

## 沥青混合料温拌技术的研究进展

唐 宁<sup>1</sup>, 王弘晔<sup>1</sup>, 符 聃<sup>2</sup>, 吴丽梅<sup>1</sup>, 王 晴<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

(2. 沈阳建筑大学外国语学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘 要:** 传统热拌沥青混合料由于需要在较高温度下生产和施工, 不仅会消耗大量的能源, 而且还会严重影响环境质量。因此, 如何降低沥青混合料的拌合温度、减少污染与能耗, 已成为道路工程界研究人员共同关注的科学问题和技术热点。温拌沥青混合料的出现为该技术难题提供了一种新颖、高效的解决思路。基于此, 较为全面地介绍了温拌沥青混合料的发展历程, 综述了国内外已有的温拌技术及其工作原理, 评价了温拌沥青混合料的路用性能, 阐述了制备温拌沥青混合料的新技术和新进展。以期道路工程界工程师在合理运用温拌技术设计沥青混合料和启发学者探索沥青混合料温拌技术的新方法、新方向等方面提供帮助。

**关键词:** 沥青; 沥青混合料; 温拌技术; 温拌助剂

**中图分类号:** TU535 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2020)09-0653-08

## Research Progress on Warm Mix Asphalt Technologies

TANG Ning<sup>1</sup>, WANG Hongye<sup>1</sup>, FU Dan<sup>2</sup>, WU Limei<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

(2. School of Foreign Languages, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** Due to its preparation and construction process being under relatively high temperature, traditional hot mix asphalt would result in not only a lot of energy consumption but also serious environmental pollution. Therefore, how to reduce the mixing temperature of asphalt mixture, as well as decrease environmental pollution and energy consumption, has become a common scientific issue and a technical hotspot for the researchers in road engineering area. The emergence of warm mix asphalt (WMA) has provided a novel and efficient solution for this technical problem. In the present work, the development history of WMA was introduced comprehensively. The warm mixing technologies existed worldwide and their technical mechanisms were summarized. The pavement performance of WMA was evaluated, and its novel preparation technologies and progress were described. It is in the hope that this paper could be helpful for the engineers to utilize the warm mixing technologies properly in designing asphalt mixtures and researchers to explore the new methods and directions of warm mixing technologies.

**Key words:** bitumen; asphalt mixture; warm mixing technologies; warm mix additive

### 1 前 言

在道路工程中, 沥青路面的铺设通常使用热拌沥青混

合料(hot mix asphalt, HMA)。但是, HMA 需要在 170 ℃ 左右拌合, 如此高的拌合温度会带来较高的能源消耗和二氧化碳排放, 从而造成严重的环境负荷<sup>[1]</sup>。因此, 温拌沥青混合料(warm mix asphalt, WMA)引起了科学界和工程界的广泛关注。WMA 是指在基本不改变沥青混合料配合比和施工工艺的前提下, 通过技术手段使其拌合温度降低 30~40 ℃ 以上同时性能达到与 HMA 相同水平的新型沥青混合料。沥青混合料拌合温度的降低会减少干燥和加热集料时燃料的消耗、降低温室气体和有毒气体的排放、极大地保护施工人员的身体健康、延长沥青路面的施工周期<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508344); 住房和城乡建设部项目(2019-K-051); 沈阳市中青年创新人才支持计划项目(RC190168)

第一作者: 唐 宁, 男, 1984 年生, 副教授, 硕士生导师

通讯作者: 王 晴, 女, 1965 年生, 教授, 博士生导师,

Email: wangqingmxxy@sjzu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202005015

为了节能减排, WMA 已经在世界各国得到了越来越广泛的应用。目前, 国内外学者对 WMA 已经开展了多方面的研究, 开发出了多种类型的温拌技术。与此同时, 随着温拌技术的飞速发展, 新型 WMA 的研发也有了許多报道。因此, 本文旨在通过系统地文献综述, 对各种温拌技术进行归纳和总结, 具体内容包括: WMA 的发展简史、优缺点、温拌技术、路用性能以及其最新进展。

## 2 温拌沥青混合料

WMA 的历史最早可以追溯到 1928 年德国人 August 申请的发明专利“泡沫沥青”<sup>[3]</sup>。1956 年, 爱荷华州立大学的 Ladis 教授将水蒸气通入到热沥青中形成了泡沫沥青<sup>[4]</sup>; 1968 年, 美国美孚公司 (Mobil Inc.) 获得了用冷水代替水蒸气的沥青发泡技术发明专利<sup>[4]</sup>; 1970 年, 美国康菲石油公司 (Conoco Inc.) 获得了 WMA 的市场准入许可, 进一步开展了 WMA 的实验室与现场研究<sup>[5]</sup>; 1977 年, 随着冷水发泡技术的成熟, 乳化沥青逐步被应用于制备 WMA<sup>[6]</sup>; 1980~2000 年间, 以英国壳牌公司 (Shell Inc.) 为代表的欧美研发机构陆续开展了泡沫沥青混合料温拌技术现场应用, 并开发了多种泡沫-沥青设备, 极大地促进了泡沫沥青混合料温拌技术的推广与应用<sup>[7]</sup>。

进入 21 世纪以来, 降低沥青拌合温度、减小沥青拌合粘度的方式不再单一, 可以通过添加温拌助剂实现, 因此, 国内外学者研发了多种温拌助剂。2004 年, 含水类温拌助剂出现, 如 Aspha-min<sup>®</sup><sup>[8]</sup>。此后, 国内外学者研发出了表面活性类、有机降粘类温拌助剂, 如 Evo-therm<sup>®</sup>, Sasobit<sup>®</sup>等<sup>[9, 10]</sup>。2006 年以后, 美国国家沥青中心 (NCAT) 和美国公路合作研究组织 (NCHRP) 连续发表了多份关于 Aspha-min<sup>®</sup>、Evo-therm<sup>®</sup>、Sasobit<sup>®</sup> 的 WMA 技术研究报告<sup>[11-15]</sup>。综上所述, 沥青混合料温拌技术的发展简史如表 1 所示<sup>[3-10]</sup>。

表 1 沥青混合料温拌技术的发展简史<sup>[3-10]</sup>

Table 1 A brief development history of warm mix asphalt technologies<sup>[3-10]</sup>

Year	Development	People/Institute
1928	Foam asphalt patent	August Jacob
1956	Steam foam asphalt	Ladis Csanyi
1968	Cold water foam asphalt	Mobil Inc.
1970	Market license of foam asphalt	Conoco Inc.
1977	Emulsified warm mix asphalt	Chevron Inc.
1995	Foamed warm mix asphalt	Shell Inc.
2004	Aspha-min <sup>®</sup>	Eurovia & MHI
2005	Evo-therm <sup>®</sup>	Meadwestvaco
	Sasobit <sup>®</sup>	Sasol

随着沥青混合料温拌技术的发展, 与 HMA 相比, WMA 的优势越来越突出。从环境保护角度来看, WMA 的拌合与压实温度更低, 可以使能耗降低 18%~30%<sup>[16]</sup>; 而且, 生产 WMA 时有害气体、温室气体、沥青烟等气体的排放量也有所减少。Vidal 等通过对 WMA 开展生命周期评价发现, 温拌技术可以减少 24% 的空气污染<sup>[17]</sup>。拌合温度的降低促使能耗与污染排放减少, 这为沥青混凝土路面施工带来了新契机; 此外, 沥青混合料的生产季节、运输时间和距离均得到了延长, 摊铺压实工艺得到了简化。从经济效益角度来看, 温拌技术减少了 20%~25% 的燃料用量<sup>[18, 19]</sup>, 可使 WMA 的生产成本降低 10%~30%<sup>[20, 21]</sup>。

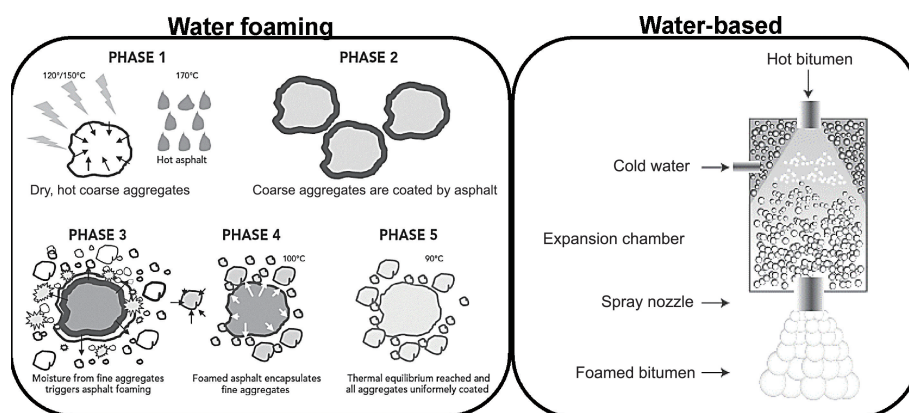
瑕瑜互见, 沥青混合料温拌技术在经济和技术上也存在缺点。首先, 在沥青混合料拌合时, 需要添置或改造一些设备。例如, 生产 WMA-Foam<sup>®</sup> 泡沫沥青时需要增加水罐、水进给装置、空气进给装置等; 而且, 一些温拌助剂需要增加喷淋装置或者投掷窗口<sup>[22]</sup>。其次, 温拌助剂的使用增加了额外的生产成本<sup>[23]</sup>。目前, 工程实际中常用的 Aspha-min<sup>®</sup>、Sasobit<sup>®</sup>、Evo-therm<sup>®</sup> 等温拌助剂的价格偏高, 一定程度上增加了沥青混合料的生产成本, 而减少的能耗只能补偿部分生产成本<sup>[23]</sup>。此外, 沸石类温拌助剂在拌合时产生的水蒸气会引起生产设备的锈蚀<sup>[24]</sup>。

## 3 沥青混合料温拌技术

目前, 沥青混合料温拌技术主要可分为 3 大类: 发泡降粘类、表面活性类和有机降粘类<sup>[25, 26]</sup>。这些技术的核心是通过减小沥青在拌合和压实时的粘度, 实现沥青混合料拌合与压实温度的降低。

### 3.1 发泡降粘类温拌技术

发泡降粘类温拌技术可分为两类, 一类是基于含水助剂, 如沸石、潮湿的集料等, 该类技术利用含水助剂在较高的拌合温度下, 可以使一定量的水在标准大气压下变成水蒸气, 此时水的体积可膨胀约 1.67 倍, 当水蒸气与热沥青接触时, 沥青的体积迅速膨胀, 从而降低其粘度和拌合温度<sup>[27]</sup>; 另一类是水基技术, 通过将冷水加入到热沥青中实现其粘度和拌合温度的降低。当冷水被通入到热沥青后, 随着水温逐渐升高, 形成的水蒸气被封装在热沥青中, 可使热沥青体积膨胀 5~10 倍。但是, 气泡膨胀随时间的推移会产生衰减, 泡沫沥青的体积会有一定程度的减小<sup>[28]</sup>。此外, 冷水也可以用乙醇或其他液体替代, 但这会增加 WMA 的生产成本<sup>[29]</sup>。发泡降粘类温拌技术的核心是将水分变为水蒸气, 利用水蒸气改变沥青的表面张力实现沥青粘度与混合料拌合温度的降低, 其降温机理如图 1 所示<sup>[18]</sup>。

图1 发泡降粘类温拌技术的原理图<sup>[18]</sup>Fig.1 Mechanism illustration of foam-based warm mixing technology<sup>[18]</sup>

常见的发泡降粘类温拌助剂如表2所示<sup>[11, 30-36]</sup>。Aspha-min<sup>®</sup>是德国 Eurovia 和 MHI 公司研发的产品, 是一种人工合成的非常细的白色粉末状沸石型铝硅酸盐。通常 Aspha-min<sup>®</sup> 的掺量为沥青混合料的 0.30% (质量分数, 下同) 时, 混合料的拌合温度可降低 40 ℃ 以上, 可节省约 30% 的能耗<sup>[11]</sup>。ADVERA<sup>®</sup> 是美国 PQ 公司生产的一种合成沸石类产品, 与 Aspha-min<sup>®</sup> 的功能相似, 区别在于 ADVERA<sup>®</sup> WMA 的粒径更细 (小于 75 μm), 比表面积更大, 其掺量可以降低到 0.25%。然而, 沸石类含水助剂由于需要水热合成导致其成本较高, 增加了沥青混合料的生产成本<sup>[30]</sup>。

WMA-Foam<sup>®</sup> 是壳牌公司和挪威克洛公司 (Kolo-Veidekke) 联合开发的沥青混合料温拌技术。该技术的核心是采用两种不同的沥青, 首先将软质沥青与集料在 110 ℃ 左右拌合, 使软质沥青与集料有一定的裹覆; 然后将硬质沥青以泡沫的形式喷入到上述混合料中, 硬质沥青在 110 ℃ 左右会持续发泡、体积增加, 从而降低沥青的粘度和混合料的拌合温度<sup>[31]</sup>。

LEA<sup>®</sup> (低能量沥青) 技术是法国 LEA 公司开发的一种温拌技术。与 WMA-Foam<sup>®</sup> 采用两种沥青不同, 该技术使用了两种不同状态的集料。首先将粗集料与沥青加热到 150 ℃ 拌合, 再加入湿冷的细集料, 利用其中的水分在沥青混合料中产生泡沫, 其出场温度可降低到 90 ℃, 且降温速率较慢, 可满足长运距的施工<sup>[32]</sup>。

此外, 荷兰 BAM 公司的 LEAB<sup>®</sup>、LEAC<sup>®</sup> 技术<sup>[33]</sup>, 瑞典 Nynas 公司的 LT Asphalt 技术<sup>[34]</sup>, 美国 Astec 公司的 Barrel Green 技术等<sup>[35]</sup>, 也都是将发泡沥青喷入到混合料中进行拌合的温拌技术。与此同时, 随着这些温拌技术在国内的工程实践, 我国也研发出了许多沸石类温拌助剂, 其掺量和性能表现与进口产品相当。例如, 深圳海川工程科技有限公司 (Haichuan) 开发的含水类温拌助剂 LCAP,

可使沥青混合料的拌合和压实温度下降 30 ℃ 左右, 从而节约 30% 的能耗, 并减少一定量的污染物排放<sup>[36]</sup>。

表2 发泡降粘类温拌助剂<sup>[11, 30-36]</sup>Table 2 Foam-based warm mix additives<sup>[11, 30-36]</sup>

Additive	Institute	Dosage	Mixing temperature/℃
WMA-Foam <sup>®</sup>	Shell Inc. & Kolo-Veidekke	Water-based	110~120
Aspha-min <sup>®</sup>	Eurovia & MHI	0.30wt% of mixture	130~140
ADVERA <sup>®</sup>	PQ USA	0.25wt% of mixture	130~140
LEA <sup>®</sup>	LEA	0.30wt% of binder	<100
LEAB <sup>®</sup>	BAM	0.10wt% of binder	90
LT Asphalt	Nynas	1.00wt% of binder	90
Barrel Green	Astec	Water-based	100~110
LCAP	Haichuan	0.30wt% of mixture	130~140

### 3.2 表面活性类温拌技术

表面活性类温拌技术, 主要指的是以乳化剂或表面活性剂为基础的温拌技术。这类温拌技术不仅可以通过改变沥青粘度来降低混合料的拌合温度, 而且还能在不影响沥青性能的前提下, 实现较低拌合温度下沥青与集料之间粘附力的提升。乳化剂类温拌技术是采用乳化沥青替代普通热沥青与集料进行拌合, 乳化沥青中的乳化剂可以提升沥青与集料间的粘附力; 而且, 乳化沥青中含有大量水分, 遇到加热过的集料会迅速破乳形成水蒸气, 从而进一步改善沥青混合料的和易性<sup>[37]</sup>。表面活性剂类温拌技术是将表面活性剂的浓缩液直接加入到沥青混合料中进行拌合, 表面活性剂可在混合料内部形成结构性水膜, 该水膜在沥青混合料温度降低时, 可以有效抵抗其粘度的降低, 从而达到温拌效果<sup>[38]</sup>, 技术原理如图2所示。



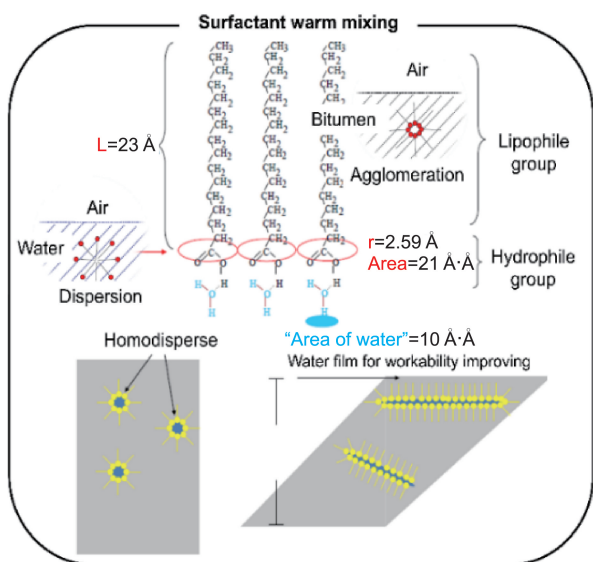


图 2 表面活性类温拌技术的原理图

Fig. 2 Mechanism illustration of surfactant-based warm mixing technology

表 3 为常见的表面活性类温拌助剂<sup>[13, 39-44]</sup>, 其中美国 Meadwestvaco 公司开发的 Evotherrm<sup>®</sup>最具代表性。2005 年, Evotherrm<sup>®</sup>温拌助剂进入我国并得到大力推广, 在我国多个省份的温拌沥青道路工程中被广泛应用。其技术核心是采用物理-化学联合作用使沥青在拌合过程中内部产生水膜润滑结构, 从而得到充分分散, 实现沥青混合料在较低温度下的拌合及压实, 且不会对其路用性能产生负面影响。Evotherrm<sup>®</sup>温拌助剂的主要成分是一种表面活性剂, 其分子链一端是亲油的长碳链基团, 另一端是亲水的极性基团, 这样的分子结构决定了其在沥青混合料拌合时具有一定的富集特性与溶解特性<sup>[13]</sup>。

目前, Evotherrm<sup>®</sup>温拌助剂已经发展了多种同类型的产品, 包括 Evotherrm-DAT(含水型)与 Evotherrm-3G(无水型)。Evotherrm-DAT 是一种表面活性剂的水溶液, 其亲水的极性基团向水和空气聚集, 达到临界状态后, 另一端的亲油基团发生富集, 最终形成球状分子胶团。在沥青混合料拌合时, 胶团的亲油基团与沥青融合, 而亲水基团形成润滑膜, 从而在降低混合料拌合温度的同时提升沥青与集料的粘附力<sup>[39]</sup>。Evotherrm-3G 是一种深黄褐色的粘稠状表面活性剂(不含水分), 是通过改变沥青分子间的极性、沥青和集料间的表面张力以达到温拌的目的<sup>[40]</sup>。

Ceca-base RT<sup>®</sup>是法国 Arkema 公司生产的一种以表面活性剂为主且不含水分的液态助剂, 其掺量通常是沥青的 0.20%~0.30%, 可在 100℃左右实现沥青混合料的拌合<sup>[41]</sup>。此外, 加拿大 COCO 集团开发的 Hypertherm/Qualitherrm<sup>[42]</sup>和荷兰 Akzo Nobel 公司研发的 Rediset WMX<sup>®</sup><sup>[43]</sup>也都是以表面活性剂为基础的温拌助剂。

随着 Evotherrm<sup>®</sup>温拌助剂在国内大力推广, 以其生产的 WMA 具有优异的温拌效果与路用性能, 引起了国内许多高校、企业研发机构的关注, 他们也进行了相关研究与开发。内蒙古工业大学(IMUT)自主研发的表面活性类温拌助剂 SYDK, 其掺量为沥青的 0.60%时, 可获得具有较优路用性能的 WMA<sup>[44]</sup>。

表 3 表面活性类温拌助剂<sup>[13, 39-44]</sup>Table 3 Surfactant-based warm mix additives<sup>[13, 39-44]</sup>

Additive	Institute	Dosage in binder/wt%	Mixing temperature/℃
Evotherrm <sup>®</sup>	Meadwestvaco	0.60	85~115
Ceca-base RT <sup>®</sup>	Arkema	0.20~0.30	90~100
Hypertherm/Qualitherrm	COCO	0.20~0.30	120
Rediset WMX <sup>®</sup>	Akzo Nobel	0.50~1.00	120~130
SYDK	IMUT	0.60	100~120

### 3.3 有机降粘类温拌技术

沥青的组成十分复杂, 通常采用以下四组分定义其组成, 包括饱和分、芳香分、胶质和沥青质。基于胶体理论, 沥青的胶体结构是以沥青质为胶核, 胶质被吸附在沥青质表面, 逐渐向外扩散形成胶团, 胶团分散于芳香分和饱和分中<sup>[45]</sup>。有机降粘类温拌技术主要是使用有机材料作为温拌助剂, 将其加入到沥青或沥青混合料中, 在高温条件下温拌助剂溶解入沥青中, 通过调整沥青组成, 降低沥青的粘度和混合料的拌合温度<sup>[33]</sup>, 其技术原理如图 3 所示。

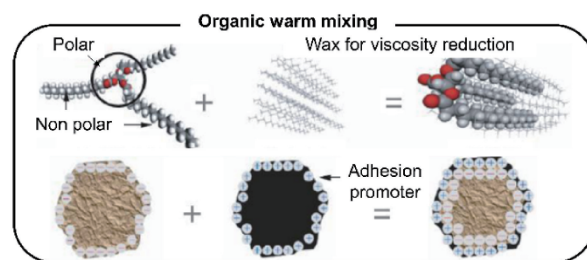


图 3 有机降粘类温拌技术的原理图

Fig. 3 Mechanism illustration of organic-based warm mixing technology

有机降粘类温拌助剂通常以蜡基有机材料为主, 常见的类型如表 4 所示<sup>[12, 45-48]</sup>。Sasobit<sup>®</sup>是南非 Sasol 公司的有机降粘类温拌助剂, 它是利用费托合成技术制备的一种长链脂肪族烃细结晶体, 外观呈白色粉末状。其熔化温度介于 100~115℃之间, 融化后可以全部溶解于沥青中充当饱和分, 从而改变沥青组分中软组分的含量, 使沥青的含蜡量增加、温度敏感性增强、粘度降低。当 Sasobit<sup>®</sup>的掺量为沥青的 0.80%~3.00%时, 沥青混合料的拌合温度最低可降至 130℃。Sasobit<sup>®</sup>是目

前应用较多的有机降粘类温拌助剂,但其成本较高<sup>[12]</sup>。

德国 Romonta 公司的 Asphaltan-B<sup>®</sup>温拌助剂,是一种褐煤蜡与高分子烃的混合物,熔点约为 99 ℃,其在沥青中的掺量及以其制备的沥青混合料的物理化学性能、路用性能均与 Sasobit<sup>®</sup>的相似<sup>[18]</sup>。德国 Clariant 公司生产的 Licomont BS<sup>®</sup>温拌助剂,是一种脂肪酸氨基化合物,掺量可达沥青的 3.00%,但其熔点较高(约为 140 ℃),降低沥青混合料拌合温度的效果有限<sup>[46]</sup>。韩国建筑技术研究院(KICT)的 Leadcap<sup>®</sup>温拌助剂,是一种颗粒状的低分子量石蜡,其熔点为 100~115 ℃,添加后可实现沥青混合料在 100~110 ℃下拌合。

此外,我国也研发了多种有机降粘类温拌助剂。Haichuan 公司在含水类温拌助剂的基础上,进一步开发了 EC-120 有机降粘类温拌助剂。它是一种颗粒状的长链脂肪族化合物,熔点在 94~114 ℃之间,掺量为沥青的 3.50%~5.00%,可以使沥青混合料的拌合温度降低约 30 ℃<sup>[47]</sup>。交通运输部公路科学研究院(RIOH of China)研发的 RH-WMA,是一种聚烯烃类温拌助剂,其掺量约为沥青的 4.00%,在 130 ℃下以其拌合的沥青混合料的路用性能与普通 HMA 的相当<sup>[48]</sup>。

表 4 有机降粘类温拌助剂<sup>[12, 45-48]</sup>

Table 4 Organic-based warm mix additives<sup>[12, 45-48]</sup>

Additive	Institute	Dosage in binder/wt%	Mixing temperature/℃
Sasobit <sup>®</sup>	Sasol	2.50	85~115
Asphaltan-B <sup>®</sup>	Romonta	2.50	90~100
Licomont BS <sup>®</sup>	Clariant	3.00	120
Leadcap <sup>®</sup>	KICT	3.00	100~110
RH-WMA	RIOH of China	3.00	130~150
EC-120	Haichuan	3.00	130~150

综上所述,道路工程市场上的温拌技术或产品高达 20 多种。我国的温拌技术走的是“引进-消化-自研”模式,与国际主流技术几乎相同,性能也相似,目前已经形成了“百花齐放、百家争鸣”的竞争格局。

#### 4 温拌沥青混合料的路用性能

沥青混合料的路用性能包括:体积特性、温度敏感性(高温稳定性和抗低温开裂性)、水稳定性。表 5 为 WMA 与 HMA 的路用性能对比结果<sup>[11-15, 27-48]</sup>。

体积特性是指沥青混合料的空隙率、矿料间隙率(VMA)、沥青饱和度(VFA)等体积相关指标。温拌助剂的加入可以降低 VMA 和 VFA,从而提高沥青混合料的表观密度和压实度。但从表 5 中可以看出,WMA 和 HMA

的体积特性之间没有显著差异。

表 5 温拌沥青混合料与热拌沥青混合料的路用性能对比结果<sup>[11-15, 27-48]</sup>

Table 5 The comparison results of pavement performance between WMA and HMA<sup>[11-15, 27-48]</sup>

Additive	Volume characteristic	Anti-rutting	Anti-crack	Anti-moisture
WMA-Foam <sup>®</sup>	↔	↓	↔	↓
Aspha-min <sup>®</sup>	↗	↘	↘	↓
ADVERA <sup>®</sup>	↔	↘	↘	↓
Asphaltan-B <sup>®</sup>	↔	↘	↘	↓
LEA <sup>®</sup>	↔	↗	↓	↓
Evotherm <sup>®</sup>	↔	↘	↗	↔
Ceca-base RT <sup>®</sup>	↔	↘	↗	↗
Rediset <sup>®</sup>	↔	↘	↗	↗
Sasobit <sup>®</sup>	↔	↑	↘	↘

Note: ↑-increase, ↓-decrease, ↔-no significant effect, ↗-slightly increase, ↘-slightly decrease

温度敏感性中,高温稳定性是指沥青混合料在高温下抵抗荷载变形的能力,主要通过动稳定度试验或汉堡车辙试验来表征;抗疲劳开裂性是指沥青混合料在低温下的抗疲劳开裂能力,主要通过基于弹性模量的疲劳弯曲试验等来表征。由表 5 可以看出,相较于 HMA, WMA 的温度敏感性整体上略有下降。例如,含水发泡降粘类的 Aspha-min<sup>®</sup>、ADVERA<sup>®</sup>和表面活性类的 Evotherm<sup>®</sup>、Rediset<sup>®</sup>都使 WMA 的高温稳定性小幅下降;而利用水基技术的 WMA-Foam<sup>®</sup>则显著降低了沥青混合料的高温稳定性。此外,有机降粘类的 Sasobit<sup>®</sup>提高了沥青混合料的高温稳定性,而 WMA 的低温抗开裂性均有不同程度的下降。

水稳定性是指沥青混合料在受水作用时抵抗破坏的能力,主要通过浸水试验、冻融循环试验来表征。不同类型的温拌助剂对沥青混合料水稳定性的影响各不相同。含水发泡降粘类的 Aspha-min<sup>®</sup>和 ADVERA<sup>®</sup>、有机降粘类的 Asphaltan-B<sup>®</sup>和 Sasobit<sup>®</sup>会使沥青混合料的水稳定性下降。但是,表面活性类的 Ceca-base RT<sup>®</sup>和 Rediset<sup>®</sup>会小幅提升 WMA 的水稳定性,Evotherm<sup>®</sup>的影响并不显著。

综上所述,不同的温拌助剂由于降温机理不同,导致 WMA 的路用性能不同。与 HMA 相比, WMA 的体积特性无显著变化;高、低温稳定性略微提升或下降,变化并不明显;水稳定性多呈现降低现象。但总体而言,它们的路用性能均能满足相关技术规范要求。

## 5 温拌沥青混合料的新进展

通过添加温拌助剂降低沥青混合料拌合温度的技术已经非常成熟。但是, 现有温拌助剂的价格十分昂贵, 使用其增加的费用并不一定能被通过节能减排所获得的经济效益所补偿。尽管为了环保不能完全从经济角度考虑, 但是这在一定程度上限制了沥青混合料温拌技术的推广与应用。与此同时, 我国工业固体废弃物的年产生量约为 33 亿吨, 历史累计堆存量超过 600 亿吨, 不仅造成资源浪费, 而且还会带来严重的环境和安全隐患<sup>[49]</sup>。固体废弃物是放错位置的资源, 因此利用其开发新型沥青混合料温拌技术, 既能消纳大宗固体废弃物储量, 又

能降低 WMA 的生产成本。

地聚合物是一种以硅氧四面体和铝氧四面体为主要组成, 结构上具有空间三维网状链接结构的新型无机材料, 可以形成丰富的“水-孔”结构。其原材料来源广泛, 是以粉煤灰、煤矸石等固体废弃物作为原料, 且可在常温下制备。因此, 以地聚合物作为温拌助剂可极大降低 WMA 的生产成本。作者团队在地聚合物材料研究的基础上, 提出了以固体废弃物为原材料制备地聚合物基含水发泡降粘类温拌助剂并实现节能减排的思路, 如图 4 所示。开发的地聚合物温拌助剂可以实现沥青混合料在 140 °C 的拌合, 制备的 WMA 的路用性能与普通 HMA 相当, 而且有效抑制了有机挥发物等有害气体的排放<sup>[50, 51]</sup>。

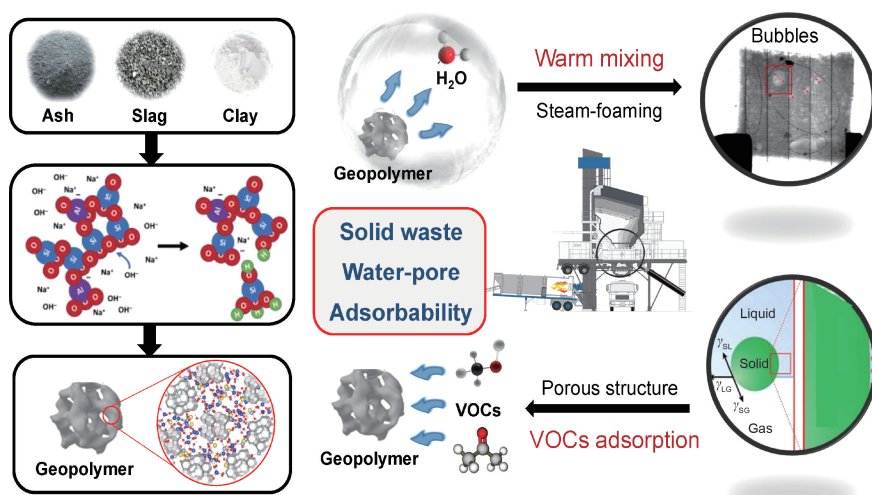


图 4 基于地聚合物的温拌技术

Fig. 4 Geopolymer-based warm mixing technology

大量积压的废弃轮胎是严重的黑色污染物, 但是废弃轮胎中的橡胶具有高弹特性, 可以用于提升沥青的高低温性能、改善沥青混合料的路用性能。然而, 废弃轮胎粉的加入会引起沥青粘度增加, 导致沥青混合料的拌合温度升高。而温拌助剂的添加虽然使 WMA 的路用性能满足相关技术规范要求, 但仍低于普通 HMA 的路用性能。因此, 将废弃轮胎粉与温拌助剂复合组成新型温拌助剂, 可以实现优势互补。研究表明, 将废弃轮胎粉与有机降粘类温拌助剂 Sasobit®、RH-WMA 等复合后 (图 5), 有效提升了 WMA 的路用性能<sup>[52-54]</sup>。

## 6 结 语

沥青混合料温拌技术是一种通过加入温拌助剂实现在较低温度下生产沥青混合料的新型拌合技术, 可分为发泡降粘类技术、表面活性类技术、有机降粘类技术。其技术核心是降低沥青材料的粘度, 改善沥青的流变性。

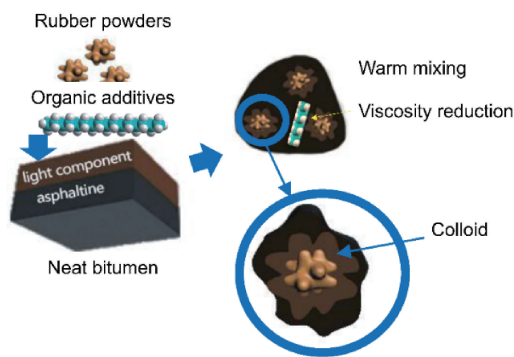


图 5 橡胶粉-有机降粘类温拌技术

Fig. 5 Warm mixing technology based on the combination of rubber powders and organic additives

尽管温拌助剂的加入可以降低沥青混合料生产过程中的能耗, 并减少污染物的排放, 但是也产生了一些负面影响, 如其水稳定性的降低。因此, 温拌沥青混合料性能



的提升仍然是一项亟待解决的技术难题。此外, 鉴于温拌助剂的高昂价格, 利用废弃物制备温拌助剂, 也可以使沥青混合料具有较低的拌合温度。

随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入人心, 研究开发绿色道路建筑材料已经成为建设资源节约型、环境友好型、可持续发展型新时代交通的必由之路。开发和应用新型沥青混合料温拌技术, 将有力地推动我国道路工程领域的可持续发展。

## 参考文献 References

- [1] ROBERTS F L, MOHAMMAD L N, WANG L, *et al.* Journal of Materials in Civil Engineering[J], 2002, 14(4): 279-293.
- [2] RUBIO M C, MARTINEZ G, BAENA L, *et al.* Journal of Cleaner Production[J], 2012, 24: 76-84.
- [3] GAUDEFRY V, OLARD F, CAZACLIU B, *et al.* Transportation Research Record[J], 2007(1998): 89-95.
- [4] JENKINS K. Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixtures with Emphasis on Foamed Bitumen [D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2000.
- [5] CHOWDHURY A, BUTTON J W. A Review of Warm Mix Asphalt [R]. Texas: Texas Transportation Institute, 2008.
- [6] BUTTON J W, CINDY E, ANDREW W. A Synthesis of Warm-Mix Asphalt[R]. Texas: Texas Transportation Institute, 2007.
- [7] KOENDERS B G, STOKER D A, BOWEN C, *et al.* Innovative Process in Asphalt Production and Application to Obtain Lower Operating Temperatures[C]// Proceedings of 2<sup>nd</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress. Barcelona: Foundation Eurasphalt, 2000.
- [8] 郭红兵, 陈拴发. 中外公路[J], 2008, 28(2): 152-155.  
GUO H B, CHEN S F. Journal of China & Foreign Highway[J], 2008, 28(2): 152-155.
- [9] ABDALLA S A R. Earth Science Reviews[J], 2008, 138(6): 47-60.
- [10] JULAGANTI A, CHOUDHARY R, KUMAR A, *et al.* Petroleum Science and Technology[J], 2017, 35(10): 975-982.
- [11] HURLEY G C, PROWELL B D. Evaluation of Aspha-Min<sup>®</sup> Zeolite for Use in Warm Mix Asphalt [R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2005.
- [12] HURLEY G C, PROWELL B D. Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt[R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2005.
- [13] HURLEY G C, PROWELL B D. Evaluation of Evotherm for Use in Warm Mix Asphalt[R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2006.
- [14] HURLEY G C, PROWELL B D. Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt[R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2006.
- [15] BONAQUIST R. Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt [R]. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2011.
- [16] THIVES L P, GHISI E. Renewable and Sustainable Energy Reviews [J], 2017, 72: 473-484.
- [17] VIDAL R, MOLINER E, MARTINEZ G, *et al.* Resources Conservation & Recycling[J], 2013, 74: 101-114.
- [18] D'ANGELO J, HARM E, BARTOSZEK J, *et al.* Warm-Mix Asphalt: European Practice[M]. Washington D. C.: Federal Highway Administration, 2008.
- [19] MICHAEL L L. Asphalt Review[J], 2008, 27(1): 41-43.
- [20] ONER J, SENGÖZ B. PLOS ONE[J], 2015, 10(1): e116180.
- [21] DEDENE C D, GOH S, WHASAN M R M, *et al.* International Journal of Pavement Research & Technology[J], 2015, 8(1): 38-46.
- [22] KOENDERS B G, STOKER D A, ROBERTUS C, *et al.* Warm-Foam, Asphalt Production at Lower Operating Temperatures[C]// Proceedings of 9<sup>th</sup> International Conference on Asphalt Pavements. St. Paul: International Society for Asphalt Pavements, 2002.
- [23] KHERADMAND B, MUNIANDY R, HUA L T, *et al.* The International Journal of Pavement Engineering[J], 2014, 15(1/2): 79-94.
- [24] OKAMOTO M, OKAMURA T, UJIKE I, *et al.* Journal of Pavement Engineering JSCE[J], 2013, 69(2): 12-21.
- [25] OLIVEIRA J R M, SILVA H M R D, ABREU L P F, *et al.* Journal of Cleaner Production[J], 2013, 41: 15-22.
- [26] 孙大权, 王锡通, 汤士良, 等. 石油沥青[J], 2007, 21(4): 54-57.  
SUN D Q, WANG X T, TANG S L, *et al.* Petroleum Asphalt[J], 2007, 21(4): 54-57.
- [27] SENGÖZ B, TOPAL A, GORKEM C. Construction & Building Materials[J], 2013, 43: 242-252.
- [28] ÖZTÜRK H I, KUTAY M E. Journal of Materials in Civil Engineering [J], 2014, 26(8): 1-8.
- [29] HASAN M R, YOU Z. Journal of Traffic and Transportation Engineering[J], 2019, 6(4): 383-395.
- [30] WU S, LI X. Construction & Building Materials [J], 2017, 145: 62-67.
- [31] LEE H, KIM Y, HWANG S D, *et al.* Use of Warm Mix Asphalt Additives for Cold In-Place Recycling Using Foamed Asphalt [C]// Proceedings of International Conference on Maintenance & Rehabilitation of Pavements & Technological Control. Iowa: University of Iowa, 2007.
- [32] ROMIER A, AUDEON M, DAVID J, *et al.* European Roads Review [J], 2006(1962): 101-112.
- [33] JAMSHIDI A, HAMZAH M, YOU Z P. Construction & Building Materials[J], 2013, 38: 530-553.
- [34] PROWELL B D, HURLEY G C, FRANK B. Warm-Mix Asphalt: Best Practices [M]. USA: National Asphalt Pavement Association, 2012: 16.
- [35] MIDDLETON B, FORFYLOW R. Transportation Research Record [J], 2009(2126): 19-26.
- [36] 李明, 黄及龙, 何唯平. 西部交通科技[J], 2013(9): 43-45.  
LI M, HUANG J L, HE W P. Western China Communications Science & Technology[J], 2013(9): 43-45.
- [37] 桑雨. 筑路机械与施工机械化[J], 2016, 33(7): 50-52.  
SANG Y. Road Machinery & Construction Mechanization [J], 2016,

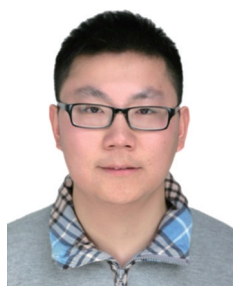
- 33(7): 50–52.
- [38] MIGUEL S, FERNANDO M, CARMEN R. *Applied Sciences*[J], 2017, 7(7): 745.
- [39] YU H, LENG Z, ZHOU Z, *et al.* *Journal of Cleaner Production*[J], 2017, 141: 336–345.
- [40] REZAPOUR M, WULFF S S. *Journal of Engineering*[J], 2019, 2019: 5719716.
- [41] AMAN M Y, SHAHADAN Z, RAZALI S R, *et al.* *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*[J], 2014, 8(10): 446.
- [42] CLARK R S, BARNES C. In-Place Evaluation of a High RAP Warm Mix Asphalt Pavement[C]//Proceedings of 57<sup>th</sup> Conference of the Canadian Technical Asphalt Association. Victoria: Canadian Technical Asphalt Association, 2012.
- [43] XIE Z, SHEN J, FAN W, *et al.* *Journal of Testing & Evaluation*[J], 2014, 42(5): 1165–1172.
- [44] 王岚, 李冀, 桂婉妹. *材料导报*[J], 2019, 33(6): 986–990.  
WANG L, LI J, GUI W M. *Materials Reports*[J], 2019, 33(6): 986–990.
- [45] FENG Z G, BIAN H J, LI X J, *et al.* *Materials and Structures*[J], 2016, 49(4): 1381–1389.
- [46] 丁海波, 周刚. *公路*[J], 2014(4): 175–179.  
DING H B, ZHOU G. *Highway*[J], 2014(4): 175–179.
- [47] 李文辉. *交通科学与工程*[J], 2013, 29(1): 12–16.  
LI W H. *Journal of Transport Science and Engineering*[J], 2013, 29(1): 12–16.
- [48] 林敏, 那日苏, 郑学文, 等. *武汉理工大学学报*[J], 2015, 37(5): 42–47.  
LIN M, NA R S, ZHENG X W, *et al.* *Journal of Wuhan University of Technology*[J], 2015, 37(5): 42–47.
- [49] 赵娜, 赵柯衡. *中国资源综合利用*[J], 2019, 37(6): 58–60.  
ZHAO N, ZHAO K H. *China Resources Comprehensive Utilization*[J], 2019, 37(6): 58–60.
- [50] TANG N, DENG Z, DAI J, *et al.* *Journal of Cleaner Production*[J], 2018, 192: 906–915.
- [51] TANG N, YANG K, ALREFAEI Y, *et al.* *Construction & Building Materials*[J], 2020, 244: 118338.
- [52] YANG X, YOU Z, PERRAM D, *et al.* *Journal of Hazardous Materials*[J], 2019, 365: 942–951.
- [53] POURANIAN M R, NOTANI M A, TABESH M T, *et al.* *Construction & Building Materials*[J], 2020, 238: 117707.
- [54] OZTURK H I, KAMRAN F. *Construction & Building Materials*[J], 2019, 229: 116940.

(编辑 王 瑶)



特约撰稿人杨文澍

杨文澍: 男, 1985 年生, 2013 年获意大利都



特约撰稿人唐 宁

灵理工大学博士学位, 哈尔滨工业大学副教授、

博士生导师, 主要从事铝基复合材料设计制备及应用技术研究。主持国家自然科学基金、国防科技创新特区、装备预先研究项目等国家级科研项目 10 余项, 申请专利 40 余项, 已获授权专利 20 余项, 发表 SCI 论文 60 余篇; 研究成果已应用于我国北斗卫星激光通讯系统、战略武

器惯导系统, 高分卫星新一代海量数据处理器热控系统 etc 装备, 保障了新一代装备天地一致性、高精度、高可靠性。

唐 宁: 男, 1984 年生, 博士, 沈阳建筑大学副教授, 硕士生导师。“香江学者计划”入选者, “兴辽英才”青年拔尖人才, 辽宁省“百千万人才工程”千人层次, 辽

宁省高等学校创新人才。主要研究方向为低品位原料和固体废弃物制备建筑材料。主持包括国家自然科学基金在内的 11 项省部级以上课题, 在 *Constr Build Mater*、*J Clean Prod* 等知名期刊发表学术论文 40 余篇, 研究成果获省部级科技进步奖励 4 项。