

面向“双碳”目标的低碳养护材料开发与工程应用

武宏伟 张青 许雪峰

内蒙古交通集团蒙通养护有限责任公司呼和浩特分公司 内蒙古 呼和浩特 010080

摘要: 作为道路全生命周期中不可或缺的环节,传统的沥青路面养护技术普遍存在能耗高、碳排放量大、环境污染等问题,已成为制约行业可持续发展的瓶颈。本文系统梳理了“双碳”目标对道路养护提出的新要求,深入剖析了传统热拌沥青混合料(HMA)养护技术在碳排放方面的短板。在此基础上,聚焦于三大类低碳养护材料——温拌沥青混合料(WMA)、冷拌冷铺沥青混合料(CMA)及再生类养护材料(包括厂拌热再生、就地热再生、就地冷再生等),全面阐述了其核心作用机理、关键技术路径、碳减排潜力及工程应用现状。通过对比分析各类材料的性能特点、适用场景与经济性,揭示了当前技术发展中存在的挑战,并对未来低碳养护材料的研发方向与工程应用策略进行了展望,旨在为推动我国道路养护行业绿色、低碳、高质量发展提供理论支撑与实践参考。

关键词: 双碳目标;道路养护;低碳材料;温拌沥青;冷拌沥青;再生技术

引言

交通基础设施作为国家经济命脉,其建设和运营过程是能源消耗与碳排放的重要来源之一。而其中,道路养护阶段的碳排放占比不容小觑。随着我国大规模公路网建设高峰期的逐渐过去,庞大的存量路网已进入集中养护期。传统的道路养护,尤其是以热拌沥青混合料(Hot Mix Asphalt, HMA)为主的预防性养护和矫正性养护技术,需要将集料加热至150-180°C,沥青加热至140-160°C,此过程消耗大量化石燃料,直接导致显著的温室气体(如CO₂、NO_x、SO_x)和有害烟尘排放。此外,HMA施工对环境温度敏感,低温季节无法施工,限制了养护窗口期,间接增加了后期大规模维修的成本与碳足迹^[1]。因此,在“双碳”目标的宏观背景下,开发和应用低碳、环保、高效的新型养护材料,已成为道路工程领域亟待解决的关键科学问题与重大技术需求。这不仅关乎行业的绿色转型,更是实现国家“双碳”战略目标不可或缺的一环。

1 “双碳”目标对道路养护的新要求

“双碳”目标为道路养护行业设定了清晰的减碳路径和更高的绿色发展标准,主要体现在以下三个方面:

1.1 全生命周期碳足迹最小化

传统的养护评价体系多关注初期成本、施工便利性和短期性能。在“双碳”语境下,必须引入全生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)理念,将原材料开采、生产、运输、施工、使用直至废弃回收全过程的碳排放纳入考量。养护方案的选择不再仅看“眼前”,更要算“长远”的生态账,优先选择能显著降低全生命周期碳足迹的技术路径。

1.2 资源循环利用最大化

“双碳”目标与循环经济理念高度契合。道路养护应成为资源循环利用的重要载体。这意味着要最大限度地利用废旧路面材料(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP),通过先进的再生技术将其“变废为宝”,减少对原生矿石和virgin沥青的需求,从而从源头上削减碳排放。高比例RAP的应用是衡量养护技术低碳水平的关键指标。

1.3 施工过程绿色化与智能化

养护施工过程本身也需实现绿色化。这要求开发能在更低温度下拌和、摊铺、压实的材料(如温拌、冷拌技术),大幅降低施工能耗和烟气排放。同时,结合智能建造技术,如精准计量、智能温控、无人化摊铺等,可以进一步优化施工参数,减少能源浪费,提升施工效率与质量稳定性,实现精细化、低干扰的绿色养护作业。

2 传统养护技术的碳排放瓶颈

热拌沥青混合料(HMA)作为主流的养护材料,其高碳排放特性主要源于以下几个环节:①集料烘干加热:这是HMA生产过程中能耗最大的环节,通常采用重油或天然气燃烧,直接产生大量CO₂。②沥青加热与保温:沥青需在高温下保持流动性,储罐和管道的保温过程持续消耗能源。③拌和与运输:高温混合料在拌和站和运输过程中的热量散失,需要额外能量补偿。④现场摊铺与碾压:为保证压实度,混合料需在较高温度下完成摊铺和碾压,若环境温度过低,则难以施工或需采取额外保温措施^[2]。研究表明,生产1吨HMA混合料的直接碳排放约为70-100 kg CO₂当量。对于一个大型养护项目而言,其累积碳排放量极为可观。此外,HMA施工产生的沥青烟(含苯并芘等致癌物)对施工人员健康和周边环境构成威

胁。这些固有缺陷使得HMA在“双碳”时代显得愈发不合时宜，迫切需要被更低碳的技术所替代或补充。

3 低碳养护材料的技术路径与核心机理

为突破传统HMA的碳排放瓶颈，业界和学界主要沿着“降能耗”、“促循环”两大主线，开发了三大类低碳养护材料。

3.1 温拌沥青混合料（WMA）

温拌沥青混合料（Warm Mix Asphalt, WMA）的核心思想是在保证混合料工作性和路用性能的前提下，将拌和与压实温度降低20-40℃。这看似微小的温度变化，却能带来显著的节能减排效果。

3.1.1 核心作用机理

WMA的实现主要依赖于三类技术：①有机添加剂法：如Sasobit等长链脂肪酸酰胺类蜡。其在高温下熔融，降低沥青粘度，改善和易性；冷却后结晶，有助于提高混合料的高温稳定性。②化学发泡法：如Evotherm等表面活性剂。它能降低沥青与水的界面张力，使少量水在高温下瞬间汽化形成微小气泡，暂时性地膨胀沥青体积，大幅降低其粘度，便于拌和与压实。水分蒸发后，沥青恢复原有性能^[3]。③物理发泡法（泡沫沥青）：将高温沥青与定量冷水混合，通过专用发泡装置产生大量泡沫，体积可膨胀数倍至数十倍，粘度急剧下降，从而实现与常温集料的拌和。此方法无需化学添加剂，成本较低，但对设备和工艺控制要求较高。

3.1.2 碳减排潜力与优势

WMA的碳减排效果立竿见影。据美国国家沥青技术中心（NCAT）数据，WMA可减少燃料消耗约20%，降低温室气体排放15%-35%，同时显著减少沥青烟、粉尘等有害物质排放高达50%以上。此外，较低的施工温度延长了混合料的可操作时间，改善了压实效果，尤其适用于低温季节、长距离运输和隧道等通风不良环境下的施工。

3.2 冷拌冷铺沥青混合料（CMA）

冷拌冷铺沥青混合料（Cold Mix Asphalt, CMA）代表了养护材料低碳化的更高阶形态，其拌和与施工均在常温下进行，彻底摆脱了对热能的依赖。

3.2.1 核心作用机理

CMA的关键在于使用特殊的改性乳化沥青或稀释沥青作为胶结料。乳化沥青是将热沥青分散于含有乳化剂的水中形成的水包油（O/W）乳液。在拌和时，乳液与潮湿集料接触，通过“化学破乳”或“机械破乳”机制，水分逐渐析出，沥青颗粒聚结并裹覆集料。最终强度的形成依赖于水分的完全蒸发和沥青的还原。为了加速早期强度形成和提升最终性能，常对乳化沥青进行聚合物

（如SBR、SBS）改性，并添加水泥、消石灰等无机填料作为促凝剂和补强剂。

3.2.2 碳减排潜力与优势

CMA实现了近乎零的施工过程碳排放，其碳减排潜力远超WMA。它对施工环境要求极低，可在0℃甚至更低温度下施工，极大地拓宽了养护作业窗口。同时，由于无需加热，CMA的生产和施工设备简单，噪音低，对交通干扰小，特别适用于城市道路、应急抢修和小规模病害处治。然而，其早期强度低、成型周期长、长期耐久性（尤其是水稳定性）仍是需要持续优化的技术难点。

3.3 再生类养护材料

再生技术是实现资源循环利用、从源头减碳的最有效途径。根据施工工艺和温度的不同，主要分为厂拌热再生（Central Plant Hot Recycling）、就地热再生（Hot In-Place Recycling, HIPR）和就地冷再生（Cold In-Place Recycling, CIR）。

3.3.1 厂拌热再生（HMA-RAP）

将回收的RAP运至拌和站，经破碎、筛分后，按一定比例（通常20%-50%）掺入新集料和新沥青中，重新加热拌和成新的混合料。虽然仍需加热，但由于RAP本身具有一定温度且替代了部分新料，整体能耗和碳排放仍低于纯新材料HMA。其优势在于质量可控，性能接近新拌HMA，适用于高等级公路的大中修工程。

3.3.2 就地热再生（HIPR）

利用专用的就地热再生机组，对路面表层（通常3-6cm）进行加热、翻松、添加再生剂和新沥青（必要时加新料），然后即时摊铺、压实。该技术实现了100%原路面材料的就地循环利用，省去了RAP的运输、破碎、存储等环节，碳减排效益极高^[4]。同时，施工速度快，对交通影响小。但其适用范围受限于路面病害类型和深度，且对设备和技术要求高。

3.3.3 就地冷再生（CIR）

这是目前碳足迹最低的养护技术之一。使用冷再生机对旧路面进行铣刨破碎，同时喷入乳化沥青（或泡沫沥青）和水，必要时加入水泥、石灰等稳定剂，进行拌和、摊铺和压实。整个过程在常温下完成，几乎不产生直接碳排放。CIR能一次性处理较厚的路面结构层（10-20cm），有效治理基层病害，造价低廉。其形成的柔性或半刚性基层，具有良好的抗疲劳和抗反射裂缝能力。主要挑战在于对施工含水量控制严格，早期开放时间较长。

4 工程应用现状与案例分析

近年来，我国在低碳养护材料的工程应用方面取得

了长足进步。WMA已在多条高速公路和国省干线的养护工程中得到规模化应用。例如,某省在GXX高速养护中采用Sasobit温拌技术,成功将拌和温度从165°C降至135°C,经LCA评估,该项目碳排放总量减少了22%。CMA在城市道路日常养护中扮演着重要角色。北京、上海等大城市普遍建立了冷拌料应急储备库,用于快速修补坑槽等突发病害,有效保障了城市交通运行效率,同时避免了小型热拌设备带来的局部污染。再生技术的应用尤为广泛。厂拌热再生已成为大中修项目的标配,RAP掺配率逐年提高。就地热再生在机场跑道、高速公路车辙处治中展现出独特优势。就地冷再生则在普通国省道和农村公路的升级改造中大放异彩。例如,某市对一条服役20年的二级公路采用泡沫沥青就地冷再生技术进行改造,不仅节约了约70%的建设成本,还减少了超过80%的碳排放,社会效益和环境效益显著。

5 面临的挑战与未来展望

5.1 面临的挑战

尽管低碳养护材料前景广阔,但在推广过程中仍面临诸多挑战:①标准规范体系尚不完善:部分新材料、新工艺缺乏统一的设计、施工和验收标准,导致业主和施工单位存在顾虑。②长期性能与耐久性验证不足:特别是高比例RAP混合料和CMA的长期老化性能、水损害敏感性等,需要更长时间、更大范围的跟踪观测数据支撑。③初期成本与认知偏差:部分低碳材料(如高性能WMA添加剂)的初期材料成本可能略高,加之对新技术的认知不足,影响了其市场接受度。④产业链协同不足:RAP的高效回收、精细分类、高质量存储等环节仍存在短板,制约了再生技术的深度应用。

5.2 未来展望

面向未来,低碳养护材料的发展将呈现以下趋势:①多功能一体化:开发兼具低碳、自愈合、融雪化冰、降噪等功能的智能养护材料。②再生技术深度化:突破高掺量

(>50%)甚至100% RAP混合料的技术瓶颈,研究再生剂的精准设计与评价方法。③生物基与固废利用:探索利用植物油、废食用油、塑料、橡胶粉等作为沥青改性剂或替代部分沥青,进一步降低材料生产的“隐含碳”。④数字化与智能化赋能:利用BIM、物联网、大数据等技术,构建养护材料从生产到施工的全过程碳排放监控与优化平台,实现养护决策的精准化和低碳化。

6 结语

“双碳”目标为道路养护行业带来了前所未有的挑战,也孕育着巨大的发展机遇。以温拌沥青、冷拌沥青和各类再生技术为代表的低碳养护材料,通过“降能耗”和“促循环”两大核心路径,能够有效破解传统热拌技术的高碳排困局,显著降低道路养护全生命周期的碳足迹。当前,这些技术已在工程实践中展现出良好的应用效果和广阔的市场前景。未来,应着力于完善标准体系、深化基础研究、加强产业链协同,并积极拥抱新材料、新技术,不断推动低碳养护材料向高性能、多功能、智能化方向发展。唯有如此,才能真正构建起与“双碳”战略相适应的绿色、低碳、循环、高效的道路养护新范式,为我国交通强国建设和生态文明建设做出积极贡献。

参考文献

- [1]杨家斌.绿色低碳理念下的公路养护新材料与施工技术[J].汽车画刊,2025,(11):91-93.
- [2]慕林虎.公路建设养护过程中低碳环保材料的应用[J].知识经济,2025,(32):154-157.
- [3]刘畅.超临界二氧化碳养护水泥基材料的强化作用机理及减碳效益[D].东南大学,2024.DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2024.002616.
- [4]张忠伦,高强,姜瑞雨,等.新型低碳胶凝材料制备及CO₂养护钙基建筑材料的研究进展[J].中国建材科技,2022,31(01):1-8.