

温拌沥青路面 施工技术

Applied Technology of Warm Mix
Asphalt for Pavement Construction

李彦伟 王江帅 等编著
黄文元 赵永祯

中国建筑工业出版社

温拌沥青路面施工技术

Applied Technology of Warm Mix Asphalt
for Pavement Construction

李彦伟 王江帅 等编著
黄文元 赵永祯

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

温拌沥青路面施工技术/李彦伟等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-112-13431-1

I. ①温… II. ①李… III. ①沥青路面-道路施工 IV. ①U416. 217

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 151557 号

本书是在河北省“温拌沥青混合料技术研究”科研成果的基础上, 结合当前国内外温拌沥青混合料技术推广应用的基本情况编写而成的, 开展的“温拌沥青混合料技术研究”, 解决了沥青路面施工实现低碳环保和环境友好型的难题, 保证了低温条件下沥青路面质量、隧道内施工人员的安全, 成功实现减排同比降低达 70%, 节能达 23%, 同时, 发布了地方标准《温拌沥青混合料施工技术指南》(DB13/T1014—2009), 填补了我国公路行业的空白。

本书供道路工程建设管理单位和施工质量管理人員, 也可供公路与城市道路工程专业大专院校的师生学习与参考, 还可作为工程技术人员的培训教材。

* * *

责任编辑: 戚大庆 李天虹

责任设计: 赵明霞

责任校对: 陈晶晶 姜小莲

温拌沥青路面施工技术

Applied Technology of Warm Mix Asphalt for Pavement Construction

李彦伟 王江帅 等编著
黄文元 赵永祯

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

华鲁印联(北京)科贸有限公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 7 1/4 字数: 188 千字

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月第一次印刷

定价: 22.00 元

ISBN 978-7-112-13431-1
(21184)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是在河北省“温拌沥青混合料技术研究”科研成果的基础上，结合当前国内外温拌沥青混合料技术推广应用的基本情况编写而成的。课题参研单位包括：河北省交通运输厅公路管理局、石家庄市交通运输局、沧州市交通运输局、河北省交通规划设计院、邢台路桥建设公司、河北路桥集团有限公司，在本书稿完成之际，特对以上单位表示感谢，管理单位、科研单位和工程施工单位的协作，使得本书力求“实际应用”这一宗旨得以实现。本书既可作为广大公路技术人员参考用书，亦可作为工程建设单位的工具书。

全书共分为8章。第1章：绪论。介绍了沥青路面温拌施工技术的发展和特点。第2章：技术路线比较。对 Evotherm 等温拌剂在室内进行了各自技术路线的比较和技术适应性研究。第3章：温拌沥青混合料设计。采用规范现行的马歇尔击实法和旋转剪切压实（GTM）法进行了混合料设计体系适应性的研究。第4章：温、热拌沥青混合料性能。通过沥青混合料的高温抗变形、低温抗裂、水稳定性和疲劳等性能试验，证明温拌沥青混合料和路面性能总体上不低于同样材料和配比的热拌沥青混合料。第5章：混合料的生产与施工。第6章：节能减排效应。第7章：应用方向与工程案例。第8章：国内外发展和展望。

本书由李彦伟、王江帅、黄文元、赵永祯、李利华、王普清、刘俊德、石鑫、邹卫红、王庆凯、周烨、张永利、党奇志、杜群乐等编写。全书由黄文元和杜群乐统稿。

本书编写尚属首次，错误之处在所难免。有些内容属于初步建立，多有不成熟之处，敬请广大读者原谅。

2011年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 温拌沥青路面施工的起源和技术发展沿革	1
1.2 温拌的定义和技术关键	4
1.3 主要技术路线和发展趋势	5
2 技术路线比较	10
2.1 Sasobit	10
2.2 SAK	17
2.3 益路 (Evotherm)	21
3 温拌沥青混合料设计	28
3.1 混合料的拌合、成型方法与压实	28
3.2 温拌沥青混合料压实特性研究	31
3.3 细集料的适应性	37
4 温、热拌沥青混合料性能	40
4.1 胶结料老化	40
4.2 混合料性能	43
4.3 耐久性	51
5 混合料的生产与施工	53
5.1 添加装置和工艺	53
5.2 混合料生产与运输	56
5.3 摊铺与压实	57
5.4 质量控制与检测	58
6 节能减排效应	60
6.1 生产过程排放	60
6.2 施工过程烟气	67
7 应用方向与工程案例	69
7.1 隧道路面	69
7.2 低温施工、延长施工季节	72
7.3 大比例沥青旧料厂拌再生与现场再生	77
7.4 密实型薄层罩面	80
7.5 改性沥青与橡胶沥青	81
8 国内外发展和展望	93
8.1 应用发展趋势展望	93
8.2 技术和应用方向展望	94
参考文献	96
附：温拌沥青混合料施工技术指南	97

1 绪 论

1.1 温拌沥青路面施工的起源和技术发展沿革

温拌沥青路面施工技术是近 10 年来,在能源紧缺、全球气候变暖的大背景下快速发展起来的具有革命性意义的沥青铺面技术。随着化石能源消耗急剧增加,全球气候在近 50 年来明显转暖,且呈愈演愈烈的趋势,由此导致的气候异动和次生灾害频繁发生,如不及时采取措施,将最终威胁人类生存。1997 年,在欧盟、日本等主要发达国家的推动下,通过了《京都议定书》,要求在 2010 年,全球温室气体的排放量比 1990 年减少 5.2%,作为最主要的缔约者,欧盟承担了最大比例的消减任务。在政策面的强力推动下,温拌沥青技术在欧洲发端并迅速进入应用阶段。2000 年,第一届国际沥青路面大会, Harrison 和 Christodoulaki 首次报道该技术。胶结料降黏型和沥青发泡型两大主流温拌技术陆续研发成功并投入应用。

2002 年,美国沥青路面协会(NAPA)主席带队,对温拌技术在欧洲的应用进行了考察。随后,在联邦公路管理局(FHWA)组织下,成立了由全美沥青技术研究中心(NCAT)、各州公路工作者协会(AASHTO)、NAPA 以及若干州运输部参加的温拌沥青技术工作小组(WMA TWG)。2003 年,表面活性平台温拌研发成功并首次应用。由此,三大主流温拌技术体系宣告成型。此后,温拌技术的发展如雨后春笋,在发达国家,特别是欧洲发端并迅速投入应用阶段。2004 年以后,以美国沥青技术研究中心(NCAT)为代表的著名研究机构,选取 3 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。2005 年,2 个温拌沥青路面试验段嵌入了著名的 NCAT 环道。2005 年~2006 年末,NCAT 陆续提交了针对这 3 个技术实验路段的研究报告。

鉴于温拌施工技术日新月异的发展,2007 年 5~6 月,沥青工作小组组织了一个半官方的赴欧温拌技术考察团,团员主要来自美国联邦公路管理局(FHWA)、各州运输部、NAPA、沥青学会(AI)等,包括 FHWA 局长等,行程覆盖挪威、德国、比利时和法国。考察团明确了减低排放污染、节约能源、改善摊铺压实工作性、改善工人操作环境是温拌技术发展的四大优点;明确温拌技术的前提是路用性能必须达到现有路面技术标准。考察团还制定了推动温拌技术发展的技术路线和行动纲要。

在欧美等发达国家,无论在技术层面,还是在政策层面,温拌沥青技术均成为了沥青路面工业和对应管理机构的研究和关注热点。

随着我国经济实力的不断增强,特别是近几年来国家对基础设施建设的投资不断加大,我国的公路建设取得了突飞猛进的发展。到 2006 年底,全国公路通车里程达 348 万公里,公路密度达每百平方公里 36.3 公里。而在高速公路建设方面,我国虽然起步较晚,但发展很快。

从 1988 年沈大和沪嘉高速公路的建成通车开始，此后的短短十几年时间，为我国高速公路发展速度最快、规模最大、最具活力的黄金时期。2002 年，全国高速公路通车里程达 2.52 万公里；2004 年达到近 3.42 万公里；到 2008 年底，高速公路通车里程突破 6 万公里，居世界第二位，仅次于美国。2010 年底通车里程达到 7.4 万公里，到 2020 年，我国从东到西，从南到北将形成高速公路大通道，“7918”国家高速公路网将初具规模。

在高速公路中，沥青路面以其众所周知的良好使用性能受到世界众多国家的青睐。在我国，沥青路面也得到了广泛的应用，占了已建成的高等级公路中的绝大部分，沥青路面已成为主要的路面形式。有资料表明，国内近期在建、重建或大中修的高速公路有 90% 以上采用了沥青路面，因此，每年需要生产大量的沥青混凝土。沥青混凝土是一项资源、能源消耗型产业，需要消耗大量的石料、沥青、重油、柴油。近年来，改性沥青的大量使用和对沥青路面压实度要求的提高，使得沥青混合料的拌合及压实温度也提高了，从而导致了生产沥青混合料时的能源消耗和烟尘等废弃物的排放增多。而随着国际石油价格的不断飞涨，沥青、重柴油价格居高不下，给沥青混凝土产业带来了巨大的冲击。

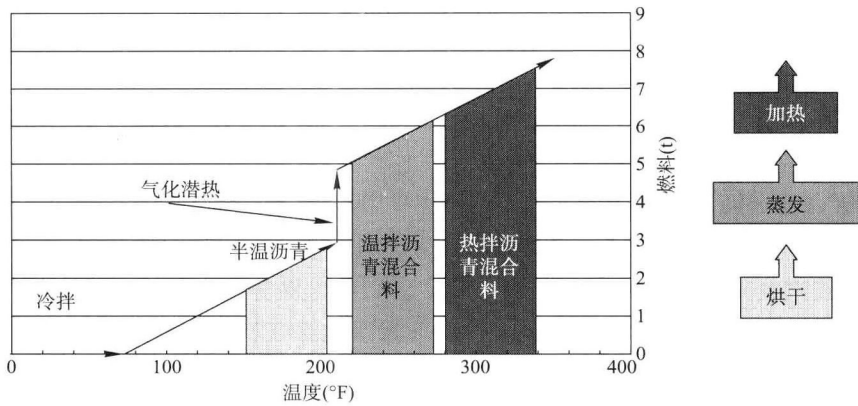


图 1.1 按照施工拌合温度划分的沥青混合料类型

根据拌合施工控制温度，道路工程沥青路面使用的沥青混合料主要可分为两种类型：冷拌沥青混合料和热拌沥青混合料。随着近年来新技术的出现与发展，国际业内人士有的在冷拌与热拌之间增加了“温拌与半温拌”，见图 1.1。冷拌沥青混合料一般采用乳化沥青或者液体沥青与集料在常温状态下拌合、铺筑，无需对集料和结合料进行加热，这样可节约大量能源。尽管在环保、能耗等方面有一定优势，但是冷拌沥青混合料初期路用性能差，难以满足高速公路、重载交通道路等重要工程的要求，因此只能用于沥青路面的修补、低交通量路面。热拌沥青混合料是应用最为广泛、路用性能良好的一种混合料。

目前，道路建设中的沥青路面基本上都采用的是传统的热拌沥青混合料。但是在热拌沥青混合料生产过程中，热拌沥青混合料的拌制和施工温度是相当高的，一般在 160~180℃。在如此高的温度下，混合料拌制过程乃至摊铺时“青烟”阵阵。这些气体中的有害成分主要有一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫以及氧化氮等。这些“青烟”除了污染大气环境外，而且也严重影响操作人员的身体健康。从另一个角度看，沥青和集料分别加热至如此高的温度，必然要消耗大量的能源。

有资料显示：在产生温室效应的众多气体中，CO₂是最重要的温室气体，其分担率占55%，日本1996年国内道路建设共排放CO₂776万吨，其中绝大多数是在制造沥青混合料时产生的。德国研究数据表明，每生产1t热拌沥青混凝土需消耗8L燃料油。如拌合温度降低30~35℃，可节约燃料油2.4L/t，并可减少30%的CO₂等气体的排放量。中国也是温室气体的排放大国，近年来道路建设的快速发展使得生产沥青混合料时的CO₂排放量急剧增加。据试验测试：在生产沥青混合料的过程中，温度每升高10℃，每1吨混合料将多产生0.9kg的CO₂排放量，见表1.1。

拌合温度与 CO₂排放量的关系 表 1.1

混合料拌合温度 (℃)	130	140	150	160	170	180
CO ₂ 排放量 (kg/t)	15.9	16.7	17.6	18.5	19.4	20.3

环境污染和能源枯竭已得到全球范围的关注，为保护生存环境，世界各国都对温室气体、有害气体以及固体粉尘等排放进行严格限制。如欧共体计划到2010年温室气体排放量将比1990年减少15%。1997年联合国气候大会通过的《京都议定书》将严格限制包括CO₂在内的6种温室气体的排放量，并于2005年正式生效。随着我国持续快速增长，能源消费总量不断攀升，我国的温室气体排放量也呈快速增长态势，受到世界范围的关注。作为《京都议定书》的签约国，如何在发展国民经济的同时节约能源、保护环境，是我国必须高度关注解决的问题。我国“十一五”规划纲要中明确“资源节约型、环境友好型”社会是我国全面建设小康社会的发展方向，同时政府工作报告首次提出单位GDP能耗降低20%的指标。

使用热拌沥青混合料的负面影响就是环境的破坏、能源的大量消耗和人的生存圈的缩小，这与我国发展绿色的和可持续的道路是背道而驰的。因此，十分有必要研究一种绿色环保的沥青混合料来取代HMA，使其既能保持和HMA一样的使用品质，又能充分地节约能源和保护环境。因此，环保节能的温拌沥青混合料的研制和应用对改善上述状况有着巨大的意义。

在中国公路交通建设中，环境保护工作越来越得到重视，但多围绕生态环境保护和绿化等方面，而在生产过程中的气体排放方面重视不够。沥青混合料的生产是道路工程中能量消耗与环境污染大户。当前我国道路工程建设正处于快速发展期，研究与应用温拌沥青混合料无疑有益于降低沥青料生产过程中的能源消耗和温室气体以及粉尘等污染物的排放。

我国的研究始于2005年，当年9月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与美国Mead Westvaco公司合作研发，在110国道辅线昌平段，完成了国内第一段温拌沥青试验路。2006年，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，主要承担单位交通运输部公路科学研究院、同济大学等多种温拌混合料施工技术进行了全面的评估，并积极在各地组织实施多条试验路。基础性的研究工作还在进行，已经完成了多种温拌技术评估、节能减排效果监测、混合料烟气与温度关系、混合料常规性能等多项研究。

除了国家级研究项目以外，大学、研究机构、道路管理机构以及重点企业对温拌技术

进行了研究开发。2007 年同济大学首先研究实施了直投式模式、温拌在超薄层的应用。江苏省交通科学研究院在浙江省交通厅立项“温拌技术在隧道工程的应用”，2007 年在 7.6km 的台金高速苍岭隧道首次实施了无烟化隧道路面施工。2007 年底，辽宁省交通科学研究院对 Sasobit 和 Evotherm 进行了研究，2007 年 12 月，四川省公路管理局在海拔 1100m 的阿坝州实施了桥面薄层铺装，在海拔 3900m 日隆镇成功实施了温拌试验段。2008 年 7 月，浦东路桥公司完成了针对 SMA 的温拌材料性能评估，2007~2008 年，东南大学承担了江苏省温拌技术课题并陆续展开了 Superpave 体系和 SMA 体系的相关研究。

此后，温拌技术应用步伐逐步加快。除了北京和上海，节能、减排在我国的绝大多数城市还没有普遍落实到政策实施的层面。因此，尽管在温拌节能、环保作用方面开展了一些研究，结果相当积极，但并不像欧美一样成为决定性的动力。在我国，温拌被道路研究者用于解决热拌实施中的问题，拓展热拌无法或有困难覆盖的应用领域。因此，在具体的道路路面应用技术方案方面，我国处于相对领先地位。先后在北京、河北、上海、江苏、河南、辽宁、四川、浙江 8 个省区实施了大量实体项目，成功应用于城市道路、高速公路和城市快速道路薄层铺装、低温季节施工和高海拔地区的沥青路面施工、桥面超薄层、隧道路面等沥青路面类型。2009 年，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。

温拌沥青路面施工技术在全球的发展速度堪称罕见。而中国尽管起步稍晚，但发展势头更加迅猛。2009 年，实际应用量突破了 50 万吨混合料，2010 年突破了 120 万吨。国内已经有很多省份将沥青路面温拌施工技术列为打造“科技示范路”或者“低碳公路建设示范工程”的主要支撑技术之一。实际上，在国内应用的温拌技术，已经基本实现了与全球最新技术同步。

温拌沥青技术，符合全球和我国可持续发展战略和建设节约型社会、和谐社会的国家目标。温拌技术在降耗、减排、操作性、路面再生方面的发展，对于交通基础设施可持续发展与和谐发展，具有战略性意义。成熟、先进、合理成本、易操作的温拌沥青技术，必然在不久的将来迎来规模化应用的明天。

1.2 温拌的定义和技术关键

温拌沥青混合料 WMA (Warm Mix Asphalt) 概括来说，是指施工温度介于热拌沥青混合料和常温拌合混合料之间的沥青路面施工技术。在同样原材料条件下，温拌沥青混合料拌合温度与压实温度一般比热拌低 30~60℃。温拌沥青混合料，通常按沥青混合料的拌合温度来区分热拌沥青混合料 (HMA)、温拌沥青混合料 (WMA) 和冷拌沥青混合料 (CMA)。其中，NAPA 的划分办法是热拌沥青混合料 (135~163℃)、温拌沥青混合料 (121~135℃)、冷拌沥青混合料 (16℃)；还有一种划分办法是热拌沥青混合料 (>130/135℃)、温拌沥青混合料 (100~130/135℃)、半温沥青混合料 (<100℃)。温拌技术的核心是采用物理或化学手段，增加沥青混合料的施工可操作性，同时这些物理或化学添加剂不应应对路面使用性能造成负面影响。

温拌技术是工艺革新技术，非新材料技术。判断是否是温拌技术，主要有以下两个界定标准：

1) 温拌混合料应用于路面面层各层,需满足现行沥青路面施工技术规范面层技术要求。尤其是材料使用性能的技术要求,不允许妥协。

2) 采用热拌全套设备和工艺流程施工,所有工艺操作温度比热拌显著下降(30~60℃)。下降30℃以上,既是节能环保的要求,也是减轻材料老化的要求。

要满足温拌技术的两个基本标准,需要把握两个技术关键点:

1) 温拌技术应该是一个过程性改变的技术,它需要在沥青混合料拌合、运输、摊铺、压实过程中发挥作用,使得温度下降后材料工作性仍然很好。但是,这样的影响又不希望是材质性的,不希望明显影响胶结料的性能和混合料的配比,以避免产生不可预料的副作用。当然,同时还有用量和成本的考虑。

2) 温拌的出料温度显著下降,石料加热温度相应下降,拌合过程中石料与沥青的物理性的浸润作用(沥青渗入石料表面细微纹理)随之下降,而热拌沥青混合料粘附力主要靠浸润来实现的。因此,任何一种温拌技术,都必须采取相应措施弥补浸润下降带来的粘结力损失。

考察一个温拌技术是否有应用前途,除了技术实施的方便程度和成本外,需要从混合料拌合、摊铺压实、完工后常态的存在状态三个阶段,来考察温拌添加剂和/或工艺的作用:

1) 石料温度下降后,如不采取措施,沥青对石料的浸润必然下降。温拌添加剂/温拌工艺如何在拌合的过程中帮助裹附并形成有效的粘附力?

2) 在明显下降的摊铺面温度下,通过什么样的机理在多大程度上能够帮助混合料的碾压?换句话说,降低到什么样的温度条件混合料仍然能够实现充分的压实?

3) 添加剂在混合料中最终的存在状态是什么样的?一般而言,希望添加剂对混合料的性能完全不产生负面影响(通常是对胶结料特性产生影响)。比较理想的状态是,添加剂最终不在胶浆内存在。

1.3 主要技术路线和发展趋势

2007年以来,全球温拌技术进入快速发展阶段,新技术层出不穷。截至2009年底,已经进入应用或初步应用阶段的温拌技术已经近20种。尽管新的技术还在不断涌现,但按照工作机理,温拌技术基本上都可以归入三个主要技术类型:

1) 降黏型温拌技术,添加高温黏度很低的有机降黏剂,降低胶结料黏度。这类有机添加剂以蜡或蜡状物为主;

2) 发泡型温拌技术,通过自由水或结晶水,采用机械或细集料带水激发沥青发泡来临时性降低沥青的黏度;

3) 表面活性温拌技术,与前两种不同,表面活性温拌技术采用少量的表面活性添加剂、水与热沥青在拌合过程中共同作用,借助拌合的强大分散能力实现彼此交织。表面活性剂富集于残留微量水和沥青的界面,三者共同作用,暂时性在胶结料内部形成较为稳定的结构性水膜。由于水膜润滑作用不受温度影响,温度下降时,水膜润滑作用能够很大程度抵消沥青黏度增大的作用,从而实现温拌效果。

1.3.1 降黏型温拌技术

热拌沥青混合料的施工工作性取决于沥青的高温黏度，而其抗变形能力与沥青在夏季路面使用温度条件下的黏度相关。添加有机类添加剂，使得沥青高温黏度下降，但同时夏季温度下黏度不变化，甚至提高，可以说是温拌最朴素的技术思路。该技术路线也是目前国内仅次于表面活性技术的进入实际应用阶段的技术。最具代表性的是 Sasobit、SAK 和 Rediset。

1.3.1.1 Sasobit

此为德国 Sasol Wax 公司的产品，原为抗车辙添加剂，后因其具有一定的降低施工温度的作用，被用作温拌添加剂。Sasobit 是由煤气采用“费-托工艺”生产出的长链石蜡，其主链分子中含有 40~115 个碳原子，众所周知，天然石蜡是对沥青高温性能有害的成分，主要原因是软化点和熔点偏低，但 Sasobit 分子链高于天然石蜡（22~45 个碳原子），因此软化点明显提高。其熔点大于 100℃，高于普通石蜡，在超过 115℃ 时，能完全溶解于沥青。Sasobit 可以明显降低沥青的高温（135℃）黏度，但提高沥青的低温（60℃）黏度。在低于熔点时，Sasobit 在沥青胶结料里呈现出晶格结构，使 WMA 具有更好的稳定性和抗车辙能力。在 WMA 里，Sasobit 的通常掺量为沥青的 2%~4%，不宜超过 4%，以免影响沥青的低温性能。Sasobit 的应用有两种方法：加入热沥青中简单搅拌大约 30~60min，即可均匀融解于沥青中；或直接投进拌缸中与热集料拌合，降低拌合温度。但是，蜡的存在降低石料与沥青的粘结和低温性能，所以不能一味提高 Sasobit 的用量来达到更高的降温效果。

1.3.1.2 SAK

赛克（SAK）温拌剂是国内生产的一种新型普适沥青改性剂，它基本接近 Sasobit 的技术路线，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。它能直接掺入基质沥青内，改变沥青黏度，降低其施工拌合温度。

1.3.1.3 Rediset

AkzoNobel 公司的温拌添加剂 Rediset，采用的也是降低沥青黏度的成分。但同时还含有抗剥落成分，一定程度上弥补了胶结料与石料粘结的缺陷。

降黏技术路线最大的问题来自降黏添加剂用量的矛盾。用量少很难达到大的降温效果，但用量增大，虽然能够取得好的降温效果，但对胶结料材料性质改变过大，往往产生意想不到的副作用。

1.3.2 发泡型温拌技术

该方法的基本原理是在混合料拌合过程中或者沥青进入拌合锅/筒之前导入水，诱发沥青发泡，通过发泡形成的沥青膜结构来实现较低温度下对集料的裹覆，同时降低沥青混合料操作温度。按照发泡方法的不同，又可分为拌合过程细微发泡和拌合前机械发泡两种类型。发泡工艺实现降低施工温度一般都较为成功，但单纯的发泡，沥青与石料的粘附力通常不能令人满意。该技术路线现在在国内还处在试验引进阶段。代表性的技术有 Aspha-Min、WAM-Foam、LEA、ASTEC 绿色双滚筒等。

1.3.2.1 Aspha-Min 沸石

德国 Eurovia Services 公司的产品, 是一种白色超细粉末, 成分为铝硅酸钠, 内部为连通多孔结构, 有较大的孔隙, 比表面积很大, 可吸收其质量约 21% 的水分, 在 85~182℃ 时会释放出来, 当加入大约 0.3% (重量比) 该种沸石到沥青混合料中时, 水分会随着时间的延长而慢慢释放出来, 从而产生连续的发泡反应, 因此, 在与热的集料拌合时会出现薄薄的水气。结合料中的发泡反应起到润滑剂的作用, 从而使混合料在低温下具有可工作性, 混合料的拌合温度亦显著降低。其掺量为混合料总质量的 0.3%, 与沥青一起添加。与 HMA 相比, 拌合与压实温度可降低约 30℃。该技术不必改变现有热拌厂的设备, 而操作上与 HMA 相同。

Aspha-Min 发泡的倍数小, 属于细微发泡, 水的释放可以持续到 100℃, 可以持续发泡, 长时间维持混合料的工作性。

1.3.2.2 WAM-Foam

该技术是由英国的 Shell (壳牌) 国际石油公司和位于挪威奥斯陆的 Kolo-Veidekke (科洛维德克) 公司共同开发的, 它是一种两阶段法生产 WMA 的技术。第一步, 将温度为 100~120℃ 的软沥青与矿料在 110℃ 左右充分拌合, 使软沥青完全裹覆于矿料表面; 第二步, 将冷水注入加热了的硬沥青中, 使硬沥青大量发泡, 将硬沥青以泡沫形式喷入, 并迅速与裹覆了软沥青的矿料拌合, 由于沥青发泡后体积增加数倍且黏度明显降低, 因此可在温度较低的条件 (100~120℃) 下拌合均匀。这样, 软质沥青和泡沫化的硬沥青都能起到降低结合料黏度的作用, 从而实现良好的工作性。该技术的混合料拌合温度在 100~120℃ 之间, 并在 80~90℃ 之间摊铺和碾压。因而使用该技术能降低 30% 的能耗, 同时减少 30% 的 CO₂ 排放和 50%~60% 的灰尘排放。但是该技术需要改装泡沫化的设备, 在美国估计要花费 5~7 万美元。该技术主要在欧洲应用, 如挪威奥斯陆环城路等。

WAM-Foam 是利用水的瞬间汽化来发泡沥青, 发泡倍数大、半衰期短。这种技术的关键在于必须选择合适的软、硬沥青种类以及二者的比例, 以满足混合料相应的路用性能要求。另外, 在第一阶段必须保证集料干燥, 防止水分存在于集料表面。必要时, 需掺加抗剥落剂以增强抗水损害能力。

由于软硬沥青均不易得, WAM 现较少使用。2007 年以后, 采用最多的机械发泡温拌技术是 ASTEC 的绿色双滚筒。机械发泡类技术主要的技术优势是成本低, 除了设备添置的一次性成本, 使用成本很低, 该技术目前尚未引入中国, 其主要的问题是:

- 1) 没有采取主动措施增进裹附和粘结力, 为了保证有效的裹附, 拌合和出料温度下降有限, 达不到 30℃ 以上, 如果勉强达到 30℃, 沥青和石料的粘附通常会出现问题;
- 2) 不是所有的基质沥青都能够发泡, 而国内常用的 SBS 改性沥青是无法有效发泡的;
- 3) 发泡装置适合于连续式作业, 与连续式拌合楼配套, 但我国国内间歇式拌合楼占据统治地位。

1.3.2.3 Low Energy Asphalt (LEA, 也叫 EBE 和 EBT)

LEA 是法国 LEACO、Fairco 和 EiffageTP 的专利技术。它是依靠湿冷的沙子 (细集料) 和填料搅拌到 120~160℃ 干燥的裹覆了热沥青的粗集料里, 水汽从集料里逸出并激发出泡沫, 泡沫化的沥青完全拌合并裹覆集料, 最终形成了 WMA。LEA 的生产温度在 90~100℃ 之间, 而 HMA 是在 150~180℃ 之间。LEA 的混合料摊铺、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。该技术生产的混合料看起来与 HMA 没有什么区别。而且易于操作，提高了工作的舒适性和安全性，可以节省超过 50% 用于加热的能源，减少 80% 的尘埃，减少约 50% 的温室气体排放，因而它获得 2006 年法国 INTERMAT 创新奖。LEA 的混合料可以使用再生料。在 2006 年就进入了美国市场。LEA 方法的降温非常显著，同时，由于加入了抗剥落的成分，黏聚力和抗水损坏性能也没有损失。除了成本相对较高，其技术困难之处主要在于：

- 1) 含水细集料的处理和获得；
- 2) 含水细集料的导入装置、导入时机和导入通道，设计复杂，涉及较多的拌合楼改造。

通过产生泡沫制备温拌沥青混合料的技术 表 1.2

名 称	厂家	技术原理	降温效果/温拌温度
Advera	PQ	含水量约 20% 的合成沸石占混合料的 0.3%	降温 25~30℃
Aspha-Min	Hubbard	含水量约 20% 的合成沸石占混合料的 0.3%	降温 25~30℃
LEA EBE	Fairco	部分集料含水发泡	拌合<100℃
LT Asphalt	Nynas	添加含水的填料占混合料 0.5%~1.0%	90℃
WAM-Foam	Shell	先加软沥青和水，产生泡沫，然后再加硬沥青，并掺抗剥落剂	110~120℃
Double Barrel Green	Astec	改进设备直接加水产生泡沫，添加的水分占沥青的 1%~2%	115~135℃
Terex Warm	Teres	改进设备直接加水产生泡沫，添加的水分占沥青的 2%	120℃
Mix Asphalt			
Ultrafoam GX	Gencor	改进设备直接加水产生泡沫，添加的水分占沥青的 1%~2%	120℃

1.3.3 表面活性型温拌技术

表面活性型技术路线的特点是：少量的表面活性添加剂、水与热沥青在拌合过程中共同作用，借助拌合的分散能力实现彼此融合。表面活性剂富集于残留微量水和沥青的界面，三者共同作用，暂时性地在胶结料内部形成较为稳定的结构性水膜。由于水膜润滑作用不受温度影响，温度下降时，水膜润滑作用能够很大程度抵消沥青黏度增大的作用，从而实现温拌效果。这一技术路线到目前为止主要的产品是美国 Evotherm。

2003 年，作为全球主要的乳化剂供应商，基于其路面用表面活性技术平台，美国 Meadwestvaco 公司开发了 Evotherm 技术。2003 年 11 月，该技术首次在南非实施试验段。此后，该技术在全球不断积累应用经验的基础上，经过了 1 次工艺革新，2 次产品升级，技术趋于成熟。2007 年底开始，技术应用全面转入规模化阶段。

该技术的演进经历了三个阶段。2003 年~2007 年上半年，Evotherm 技术采用的是乳化沥青添加模式（ET），即将添加剂首先作为乳化剂生产一种高残留物（70%）乳化沥青，将该乳化沥青通过沥青管路投放到拌合锅进行拌合。该方式最大的好处是水、沥青、

添加剂在乳化沥青中已经达到了充分的混合。然而，尽管项目实施都很成功，但乳化沥青的保温（80℃）和与现有热沥青管路的配合，在实际施工中遇到了巨大的困难，而且过大的水量也极大地降低了节能效果。另外，由于添加剂首先要求有乳化作用，沥青首先要求能乳化，也限制了一些材料的使用。

2007 年开始，采用了直投式添加模式（DAT）。直接用添加剂配制一定浓度的水溶液，在沥青和集料拌合过程中喷入该溶液（添加剂通过简易的独立系统送入拌合锅），经充分搅拌后生产温拌混合料。直投式的采用，极大地增大了添加剂供应的便利性，同时由于添加的水量仅相当于乳化沥青模式的 10%~20%，节能效果更加明显。对沥青几乎没有选择性。对设备和材料的适应性，使得 Evotherm 与现有沥青混合料技术体系实现了无缝链接。Evotherm 的混合料操作温度比同型号热拌沥青混合料相比普遍下降 30~60℃。直投式添加模式的采用为添加剂本身的技术升级带来了技术空间。开始的水溶液需要调强酸强碱，无法很好兼顾添加剂水溶液的稳定性、沥青对石料裹覆粘结等工程特性。直投式添加方式采用后不久，添加剂即升级为稳定中性水溶性型，完全解决了添加剂的稳定性问题。

2008 年初，添加剂成分进行了抗剥落加强。对于采用后两代添加剂的温拌混合料，已经没有了添加抗剥落剂的必要。

相比于 ET，DAT 的添加固然大大简化，但是，仍然需要配置浓缩液设备和在拌合楼安装添加系统，加工和添加环节需要质量控制工作。对于用量不大的项目、偏远项目，配套和技术支持的成本和难度仍偏大。为适应更多地区的要求，并增加供应的灵活性，2008 年末开始，美国开始第三代技术（3G）的应用，目前已经占据了表面活性剂应用的半壁江山。2009 年底引进我国，已经完成了初步的室内评估，目前已成功进行了数条试验路。

表面活性类温拌混合料技术是国际上主要的已商用温拌沥青混合料技术之一。截至 2010 年，我国 90% 以上的温拌混合料实际工程中采用了这一技术。

2 技术路线比较

2005 年, Evotherm 在北京铺设了国内首个以温拌为研究主题的试验路。而在此前后, Sasobit 作为抗车辙添加剂在国内开始了一定范围的应用。2007 年后, 随着国内道路工程对温拌技术的关注度持续升温, 作为国际上开始温拌应用研究较早的技术, Sasobit 也开始了国内的温拌应用尝试。而此时, 与 Sasobit 技术路线接近的国产添加剂 SAK 也开始进入温拌领域。因此, 这三个技术, 也成了这个阶段研究者涉及最多的温拌技术。

室内进行比较研究试图解释温拌机理, 同时, 在室内性能试验比较, 并进一步试验路研究的基础上, 进行技术路线的比较和技术适应性研究, 也成了多数研究者开始温拌研究第一步进行的工作。

选择一个适宜的温拌技术, 需从温拌添加剂在三个阶段的作用的存在状态着手:

(1) 温拌拌合温度下降, 通常主要是石料加热温度下降。石料温度下降后, 沥青对石料的裹附和浸润势必下降, 需要采取措施弥补这一损失。

(2) 热拌工艺中, 沥青流动性决定了混合料工作性。沥青的流动性对温度高度敏感。如何在温度下降 30℃ 以上的情况下, 保持混合料的工作性?

(3) 温拌是一个工艺性革新技术, 目的是为了实现在温拌, 而最有前途的温拌技术肯定是实现温拌的同时对材料体系和性能影响最小的技术。

2.1 Sasobit

Sasobit 是一种窄分布的合成饱和碳氢化合物的混合物, 是一种长链脂肪烃, 一种硬蜡, 经由煤炭气化, 用 F-T 法制成。众所周知, 沥青中蜡含量偏高会对沥青的高低温性能均会产生明显的负面影响, 但高分子蜡在高温性能方面的表现有很大的不同。沥青中的蜡分子一般只含有 22~40 个碳原子, 而 Sasobit 分子是含有 40~120 个碳原子的长链脂肪烃。蜡在温度低于熔点时, 会在沥青中形成网状的晶格结构, 从而增加沥青的稳定性, 提高路面在该温度范围内的抗变形性能。Sasobit 的熔点在 100℃ 左右, 而且可以完全融解在温度高于 115℃ 的沥青中, 在该温度下, Sasobit 的黏度非常低, 可以降低沥青的黏度。该降低幅度, 相当于使拌合温度降低 7~12℃。在路面使用温度范围内 (60~90℃) 时, Sasobit 在沥青中形成网状的晶格结构, 增加沥青的稳定性, 提高路面在使用温度范围内的抗车辙性能。供应商建议 Sasobit 的推荐掺量是沥青用量的 3%, 不超过 4%, 以免影响到沥青的低低温性能。Sasobit 在高温沥青中简单地机械搅拌即可均匀地融解分布于沥青中, 并不必要进行高速地剪切搅拌。

作为德国发源的技术, 德国本土的应用不得不提。2003 年, Sasobit 在法兰克福机场的重建工程中得到了成功的应用。由于法兰克福机场是欧洲的重要交通枢纽, 重建工程要求不能影响航班的起降, 所以只能在夜间小块施工, 且必须能很快开放交通。在招标合同

上注明了对沥青混合料的施工温度的要求, 规定为 125℃ 的铺面温度, 而作为枢纽空港, 法兰克福机场飞机起降量非常大, 要求沥青路面的高温稳定性很好, 这对热拌改性沥青混合料几乎是不可调和的矛盾。承建方选择了基质沥青加入 Sasobit 制备温拌沥青混合料, 结果施工温度比平时降低了 50℃ (与采用的改性沥青混合料相比), 铺筑碾压过的路面温度约为 100℃, 经 1.5 小时后, 大约会再冷却 15℃。即使如此, 仍然能让 330 吨重的飞机降落时, 不使跑道损坏, 项目取得了成功。

2.1.1 Sasobit 掺量对沥青指标的影响

1. Sasobit 掺量对普通沥青针入度、延度、软化点的影响

试验采用 70 号沥青, 不同掺量温拌剂对沥青针入度、软化点、延度的影响见表 2.1 及图 2.1~2.3。

不同 Sasobit 掺量对 70 号沥青指标的影响 表 2.1

温拌剂掺量 (%)	针入度 0.01mm	软化点 (℃)	延度 (15℃)
0	65.1	48.5	150
1	53.7	49.7	150
2	49.6	56.1	142
3	47.2	65.9	129
4	46.1	80.2	107

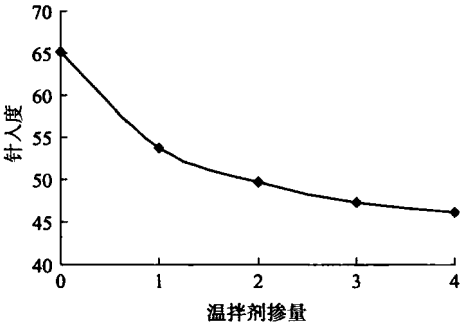


图 2.1 针入度随 Sasobit 掺量变化曲线图

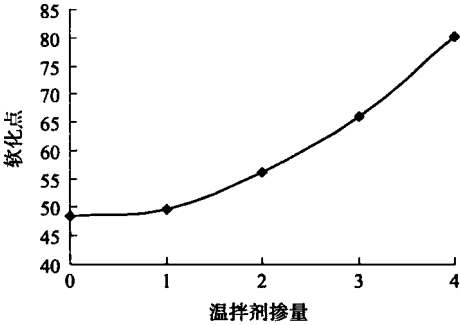


图 2.2 软化点随 Sasobit 掺量变化曲线图

在 70 号沥青里掺入 Sasobit 温拌改性剂后, 沥青的软化点明显升高, 且随掺量的增加而升高, 同时针入度随着 Sasobit 掺量的增加而降低, 说明在 70 号沥青里掺入 Sasobit 温拌改性剂后, 可以大幅度地提高沥青的高温性能。

沥青的 15℃ 延度, 掺入温拌改性剂会使沥青的低温延度降低, 且都随着掺量的增加而进一步降低, 说明掺入温拌改性剂会降低沥青的延度, 即降低了沥青的低温性能。

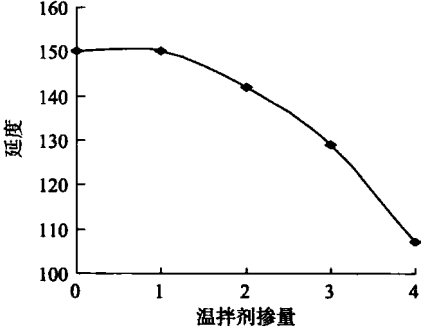


图 2.3 延度随 Sasobit 掺量变化曲线图

2. Sasobit 掺量对 SBS 改性沥青针入度、延度、软化点的影响

试验采用 I-D 型 SBS 改性沥青, 不同掺量温拌剂对沥青针入度、软化点、延度的影响见表 2.2 及图 2.4~2.6。

在 SBS 改性沥青里掺入 Sasobit 温拌改性剂后, 同样表现出沥青的软化点升高, 但是不如 70 号沥青表现得明显, 且随掺量的增加而升高, 同时针入度随着 Sasobit 掺量的增加而降低。掺入温拌改性剂会使沥青的低温延度降低, 且都随着掺量的增加而进一步降低, 说明掺入温拌改性剂会降低沥青的延度, 即降低了沥青的低温性能。

不同 Sasobit 掺量对 SBS 改性沥青指标的影响 表 2.2

温拌剂掺量 (%)	针入度 0.01mm	软化点 (°C)	延度 (15°C)
0	48.8	80.7	29.1
1	34.4	82.3	16.3
2	31.2	82.8	13.4
3	26.4	85.1	8.6
4	20.8	87.9	7.1

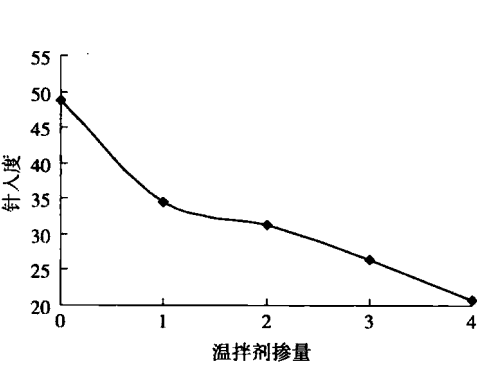


图 2.4 针入度随 Sasobit 掺量变化曲线图

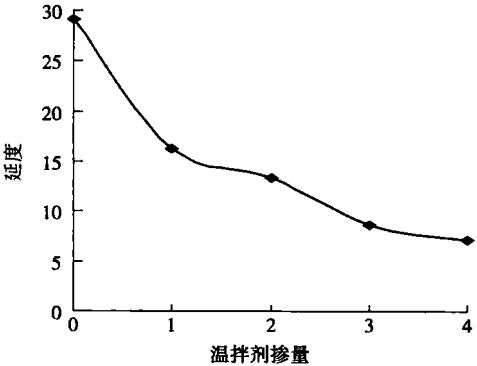


图 2.5 延度随 Sasobit 掺量变化曲线图

说明在改性沥青中掺入 Sasobit 温拌改性剂后, 路面高温性能的增加幅度不如加入基质沥青, 但副作用接近。非常明显的结论是, Sasobit 的加入会明显影响沥青三大指标, 从低温性能的角度出发, Sasobit 的掺量不宜超过 3%。

3. Sasobit 掺量对沥青黏度的影响

黏度是沥青材料流动性参数, 直接影响混合料的施工工作性。源于美国 SHRP 混合料设计方法, 我国《沥青路面施工技术规范》直接利用沥青黏度与温度的关系来预估沥青混合料的施工温度。作为通过降低沥青黏度来实现温拌的

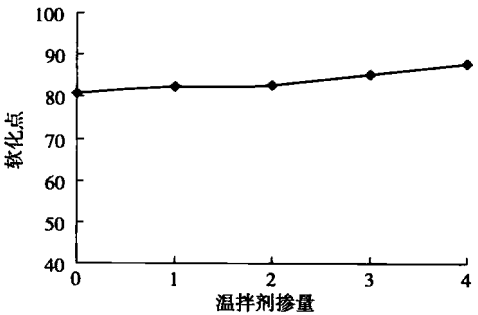


图 2.6 软化点随 Sasobit 掺量变化曲线图