

# 传导沥青混凝土

CHUANDAO LIQING HUNNINGTU  
XINGNENG YANJIU

# 性能研究

王虹◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

# 传导沥青混凝土性能研究

王虹◎著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

## 图书在版编目 (CIP) 数据

传导沥青混凝土性能研究/王虹著. —北京: 知识产权出版社, 2015. 9  
ISBN 978-7-5130-3213-1

I. ①传… II. ①王… III. ①沥青混凝土—性能—研究 IV. ①TU528.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 283402 号

## 内容提要

利用沥青混凝土自身的优势, 设计出传导沥青路面用于冬季路面融雪是目前国内外专家学者普遍研究的课题。本书通过室内外实验对传导沥青混凝土在太阳能集热及融雪化冰应用上进行关于道路交通安全、可持续发展和新型环保绿色建材等方面的探索性扩展研究; 对换热路面结构与材料组成、导热沥青混凝土性能和沥青路面集热与融雪化冰性能等方面进行了创新设计与研究。

预期本书的研究成果, 不仅对机场跑道、道路、桥面的夏季降温与冬季融雪化冰方法具有重要的现实意义, 亦为科学地开展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。

责任编辑: 江宜玲

责任校对: 董志英

封面设计: 智兴工作室·张国仓

责任出版: 刘译文

## 传导沥青混凝土性能研究

王虹◎著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

网 址: <http://www.ipph.cn>

社 址: 北京市海淀区马甸南村1号(邮编: 100088)

天猫旗舰店: <http://zscqcbbs.tmall.com>

责编电话: 010-82000860 转 8339

责编邮箱: [jiangyiling@cnipr.com](mailto:jiangyiling@cnipr.com)

发行电话: 010-82000860 转 8101/8102

发行传真: 010-82000893/82005070/82000270

印 刷: 北京科信印刷有限公司

经 销: 各大网上书店、新华书店及  
相关专业书店

开 本: 720mm×1000mm 1/16

印 张: 18.5

版 次: 2015年9月第1版

印 次: 2015年9月第1次印刷

字 数: 300千字

定 价: 68.00元

ISBN 978-7-5130-3213-1

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

# 序 言

黑色沥青路面具有很强的吸收太阳能的能力，利用沥青路面吸收太阳能成为一项新型的能源利用技术。此外，在低温冰雪天气中，亦可用夏季收集并储存的热量来给建筑物供暖和加热道路以融雪化冰，实现热量的跨季节应用。因此，该技术不仅可以大大缓解我国能源紧张的状况并提高道路交通的安全畅通程度，而且还可以有效降低路面温度和缓解城市热岛效应，减轻夏季高温天气中车辙、推移、泛油等病害。沥青道面换热器是实现太阳能集热和融雪过程的关键构造体，在实现并提高集热和融雪功能之前必须保证道路本身的功能和路用性能。本书从以下八个方面做了研究和分析及应用。

第一，本书提出了集热和融雪化冰沥青道路的结构形式，对集热和融雪用沥青路面建筑材料进行了设计和制备，包括用复合导热相填料制备传导沥青胶浆和传导沥青混凝土、利用页岩陶粒制备隔热层沥青混凝土等；同时，对沥青路面建筑材料的力学性能进行了系统试验和优化研究，评价导热相填料对沥青胶浆和沥青混凝土性能的影响，检验了页岩陶粒沥青混凝土的路用性能。

第二，基于传热学和气象学的基本原理，分析沥青路面太阳能集热及融雪的传热机理和热工过程，解析影响沥青路面集热和融雪的路面材料、结构特性和环境气候条件等基本概念，界定影响沥青混凝土路面换热的关键参数；对复合材料的各种导热模型进行归纳和总结，采用瞬态平板热源法精确测量沥青胶浆及沥青混凝土的热学参数，确定了传导沥青胶浆和沥青混凝土的导热机理；提出适合传导沥青胶浆和沥青混凝土导热系数的计算预估模型。

第三，在设定的冻融条件下进行多次冻融循环试验，研究传导沥青混凝土性能的变化规律，评价传导沥青混凝土耐水温耦合冲击的性能；模拟路面结构

制备了组合式车辙板,采用结构自诊断的方法评价温度的重复变化对混凝土性能及路面功能的影响;提出了适合传导沥青混凝土抗水温耦合冲击的检测方法和指标。

第四,参考相关标准并结合沥青混凝土制备和成型的实际情况对混凝土太阳能集热和融雪的室内试验装置进行设计;建立了一个沥青混凝土换热大板来模拟路面的融雪,利用低温流体加热沥青路面在冰雪天气中进行融雪研究,主要通过实验测量融雪率、基本特征点的温度变化、融化时间以及表面温度场等数据,讨论实际道路管道融雪化冰的热工特性和融化规律,对融雪过程进行性能评价。

第五,通过集热试验验证了试验装置和方法能模拟集热条件,同时进行沥青混凝土试块温度场测试;测试结果的精度满足室内可控条件下对沥青混凝土太阳能集热性能评价的要求。根据沥青路面所处的实际气候条件,借助实验装置模拟气候条件在室内对路面温度场进行测量;获得沥青路面温度的变化过程、温度的垂直分布、温度变化速率以及温度梯度等结果。在室内和大气环境中利用沥青混凝土换热板进行太阳能集热试验,测量集热器内部温度的变化过程;评价不同流量对降低路面温度的效果以及路面初始温度对路面升温过程的影响。

第六,利用有限元软件 ANSYS 对传导沥青路面融雪性能进行优化设计。传导沥青路面融雪化冰时间与沥青混凝土材料导热系数呈幂指数关系;埋管越深,提高沥青混凝土的导热系数对融雪化冰效果越明显。传导沥青路面中的换热管道可根据沥青铺装层的厚度分两种方式进行布置 [沥青混凝土导热系数 $\geq 3.0\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ]: ①埋管深度为 10cm 时,埋管间距为 0.1m; ②埋管深度为 4cm 时,埋管间距为 0.15m。

第七,通过对传导沥青路面在夏季炎热条件下温度场分布研究得出:沥青路面最高温度出现在路表以下 2cm 处。传导沥青混凝土材料的选择可使沥青路面最高温度降低 3.8% 以上。在换热管道内通入助冷剂(水)可有效降低道路表面及内部温度。对于导热系数为  $3.0\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  的传导沥青路面而言,夏季在换热管道内通入助冷剂(25℃水)可使道路表面温度降幅达 20% 以上。

第八,采用有限元软件 ABAQUS 对埋管型传导沥青路面在移动荷载作用下的黏弹性响应进行研究,得出了将沥青混合料黏弹性本构关系转换为 Prony

级数的方法。无论是埋有换热管道的传导沥青路面还是普通沥青路面，在行车荷载作用下最大拉应变均发生在铺装层下面层底部。换热管道可有效削弱中面层底部产生的最大拉应变。道路结构埋管与否以及埋何种换热管道对路面疲劳寿命影响不大，埋管型传导沥青路面可按普通沥青路面设计方法进行设计。

# 目 录

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 道路融雪化冰研究现状 .....	5
1.3 沥青路面太阳能集热研究现状 .....	14
1.4 传导沥青路面融雪化冰模型及试验研究现状 .....	21
1.5 传导沥青混凝土材料性能研究现状 .....	24
1.6 沥青路面温度场研究现状 .....	28
1.7 动载作用下沥青路面黏弹性响应研究现状 .....	32
1.8 存在的问题 .....	33
1.9 研究内容及技术路线 .....	34

## 第一篇 实 验

<b>第 2 章 集热及融雪化冰沥青路面材料的制备与路用性能</b> .....	41
2.1 原材料与组成设计 .....	41
2.2 传导沥青胶浆路用性能 .....	50
2.3 传导沥青混凝土路用性能 .....	69
2.4 隔热层材料路用性能检验 .....	76
2.5 小 结 .....	77

<b>第 3 章 集热及融雪化冰沥青路面传热机理和材料热物性</b> .....	79
3.1 集热及融雪化冰沥青路面传热机理分析 .....	80
3.2 路面材料热物性的测量 .....	100
3.3 传导沥青胶浆热物性 .....	107
3.4 传导沥青混凝土热物性 .....	116
3.5 隔热层材料热物性 .....	127
3.6 小 结 .....	128
<b>第 4 章 传导沥青混凝土抗水温冲击性能</b> .....	131
4.1 原材料和试验方法 .....	131
4.2 冻融对沥青混凝土体积性能的影响 .....	135
4.3 冻融对劈裂强度的影响 .....	140
4.4 温度冲击对传导沥青混凝土路面功能的影响 .....	145
4.5 小 结 .....	148
<b>第 5 章 沥青路面流体加热融雪化冰试验</b> .....	150
5.1 混凝土太阳能集热及融雪试验装置设计 .....	150
5.2 试验大板的制备与试验方法 .....	158
5.3 流体加热沥青路面融雪效果 .....	161
5.4 沥青路面换热器的维修与养护 .....	170
5.5 小 结 .....	172
<b>第 6 章 沥青路面太阳能集热试验</b> .....	173
6.1 导热相填料对沥青混凝土路面温度场的影响 .....	173
6.2 集热对沥青混凝土路面温度场的影响 .....	181
6.3 室内小板集热性能试验 .....	187
6.4 室外集热性能试验 .....	191
6.5 小 结 .....	195



## 第二篇 数值模拟

<b>第 7 章 传导沥青路面融雪化冰性能优化设计</b> .....	199
7.1 沥青路面热传导计算方法 .....	200
7.2 传导沥青路面融雪化冰模型的建立 .....	203
7.3 传导沥青路面换热管道的优化布置 .....	207
7.4 传导沥青路面融雪化冰性能预估 .....	213
7.5 小 结 .....	216
<b>第 8 章 传导沥青路面夏季温度场数值模拟</b> .....	217
8.1 传导沥青路面温度场模型的建立 .....	218
8.2 传导沥青路面夏季温度场数值模拟 .....	225
8.3 小 结 .....	231
<b>第 9 章 动载作用下传导沥青路面黏弹性响应分析</b> .....	233
9.1 理论基础 .....	234
9.2 传导沥青路面力学模型的建立 .....	237
9.3 移动荷载下传导沥青路面黏弹性响应分析 .....	253
9.4 小 结 .....	259
<b>第 10 章 结论与展望</b> .....	261
10.1 研究结论 .....	261
10.2 展 望 .....	267
<b>参考文献</b> .....	268
<b>后 记</b> .....	285

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景及意义

### 1.1.1 研究背景

能源是整个世界发展和经济增长最基本的资源保障，是人类生存和社会发展的物质基础。自工业革命以来，能源安全问题就开始出现。在全球经济高速发展的今天，能源安全已上升到国家战略高度，各国都制定了以能源供应安全为核心的能源政策。通过稳定能源供应，世界经济规模得以较快地扩张。但是，人类在享受能源带来的经济发展、科技进步等利益的同时，也遇到一系列无法避免的能源安全挑战，能源短缺、资源争夺以及过度使用能源造成的环境污染等问题威胁着人类的生存与发展。<sup>[1]</sup>

作为世界上最大的发展中国家，中国是一个能源生产和消费大国。我国资源总量虽然较大，但人均占有量少，人均能源资源可采储量只有世界人均水平的1/2。<sup>[2]</sup>目前，中国的能源生产量仅次于美国和俄罗斯，居世界第3位；能源消费占世界总消费量的10.4%，居世界第2位。<sup>[1]</sup>从能源消费结构来看，中国是一个以煤炭为主要能源的国家，在发展经济的同时也造成了环境的污染。因此，探索可再生能源的利用方法和提高现有能源的利用效率，是解决我国能源安全问题和突破制约经济社会可持续发展“瓶颈”的主要途径。

太阳能是一种可再生能源，受到许多国家的重视。我国的太阳能资源十分丰富，分布区域广阔，2/3的地区年辐射总量大于5 020MJ/m<sup>2</sup>，年日照射小时

数在 2 200h 以上,具有良好的太阳能利用条件。<sup>[2-3]</sup>太阳能利用方式主要有三种:光热转换、光电转换和光化学转换。目前我国太阳能的主要利用方式是太阳能热水系统,是一种光热利用形式;此外,光热还可以用于建筑物采暖、制冷、蒸馏、烹饪、温室、干燥以及工农业生产的其他领域。<sup>[1-4]</sup>

交通运输是经济社会发展的动力,是经济增长基础结构中一个重要的组成部分。公路与桥梁则是组成交通运输基础设施的重要部分,对整个交通运输的发展起着关键作用。根据国家统计局数据,截至 2010 年年底,全国高速公路通车总里程已超过 7.41 万千米,居世界第 2 位。<sup>[5]</sup>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,占现有公路路面的 90% 以上。<sup>[6-7]</sup>然而,沥青混凝土是一种典型的“温敏性”黏弹塑性材料,夏季在车辆荷载作用下易产生高温变形,冬季在低温环境下路面易产生温缩裂缝,尤其是在严寒季节路面的积雪和冰冻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。<sup>[8]</sup>图 1-1 显示了积雪造成的机场及道路交通难以正常运行的困境。<sup>[9-10]</sup>



(a) 机场积雪<sup>[5]</sup>



(b) 大雪中拥堵的高速公路<sup>[6]</sup>

图 1-1 冰雪对道路交通的影响<sup>[9-10]</sup>

据交通部门资料显示,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;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下全国发生的道路交通事故死亡人数同比上升了 13.3%。<sup>[11-12]</sup>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管理部门工作的重中之

重。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部门和道路研究工作者迫切希望解决的问题。

### 1.1.2 研究目的及意义

利用沥青路面吸收太阳能是一种新型的能源利用技术，它涉及道路能量的可持续发展、新型绿色能源的开发利用问题。沥青路面太阳能集热技术在能源开发利用中具有独特的优势，黑色的沥青路面具有很强的太阳能吸收能力，其吸收系数可达 0.9，在夏季高温时路面温度可达  $70^{\circ}\text{C}$ ；与传统的太阳能集热系统相比（如太阳能热水器的集热面板），沥青路面具有很大的集热面积。<sup>[13]</sup> 荷兰有关资料显示：每年每平方米的沥青路面可提供  $90 \sim 150\text{kW}\cdot\text{h}$  的能量，每  $30\text{m}^2$  沥青路面提供的能量可满足一座住房的热量需求（ $2\,700 \sim 4\,500\text{kW}\cdot\text{h}$ ）；此外路面收集的太阳能只有  $20\% \sim 30\%$  用于防止路面结冰，其余  $70\% \sim 80\%$  还可用作其他用途。如果能够将沥青路面收集的太阳能利用起来，可给建筑物供暖供冷，从而减少传统能源在建筑能耗中的使用，大大缓解我国能源紧张的局面并减少  $\text{CO}_2$  等废气的排放。因此，沥青路面太阳能集热技术的研究具有十分重要的理论意义和实用价值，该技术的原理如图 1-2 所示。路面将太阳能辐射的光能吸收并转换为热能，换热介质经管道将路面接收的热量输送至储热器储存或用于直接应用。在需要热量时，热泵从储热器中抽取热量为用户供暖或融雪化冰，从而实现太阳能的转换、储存和应用。<sup>[14]</sup>

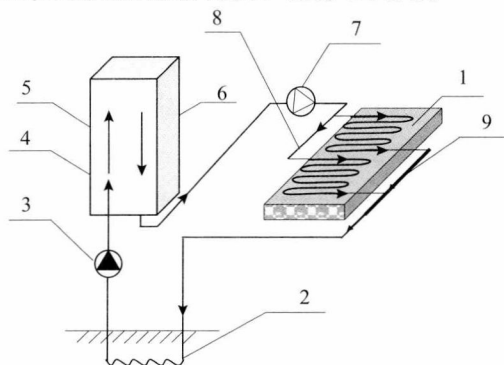


图 1-2 沥青路面太阳能集热/融雪技术原理<sup>[14]</sup>

1. 路面；2. 储热器；3. 土壤源热泵；4. 用户热交换器；5、6、8、9. 管道；7. 泵

夏季高温时,利用沥青混凝土道面收集太阳能;冬季低温天气时,将收集的热量通过管道输送至近旁的建筑物实施供暖,或用于路面融雪化冰。该技术可以:①有效防止路面积雪结冰,减少混凝土因低温导致的收缩裂缝,夏季给路面降温,避免因高温而导致的永久变形;②避免使用融雪盐,实现绿色环保;③避免沥青路面在极端温度中的剧烈变化,增加路面的稳定性和耐久性;④给建筑物供暖供(制)冷,减少传统一次能源在建筑能耗中的比重,有效缓解我国能源紧张的局面并减少CO<sub>2</sub>等温室气体的排放。因此,沥青混凝土路面太阳能集热及融雪化冰技术的研究和应用具有十分重要的理论意义和实用价值。<sup>[3]</sup>

利用黑色的沥青路面收集太阳能是一种新型的可再生能源利用技术,它关系到道路交通的可持续发展,可有效解决冬季道路、桥梁安全的融雪化冰应用问题。利用沥青路面进行太阳能集热和融雪化冰具有独特的优势,沥青路面具有很强的太阳能吸收能力(吸收系数可达0.9以上),在夏季高温时路面局部温度可达60~70℃<sup>[15]</sup>;与传统的太阳能热水集热系统相比,沥青混凝土路面有巨大的集热面积,并且可以在日落之后继续收集路面残留的热量,能有效缓解夏天城市热岛效应。<sup>[13,16]</sup>

作为一种新的太阳能收集和利用方式,在我国的自然及道路交通条件下,沥青路面太阳能集热及其融雪化冰应用技术能提供多少能量以及如何提高该技术在集热和融雪过程中的集/换热效率是首先要解决的问题。其次,沥青混合料是一种温度敏感性材料,使用路面本身进行集热、融雪化冰,需要在路面中安装换热装置;太阳能集热和融雪化冰两种功能的实现涉及路面降温、加热两种热工过程,是否对现存路面结构和使用性能产生影响都是需要探讨和研究的问题。利用沥青路面自身的集热优势,在路面中埋入换热管道用于冬季路面融雪是一种安全、有效、环保节能的融雪方法。普通沥青混凝土为低传导性材料,热传导率较低,夏季时普通沥青混凝土内部低温向外传递、冬季沥青混凝土内部高温向外放热融化路面冰雪的可能性较小,因此该方法顺利实施的前提就是:将普通沥青混凝土材料改为热传导率高的传导沥青混凝土材料。

本书依托国家自然科学基金“融雪化冰用多相复合导电沥青混凝土的制备和服役行为研究”及交通运输部西部交通科技建设项目“融雪化冰用导电沥青混凝土桥面铺装技术研究”,并基于专利“一种导热型沥青路面太阳能集

热系统及其应用”<sup>[14]</sup>、“导热型沥青混凝土屋顶太阳能蓄热系统”<sup>[17]</sup>和“混凝土太阳能集热及融雪化冰用试验装置”<sup>[18]</sup>，对传导沥青混凝土的材料性能和结构性能进行了以下研究。①通过室内外实验对传导沥青混凝土在太阳能集热及融雪化冰应用上进行道路交通安全、可持续发展和新型环保绿色建材等方面的探索性扩展研究；对换热路面结构与材料组成、传导沥青混凝土性能和沥青路面集热与融雪化冰性能等方面进行创新设计与研究。②运用有限单元法利用传热学基本原理分析沥青路面的热传导系数、换热管道的埋管深度及埋管间距等对传导沥青路面夏季降温、冬季融雪化冰的影响效果，确定出合理的埋管深度及埋管间距；对合理换热管道布置的传导沥青路面在移动荷载作用下的黏弹性响应进行分析，预估其设计疲劳寿命。

预期本书的研究成果，不仅对机场跑道、道路、桥面的夏季降温与冬季融雪化冰方法具有重要的现实意义，亦为科学地开展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。

## 1.2 道路融雪化冰研究现状

### 1.2.1 道路融雪化冰技术分类与简介

目前，常用的融雪化冰方法按照实施阶段不同可分为主动融雪法和被动融雪法两大类；按照采用技术类别可分为清除法和融化法，清除法主要包括人工法和机械法，融雪法主要有化学和物理两类。<sup>[19]</sup>广泛使用的除雪方法有多种，这些技术的优缺点如表1-1所示。<sup>[20-21]</sup>下面对几种主要的道路融雪化冰技术进行介绍。

表1-1 不同类型的融雪化冰方法及其特点

方法		优点	缺点	
清除法	人工清除法		除雪较彻底	效率低、影响交通、浪费人力
	机械清除法	机械设备铲雪	除雪面积大、速度较快	清除不彻底、影响交通、设备昂贵且闲置期长，经济效益差
		吹雪机除雪	除雪安全环保	适用范围小、费用高

续表

方法		优点	缺点
化学 融化法	氯化物融化法	材料来源广泛, 价格便宜	降低路面耐久性, 污染环境, 影响路面的抗滑性能
	环保融雪剂法	环保, 融雪较氯盐快	价格昂贵, 难以推广
	添加盐化物技术	较长时间内防积雪, 降低除雪难度	难以保证沥青路面本身的性能, 添加量有限
融化法  热融化法	地热管法	利用清洁能源, 绿色环保	融雪效率低, 初期投资大, 且耐久性较差
	红外线管加热	自动融雪, 易于控制	升温过于迟缓且受外部风向的影响大, 现已基本不用
	电热丝法	不需变压器等服务设施, 加热效果好	电热丝易被行车荷载破坏, 不易维修, 限制了其应用
	导电混凝土法	自动融雪, 绿色环保	安全性不好, 价格昂贵, 不易控制
	发热电缆加热	无污染, 热稳定性好, 控制方便	会增大城市对电的需求, 加重城市电力负担
	流体加热法	利用自然热水源或太阳能加热, 绿色环保	系统本身与安装价格昂贵, 换热管道易因渗漏而影响加热效果
抑制冻结铺装技术	橡胶颗粒填充	自应力有效抑制路面面积雪结冰, 路面性能得到改善, 低噪、环保	路面不易达到充分密实, 不能移除冰雪
	镶嵌类铺装	路面抗冰冻、抗滑	破坏路面原有状态, 填充物易脱落, 路面易出现松散、坑槽
	粗糙型铺装	一定抗冰冻、抗滑效果	路面空隙率大, 抗积雪结冰效果有限, 表面磨损后效果散失

### 1.2.1.1 撒布融雪剂和砂石材料

撒布融雪剂是目前比较常见的一种路面除雪化冰方法。融雪剂可以降低路面上冰雪的熔点, 达到除冰雪的目的。融雪剂主要有盐类和醇类, 通常适合路面积雪厚度较小、环境温度较高的地域。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。<sup>[22]</sup>例如, 1998年, 美国 60 万座钢筋混凝土桥中, 被列入修复计划的费用是 2 000 亿美元, 是当初建桥费用的 4 倍。<sup>[23]</sup>2003 年, 北京地区因为融雪剂的使用, 导致 3 万多

平方米的草地受害, 4 000 棵大树和 4 万株灌木死亡, 造成 1 500 多万元的直接经济损失。<sup>[24]</sup>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、氯化钙晶体和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, 国内外科研机构和生产单位都在积极开发环保、低腐蚀的融雪剂产品, 如生物降解型融雪剂等。<sup>[25]</sup>这种融雪剂对冰雪清除较彻底, 但费用较高, 一旦环境温度下降会出现反结冰现象, 适用于冰雪范围较小的路段。

撒布砂石材料法是在积雪路面上撒布砂石材料, 如较小粒径的石屑、煤渣以及砂盐混合物等, 以提高车辆的附着力, 从而提高车辆、行人的抗滑能力。冰雪中的砂石可以使冰雪冻结不均匀, 同时在车辆的反复荷载下冰雪层得不到压实, 达到抗滑的目的。该方法环保、成本低, 但清除冰雪效率低、冰雪天气过后影响交通通行及行车安全, 主要适用于小雪及重点难点路段的积雪, 是西部地区及其他经济相对落后地区常用的方法之一。

### 1.2.1.2 添加盐化物类技术

20 世纪七八十年代, 在欧美、加拿大和日本等 15 个国家, 在 300 多个城市的道路进行试验研究后, 瑞士最先成功地在路面材料中复合了一种氯化钙化学添加物——Verglimit 防冻剂。添加了该防冻剂的路面在冰雪低温天气中释放类似抗冻结盐物质, 可以有效降低路面冰点至  $-20^{\circ}\text{C}$ , 从而有效阻止和延缓路面的结冰。<sup>[26]</sup>日本从 20 世纪 70 年代末期开始引进该种路面形式, 并于 20 世纪 90 年代初成功推出代表性产品 Mafilon。<sup>[27]</sup>Mafilon 是一种包裹了氯化钠的融冰盐, 其特点是不同温度下效果不一样, 在低温冰冻天气中释放盐量高于在高温天气的释放量。

在沥青混凝土中添加盐化物(氯化物)已成为一种有效的路面抗冻结方式, 主要添加方式有以下 4 种。<sup>[28]</sup>

(1) 以粉体形式置换混凝土中的粉料, 添加量约为混凝土重的 7%。

(2) 以细集料形式表面裹覆沥青后替代混凝土中的细骨料, 添加量约 5%。

(3) 盐化物混合水泥固化成颗粒, 替换沥青混凝土中的粗、细集料, 添加量约 8%。



(4) 在开级配沥青混凝土空隙中填充抗冻液、盐化物等抗低温冻结的材料。

2008年,长安大学新型路面研究所在京沪高速公路蓝商段成功铺筑了5.1km的添加盐化物类抗冻结沥青混凝土路面,属添加粉体型。<sup>[29]</sup>添加盐化物技术的难点在于为了保证沥青路面原有的路用性能,添加的盐化物数量不能太大,并且经过冬夏交替在冰雪天气中渗出的盐化物稀少,因此实际融雪化冰的效果不是很明显,盐化物对沥青混凝土路面耐久性的影响还不明确。<sup>[29]</sup>

### 1.2.1.3 抑制冻结的路面铺装技术

抑制冻结的铺装类技术是在路面建筑材料中添加一定量的具有较强弹性变形能力的材料,从而改变路面与车辆轮胎的接触状态和路面的荷载应变,在行车荷载的作用下产生对冰雪的应力,使路面冰雪破碎或融化,从而有效抑制路面积雪与结冰。<sup>[28]</sup>

目前抑制冻结的铺装技术主要包括橡胶颗粒填充路面技术、镶嵌类铺装技术和粗糙型铺装技术三种。<sup>[30]</sup>橡胶颗粒填充的沥青混凝土是将废旧橡胶轮胎破碎成一定粒径和形状的颗粒,用以替代部分细集料的形式直接掺入沥青混合料中,然后用于沥青混凝土路面的摊铺。该技术最早于20世纪70年代由瑞典道路研究所提出。1979年至今,日本在北海道及本州的山区公路由于缺乏有效的融雪化冰技术,因此铺筑十几处掺橡胶颗粒的自抗冻结铺装技术路面。<sup>[30]</sup>国内哈尔滨工业大学谭忆秋近年来进行了相关的室内试验研究和实体工程的铺筑。<sup>[31]</sup>

镶嵌类铺装技术是在普通沥青混凝土路面摊铺完成后,将弹性材料通过一定的施工工艺和方法镶嵌在路表面,利用路表部分材料的弹性变形来降低冰雪对路面的黏附程度,此外再利用行车的外力来破碎冰雪的冻结。日本道路建设公司采用的方法是在刚完工的沥青混凝土路面上均匀铺撒直径2cm的三角形橡胶颗粒,然后趁路表温度较高时用压路机将橡胶颗粒压入沥青混凝土内或镶嵌在路面。1998年,在东京至长野的高速公路上采用了该技术并铺筑了试验段;试验段的研究结果表明,在沥青路面镶嵌橡胶颗粒可以有效地避免路面积雪冻结,从而提高路面抗滑能力。<sup>[30]</sup>镶嵌类铺装抑制冻结技术虽然有一定的效果,但是该技术在镶嵌橡胶块或颗粒过程中会破坏沥青路面原有的均质状态,镶嵌的橡胶块周围会出现黏附缺陷和薄弱面,在重复的行车荷载的冲击和车轮