

道路机场与桥隧工程中的环保型沥青材料研发与应用

邰庆双

莒南县交通运输局 山东 临沂 276600

摘要: 本文系统性地探讨了环保型沥青材料的研发背景、技术路径、性能特征及其在道路、机场与桥隧等不同工程场景中的应用实践。文章首先剖析了传统沥青材料带来的环境挑战,继而详细阐述了温拌沥青、再生沥青、生物基沥青、废塑料改性沥青等主要环保型沥青的技术原理与发展现状。在此基础上,结合各类工程结构(如柔性路面、刚性道面、钢桥面、隧道)的独特需求,深入分析了环保型沥青的适用性、技术优势与潜在挑战。最后,文章展望了环保型沥青材料未来的发展趋势,并提出了促进其规模化应用的政策与技术建议,旨在为我国乃至全球交通基础设施的绿色、低碳、高质量发展提供理论参考与实践指导。

关键词: 环保型沥青; 温拌技术; 道路工程; 机场工程; 桥隧工程

引言

交通基础设施是国民经济发展的先行官,其建设与运维规模庞大,对资源消耗和环境影响巨大。沥青混凝土作为全球应用最广泛的路面铺装材料,其核心组分——石油沥青,是一种不可再生的化石资源衍生物。据估算,在传统热拌沥青混合料(Hot Mix Asphalt, HMA)的生产过程中,每吨混合料需消耗约7-9升燃料油,并排放大量温室气体(CO₂)、氮氧化物(NO_x)、硫氧化物(SO_x)以及可吸入颗粒物(PM)。此外,每年因道路维修、翻建产生的废旧沥青路面材料(RAP)数量惊人,若处理不当,不仅占用大量土地资源,还会造成环境污染。在全球气候变化加剧和资源日益枯竭的双重背景下,世界各国纷纷将绿色、低碳、循环作为交通基础设施建设的核心战略。中国提出的“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”目标,更是对交通行业的节能减排提出了明确且紧迫的要求。在此宏观背景下,研发和应用环保型沥青材料,已成为破解行业发展瓶颈、实现可持续发展的关键突破口。

1 传统沥青材料的环境挑战

1.1 资源消耗与不可再生性

石油沥青是原油炼制过程中的残余物,其供应完全依赖于有限的石油资源。随着全球石油储量的递减和开采成本的上升,沥青的价格波动剧烈,对工程建设成本构成不确定性风险。过度依赖不可再生资源,与循环经济和可持续发展的理念背道而驰。

1.2 高温施工带来的能耗与排放

HMA的拌和与压实通常需要在150°C至180°C的高温下进行。此过程不仅消耗大量化石燃料(如重油、天然气),产生巨量的CO₂,加剧温室效应;同时,高温

还会促使沥青中的轻质组分挥发,释放出包含多环芳烃(PAHs)在内的有害气体和烟尘,对施工现场工人的健康构成威胁,并污染周边大气环境。

1.3 废旧材料处置难题

道路养护和大修过程中会产生巨量的RAP。过去,这些材料常被简单地填埋或堆弃,不仅浪费了其中蕴含的优质骨料和沥青胶结料,还占用了宝贵的土地资源,并可能因雨水淋滤导致土壤和地下水污染^[1]。如何高效、高值化地利用RAP,是行业亟待解决的重大课题。

1.4 性能局限性与耐久性问题

传统沥青混合料在极端气候条件下(如高温车辙、低温开裂)和重载交通作用下,易出现早期损坏,导致频繁的维修,这不仅增加了全寿命周期成本,也因反复施工带来了额外的能源消耗和环境扰动。

2 主要环保型沥青材料的技术研发

2.1 温拌沥青(WMA)技术

WMA技术通过物理或化学手段,有效降低沥青混合料的拌和与压实温度(通常可降至100°C-130°C),从而在源头上削减能耗与排放。WMA的核心在于改善沥青在较低温度下的施工和易性。主要技术路径包括:(1)有机添加剂法:如Sasobit(一种长链脂肪酸酰胺蜡),在高温下溶解于沥青,降低其粘度;在低温下结晶,起到骨架支撑作用,防止车辙。(2)化学发泡法:如Aspha-min(一种合成沸石),在拌和时释放内部水分,形成微小气泡,暂时性地膨胀沥青体积,降低其表观粘度。(3)水基发泡法:将少量冷水(通常为沥青质量的1-3%)喷入热沥青中,瞬间汽化产生大量泡沫,大幅降低沥青粘度,便于与集料拌和。此方法无需添加化学剂,成本较低,应用前景广阔。WMA技术可使生产能

耗降低, 温室气体排放减少, 烟尘和有害气体排放显著下降。同时, 较低的施工温度延长了混合料的可施工时间, 改善了工作环境, 并允许在较冷季节或地区施工, 提高了施工灵活性。

2.2 再生沥青 (RAP & RAS) 技术

再生技术是循环经济理念在道路工程中的直接体现, 通过将RAP/RAS重新用于新混合料中, 实现资源的闭环利用。RAP中含有老化硬化的沥青和洁净的集料。将其掺入新混合料时, 需要解决两个关键问题: 一是老化沥青的性能恢复, 二是新旧沥青的融合。通常通过添加再生剂 (Rejuvenator) 来实现。再生剂是一种富含轻质芳香分和饱和分的油性物质, 能够渗透到老化沥青中, 补充其损失的轻质组分, 软化老化沥青, 恢复其部分原始性能, 从而改善混合料的低温抗裂性和疲劳性能^[2]。早期RAP掺配率较低 (<20%), 主要用于底基层。如今, 通过优化配合比设计、使用高性能再生剂和抗剥落剂, RAP掺配率已可高达50%甚至100% (全深式再生)。RAS (回收屋面沥青瓦) 作为一种高沥青含量的废弃材料, 也被成功应用于路面再生, 但需严格控制其掺量以避免混合料过脆。大量使用RAP/RAS可显著减少对新沥青和新集料的需求, 节约自然资源; 减少填埋用地, 降低废弃物处理成本; 同时, 由于RAP通常在常温下加入, 也能间接降低混合料的生产温度和能耗。

2.3 生物基沥青

生物基沥青旨在用可再生的生物质资源部分或全部替代石油沥青, 从根本上改变沥青的原料来源。利用木质素、糖类、植物油 (如大豆油、棕榈油、亚麻籽油)、藻类、甚至废弃食用油等生物质原料, 通过热解、催化裂解、酯交换、聚合等化学工艺, 制备出具有类似沥青性能的生物粘结剂 (Bio-binder)。这些生物粘结剂可以直接作为沥青替代品, 或作为改性剂/再生剂与石油沥青共混使用。生物基沥青通常具有较好的柔韧性和低温性能, 但其高温稳定性和长期耐久性 (尤其是抗老化能力) 仍是当前研究的重点和难点。此外, 大规模生产时还需考虑原料的可持续性 (避免与人争粮、与粮争地) 和成本竞争力。生物质在生长过程中吸收CO₂, 因此生物基沥青具有显著的碳汇效应, 可大幅降低材料的全生命周期碳足迹。同时, 它开辟了利用农业、林业废弃物的新途径, 促进了资源的多元化利用。

2.4 废塑料改性沥青 (PMA)

PMA技术将难以降解的废塑料 (如PE、PP、PET) 作为改性剂添加到沥青中, 实现“黑色污染”向“黑色黄金”的转化。废塑料在高温下熔融, 均匀分散于沥青

中, 形成聚合物网络结构, 从而显著提升沥青的高温稳定性、弹性恢复能力和抗疲劳性能。根据塑料形态和处理方式, 可分为干法 (将塑料颗粒直接投入拌缸) 和湿法 (预先将塑料与沥青制成母粒)。关键在于确保塑料与沥青的良好相容性, 防止离析。不同种类、不同来源的废塑料性能差异巨大, 需要建立严格的分类、清洗和预处理标准。此外, 塑料在沥青中的长期老化行为及其对环境 (如微塑料释放) 的潜在影响仍需深入研究。PMA为解决全球性的“白色污染”问题提供了极具吸引力的出路。每公里道路可消耗数吨至数十吨废塑料, 环境效益巨大。同时, 改性后的沥青性能提升, 可延长路面寿命, 减少维修频率。

3 环保型沥青在不同工程场景中的应用

3.1 在道路工程中的应用

道路工程是环保型沥青应用最成熟、最广泛的领域。温拌沥青技术凭借其显著的减排和改善施工环境的优势, 已成为新建和养护工程的常规选择, 尤其适用于对施工扰民敏感的城市道路、通风条件受限的长大隧道以及施工季节短暂的寒冷地区。再生沥青技术则实现了从低等级公路到底基层再到高速公路上面层的全结构层、高掺配率应用, 厂拌热再生和就地热再生技术的成熟使得其经济效益和环保效益得到充分彰显^[3]。相比之下, 生物基沥青与废塑料改性沥青目前多处于示范工程和试点应用阶段, 荷兰、英国等国已铺设了多条掺有废塑料的试验路段, 而美国、中国也在积极探索生物基再生剂在高等级公路养护中的实际效果。

3.2 在机场工程中的应用

机场跑道, 尤其是民用运输机场的主跑道, 对道面的平整度、抗滑性、承载能力和耐久性要求极为苛刻, 任何微小的缺陷都可能危及飞行安全。因此, 环保型沥青在机场的应用更为审慎。温拌技术和高比例再生技术在主跑道上的应用面临挑战, 前者可能导致混合料冷却过快影响最终压实度, 后者则可能因RAP引入的性能变异性而影响道面长期性能的一致性。目前, 温拌技术在机场滑行道、联络道和停机坪等非主跑道区域已有成功应用案例, 而再生技术则更多用于机场内部服务道路或作为基层材料。生物基沥青和废塑料改性沥青在主跑道上的应用尚处研究阶段, 需经过极其严格的性能验证和长期观测。未来的研究方向将聚焦于开发专用于机场道面的高性能、低排放温拌再生技术, 确保其在满足严苛性能要求的同时, 实现绿色施工。

3.3 在桥隧工程中的应用

桥梁 (尤其是钢桥面) 和隧道因其特殊的结构形式

和服役环境,对铺装材料有独特要求。对于钢桥面铺装而言,其核心需求在于优异的追随性(抗弯拉)、与钢板的强粘结性、防水密封性以及综合的高低温性能。传统的浇注式沥青或环氧沥青虽然性能卓越,但施工温度高、VOC排放大。为此,研究人员正致力于开发低温施工的高性能树脂沥青或温拌型高弹改性沥青,例如将温拌技术与SBS、TPS等高弹性改性剂结合,以期在保证关键性能的同时,大幅改善施工环境。再生沥青在此领域的应用则相对谨慎,主要担忧其性能衰减可能会影响铺装层与柔性钢板的协同受力机制。在隧道工程中,封闭空间和差通风条件使得施工过程中的烟雾、气味和有害气体排放成为首要关切。温拌沥青因其低温施工特性,几乎完美契合了隧道的环保需求,能极大改善作业环境,保障工人健康,并减少对昂贵隧道通风系统的依赖。一些专为隧道开发的低烟、无味新型温拌添加剂也应运而生。再生沥青在隧道中的应用也较为可行,但需特别关注再生剂本身的气味问题。

4 挑战、发展趋势与展望

4.1 当前面临的挑战

新型环保沥青,如生物基和高掺量废塑料沥青,长期野外性能观测数据匮乏,复杂气候与交通荷载下的老化规律、疲劳寿命等关键指标不明,影响业主和设计单位采用。现有规范多基于传统HMA制定,未充分涵盖环保型沥青特殊性能指标与评价方法,导致“有好材料,无好标准”^[4]。部分环保型沥青初期成本高,且废塑料、RAP等原材料稳定高质量供应体系未完全建立,阻碍市场推广。此外,环保型沥青研发涉及多学科,跨学科协同创新机制不完善。

4.2 未来发展趋势

未来环保型沥青将向多功能一体化发展,集自感知、自修复、光催化降解污染物等智能与功能于一体,

成为智能铺面材料。数字化与智能化技术将深度融入,利用大数据和人工智能优化配合比设计、预测长期性能,借助智能施工设备精确控制工艺参数,保障工程质量。全生命周期评价(LCA)将成为核心评估工具,推动行业全面“绿色”转型。随着“双碳”目标推进,政府将出台更严格排放标准、提高再生材料强制使用比例、实施绿色建材财税激励政策,为环保型沥青创造广阔市场空间。

5 结语

环保型沥青材料的研发与应用,是交通基础设施行业响应国家绿色发展战略、实现自身转型升级的必然选择。温拌、再生、生物基、废塑料改性等技术路径各具特色,已在道路、机场、桥隧等不同工程场景中展现出良好的应用前景。尽管在长期性能验证、标准体系建设、成本控制等方面仍存在挑战,但随着技术的不断进步、政策的持续引导和全行业的共同努力,环保型沥青必将从“可选项”变为“必选项”,为构建资源节约、环境友好、安全耐久的现代化综合立体交通网奠定坚实的材料基础。未来的道路,不仅是连接远方的通途,更应是一条条践行绿色发展理念的生态走廊。

参考文献

- [1]丁佳瑛,薛永兵,刘振民,等.环保型沥青研究进展[J].化工进展,2021,40(S2):226-231.
- [2]陈黎旋.新型环保型沥青材料对道路性能提升的影响分析[J].运输经理世界,2025,(28):142-144.
- [3]李春波.机场沥青混凝土道面设计[J].运输经理世界,2021,(23):12-14.
- [4]邢圣杰,吴秀梅,孟令凯,等.沥青混合料施工用环保型沥青防黏隔离剂的应用研究[J].山东化工,2026,55(02):187-190.