环保型固废材料用于公路路基填筑的可行性研究

郑淑娟[1]　李　楠[1]　卢红亮[2]
1. 阿拉善左旗公路运输维护中心　内蒙古　阿拉善盟　750300
2. 准格尔旗交通运输综合服务保障中心　内蒙古　鄂尔多斯　017100

摘　要：环保型固废材料用于公路路基填筑，是缓解天然砂石短缺、消纳工业与城市固废、降低交通建设碳排放的重要途径。本文围绕技术、环境、经济、政策与社会五个维度，构建可行性分析框架。分析表明，固废材料经破碎、筛分、陈化、配伍和稳定化处理后，可在级配、压实度、承载比、回弹模量和水稳定性满足规范的前提下，替代部分天然填料。其环境可行性取决于重金属与可溶盐浸出控制，经济可行性取决于运输半径、预处理成本和碳交易收益，制度可行性取决于标准、监管与责任分担。结论认为，环保型固废路基填筑总体可行，但属于有条件可行，应分类分级、因地制宜、全过程管控，并完善标准与产业链，方能实现规模化推广。

关键词：环保型固废；公路路基；填筑材料；资源化利用；可行性

引言

我国公路建设规模大，传统的路基填筑一直以砂石土为主要原料，造成大量资源消耗及生态环境破坏以及碳排放问题。同时，工业副产石膏、粉煤灰、钢渣、矿渣、建筑垃圾、尾矿等固废也大量产生，占用了大量土地并且对环境构成威胁。利用这些固废经过无害化与资源化处理后作为路基填筑材料，既可以减少对于天然材料的需求，也可以解决固废的问题，符合绿色交通和循环经济发展理念。但是由于固废来源广泛，成分变化较大，污染物迁移难以预测，因此固废能否用作路基填筑还需要考虑多个方面的问题而不能仅仅基于某一指标进行评价。

1 环保型固废材料与路基填筑的基本要求

1.1 环保型固废材料界定

环保型固废材料是在生产、运输、处置及应用环节中对环境污染较小、资源化程度较高、满足相应要求并且能作为公路路基填料使用的各类固体废物以及其混合物。根据其来源不同可以分为工业固废、建筑固废、矿业固废和城市固废；根据其作用不同又可划分为主要填料、辅助填料、稳定剂和胶凝组分等。“环保型”不是固废固有的特性，而是经过筛选、分选、预处理、混合调配并受控之后所具有的特性。如果其中有害成分超标或者渗滤液对周边环境造成污染，则不能称之为环保型固废材料。因此，环保属性是涵盖从产生到处置再到利用及后期跟踪监测整个过程的。

1.2 公路路基填筑技术要求

路基承受路面荷载并向地基传递，应具有足够的强度、刚度、水稳性和耐久性。填筑材料一般需级配良好、易于压实、承载比及回弹模量符合设计要求，收缩膨胀较小，抗冻融能力和抗冲刷能力强等。不同类型公路以及不同路段、不同地区对填筑材料的要求不同。所以，能否利用某种固体废物取决于该种固体废物经过处理后是否适合用于该处路基，而不是单纯依据固体废物的种类来判断。另外，路基还要有良好的排水设施，避免雨水长时间停留而降低路基强度。

2 技术可行性

2.1 材料性能与稳定机理

固废经破碎、筛分、陈化、均化后可获得适宜级配。粉煤灰与矿渣具有潜在胶凝活性，在碱性激发或水泥、石灰作用下水化，提升强度与水稳定性；钢渣和建筑垃圾再生骨料起骨架作用，需控制游离氧化钙、石膏及可溶物含量；尾矿和磷石膏需经改性或包覆以降低环境影响。合理配比并压实后，可形成密实结构，满足道路基层要求。关键在于原材料特性与比例调控：粉煤灰中玻璃微珠和未燃碳影响需水量与强度；矿渣碱度系数和活性指数决定胶凝效果；钢渣中游离氧化钙遇水膨胀，须经陈化或蒸压处理并限掺；磷石膏含可溶性磷、氟及重金属，需清洗、中和或煅烧处理[1]。通常采用“主填料 + 稳定剂 + 调节剂”模式，以建筑垃圾再生骨料或尾矿砂为主填料，水泥、石灰或固废基胶凝材料为稳定剂，粉煤灰或矿渣微粉为调节剂，通过击实、承

载比和无侧限抗压强度试验确定最佳配比，级配不足时可调整颗粒组成以降低空隙率、增强骨架嵌挤作用。

2.2 施工与质量控制

因固废密度、吸水率及破碎程度差异大，施工前须开展配合比设计与工艺参数优选，并采取防尘、防水、降噪等环保措施。质量检查涵盖压实度、CBR 值、回弹模量、粒径分布、含水率及浸出毒性，来源不稳定材料应分批检测并建立台账。雨季或低温施工需防止未固化材料泡水，摊铺采用分层方式，松铺厚度 20～30cm，压实度依路段位置与道路等级确定；碾压遵循“由轻到重、由慢到快、由边缘到中心”原则，避免骨料破裂或局部过压破坏。含水量控制尤为关键：粉煤灰、矿渣最佳含水量范围宽，过干难压实，过湿易形成“橡皮土”；钢渣和建筑垃圾再生骨料吸水性强，可洒水润湿或闷料处理。现场应设临时排水沟与沉淀池，防止雨水冲刷导致金属离子或可溶盐类污染周边水域。

2.3 长期耐久性

路基长期受到车辆荷载作用以及干湿交替、冻融及化学腐蚀等破坏，固废材料由于体积安定性差、盐析以及强度降低都会对其产生不利影响，需要考虑其膨胀性、崩解性、抗冻性和疲劳等性能问题。可通过稳定化、合理配合比设计及设置良好的排水系统来避免这些问题的发生[2]。总体上说，技术上可行，但是取决于预处理的程度以及施工质量控制情况不能一概而论；对于重要的路段，则要增大安全系数并且加强长期的观测。钢渣中的游离氧化钙过高会引发膨胀开裂，需要进行压蒸安定性试验并且限制其在路床以及构造物附近的应用比例；磷石膏在反复干湿环境下容易析出可溶盐，需要加设隔离层与防渗层；建筑垃圾再生骨料在冻融过程中会发生冻胀融沉现象，因此要控制其中的小颗粒的比例以及做好排水工作。长期监测可以是沉降、侧向位移、含水量、浸出液的质量以及强度衰减的速度；对于重要的公路还需要设置专门的观测断面，在一定的时间间隔内采集样品进行测试并及时采取相应的养护措施。

3 环境与经济可行性

3.1 环境可行性

固废含有重金属、可溶盐、有机物以及放射性物质，雨水渗透而产生的浸出液会对土壤、地下水造成影响，因此需要做浸出毒性测试，在必要的时候要进行稳定化、固化或者隔离，还要有排水设施，以免长时间浸泡而造成影响。如果环境风险可以接受，则固废填筑可以减少天然砂石开挖量，减少对生态环境破坏以及固废堆放面积，有利环保；但是要注意控制粉尘、运输过程中产生的扬尘及能源消耗的问题，防止二次污染的发生。环境可行性的分析除了浸出液浓度外还需考虑当地的水文地质情况、地下水资源埋藏深度、土壤的吸附能力以及敏感受体的距离等因素。在饮用水源保护区、湿地和地下水资源补给区不应使用可能会产生浸出的固废；而在一般的路堤上可以采用水泥固化、石灰中和、黏土包裹或土工膜隔离的方法。浸出实验最好能模拟出酸雨、中性和碱性条件下的长期渗透的情形；同时还需对运输和破碎的过程中产生的扬尘、噪音及废气进行评价以避免“末端无害，但过程有污染”。

3.2 经济可行性

固废就近使用可以节约运费及填埋费；而远距离运输或者复杂的无害化处理可能会超过天然填料的成本。需要计算建设和维护、保养、修复以及环境保护等全部成本，在此基础上碳交易、资源综合利用税收优惠、绿色金融都对提高经济性有益处。总的来说，经济性的可行性具有地域性，大中城市及其附近地区以及产业集聚区更容易实现规模化应用[3]。一般而言，运输半径不宜过大，一般为 30-50km 以内，否则运输成本会超过固废本身带来的经济效益。预处理成本主要包括破碎、筛分、陈化、稳定化以及检测等，而其中检测费用往往被忽视，但实际上它是保证环境安全的重要环节。固废代替天然砂石也可以节约取土场和弃土场的土地占用，从而减少相应的土地复垦费用，这也是一笔不小的收入，在经济评价时也应予以考虑；碳交易如果纳入碳排放核算范畴，还可以反映由于减少了水泥和天然骨料的生产和使用所导致的碳减排量所带来的经济利益。但是如果是当地的天然砂石价格较低并且容易获取，那么采用固废修建公路基床就没有明显的经济效益，甚至还需要政府补贴才能普及开来。

4 社会政策与风险保障

4.1 政策与标准支撑

国家倡导循环经济、无废城市以及绿色交通理念，有利于固废路基应用。但是目前相关规范大多针对常规材料，而固废路基设计、施工、检测及验收等方面的规范尚不健全。需要有分类分级标准，区分各类固废的应用场合、掺入比例以及环境要求；还需要加强跨部门管理，落实各方责任，包括生产者、运输商、使用者以及施工单位的责任，并与生态环境主管部门、住房和城

乡建设厅、交通运输厅、自然资源厅等部门协调配合。可以参考《公路路基施工技术规范》《公路路基设计规范》《固体废物鉴别标准》等相关文件编制固废路基专门的技术导则，对粉煤灰、钢渣、矿渣、建筑垃圾和磷石膏等主要固废提出具体的要求。掺入比例根据道路级别、路基位置以及环境敏感性进行分层次规定；环境要求则包括浸出液中的重金属、氟化物、可溶盐等不得超过一定数值。同时要建立健全固废来源登记、运输联单和使用记录，做到全链条可查询：生产者对其基本信息负责，使用者对其前期预处理和施工质量负责，建设单位对其最终使用寿命负责。

4.2 风险与保障机制

技术风险来自材料波动及长期性能不确定性；环境风险来自浸出及二次污染；市场风险来自成本波动及供应不稳定；管理风险来自监管缺失与责任不明晰。需进行源头分类、建立台账、委托第三方进行检测、定期监测并制定应急计划，同时加强信息公开与社会监督以获得公众支持，在技术上可通过批批检测、配合比调整及试验段进行控制；在环境保护方面可开展浸出试验、做好防渗处理并进行地下水监测来预防；对于市场风险可签订长期供货合同、实行价格联动以及寻找多种固体废物来源以分散风险；而在管理上可明确责任人、健全管理制度并实施奖惩措施来减少风险的发生[4]。对学校、医院、水源地等敏感地区要提高环境门槛，不能使用易发生浸出的固体废物。应急预案应包括浸出物超标、边坡坍塌和扬尘污染等情况。

5 综合可行性判断与实施路径

5.1 综合判断

环保型固废材料应用于公路路基填筑整体可行，但为有条件可行。该条件是：材料经过无害化处理并且对环境影响在可接受范围之内；性能达到设计及规范要求；经济上优于或等于传统方式；有相应的标准、管理和责任制度；施工和养护可控。各地不同固废种类以及不同路段情况差异较大，不能一概而论。忽略环境底线可能会带来二次污染，忽略经济约束也不能广泛推广。要防止过于乐观或者过于谨慎的态度，要采取区别对待、因地制宜、全过程管理的方法。如粉煤灰、矿渣等环境风险小、技术成熟固废可优先推广；钢渣、磷石膏等需要进行改性的固废应在充分试验后谨慎采用；来源不明、成分复杂、环境风险高的固废禁止或者限制使用。

5.2 实施路径

第一，进行资源调查，建立固废数据库，明确可利用品种及风险等级；第二，推广预处理和技术固化等工艺，形成标准化产品；第三，制定相应设计规范及施工指南，将固废路基纳入绿色公路评价；第四，建立健全环境监测和全寿命期评估制度；第五，通过税收优惠、碳交易市场以及绿色采购方式促进产业发展；第六，加强政府间合作和社会各界参与，形成多方共治局面。可以分为三个阶段推进：初期以粉煤灰、矿渣及建筑垃圾再生骨料为主，在工业聚集地和大城市周边进行试验示范；中期完善相关标准和管理制度，增加钢渣、尾矿等固废的应用；远期形成完整的固废路基产业链，实现规模化、标准化和低碳发展。试验需考虑各种气候、水文以及交通情况，获取长期内性能信息；提前制定标准可防止一拥而上或一刀切的做法；监管形成闭合回路包括从源头到分类运输再到预处理施工直至竣工验收以及后续长期监测；公众参与要注重信息透明和公众参与决策等。

结束语

环保型固废材料用于公路路基填筑，是资源化利用与绿色交通的交汇点。其可行性不是简单的“能”或“不能”，而是技术、环境、经济、制度和社会多约束下的条件判断。只要坚持源头分类、无害化处理、性能匹配、过程控制和长期监测，固废材料可在一定范围内替代天然填料，降低资源消耗和环境负荷。未来应加强标准体系建设、全寿命周期评价和产业链协同，推动固废路基填筑从分散探索走向规范应用，为公路建设低碳转型提供支撑。

参考文献

[1] 王强, 刘洋. 工业固废在公路路基中的资源化利用研究进展 [J]. 公路交通科技,2021,38(4):1-8.

[2] 李敏, 张华. 固废基路基填料环境风险评价与控制 [J]. 环境工程,2022,40(6):155-161.

[3] 陈晨, 赵磊. 钢渣-矿渣复合路基填料力学特性研究 [J]. 建筑材料学报,2021,24(5):1120-1127.

[4] 周涛, 孙丽. 磷石膏改性路基填料的工程适用性 [J]. 硅酸盐通报,2021,40(9):3012-3019.