



泡沫沥青

温拌混合料技术

WARM MIX FOAMED
ASPHALT MIXTURE TECHNOLOGY

吴英彪 石津金 张 瑜 刘金艳 王秀稔 编著

非外借



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

泡沫沥青

温拌混合料技术

吴英彪 石津金 张 瑜 刘金艳 王秀稔 编著

WARM MIX FOAMED
ASPHALT MIXTURE TECHNOLOGY



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

内 容 提 要

本书总结了泡沫沥青温拌技术的工艺原理、沥青的发泡特性、间歇式发泡设备技术要求,详细介绍了泡沫沥青温拌混合料的配合比设计与路用性能评价,阐述了水分在泡沫沥青中的迁移规律及泡沫沥青与集料界面的稳定性,同时注重理论与实践紧密结合,把研究成果与生产施工经验融入其中。

本书可供不同层次公路工程、市政工程等相关专业人员阅读,同时还可作为高校相关专业教学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

泡沫沥青温拌混合料技术 / 吴英彪等编著. —北京:
人民交通出版社股份有限公司, 2018.2

ISBN 978-7-114-14536-0

I. ①泡… II. ①吴… III. ①沥青路面—路面施工
IV. ①U416.217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 021353 号

书 名: 泡沫沥青温拌混合料技术

著 作 者: 吴英彪 石津金 张 瑜 刘金艳 王秀稔

责任编辑: 韩亚楠 朱明周

责任校对: 张 贺

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: 14

字 数: 244 千

版 次: 2018 年 4 月 第 1 版

印 次: 2018 年 4 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14536-0

定 价: 42.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

随着我国环保形势的日益严峻以及低碳理念逐渐深入人心,泡沫沥青温拌技术得到迅速发展。沧州市市政工程股份有限公司在对美国泡沫沥青温拌技术进行考察和调研的基础上,于2010年引进了国内第一台适用于间歇式拌和设备的沥青发泡设备,并对泡沫沥青温拌技术进行深入、系统的研究,取得了一定的研究成果。本书是在沧州市市政工程股份有限公司承担的“泡沫沥青温拌技术研究”和“泡沫沥青温拌混合料配合比设计方法及路用性能研究”等科研成果的基础上,结合当前国内外泡沫沥青温拌技术领域先进的研究成果编写而成。

全书共分为十章。第一章介绍了泡沫沥青温拌技术的起源、发展历史及技术优势。第二章介绍了沥青发泡原理、泡沫沥青的评价指标、影响因素以及最佳发泡条件的确定。第三章介绍了试验室和拌和站常用的几种发泡设备及工艺,并以 MEEKER 沥青发泡设备为例介绍了间歇式沥青发泡工艺的技术原理。第四章介绍了基于马歇尔设计体系的等体积设计方法及泡沫沥青温拌混合料的设计指标。第五章对比分析了泡沫温拌工艺对沥青性能的影响以及泡沫沥青温拌混合料的和易性、可压实性及与粗集料的裹附性;同时综合评价了泡沫沥青温拌混合料的路用性能。第六章从微观层面揭示了水分在泡沫沥青中的迁移规律以及泡沫沥青与集料界面的稳定性。第七章介绍了泡沫沥青温拌混合料的生产及施工工艺。第八章以实体工程为依托,介绍不同类型的泡沫沥青温拌混合料的工程应用效果。第九章阐述了泡沫沥青温拌技术在环境保护方面的作用及显著的经济效益。第十章对泡沫沥青温拌技术进行总结,并展望了推广应用前景。

泡沫沥青温拌技术是一项低碳、环保、节能且经济效益良好的工艺改革,大量工程实践证明,采用该技术拌制的混合料能够达到与同

类型热拌沥青混合料相同的技术指标,且具有广泛的适用性。为使泡沫沥青温拌技术得到进一步推广,编者对泡沫沥青温拌技术进行了总结,在参考大量国内外文献资料的基础上,编写了这本《泡沫沥青温拌混合料技术》。在此对参与技术研究和推广应用的人员以及所引用参考文献的诸位原作者,表示衷心的感谢。

本书可作为从事沥青路面科研、设计、施工与管理的工程技术人员参考使用,亦可作为工程建设单位的工具书。同时,由于泡沫沥青温拌技术在国内的研究尚不丰富,一些技术问题还有待在实践中进一步完善和发展,且编者的技术水平有限,因此本书中一些论述可能存在不成熟之处,敬请广大读者原谅,同时欢迎同行批评指正。

本书主要编写人员为:吴英彪、石津金、张瑜、刘金艳、王秀稔、杨晨芳、赵雯、李秀显、刘智、许森、张培良、孟令宇。

编著者

2017年10月

目 录

第一章 绪论.....	1
第一节 温拌技术的起源与发展现状.....	1
第二节 温拌技术的分类与比较.....	5
第三节 泡沫沥青温拌技术的发展现状.....	7
第二章 沥青发泡原理及发泡特性.....	10
第一节 沥青发泡原理.....	10
第二节 沥青发泡特性的评价指标.....	11
第三节 影响发泡指标的因素.....	16
第四节 最佳发泡条件的确定.....	19
第三章 沥青发泡设备及工艺.....	24
第一节 试验室发泡设备.....	24
第二节 拌和站发泡设备及工艺.....	28
第四章 泡沫沥青温拌混合料配合比设计.....	36
第一节 配合比设计方法概述.....	36
第二节 基于马歇尔设计体系的等体积设计方法.....	40
第五章 泡沫沥青温拌混合料技术性能.....	49
第一节 泡沫沥青温拌工艺对沥青性能的影响.....	49
第二节 泡沫沥青与粗集料的裹附性.....	55
第三节 泡沫沥青温拌混合料的拌和及可压实性能.....	61
第四节 泡沫沥青温拌混合料的路用性能.....	76
第六章 水分迁移规律及界面稳定性.....	90
第一节 泡沫沥青中水分含量测试方法.....	90
第二节 水分在泡沫沥青中的迁移规律.....	98
第三节 泡沫沥青与集料界面的稳定性.....	103
第七章 泡沫沥青温拌混合料生产与施工.....	112
第一节 泡沫沥青温拌混合料生产.....	112
第二节 泡沫沥青温拌混合料施工.....	116

第八章 工程应用及推广情况.....	123
第一节 沧州市化工路温拌再生沥青混合料应用.....	124
第二节 沧州市新华西路温拌橡胶沥青混合料技术应用.....	129
第三节 沧州市吉林大道温拌 SMA 混合料应用	136
第四节 沧州市光荣路温拌超薄混合料应用.....	143
第五节 山东德商高速公路温拌 SBS 改性沥青混合料应用	149
第九章 泡沫沥青温拌技术的环境效益和经济效益.....	154
第一节 泡沫沥青温拌技术的环境效益.....	154
第二节 经济效益分析.....	161
第十章 结语.....	163
第一节 泡沫沥青温拌技术的优势.....	163
第二节 推广应用前景.....	164
参考文献.....	166
附:泡沫沥青温拌混合料路面技术规程	171

第一章 绪 论

第一节 温拌技术的起源与发展现状

一、温拌技术的起源

随着世界经济的发展,与之相伴的环境问题日益突出。由于人口的增加和人类生产活动规模的扩大,向大气释放的温室气体不断增加,大气质量受到影响,气候有逐渐变暖的趋势,由此导致生态系统发生变化和破坏,气候异动,次生灾害频发,对人类生活产生了一系列重大影响。全球气候变暖和资源日益匮乏已经受到国际社会的高度重视,建设资源节约型、环境友好型社会成为整个社会的共同责任。为了保护生存环境,世界各国都在倡导和应用“绿色低碳”技术。我国作为世界上最大的发展中国家,同样面临着环境污染、能源枯竭等一系列问题。交通运输行业是温室气体和大气污染排放的重要产生源,在环境污染、能源消耗浪费问题上,正面临着严峻的考验。

目前,公路及城市道路建设的沥青路面普遍使用具有良好路用性能的热拌沥青混合料 HMA(Hot Mixture Asphalt)。其是由矿料与黏稠沥青在专业拌和设备中加热拌和而成,保温运输至施工现场,并在热态下进行摊铺和压实的混合料,拌和温度通常为 $150\sim 180^{\circ}\text{C}$ 。热拌沥青混合料路面经过几十年的发展,为道路建设立下汗马功劳。然而,热拌沥青混合料也暴露出许多自身不可调和的缺点,主要体现为:①沥青老化严重。由于热拌沥青混合料生产、施工都是在非常高的温度下进行的,结合空气中的氧气,沥青的老化是不可避免的,并且由于拌和时裹覆在集料上的沥青膜厚度都在 $10\mu\text{m}$ 以下,更大大加剧了沥青的老化程度。沥青老化直接影响沥青混合料的路用性能,进一步影响沥青路面的使用寿命。②能源消耗大,环境污染严重。热拌沥青混合料的生产过程中,沥青和石料都要加热到很高的温度,加热过程中必然消耗大量的能源,同时在混合料生产和施工过程中会排放出大量的粉尘和废气,这些气体中的有害成分包括一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO_2)、二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)等,不仅造成环境污

染,而且严重影响周边环境质量和施工作业人员的身体健康。

减少能源消耗,降低环境污染,是道路施工行业的发展方向。在这种形势下,沥青混合料温拌技术应运而生,为交通行业的发展带来了新的契机。目前,道路工程沥青路面使用的混合料按照集料加热温度或沥青混合料的拌和温度,可以划分为4类:①热拌沥青混合料,以HMA表示,拌和温度通常为150~180℃;②冷拌沥青混合料,以CMA表示,拌和、成型温度均为常温;③温拌沥青混合料,以WMA表示,拌和温度通常为110~140℃;④半温拌沥青混合料,以HWA表示,是指将矿料加热到环境温度与100℃之间范围内与沥青类结合料进行拌和而成的混合料。冷拌、半温拌、温拌以及热拌技术的拌和温度及能量消耗如图1-1所示。其中,温拌沥青混合料WMA(Warm Mixture Asphalt)是指拌和及施工温度介于热拌沥青混合料(150~180℃)和冷拌(常温)沥青混合料之间,能够实现沥青路面施工且性能达到(或接近)热拌沥青混合料要求的新型路面材料。

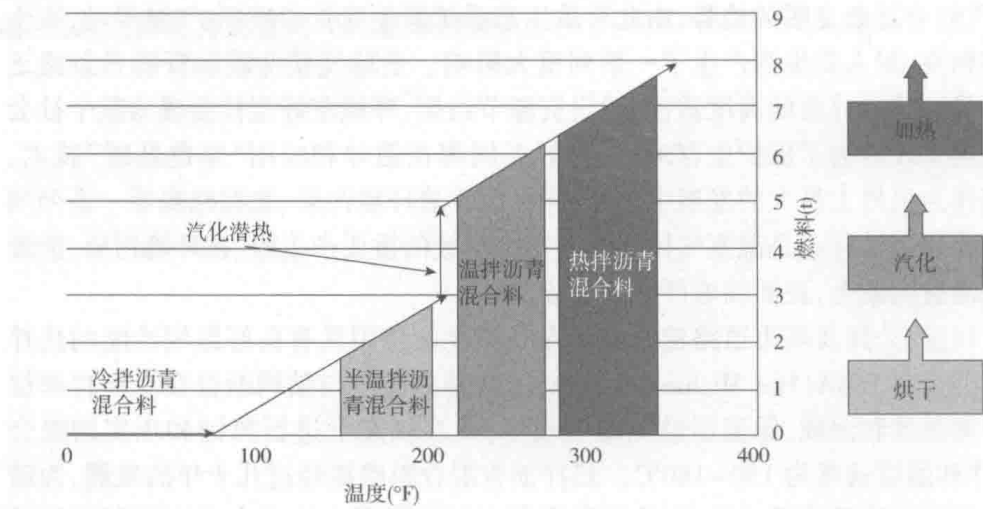


图 1-1 冷拌、半温拌、温拌以及热拌技术的拌和温度及能量消耗^①

有资料显示,在沥青混合料生产过程中,温度每升高 10℃,每吨混合料将多产生 0.9kg 的 CO₂ 排放量,而 CO₂ 是导致温室效应的最重要的温室气体。经实际生产计算可得,温拌沥青混合料要比热拌沥青混合料降低能源消耗 30% 以上,减少 CO₂、NO_x、SO₂ 排放量 30% 以上。温拌技术在不降低沥青混合料路用性能的前提下,有效减少了能源消耗和生产施工过程中有害气体和碳排放,具有节

① 华氏度(°F)与摄氏度(°C)的换算关系为:华氏度(°F)=摄氏度(°C)×1.8+32。

能、环保、改善作业环境、减轻沥青老化等优点,成为近年来道路领域研究和应用的热点。采用温拌技术,将沥青混合料的生产、摊铺实现“低碳、环保、可持续”,不仅可以解决传统热拌沥青混合料污染严重的问题,更有节约能源和提高利用废旧材料比例等特点。

二、温拌技术的发展现状

20 世纪 90 年代末,作为减少温室气体排放的措施,温拌技术首先在欧洲发展起来。1997 年,为抑制全球气候变暖,欧洲等地的不少国家签署了《联合国气候变化框架公约的京都议定书》,该协议规定所有发达国家到 2010 年,温室气体排放量要比 1990 年的温室气体排放量降低 5.2%。这些国家承诺将大量地减少温室气体排放,从而促进了温拌技术的快速发展。2000 年,在第一届国际沥青路面大会上,第一次正式报道温拌技术。为响应会议的号召,世界各国开始大力研究、应用温拌技术。在此期间,欧洲的德、英等国家开展了温拌沥青混合料的研究。随后,由于温拌沥青混合料具有节能、环保等优点,在欧美、南非、日本等地区和国家得到了广泛的推广应用,并迅速发展起来。

美国在 2002 年开始从欧洲引进温拌技术,由美国沥青路面协会(NAPA)主席带队考察了欧洲温拌技术的应用情况,并由联邦公路管理局组织成立了温拌沥青技术工作小组。早期欧洲发展的温拌技术主要是沥青发泡类或有机添加剂类,2003 年,表面活性平台温拌技术研发成功并首次应用,宣告了三大主流温拌技术体系的成型。2004 年,以美国沥青技术研究中心(NCAT)为代表的著名研究机构,选取了三个具有代表性的主要温拌沥青技术,展开了综合性的室内外研究工作。2008 年,美国国家公路合作研究项目(NCHRP)开始进行温拌沥青混合料的施工性能、气体排放以及路用性能研究。温拌技术如雨后春笋般迅速发展起来,欧美很多科研机构 and 大型公司都开发了相关产品。迄今为止,主要有泡沫沥青温拌技术、表面活性温拌技术和有机降黏温拌技术三大种类温拌沥青混合料技术,见表 1-1。美国温拌技术应用状况调查显示,泡沫沥青温拌技术应用最为广泛,在三大种类技术当中所占比例达 70%以上,其次为表面活性温拌技术,有机降黏温拌技术应用较少,见表 1-2。

温 拌 技 术 分 类 表 1-1

温拌技术类别	典 型 技 术
泡沫沥青温拌技术	Aspha-min, Ultrafoam GX, Terex, Doubie Barrel Green, Stansteel, Aquablack, ECOFOAM- II , Meeker WMA, AquaFoam, Tri-Mix

续上表

温拌技术类别	典型技术
表面活性温拌技术	EvothermET, EvothermDAT, Evotherm3G, REVIX(Evotherm 3G) ,Cecabase RT, Iterlow-T, HyperTherm, QualiTherm, Redist LQ
有机降黏温拌技术	Sasobit, Asphatan B, Rediset WMX, CECABASE RT [®] SAK, Sasowax, SLA, SonneWarmix, Thiopave, LEADCAP

美国温拌技术的应用状况 表 1-2

温拌技术类别	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
泡沫沥青温拌技术	84.7%	93%	95.9%	90.2%	87.2%	84.5%	74.1%
表面活性温拌技术	15%	6%	3.8%	9.6%	12.1%	15%	25.2%
有机降黏温拌技术	0.3%	1%	0.3%	0.2%	0.7%	0.5%	0.7%

目前,在美国有 200 多个温拌沥青混合料的建设或试验项目,所有州都在研究温拌沥青混合料,得克萨斯州和加利福尼亚州已经开始把温拌沥青混合料纳入各自的规范中。2010 年全美有 44 个州在使用温拌沥青混合料,其用量达 4760 万 t,占沥青混合料总用量的 14.6%。到 2015 年,美国温拌沥青混合料用量上升至 11980 万 t,占沥青混合料总用量的 32.8%。英法等欧洲国家对温拌沥青混合料的用量也在逐年递增。

我国在温拌沥青混合料技术方面起步于 2005 年,主要是对表面活性温拌技术进行研究与应用。2005 年,由交通运输部公路科学研究院、同济大学、北京路桥路兴物资中心和美国 Mead Westvaco 合作研究温拌沥青混合料,并于当年 9 月在北京 110 国道昌平段辅线成功铺筑温拌试验路,这是我国温拌沥青技术的首次应用。2006 年,由交通部公路科学研究院、同济大学等科研院校承担的西部交通建设科技项目“温拌沥青混合料应用技术研究”立项,该项目对多种温拌沥青混合料的施工技术进行了研究,并在各地组织实施了多条试验路。2006 年 9 月,我国铺设了世界上第一条改性沥青 SMA 温拌试验路。2007 年,北京、上海、江苏、河北等 8 个省、直辖市展开了温拌技术的应用研究(共 13 个试验项目),并成功应用于大量实体工程。2008 年,温拌技术全面进入商业应用阶段,温拌沥青混合料技术应用于隧道路面、超薄磨耗层及低温条件施工。至 2010 年 10 月,全国已有十多个省市铺筑了 100 多条试验路及应用工程。2009 年 4 月,河北省编制了《温拌沥青混合料施工技术指南》(DB13/T 1014—2009),同年 9 月,青海省发布了《寒区温拌沥青混合料路面技术规范》(DB63/T 812—2009),2010 年 1 月,北京路政局编制出版了《北京市温拌沥青混合料路面技术指南》,

2014年12月,国家标准《温拌沥青混凝土》(GB/T 30596—2014)正式发布实施,正在修订的《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)已确定将温拌技术的相关标准要求纳入其中。此外,还有多省市温拌产品标准与地方标准进入或已经完成了制定程序。

第二节 温拌技术的分类与比较

按照工作原理,温拌技术主要可以分为表面活性温拌技术、有机降黏温拌技术和泡沫沥青温拌技术三大类。

一、表面活性温拌技术

表面活性温拌技术的特点是沥青与集料在高温拌和时加入少量表面活性添加剂和水,在它们的共同作用下,表面活性添加剂、水和沥青借助拌和的分散能力,实现相互融合,有微量的水和表面活性添加剂残存在集料表面,并形成一种结构性水膜。由于水膜不受外界环境温度改变的影响,当温度降低时,沥青胶结料的黏度会适当增大,但是由于水膜的存在,可以抵消部分的沥青黏结作用,从而实现了沥青混合料生产的温度降低。表面活性温拌技术最主要的产品是由美国美德维实伟克公司生产的 Evotherm 活性降黏剂。

二、有机降黏温拌技术

有机降黏温拌技术通过使用有机降黏剂来减小沥青的高温黏度,但是对沥青的低温黏度却没有影响。这类有机添加剂以蜡或蜡状物为主,添加这类有机降黏剂能够降低沥青的高温黏度,但在夏季温度下黏度不但不变化,甚至可能提高。采用有机降黏剂法生产的沥青混合料不仅施工温度大大降低,而且路用性能较常规热拌没有衰减。现有的通过添加有机降黏剂的温拌技术包括 Sasobit、Rediset、SAK 等。

(1) Sasobit: Sasobit 由南非 Sasol Wax 公司生产,是专门为了配制碾压沥青而生产的降黏剂,可以明显降低沥青的高温(135℃)黏度,提高沥青的低温(60℃)黏度,在低于熔点时,Sasobit 在沥青胶结料中呈现出晶格结构,使 WMA 具有更好的稳定性和抗车辙能力。

(2) Rediset: Rediset 由荷兰 Akzo Nobel 公司开发,是通过降低沥青表面的张力,使得沥青对集料的吸附力大于水对其的吸附力,从而置换了集料表面的水分和沥青,增强了沥青胶结料的黏附性能,提高了沥青本身的内聚力,使沥青与集

料更好地裹附。

(3) SAK: SAK 是一种新型普适沥青改性剂, 产于国内, 属于新型聚烯烃类沥青改性剂, 是一种窄分布的合成饱和碳氢化合物的混合物。SAK 温拌剂能直接掺入基质沥青内, 改变沥青黏度, 降低其施工拌和温度, 它的技术路线基本接近于 Sasobit。

三、泡沫沥青温拌技术

泡沫沥青温拌技术是将在加热的黏稠沥青中加入少量水分形成的泡沫沥青与矿料进行拌和而成的温拌混合料。泡沫沥青是一种膨胀成泡沫的沥青, 通过高温的沥青中加入少量冷水, 在水的急速汽化中形成爆炸性泡沫, 使沥青表面积大量增加, 体积膨胀数倍至数十倍, 形成的泡沫沥青在近 1min 内又恢复原状。由于沥青膨胀产生泡沫, 使沥青的黏度下降, 故泡沫沥青可以方便地与低于热拌沥青混合料温度的矿料拌和均匀而减少能源消耗。泡沫沥青并不是一种新的沥青黏结料, 而是一种新技术应用所带来的产物。泡沫沥青温拌技术主要有沸石法 (Aspha-Min 技术)、湿砂法 (Low Energy Asphalt) 以及机械发泡法 3 种形式。

(1) 沸石法 (Aspha-Min 技术): 法国 Eurovia 公司开发了名为 Aspha-min 的温拌沥青混合料技术, 其原理是使用一种沸石物质 (白色超细粉末, 成分为铝硅酸钠, 内部为连通多孔结构, 可吸收其质量约 21% 的水分), 将这种沸石加入到热沥青中, 水分会随着时间的延长而慢慢释放出来, 从而实现沥青的连续发泡, 降低了沥青的瞬时黏度, 可以使沥青混合料的生产温度降低 30℃ 左右。Aspha-Min 发泡的倍数小, 属于细微发泡, 水的释放可持续到 100℃, 实现持续发泡, 长时间维持混合料的工作性。

(2) 湿砂法 (Low Energy Asphalt 技术): 法国 LEACO、Fairco 和 EiffageTP 开发了 Low Energy Asphalt 专利技术, 首先让粗集料与沥青在 120~160℃ 温度下搅拌, 然后将潮湿未加热的砂子 (细集料) 加入到粗集料中, 水汽遇热, 体积膨胀, 在热沥青中形成泡沫, 泡沫化的沥青可以增加沥青胶结料的比表面积, 表面积增加后便可以与集料有充分的接触面, 可以与集料较好地拌和, 并形成混合料。LEA 的生产温度在 90~100℃ 之间, 混合料摊铺、碾压温度小于 90℃, 能够在雨天摊铺, 并且在低至 60℃ 的情况下仍能进行碾压。该技术易于操作, 提高了工作的舒适性和安全性, 可有效节约能源, 减少温室气体排放。

(3) 机械发泡法: 利用发泡设备将高温沥青与水在发泡室 (发泡腔) 内共混、发泡, 发泡设备有多种形式和种类。机械发泡的典型代表工艺主要有 Astec 绿色双滚筒及 MEEKER 沥青发泡工艺等。机械发泡法的工艺原理、技术特点等详

细内容在本书第三章中详细介绍。

综上所述,三种温拌技术相比较而言,表面活性温拌技术和有机降黏温拌技术,均需要额外采购添加剂,因而提高了温拌沥青混合料的生产成本,经济效益并不理想。而泡沫沥青温拌技术,无需任何添加剂,只需在原有拌和设备上安装沥青发泡设备及其控制系统,就能实现温拌混合料的生产,因而能够有效降低生产成本。同时,采用泡沫沥青温拌技术拌制的混合料各项路用性能指标均可达到同类型热拌沥青混合料的技术要求。泡沫沥青温拌技术更具环保性和经济性,适合在工程中推广应用。

第三节 泡沫沥青温拌技术的发展现状

一、国外发展概况

1928年,德国的 August Jacobi 注册了第一个制造沥青泡沫的专利。早期的泡沫沥青主要作为稳定剂和再生剂应用于道路基层稳定和冷再生技术。直到1998年,为了降低成本,同时又不降低温拌沥青混合料的性能,Shell(壳牌)国际石油有限公司和挪威 Kolo-Veidekke 公司共同开发了一种在混合料拌和的不同阶段加入软质沥青和泡沫化的硬质沥青来生产温拌沥青混合料的技术,被称为泡沫沥青温拌混合料。其生产步骤为:首先,将温度 100~120℃ 的软沥青与热集料充分拌和达到良好的裹附;然后,将硬沥青泡沫化后注入预裹附的集料中。泡沫化以后的硬质沥青体积增长 15~20 倍,与集料裹附后,其黏度明显降低。在1999年,采用这种泡沫沥青温拌混合料铺筑了试验路段并与热拌沥青混合料进行了现场对比试验,经过1年的跟踪观测,路面使用性能良好。

在沸石法泡沫沥青温拌技术的研究方面,Brian Prowell、Graham Hurley、Wasiuddin等人进行了大量的研究,研究成果主要包含以下几个方面:沸石温拌技术生产的沥青混合料回弹模量以及高温抗车辙能力随温度增加而有所上升;沸石温拌混合料采取旋转压实成型,孔隙率降低 0.65%,但是压实性能却有所升高。沸石温拌沥青混合料通过老化试验显示,其老化程度有部分降低;通过冻融劈裂试验研究发现,其冻融劈裂强度较低,原因在于沸石中释放的水分在沥青表面,导致了沥青的剥落。汉堡车辙试验显示,在沸石温拌沥青混合料中加入少量消石灰,其水稳定性能会有所提高。

在机械发泡法泡沫沥青温拌技术方面,B.G Koenders 等人进行过大量研究,研究结果表明,在拌和泡沫类温拌沥青混合料的过程中,沥青的瞬时黏度会有一

定程度的下降,这样有利于沥青混合料的生产。采用该技术铺筑的泡沫沥青温拌混合料试验路路面的早期强度增长速度较快,其路用性能基本接近于普通热拌沥青混合料路面。

在众多的泡沫沥青温拌技术中,机械发泡法工艺简单、易于操作,因此目前应用最多的泡沫沥青温拌技术为机械发泡法。2015年,美国 NCHRP9-53 完成了对泡沫沥青温拌混合料的研究,通过研究确定了泡沫沥青温拌混合料技术性能与实验室开发沥青发泡机和相关机理以及泡沫沥青温拌混合料生产流程等关键技术问题。该研究由得克萨斯州 A&M 交通研究院、得克萨斯州 A&M 大学,联合得克萨斯州大学奥斯汀分校共同完成。随后,机械发泡法的泡沫温拌沥青混合料在美国高速公路、城市快速路、机场道面等工程中得到迅速应用,并引起了澳大利亚、南非、日本等国家的广泛关注。

二、国内发展概况

近年来,随着泡沫沥青温拌技术在美国的迅速发展,我国的道路工作者开始关注节能、环保、经济效益更好的泡沫沥青温拌技术,采用沥青发泡工艺生产温拌沥青混合料的技术工艺正逐步发展起来。国内对于泡沫沥青温拌技术的研究应用起步最早、推广最多的企业为沧州市市政工程股份有限公司(以下简称“沧州市政”)。2010年6月,沧州市政在对美国温拌技术的发展和应用状况进行调研考察的基础上,与美国 MEEKER 公司合作,引进了国内第一台适用于间歇式拌和设备的沥青发泡设备,开始进行泡沫沥青温拌技术的研究工作。沧州市政先后完成了河北省住房和城乡建设厅的计划项目“泡沫沥青温拌技术研究”“泡沫沥青温拌混合料配合比设计方法及路用性能研究”两项科研成果,对沥青的发泡特性、泡沫沥青温拌混合料配合比设计方法和路用性能进行了系统研究,同时采用表面自由能理论及核磁共振试验方法,从微观层面揭示了泡沫沥青中的水分迁移规律及界面稳定性。同时将泡沫沥青温拌技术与厂拌热再生技术、橡胶沥青混合料技术、超薄磨耗层等技术相结合,成功进行了温拌普通沥青混合料、温拌改性沥青混合料、温拌橡胶沥青混合料等多种类型混合料的工程应用。基于以上课题的研究成果和工程实践经验,沧州市政编制了河北省地方标准《泡沫沥青温拌混合料路面技术规程》[DB13(J)/T 233—2017],于2017年8月1日起发布实施。在沧州市政的大力推广下,泡沫沥青温拌技术已在河北、山东、河南、青海等地进行了工程应用,累计铺筑的泡沫沥青温拌路面多于150公里。

与此同时,国内一些科研机构、机械制造企业等也进行了泡沫沥青温拌技术

的研究开发工作。2011年7月,徐工道路机械事业部与河海大学联合承担江苏省交通科研计划项目“温拌用泡沫沥青设备研发及其应用关键技术研究”,对温拌用泡沫沥青制备关键工艺、生产工艺参数、生产设备研发、施工工艺等方面展开了研究。江苏东交工程检测有限公司开展的“发泡温拌沥青混合料技术应用研究”,采用美国TARMAC公司的TRI-MDC沥青发泡设备,降低混合料施工温度30℃,试验路铺筑一年多来,使用效果良好。2017年7月,由“苏交科”集团和江苏省徐州市公路管理处等5家单位联合完成的“微发泡温拌沥青混合料技术研究及工程示范”课题通过了项目成果评价会,该课题优化了基质沥青与改性沥青的发泡条件,分析了发泡用水对沥青综合性能的影响,获得了微发泡温拌沥青混合料的抗水损害特性,完善了泡沫温拌沥青混合料及泡沫温拌再生沥青混合料的设计方法。该课题成果分别在徐州G104、镇江G312、苏州S228、贵州盘兴高速公路、青海S103等工程中进行了应用。另外,交通运输部公路科学研究院也对泡沫沥青温拌技术展开了深入的研究。从国内的发展情况来看,泡沫沥青温拌技术这一低碳、环保型技术正逐渐兴起,迎来广阔的发展空间。

第二章 沥青发泡原理及发泡特性

在高温沥青中加入少量水,沥青就会产生大量泡沫,体积膨胀,此种特殊状态下的沥青结合料称为泡沫沥青。沥青的发泡过程,主要发生的是一种物相(物理)转化,基本不发生化学反应。沥青发泡后,其黏度显著降低,故可以与集料在较低的温度下进行拌和、摊铺及碾压等一系列施工操作。沥青的发泡效果,直接影响着混合料的拌和效果及使用质量。因此,理解和研究沥青发泡原理及发泡特性,科学地确定沥青的最佳发泡条件,是深入研究泡沫沥青温拌混合料路用性能的首要工作。

第一节 沥青发泡原理

沥青发泡的基本过程如图 2-1 所示,当冷水滴(室温)与热沥青(通常为 140℃ 以上)接触后将发生以下连锁反应:热沥青与小水滴表面发生能量(热量)交换,使水滴表面温度升高,水滴周围的沥青温度降低。沥青传递的能量超过水汽化的潜热,导致体积膨胀,产生蒸汽。急剧膨胀的蒸汽泡在一定的压力作用下被压入沥青的连续相;随着溶有大量蒸汽的沥青从喷嘴喷出,压缩蒸汽膨胀使略微变凉的沥青形成薄膜状,并依靠薄膜的张力将气泡完全裹附。在泡沫的急剧膨胀过程中,沥青膜的表面张力与包裹的蒸汽压力相互抵制,随着泡沫的膨胀,蒸汽压力逐渐减小,直到与表面张力形成一种平衡状态。由于沥青与水的低导热性,这种平衡一般能够维持数秒的时间;发泡过程中形成的大量气泡是以一种亚稳态的形式存在,泡沫容易破灭。

发泡过程中导致泡沫破灭的因素很多,一种解释为随着沥青胶团在常温下冷却,气泡中的蒸汽冷凝而导致气泡破灭,这时发泡水会存留在沥青中形成所谓的水饱和沥青(water saturated bitumen);另一种解释为泡沫具有近乎稳定的蜂窝状结构气室,且气室两边的膜即为泡沫液膜。在三个或多个气泡聚集的地方,液膜被弯曲,并凹向气室的一方,形成如图 2-2 所示的普来特(Plateau)边界。由于在普来特交界处有较大的曲率,根据拉普拉斯(Laplace)方程,在气相与液相之间就会产生压力差,它随液体表面张力增加而增大,随气泡曲率增大而减小,