

低碳建造背景下道路基层材料资源化利用

夏 恒

湖北省路桥集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]伴随着双碳战略的不断推进,道路工程建设所遭遇的资源消耗和碳排放双重压力越来越大,促使基层材料资源化利用成为行业绿色转型的重要途径。文章对道路基层材料资源化利用在低碳建造背景下的意义进行了系统的梳理,从再生材料性能稳定性差、施工技术体系不健全、质量评价标准缺位、成本控制难等问题入手,提出加强再生材料性能改善和研发、健全全过程质量把控体系、推进数字化技术应用、创建废弃材料循环利用体系、加强政策扶持和产业合作等改进途径。研究表明,采用多种措施综合推进的方式可以在保证工程品质的同时达到减碳降耗和资源循环的双重目的。

[关键词]低碳建造;道路基层;固废资源化;再生材料;循环利用

DOI: 10.33142/ec.v9i8.20218

中图分类号: U416.043

文献标识码: A

Resource Utilization of Road Base Materials under the Background of Low-carbon Construction

XIA Heng

Hubei Road & Bridge Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: With the continuous promotion of the dual carbon strategy, the dual pressure of resource consumption and carbon emissions encountered by road engineering construction is increasing, which has made the resource utilization of grassroots materials an important way for the industry's green transformation. The article systematically sorts out the significance of resource utilization of road base materials in the context of low-carbon construction. Starting from the problems of poor performance stability of recycled materials, incomplete construction technology system, lack of quality evaluation standards, and difficulty in cost control, it proposes ways to strengthen the improvement and research and development of recycled material properties, improve the overall quality control system, promote the application of digital technology, create a waste material recycling system, strengthen policy support and industrial cooperation. Research has shown that adopting a comprehensive approach of multiple measures can ensure the quality of engineering while achieving the dual goals of carbon reduction, consumption reduction, and resource recycling.

Keywords: low carbon construction; road grassroots; solid waste resource utilization; recycled materials; recycling

引言

道路工程建养资源占用大、能耗高、碳排放大。我国每年道路工程消耗砂石等材料几十亿吨,建筑垃圾、工业固废年产量不断上升,大量堆放占用土地,又对环境造成威胁。把固废转化成道路基层材料,既可解决大量的废弃物问题,又可以削减天然骨料的开采压力,还能削减碳排放,属于践行低碳建造的切入点之一。2025年6月固废资源化利用技术研发与产业化应用成为交通强国建设试点任务。近些年来,工业固废、建筑垃圾以及生活垃圾在基层材料中的应用都得到了发展。生活垃圾焚烧炉渣在最大替代情景下,全生命周期碳排放减少31%,基层碳减排效果最好,降幅达到51%~78%。但是实验室到规模化

工程应用之间还存在着再生材料性能不稳定、施工工艺适应性差、质量评价标准不统一、经济性难以验证等许多问题。本文从意义、问题、策略这三个方面进行论述,以期给该领域提供一定的参考。

1 道路基层材料资源化利用的意义

道路基层是路面结构的主要承重层,材料性能的好坏直接影响到道路的使用寿命和安全水平。传统的基层材料主要是用天然碎石、水泥、石灰等作为主要组成,开采和生产过程中消耗的能源以及产生的碳排放量较大。将工业固废、建筑垃圾、废旧路面材料等再生资源引入基层材料体系,有诸多积极意义。从环境效益上看,道路基层材料资源化利用属于消纳大宗固废的手段之一,每公里道路可

以消纳固废几千吨以上。采用再生集料代替天然骨料、用低碳胶凝材料代替传统水泥,可以大大减少矿山开采和水泥烧制造成的生态破坏和碳排放。工业固废在道路建设中进行资源化利用,是解决工业固废消纳问题、为公路建设提供新选择的一种方式,也推动着公路建设的绿色低碳发展。从经济效益角度出发,资源化利用可以大大减少工程成本,用工业废弃物改性不良路基土已经成为减轻道路材料短缺、加快绿色建筑材料开发的重要途径。根据部分工程实践可知,利用固废再生技术在矿山资源开采过程中可以节省成本,并且也可以使工程造价得到降低。从社会效益角度来讲,资源化利用符合国家“双碳”战略和循环经济政策的指引,有利于促使道路建设由“资源消耗型”转变为“循环再生型”。固废地质聚合物路面基层应用技术符合无废城市、双碳战略目标,给大宗固废资源化利用、交通基础设施低碳转型提供一条重要途径。

2 道路基层材料资源化利用存在的问题

2.1 再生材料性能稳定性不足

再生材料性能稳定性是决定它能否大范围应用于道路基层的首要条件。与天然骨料相比,再生集料的表观密度、压碎值、吸水率等基本物理指标有较大的差别。研究表明再生骨料基本性能指标低于天然骨料,因此在基层材料中掺配比例不能太高,控制在 20%~50%之间。再生砂浆、再生砖等低强度骨料的单颗粒强度只有天然碎石的 40%~60%,造成混合料压碎值严重超标。另外再生材料成分复杂、来源不同,在荷载、温度、湿度等外界环境作用下,容易造成再生料颗粒破碎,从而影响再生料的性能。在基层服役期间,再生混合料的收缩、抗冲刷、抗冻融等耐久性能同天然材料基层相比还存在差距,早期开裂和后期劣化风险较高。因此再生材料在重载交通或者高等级道路基层的应用受到很大的限制,工程决策者一般会因为担心长期服役性能而选择保守的设计方案。

2.2 材料制备与施工技术体系不完善

再生材料用于道路基层,不是简单的用废代石,而是包含破碎筛分、配合比设计、拌合运输、摊铺碾压、养生维护等全过程的技术重新构建。但是目前对于再生基层材料的制备和施工技术体系还不健全。在材料制备环节,由于各种固废材料的品位变异性较大,怎样通过配合比优化来实现性能的稳定可控,缺少系统的指导。目前工程中回收料利用率一般小于 40%,再加上冷再生材料早期强度形成慢、初期强度不足,大大影响了其性能和工程应用^[1]。施工环节中再生混合料的压实特性、养生条件等同于常规材料不同,施工参数和工艺方法不能直接套用。目前再生

混凝土在公路工程中还处在起步阶段,存在着应用规模小、技术标准不健全、质量控制难等状况。

2.3 质量评价与标准体系有待健全

标准化为技术推广打下基础,质量评价为工程应用提供保证。但是道路基层材料资源化利用领域标准体系的建设严重滞后于技术发展的需要。目前我国还没有形成一套关于一般工业固体废物在道路资源化利用方面的系统性评价标准体系。目前公路工程材料标准大多以天然材料为对象制定,对于再生材料的特殊性考虑不够。我国建筑垃圾资源化利用标准还存在着利用对象不全面、再生产品利用路径单一、指导其在道路中应用的标准体系不完善等不足。再生材料质量波动比天然材料大得多,一个技术指标不能全面体现它的工程适用性。可喜的是中国环境科学研究院牵头建立了包括工业固废道路利用全链条标准的体系。道路用建筑垃圾再生骨料无机混合料(JC/T 2281-2025)行业标准已经正式发布,自 2026 年 3 月 1 日起施行,本标准适用于城镇道路路面基层、底基层用再生混合料。

2.4 资源化利用成本控制难度较大

从全生命周期看,资源化利用有明显的经济效益,但是成本控制还存在很多问题。再生材料的收集、运输、分选、破碎、筛分等预处理环节会增加设备投资和运行成本,当固废来源分散、运输距离远的时候,物流成本会把材料本身的价格优势抵消掉。另外再生材料的性能改良大多要加入特定的激发剂、固化剂等外加剂,使材料成本增加。一些建筑垃圾再生利用企业陷入“原料吃不饱”和“产品卖不动”的两难境地,前边的固废回收体系不够完善造成原料供应不稳定,后边的市场对于再生产品的接受度不高又限制了规模化生产^[2]。另外由于没有形成成熟的定额体系以及造价依据,工程预算编制时很难对再生基层材料进行准确的综合成本计算,从而影响到它在招投标和工程计价中的竞争力。由于成本控制存在不确定性,所以很多潜在的应用场景都处在技术上可行、经济上存疑的尴尬境地。

3 低碳建造背景下道路基层材料资源化利用优化策略

3.1 加强再生材料性能改良与技术研发

提高再生材料的工程性能,这是促使它大规模使用的根本前提。对再生集料强度低、吸水率高、耐久性差等主要缺点,要从材料源头和改性技术两方面同时入手。骨料方面要改善破碎和筛分工艺,控制再生集料的粒形、级配,削减薄弱颗粒含量。使用较小粒径范围的再生骨料代替天然骨料,可以减小再生骨料对混合料力学强度发展的不利影响。从胶凝材料方面来说,用钢渣、粉煤灰、矿渣粉和

脱硫石膏等工业固废来制备固废基胶凝材料,可以达到固废资源化利用的目的,并且可以降低水泥的消耗。固废基低碳胶凝材料可以满足不同工业固废材料之间品位变异性的要求,有较好的适用性。另外,地聚物胶凝材料稳定天然骨料混合料在力学性能上也存在一些特别之处。继续开展材料改性技术、施工工艺及有关标准规范的完善工作,是使固废再生材料在道路工程中得到广泛应用的重要途径。

表 1 典型固废基道路基层材料的性能改良技术路径

固废类型	主要性能短板	改良技术路径	适用层位
建筑垃圾再生集料	压碎值高、吸水率大、强度低于天然骨料	优化破碎筛分工序;控制掺配比例(20%~50%);采用较小粒径范围替代	基层、底基层
钢渣/粉煤灰/矿渣粉	活性激发不足	固废基胶凝材料制备;多元数学回归模型配比优化	基层
生活垃圾焚烧炉渣	成分复杂、性能不稳定	替代天然集料用于基层;全生命周期碳减排评估	基层
黄金尾矿	颗粒细、活性低	低碳胶凝材料稳定;协同激发	底基层
工业固废混合料	品位变异性大	低碳胶凝材料适配不同固废品位	基层、底基层

3.2 完善资源化利用全过程质量控制体系

质量控制要覆盖固废材料从源头到成品全部过程。原材料方面要建立严格的固废分类和入场检验制度,将不同来源、不同品级的再生材料分门别类地加以管理,保证进入生产环节的材料质量有保障。配合比设计时要考虑到再生材料的变异性,使用动态设计的方法,根据实际材料性能随时调节配比参数。通过配比优化决策得到强度高、水稳定好、耐久性好的路用混合料。生产、施工过程中要制定再生基层材料专用施工工艺指南,确定拌合时间、含水率控制、压实遍数、养生条件等重要参数。低碳胶凝材料稳定固废混合料底基层铺筑可采用传统无机结合料稳定材料铺筑工艺,不需要对设备做特殊改造。验收和监测阶段要创建包含强度、耐久性、环境安全性等各方面指标的评价体系,做试验段应用研究以及路用数据剖析和评价^[3]。全过程质量数据的采集和追溯,可以对每一个工程批次进行有效的控制。

3.3 推动数字化技术赋能材料生产与施工管理

数字化技术给道路基层材料资源化利用的提质增效赋予了新的可能性。依靠大数据、机器学习的智能化设计平台可以自行产生适合各种环境条件的材料设计方案,从而大大缩减研发周期。在材料生产阶段要创建起包含原材料进厂检验、生产过程控制、成品质量检测在内的全链条信息化管理体系。施工管理阶段,全面融合大数据、物联网、人工智能等先进技术,创建起施工状态感知、数据多

维剖析、短板精确找到的全流程智能化管理体系,达成施工管理的精准化、高效化。数字化技术的运用可以提高生产、施工的准确性、效率,还可以给质量追溯、性能预测、持续改进提供数据支持。未来要继续推进再生基层材料生产由经验驱动向数据驱动转变,用数字化手段解决再生材料变异性大、质量控制难的固有问题。

3.4 建立道路废弃材料循环利用体系

资源化利用的可持续性,要依靠前端废弃物的稳定供应和后端再生产品稳定的消纳。要创建起“源头减量-过程利用-循环再生”全链条的循环体系。源头上要创建道路废弃材料的分类回收及储运网络,保证废旧沥青混合料、废旧水泥混凝土、旧路基层材料等有条理地回收并加以规范。创建路面废旧料收储和利用平台属于实现源头管理的重要手段。在过程端要推进再生材料在不同道路结构层位上的分层使用,即高品质的再生材料用在基层或者面层,低品质的再生材料用在底基层或者垫层上,实现“物尽其用”。末端端要打通再生产品的市场出路,把建筑垃圾资源化利用产品纳入建筑节能技术产品认定范围、绿色建材推广目录,积极推广使用建筑垃圾再生产品^[4]。循环体系闭环运行之后,道路建设就由原来的“开采-使用-废弃”线性模式转变为现在的“回收-再生-利用”,从根本上减少对天然资源的依赖。

3.5 加强政策引导与产业协同发展

政策引导属于促使道路基层材料资源化利用由技术可实施变为工程应用的主要推动力。国务院办公厅转发住房城乡建设部《关于进一步加强城市建筑垃圾治理的意见》,提出到2027年健全城市建筑垃圾治理体系,全国地级及以上城市建筑垃圾平均资源化利用率提高到50%以上。循环经济发展“十五五”规划提出到2030年大宗固体废弃物年综合利用量达到45亿吨左右。从标准规范角度来讲,道路用建筑垃圾再生骨料无机混合料(JC/T 2281-2025)等标准的出台,给再生混合料的规范化使用赋予了技术支撑。财政部、交通运输部已经公布了第一批25个“政府采购支持公路绿色低碳发展”试点任务,探索政府采购支持公路绿色低碳发展模式。就产业协同而言,应当促进设计单位、科研院所、施工企业同固废产生企业建立起长期的合作关系,依靠政策扶持和市场推动来推进道路基层材料资源化利用由试点示范走向规模化推广。

4 结语

低碳建造背景下,道路基层材料的资源化利用肩负着减碳降耗和固废消纳的双重任务,是响应国家“双碳”战略的必然选择,也是道路工程行业绿色转型的方向之一。

目前再生材料性能稳定、施工技术体系、质量评价标准、成本控制等各方面的不足仍然存在,限制了资源化利用的规模化发展。破解以上瓶颈需要从材料研发、质量控制、数字赋能、循环体系、政策引导等各方面综合施策、齐头并进。固废再生材料作为路面基层材料的相关研究已经取得了很大的进步,但是进一步提高材料改性技术、完善施工工艺、建立相关的标准规范仍然是今后的工作重点。可以预见,在技术进步和制度完善同时推进的情况下,道路基层材料的资源化利用会在低碳建造的宏大叙事里起到越来越重要的作用,给交通运输领域的绿色可持续发展提供坚实的材料支持。

[参考文献]

- [1]朱磊.低碳背景下工业固废基路面基层材料制备与路用性能验证[J].江西建材,2026(3):93-96.
- [2]余萌,廖鑫.建筑垃圾回填道路基层材料关键技术研究[J].城市道桥与防洪,2021(4):30-33.
- [3]王羽佳,王宇.固土岩复合材料在道路基层中的应用分析[J].散装水泥,2026(4):8-10.
- [4]王婷灏.废旧道路材料混合再生基层材料力学性能研究[J].甘肃科学学报,2019,31(2):92-96.

作者简介:夏恒(1986—),男,汉族,湖北武穴人,工程师,本科,研究方向:道路工程。