

相变储热沥青路面材料 开发及降温机理

DEVELOPMENT AND COOLING MECHANISM OF
PHASE CHANGE HEAT STORAGE ASPHALT PAVEMENT MATERIALS

朱洪洲 何丽红 唐伯明 曹雪娟 著



科学出版社

相变储热沥青路面材料 开发及降温机理

朱洪洲 何丽红 著
唐伯明 曹雪娟

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统阐述了作者 2008~2018 年 10 年来关于相变储热沥青路面材料开发与应用方面的研究成果。本书主要介绍了相变储热材料与相变储热原理、沥青路面用相变储热材料的优选、PEG 改性沥青及其混合料的制备与性能研究、多孔基复合相变储热材料的制备与性能研究、冷拌相变沥青混合料的降温效果与路用性能评价、PEG/SiO₂ 复合定形相变材料的制备与性能测试、沥青-PEG/SiO₂ 共混物的技术性能与作用机理、复合相变储热沥青混合料的降温与路用性能研究、相变降温沥青混合料试验路的铺筑。

本书可供从事道路和机场等工程研究的科技工作者,以及高等院校相关专业的教师和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

相变储热沥青路面材料开发及降温机理/朱洪洲等著. —北京:科学出版社, 2018

ISBN 978-7-03-056976-9

I. ①相… II. ①朱… III. ①沥青路面-路面材料-开发-研究②沥青路面-路面材料-降温-研究 IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 051685 号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:王万红
责任印制:吕春珉 / 封面设计:东方人华平面设计部

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 14

字数: 266 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135120-2005

版权所有,侵权必究

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

前 言

沥青路面以其行车舒适、维修方便、噪声低等优点被广泛应用于高等级公路和城市道路。随着全球气候变暖,极端高温天气不断出现,在夏季炎热区域沥青路面内部温度可达 65°C 以上,车辙、拥包、推移等热稳性病害严重影响沥青路面的使用性能和寿命,同时高温沥青路面释放的有机挥发物和大量热量既污染环境,又加剧了城市热岛效应。

随着绿色交通和绿色发展理念的树立和贯彻,环境友好型路面技术引起了人们的广泛关注。作者所在课题组基于相变储热理论,从 2008 年开始进行相变降温储热沥青路面技术方面的研究,以期实现在高温气候条件下主动降低沥青路面温度,减轻热稳性病害;缓解城市热岛效应,改善人居环境。10 年来,课题组先后探索了 PEG 相变沥青结合料、石蜡/多孔基复合相变储热材料集料和 PEG/ SiO_2 复合定形相变材料等多种技术路径,研究将相变储热材料应用于沥青路面的材料学机理,最终开发出具有相变储热功能的沥青路面材料。

全书共分 10 章,第 1 章综述研究背景和国内外沥青路面降温技术研究现状;第 2 章介绍相变储热材料与相变储热原理,以及应用于沥青混合料中的相变储热降温机理分析;第 3 章结合沥青路面铺面工程技术和相变储热材料的结构性能特点筛选出适用于沥青路面用的相变储热材料;第 4 章介绍以 PEG 为功能单元的相变储热材料对沥青及沥青混合料储热性能的影响;第 5 章和第 6 章介绍石蜡/多孔基复合相变储热材料的制备及其在冷拌相变沥青混合料中的应用研究;第 7 章~第 9 章介绍 PEG/ SiO_2 复合定形相变材料的制备及其在沥青与沥青混合料中的应用研究;第 10 章介绍相变降温沥青混合料试验路的铺筑。

本书内容依托于国家自然科学基金面上项目(项目编号:51178491)、国家自然科学基金青年科学基金项目(项目编号:51508063)、重庆市重点科技攻关项目(项目编号:CSTC2011AB6067)、交通运输部基础研究项目(项目编号:2012319814200)的相关研究成果撰写而成,同时在研究过程中得到了广西交通投资集团有限公司等合作单位的大力支持,在此一并表示感谢。

全书汇聚了课题组近年来在相变储热降温沥青路面方向取得的研究成果,由朱洪洲、何丽红、唐伯明、曹雪娟执笔完成。本书涵盖了课题组指导的硕士研究生张一博、李菁若、李文虎、佟禹等的学位论文相关成果,撰写过程中硕士研究生王浩帮助编辑整理,衷心感谢相关人员的辛勤工作。另外,本书的出版得到了重庆交通大学交通土建工程材料国家地方联合工程实验室的资助,在此表示感谢。

相变储热降温沥青路面研究涉及道路工程学、材料学和环境学，国内外极少有相关成果可以参考，研究难度大。由于作者水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正，以便在后续研究中不断完善补充。

朱洪洲 何丽红

唐伯明 曹雪娟

2017年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 沥青路面的高温病害	3
1.2.1 热稳性病害	3
1.2.2 城市热岛效应	5
1.3 沥青路面的降温技术	6
1.3.1 沥青路面被动降温技术	6
1.3.2 沥青路面主动降温技术	9
1.4 相变储热降温沥青路面的研究现状	11
1.4.1 相变储能技术	11
1.4.2 相变储热沥青路面材料	12
参考文献	15
第 2 章 相变储热材料与相变储热原理	19
2.1 相变储热材料概述	19
2.1.1 无机相变储热材料	20
2.1.2 有机相变储热材料	21
2.1.3 复合相变储热材料	22
2.2 相变储热原理	25
2.3 相变储热沥青混合料的降温机理	27
参考文献	29
第 3 章 沥青路面用相变储热材料的优选	31
3.1 沥青路面用相变储热材料的选择原则	31
3.1.1 相变储热材料的选择依据	31
3.1.2 沥青路面用相变储热材料的技术要求	32
3.2 相变储热材料的筛选	34
3.2.1 相变温度与相变潜热	34
3.2.2 相变循环稳定性	35

3.2.3	热稳定性	37
3.2.4	化学兼容性	42
3.3	石蜡类相变储热材料	43
3.3.1	热性能	44
3.3.2	结构表征	45
3.4	PEG 相变储热材料	46
3.4.1	相变温度与相变焓	46
3.4.2	热稳定性	51
3.4.3	相变循环性能	54
3.4.4	导热性能	55
3.4.5	结晶性能	57
3.4.6	化学稳定性	58
3.5	PEG 二元共混体系	59
3.5.1	PEG 二元相变体系制备	59
3.5.2	步冷曲线分析	60
3.5.3	DSC 分析	63
3.6	本章小结	66
	参考文献	67
第 4 章	PEG 改性沥青及其混合料的制备与性能研究	68
4.1	PEG 改性沥青的制备	68
4.1.1	原材料及主要仪器	68
4.1.2	制备步骤	69
4.2	PEG 改性沥青的性能测试	69
4.2.1	基本性能	69
4.2.2	储热性能	73
4.2.3	降温效果	74
4.2.4	化学兼容性	75
4.3	PEG 改性沥青混合料的储热性能	76
4.3.1	原材料	76
4.3.2	试件成型	77
4.3.3	降温效果	77
4.3.4	高温稳定性	79
4.4	本章小结	80
	参考文献	81

第 5 章 多孔基复合相变储热材料的制备与性能研究	82
5.1 原材料	82
5.1.1 多孔基体	82
5.1.2 石蜡	85
5.2 多孔基复合相变储热材料的制备	86
5.2.1 石蜡/多孔火山岩复合相变储热材料的制备	86
5.2.2 石蜡/膨胀石墨复合相变储热材料的制备	87
5.2.3 石蜡/沸石复合相变储热材料的制备	89
5.3 多孔基复合相变储热材料的性能与结构表征	90
5.3.1 热性能	90
5.3.2 化学兼容性	94
5.3.3 结晶性能	96
5.3.4 表面形貌	98
5.4 本章小结	99
参考文献	99
第 6 章 冷拌相变沥青混合料的降温效果与路用性能评价	101
6.1 原材料	101
6.1.1 乳化沥青	101
6.1.2 集料	101
6.1.3 多孔相变储热颗粒	102
6.1.4 水	102
6.2 冷拌相变沥青混合料的级配设计	103
6.2.1 矿料级配设计	103
6.2.2 多孔相变储热颗粒的掺入方式	104
6.2.3 矿粉与水的最佳用量	105
6.2.4 乳化沥青的最佳用量	106
6.3 冷拌相变沥青混合料的成型工艺	107
6.4 冷拌相变沥青混合料的降温效果	108
6.5 冷拌相变沥青混合料的路用性能	110
6.5.1 力学性能	110
6.5.2 高温性能	112
6.5.3 低温性能	113
6.5.4 水稳定性	116

6.6 本章小结	118
第7章 PEG/SiO ₂ 复合定形相变材料的制备与性能测试	119
7.1 试验部分	119
7.1.1 原材料	119
7.1.2 主要仪器	120
7.1.3 PEG/SiO ₂ 复合定形相变材料的制备	120
7.1.4 性能测试与结构表征	122
7.2 PEG/SiO ₂ 复合定形相变材料的储热性能	123
7.2.1 胶凝方式的影响	123
7.2.2 PEG 相对分子质量的影响	126
7.2.3 PEG 质量分数的影响	128
7.3 PEG/SiO ₂ 复合定形相变材料的热稳定性	132
7.4 PEG/SiO ₂ 复合定形相变材料的相变循环性能	134
7.5 PEG/SiO ₂ 复合定形相变材料的导热性能	135
7.6 PEG/SiO ₂ 复合定形相变材料的形貌与结构特征	136
7.6.1 定形效果	136
7.6.2 结晶性能	138
7.6.3 化学兼容性	138
7.6.4 相变行为	139
7.6.5 表面形貌	140
7.7 本章小结	143
参考文献	144
第8章 沥青-PEG/SiO ₂ 共混物的技术性能与作用机理	145
8.1 沥青-PEG/SiO ₂ 共混物的制备	145
8.1.1 原材料	145
8.1.2 共混物制备	146
8.2 PEG/SiO ₂ 相变颗粒对沥青基本性能的影响	146
8.2.1 针入度	146
8.2.2 延度	150
8.2.3 软化点	151
8.3 沥青-PEG/SiO ₂ 共混物的流变性能	152
8.4 沥青-PEG/SiO ₂ 共混物的降温性能	153
8.5 沥青定形相变材料的制备与热性能	155

8.5.1 沥青定形相变材料的制备	155
8.5.2 储热性能	155
8.5.3 热稳定性	156
8.6 沥青定形相变材料的作用机理	157
8.6.1 FT-IR 分析	157
8.6.2 XRD 分析	158
8.7 本章小结	159
参考文献	159
第 9 章 复合相变储热沥青混合料的降温与路用性能研究	160
9.1 试验原材料	160
9.1.1 沥青	160
9.1.2 集料	161
9.2 复合相变储热沥青混合料的组成设计	163
9.2.1 矿料级配与油石比	163
9.2.2 PEG/SiO ₂ 相变颗粒掺入方式	166
9.2.3 最佳油石比	169
9.3 复合相变储热沥青混合料的热物性	173
9.3.1 导热系数	174
9.3.2 比热容	176
9.4 复合相变储热沥青混合料的降温性能	180
9.4.1 评价方法	180
9.4.2 理论降温幅度	185
9.4.3 室外降温效果	186
9.4.4 室内降温效果	188
9.5 复合相变储热沥青混合料的高温稳定性	192
9.5.1 马歇尔试验	193
9.5.2 车辙试验	193
9.5.3 等效车辙试验	195
9.6 复合相变储热沥青混合料的低温性能	196
9.7 复合相变储热沥青混合料的水稳定性	197
9.7.1 浸水马歇尔试验	198
9.7.2 冻融劈裂试验	198
9.8 本章小结	199
参考文献	200

第 10 章	相变降温沥青混合料试验路的铺筑	201
10.1	PEG/SiO ₂ 相变颗粒制备及储热性能	201
10.2	复合相变储热沥青混合料配合比设计	205
10.3	相变降温沥青混合料试验路摊铺	207
10.4	本章小结	210

第1章 绪 论

1.1 引 言

“十二五”与“十三五”规划期间是我国公路建设的快速发展时期，据《2016年交通运输行业发展统计公报》，2016年底全国公路总里程达469.6万km，居世界第一位；公路密度48.9km/(100km²)，较2015年提高了1.2km/(100km²)，如图1.1所示^[1]。2015年末，国家干线公路网、高速公路网已基本形成，农村交通条件也发生了根本性改变，逐步建成了较为完善的公路交通运输系统。其中，沥青路面以其施工维修方便、行车舒适性好、延长轮胎使用寿命、噪声低等多种优点被广泛应用于公路工程建设中。据统计，美国约200万mile(1mile=1609.344m)路面为沥青路面，占美国公路总里程的96%。与发达国家相比，我国沥青路面占公路总里程比例偏低，但随着我国公路事业的迅速发展，沥青路面已成为我国铺装道路中最主要的路面形式，目前在建、重建或大中修的高速公路中90%以上采用了沥青路面^[2]。

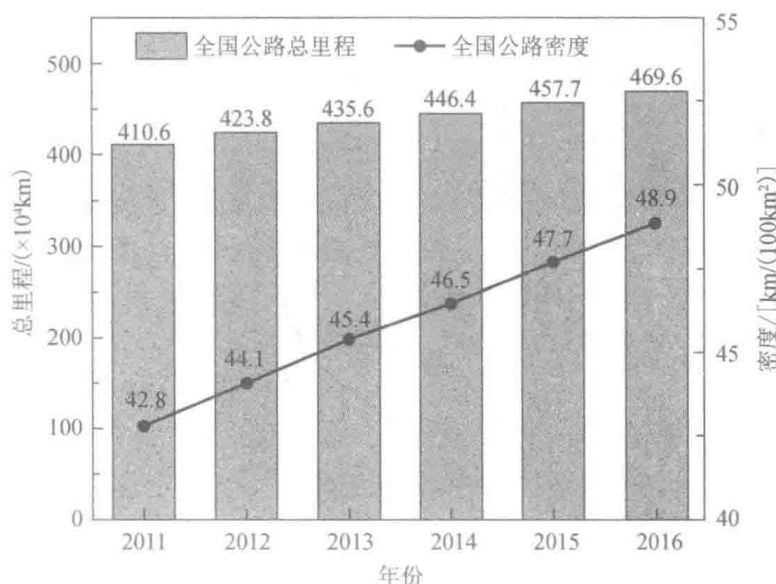


图 1.1 我国 2011~2016 年公路总里程及公路密度发展趋势图

沥青是一种温度敏感性的黏弹性材料,在路面工程广泛应用的同时也面临着由温度带来的负面影响^[3]。特别是随着全球气候变暖,在我国夏季炎热地区,气温往往超过 35℃,甚至达到 40℃以上,而沥青是一种黑色的吸热材料,对太阳热辐射的吸收率高达 85%~95%。在太阳的持续热辐射作用下,大量热量被沥青路面吸收并蓄积在沥青面层中,导致沥青路面温度极易超过它的使用温度范围,往往高达 60℃以上,远远超过道路石油沥青的软化点,使沥青路面的高温稳定性受到严峻的考验,极易产生车辙、拥包、推挤等热稳性病害,严重影响沥青路面的路用性能及服务质量^[4];同时,高温的沥青路面还会释放出大量的沥青挥发物,污染环境,且蓄积了大量热量的沥青路面不断释放热量导致周围气温升高,加剧了城市热岛效应^[5]。为了减轻沥青路面与高温相关病害的产生与发展,国内外主要从提高沥青结合料与混合料的温度稳定性方面开展重点研究,提出了沥青改性、添加纤维、优化矿料级配等技术措施,被动应对沥青路面使用过程中面临的环境气温变化,解决了一些具体工程技术问题,但沥青路面与高温相关的病害仍很严重^[6]。因此,如能采取某种措施主动应对环境气温变化,研发自调温沥青混合料,则可有效地减轻沥青路面与高温相关的病害。

相变储能技术是一种能够将能量以相变潜热的形式高密度储存的高新技术,可解决能量供求在时间和空间上不匹配的矛盾,在太阳能利用、电力的“削峰填谷”、工业废热和余热的回收利用、民用电子产品及建筑节能等领域具有良好的应用前景^[7]。实现储能技术的核心和基础是相变储热材料,简称相变材料(phase change materials, PCM),它是指在一定温度范围内,即相变温度范围内改变其相态以潜热的形式吸收、储存或释放大热量而本身温度保持不变的材料,这类材料具有热能储存和温度调节控制的特性,在许多领域具有应用价值^[8]。近年来科研工作者们利用相变材料的相变特性,将其应用于沥青混合料中制备具有相变储热功能的沥青路面材料,主动调节沥青路面温度。具有相变储热功能,在高温季节可有效缩短路面的高温作用时间,降低沥青路面温度,主动减轻路面高温病害;延长道路使用寿命,减少道路的维修费用,提高交通安全;同时还可减少高温路面向环境散发的有害物质和大量热量,从而改善人居环境,缓解城市热岛效应,节约能源。

本书针对沥青路面受高温气候条件的负面影响,基于相变储热理论,探索将相变储热材料应用于沥青路面的材料学机理,采用复合技术研制出适用于沥青路面的复合相变储热材料,将其应用于沥青混合料中,形成具有相变储热功能的沥青路面材料,以实现在高温气候条件下主动降低沥青路面温度,减轻热稳性病害;缓解城市热岛效应,改善人居环境;并为相变储热材料在沥青路面工程中的实践应用提供研究基础与技术服务。

1.2 沥青路面的高温病害

沥青混合料是一种典型的黏弹性材料,其物理力学性能与温度和荷载密切相关。特别是在全球气候变暖、气候异常、交通荷载日益重型化、交通量大幅度增长、超载车辆急剧增加等现状条件下,沥青路面在广泛应用的同时也面临着严峻的考验。在保证额定荷载的情况下,温度已然成为沥青路面使用性能的主要制约因素,尤其是在炎热的夏季,高温沥青路面常常引发以下两大问题。

1.2.1 热稳性病害

沥青混合料是一种温度敏感性的复合材料,是典型的弹、黏、塑性综合体,在低温小变形范围内接近线弹性体,在高温大变形范围内为黏塑性体,而在通常温度的过渡范围内则为黏弹性体^[5]。在气候炎热地区,持续高温作用下,沥青路面蓄积大量热量,易产生车辙、拥包、推挤、泛油、搓板等热稳性病害,如图 1.2 和图 1.3 所示。

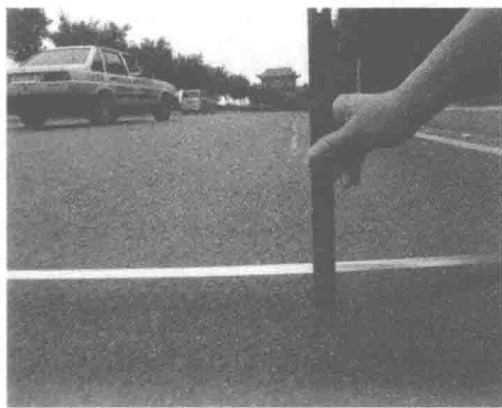


图 1.2 沥青路面高温车辙破坏

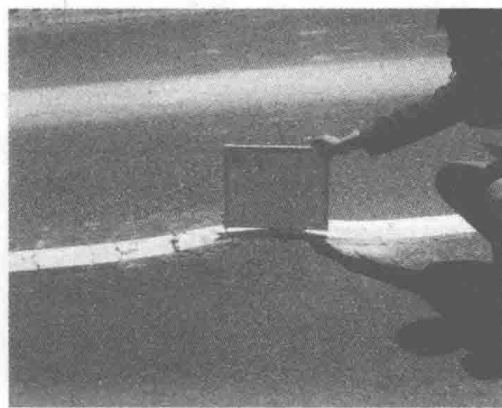


图 1.3 热稳性不足引起的拥包开裂

在沥青路面的热稳性病害中,车辙是高温季节沥青路面最严重的破坏形式。车辙是指在高温渠化交通条件及行车荷载的反复作用下,沥青路面各结构层所产生的不可恢复应变的累积变形及行车荷载作用下的压密变形,是沥青路面最普遍的一种损坏形式。周岚等^[9]应用有限元分析环境温度与车辙的关系,发现沥青路面车辙随着月份的变化呈现出十分明显的规律。车辙发展较快的月份集中在 5~10 月,处于春夏交替、夏季及夏秋交替时段,环境平均温度较高,太阳辐射较强,导致沥青路面温度偏高,在荷载反复作用下沥青层产生塑性流动,发生竖向永久变形。这是因为随着环境温度升高,沥青的黏度呈对数级下降,表现出更多的黏性特性,更加容易出现塑性流动变形,沥青混合料的抗压强度和抗剪强度快速下

降。黄晓明等^[10]研究了环境温度对动稳定性和总变形量的影响规律,结果表明环境温度是影响沥青混合料高温稳定性的主要外部因素,随着环境温度的升高,沥青混合料的高温稳定性明显降低,当环境温度在沥青软化点附近($\pm 3^{\circ}\text{C}$)时,沥青混合料的动稳定性迅速下降,变形量急剧增加。

车辙的形成对路面结构和交通行车均造成不良的后果,结构的整体强度下降易诱发其他病害;雨天车辙内积水导致车辆出现漂滑,影响高速行驶的安全性;冬季车辙槽内聚冰,降低路面的抗滑能力,行车产生冰滑现象;车辆在超车或变换车道时方向失控,影响车辆的操纵稳定性,严重影响着沥青路面的路用性能和交通安全^[11]。

此外,沥青路面在使用过程中,太阳辐射、气温和汽车尾气都会促使路面温度不同程度提高。当路面结构层温度均匀变化时,会产生胀缩变形,若受其他结构层约束则产生胀缩应力;当结构层内出现温度梯度时,会产生翘曲变形,若受其他结构层约束则产生翘曲应力。因此,沥青路面除了要承受行车荷载外还要承受温度荷载,有时温度应力对沥青路面结构的负面影响比荷载应力更大^[5],温度应力产生的破坏如图 1.4 所示。温度升高时路面结构出现压应力,降低时路面结构则表现出拉应力,路表面附近的温度应力最大,且随着深度的增加,温度应力逐渐减小,材料特性随温度的变化对温度应力计算结果有显著影响^[12]。所以,如果能够缓和温度变化,一方面可以减小路面结构内的温度梯度,另一方面可以减轻材料特性随温度变化带来的负面影响。



图 1.4 温度应力产生的破坏

沥青路面由高温引发的温度病害大大缩短了路面的使用寿命,降低了服务质量,许多道路建成通车后尚未达到设计使用寿命,便提前进入大修,造成巨大经济损失。因此,由高温引发的沥青路面温度病害问题亟待解决,这对提高道路服务水平,延长路面使用寿命具有重要意义。

1.2.2 城市热岛效应

城市热岛效应 (urban heat island effect) 是由于城市人口稠密、建筑密集、植被稀少、工业集中及人的活动, 热量在城区空间范围内聚集, 在近地面温度图上, 城市中的气温明显高于外围郊区的现象, 如图 1.5 所示。

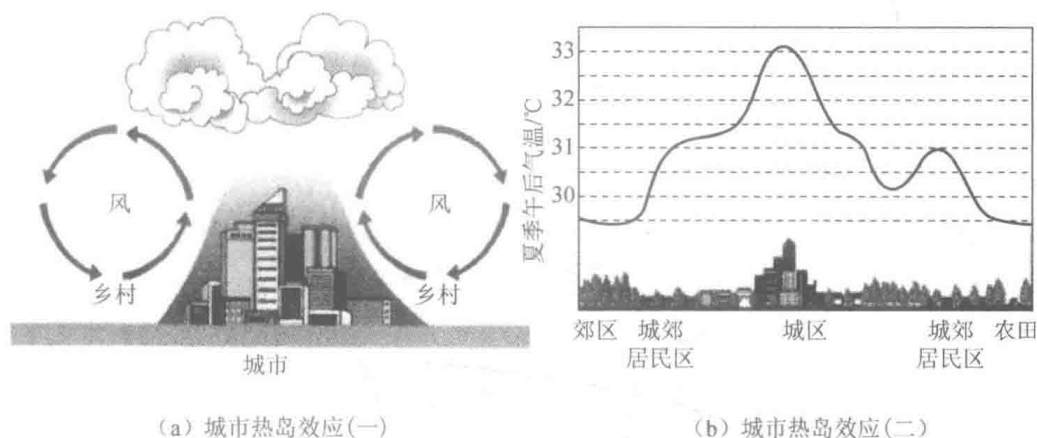


图 1.5 城市热岛效应示意图

城市热岛效应的形成是城市下垫面性质的改变、人工热源、大气污染物、城市布局不合理和局部天气气候条件共同作用的结果, 由其引起的温度差称为热岛强度。城市热岛效应使城区年平均气温比郊区高出 1°C 左右, 在炎热夏季, 城区密集高大的建筑物阻碍气流通行, 城区风速减小, 城市局部地区的气温有时甚至比郊区高出 6°C 以上。较高的热岛强度对路面力学性能也会产生影响, 尤其是在夏季高温时段内对沥青路面的抗变形能力影响较大, 导致市区的路面比郊区的路面更容易出现破坏。城市热岛效应使城区与郊区形成了一个昼夜相同的热力环流, 加剧了城市污染, 降低了人居环境质量, 同时加大了城市能耗及地表大气的热扩散, 影响人们身体健康。随着城市化的快速发展, 城市道路网络越来越密集, 在高温季节, 黑色的沥青路面吸收大量的热量并不断释放, 导致周围环境温度升高, 加剧热岛强度; 同时高温的沥青路面还释放出大量的沥青挥发物, 污染环境, 恶化人居环境^[13]。

综上所述, 环境高温不仅对沥青路面本身产生病害, 而且加剧了城市热岛效应, 污染环境, 加大民用能耗量。如能采取某种技术措施降低路面温度, 则可有效地减轻沥青路面带来的负面影响。

1.3 沥青路面的降温技术

沥青路面由高温引发的热稳性病害与城市热岛效应,究其根源在于高温气候环境下,沥青路面蓄积大量的热量促使沥青路面温度急剧升高,因此,如何降低沥青路面温度才是从根本上解决或减轻上述温度病害的关键所在。道路工作者们相继对沥青路面降温技术展开研究,目前研究的主要方法根据沥青路面降温形式可分为被动降温技术和主动降温技术两类^[14]。

1.3.1 沥青路面被动降温技术

1. 洒水降温

最为传统的方法就是在高温时段给路面洒水降温,即利用水分蒸发由液态变为水蒸气的过程吸收大量热量,从而被动降低路面温度。陈继松^[15]在浙江某高速公路进行定时洒水养护和不洒水的日常养护对比试验,结果发现,洒水后路面结构层上面层温度约降低 5℃,其他结构层约有 3℃的降幅,因此提出当环境温度高于 34℃时,每 30min 洒水 1 次,可有效降低沥青路面温度,定期洒水养护是延缓沥青路面变形类病害产生与发展的有效措施。但目前沥青路面面层结构多采用 AC 型或 SMA 型级配沥青混合料,因设计空隙率小,上面层几乎不透水,洒水仅能降低和车辆轮胎直接接触的上面层,且降温效果不明显^[16]。研究发现,洒水降温效果与路面空隙率密切相关,不同路面结构水的渗透性不一样,所需洒水量和降温持续时间也不同。因此由间断级配构成的高空隙沥青混凝土路面应运而生,如排水沥青路面和保水沥青路面。

2. 排水降温

排水沥青路面又称透水沥青路面,是基于公路排水系统发展起来的一种多孔隙沥青磨耗层,其主要特征是空隙率高,一般在 20%左右,该路面能将路表的水通过空隙及时排除,从而消除对行车不利作用的路表水膜,显著提高雨天行车的安全性和舒适性;同时,排水沥青路面的多孔特征可以吸收交通噪声,具有良好的降噪效果^[17]。除此之外,排水沥青路面因空隙率高达 20%,与环境接触面积大,在沥青上面层被地面风带走热量的同时,也会带走部分中下面层蓄积的热量;另外,如高温时段降雨或洒水,水分更易渗透到中下面层,中下面层蓄积的热量将水分蒸发可消耗大量的热量,从而降低沥青路面温度。

美国自 20 世纪 50 年代就开始使用空隙率达 15%左右的开级配抗滑磨耗层