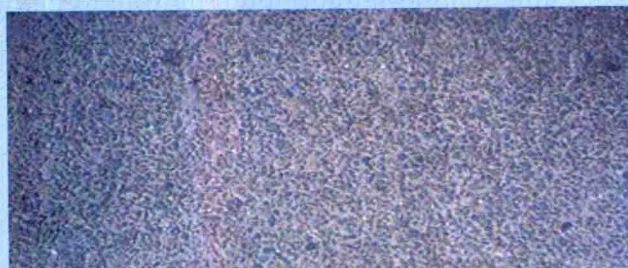


Skid Resistance and Noise Reduction Technology  
of Highway Cement Concrete Pavements



# 公路混凝土路面 抗滑与降噪技术



康宏伟 李波 杨小龙 编著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

Skid Resistance and Noise Reduction Technology  
of Highway Cement Concrete Pavements

# 公路混凝土路面 抗滑与降噪技术

康宏伟 李 波 杨小龙 编著



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

本书系统总结了针对公路隧道混凝土路面抗滑性差、噪声大等问题开展的系列研究课题的成果和经验, 主要内容包括: 公路隧道混凝土路面抗滑降噪功能需求和机理分析, 刻槽混凝土路面、露石混凝土路面和聚合物改性纤维混凝土路面的抗滑与降噪性能研究, 混凝土路面抗滑性能衰减规律与改善技术研究, 隧道混凝土路面抗滑与降噪试验路研究, 隧道混凝土路面抗滑降噪技术推荐等。

本书可供公路设计、施工、管理、科研人员使用, 也可供相关专业研究生学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

公路混凝土路面抗滑与降噪技术 / 康宏伟, 李波, 杨小龙编著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017. 1

ISBN 978-7-114-13662-7

I. ①公… II. ①康… ②李… ③杨… III. ①公路隧道—水泥混凝土路面—抗滑性能—研究②公路隧道—水泥混凝土路面—减振降噪—研究 IV. ①U459.2  
②U416.216

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第017910号

书 名: 公路混凝土路面抗滑与降噪技术

著 作 者: 康宏伟 李 波 杨小龙

责任编辑: 杜 琛

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 16.25

字 数: 402千

版 次: 2017年3月 第1版

印 次: 2017年3月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13662-7

定 价: 39.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前言

随着我国公路建设的迅速发展,公路等级及相应公路线形标准的提高,公路隧道不断增多,在山岭重丘区高等级公路隧道的长度有明显的增加。由于缺少隧道混凝土路面设计与施工方面的规范和规程,已建隧道混凝土路面大多参照普通水泥混凝土路面结构设计方法、混凝土原材料选择、配合比设计以及施工工艺进行设计和施工,而没有考虑隧道内部环境对路面的影响以及隧道路面在结构和材料等方面的特殊要求,造成了已建隧道水泥混凝土路面大多出现了不同程度的问题和病害,其中最突出的问题是刻槽抗滑构造极易磨平、路面抗滑性能衰减快、交通安全隐患大。与此同时,长大隧道噪声污染严重,极大地影响了公路隧道的交通安全性和舒适性。行车经验和现场测试结果说明,由于隧道的封闭作用,噪声在隧道内产生反射、共振和叠加,噪声持续时间更长,不易消散,隧道内的噪声远高于隧道外,让人难以忍受。

针对目前隧道混凝土路面主要存在:①隧道混凝土路面使用环境特殊,传统制纹构造与其不适宜,交通事故频发;②隧道成管状,噪声较大,驾驶和乘车舒适性差;③槽型抗滑构造不耐磨,抗滑性能衰减快,交通安全隐患大等问题,甘肃长达路业有限公司联合兰州交通大学开展了“公路隧道混凝土路面抗滑性及降噪技术研究”。该项目通过调研隧道混凝土路面使用环境和隧道混凝土路表现状,分析隧道环境对路表结构与材料的要求;研究普通拉毛、拉槽和刻槽混凝土路面抗滑、噪声特性及其在使用过程中的衰减特性;从刻槽混凝土抗滑机理的角度,分析参数对刻槽混凝土路面抗滑性的影响,提出刻槽混凝土路面优化的刻槽参数;结合隧道进出口段交通及使用环境特征,从原材料、配合比等方面开展露石混凝土路面的适用性研究;针对普通水泥混凝土路面耐磨性差的缺点,研究隧道水泥混凝土路面表面功能持久性改善技术;最后,铺筑不同纹理方案的混凝土路面试验段,总结低噪声抗滑混凝土路面施工工艺,进行抗滑、噪声及其经济效益对比分析,提出低噪声抗滑混凝土路面修筑成套技术,可为我国高速公路隧道修建安全、环保的混凝土路面提供技术支持,对于提高隧道混凝土路面抗滑性、降低其噪声,对于混凝土路面的推广和使用具有重要的理论意义和参考价值。

本书涉及的研究内容、成果得到了国家自然科学基金项目(51668038)、甘肃省交通建设科技项目(2011-08)和兰州交通大学优秀科研团队项目(201606)的资助。本书由甘肃长达路业有限公司康宏伟教授级高工编写第4、5章及统稿,兰州交通大学李波博士编写第1、2、3、6、7、10章,杨小龙编写第8、9章。编写过程得到了研究生张正伟、李晓辉、刘祥等人的协助。长安大学韩森教授和徐鸥明博士也在本书编著过程中提供了许多帮助与指导。

由于作者学识水平的局限,书中论述存在的许多偏颇甚至谬误之处,敬请广大读者交流探讨、批评指正。

编者

2016年11月

# 目 录

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 第 1 章 | 绪论 .....                   | 1  |
| 1.1   | 研究的背景及意义 .....             | 1  |
| 1.2   | 国内外研究现状 .....              | 2  |
| 1.3   | 主要研究内容 .....               | 12 |
| 第 2 章 | 公路隧道混凝土路面抗滑降噪功能需求分析 .....  | 14 |
| 2.1   | 甘肃省外公路隧道混凝土路表状况调查与分析 ..... | 14 |
| 2.2   | 甘肃省隧道混凝土路面抗滑及降噪需求分析 .....  | 20 |
| 2.3   | 隧道进出口段安全影响因素分析 .....       | 32 |
| 2.4   | 本章小结 .....                 | 34 |
| 第 3 章 | 公路隧道混凝土路面抗滑降噪机理分析 .....    | 35 |
| 3.1   | 混凝土路表构造分类及其作用 .....        | 35 |
| 3.2   | 混凝土路面抗滑机理分析 .....          | 38 |
| 3.3   | 混凝土路面降噪机理分析 .....          | 48 |
| 3.4   | 本章小结 .....                 | 51 |
| 第 4 章 | 刻槽水泥混凝土路面抗滑与降噪性能研究 .....   | 52 |
| 4.1   | 刻槽的分类和作用 .....             | 52 |
| 4.2   | 刻槽混凝土路面数值模拟 .....          | 53 |
| 4.3   | 刻槽混凝土路面抗滑性能试验研究 .....      | 60 |
| 4.4   | 刻槽混凝土路面噪声特性研究 .....        | 64 |
| 4.5   | 本章小结 .....                 | 70 |
| 第 5 章 | 露石混凝土路面抗滑与降噪性能研究 .....     | 72 |
| 5.1   | 露石混凝土路面的制备 .....           | 72 |
| 5.2   | 露石混凝土路面抗滑性能研究 .....        | 84 |
| 5.3   | 露石混凝土路面噪声特性研究 .....        | 86 |
| 5.4   | 本章小结 .....                 | 88 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 第6章 聚合物改性水泥混凝土路面抗滑降噪性能研究 .....         | 90  |
| 6.1 聚合物改性混凝土路面抗滑降噪功能层的结构设计 .....       | 90  |
| 6.2 聚合物改性混凝土的制备 .....                  | 92  |
| 6.3 聚合物改性混凝土路面抗滑性分析 .....              | 107 |
| 6.4 聚合物改性混凝土路面噪声测试 .....               | 111 |
| 6.5 本章小结 .....                         | 115 |
| 第7章 混凝土路面抗滑性能衰减规律研究 .....              | 116 |
| 7.1 混凝土路面磨损机理 .....                    | 116 |
| 7.2 混凝土路面抗滑性磨损试验方案 .....               | 119 |
| 7.3 刻槽混凝土路面抗滑构造衰减试验结果分析 .....          | 122 |
| 7.4 刻槽混凝土路面摆值变化规律试验结果分析 .....          | 128 |
| 7.5 本章小结 .....                         | 140 |
| 第8章 混凝土路面耐磨性能改善技术研究 .....              | 141 |
| 8.1 原材料对混凝土耐磨性能的影响 .....               | 141 |
| 8.2 耐磨路面混凝土配合比优化设计 .....               | 146 |
| 8.3 混凝土路面表面功能持久性改善技术研究 .....           | 155 |
| 8.4 矿物外掺料改善混凝土耐磨性能的微观结构分析 .....        | 165 |
| 8.5 本章小结 .....                         | 169 |
| 第9章 隧道混凝土路面抗滑与降噪试验路研究 .....            | 171 |
| 9.1 依托项目概况及试验路方案 .....                 | 171 |
| 9.2 公路隧道露石混凝土路面试验路施工技术研究 .....         | 174 |
| 9.3 公路隧道聚合物改性水泥混凝土路面试验路施工技术研究 .....    | 200 |
| 9.4 公路隧道混凝土路面刻槽试验路施工技术研究 .....         | 223 |
| 9.5 公路隧道混凝土路面试验路抗滑性能对比分析 .....         | 236 |
| 9.6 公路隧道混凝土试验路噪声对比分析 .....             | 240 |
| 9.7 本章小结 .....                         | 245 |
| 第10章 隧道混凝土路面抗滑降噪技术推荐 .....             | 247 |
| 10.1 隧道混凝土路面抗滑纹理构造评价指标 .....           | 247 |
| 10.2 隧道混凝土路面抗滑降噪技术综合评价方法 .....         | 248 |
| 10.3 基于 Topsis 法的隧道混凝土路面抗滑降噪技术推荐 ..... | 249 |
| 参考文献 .....                             | 251 |

## 1.1 研究的背景及意义

随着我国公路建设的迅速发展,公路等级及相应公路线形标准的提高,公路隧道不断增加,在山岭重丘区,高等级公路隧道的长度有明显的增加。据不完全统计,截至2012年底,全国公路隧道达7384座、512.26千米,比“十五”末分别增加4495处、359.55千米。其中,特长隧道265处、113.80千米,长隧道1218处、202.08千米。隧道由于其特殊环境情况,容易引发重大火灾事故。有试验表明,等量的燃油燃烧时在水泥混凝土路面上的火焰高度约为0.3mm,而在沥青路面上的高度为2.5~3mm,因此从考虑防火问题角度出发,目前在长大隧道内多采用水泥混凝土路面。

隧道水泥混凝土路面安全性对隧道交通事故发生的频率及事故严重程度影响很大。然而,国内对隧道工程的研究主要集中在隧道岩土动力学、洞体结构设计、工程水文地质问题、各种施工技术以及通风、照明等方面。隧道路面的研究在隧道工程和公路工程领域都较少涉及,在我国现行《公路隧道设计规范》(JTG D70/2—2014)中,关于隧道路面的规定仅有一条——“隧道路段各级水泥混凝土路面结构可靠度设计标准、材料性能与结构参数及变异水平、设计方法、标准轴载、材料组成和性能参数均应符合现行《公路水泥混凝土路面设计规范》要求的有关规定”。而现行《公路水泥混凝土路面设计规范》对体现路面安全性的抗滑性要求方面几乎没有。

由于缺少隧道混凝土路面设计与施工方面的规范和规程,已建隧道混凝土路面大多参照普通水泥混凝土路面结构设计方法、混凝土原材料选择、配合比设计以及施工工艺进行设计和施工,而没有考虑隧道内部环境对路面的影响以及隧道路面在结构和材料等方面的特殊要求,造成了许多已建隧道水泥混凝土路面出现不同程度的问题和病害,其中最突出的问题是刻槽抗滑构造极易磨平、路面抗滑性能衰减快、交通安全隐患大。此外,由于隧道处在相对封闭的环境中,湿度较大,加之地下水的渗漏或车轮从隧道外带入的雨水不易散失,路表面长期处于潮湿状况下;同时,普通水泥混凝土路面横槽式抗滑构造不耐磨耗,逐渐磨光的路表面与轮胎之间容易产生水膜,导致车辆滑溜,严重影响行车安全。例如,麦积山隧道于2005年建成通车后,混凝土路面抗滑性能急剧下降。从外观来看,路面横向拉槽逐渐变浅或消失(图1.1.1),表面光滑,手感油腻,呈镜面现象,交通事故数量大幅度上升。这一典型现象在我国大部分隧道水泥混凝土路面均有不同程度的体现。因此,隧道水泥混凝土路面因抗滑性能衰减而引起的交通事故频发已成为亟待解决的难题之一。

与此同时,长大隧道噪声污染严重,极大地影响了公路隧道的交通安全性和舒适性。行车经验和现场测试结果表明,由于隧道的封闭作用,噪声在隧道内产生反射、共振和叠加,噪

声持续时间更长,不易消散,隧道内的噪声远高于隧道外,让人难以忍受。



a)



b)

图 1.1.1 隧道路面磨损状况

路面抗滑持久性与混凝土耐磨性息息相关。混凝土耐磨性差,路面抗滑构造衰减会加快。然而,国内外均缺乏有关水泥混凝土路面常见刻槽构造和露石混凝土路面抗滑构造的耐磨性及其抗滑性能衰减规律的系统研究,且未见针对潮湿混凝土路面耐磨性能专题分析。因此,有关不同路面抗滑构造耐久性或使用寿命的分析大多出于经验判断,缺乏令人信服的依据。

目前,隧道混凝土路面存在的主要问题是:①隧道混凝土路面使用环境特殊,传统制纹构造与其不适宜,交通事故频发;②隧道呈管状,噪声较大,驾驶和乘车舒适性差;③槽型抗滑构造不耐磨,抗滑性能衰减快,交通安全隐患大。针对上述问题,研究团队通过调研隧道混凝土路面使用环境和隧道混凝土路表现状,分析隧道环境对路表结构与材料的要求;研究普通拉毛、拉槽和刻槽混凝土路面抗滑、噪声特性及其在使用过程中的衰减特性;从刻槽混凝土抗滑机理的角度,分析参数对刻槽混凝土路面抗滑性能的影响,提出刻槽混凝土路面优化的刻槽参数;结合隧道进出口段交通及使用环境特征,从原材料、配合比等方面开展露石混凝土路面的适用性研究;针对普通水泥混凝土路面耐磨性差的缺点,研究隧道水泥混凝土路面表面功能持久性改善技术;最后,铺筑不同纹理方案的混凝土路面试验段,总结低噪声抗滑混凝土路面施工工艺,进行抗滑、噪声及其经济效益对比分析,提出低噪声抗滑混凝土路面修筑成套技术。这可为我国高速公路隧道修建安全、环保的混凝土路面提供技术支持。对于提高隧道混凝土路面抗滑性能、降低其噪声,对于抗滑降噪混凝土路面的推广使用等都具有重要的理论意义和参考价值。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 隧道混凝土路面抗滑与降噪技术研究

#### 1) 隧道路面抗滑技术研究

Panagouli 和 Kokkalis 通过调查和研究交通事故、路面抗滑能力与抗滑构造三者关系并考虑路面积水的影响,认为不同路面宏观和细观构造及其组合直接影响轮胎与路面之间的摩阻力。

路面表面构造对混凝土路面抗滑性至关重要。路面表面应具备两种构造:一种是细观构造(水平方向  $0 \sim 0.5\text{mm}$ 、垂直方向  $0 \sim 0.2\text{mm}$ ),它是影响车辆低速行驶(车速在  $50\text{km/h}$  以

内)时路面抗滑能力的主要因素;另一种是由路面集料间的开放空间、孔隙和沟槽组成的宏观构造(水平方向 $0.5 \sim 50\text{mm}$ 、垂直方向为 $0.2 \sim 10\text{mm}$ ),它是影响高速行驶(车速大于 $50\text{km/h}$ )时路面抗滑能力的主要因素。品质良好的砂、合适的砂率与水泥所组成的水泥砂浆使得普通水泥混凝土路面表面具有良好的细观构造,能够满足车辆低速行驶下的抗滑要求。一般来说,采用天然砂能使路面保持一定的细观构造,所以水泥混凝土路面提高并保持抗滑能力的关键在于形成良好的宏观构造。

对此,国内外的许多道路工作者研究出一些抗滑技术,如拉毛、压纹、刻槽,即所谓的“第一代、第二代、第三代抗滑技术”。美国混凝土学会委员会用花纹轮胎拖车以 $60\text{mile/h}$ ( $1\text{mile/h}=0.44704\text{m/s}$ )的速度对常见抗滑构造形式的水泥混凝土路面进行抗滑性能试验,从检测数据分析得出各种构造形式抗滑优劣排序如下:①人造草皮纵向拉毛+横向刻槽;②横向刻槽;③横向拉毛;④人造草皮纵向拉毛;⑤纵向拉槽;⑥纵向拉毛。经过长期使用表明,路面拉毛易被磨光,抗滑性能衰减很快,路面压纹、刻槽对抗滑性能提升作用较小,且嵌入槽内的小石子易使路面表面破碎。

近年来,为了改善隧道混凝土路面的抗滑降噪效果,科研人员研究开发了露石混凝土路面、多孔混凝土路面、柔性混凝土路面等新型混凝土路面。

丹麦曾在高速公路上以露石和刻槽两种方法修建了 $4\text{km}$ 试验路。经多年跟踪测试发现,露石混凝土路面较刻槽路面摩擦力好,露石混凝土路面摩擦系数损失仅为刻槽路面的 $1/4 \sim 1/3$ 。

近年来,多孔水泥混凝土路面因具有噪声低、排水快和抗滑等特点而受到关注,在一些隧道路面工程中得到了应用。多孔水泥混凝土不同于普通的密实型水泥混凝土,属于骨架—孔隙结构,孔隙率较大,通常达 $20\%$ 以上。

2004年,210国道贵州境崇遵高速公路金竹窝隧道路面工程,以右洞为试验路段,左洞采用普通混凝土路面作为对比,探讨隧道多孔混凝土路面的施工工艺,初步提出可行的施工机具、工艺流程和施工控制要求。通过该试验路段的铺筑实践,认为这一路面形式对隧道内行车条件和运营环境有很大的改善。

中南大学陈瑜依托湖南省交通科技项目“高速公路隧道路面结构与材料应用技术研究”,对公路隧道多孔水泥混凝土路面存在的主要问题进行了研究。

多孔混凝土对于降低路面特别是隧道内交通噪声效果明显,但多孔水泥混凝土应用于铺筑高等级公路面层仍存在如何采取技术措施大幅度提高材料强度,解决多孔降噪与强度下降的矛盾;多孔混凝土结构模型与普通混凝土不同,原材料的选择与技术性能要求如何,如何建立其工作性评价与配合比设计方法;孔隙率是多孔混凝土的关键指标,为保证目标孔隙率的实现,采用怎样的混凝土试件室内成型方法和实际路面施工方法,即孔隙率的控制与实现问题;如何进行多孔混凝土路面随机凸凹构造参数的优化以达到最理想的表面抗滑与降噪效果;多孔混凝土路面强度、耐久性、工作性、耐磨性、抗滑能力、降噪效果、容水与透水能力等使用性能及其协调性如何以及是否适用于公路隧道环境等一系列问题,目前少见系统、深入的研究。同时,多孔路面抗滑与降噪功能的保持与恢复、刚性多孔路面是否能抵抗高速车轮的碾压和冲击破坏以及孔隙堵塞等问题,以往的研究较少涉及,且结论不一,争议较大。总体上,新建多孔混凝土路面尽管在抗滑、降噪功能上有很大优越性,但其强度低、耐久性差、成本高等缺陷,仍然是其推广应用的极大障碍。

武汉理工大学杨明华在分析当前高速公路隧道路面特殊使用环境与铺装层施工、防火安全、行驶舒适性和耐久性等使用要求之间矛盾的基础上,采用水泥混凝土基材料复合改性

技术和纤维增强技术,研究和制备了一种具有低弹性模、高韧性特点的柔性水泥混凝土路面材料,使之既保持普通混凝土在施工、防火安全、耐久性等方面的缺陷,又兼备柔性路面材料所具有的行车舒适性。

## 2) 隧道路面降噪技术研究

对噪声的研究始于 1976 年维也纳世界道路会议。会议报告中专门安排了一章讨论轮胎与道路噪声问题,研究说明轻型、重型车辆的噪声来源,但却未能阐述噪声的主要机理及路表特性与所产生的噪声之间的关系。在 1983 年悉尼会议上,对轮胎一路面噪声予以了较多关注,明确了噪声与路面结构之间的关系。

对于轮胎一路面噪声的研究,起步最早的是欧洲国家如瑞典、德国等,特别是在轮胎一路面噪声理论、预测模型以及交通噪声标准等方面,取得了丰硕成果。Sandberg 撰写的“轮胎一路面标准参考书”是欧盟国家在轮胎一路面噪声理论研究方面成果的结晶。

日本在公路隧道降噪方面的研究比较早。在 1971 年,夏德荣校对公路隧道交通噪声进行了声学处理研究,并评价了声学处理的测量方法。国外对铁路隧道噪声研究较多,例如, M.s.HowE 对铁路隧道入口处的声波的反透射进行了详细的研究,但铁路隧道内噪声的形成机理与公路隧道差别较大,值得借鉴处较少。根据日本研究介绍,公路降噪效果以路堑形式最佳,美国修建的高速公路当通过声环境敏感地区时,亦常采用路堑形式。

国内从 20 世纪 80 年代末才开始对隧道交通噪声产生的影响予以关注。在公路隧道交通噪声预测和分析方面,有代表性的研究有:陈延训于 20 世纪 90 年代初对重庆向阳隧道做吸声处理前后的交通噪声分别进行了大量的测量,通过数据拟合的方法得到了隧道内噪声与车流量之间的回归公式,并讨论了吸声材料的面积、穿孔率及装修情况等对降噪效果的影响;师利明等对比了波动声学 and 房间声学理论在隧道内的应用,最终选用房间声学理论进行预测,并结合美国联邦公路局(FHWA)的公路交通噪声预测模式,研究了横断面为半圆形的公路隧道内噪声预测方法和降噪措施,给出了预测模式,确定了影响隧道内交通噪声的参数,并对几种几何断面降噪措施方案进行了比较;陈方荣则采用类比测量法进行隧道交通噪声预测,选取南京玄武湖东西向隧道作为类比对象,对南京玄武湖南北向隧道工程进行了实证研究,并取得了较好的效果。

我国的和松、朱兴元、俞悟周等人指出,轮胎一路面噪声是道路交通噪声的重要来源,介绍了产生轮胎一路面噪声的主要机理及影响因素、几种主要的测量方法及各自的特点,并在充分考虑轮胎胎面花纹块形状的基础上,结合声学基本理论,提出轮胎花纹块撞击路面噪声的预测模型。

在隧道噪声的治理方面,国内做过一些研究。胡维楨对隧道内装吸声材料的各影响参数进行了详细的研究,并提出应对隧道洞口外贴吸声材料,对耐候型吸声板特性进行了简要介绍。2005 年,湖北省交通厅依托交通科技项目“公路隧道降噪技术研究”,用低噪声路面和多孔吸声壁面设计降噪系统,取得了良好效果。

## 1.2.2 刻槽混凝土路面抗滑与噪声特性研究

### 1) 国外研究现状

对于水泥混凝土路面表面功能改善的研究,国外相关研究主要是针对混凝土路面表面纹理构造(Surface Texture)与抗滑、噪声的关系开展的,通过修建大量试验路与实际工程应用相结合,对不同表面纹理构造形式的路面,如拉毛、拉槽、刻槽、金刚石研磨等进行抗滑及噪声方

面的测试,得到了大量的数据资料,其相应的研究成果与结论也较为丰富。

### (1) 美国

20世纪70年代中期,美国波特兰水泥协会(PCA)及各州公路和运输工作者协会(AASHTO)等以确保行车安全为主要目标,推荐采用的横向槽尺寸为:槽深 $3.2 \sim 4\text{mm}$ ,槽宽 $2.3 \sim 3.2\text{mm}$ ,槽中心间距 $12 \sim 25\text{mm}$ 。美国联邦公路局从提高路面抗滑能力和降低噪声的综合角度考虑,推荐采用不等间距横向刻槽:建议槽宽为 $3\text{mm}$ ( $\pm 0.5\text{mm}$ ),槽深为 $3 \sim 6\text{mm}$ ,窄而深的沟槽优于宽而浅的沟槽;槽深平均为 $0.8\text{mm}$ ,个别值不小于 $0.5\text{mm}$ ;槽中心距在 $10 \sim 57\text{mm}$ 范围内随机变化,且其中50%的槽间距应小于 $25\text{mm}$ 。FHWA还规定,无论是采用纵向槽还是横向槽,按容量法测得的路表平均构造深度最小值应达 $0.5\text{mm}$ 。对于曲线路段,采用纵、横向沟槽组合是减少高速行车事故的有效方法。例如:采用间距 $20\text{mm}$ 的纵槽与间距 $75\text{mm}$ 的横槽相组合,既可加强曲线段的行车控制,又可迅速排除路表雨水。

美国混凝土协会325委员会规定:横向刻槽效果最好,槽宽应大于 $3\text{mm}$ ,槽深应小于 $6\text{mm}$ ,间距应在 $12 \sim 25\text{mm}$ 之间。但从不影响窄轮胎车辆(摩托车)的行车安全性和舒适性角度考虑, $20\text{mm}$ 的等间距纵向槽布置应是最佳选择。

为了找出抗滑效果最佳的刻槽间距,加利福尼亚州对不同槽间距的滑溜事故进行调查后认为:槽间距为 $19\text{mm}$ 时最安全;再考虑到行车的舒适性和刻槽的寿命,加利福尼亚州的刻槽尺寸规定为槽宽 $2.4\text{mm}$ 、槽深大于 $3.2\text{mm}$ 、槽间距(中心) $19\text{mm}$ 。

1997年威斯康星州交通运输部首先提出,等间距拉槽会产生出个别的峰值噪声(Prominent Tone),刺激人耳。不等间距以及纵向纹理等均不会产生类似的峰值噪声,其采用的不等间距刻槽尺寸(尺寸单位为 $\text{mm}$ )如下:

32-19-22-25-35-22-22-22-22-25-35-13-38-16-25-22-16-32-

19-25-25-25-19-22-25-22-10-25-25-25-32-38-22-25-22-25

随后,科罗拉多州也有类似发现,并将应用最广泛的横向等间距 $25\text{mm}$ 纹理形式改为 $18\text{mm}$ 间距的纵向纹理。

1983年,爱荷华州交通运输部进行了“纵向研磨和横向刻槽改善路面摩擦性能和断面特性”的研究,其铺筑的试验路中有三种纹理构造形式:横向等间距刻槽、横向不等间距刻槽以及纵向研磨。纹理构造形成前后的路面摩擦系数测试结果表明,刻槽及研磨前后路面的摩擦系数均得到大幅提高。

1999—2000年,美国威斯康星州交通运输部(WisDOT)与FHWA共同开展了混凝土路面噪声与纹理构造特性研究,在威斯康星州、卡罗来纳州、爱荷华州、密歇根州、北达科他州等地,共修建57条试验路,纹理构造包括不同尺寸的拉槽、横纵向刻槽、金刚石研磨等,并对其进行了平均断面深度(MPD)及路面噪声水平测试。

亚利桑那州对四种纹理形式的路面进行噪声测试表明,随机间距横向拉槽的噪声水平最高,金刚石研磨的噪声水平最低,两者相差约 $9\text{dB(A)}$ 。在低于 $1600\text{Hz}$ 的频率范围内,四种纹理形式的噪声频谱相差较大,对应的声压水平相差可达到 $10 \sim 12\text{dB(A)}$ 。

加利福尼亚州洛杉矶地区对77个路段的研究表明,旧混凝土路面经纵向刻槽后,雨天情况下的交通事故率降低约75%。纵向刻槽采用宽度 $3.2\text{mm}$ 、深度 $3.2\text{mm}$ 、中心槽间距 $19\text{mm}$ 时,对于汽车的使用性较好,但对于摩托车则存在车轮与路面间附着力低的问题。

### (2) 欧洲各国及日本

①法国道桥研究所认为,当刻槽表面积比(即槽宽与槽宽+槽间距之比)相同时,减少槽

宽、缩小槽间距,抗滑效果最好;当槽间距一定时,增加槽宽可提高抗滑性;当槽宽不变时,缩小槽间距有利于抗滑。当刻槽表面积比超过 10% ~ 12% 时,纵、横向摩擦系数不再增加。通常取槽宽 3 ~ 5mm,槽深 5 ~ 6mm,槽间距 20 ~ 30mm。

②丹麦公路局在高速公路水泥混凝土路面上的刻槽经验表明,在已经硬化的混凝土上进行刻槽成本较高,在未硬化混凝土上拉槽或压槽比较经济。其所采用的水泥混凝土路面防滑构造,主要是利用带有波纹的氯丁橡胶带碾压未硬化路面,以此得到沟槽,效果较好。有的路段还用亚麻籽油做表面处理,以保护路面使用经过第一个冬季时免受除冰盐的伤害。经过测试证明,用亚麻籽油处理的路段,在开放交通头 3 年内的路面摩擦系数增加显著(由 0.45 增加到 0.6)。

③德国一项研究表明,采用通过法测试噪声时,纵向槽路面的车外噪声高出露石混凝土路面 1dB (A)左右,而横向槽路面的噪声要高出约 3dB (A)。

④英国为了控制路面噪声在 80dB 范围内,多采用尼龙齿耙横向拉槽和用振动板所做的随机塑性刻槽,槽宽多采用 5mm,槽深 2mm。同时,还采用纵向拉槽来减少路面噪声。另外,英国曾做过斜向刻槽的试验,但其施工技术比较复杂,同时还存在诱发车辆出现侧滑的可能性,应用很少。

⑤1998 年 3 月,美国的 Roger Waylon 通过试验路研究认为,横向槽路面会产生很大的单极子噪声(Wheel Whine);不等间距槽可降低轮胎/路面噪声的音调,对降低总噪声级有利;槽深对水泥混凝土路面噪声有一定影响。

⑥日本在水泥混凝土路面和机场跑道中多采用刻槽技术。规定机场跑道的刻槽形式为 6mm×6mm@32mm(槽宽 6mm、槽深 6mm、槽中心间距 32mm),纵向刻槽必须在跑道全长范围内进行,横向刻槽必须在 2/3 跑道宽度范围内进行。

### (3)其他国家及组织

①澳大利亚相关试验测试表明,槽深增大对减轻噪声有利。其采用的不等间距槽间距布置方案为(尺寸单位为 mm):

10-14-16-11-10-13-15-16-11-10-21-13-10

②国际民航组织规定,跑道刻槽的构形为 6mm×6mm@32、3mm×3mm@25mm,必须在跑道全长范围进行纵向刻槽,横向刻槽在距跑道边 3m 以内的范围。规定槽深、槽宽、槽间距、直线性的允许误差:线性±40mm/22m,平均深度和宽度±1.5mm。

综上所述,国外对刻槽(或拉槽)路面的研究应用时间较长,美国各州已经规定了较为完整的刻槽参数大小以及刻槽形式,对横向刻槽路面以及纵向刻槽路面的抗滑及噪声特性也进行了一定研究,但主要是围绕槽间距(中心距)、槽走向等展开的,对刻槽路面防滑机理方面没有建立完整的理论论述;虽然对不等间距刻槽的降噪效果进行了大量的试验路数据分析,但结果不尽如人意,没有提出合理的不等间距刻槽路面降噪机理及间距组合设计原则;同时缺乏对梯形刻槽路面抗滑及噪声特性的研究。

### 2)国内研究现状

相对而言,我国对水泥混凝土路面表面功能的研究起步较晚,无论是对抗滑性、还是噪声特性的研究,在深度和广度上和国外都有着一一定的差距,对于水泥混凝土路面抗滑性能恢复改善技术更是缺少相应的研究工作。

20 世纪 80 年代后期,我国开展了国家科委引导性项目(025 项目)——“我国水泥混凝土发展对策及修筑技术研究”。自此,展开了对水泥混凝土路面研究的新阶段。“八五”期间,

进行了国家重点科技攻关项目——“水泥混凝土路面抗滑技术的研究”专题,针对水泥混凝土路面表面抗滑构造的合理性、耐久性、施工方法等展开了研究,通过河北高碑店试验路、湖南湘潭—株洲试验路、湖南莲易路实体工程(12km)和河北石太路实体工程(5km)的铺筑及检测,完成了对拉槽、压槽以及刻槽构造形式、施工方法的初步研究。

1991 年,我国研制开发了第一台电动刻槽机,开创了我国水泥混凝土路面应用金刚石锯片来进行表面刻槽纹理制作、保证防滑性能的新时期。目前,刻槽已经成为我国水泥混凝土路面最主要的防滑形式。

我国工程应用中采用的刻槽构造有以下特点:

(1)我国高速公路及一级公路中所采用的刻槽槽宽、槽深绝大部分都在 3 ~ 5mm;槽间距以等间距 20mm 为常用尺寸,合宁高速公路采用了不等间距压槽的防滑构造;早期修建的路面中,刻槽走向多以横向为主,只有晋阳高速公路牛王山隧道旧路面抗滑恢复项目,采用了纵向刻槽;槽型断面多以矩形为主,只有广东深汕东高速公路采用梯形断面形式。

(2)国内几家采用水泥混凝土路面的机场跑道除徐州观音机场采用压槽机压槽外,其余均采用刻槽机刻槽,其采用的刻槽参数相比高速公路、一级公路均较大,为 6mm×6mm@32mm,槽走向为横向,槽型断面为矩形。

(3)其他市政道路或等级较低道路采用的刻槽尺寸均比高速公路、一级公路要小,槽宽多用 3 ~ 5mm,槽深 1 ~ 6mm 不等,槽间距控制在 15 ~ 40mm 范围内,槽走向以横向为主,槽型断面也多采用矩形断面。

在相关工程实践和研究成果的基础上,我国水泥混凝土路面相关规范对其表面构造也做了相关规定。《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)中规定:路面表面构造应采用刻槽、压槽、拉槽或拉毛等方法制作。构造深度在使用初期应满足表 1.2.1 的要求。

水泥混凝土路面抗滑构造技术要求

表 1.2.1

| 检 查 项 目  |      | 允 许 值       |             |
|----------|------|-------------|-------------|
|          |      | 高速公路、一级公路   | 其他等级公路      |
| 构造深度(mm) | 一般路段 | 0.70 ~ 1.10 | 0.50 ~ 0.90 |
|          | 特殊路段 | 0.80 ~ 1.20 | 0.60 ~ 1.00 |

注:1. 特殊路段指高速公路、一级公路中的立交、平交、变速车道等处;其他等级公路系指急弯、陡坡、交叉口或者集镇附近。

2. 年降雨量 600mm 以下的地区,表列数值可适当降低。

《公路水泥混凝土路面养护技术规范》(JTJ 073.1—2014)中对于水泥混凝土路面表面功能恢复时刻槽法进行了规定。刻槽深度 3 ~ 5mm,槽宽 3 ~ 5mm,缝距为 10 ~ 20mm。刻槽时宜由高向低逐步推进。

《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30—2014)中对水泥混凝土路面抗滑构造做了更为详细的规定。

由以上分析可以看出,我国水泥混凝土路面相关规范对水泥混凝土路面表面功能必需的构造措施如拉槽及刻槽做了简要规定,并推荐了拉槽及刻槽的参数取值范围,但仍存在以下问题与不足:

(1)未对拉槽施工做出具体要求,如机械设备的选择、非等间距拉槽如何进行组合设计等。

(2)未对刻槽施工工艺做出明确规定,缺乏具体的施工注意事项、施工机械设备选择等;虽规定了有降噪需求的路段采用非等间距刻槽,但未明确如何进行不等间距刻槽、间距如何

布置等;虽规定路面结冰地区宜使用梯形槽,但如何实现梯形刻槽、对机械设备等有哪些要求等未明确提出。

### 1.2.3 露石混凝土路面应用现状分析

在一些发达国家,对露石水泥混凝土路面的应用与研究表明,表面露石所形成的丰富的宏观构造,使此种路面具有提高抗滑性能、降低噪声等特点,因此,将此种路面也称为低噪声水泥混凝土路面。

露石水泥混凝土路面(Exposed-Aggregate Cement Concrete Pavement,简称 EACCP),是在面层水泥混凝土混合料铺筑完成后,喷洒露石剂并覆盖塑料膜养生,期间通过露石剂作用对水泥混凝土表面层进行化学处理,延缓表面一定厚度水泥砂浆的凝结,但不影响主体混凝土的正常凝结硬化,当主体混凝土达到一定强度后,刷洗其表面进行表面除浆,露出均匀分布的粗集料,这样所形成的水泥混凝土路面就是 EACCP。

EACCP 除保持普通水泥混凝土路面强度高、使用寿命长、养护费用低等优点外,由于其优良的宏观构造与细观构造,具有一些优异的使用性能。首先,路面抗滑性能得到极大的提高,特别在雨天其抗滑能力显著增加,而且路面抗滑能力保持时间长,不易被磨损;其次,由于集料外露而减小了泵吸噪声,使交通噪声水平显著降低;另外, EACCP 对强烈的阳光形成漫反射,可消除或减缓耀眼光线对驾驶人、行人的干扰,排除反光眩目现象,提高了路面的安全性能。因此, EACCP 具有优良的使用性能和广阔的应用前景。

20 世纪 90 年代,基于对环境改善与提高道路安全性的需求,西欧国家开始较大规模地研究应用低噪声路面,低噪声沥青路面(或称多孔隙沥青路面)在西欧许多国家的研究应用较多,对交通噪声影响环境比较大的旧路加铺低噪声沥青混合料磨耗层,或刨洗旧沥青路面面层后铺装低噪声沥青面层;与此同时,对一些新建水泥混凝土路面也研究应用了 EACCP 技术。

英国南威尔士 A449 Codra-Usk 道路大修项目中,对旧水泥混凝土路面实施连续配筋混凝土加铺层时,采用了“悄声混凝土路面”技术,即 EACCP 技术,预期比传统的拉毛混凝土路面降低噪声 3dB(A)。该道路承担繁重的重载交通,过去 20 年中交通增长率大大高于英国平均水平,原路面设计总标准当量轴次为 1500 万次,加铺罩面后的设计寿命为 40 年,总标准当量轴次为 3.11 亿次。此项目未采用柔性罩面的主要原因是考虑旧水泥混凝土路面接缝的反射问题,如采用柔性罩面,在设计寿命 40 年内会较早地出现反射裂缝。实施 EACCP 罩面时,采用双层铺筑方法,底层 21cm 厚采用普通石灰岩水泥混凝土,表层采用单粒径高磨光值(65)集料所组成的混凝土。混凝土铺筑后,喷洒露石剂并覆盖聚乙烯塑料膜养生,大约在 24h 后进行表面除浆,露出集料,获得了 1.5mm 的构造深度。

A449 项目中的连续配筋 EACCP 设计,一方面使混凝土路面无缝,大大提高了水泥混凝土路面的平顺性,另一方面其 EACCP 使沿线交通噪声降低,路面舒适性提高,而且连续配筋使路面承担繁重交通的能力获得很大提高。

比利时对所有新建公路水泥混凝土路面均采用 EACCP。比利时在对原有旧水泥混凝土路面进行表面处理时,多采用纵向刻纹施工工艺,增加其抗滑性,提高路面纵向平整度,同时对交通噪声也有降低作用。甚至对带有横向刻槽的旧水泥混凝土路面也采用纵向刻纹措施,以改善路面的表面功能。但对新建水泥混凝土路面则都采用 EACCP。测试结果表明, EACCP 降噪效果显著。

德国使用滑模摊铺机铺筑低噪声水泥混凝土路面,混凝土板下部 20cm 是普通水泥混凝土

土或再生水泥混凝土,表层 5cm 是高强混凝土,抗压强度达到 70MPa,单一粒径 5 ~ 7mm。滑模摊铺机施工过后,喷洒超缓凝剂使表面混凝土缓凝,6 ~ 12h 后(具体时间视气温而定),用刷洗机将表面砂浆刷掉,形成裸露均一骨料的低噪声路面表面。既达到了粗糙路面降低噪声的目的,又以高强混凝土保证路面骨料不被车轮冲击松动脱落。这种高强的低噪声水泥混凝土路面达到与沥青混凝土路面同样的噪声水平。目前德国水泥混凝土路面技术规范已规定采用这种低噪声水泥混凝土路面技术,并建成了一些高速公路。

1987 年日本在九州高速公路金刚山隧道,采用普通的刻槽法进行路面的抗滑处理。而在与其相毗邻的福智山隧道采用了 EACCP。经刻槽法与露石法对比,显示出 EACCP 的明显优越性。EACCP 的抗滑性和耐磨耗性均优于刻槽混凝土路面,而且 EACCP 在隧道内产生的粉尘少。

1976 年丹麦在 M20 高速公路上,分别修筑长 4km 的 EACCP 和刻槽水泥混凝土路面。经过 5 年的系统测试,得出结论:EACCP 比刻槽路面的抗滑性能好且维持时间长,EACCP 比刻槽路面摩擦系数损失小,仅为刻槽路面的 1/4 ~ 1/3。

发达国家发展低噪声水泥混凝土路面施工技术,使水泥混凝土路面的缺陷得以克服,获得了优良的表面功能,且使路面的舒适性大大提高。

但是国外的研究应用资料仅反映出 EACCP 的一些使用效果和施工工艺,没有详尽的研究,也没有路面材料组成方法及施工工艺的关键细节,而且由于各方面的条件与情况不同,难以将其技术应用到我国的工程实际中。

20 世纪末,国内个别水泥混凝土路面如黑龙江哈绥线尚志至亚布力段,施工中对 EACCP 做了尝试性试验,但尚未开展深入研究,对这种路面形式的技术要求、施工工艺以及路面性能评价指标未进行探讨,总体上,没有进行 EACCP 的系统研究。

2000 年开始,长安大学与铜川公路管理局合作进行 EACCP 研究,当年铺筑了 100 多米试验路,2001 年又实际应用铺筑了长 1.6km 的 EACCP,2004 年在我国铺筑了第一条抗滑低噪声水泥混凝土隧道路面,其降噪幅度在车辆速度为 80km/h 时达 4dB (A)。2004 年年底到 2005 年年初由长安大学提供技术支持,分别在西藏铺筑了长 2.5km 的隧道 EACCP,在厦门大陆坡路段(局部路段纵坡大于 10%)铺筑了长 3km 的抗滑 EACCP。这些试验路或实际应用路段的使用均获得了满意效果。

## 1.2.4 聚合物改性纤维混凝土应用现状分析

### 1) 聚合物改性水泥基材料研究现状

国外对聚合物改性水泥基材料的研究起步较早,20 世纪 20 年代就已经开始了相关研究,Creson 于 1923 年第一个获得这方面的英国专利,这个专利是关于用作铺路材料的水泥填充天然橡胶胶乳。1924 年,Lefebure 获得的英国专利介绍了利用一定的配比生产天然橡胶胶乳改性水泥基材料的方法。1932 年,英国 Bond 申请了用合成橡胶胶乳改性水泥基材料的专利。1939 年,美国的 Rodwell 提出了用合成树脂乳液生产聚合物改性水泥基材料的专利。

在聚合物对水泥基材料性能的影响方面,国外学者做了很多相关的研究工作。Gao 等(2002)在水泥砂浆中掺加聚丙烯酸酯(PAE)以及硅灰(SF),结果表明,PAE-SF 改性砂浆相比普通砂浆,其力学性能及耐久性得到显著改善;Almeida 和 Sichieri(2007)采用苯乙烯—丙烯酸酯共聚物和 SF 进行改性砂浆研究,试验结果显示,改性砂浆比普通砂浆具有更高的

黏结强度;Kwon 等(2009)在砂浆中掺入丙烯酸乳液聚合物和矿渣后,其强度显著提高;Joo 等(2004)的研究表明,苯乙烯—丁二烯橡胶改性砂浆中掺加矿粉具有优良的力学性能;环氧改性混凝土中掺入硅灰(SF)或粉煤灰同样也可以改善砂浆的力学性能[Barbuta 等(2010)和 Rebeiz 等(2004)]。Anan 研究了聚合物乳液改性水泥胶浆的流变性,研究表明,聚合物改性水泥胶浆表现出明显的摇溶性与剪切变稀的流变行为;德国的 Grosskurch 采用聚合物乳液改性水泥混凝土,并对其长期强度性能进行了研究,研究结果表明,不同聚灰比的水泥混凝土的抗压强度均低于不掺聚合物的空白样,并且聚合物改性水泥混凝土抗压强度降低趋势随着聚灰比的增大而变得缓慢。日本的 Ohamals 对多种不同聚合物改性水泥基材料进行了系统深入的研究,提出了用于计算聚合物乳液改性砂浆和混凝土强度的数学公式。

国内对人工合成聚合物改性水泥基材料的研究起步较晚,主要开始于 20 世纪 80 年代,目前已取得了一些初步成果。王培铭对掺加不同掺量聚乙酸乙烯酯(PVAC)的聚合物改性水泥混凝土的抗拉强度进行了研究,结果表明, PVAC 聚合物改性水泥混凝土的抗拉强度比普通混凝土有较大幅度的提高,聚合物的最佳掺量在 10% 左右;钟世云采用不同聚合物乳液进行共混,研究了不同聚合物组成对聚合物改性砂浆性能的影响,研究结果表明,聚合物改性砂浆的抗压强度随聚合物薄膜的拉伸强度增大而明显提高,而聚合物改性砂浆的抗弯拉强度则没有随聚合物薄膜的拉伸强度增大而出现显著提高。梁乃兴对聚合物改性水泥混凝土的路用性能进行了系统研究,提出了适用于路面的塑性聚合物改性水泥混凝土配合比。申爱琴对水泥路面裂缝成因和修补材料进行了研究,研制出了性能优异的聚合物改性超细水泥路面裂缝修补材料,并对用于路面的塑性聚合物改性水泥混凝土的材料组成及路用性能进行了系统研究。

## 2) 聚合物改性水泥基材料的应用现状

目前在国外,聚合物改性水泥基材料因其在变形能力、抗弯拉强度、黏结性能、动载力学性能、防水性能、耐久性、耐化学介质侵蚀等方面的卓越性能被广泛应用在公路路面、桥梁铺装层、房屋建筑、水库大坝、港口码头、水利工程等领域。

美国将聚合物用于路桥工程已非常普遍。美国认证协会(American Certification Institute, 简称 ACI)订立了有关聚合物在路桥修补工程中的技术规范 ACI 548.5R,其中对于修补路面、桥面的聚合物改性水泥砂浆及混凝土的相关性能指标做出了具体规定。另外,美国很早就将聚合物改性水泥砂浆及混凝土用于桥面铺装层,截至 2010 年,美国共有超过 12000 座桥梁总计 220 多万平方米的桥面采用聚合物改性水泥基材料进行铺装或罩面改造。由于其较低的渗透性与较高的黏结强度,聚合物改性水泥混凝土在美国已成为桥面板的标准防护系统。

其他发达国家如英国、德国和日本也纷纷开展了此方面的应用,其中用于公路工程构造物修补和防水的相关应用较多,且使用非常普遍。20 世纪 80 年代,日本开始大规模利用聚合物改性水泥砂浆修补破损的路面及桥面,目前该技术的应用已相当普及,并订立了相关的聚合物改性砂浆质量标准(JIS A6203),如表 1.2.2 所示。

日本聚合物改性水泥砂浆相关质量标准(JIS A6203)

表 1.2.2

| 指标 | 7d 抗弯拉强度(MPa) | 7d 抗压强度(MPa) | 7d 黏结强度(MPa) | 长度变化(%) |
|----|---------------|--------------|--------------|---------|
| 要求 | ≥ 5.0         | ≥ 15.0       | ≥ 1.0        | 0 ~ 0.1 |

德国交通部筑路局也制定了用于桥梁的聚合物改性水泥混凝土技术及检验规范(TP BE—PCC),如表 1.2.3 所示,对用于桥梁的聚合物改性砂浆及混凝土的力学性能做出了具体要求。

德国对用于桥梁的聚合物改性水泥混凝土的规范要求(TP BE—PCC) 表 1.2.3

| 改性混凝土 | 抗压强度(MPa) |      |      | 抗弯拉强度(MPa) |     |     | 28d 弹性模量<br>(GPa) | 28d 抗拉强度<br>(MPa) |
|-------|-----------|------|------|------------|-----|-----|-------------------|-------------------|
|       | 7d        | 28d  | 90d  | 7d         | 28d | 90d |                   |                   |
| 动载    | ≥ 30      | ≥ 45 | ≥ 45 | ≥ 5        | ≥ 9 | ≥ 9 | 25 ~ 40           | ≥ 2               |
| 静载    |           | ≥ 30 | ≥ 30 |            | ≥ 6 | ≥ 6 | 15 ~ 30           | ≥ 2               |

前苏联利用聚合物改性水泥混凝土以提高其路用性能也有较长历史,这主要与前苏联有很多水泥混凝土道路冬季受到严重的冻融破坏有关,而喷撒除冰盐更加重了这种路面的耐久性问题,其中用于水泥混凝土改性的聚合物以丁苯乳液居多,这主要是由于丁苯乳液价格较为便宜且产量大。在国内,长安大学申爱琴等利用塑性聚合物改性水泥混凝土做路面材料,并在广东惠州进行了试验路的铺筑,使用效果良好。重庆交通大学易志坚等利用聚合物改性多孔水泥混凝土作为道路表面罩面层,研究结果表明其具有抗滑、降噪等表面特性,显著提高了传统水泥混凝土路面的使用功能,该成果在重庆市政建设及湖北沪蓉西高速公路得到了应用。

### 3) 纤维增强聚合物改性水泥基材料研究现状

纤维增强聚合物改性水泥基材料是近年来发展起来的一种新型建筑材料,其中纤维主要采用钢纤维与有机纤维两大类。由于纤维的加入,在纤维增强水泥基材料内部,尤其是纤维与水泥石之间的界面过渡区(ITZ)会存在大量孔隙,导致水泥水化物、纤维和骨料界面黏结不够充分,从而严重影响了水泥基材料的耐久性,降低了纤维的增强作用。有学者提出利用聚合物对纤维水泥基材料进行改性,由于聚合物极强的黏结性能,能够显著增强纤维与水泥石之间的黏结性能,并且可有效填充基体内部的孔隙,从而显著提高水泥基材料的耐久性。

罗立峰等人研究了钢纤维增强聚合物水泥混凝土桥面铺装层材料(SFRPC)的组成设计与路用性能,研究表明,SFRPC克服了钢纤维混凝土与聚合物改性混凝土的缺点,吸收了两者的优点,形成包括高强度、高延展性、高抗冲击能力、优良的裂缝控制、高耐久性和低渗透性等优良性能,并且施工相对容易。梅迎军等人研究了体积掺量为0~0.3%的聚丙烯纤维,质量掺量为0~12%的丁苯聚合物乳液在单掺、复掺情况下对不同龄期的水泥砂浆力学性能、耐磨损性能、抗冲击性能等的影响,研究表明,聚丙烯纤维的掺入大幅度提高了丁苯乳液改性水泥砂浆的耐磨损性能和抗冲击性能,其中提高耐磨损性能的最佳纤维体积掺量为0.1%,纤维掺量越大,对提高改性水泥砂浆的抗冲击性能越有利。李国忠等人研究了聚丙烯纤维和聚合物乳液对水泥砂浆抗徐变性能和抗冲击性能的影响,结果表明,掺加适量的聚丙烯纤维和聚合物乳液,可以有效提高水泥砂浆的抗徐变性能和抗冲击性能。

由此可见,聚合物改性水泥基材料在公路工程中的研究与应用已得到了相关部门的广泛关注,并逐渐得以推广应用。今后我国聚合物改性水泥混凝土的研究,一方面需要对用于水泥混凝土的聚合物乳液进行深入研究 and 改进,降低聚合物乳液材料成本,提高其稳定性及其与水泥的相容性;另一方面需要对聚合物改性水泥砂浆或混凝土的路用性能进行系统、深入研究,并制定相关的技术标准。

### 4) 复合式路面以及路面研究与应用现状

随着水泥混凝土路面施工工艺的不断发展,20世纪50年代,美国、加拿大开始研究碾压混凝土(PCCP)路面。后来逐渐发展为上下两层采用不同的材料与集料级配的PCCP路面(即PCCP-PCCP复合式路面),两次摊铺,一次碾压成型;也可采用下层为碾压混凝土,上层