

导电沥青混凝土及其应用

吴少鹏 刘全涛 著



 科学出版社

导电沥青混凝土及其应用

吴少鹏 刘全涛 著

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229,010-64034315,13501151303

内 容 简 介

本书在参考国内外相关研究成果的基础上,通过室内外试验、理论分析以及实体工程验证,系统阐述了导电沥青混凝土的制备方法及其应用技术,集中体现了作者十几年来关于导电沥青混凝土的制备技术、自诊断特性、自愈合性能、融雪化冰性能和太阳能集热性能等方面的研究成果。

本书可作为科研、设计、工程管理等相关人员以及高等学校材料科学、土木工程、交通等相关专业教师、研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

导电沥青混凝土及其应用/吴少鹏,刘全涛著. —北京:科学出版社,2017.3
ISBN 978-7-03-051290-1

I. ①导… II. ①吴… ②刘… III. ①沥青混凝土—研究 IV. ①TU528.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 312129 号

责任编辑:王雨舸/责任校对:董艳辉

责任印制:彭超/封面设计:苏波

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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2017年3月第 一 版 印张:16 1/2

2017年3月第一次印刷 字数:416 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

导电沥青混凝土的研究如果从国外专利公布的年份上可追溯到二十世纪六十年代,但在国内只是近些年才开始研究。该书作者吴少鹏团队是国内最早开展导电沥青混凝土研究的研究组之一,完成了包括国家自然科学基金“融雪化冰用多相复合导电沥青混凝土的制备与服役行为研究”等科研项目。该书即是基于这些研究成果的系统汇聚。

沥青是天然的绝缘材料,将沥青混凝土做成导电型的材料将赋予新的功能(如压敏、温敏特性)。导电沥青混凝土目前主要应用于公路,该书所述亦以公路性能为主线。我国高速公路通车里程已近十三万公里,特别是自 21 世纪以来,沥青混凝土路面的养护维修工作量逐年上升,上世纪九十年代所修公路大都进入了大修期,所耗人力财力提醒我们:造路与维修同等重要。延长公路的使用寿命对国民经济的促进作用不言而喻。

目前所使用的维修手段大都以表面处理为主,包括车辙的修补和坑槽的挖补。对于较深层次的半刚性路面内部裂缝的自愈性修复,该书介绍的方法具有独特的优势。例如,损伤的自我诊断、深层次的自愈修复、冬季融雪化冰和夏季集热蓄热等。

导电沥青混凝土的压敏和温敏特性使修建的公路具有初步的智能化。但沥青混凝土是一个复杂的多相体系,选择合适的导电相材料掺入到沥青混凝土中,是研究者首先遇到的问题。目前选用的石墨类材料(如炭黑、石墨、碳纤维)和金属类材料(如钢纤维、钢渣)都是国内容易获取和使用的导电材料,利用物理混合工艺可容易实施,从性价比和经济实用角度而言是合理的选择。

该书的研究工作兼具实用性与理论阐述,总结了著者的以下研究成果:

(1) 以疲劳寿命为基础的损伤自诊断方法,对确定沥青混凝土路面的初始养护时间具有重要的作用。此部分试验未采用钢纤维作导电相,排除了金属材料锈蚀钝化过程所造成的影响,所制备的导电沥青混凝土的自诊断特性是比较可靠的。

(2) 感应加热以修复路面内裂缝的试验工作以钢纤维为导电材料,因为炭类粉体材料不具备这种性能。混有钢丝绒导电相的沥青混凝土在荷兰进行了试验段铺筑,经现场取样制作试件,其飞散损失试验、间接拉伸试验、感应加热及愈合试验结果优异,感应加热后试验段路用性能优异。

(3) 与热性能有关的沥青混凝土融雪化冰与集热性能的研究还需其他科技领域的发展予以配合。目前研究成果表明,以电阻法实施的加热方式可用于融雪化冰,但大面积推广应用尚有待时日。导热沥青路面集热、蓄热问题的提出给今后的综合利用提出了一个方向。

该书主要是著者团队十几年的工作成果汇聚,其成书难免有雕琢痕迹或雕琢不到之处。

傅鹰先生言：编书如造园，一石一木在拙政园安排得合适，移到狮子林则未必和谐。不过，该书阐述采用几种导电相材料制备成导电沥青混凝土，并进行了从实验室到试验路段的系统研究，形成了实用性很强的理论，这是该书对我国沥青混凝土行业的贡献。可作为试射者之嚆矢，庶可为后射者明目的也。

是为序。

南策文

2016年10月

前 言

导电沥青混凝土是一种功能型沥青混凝土。导电沥青混凝土电阻率的变化与其损伤程度之间的关系显著,可根据其电阻率的变化实现对沥青混凝土裂纹和损伤的智能诊断,进而确定沥青混凝土路面的养护时机;导电沥青混凝土能够被电磁感应加热,能够利用感应加热诱使导电沥青混凝土裂纹自愈合,从而避免沥青路面产生开裂、坑槽等病害;施加电压后,导电沥青混凝土会产生电热效应,能够实现沥青路面融雪化冰;导电沥青混凝土具有较高的导热性能,可利用导电沥青混凝土实现高效率的沥青路面太阳能集热。开发并利用导电沥青混凝土的上述功能,不仅能够实现沥青路面损伤的智能诊断、裂纹自愈合、融雪化冰和太阳能集热,而且能够减少沥青路面的高、低温病害,缓解城市的热岛效应。

本书依托国家自然科学基金项目“融雪化冰用多相复合导电沥青混凝土的制备和服役行为研究”及科学技术部国际科技合作专项项目“沥青路面的自愈合技术及其应用合作研究”,对导电沥青混凝土的制备与功能进行了系统研究:①探明了导电相材料的掺入对沥青混凝土电阻率的影响规律,揭示了导电沥青混凝土电学性能的改善机制,研发了多相复合导电沥青混凝土的制备技术;②研究了导电沥青混凝土的压敏特性、温敏特性及其作为器件的自诊断特性,提出了自诊断导电沥青混凝土的施工方法,研发了导电沥青混凝土的自诊断模型;③研究了导电沥青混凝土的感应加热速率、力学性能和感应加热自愈合功能,并在实体工程中验证了导电沥青混凝土的感应加热自愈合功能;④揭示了融雪化冰用导电沥青混凝土的电学性能要求,探明了导电沥青路面电阻特性与电热效应;⑤分析了沥青路面集热性能时效性的影响因素,探明了太阳能集热沥青路面功能层的优化设计,研究了导电沥青混凝土的太阳能集热性能。

本书预期的研究成果,不仅对机场跑道、道路、桥面的损伤自诊断、裂纹自愈合、夏季降温、冬季融雪化冰方法具有重要的现实意义,而且为科学地开展损伤自诊断、裂纹自愈合、太阳能集热及融雪化冰沥青路面的设计与施工提供理论依据和工程指导。

本书在写作和研究过程中得到了众多朋友、同行、同事、学生的帮助与支持,其中许多内容都是与他们共同进行研究的成果。磨炼同博士和张园博士参与了导电沥青混凝土制备技术的研究,刘小明博士、唐宁博士和孙长军博士在导电沥青混凝土的自诊断特性研究方面付出了大量辛苦的劳动,潘攀博士和陈明宇博士在导电沥青混凝土融雪化冰方面做了大量的研究工作,王红博士在导电沥青混凝土太阳能集热方面给予了帮助,潘攀博士和唐宁博士参与了书稿的撰写与修订。此外,在写作本书过程中,得到了著名专家南策文院士的悉心指导。在此,作者对所有支持关心本书的老师、同事、朋友与学生一并表示感谢!

由于作者的学识有限,书中难免有疏漏和不当之处,恳请各位读者批评、指正。

作 者

2016年10月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 沥青路面存在的主要问题	1
1.1.1 路面车辙	1
1.1.2 路面开裂	2
1.1.3 路面坑槽	3
1.1.4 路面养护	3
1.1.5 路面积雪	5
1.2 导电沥青混凝土及其功能	6
1.2.1 结构自诊断	6
1.2.2 感应加热自愈合	7
1.2.3 融雪化冰	8
1.2.4 太阳能集热	9
第 2 章 导电沥青混凝土的制备技术	11
2.1 导电相材料	11
2.1.1 炭黑	11
2.1.2 石墨	11
2.1.3 碳纤维	12
2.1.4 钢渣	12
2.2 电阻率的测定方法	13
2.3 导电相材料的掺入对沥青混凝土电阻率的影响	15
2.3.1 单相复合导电体系	15
2.3.2 两相复合导电体系	16
2.3.3 三相复合导电体系	17
2.4 导电沥青混凝土电学性能的改善机制	19
2.4.1 单相导电材料对沥青混凝土电学性能的改善机制	19
2.4.2 多相复合导电体系对沥青混凝土电学性能的改善机制	22
2.5 多相复合导电沥青混凝土的制备	24

2.5.1	配合比与矿料级配设计	25
2.5.2	石墨对沥青用量的影响	26
2.5.3	复合导电沥青混凝土制备工艺	28
2.6	多相复合导电沥青混凝土路用性能研究	29
2.6.1	石墨对沥青胶浆流变性能的影响	29
2.6.2	石墨对沥青胶浆温度敏感性的影响	31
2.6.3	多相复合导电沥青混凝土水稳性研究	34
2.6.4	多相复合导电沥青混凝土高温稳定性研究	36
2.6.5	多相复合导电沥青混凝土疲劳性能研究	37
2.6.6	多相复合导电沥青混凝土老化性能研究	38
第3章	导电沥青混凝土的自诊断特性	41
3.1	导电沥青混凝土的压敏特性	41
3.1.1	压阻模型	41
3.1.2	电阻蠕变行为	41
3.1.3	压阻特性	43
3.1.4	压阻系数	44
3.2	导电沥青混凝土的温敏特性	45
3.2.1	温敏特性的概念	45
3.2.2	多次温度循环的温敏特性	47
3.3	导电沥青混凝土作为器件的自诊断特性	48
3.3.1	圆柱体器件的自诊断特性	48
3.3.2	梁式器件的自诊断特性	54
3.3.3	车辙器件的自诊断特性	59
3.4	自诊断导电沥青混凝土的应用	66
3.4.1	自诊断导电沥青混凝土应用概况	66
3.4.2	自诊断导电沥青混凝土施工关键技术	67
3.4.3	自诊断导电沥青混凝土的养护决策	81
3.5	导电沥青混凝土的自诊断模型	83
3.5.1	模型的评价指标体系	83
3.5.2	路面综合性能评价模型	85
3.5.3	自诊断沥青混凝土试验段的养护决策	88
第4章	钢纤维导电沥青混凝土的感应加热自愈合性能	91
4.1	概述	91

4.1.1	关于沥青的自愈合性能基础概述	91
4.1.2	沥青混凝土感应加热自愈合法	92
4.2	原材料和试件制备	93
4.2.1	原材料	93
4.2.2	沥青砂浆梁的制备	94
4.2.3	沥青混凝土旋转压实试件的制备	96
4.2.4	多孔沥青混凝土梁的制备	99
4.3	自愈合用沥青混凝土的导电性能和感应加热速率	99
4.3.1	掺钢丝绒的沥青砂浆和多孔沥青混凝土的电阻率	99
4.3.2	导电沥青砂浆和导电沥青混凝土的感应加热性能	106
4.4	自愈合用导电沥青混凝土的力学性能	117
4.4.1	肯特堡飞散损失	118
4.4.2	干燥状态的间接拉伸强度	121
4.4.3	水损害状态的残留间接拉伸强度	124
4.4.4	劲度模量	125
4.4.5	间接拉伸疲劳	128
4.4.6	纳米压痕模量与硬度	130
4.5	导电沥青混凝土的感应加热自愈合试验	132
4.5.1	沥青砂浆梁自修复试验	133
4.5.2	沥青混凝土间接拉伸疲劳自愈合试验	134
4.5.3	沥青混凝土梁弹性基座上的自愈合	138
4.5.4	沥青混凝土梁四点弯曲疲劳损伤的自愈合	142
4.6	感应加热自愈合沥青混凝土的应用	149
4.6.1	钢丝绒多孔沥青混合料的拌和工艺优化及性能验证	149
4.6.2	感应加热自愈合多孔沥青路面试验段的铺筑	155
4.6.3	感应加热自愈合试验段性能分析	157
第5章	导电沥青混凝土的融雪化冰性能	166
5.1	融雪化冰用导电沥青混凝土的电学性能要求	166
5.1.1	传热分析基础知识	166
5.1.2	融雪化冰过程热平衡分析	169
5.1.3	导电沥青路面结构与材料设计要求	176
5.2	导电沥青路面电阻特性与电热效应研究	177
5.2.1	室内加热试验方案	177
5.2.2	导电沥青混凝土电阻特性研究	180

5.2.3	沥青混凝土升温 and 融雪试验研究	183
5.2.4	隔热层对导电沥青路面加热效率的影响	185
第 6 章 导热沥青混凝土的太阳能集热性能研究		190
6.1	沥青路面太阳能集热性能的影响因素	190
6.1.1	热平衡分析	190
6.1.2	传热过程解析	192
6.1.3	沥青路面集热性能时效性影响因素分析	196
6.2	太阳能集热沥青路面功能层的优化设计	197
6.2.1	功能层集热过程的基本参数	197
6.2.2	功能层集热三维非稳态传热模型验证	203
6.2.3	不同参数对功能层集热性能的影响研究	207
6.2.4	各参数对功能层性能影响程度的灵敏度分析	219
6.3	沥青路面太阳能集热性能研究	221
6.3.1	导热填料对沥青混凝土路面温度场影响的试验研究	221
6.3.2	集热对沥青混凝土路面温度场影响的试验研究	226
6.3.3	室内小板集热性能的试验研究	230
6.3.4	室外集热性能的试验研究	234
6.3.5	不同气候条件下集热沿程变化数值模拟	237
参考文献		245

第 1 章 绪 论

1.1 沥青路面存在的主要问题

公路交通行业作为国民经济的基础性行业,对我国国民经济的飞速发展起到了重要的作用。新中国成立以来,我国的公路交通行业取得了举世瞩目的成就。截至 2015 年底,全国公路通车总里程达到 457.73 万公里,其中高速公路通车总里程 12.35 万公里,居世界第一位^[1]。沥青混凝土道面由于其平整度高、舒适性好,并且行车低油耗、低噪、抗滑等优点,已被广泛应用于城乡公路、桥面加铺、机场道面及高速公路面层等运输系统中^[2-3]。然而,在行车荷载和环境因素的作用下,沥青道路的行驶质量和服务能力逐渐下降,产生车辙、裂缝、松散和坑槽等病害,这些病害的产生和发展严重威胁着道路的安全畅通,防治这些病害又造成了巨大的经济和资源损失。此外,冬季路面积雪结冰也严重威胁着道路的安全畅通,撒盐除雪又造成了路面腐蚀和环境污染。

1.1.1 路面车辙

高温变形是沥青路面最常见的病害之一,它是在行车荷载重复作用以及气温等因素综合作用下产生的一种永久性变形。沥青混凝土是一种典型的“温敏”黏弹塑性材料,其强度和劲度模量随着温度的升高而降低。路面夏季高温时,由于渠化交通的作用,在重载车辆车轮经常作用的部位,沥青混凝土面层进一步被压实;侧向流动的变形导致轮迹带逐渐变形下陷,两侧鼓起。这种高温变形即所谓的“流动性车辙”(图 1-1)。



图 1-1 车辙

车辙产生后,路面平整度降低,容易导致车辆失控,尤其在车辙积水时,严重降低行车安全。同时,车辙也会引起其他病害,如网裂、坑槽、坑洞等。随着我国道路交通向重载、大流量和渠化的不断发展,沥青路面车辙损坏严重,且无经济有效的维修方法,只能对车辙部位进行

铣刨,用新混合料重新铺筑。

1.1.2 路面开裂

沥青面层由于老化而变脆、变硬,延伸率下降,在低温和温差大的情况下极易发生横向的温缩裂缝。当气温骤降,沥青混凝土如果低温柔性不足,易产生面层裂纹,裂纹在长期作用下扩展,逐渐向底面层和基层延伸,从而形成上宽下窄、从上自下的温缩裂缝。在温度变化大的地区,夏季完好的路面到了冬季会由于路面温度过低或温度变化过大,产生纵向近似等间距的横向裂缝,有时横向温缩裂缝会贯通路面的一部分,而大部分横向温缩裂缝则是贯通整个路面宽度(图 1-2)。此外,由于半刚性基层不可避免的横向开裂,在路基裂纹处裂纹向上扩展,导致沥青路面面层产生裂缝,此种裂缝为反射裂缝。

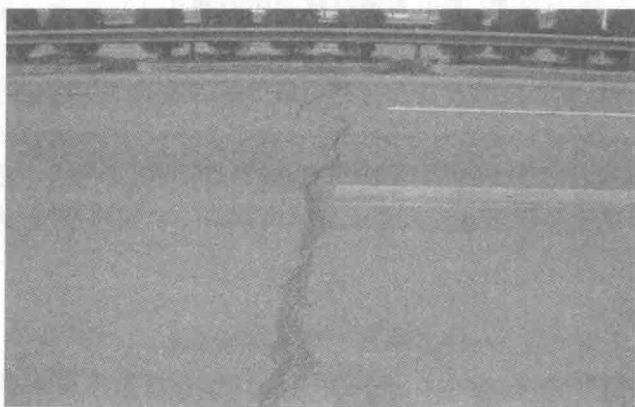


图 1-2 温缩裂缝

在服役过程中,行车道上的沥青路面在行车荷载的反复作用下极易产生龟裂(图 1-3)。龟裂是路面受交通荷载作用,其变形和挠度过大,在沥青路面的柔性不够及重载车辆的反复碾压下,路面材料疲劳而形成的一种裂缝,故有时亦将此类裂缝称为疲劳裂缝。在龟裂形成初期,由于裂缝轻微,对沥青路面的服务水平影响不大,但由于路面有龟裂而使得路表面的水渗入,这样便会加速龟裂面积的扩大以及裂缝的扩展,形成坑槽破损。

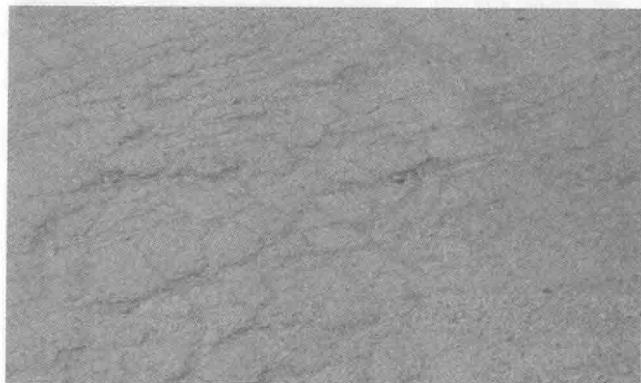


图 1-3 龟裂

在沥青混合料摊铺时,由于纵向接缝处理不当,造成路面早期渗水或压实未达到要求,在行车作用下会在纵向接缝处形成纵向裂缝(图 1-4)。由于地基和填土在横向不可避免的不均匀沉降,特别是在有路表水渗入地基的情况下,沥青路面也可能产生细而小的纵向裂缝。沥青面层由于老化导致的变脆、变硬,可加剧纵向裂缝的发展。

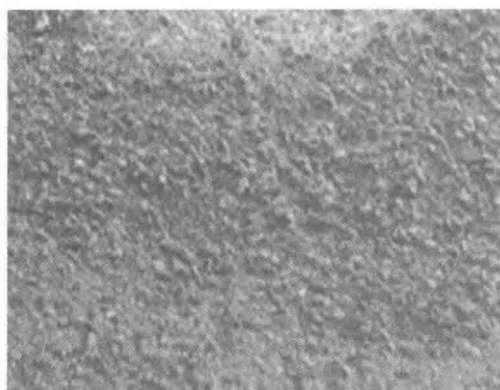


图 1-4 纵向裂缝

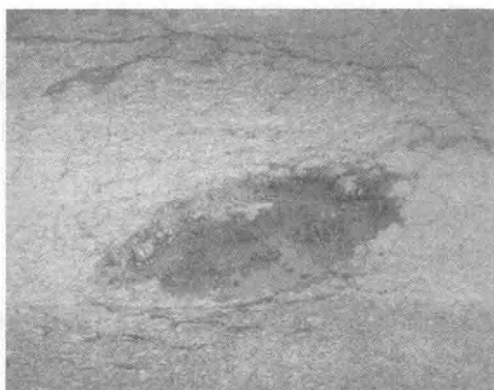
如果裂缝不能被及时地填封,在行车荷载作用下,水会由裂缝进入沥青路面,引起水损害、松散等进一步的病害,甚至随着水进一步的进入,会冲刷路基,导致更大面积的破坏^[4-7]。并且,裂缝尖端会产生较大的应力集中,使裂缝向下延伸并逐渐穿透整个沥青面层,并可能导致半刚性基层开裂。一旦基层出现裂缝,其整体性就遭到破坏,路面强度也因此大为降低,在行车荷载的反复作用下,路面很快就会遭到破坏^[8]。

1.1.3 路面坑槽

由于连续降雨或路表面积水,沥青路面长时间侵水,或者水通过路表面的裂缝、材料孔隙渗入路面结构层内,若水不能被及时、有效地排出,则路面材料将会长时间处于水的包围之中,水分就很容易包裹在沥青和集料的界面上,削减沥青与集料的黏结,使沥青从黏附的集料表面剥离,导致集料之间失去黏结力,使沥青混合料呈松散状态。路面发生松散后,如果没有得到及时的修补,在荷载和水的作用下,进一步形成坑槽。在沥青的服役过程中,由于紫外光老化产生的裂缝,破坏了沥青上面层的防水功能,为水对路面的入侵提供了可趁之机,导致沥青混凝土路面在水和车载的作用下更易发生松散和坑槽(图 1-5)。



(a) 松散



(b) 坑槽

图 1-5 松散和坑槽

1.1.4 路面养护

由于交通荷载及气候环境的反复作用,沥青路面易产生低温收缩裂缝、温度疲劳裂缝和反射裂缝,如不及时维修养护,则会快速发展成唧浆、松散、坑槽等病害^[9]。特别是现代交通重

载、大流量与渠道化的特点,使得沥青路面的病害问题更为突出,及时维修养护就显得更为重要^[10]。沥青路面常用的预养护方法主要包括雾封层、裂缝填封、稀浆封层、微表处、碎石封层与开普封层、薄层罩面、就地热再生等^[11]。

对沥青路面进行预防性养护,首先要确定的是预防性养护的时机(图 1-6)。过早地进行预防性养护,将造成资源的浪费,达不到降低养护成本的目的。而过晚地进行预防性养护,预防性养护已经不能发挥其应有的作用,同样也不能起到预防性养护的目的^[12]。只有在路面使用后一个合适的时间范围内进行预防性养护,才能达到成本的最大化,降低全寿命周期内的养护费用。值得注意的是根据不同的气候条件、交通量、施工状况等客观条件,不同的路面所需要进行预防性养护的时机各不相同,需要进行严格的评估决策,才能确定合适的养护时机。



图 1-6 沥青路面预防性养护措施

在世界范围内,沥青路面的预养护时机问题一直是研究的热点与难点问题。总体看来,有以下几种方法来确定预防性养护的时机。

1. 基于路面使用性能的预防性养护时机

基于路面使用性能的预防性养护时机就是从路面的状况出发,当路面的某项性能达到某个特定的阈值后,就认为该路段路面需要进行预防性养护了。这项功能性的指标可以确定为路面的行驶质量或者综合状况指标(PCI)。由于引起路面破坏的外在原因有很多,PCI可能在一个短的时间内出现急剧的变化,而对路面 PCI 等数据的监测的频率相对滞后,这样会导致预防性养护时机的判断出现较大的偏差,因此目前较少用这种方法来决定预防性养护的时机。

2. 基于预防性养护措施使用效果的养护时机

该方法是养护管理部门对不同时间节点,预防性养护手段在沥青路面上使用性能的长期监测,根据成功的经验可以找到效益最佳的时间节点,进而可以得到该区域的最佳养护时机。这种方法对特定区域是有效的,但是作为一个经验性的指标,不能广泛的被推广。

3. 效益费用比的方法

效益费用比的方法目前在美国被广泛用来确定沥青路面预防性养护的时机。这种思想是考虑预防性养护措施在不同的时间节点应用会对沥青路面的技术指标产生不同的影

响,从而通过沥青路面的技术指标的量化,来计算出预防性养护措施全寿命周期内预防性养护所取得的效益与费用的比值。基于效益费用比的预防性养护时机判断方法分为以下5个步骤:选定沥青路面技术指标、确定各技术指标的权重因子、预测采取预防性养护措施前后沥青路面性能的变化曲线、确定选定路面技术指标阈值和计算效益费用比。这种方法要求路面有良好的路面管理系统,有足够的数据库来预测沥青路面性能的变化趋势,并且在各技术指标不同的权重因子组合下会形成不同养护时间。

4. 决策树法

决策树是通过一定的“树”的形式,针对沥青路面的交通量、路面的基本状况等关键因素,将路网进行不断地分枝,考虑在不用组合条件下,项目级养护所适宜的对策。决策树能够与工程师的主观经验良好的结合,但是决策树存在的问题是其受影响的因素太多,其对路面的养护问题的各方面影响因素考虑不足,很多好的养护措施可能没法进入决策树模型,因此用来作为决策的最终工具存在其局限性。

5. 基于沥青路面中沥青结合料老化的方法

该方法是根据沥青路面中沥青及混合料的老化程度来进行预防性养护的决策,这种方法对因老化引起整体性能恶化的路面具有较好的针对性,但不适用于结构强度、排水设计等方面存在问题的沥青路面。

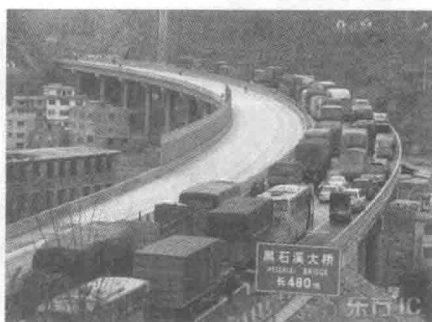
通过以上的分析可以看出,现行的预防性养护时机的判别方法各有缺点,如何确定不同的气候条件、交通量、施工状况下沥青路面的养护时机,仍然是道路工程领域亟待解决的技术难题。

1.1.5 路面积雪

在严寒季节,路面的积雪和冰冻是常见的问题,这不仅大大降低了道路安全运输能力,而且极易引发交通事故^[13]。图1-7表明了积雪造成的机场及道路交通难以正常运行的困境^[14-15]。



(a) 机场积雪



(b) 大雪中拥堵的高速公路

图 1-7 冰雪对道路交通的影响

根据中华人民共和国交通运输部(简称交通运输部)资料显示,我国交通事故致死率高于亚洲其他发展中国家,万车死亡率呈逐年下降趋势,但仍与发达国家差距明显,我国仍处于事

故高发时期;在 2009~2010 年,全国范围内因冰雪低温恶劣天气导致交通事故死亡人数同比增加,特别是 2009 年下半年,由于雨雪、低温等恶劣天气条件,全国发生的道路交通事故而死亡人数同比上升了 13.3%^[16-17]。雨雪、低温天气如何保证道路的安全畅通,保障经济社会的正常运行是交通运输管理部门工作的重中之重。

为了清除路面积雪,撒布盐类融雪剂是目前最常用的一种路面除雪化冰方法,利用融雪剂降低路面上冰雪的熔点,达到除冰雪的目的。然而大多数盐类融雪剂都存在腐蚀性,不仅腐蚀破坏道路结构和车辆,而且还会污染周边土壤、水体等^[18]。例如,2003 年,北京地区融雪剂的使用,导致 3 万多平方米的草地受害,4000 颗大树和 4 万株灌木死亡,造成 1500 多万元直接经济损失^[19]。此外,某些氯盐类融雪剂有极强的吸水性,在冰雪融化后极易吸水,在道路表面形成氯化钙水合物、氯化钙晶体,以及路面灰土的滑腻混合物,使路面抗滑性能降低,容易引发交通事故。因此,如何及时有效地清除路面冰雪、避免交通事故的发生、延长道路的使用寿命,从而提高公路建设的投资效益一直是世界各国交通运输部门和道路工作者迫切希望解决的问题。

1.2 导电沥青混凝土及其功能

通过在普通沥青混凝土中掺入一定掺量的导电相材料可以赋予其良好的导电性能,使其成为导电沥青混凝土。导电沥青混凝土是一种功能型沥青混凝土,导电沥青混凝土电阻率的变化与其损伤程度之间的关系显著,因此,可根据其电阻率的变化实现对沥青混凝土裂纹和损伤的智能诊断,进而确定沥青混凝土路面的养护时机;导电沥青混凝土能够被电磁感应加热,能够利用感应加热诱使导电沥青混凝土裂纹自愈,从而避免沥青路面产生开裂、坑槽等病害;导电沥青混凝土在被施加电压后会产生电热效应,能够实现沥青路面融雪化冰;导电沥青混凝土具有较高的导热性能,可利用其导热性能实现高效率的沥青路面太阳能集热。开发并利用导电沥青混凝土的上述功能,不仅能够实现沥青路面损伤的智能诊断、裂纹自愈、融雪化冰和太阳能集热,而且能够减少沥青路面的高低温病害和缓解城市的热岛效应。

1.2.1 结构自诊断

导电沥青混凝土具有感知内部应力、应变和损伤的功能,通过分析其结构变化与电学性能变化的关系,可实现对导电沥青路面的结构健康监测、疲劳寿命预测和结构承载能力等问题进行自诊断。

如果在路面上采用自诊断沥青混凝土,可以根据其受载后输出电信号的变化规律来判断路面结构的变化,方法简单灵活,重复性高,灵敏度高,对于实时现场监控并保证沥青路面结构的正常运行具有很强的实用性。图 1-8 为采用结构自诊断沥青混凝土所提出的养护点与利用普通人工检测提出的养护点之间的寿命对比图。采用结构自诊断沥青混凝土进行养护点的确定具有如下优点:

(1) 可以在沥青路面性能指数的下降初期就提出养护,寻找最佳的养护时机,这可以大幅降低养护成本,大幅度地延长沥青路面的使用寿命。

(2) 沥青混凝土路面的健康状况评价主要依靠外部观察和专家评分,采用主客观相结合的办法来评价路面的使用性能,这造成管理水平和效率的低下、更重要的是它没有建立明确的

定量关系,无法发现内部应力水平的变化和早期损害。只有当外部出现明显缺陷时才开始考虑维修养护,通常沥青路面性能指数下降到75%~85%的时候才提出养护,即使恢复也只能停留在原有水平的75%~85%。与之相比,自诊断沥青混凝土在损伤的初期阶段就能发现并提出解决方案,可以使路面的性能指数恢复到原有水平甚至更高。

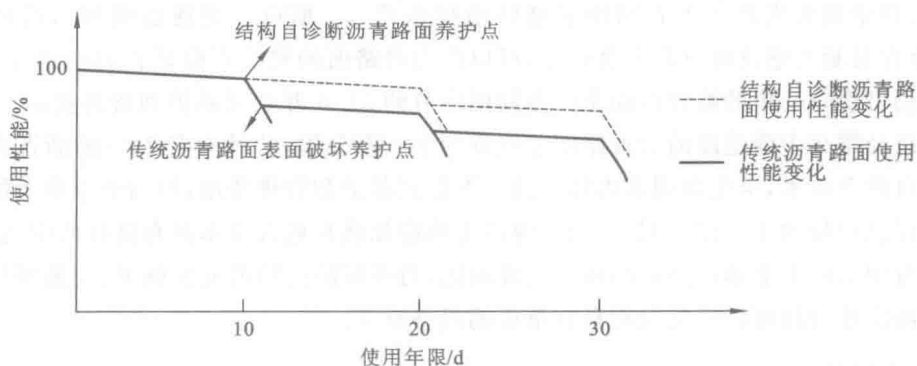


图 1-8 自诊断与普通检测提出的养护点之间的寿命对比图

因此,结构自诊断沥青混凝土在沥青路面的结构承载能力评估、结构健康监测、疲劳寿命预测和智能化管理等方面有着较为广泛的应用前景。

1.2.2 感应加热自愈合

导电沥青混凝土的另一个功能是感应加热自愈合(图 1-9),感应加热自愈合的原理是利用电磁感应加热升高沥青混凝土的温度,提高沥青流动和扩散的速率,促使沥青混凝土中的裂纹自动愈合。感应加热自愈合是作者与荷兰代尔夫特理工大学 Schlangen 教授共同研发的一项技术,利用感应加热自愈合可以有效修复沥青路面中的微裂纹,阻止其扩展成裂缝、坑槽等宏观病害。利用沥青混凝土感应加热自愈合性能,在沥青路面出现细微裂缝时就进行养护,已成为国内外近年来所倡导的先进沥青路面养护理念。

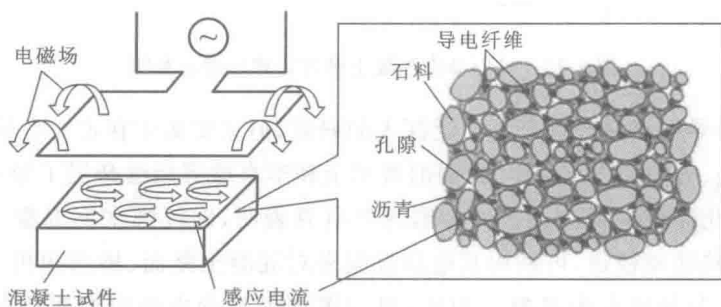


图 1-9 沥青混凝土感应加热自愈合示意图

作者研究发现:通过感应加热可使掺加钢纤维的多孔沥青混凝土的强度恢复到初始强度的80%;当裂纹再次出现时可继续利用感应加热进行修复,从而可使沥青混凝土的四点弯曲疲劳寿命延长两倍以上^[20]。Garcia 依据毛细管流动原理揭示了沥青在受热后的自愈合机制,并将感应加热自愈合法成功应用到密级配沥青混凝土^[21-22]。Menozzi 等通过实验证明,感应