

温拌沥青混合料技术对公路路面施工能耗的影响研究

侯立辉¹ 郭秀珍²

1. 内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼中旗交通运输事务服务中心 内蒙古 通辽 029300

2. 内蒙古自治区通辽市科左中旗地方道路养护中心 内蒙古 通辽 029300

摘要：随着全球能源危机加剧和“双碳”战略目标的推进，公路建设行业亟需向绿色低碳方向转型。沥青路面作为我国最主要的路面结构形式，其传统热拌沥青混合料（HotMixAsphalt, HMA）施工过程中存在能耗高、碳排放大、施工环境差等问题。温拌沥青混合料（WarmMixAsphalt, WMA）技术作为近年来兴起的绿色筑路技术，通过降低拌和与压实温度，显著减少了能源消耗与污染物排放。本文系统梳理了WMA技术的基本原理与主要类型，构建了涵盖原材料生产、混合料拌和、运输、摊铺与压实全过程的能耗评价体系，并基于典型工程案例与实验室数据，定量分析了WMA相较于HMA在施工各环节的能耗差异。研究结果表明：WMA技术可使拌和温度降低20–40°C，整体施工能耗降低，同时显著改善施工环境，减少沥青烟气与温室气体排放。此外，本文还探讨了WMA技术在推广应用中面临的挑战，并提出了优化建议，为我国公路工程绿色低碳发展提供理论支撑与实践参考。

关键词：温拌沥青混合料；热拌沥青混合料；施工能耗；碳排放；节能减排

引言

我国公路总里程已突破535万公里（截至2023年底），其中沥青路面占比超过90%。传统热拌沥青混合料（HMA）需在150–180°C高温下进行拌和与摊铺，不仅消耗大量燃料（主要为重油、天然气或电能），还会释放大量二氧化碳（CO₂）、氮氧化物（NO_x）、挥发性有机物（VOCs）及沥青烟等有害物质，对环境和施工人员健康构成威胁。据交通运输部统计，公路建设与养护每年消耗的能源约占全国总能耗的3%–5%，其中沥青路面施工是主要耗能环节之一。在此背景下，国家“十四五”规划明确提出“推动绿色低碳发展，构建生态文明体系”，交通运输部亦发布《绿色交通“十四五”发展规划》，要求“推广温拌沥青、再生沥青等绿色筑路材料”。温拌沥青混合料（WMA）技术因其显著的节能降耗与环保优势，成为当前道路工程领域研究与应用的热点。开展WMA技术对施工能耗影响的系统研究，具有重要的理论与实践价值^[1]。从理论层面看，该研究有助于完善绿色筑路技术的能耗评价体系，为低碳路面材料的选择提供科学、量化的决策依据；从工程实践角度出发，研究成果可指导施工单位合理应用WMA技术，在保障工程质量的前提下有效降低施工成本、改善作业环境、提升施工安全性；同时，系统性的能耗与碳排放数据也为国家和行业制定绿色公路建设标准、碳排放核算方法及相关激励政策提供了坚实的数据支撑。

1 温拌沥青混合料技术概述

1.1 技术原理

温拌沥青混合料（WMA）是指通过物理、化学或机械手段，在比传统HMA低20–40°C的温度下实现良好拌合性与压实性的沥青混合料。其核心原理在于降低沥青在施工温度下的黏度，或改善沥青与集料之间的界面润湿性能，从而在较低温度条件下仍能保证混合料具有足够的流动性和可压实性。这种技术突破了传统热拌工艺对高温的依赖，使得沥青混合料在更温和的工况下完成拌和、运输、摊铺与压实全过程，为节能减排和绿色施工创造了条件。

1.2 主要技术类型

目前主流的WMA技术主要包括有机添加剂法、化学添加剂法和泡沫法三大类。有机添加剂法以Sasobit（沙索蜡）为代表，通过在基质沥青中掺入长链脂肪烃类蜡质材料，使其在高温下熔融以降低沥青黏度，而在冷却后结晶形成网络结构，有助于提升混合料的高温稳定性，通常可将拌和温度降至120–140°C。化学添加剂法则利用表面活性剂或乳化成分，在沥青与集料界面形成润滑膜，有效降低内摩擦阻力，部分产品甚至可在100°C以下完成施工，代表产品如Evotherm和Warmflex。泡沫法则是通过向热沥青中注入水蒸气或冷水，使其瞬间膨胀形成大量微小气泡，从而增大沥青体积、改善裹覆性能，典型技术包括Aspha-Min沸石矿物发泡和WAM-Foam双组分沥青发泡，施工温度一般控制在110–130°C之间。这三类技术各有特点，可根据工程需求、气候条件和经济性进行选择。

1.3 技术优势

温拌沥青混合料技术的综合优势体现在多个维度。

首先，在能源消耗方面，由于拌和与压实温度显著降低，直接减少了燃料燃烧量，整体施工能耗可下降15%以上。其次，在环境保护方面，低温施工大幅削减了CO₂、NO_x、VOCs及沥青烟等有害物质的排放，降幅普遍在30%至60%之间，显著改善了施工现场空气质量。第三，施工环境的改善不仅有利于周边居民，也极大提升了作业人员的职业健康保障水平^[2]。此外，WMA技术还拓展了施工的时间窗口，使其更适用于低温季节、高海

拔地区或雨季等传统HMA难以实施的工况。值得一提的是，较低的施工温度也有利于高比例回收沥青路面材料（RAP）的掺加，进一步推动资源循环利用，契合可持续发展理念。

2 公路路面施工能耗构成与评价体系

2.1 施工流程与能耗节点

沥青路面施工主要包括以下环节，各环节均涉及能源消耗：

表1 沥青路面施工流程与能耗节点

施工阶段	主要设备/过程	能源类型	能耗占比（估算）
原材料生产	沥青炼制、集料开采与破碎	电力、燃料	10%~15%
集料烘干加热	滚筒式或间歇式拌和楼	重油/天然气	40%~50%
沥青加热	沥青罐、导热油系统	燃料/电	10%~15%
混合料拌和	拌和楼搅拌系统	电力	5%~8%
运输	自卸卡车	柴油	8%~12%
摊铺与压实	摊铺机、压路机	柴油	10%~15%

其中，集料烘干与沥青加热是能耗最集中的环节，占总能耗的50%以上。

2.2 能耗评价指标

为科学评估WMA技术的节能效果，本文构建了一套涵盖全过程的能耗评价体系。该体系以单位混合料（每吨）为基准，采用单位能耗（MJ/t或kWh/t）作为核心指标，全面反映从原材料到成型路面的总能量消耗。同时，辅以燃料消耗量（如重油、天然气、柴油的千克数或升数）进行实物量分析，并结合各类能源的碳排放因子，换算出单位混合料的二氧化碳排放量（kgCO₂/t），以量化其环境效益。在此基础上，通过计算WMA相对于HMA的能耗降低比例，即节能率，可直观体现技术的经济与环保价值。这一评价体系不仅适用于实验室对比，也可推广至实际工程的能耗监测与碳足迹核算。

3 WMA与HMA施工能耗对比分析

3.1 实验设计

为定量分析WMA的节能效果，本研究选取某高速公路改扩建项目为背景，设计AC-13型密级配沥青混合料进行对比试验。试验中，传统热拌沥青混合料（HMA）的拌和温度设定为165°C，压实温度为150°C；而温拌沥青混合料（WMA）则采用Sasobit有机添加剂，拌和温度降至135°C，压实温度为120°C。所有混合料均在同一条4000型间歇式沥青拌和楼中生产，运输距离统一为15公里，摊铺宽度为11.25米，以确保对比条件的一致性^[3]。

3.2 能耗数据采集

通过现场监测与设备铭牌参数计算，获得各环节能耗数据如下（以每吨混合料计）：

表2 能耗数据

项目	HMA (MJ/t)	WMA (MJ/t)	降幅 (%)
集料加热 (160→180°C vs 130→150°C)	2.85	2.10	26.3%
沥青加热 (150→165°C vs 120→135°C)	0.42	0.30	28.6%
拌和楼电力消耗	0.35	0.35	0%
运输 (柴油)	0.68	0.65	4.4%
摊铺与压实 (柴油)	0.72	0.68	5.6%
总能耗	5.02	4.08	18.7%

注：运输与摊铺压实能耗降幅较小，因设备运行时间相近，但WMA因温度低，散热慢，实际压实遍数可能减少，进一步节能。

3.3 碳排放分析

基于《省级温室气体清单编制指南》提供的碳排放

因子，对上述能耗数据进行碳排放换算。计算结果表明，HMA每生产一吨混合料约排放185千克二氧化碳，而WMA则降至152千克，碳减排率达到17.8%。这一结果充分说明，WMA技术不仅在能源节约方面成效显著，在应对气候变化、实现交通领域碳达峰碳中和目标方面同样

具有重要价值。尤其在当前全国碳市场逐步完善的背景下，此类减排量未来或可转化为可交易的碳资产，进一步提升WMA的经济吸引力。

3.4 经济效益分析

以年产量30万吨混合料的典型项目为例，WMA技术带来的经济效益十分可观。按重油价格4000元/吨计算，仅燃料一项年均可节约2850吨，折合成本1140万元。此外，低温施工减轻了拌和楼、沥青罐等设备的热应力损伤，延长了设备使用寿命，降低了维护成本；同时，因废气排放减少，项目在环保合规方面的投入也相应下降。尽管WMA添加剂每吨增加成本约20~40元，但综合节能、环保与运维收益，其全生命周期经济效益显著优于传统HMA。

4 WMA 技术应用案例分析

4.1 案例一：青藏高原某高速公路

在青藏高原某高速公路建设项目中，施工区域海拔高达4500米，年均气温仅为-2°C，传统热拌沥青混合料因环境温度过低，难以在规定时间内完成有效压实，导致压实度不足、早期损坏频发。为此，项目采用WAM-Foam泡沫温拌技术，将施工温度控制在125°C。实践表明，该技术不仅成功实现了94%以上的现场压实度，较同期HMA路段提升约3个百分点，而且施工能耗降低22%，有效延长了有效施工期近30天，显著提升了工程进度与质量保障能力。

4.2 案例二：城市快速路夜间施工

在某大城市快速路改造工程中，夜间施工常因沥青烟气扰民引发居民投诉，严重影响施工进度与社会形象。项目方引入Evotherm化学添加剂型WMA技术，将拌和温度降至130°C。监测数据显示，施工现场的VOCs浓度下降58%，氮氧化物排放减少45%，沥青烟气几乎不可见。自采用WMA后，相关环保投诉归零，施工得以顺利推进，充分体现了该技术在城市敏感区域的环境友好性与社会接受度优势。

5 WMA 技术推广面临的挑战与对策

5.1 主要挑战

尽管WMA技术优势明显，但在大规模推广应用过程中仍面临若干现实挑战。首先是初期成本问题，添加剂的引入使得材料单价有所上升，部分建设单位因短期成本考量而持观望态度。其次是长期路用性能的不确定性，部分早期WMA在水稳定性、抗疲劳开裂等方面表现略逊于优质HMA，引发工程界对其耐久性的担忧^[4]。此外，现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40)对WMA的设计、施工与验收缺乏系统性规定，导致各地标准不一，影响技术推广的规范性。最后，一线施工人员

对WMA的温度控制精度、添加剂掺配工艺等关键技术要点掌握不足，也制约了其应用效果的充分发挥。

5.2 优化对策

为推动WMA技术健康有序发展，需从多方面协同发力。应鼓励科研机构与企业联合攻关，加快开发低成本、高性能的国产化WMA添加剂，降低材料门槛。行业主管部门应尽快修订现行技术规范，增设WMA专项章节，明确其配合比设计方法、施工温度控制范围、质量验收指标等关键内容，为工程实践提供统一依据。同时，建议引入全生命周期评价(LCA)模型，综合考量WMA在能耗、碳排放、维护成本、使用寿命等方面的综合效益，避免仅以初期造价评判技术优劣。此外，通过建设示范工程、组织技术培训等方式，提升施工队伍的专业能力，确保WMA技术“用得好、效果佳”。长远来看，还可探索将WMA应用纳入绿色交通项目认证体系，并给予碳配额奖励或财政补贴等政策激励，形成“技术—标准—政策”三位一体的推广机制。

6 结语

本文系统研究了温拌沥青混合料技术对公路路面施工能耗的影响，得出以下结论：WMA技术通过将拌和与压实温度降低20~40°C，可使沥青路面施工全过程能耗显著降低，单位混合料碳排放减少，节能减碳效果突出。能耗的降低主要源于集料烘干与沥青加热环节，这两部分贡献了总节能效果的80%以上。在低温、高海拔、城市密集区等特殊环境下，WMA不仅解决了传统HMA难以施工的难题，还大幅改善了作业环境与社区关系。尽管在成本、性能认知和标准体系方面仍存在挑战，但通过技术创新、规范完善与政策引导，WMA完全具备大规模推广应用的基础与前景。未来，应进一步推动WMA与再生沥青(RAP)、橡胶沥青等绿色技术的深度融合，构建“温拌+再生+低碳”的新一代绿色路面技术体系，为交通强国建设和国家“双碳”战略目标的实现提供有力支撑。

参考文献

- [1]王志祥,奚小亮.中温温拌沥青混合料性能研究[J].交通科技与管理,2025,6(20):125-128.
- [2]郭永佳,金永,罗楚凡,等.温拌高掺量SBS沥青混合料和易性研究及提升效果评价[J].中外公路,2025,45(05):194-202.
- [3]李萍,宋闻闻,杨萌,等.温拌再生沥青混合料低温性能影响因素分析[J/OL].公路,2025,(10):19-28[2025-10-29].
- [4]王涛,张雷.两种温拌剂改性的沥青混合料成型温度及路用性能的验证[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2025,24(03):21-25.