面的基本要求是具有一定的强度和稳定性，具有能够抵抗水、热等作用的耐久性，具有一定的表面平整度和粗糙度，以满足汽车行驶要求。

随着人类社会的发展，道路交通与人的关系越来越密不可分。道路路面不仅是作为汽车行驶的通道，而且也成为人们工作和生活居住环境的重要组成部分。既然作为人们居住的重要环境组成，对路面除了要有上述从保证正常的道路行驶条件出发而提出的基本要求之外，还希望路面具有能够透水、降噪、低吸热、除冰雪、减小汽车尾气污染、诱导视觉等新的环境友好功能。在这一社会环境发展要求驱使下，近年来出现了冠以排水、透水、低噪声、静音、自融雪、除冰雪等新型路面的研究和应用，并有越演越烈的趋势。

为获得强度、稳定性以及耐久性，传统路面的材料和结构的设计理念都是着眼于形成密实、不透水、均一的路面材料，主要从受力角度考虑结构的功能性和耐久性。然而，从维持水循环、吸收噪声、利于热量传递等角度考虑，可能更需要路面材料组成向多孔、透水、非均一的方向发展，还要从更宽广的物理和化学角度考虑水储存和流溢、声传播与吸收、热传递和交换、气体吸收与分解等结构功能的发挥。这不仅仅是对道路技术提出了更高的要求，而且必将导致路面材料技术的变革，乃至新一代路面设计理论和施工技术的形成。

社会发展与技术变革是互相促进的。社会发展中提出的问题促使工程技术人员相应去发明创造新型路面材料和结构，乃至新的理论与方法；新型路面材料和结构将会促进道路路面技术的发展和运用，乃至促进社会和谐发展。

1.1 透水路面

1.1.1 问题的提出

在城市建设中，绝大多数的城市道路、停车场、广场、商业步行街、人行道及公园道路的铺装普遍采用密级配沥青混合料、水泥混凝土等材料。此类不透水材料虽然铺装简单、工艺成熟，但对城市的生态环境和人居环境的负面影响日渐突出。

首先，这种不透水铺装使透入地下雨水的数量锐减，大部分降雨通过城市排水系统排走，不能有效补充地下水。其次，这种不透水铺装使雨天路表面积水不能及时排走，一方面降低了道路的舒适性和安全性；另一方面在大降雨时，地面径流量急剧增高，容易出现峰值，加重了城市排水系统负担。有资料表明，我国城市道路的不透水覆盖率达 7%~15%，特大城市可能超过 20%^[1]。

城市沥青路面和水泥路面的增多,不透水地面面积比例的增大,导致地表径流增大,某些径流系数高达 90%。由不同地面覆盖的径流系数(表 1.1)可知,城市的各种屋面、水泥混凝土和沥青混合料路面处地表径流系数为 0.90 左右,也就是说,只有约 10%的雨水才能透入土壤,若考虑截留与蒸发损失则更少。如果地下水埋藏较浅,地下水尚可补给;如果埋藏较深,几乎不能补给。

表 1.1 城市中不同地面覆盖的径流系数^[2]

| 地表情况 | 径流系数 |
|--------------------|------|
| 各种屋面、水泥混凝土和沥青混合料路面 | 0.90 |
| 块石铺砌、沥青表面处理路面 | 0.60 |
| 级配碎石路面 | 0.45 |
| 片石路面 | 0.40 |
| 无铺砌土路面 | 0.30 |
| 绿地、公园 | 0.15 |

此外,地表径流由于经过较长距离才能进入城市排水系统,该过程使雨水溶入大量的城市地表污染物,易造成水资源的二次污染^[3,4]。

为了解决上述难题,最直接的方法就是在城市修建中投入大量资金改造和扩建下游区排水系统,可供选择的方法为增加上游雨水的滞留时间并且延缓雨水的排出,具体的措施包括储水池、雨水沼泽地、池塘等。但是,这些方法一方面造价昂贵,更重要的是受城市空间的限制使用起来并不符合实际。而透水性沥青路面由于其具有良好的透水性,可能会成为一种有效的手段来解决洪峰流量增大、城市水资源匮乏和城市排水系统在大雨期间瘫痪等问题。因为该路面结构不需要额外的城市空间,只需通过暂时存储降雨,然后逐步下渗,最后通过土基或者在土基上把雨水排出。如果雨水直接透入土基,在下渗过程中雨水可以得到有效净化,解决了不透水表面所产生的二次污染问题。

1.1.2 透水路面的特点

透水路面,是指由较大空隙率的混合料作为路面结构层、允许路表水进入路面甚至路基的一类路面的总称。这种大空隙结构使雨水透入路面,有效补充城市地下水,改善城市生态环境;此外,还具有减少水污染、减小路表径流、降噪和缓解城市热岛效应等诸多优点。

透水路面与传统路面相比具有以下特点:

1) 减小洪峰流量,减轻城市排水系统压力

透水路面具有良好的透水能力,减少路面积水、路表径流以及进入雨水管的流量,因而可以减缓径流曲线,降低峰值流量,有效缓解城市排水系统的泄洪压力,有利于城市防洪。据美国纽约的研究成果表明^[5],使用透水性沥青路面可使洪峰流量减少 80%左右。

2) 有效补充地下水资源

根据材料、土质类型以及降雨量等条件设计合理的透水路面可以使雨水通过路面结构渗入路基。雨水由路面直接渗透减少了地面径流,同时经过路面和土壤的截留、吸附、