

隧道口路面与桥面沥青混合料 凝冰防治技术研究



SUIDAOKOU LUMIAN
YU QIAOMIAN LIQING HUNHE LIAO
NINGBING FANGZHI JISHU YANJIU

张贤康 严世祥 朱宝林 著



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

隧道口路面与桥面沥青混合料 凝冰防治技术研究

张贤康 严世祥 朱宝林 著



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

内 容 提 要

本书介绍了高速公路凝冰灾害形成的气候及环境特点,提出了高速公路路面凝冰环境条件标准和凝冰危险等级评定标准;并建立了高速公路早期凝冰预警系统管理平台,实现智能化自动处置技术;同时为了最大限度减少环境影响,通过向混合料和沥青中添加抗凝冰改性剂,将沥青路面提前预设成能够融冰化雪的自主抗凝冰路面。在依托实体工程验证基础上,力求为广大读者呈上一本全面、系统地介绍凝冰智控系统以及抗凝冰沥青混合料技术体系的著作,为长大纵坡和超高急弯等事故黑点路段的冬季道路安全性提升提供解决方案。

本书不仅可作为智慧交通初级读物,也可作为交通运输行业冬季养护先进技术的典型案例参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

隧道口路面与桥面沥青混合料凝冰防治技术研究 /
张贤康, 严世祥, 朱宝林著. — 北京: 人民交通出版社
股份有限公司, 2017. 11

ISBN 978-7-114-14344-1

I. ①隧… II. ①张… ②严… ③朱… III. ①高速公路—
沥青路面—防冻—研究 IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 289001 号

Suidaokou Lumian yu Qiaomian Liqing Hunheliao Ningbing Fangzhi Jishu Yanjiu
书 名: 隧道口路面与桥面沥青混合料凝冰防治技术研究

著 者: 张贤康 严世祥 朱宝林

责任编辑: 牛家鸣 潘艳霞

责任校对: 赵媛媛

责任印制: 张 凯

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: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 9.25

字 数: 155 千

版 次: 2018 年 12 月 第 1 版

印 次: 2018 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14344-1

定 价: 70.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

本书编委会

主 任：张贤康 严世祥 朱宝林

委 员：彭余华 江睿南 周 彬 魏道新 陈 景

柴 智 李 霖 惠 嘉 程 寅 王 瞳

雷谦荣 刘和开 沈 冰 徐建国 赵小洁

李 宁 曹艳华 陈 钰 何春伟 刘家顺

张海太 白从启

序

PREFACE

冬季行车安全这一话题与我们的生活息息相关,随着经济发展,也逐渐被大众所关注。当我们在日常生活中不断地为不良气候所带来的交通灾害买单时,是否想过,能够提高安全的是好管理、好应急,还是好科技?(提高冬季行车安全,代表着养护部门管理能力的提升、国家对于突发状况应急预案的重视等等,但最核心的灵魂是科技)。研究人员不仅研发产品,也肩负着保护人民群众生命和财产安全的使命。

本书客观、完整、全面地论证了智控新设备、新材料在冬季通行车安全中的应用。它是一部科研人员对抗路面凝冰积雪的教科书,反映了从理论到实践的严谨科研态度;它是一部冬季道路安全防治措施的工具书,介绍了自动化技术以及主动防治冰雪灾害技术;它更是一部我国科研人员自主创新发展新技术的参考书。

展望未来,我们面临崭新的机遇和广阔的空间,我们要用科学、务实的态度谋划我国科学技术创新发展,为实现中华复兴的伟大中国梦贡献我们科研人员的聪明才智。

刘学勤

前 言

—FOREWORD—

路面凝冰灾害不同于积雪灾害,水雪相容凝聚路表面形成润湿的状态,其摩擦力远远低于积雪路面。随着现代化公路运输体系提出的快速、高效和安全理念,在凝冰条件下的道路行车安全越来越受到交通管理者的广泛关注。

本书是在作者多年来主持参与交通运输部西部交通建设科技项目、全国各省市自治区交通科技项目经验总结的基础上编写的。本书在撰写内容上力求实用,并尽量做到理论和实践相结合;在内容编排上,尽量做到由浅入深。本书介绍了凝冰预警系统工作原理及研发过程,通过预警能够提前感知路面凝冰发展情况,并采取自动化处置措施对路面凝冰进行主动式处置。

本书的内容可以分为两个部分:第一部分主要由交通运输部科学研究院的江睿南、曹艳华以及云南省公路科学研究院张贤康、严世祥编写,讲述预警及自动化处置系统的研发过程及工作原理等理论知识;第二部分主要由交通运输部科学研究院的朱宝林和长安大学的彭余华教授共同编写,讲述如何利用前一部分理论知识实现应用系统的设计。

第1章~第3章首先揭示了凝冰形成机理与环境条件,并以此为依据指导第7章,具有我国自主知识产权的主动式凝冰预警传感器的研发,实现了路面凝冰的提前感知。

第4章~第6章讲述了智控系统碳纤维发热体系的发热原理、布设参数以及力学场变化情况,并最终指导实体工程应用。第8章~第12章阐述了抗凝冰沥青混合料技术的实现过程。首先是添加剂的研发,通过配合比设计对比路用性能,最终确定添加剂最佳掺量,并实现实体工程应用。

本书在编写过程中得到了云南省公路科学技术研究院科研人员的支持和帮助,在这里向他们表示衷心的感谢。在本书的编写过程中,作者参考了许多专家和学者的著作和研究成果,在这里也向他们表示衷心的感谢。

由于本书是通过一系列具有明确目的的设计任务组织撰写的,在所涉及内容的完整性方面可能有所欠缺,加之作者的水平有限,书中的错误与不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2018年3月

目 录

CONTENTS

1 概述	1
1.1 路面凝冰的不利影响	1
1.2 国内外研究现状	2
2 高速公路凝冰危险性等级评价研究	5
2.1 凝冰危险性因素构成分析	5
2.2 凝冰危险性等级评价划分	10
3 路面凝冰形成机理	14
3.1 路面凝冰的物理特征研究	14
3.2 凝冰环境条件	15
4 碳纤维发热线特性及内置于路(桥)面结构的碳纤维材料选型	21
4.1 碳纤维发热线特性	21
4.2 碳纤维发热线相关技术指标	21
5 路(桥)面结构融冰化雪效能室内研究	27
5.1 发热线部位确定及发热线布置方法	27
5.2 碳纤维发热线电热性能试验研究	36
6 内置发热线的桥面结构融冰化雪效能有限元分析与影响参数 敏感性分析	46
6.1 问题的提出	46
6.2 系统热传递分析	47
6.3 融冰化雪模型的建立	47
6.4 不同情况模拟结果	54

6.5	桥面融冰化雪影响因素研究	54
7	沥青路面凝冰信息采集与预警技术	67
7.1	路面凝冰状况传感器	68
7.2	智能路面凝冰状况传感器设计原则	70
7.3	智能路面凝冰状况传感器工作流程	70
7.4	智能路面凝冰状况传感器性能测试	71
8	内置碳纤维融冰路面融冰技术工程应用实例	73
8.1	工程简介	73
8.2	应用方案分析	74
8.3	应用路段选取	75
8.4	麻昭高速公路融冰系统线铺装设计	76
8.5	麻昭高速公路融冰系统电气控制设计	81
8.6	融冰路面施工方案	83
8.7	凝冰预警系统实体工程	85
8.8	冬季运营路(桥)面融冰方案实施与实时效果分析	88
8.9	麻昭高速公路碳纤维融冰系统造价分析	95
9	抗凝冰改性剂研发	98
9.1	基本组成及机理分析	98
9.2	盐化物的组合优选	98
9.3	缓释剂的选型	100
9.4	抗腐蚀剂的应用	107
9.5	抗凝冰改性剂生产工艺	108
10	沥青混合料的抗凝冰效果分析	111
10.1	抗凝冰改性剂掺量确定	111
10.2	抗凝冰改性剂的耐久性评估	113
11	抗凝冰沥青混合料配合比设计	117
11.1	抗凝冰改性剂与沥青的相容性分析	117
11.2	抗凝冰沥青混合料的级配设计	117
11.3	抗凝冰沥青混合料路用性能检验	119

12 抗凝冰沥青混合料工程应用实例 ·····	122
12.1 应用工程简介·····	122
12.2 抗凝冰沥青混合料施工工艺与质量检测·····	123
12.3 试验路抗凝冰效果分析·····	126
13 技术成果及未来展望 ·····	130
13.1 技术成果·····	130
13.2 未来展望·····	131
参考文献 ·····	132

1 概述

1.1 路面凝冰的不利影响

在冬季,我国大部分地区道路会因降雪、冻雨等天气现象而结冰,给道路畅通和行车安全带来了严重的影响。一方面,由于冰、雪的存在,路面的摩擦系数减小,附着能力降低,减小了车辆轮胎与路面之间的摩擦力,使车辆制动、行驶困难,汽车出现打滑、制动距离延长,甚至制动失灵、方向失控,极易造成严重的交通事故。根据国外的相关研究,行驶在冰雪道路上的车辆导致交通事故的概率是正常天气条件下的2倍,且70%的事故可能引致伤亡。另一方面,当路面出现冰雪时,交通运输部门为了保障安全,通常会对高速公路进行封闭,致使交通堵塞,降低了道路运营效益,严重影响了国民经济的发展和人民的正常生活。高速公路是交通运输的命脉,而交通运输又直接影响国民经济的发展。严重的路面积雪将造成高速公路封闭及交通瘫痪,给客货运输带来不便,造成的直接以及间接经济损失更是无法估量,因而,道路融冰化雪是交通运输部门亟待解决的问题。

因此,为了保障道路畅通和行车安全,提高道路运营效益,必须采取措施清除路面冰雪,这是我国北方寒冷地区冬季道路养护的一项重要工作。如何采取有效措施使公路冰雪天不封路或少封路,避免交通事故或少出交通事故,形成良好的安全管理模式,已成为交通管理部门的重要工作之一。

昭通市位于云南省东北部,地处四川盆地向云贵高原抬升的过渡地带,与贵州、四川两省接壤。其地势南高北低,群山起伏,全市山地面积占72.2%。由于群山林立以及较大的海拔差异,昭通市具有高原季风立体气候特征。全年最低气温出现在1月,月平均气温在1~12℃之间,且降水丰富,冻雨及路面凝冰时有发生。

目前,广泛采用的融冰化雪方法是人工或机械设备除雪以及融雪剂除雪,但

这些被动的对于道路路面及环境的破坏比较严重,效率低、成本高,增加了路面的维护费用,带来了严重的经济损失,因此寻求一种快速、高效、经济、环保的融冰化雪方法,具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 发热线加热技术

发热线以电力为能源,利用金属丝或合金电阻丝进行通电发热,来达到加热或者保温的效果。发热线芯由冷线、热线组成,外面由绝缘层、接地、屏蔽层和外护套组成。发热线具有热效率高、节能、设计简单、安装方便、无污染、使用寿命长、能实现遥控和自动控制等优点。

发热线加热系统最早主要应用于民用建筑、室外设施等方面,后期逐步开始被交通系统借用,通过设置的电源系统给发热线通电加热,经过上部结构层将热量传至路面或桥面表面,当表面冰雪吸收热量达到一定温度后,冰雪即开始融化,实现电能与热能的转换,达到融冰化雪的目的。其优点是对周围环境、植物没有危害,不会对基础设施和路面、桥面结构造成严重损坏,操作方便,适用范围广,运行费用低且融雪效果好。

1961年, Henderson 等^[10]在 New Jersey (USA) 的 Newark 一座沥青混凝土桥面上安装了一套发热线加热装置,该装置融化 25mm/hour 的雪所需的功率,桥面及路面分别为 $378\text{W}/\text{m}^2$ 和 $430\text{W}/\text{m}^2$,但由于车辆对桥面板的作用使发热线被拔出,所以实验并不成功。1964年该电热装置又被安装在 Teterboro, New Jersey 的两个斜坡和一座桥面板上,这一系统运行令人满意,能量消耗平均为 $323\text{W}/\text{m}^2$ 、 $430\text{W}/\text{m}^2$,年运行费用平均为 5 美元/ m^2 。1970年在 Omaha, Nebr. 的一座混凝土桥面板上安装了发热线发热装置,系统由温度传感器返回的信号来控制,然而这个自动控制系统有时并不可靠,需要人工操作。随着科技逐步发展,2005年美国俄勒冈州距 La Grande 以南 11 英里^①的路面和桥面将发热线沿车道纵向埋置于事先开槽的沥青混凝土路面上,埋设深度为 44.5mm,间距 229mm,沟槽用密封剂填充,桥面 76.2mm 深度处布置热电偶监测温度。当环境温度低与 -0.28℃ 时,系统开启。该系统冬季月平均耗电费用为 5000 美元,峰值耗电费用为 9000 美元/月。2005年及 2006年冬季系统运行良好,路段未出

① 1 英里 = 1609.344 米。

现需要封闭的情况。

国内许多研究人员也对发热线加热系统的应用进行了研究。罗延龄、黄新武等人在研究防冻保温用自控温加热线国内外现状的基础上,提出了 PTC 加热控温原理,并介绍了发热线的结构材质及材料特性。

北京工业大学的李炎峰、贾衡、李俊梅、赵志强等人对发热线在露天管道防冻方面的应用进行了系统的研究,提出了露天管道层绝热保温加电伴热防冻方案并进行了经济分析和试验研究,同时对新型管道防冻方案的动态运行特性及节能效果进行了研究。研究结果证明了防冻方案的可行性,并得出了一些有价值的成果。

国内对发热线加热系统在路面桥面融冰方面应用也开展了相关研究。郭振国、德颖等人研究了发热线在车道融雪化冰中的应用,并详细介绍了施工工艺。卢晓玲、樊浩博等人依托图们至珲春段高速公路,研究了发热线在寒区公路隧道路面防滑中的应用,提出了设计方案和施工组织方案,可为寒区隧道路面防滑措施的实施提供参考。杨洁、李海涛等对电热法除路面冰雪的技术进行了探讨,计算了车道除冰雪耗电量,并对发热线的几个重要指标进行了讨论,验证了发热线法除冰雪的技术经济可行性,同时指出发热线法用于实际工程还需进行大量的实地试验,并对能耗及安装方法等进行验证完善。

北京工业大学的李炎峰、武海琴等人研究了发热线用于路面融雪化冰的模式,采用有限元分析方法对路面温度变化进行研究,得到了不同气候条件下道路表面及结构层内的温度分布、升温规律,并进行了试验研究。将数值模拟结果与试验测量结果进行比较,发现二者吻合较好。研究表明:依据北京地区近 10 年的气温数据,采用铺装功率为 $250 \sim 350 \text{W}/\text{m}^2$ 的发热线可满足北京地区路面融雪化冰的要求。

上海交通大学的管数园建立了发热线加热系统的数值模型,进行了融雪的数值分析和模拟,并开发了一套发热线加热系统分析软件。

大连理工大学的赵宏明博士进行了布置发热线混凝土板融雪化冰的有限元分析、混凝土板内布置发热线间距的试验研究、混凝土小板温升及融雪化冰试验研究、混凝土大板室外融雪化冰的试验研究,以及发热线混凝土板融雪化冰的温度场有限元分析及预测,验证了布置发热线混凝土板融雪化冰方法的可行性,为实际工程中混凝土板内发热线设计及输入功率的选取提供了参考和借鉴。

发热线加热法除冰雪在工程中的应用尚处于起步阶段,且该方法的许多细节受到气候条件因素的影响很大,我国幅员辽阔,要在工程中广泛应用还需针对具体的气候条件进行研究分析。

1.2.2 抗凝冰路面技术研究现状

抗凝冰路面是指路面具有主动除冰雪的性能,无须其他人为辅助即可完成清除冰雪的功效,是近年来国内外道路工作者研究的重点。

(1) 自应力抗凝冰路面

20世纪90年代,日本针对札幌市冬季极易出现“滑冰场路面”进行了应用路段研究。铺设了变形路面,增加了路面面层(或罩面)材料的柔性,从而增加了路面受力时的弹性变形量。路面结冰后,行车碾压使得路面冰层直接承受不均匀垂直和水平力作用而自动破碎。

北美、北欧也开展了自应力弹性路面技术研究,通过在沥青路面材料内添加弹性颗粒材料,改变路面与轮胎的接触状态和路面的变形特性,利用弹性材料局部变形能力强的特点,通过路面在外力荷载作用下产生的自应力,使路面凝冰破碎融化,从而有效抑制路面凝冰。

我国对抗凝冰路面也有一定的研究基础。1998年,哈尔滨建筑大学开始了废旧轮胎橡胶颗粒沥青混凝土研究。刘晓鸿博士对橡胶颗粒沥青路面路用性能研究发现,掺加橡胶颗粒的沥青混凝土具有除冰可行性。2008年,长安大学韩森教授在内蒙古铺设了近10km长的粗糙型路面,用的破冰抗滑露石水泥混凝土路面技术,简称EACCP。

目前,影响自应力弹性路面广泛应用的技术难点是高变形弹性颗粒与沥青胶结料的黏附性不足,导致这类路面使用寿命不及常用的沥青路面。

(2) 化学类抗凝冰路面

蓄盐路面层技术以粉状盐化物代替部分矿粉,混合料中的化学物质通过渗透压力和毛细管现象溶出,或因路面磨损露出,以达到路面防冻和覆冰剥落的效果。FAP纤维路面技术在高黏度改性沥青开级配混合物的空隙中,注入混合油吸收盐类和氯化物的吸水性聚合物纤维。当路面除雪功能下降时,可再撒布氯化物等恢复冻结抑制功能。

日本在化学类抗凝冰路面技术上有一定研究,但对于如何保证此类路面在凝冰环境下有效控制融冰材料的释放浓度和数理方面仍需完善。

综上所述,目前世界各国对于处理道路路面积雪已有多年的经验,但现有的处理路面积雪的技术措施与设备多数不适用于处置路面凝冰状况。因此,本书开展抗凝冰路面技术研究,旨在研究控制融冰材料释放以及自动化处置技术。

▶▶▶ 2 高速公路凝冰危险性等级评价研究

基于对路面凝冰信息采集与预警技术的研究,结合高速公路凝冰高危路段的特殊性和规律性,对高速公路路面凝冰进行了危险性等级的评定与划分,为下一步选择与优化高速公路抗凝冰安全保障方案提供基础。

2.1 凝冰危险性因素构成分析

当空气温度略低于 0°C 时,路面最易发生凝冰,应充分分析凝冰形成的影响因素,同时结合凝冰风险,进行凝冰危险性因素构成的分析。

2.1.1 道路设计因素

道路因素对冰雪天气行车安全有重大影响,主要体现在两方面:一是道路和车辆之间的力学耦合作用,二是道路直接或通过车辆间接对驾驶员的驾驶行为产生影响。这两方面的作用相互联系,互相作用,共同影响行车的安全性。以下从平面线形、纵断面线形、平纵线形组合、路面状况以及云南地区典型的易结冰路段五个方面进行详细分析。

(1) 道路平面设计

在冰雪天气下,无论是积雪、结冰,还是冰雪混合物,都大大降低了高速公路路面的抗滑性能。横向安全性方面,较低的路面附着系数加之平曲线半径的影响,增加了车辆转弯时的行车风险性;纵向安全性方面,较低的路面附着系数延长了制动距离,因此冰雪天气相对需要较好的视距条件。

平曲线半径对道路交通安全性的影响机理主要体现在车辆绕平曲线做圆周运动时,必须满足圆周运动的力学约束,否则会发生车辆偏离或甩出路面而造成交通事故。

圆周运动的力学约束方程如下:

$$mgf_h + mgi_h \geq \frac{mv^2}{R}$$

式中： R ——平曲线半径；

v ——车辆行驶速度；

f_h ——路面横向摩擦系数；

i_h ——横向倾角；

m ——汽车质量；

g ——重力加速度。

(2) 道路纵断面设计

对纵坡路段的交通事故调查发现,陡坡路段交通事故的主要形态为:下坡时车辆失控驶出路面,连续下坡时行车速度过高。一般情况下,下坡事故数要比上坡事故数多,即下坡路段比上坡路段更危险。相关研究成果表明:纵坡坡度在0~2%之间最为合适;低于6%的坡度对交通事故率影响不明显;当坡度大于6%时,事故率会突然显著增加,这种变化在下坡路段尤其明显。

(3) 易结冰路段

在积雪结冰路面上行车采用低速能够大大提高行车安全性,但实际上高速公路很多事故的发生是由于驾驶员没有察觉到前方路面的冰层而高速行驶,这些事故往往发生在比较特殊的局部路段。

总结高速公路不易察觉的路面结冰情况有:一是容易在桥梁和涵洞上结冰,原因是桥梁和涵洞一般是悬空架设,没有地温支撑,桥面、涵面没有能量储备,吸热快,散热也快,其顶端均暴露在外,因此往往较普通路面容易形成结冰;二是隧道进出口受隧道风的影响,降温快极易结冰且隧道比较狭窄,从无冰雪隧道路面过渡到结冰路面的隧道进出口时,容易对隧道进出口的驾驶困难估计不足,导致交通事故或者交通堵塞;三是高速公路的急弯、陡坡路段,以及靠湖临河等路段也是易结冰的地方。

2.1.2 环境因素

环境系统的基本要素包括气候、地形地貌、道路周边人文社会环境等方面。气候因素主要是光照、雨、雪、风、雷、雾、结冰、干燥、高温、低温等都会产生影响。

(1) 冰雪

降雪过程中,飘落的雪花影响驾驶员视线,积雪对阳光的强烈反射作用造成的雪盲现象,路面积雪使行车变得困难,被积雪覆盖的道路交通设施的安全性被弱化等。降雪很大造成雪灾时,其危害还体现在雪崩摧毁道路、桥梁及其他公路

结构物;风雪流或雪崩掩埋公路,致使交通无法畅通直至阻断,甚至造成人员伤亡。

冰雪对道路交通的行车安全影响较大,冰雪会使车轮和地面之间的摩擦系数降低,刹车距离增大,同时易引发车辆侧滑、横移,驾驶员普遍采用低速度行驶。Oberg 在实际的 5 条道路上对小客车进行测试,发现在常温条件下,干燥路面车辆的平均速度为 85 ~ 95km/h;在覆盖有冰雪的相同路面上,车辆的平均速度仅下降 6 ~ 10km/h。假设驾驶员的反应时间为 1s,路面的摩擦系数为 0.25 ~ 0.8,小客车的刹车距离为 65 ~ 129m,其安全行驶车速为 56km/h。

(2) 低温

低温会使路面开裂,造成路面非连续,给降水下渗提供通道;气温转暖时路面翻浆使路面湿滑,降低路面对轮胎的黏附力,司机可能因此变道行驶,进而干扰交通秩序,影响交通安全。当温度低于零度时,路面容易产生结冰现象,特别是涵洞路段及桥梁路段,低温在路面上产生的薄冰极容易使车辆打滑失控而发生交通事故。在温度高于 -5°C 的暖冰上,摩擦系数极小。这时摩擦系数主要取决于冰的物理性能而不是橡胶的性能,尤其是温度接近冰点时,试样的滑动摩擦阻力几乎接近于 0,如图 2-1 所示。还有研究表明,温度的下降会使干燥路面的摩擦系数下降。温度在 10°C 以上时摩擦系数较大且比较稳定;温度在 $0 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间,摩擦系数有明显的突变特征;温度在 -5°C 以下,摩擦系数明显低于温度在 10°C 以上,如图 2-1 所示。

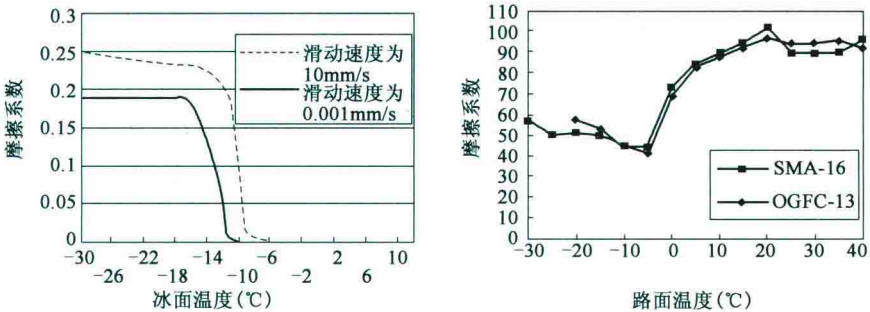


图 2-1 温度与摩擦系数关系

2.1.3 路面性能因素

准确检测和评价路面的安全性能十分必要,其中路面的安全性能——抗滑性能是用路面摩擦系数这一指标来进行评价的。