

多孔隙材料与透水铺装结构 理论与实践

李辉 杜群乐 陆海珠◎著

POROUS MATERIALS AND PERMEABLE PAVEMENT STRUCTURES
THEORY AND APPLICATION



中国建材工业出版社

多孔隙材料与透水铺装结构 理论与实践

POROUS MATERIALS AND PERMEABLE PAVEMENT STRUCTURE
THEORY AND APPLICATION

李 辉 杜群乐 陆海珠 著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

多孔隙材料与透水铺装结构理论与实践/李辉, 杜群乐, 陆海珠著. --北京: 中国建材工业出版社, 2020. 1

ISBN 978-7-5160-2666-3

I. ①多… II. ①李… ②杜… ③陆… III. ①透水路
面—路面铺装 IV. ①U416.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 188702 号

内 容 简 介

本书以多孔隙材料与透水铺装为主要研究对象, 对透水铺装材料与结构的相关研究成果进行了系统性梳理与阐述, 内容涉及透水铺装概述、材料选择、结构设计理论与方法、水文设计、工程实践等多方面内容, 并探索可持续路面技术如彩色反射涂层、路面寿命周期综合评价方法等在透水路面中的应用。

本书可供从事海绵城市、透水铺装、道路工程相关技术、管理、决策人员参考, 也可供大中专院校相关专业教学人员及对此领域感兴趣的读者借鉴。

多孔隙材料与透水铺装结构理论与实践

Duokongxi Cailiao yu Toushui Puzhuang Jiegou Lilun yu Shijian

李 辉 杜群乐 陆海珠 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 13.75

字 数: 320 千字

版 次: 2020 年 1 月第 1 版

印 次: 2020 年 1 月第 1 次

定 价: 86.00 元

本社网址: www.jcbs.com, 微信公众号: [zgjcgychs](https://www.jcbs.com)

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 68343948

本书如有印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换, 联系电话: (010) 88386906

前 言

透水铺装作为海绵城市的组成部分之一，也是重要的道路设施、排水载体，在城市基础设施建设中逐步受到关注与重视，各地政府、科研机构及设计单位均对此表现出极高的兴趣与热情。我国在透水铺装设计与建设方面起步相对较晚，目前多应用于居民小区、广场、园林、停车场以及人行道等轻载路面。同时，随着国内对透水铺装体系、结构设计、材料选择、生态功能、建设与养护等方面研究的深入，也推动了透水铺装技术在城市道路、公路、港口等更多领域的逐步应用与推广。

本书将围绕透水铺装材料与结构的相关研究展开，系统阐述透水铺装土基、基层、面层、结构、水文以及环保涂层材料等方面内容。具体包括：概述（第1章）、土基材料与性能（第2章）、开级配碎石基层（第3章）、水泥混凝土面层材料（第4章）、沥青混凝土面层材料（第5章）、结构设计理论与方法（第6章）、彩色透水路面反射涂层光学特性及耐久性研究（第7章）、路面寿命周期经济成本与环境影响综合评价（第8章）、工程应用案例（第9章）。

感谢相关人员在书稿素材整理与校核方面所做的贡献，希望本书能够为从事海绵城市及透水铺装行业的技术研究人员与管理人员提供借鉴和参考，对于书中的不足之处，敬请读者批评指正。

本专著研究成果得到了国家重点研发计划资助（2016YFF0108200）及河北省交通运输厅项目资助（QG2018-5），特此表示感谢！

编著者

2019年11月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 透水铺装研究背景	1
1.2 透水铺装材料与结构概述	3
1.3 透水铺装的应用范围与现存问题	6
第 2 章 土基材料与性能	8
2.1 透水铺装土基加固方法研究现状	8
2.2 试验概况	12
2.3 低掺量水泥土力学性能的试验研究	17
2.4 低掺量水泥土渗流性能的试验研究	24
2.5 脲酶固化土水文性能的试验研究	25
2.6 脲酶固化土力学性能的试验研究	27
2.7 本章小结	29
第 3 章 开级配碎石基层	31
3.1 研究背景	31
3.2 原材料和试验方法	31
3.3 回弹模量	35
3.4 剪切强度	38
3.5 永久变形	38
3.6 本章小结	42
第 4 章 水泥混凝土面层材料	43
4.1 大孔隙水泥混凝土力学性能影响因素研究	43
4.2 大孔隙水泥混凝土增强技术	48
4.3 大孔隙水泥混凝土环保性能研究	58
4.4 大孔隙水泥混凝土堵塞机理分析	73
第 5 章 沥青混凝土面层材料	81
5.1 透水沥青混合料孔隙特征及其对性能的影响	81
5.2 固废填料在沥青混合料中的研究及应用	94

第 6 章 结构设计理论与方法	108
6.1 基于水文性能的透水路面设计理论与方法	108
6.2 透水铺装区域模拟	116
6.3 透水路面设计理论与方法	119
6.4 透水路面典型结构组合与力学分析	129
第 7 章 彩色透水路面反射涂层光学特性及耐久性研究	144
7.1 绪论	144
7.2 研究方法	146
7.3 路面材料全频谱光学反射特性变化规律	149
7.4 路面材料全频谱光学反射特性与色度空间模型	154
7.5 反射路面涂层材料全频谱光学反射特性与热学特性模型	155
7.6 路面材料全频谱光学反射特性优化评价方法	158
7.7 本章小结	170
第 8 章 路面寿命周期经济成本与环境影响综合评价	171
8.1 路面寿命周期经济成本和环境影响综合计算方法	172
8.2 透水路面透水性影响的计算模型	182
8.3 寿命周期经济成本与环境影响评价工具开发及应用	188
第 9 章 工程应用案例	193
9.1 河北省曲港高速公路安国服务区(南区)	193
9.2 郑州荥阳市京襄城遗址生态园休闲步道工程	198
9.3 上海茸吉路路面工程	199
9.4 本章小结	200
参考文献	201

第1章 概述

1.1 透水铺装研究背景

我国城市化快速发展过程中普遍存在开发强度高、地表铺装硬化等诸多问题，从而改变了城市原有的水文条件与生态环境。首先，地表径流大幅增加，增大了传统末端处理设施的负荷，而且超负荷流量引发了严重的城市内涝问题。据统计，2008—2010年，全国62%的城市发生过不同程度的内涝，内涝灾害超过3次的城市达137个。2012年，我国有184个县级以上城市遭受了不同程度的内涝灾害^[1]。其次，地表径流裹挟着空气中的悬浮物及路表各种有机污染物排入附近水体，造成城市面源污染。另外，在近年来气候变化与人类活动的综合影响下，水资源供需矛盾愈发突出。针对以上城市水安全、水环境、水资源三大问题，探讨新型的雨洪管理理念与方法成为目前的主要方向，国内外就此积极开展实践，并提出了适合本国的各种理论体系。

1.1.1 美国——最佳管理措施与低影响开发

1972年，在美国《净水法案》（Clean Water Act, CWA）中首次提出了“最佳管理措施”（Best Management Practices, BMPs），最初是为了解决城市面源污染问题，在逐步推广的过程中发现BMPs措施主要针对排放末端的处理，对于不同的地区与流域不具有普适性。1990年，美国马里兰州乔治王子郡（Prince George's County）首次采用低影响开发（Low Impact Development, LID）理念，减少非渗透路面的使用，保留自然区域^[2]。“低影响开发”（LID）理念从微观尺度出发，采用分散、小规模源头综合性措施，控制道路径流污染和总量，减少城市开发前后水文、生态条件的改变，即开发后的地表径流量不超过开发前的地表径流量，保持径流峰值出现的时间基本不变，如图1.1所示，如今已成为美国及其他发达国家普遍采用的城市绿色雨水基础设施技术。

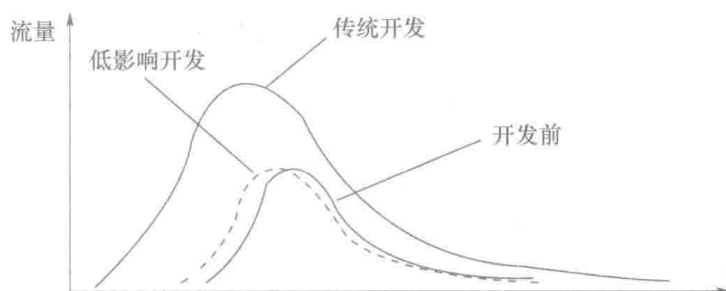


图 1.1 “低影响开发”水文原理示意图^[3]

1.1.2 英国——可持续排水系统

20世纪90年代,基于美国BMPs措施,英国开始推行一系列雨洪管理政策。1997年,苏格兰的Jim Conlin^[4]首次提出了“可持续城市排水系统”(Sustainable Urban Drainage System, SUDS),来描述暴雨径流管理措施。SUDS包括一系列排水技术手段,从源头、传输过程和末端处理三个阶段进行分级削减和控制,在每个环节采用不同的控制措施和设计方法,最终实现预防措施、源头控制、场地控制和区域控制四个目标,形成暴雨径流管理链。

1.1.3 澳大利亚——水敏感性城市设计

20世纪90年代,澳大利亚提出了“水敏感性城市设计”(Water Sensitive Urban Design, WSUD)这一理念,在WSUD理念中,雨洪管理是一个子系统,旨在控制洪水径流、提高水质、收集雨水用于非饮用渠道。在2006年左右,多名学者开始关注WSUD理念在整个城市水循环系统中的生态整合框架,包括供水系统、排水系统以及雨洪管理系统,目的是实现城市建设与城市水循环的协同发展,保护城市生态环境与水资源^[5]。与前几种理念不同,WSUD更注重整合资源和学科交叉,将雨水处理和景观设计相结合,以雨洪管理子系统为中心,联合其他子系统,进而形成“工具包”,共同促进城市水循环的健康发展。2016年,国内王晓锋等^[6]对WSUD这一理念的内涵、基本原则等进行了总结,以三峡库区城市水体为中心,基于WSUD理论进行了创新性设计。

1.1.4 新西兰——低影响城市设计与开发

新西兰“低影响城市设计与开发”(Low Impact Urban Design and Development, LIUDD)的关键点在于避免水质和流域污染,而非水流状态管理^[7],并不仅仅针对城区的流域和径流进行管理优化。LIUDD理念可表示为

$$\text{LIUDD} = \text{LID} + \text{CSD} + \text{ICM} + \text{SB} \quad (1-1)$$

式中 LID——低影响开发;

CSD——小区域管理;

ICM——综合流域管理;

SB——可持续建筑。

LIUDD理念不仅采用了低影响开发(LID)这一理念,还将城市设计(Urban Design, UD)融入其中,从综合规划的角度强调人类城市的发展和建设活动不能损害自然环境和资源的理念、方法和措施。

1.1.5 中国——海绵城市

我国于2012年首次提出“海绵城市”(Sponge City)概念,在2014年至2015年期间相继发布了《海绵城市建设技术指南》《关于开展中央财政支持海绵城市建设试点工作的通知》《海绵城市建设绩效评价与考核办法》《关于推进海绵城市建设的指导意见》等一系列政策意见和技术指南,并于2015年和2016年分两批选择了镇江、嘉兴、南宁等30个城市开展试点。预计到2020年,我国城市建成区20%以上的面积将达到海绵城市建设目标要求;到2030年,城市建成区80%以上的面积将达到目标要求。

建设海绵城市所需的技术措施包括透水铺装、绿色屋顶、雨水花园、生态滞留池等。其中道路铺装面积占到城市地表面积的 20%~30%，因此透水铺装技术是海绵城市建设的重要组成部分。透水铺装系统旨在重新构建被硬化地面破坏的“降雨—径流—下渗—回用/循环”这一良性循环，如图 1.2 所示，这对修复城市水环境、实现雨水资源化具有重要意义。

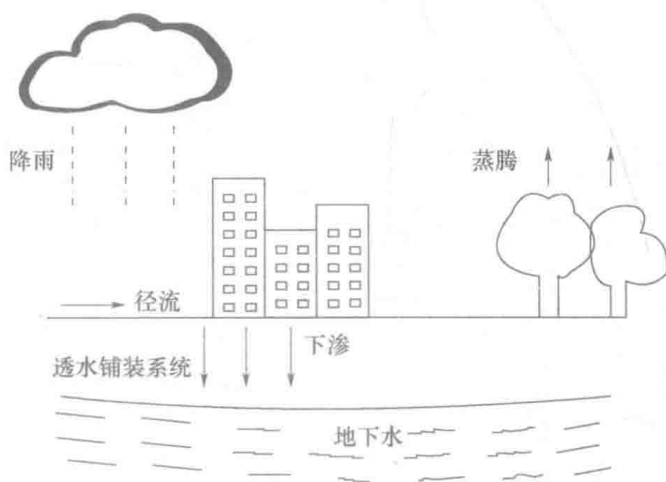


图 1.2 降雨—径流—下渗—回用/循环^[8]

1.2 透水铺装材料与结构概述

透水铺装是指采用多孔结构形成骨架，在满足雨水下渗功能的同时，能够满足路用铺筑强度和耐久性要求的地面铺装技术，主要形式有透水沥青混凝土铺装、透水水泥混凝土铺装及透水连锁混凝土铺砖。透水铺装具有减少洪峰流量、防治城市内涝、净化雨水径流污染、降低城市热岛效应等多种生态功能，作为一种环保型路面受到广泛的关注，并应用于多个领域。

1.2.1 透水铺装的主要材料

由于透水铺装兼具雨水渗透与承受荷载的双重作用，因此无论路基、基层还是面层材料都与传统路面有所不同。对透水路面的路基及基层材料而言，如何有效提高承载能力，尽可能避免水损坏，对整个道路结构来说至关重要，有关路基、基层材料及其性能的试验研究将分别在第二、三章进行详细阐述。

通常，透水铺装根据不同的面层材料分为透水沥青混凝土、透水水泥混凝土、透水铺砖和透水新材料，如图 1.3 所示。

1. 透水沥青混凝土

在透水沥青路面中，作为胶结材料的沥青胶浆对于混合料自身的强度与稳定性具有重要作用，如图 1.4 所示。本书第 5 章将详细介绍透水沥青混合料孔隙特征与混合料生态性能之间的关系，探讨固废填料在透水沥青混合料中应用的可能性，并深入研究赤泥、粉煤灰和硅藻土等固体废弃物填料对沥青胶浆和混合物的影响。

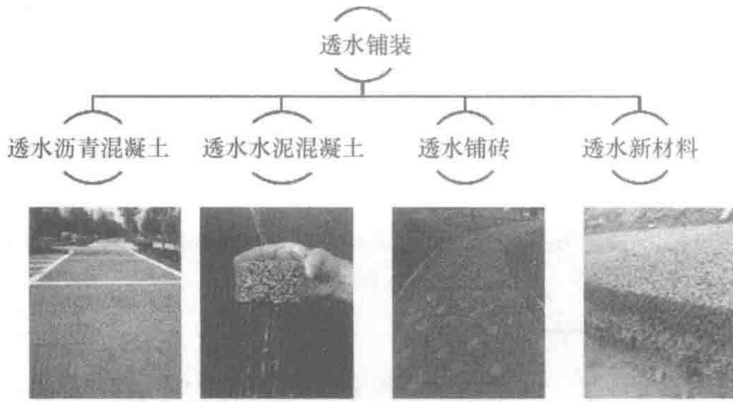


图 1.3 透水铺装 (按材料分类)



图 1.4 透水沥青路面及混合料试件

2. 透水水泥混凝土

透水水泥混凝土的主要组成材料为水、水泥、集料及其他增强材料，如图 1.5 所示，透水水泥混凝土的孔隙率较大，导致其不具有与传统混凝土相似的性能和耐久性，这极大地阻碍了透水水泥混凝土路面的推广应用；其次，在道路使用过程中，空气及路表面的悬浮颗粒极易进入路面孔隙之中，受到孔隙嵌锁作用，从而堆积于透水混凝土路面内部，使其透水性能不断下降，甚至丧失。本书第 4 章将着重介绍大孔隙水泥混凝土的增强技术与堵塞机理，并对其控制城市面源污染、降低城市雨洪风险的环保性能进行研究。

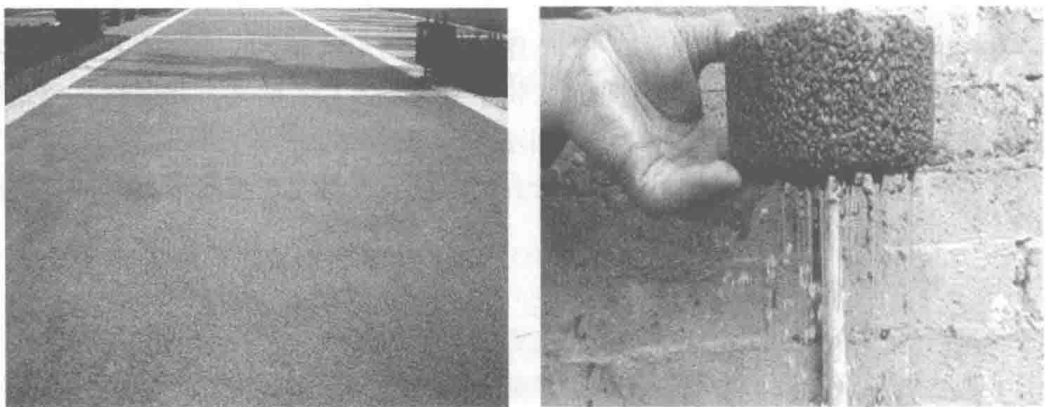


图 1.5 透水水泥路面及混合料试件

3. 透水铺砖

透水铺砖起源于荷兰，又称荷兰砖，主要分为两类：一类是以无机非金属材料为主要原料，经成形及固化等工艺制成的透水砖，内部形成大量连通孔隙；另一类是以废弃工业料、建筑垃圾等为主要原料，通过粉碎、筛留、成形和高温烧制而成的陶瓷透水砖，运用造孔工艺，形成连续开口孔隙，如图 1.6 所示。透水砖的价格比较低廉，性能优良，在城市人行步道及公园、停车场等区域得到了广泛的应用。

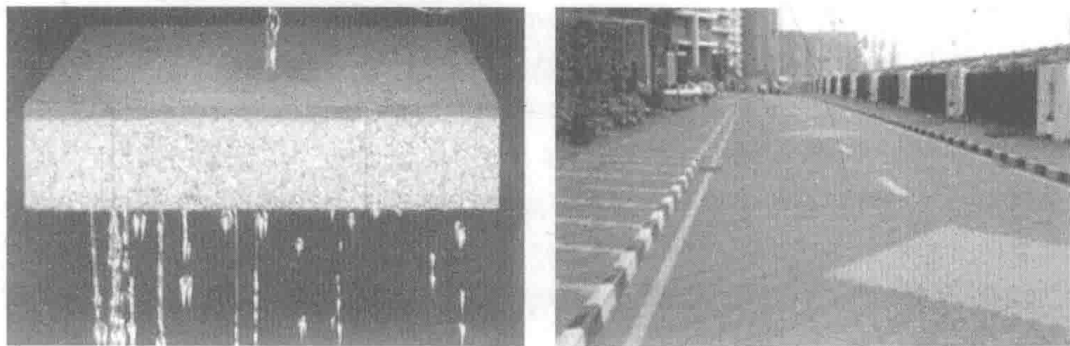


图 1.6 透水铺砖路面及透水铺砖

4. 透水新材料

透水新材料采用聚氨酯或环氧树脂等高分子胶结料代替传统的沥青及水泥，掺配具有一定级配的碎石或细砂，通过碾压成型，具有一定的力学强度和透水性能，如图 1.7 所示。这类材料的相关研究目前处于发展阶段，材料造价较高，在现阶段并未得到广泛推广。

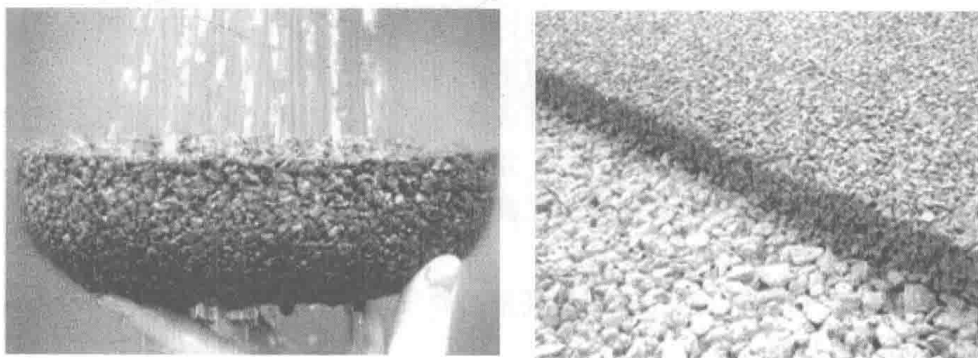


图 1.7 透水新材料

1.2.2 透水铺装的基本结构

我国大部分文献按照排水方式（或水流路径）将透水铺装归类为排水型路面、半透水型路面及全透水型路面，如图 1.8~图 1.10 所示。

透水路面功能的特殊性要求在设计时兼顾力学性能和水文性能，本书第 6 章将介绍透水路面的设计理论与方法，并提出典型的透水路面结构组合，供实际工程应用参考。

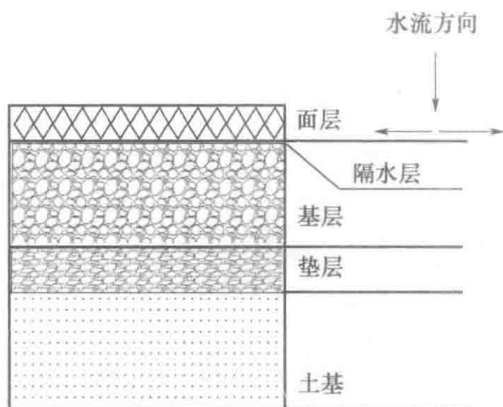


图 1.8 排水型路面

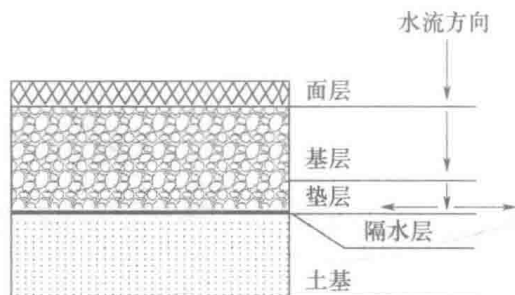


图 1.9 半透水型路面

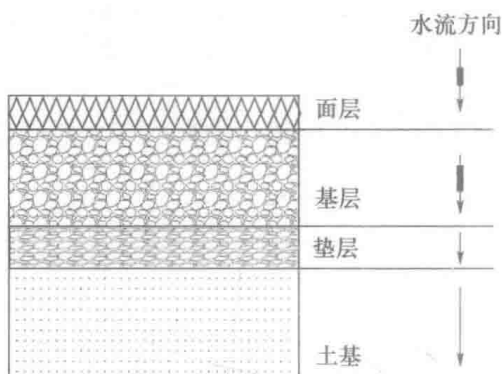


图 1.10 全透水型路面

除了介绍透水铺装材料与结构，本书第 7 章从降低城市热岛效应的角度出发，对彩色透水路面反射涂层光学特性及耐久性进行探究，揭示了路面材料全频谱光学反射特性变化规律，并优化和设计了具备较高反射率、避免眩光、路用性能突出的路面涂层材料配方。第 8 章主要围绕路面寿命周期经济成本与环境影响综合评价，提出了一种将经济成本与环境影响相结合的综合评价方法，并以透水路面为研究对象进行分析，依托 Java 语言开发了相应的路面全寿命周期评价工具，为道路工程的多方案比选问题提供了有效的解决办法。

另外，本书第九章将以河北省曲港高速公路安国服务区（南区）、郑州荥阳市京襄城遗址生态园休闲步道工程、上海茸吉路路面工程为例，介绍透水铺装在实际工程中的应用案例。

1.3 透水铺装的应用范围与现存问题

1.3.1 透水铺装的应用范围

目前，在美国、日本、荷兰等国家，透水性路面被广泛应用于新建、扩建、改建的公路工程、室外工程、市政工程、广场、园林工程、停车场以及人行道，并开始尝试应用于港口和机场等重载路面。在我国，透水铺装技术仍处于起步阶段，相关规范标准并

不完善, 养护技术仍不健全, 且我国目前重载车辆相对较多, 因此透水铺装技术在我国目前大多应用于小区、广场、园林工程、停车场以及人行道等轻载路面。

1.3.2 透水铺装的现存问题

透水铺装作为一种集多种功能于一体的新型路面结构, 目前存在许多问题, 这限制了透水铺装的大规模使用, 需要做进一步研究和探索。透水铺装主要面临的问题和需要解决的问题有以下几个方面。

(1) 堵塞问题

Kuldip Kumar 等^[9]在美国对一个停车场的铺装进行堵塞研究, 结果发现, 从第二年到第四年, 由于路面内部颗粒的沉积和车辆的剪切应力作用, 导致路面孔隙堵塞, 使路面渗透率明显下降 60%~90%。Guthrie 等^[10]研究了堵塞和饱和度对透水混凝土抗冻融作用的影响。结果显示, 被堵塞或完全饱和的试件, 损坏的速度更快。针对透水铺装孔隙堵塞问题, 目前主要以使用水和真空(或两者结合)的压力清洗为主, 但频繁的清洗养护并非长久之计, 如何制备防堵塞的透水铺装材料才是保证其可持续发展的关键。

(2) 冻融耐久性

影响透水沥青路面使用的主要问题是耐久性不足, 使用寿命较短。造成这一问题最主要的原因是低温下集料的剥落和松散, 即冻融损伤破坏, 如何制备兼具良好的抗冻融特性与经济性的透水沥青混凝土是现阶段研究工作的一大主要任务。

(3) 重载应用

目前, 针对透水铺装材料性能的研究取得了初步成果, 但对于将来用于重载和大规模的推广应用, 传统的密集配结构设计方法并不适用。未来针对不同结构层的要求, 通过对透水路面的材料和结构各方面的优化来提高透水路面承载能力, 使其适用于城市主干道等重交通场所, 也是海绵城市和可持续绿色发展的关键问题。

本书希望通过透水铺装材料基本性能以及结构设计方法的相关介绍, 为透水铺装的材料性能优化提供理论支持, 为透水铺装在高频、重载条件下的应用提供技术参考, 从而为突破透水铺装的应用瓶颈做出贡献。

第2章 土基材料与性能

2.1 透水铺装土基加固方法研究现状

2.1.1 低掺量水泥固化技术研究

透水路面对于雨水的处理方式，从根本上颠覆了传统路面结构设计将水损坏视为主要破坏形式的理念，主要承担渗透功能的土基材料应受到更多的重视。已有研究表明，透水铺装常见的破坏类型多与下部结构层因外部雨水作用有关；土基渗透性会显著影响透水路面结构的储水能力。采用土壤固化剂对土基进行加固，可以有效提高土基的承载能力，加强路面结构，减少因路基损坏产生的路面灾害。在诸多土壤固化剂中，较为常见的水泥基固化剂具有价格低廉、应用广泛、技术成熟等特点。

目前水泥土的相关研究多集中于力学性质，包括水泥土的抗压强度、抗剪强度、抗拉强度、回弹模量等，也有部分学者对水泥土的渗透性能进行了研究。

(1) 水泥土的力学性能

许森^[11]以无侧限抗压强度试验研究了水泥掺量、干密度、含水率、养护龄期和养护方式对水泥土无侧限抗压强度和应力-应变关系的影响。研究发现：随着水泥掺量（6%~18%）的增加，水泥土的最大干密度和最优含水率都有小幅度增加，而且水泥土的无侧限抗压强度呈线性增长。在水泥掺量相同的情况下，随着干密度（ $0.92\rho_{dmax} \sim 1\rho_{dmax}$ ）的增加，水泥土无侧限抗压强度呈线性增长；随着含水率的增加，水泥土无侧限抗压强度呈二次函数形式衰减；随着养护龄期的增长，水泥土无侧限抗压强度呈幂函数形式增长。此外，水泥掺量和养护龄期的增加能够减小水泥土的弹塑性变形；干密度和含水率的增加能够增加水泥土的弹塑性变形。

范凌燕^[12]通过水泥土无侧限抗压强度室内配比试验，运用灰色系统理论的关联度分析方法，分析水泥掺入比、土样含水率和有机质含量对水泥土无侧限抗压强度的影响。研究结果表明：水泥掺入比（10%~30%）对水泥土无侧限抗压强度影响最大，其次是土样有机质含量，含水率对水泥土无侧限抗压强度影响最小。

王海龙和申向东^[13]通过无侧限抗压强度试验，对多掺量和多龄期下水泥土的强度与水泥掺量进行对比分析。试验结果表明：水泥掺量在20%以下时，强度增长速度缓慢，反应物胶凝颗粒覆在颗粒表面，对强度作用弱；水泥掺量在20%以上时，强度近乎幂指数增长，土颗粒间充实了空隙，故对强度增长帮助大。

水泥土与混凝土相似，呈脆性，其抗拉强度与抗压强度相比较小。水泥的抗拉强度与抗压强度均受到多种因素影响。大量的试验数据表明：抗拉强度随着抗压强度的增长

而增长,但并不呈严格的线性关系。水泥土的抗拉强度与抗压强度之比随抗压强度增大而减小,即抗压强度增长的同时,抗拉强度亦增长,但增长速率却降低了^[14]。

研究者采用三轴试验研究了水泥土在不同水泥掺入比和龄期下的黏聚力、内摩擦角和抗剪强度变化情况。根据王珊珊等^[15]的试验结果,水泥土的抗剪强度随水泥掺入比增长而增大;掺入比达到33%时,水泥土抗剪强度增长速率趋于缓慢。阮波等^[16]分别研究水泥掺入比为10.7%、13.7%和16.7%的水泥土在14d、28d和90d龄期的抗剪强度。试验结果表明:水泥土应力-应变曲线表现为应变软化型,峰值强度对应的应变为1.56%~5.31%。随着养护龄期的增大,峰值强度不断变大,峰值强度对应的应变却不断减小。随着水泥掺入比和龄期的增大,水泥土较原状土而言,黏聚力从11.2kPa提高到797.2kPa,提高了9.0~71.0倍,内摩擦角从23.8°提高到38.4°,提高幅度为1.1~1.7倍。

杨廷玉等^[17]采用三轴试验研究了水泥固化土的力学性能,分析了水泥固化剂掺量、龄期对应力-应变、强度及刚度的作用。研究结果得出:在轴向应变相同时强度、刚度、偏应力和破坏应力随着水泥掺量、龄期的增长而增长;当轴向应变加大时,刚度负载前期降低速度较快,后期趋于平稳。

韩华强等^[18]采用室内动三轴试验研究了砂土与水泥胶凝砂土在不同应力条件下的动力变形特性及抗液化特性,结果表明:胶凝材料的掺入显著提高了砂土在动荷载作用下抵抗变形的能力,在水泥掺加量较低的情况下,胶凝砂土中砂土的动力特性仍占据主导地位;胶凝砂土的动模量比砂土大3倍以上,而抗液化动剪应力为砂土的2倍以上,但初始变形量及累计动残余变形量值均较砂土大幅降低;胶凝作用对低应力状态更为敏感,应力水平越低,胶凝作用对砂土抵抗动力变形能力的提高越显著。

宋新江等^[19]研制真三轴仪对水泥土进行等小主应力 σ_3 、等中主应力参数 b 真三轴试验,研究中主应力参数、小主应力对水泥土应力-应变特性的影响。试验结果表明:相同 σ_3 条件下,水泥土应力-应变曲线的初始切线模量、破坏强度均随 b 的增大而增大,破坏时的等大主应变则随 b 值的增大而减小;水泥土破坏强度与等中主应力参数 b 近似呈线性关系,直线斜率随 σ_3 的增大而增大。 b 值相同时,水泥土的应力-应变曲线初始切线模量、破坏强度、破坏时的大主应变均随 σ_3 的增大而增大;水泥土破坏强度与 σ_3 近似呈线性关系,且随 b 值的增大,线性关系更加明显。

(2) 水泥土的渗透性能

水泥土的渗透性能采用渗透系数进行表征,影响渗透系数的主要因素有水泥掺入比、养护龄期、围压、养护环境等。杨俊杰等^[20]通过大量试验证明:水泥掺入比是影响水泥土渗透性的主要原因,水泥土的渗透系数随着水泥掺入比的增大而减小,最终渗透系数在一定的范围内并趋于一致。张精禹等^[21]通过研究表明:当水泥掺入量一定时,水泥土的渗透系数随着龄期的增大而减小。庞文台等^[22]也指出:当龄期小于14d时,渗透系数随时间的变化最明显;当龄期大于14d而小于28d时,渗透系数随时间的变化较明显;当龄期大于28d时,渗透系数随时间的变化不明显,趋于一定值。袁荣宏等^[23]采用柔性壁式渗透仪研究围压对水泥土渗透系数的影响,结果表明:当围压低于100kPa时,渗透系数随着围压的增大而减小,且变化幅度较大;当围压大于100kPa时,随着围压的增大渗透系数逐渐减小,变化幅度逐渐减小。傅小姝等^[24]研究了水泥

土处于不同酸碱环境时的力学与渗透特性,研究发现在不同的酸碱环境下,水泥石均可较好地改善红黏土的力学与渗透特性:碱性环境下水泥石的无侧限抗压强度更高、渗透系数更低;酸性环境则呈相反趋势。倪春雷^[25]总结分析了清水环境和海水环境下温度对水泥石的渗透性能的影响,研究发现:随着温度的增加,水泥石渗透系数逐步增大;海水对水泥石有腐蚀作用,海水环境下水泥石的强度、黏聚力和内摩擦角均逐步降低,而渗透系数逐步增大;在清水或海水环境下,在渗流-应力场中,水泥石渗透系数先减小而后逐步增大,呈现U形变化趋势。

陶高粱等^[26]以不同水泥掺量的水泥黏土为研究对象,进行核磁共振试验,研究水泥掺量对微观孔隙分布的影响,并进行变水头渗透试验,研究水泥掺量对渗透性的影响,在此基础上调查水泥掺量对渗透性影响的微观机制。研究发现:水泥石的渗透系数随水泥掺量的增大而减小,其中在低水泥掺量(4%~12%)范围内急剧减小,在高水泥掺量(15%~25%)范围内呈现相对缓慢减小趋势;在水泥掺量较低时,水泥水化作用优先堵塞大孔和中孔,导致渗透系数随水泥掺量增加而显著减小;在水泥掺量较高时,水泥掺量的增加主要减少小孔隙面积,大孔和中孔面积变化不大,此时增加水泥掺量对减小水泥石渗透系数的效果相对较差。

综上所述,尽管水泥基固化剂领域已经取得了一些研究成果,但绝大多数文献以探究水泥固化剂的外掺剂的应用以及不同特性的土质水泥加固方法为主,较少关注其在透水性路面中的应用情况;同时,受限于以上所述的应用范围,过往文献在性能表现方面大多仅关注力学性能,而忽略了低掺量水泥石在渗流性能方面的应用潜力。鲍俊安等^[27]通过研究表明:当水泥掺量降低到3%以下时,砂土固化后的透水系数仍然可达到 10^{-4} cm/s的数量级。因此,有必要通过试验进一步系统地探究低掺量水泥石的各项性能,这有助于拓宽其应用范围,并研究其在透水性路面中的应用效果。

2.1.2 微生物诱导碳酸盐沉淀技术研究现状

(1) 微生物诱导碳酸盐沉淀的机理

1973年,Boquet等^[28]从土壤中分离出细菌,并发现细菌在新陈代谢过程中能诱导碳酸盐沉积。随后,学者们发现,在一定的人为环境和营养条件下,岩土中一些无毒害的天然微生物新陈代谢作用能显著析出多种矿物结晶,如碳酸盐、磷酸盐、氧化物、硅华以及胞外聚合物等,从而为软弱砂土的原位微生物改性及固化创造有利条件。其中,研究者利用一些特定的微生物,比如产脲酶的微生物巴氏芽孢杆菌 *Sporosarcina pasteurii* (*S. pasteurii*) 进行试验研究,为其提供富含钙离子和氮源的营养盐,快速析出具有胶凝作用的碳酸钙结晶。这一微生物成矿技术称为微生物诱导碳酸钙沉淀 [Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP)] 技术^[29]。不同种类的细菌 MICP 过程有所差异,主要包括尿素水解^[30]、反硝化作用^[31]、硫酸盐还原^[32]、三价铁还原^[33],其中尿素水解因其反应过程直接、易于控制^[34]并且反应产物生成速率快^[35](24h内CaCO₃的转化效率达90%)的特点而受到较多的关注。

尿素水解 MICP 的反应过程包含两个阶段^[36]:在第一个阶段,产脲酶微生物在其自身的生长代谢过程中持续产生一种高活性的脲酶,脲酶催化尿素的水解生成氨和二氧化碳,通过细胞壁分散到溶液中,然后迅速水解生成铵离子和碳酸根离子。在第二个阶

段,如果此时溶液中存在钙离子,由于这种细菌带负电,钙离子被吸附到细菌细胞表面,这时,尿素水解后生成的碳酸根将与这些钙离子生成碳酸钙沉淀,包裹住细菌。此外,培养液中尿素分解产生的铵离子使微生物细胞附近呈碱性,有利于碳酸钙沉淀的生成。两个阶段反应过程的化学反应方程式为



微生物诱导碳酸盐沉淀是一个复杂的过程,反应过程中受一些自然环境因素的影响,这些因素包括菌的种类、菌的浓度、温度、尿素浓度、钙离子浓度、离子强度和pH等^[37-39]。Mortensen等^[40]指出,尿素水解主要受到细菌浓度(脲酶浓度)和底物尿素的影响;钙离子浓度是碳酸钙沉淀过程的重要影响因素之一。当MICP技术用于固化土壤时,砂土颗粒大小也会对其产生影响,Qabany等^[41]发现,级配良好的较大颗粒砂土比级配不好的细砂碳酸钙沉淀效果好。

(2) 尿素水解 MICP 固化土壤应用

近年来,研究者利用注浆技术在改善土壤的强度和稳定性方面进行了大量探索,且在单元尺度和原型地基上进行了大量试验。试验结果表明:该技术在有效提高土体强度及刚度的情况下,还能够使土体保持一定的渗透性^[42]。

采用微生物诱导碳酸钙沉淀方法进行改良后,土壤硬度可以增加3倍,最大强度可以达到500kPa^[43-44]。Harkes等^[45]将巴氏芽孢杆菌注入柱形砂土样品中,发现30~600kg/m³的碳酸钙沉淀对应0.2~20MPa的无侧限抗压强度。van Paassen等^[46]也采用注入巴氏芽孢杆菌的方法进行了MICP固化土壤的研究,结果表明:当碳酸钙百分比为0%~24%时,无侧限抗压强度为1~12MPa。根据文献数据记载,经过MICP方法改良的土壤,无侧限抗压强度至少可达到150kPa,最高可达到34MPa^[29]。van Paassen等^[47]发现,MICP固化土的无侧限抗压强度与CaCO₃含量之间呈指数关系。这表明,MICP固化土的抗压强度不仅与CaCO₃沉淀生成量相关,也与起到加固作用的有效CaCO₃含量有关。

Duraisamy和Airey^[48]运用MICP技术对可液化砂土进行改良,通过剪切波速检测仪对土样固化程度与剪切强度与之间的关系进行研究。结果表明:随着沉淀量的增加,固化土的黏聚力明显提升,但内摩擦角变化并不显著。与之相反,Chou等^[49]使用三种状态的巴氏芽孢杆菌(生长、静止与死亡状态)对土体中进行MICP加固,结果表明:固化土的内摩擦角大幅增加,而黏聚力增加幅度较小。此外,与未经处理的土壤相比,MICP固化土的抗剪强度峰值较高,并且经由生长状态的细胞改良后,土壤的抗剪强度峰值普遍高于另外两种状态下的抗剪强度峰值。Montoya和DeJong^[50]通过试验发现,在MICP固化过程中,固化土的抗剪强度明显提高。同时,随着固化程度的加强,抗剪强度峰值不断增大,最终导致应力-应变特性从应力硬化转变为应力软化状态。

通常,MICP技术可用于提高土壤强度,同时保持足够的渗透性(用于固化)或者完全堵塞土壤孔隙(用于抗渗)。在土壤生物固化中,相较于普通硅酸盐水泥等其他胶结材料,MICP方法更有利于保持固化前原有的渗透性能。Cheng等^[36]认为,当采用硅酸盐水泥加固土壤时,水泥与孔隙水发生水化反应形成的不溶性化合物占据了原来孔隙,因而造成固化土渗透性能严重降低;对于MICP固化土,反应产生的CaCO₃沉淀同样会影响渗透性能,但不同的是,CaCO₃沉淀在孔隙中会引起轻微的体积变化,从