

A Preliminary Analysis of the Application of High Performance Solid Waste Treatment Materials in Road Engineering

Shuai Pang

Shanxi Provincial Transportation Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract

This article explores the current application status and development prospects of high-performance solid waste treatment materials in road engineering. With the acceleration of urbanization and the continuous promotion of infrastructure construction, the amount of solid waste generated has increased sharply. How to effectively handle and utilize these solid wastes has become an urgent problem to be solved. This article analyzes the classification and characteristics of high-performance solid waste treatment materials, with a focus on their application technologies in road base, subgrade, and pavement. The feasibility and effectiveness of these materials are verified through practical case analysis. Research has shown that high-performance solid waste treatment materials can not only effectively solve the problem of solid waste disposal, but also improve the quality and durability of road engineering, with significant economic and environmental benefits. Finally, this article looks forward to the future development direction and challenges faced in this field.

Keywords

high-performance solid waste treatment materials; Road engineering; Solid waste utilization; environmental protection; Sustainable development

高性能固废处治材料在道路工程中的应用浅析

庞帅

山西省交通规划勘察设计院有限公司, 中国·山西太原 030000

摘 要

本文探讨了高性能固废处治材料在道路工程中的应用现状和发展前景。随着城市化进程的加快和基础设施建设的不断推进, 固体废弃物的产生量急剧增加, 如何有效处理和利用这些固废成为亟待解决的问题。本文分析了高性能固废处治材料的分类与特性, 重点研究了其在道路基层、路基和路面中的应用技术, 并通过实际案例分析验证了其可行性和效果。研究表明, 高性能固废处治材料不仅能有效解决固废处置问题, 还能提高道路工程的质量和耐久性, 具有显著的经济效益和环境效益。最后, 本文展望了该领域未来的发展方向和面临的挑战。

关键词

高性能固废处治材料; 道路工程; 固废利用; 环境保护; 可持续发展

1 引言

随着我国城市化进程的快速推进和基础设施建设的蓬勃发展, 固体废弃物的产生量呈现爆发式增长。据统计, 我国每年产生的建筑垃圾超过 20 亿吨, 工业固废产生量更是高达 30 多亿吨。这些固废若得不到妥善处理, 不仅占用大量土地资源, 还会对环境造成严重污染。与此同时, 道路工程建设需要消耗大量天然原材料, 导致资源日益枯竭。如何将固废转化为高性能的道路工程材料, 实现“变废为宝”, 已成为当前研究的热点问题^[1]。

高性能固废处治材料是指通过物理、化学或生物方法对固体废弃物进行处理, 使其具备优良的工程性能, 能够满

足道路工程建设要求的材料。这类材料不仅能够有效解决固废处置难题, 还能减少对自然资源的开采, 降低工程造价, 具有显著的经济效益和环境效益。本文将从材料分类、应用技术、案例分析等方面, 系统探讨高性能固废处治材料在道路工程中的应用现状和发展前景。

2 高性能固废处治材料的来源、分类及特性

高性能固废材料是指以工业固废、建筑垃圾、城市废弃物等为主要原料, 通过物理、化学或生物技术手段处理, 制备出的具有优异力学性能、耐久性 or 特殊功能(如吸附、催化、隔热等)的材料。这类材料是实现资源循环利用和低碳发展的重要途径, 广泛应用于建筑、交通、环保等领域。

2.1 高性能固废处治材料的来源:

工业固废: 粉煤灰、矿渣、钢渣、赤泥、煤矸石、尾矿等; 建筑垃圾: 废弃混凝土、砖瓦、玻璃、陶瓷等; 城市固废: 焚烧飞灰、污泥、废旧塑料、橡胶等; 农业固废: 稻壳灰、

【作者简介】庞帅(1985-), 女, 中国山西太原人, 硕士, 工程师, 从事道路桥梁设计研究。

秸秆、果壳等。

2.2 高性能固废处治材料的分类

高性能固废处治材料可根据来源和处理方式分为三大类：建筑垃圾再生材料、工业固废改性材料和特殊固废复合材料。建筑垃圾再生材料主要包括再生骨料、再生混凝土和再生沥青混合料等，这些材料通过对拆除建筑物的混凝土、砖瓦等废弃物进行破碎、筛分和强化处理而获得。工业固废改性材料则包括矿渣、粉煤灰、钢渣等工业副产品经过活化处理后形成的胶凝材料或填料。特殊固废复合材料是指将一些具有特殊性质的固废，如废弃橡胶、塑料等，与其他材料复合制备的新型道路工程材料。

2.3 高性能固废处治材料的特性

这些高性能固废处治材料具有以下显著特性：首先，它们具有良好的力学性能，经过适当处理后，其强度、刚度和稳定性可达到甚至超过传统材料的标准要求。其次，这些材料具有优异的耐久性，能够抵抗冻融循环、化学腐蚀等环境因素的破坏。再次，它们往往具备一些特殊功能，如温度敏感性低、抗裂性能好等。最重要的是，使用这些材料可以显著降低道路工程的碳排放和能源消耗，实现绿色建造。研究表明，使用30%的再生骨料替代天然骨料，可减少约15%的二氧化碳排放量^[2]。

3 高性能固废处治材料在道路工程中的应用技术

3.1 高性能固废材料处治的关键技术要点

3.1.1 预处理技术

固废材料的预处理技术是将其转化为高性能材料的关键环节，旨在通过物理、化学或生物方法对原始固废进行分选、纯化、活化或改性，以满足后续加工或应用的性能要求。主要有以下几种：

①破碎与筛分：通过颚式破碎机、反击式破碎机等设备将建筑垃圾、工业固废处理成不同粒径的骨料，满足道路工程级配要求。②活化改性：由于原始固废材料活性低（如粉煤灰28d活性指数仅65-75%），物理力学性能不达标（如再生骨料压碎值>30%），耐久性缺陷（抗冻性、抗渗性差），所以要对固废材料进行活化改性。主要方式有以下几种：物理活化：机械研磨（如钢渣超细粉磨）提高活性；化学活化：采用碱激发剂（如NaOH、水玻璃）激发粉煤灰、矿渣的胶凝性；热活化：煅烧黏土类固废（如废弃砖瓦）提升火山灰活性。

3.1.2 配合比设计

高性能固废材料的配合比设计需兼顾力学性能、耐久性、经济性和环保性，其核心在于通过科学方法优化固废掺量、胶凝体系、骨料级配及外加剂组合。

①性能优先：满足强度（抗压/抗折）、耐久性（抗冻、抗渗）等工程要求。②固废最大化：在保证性能前提下，提高固废替代率（如矿渣替代水泥≥50%）。③协同效应：利用不同固废的互补性（如粉煤灰的活性+钢渣的微膨胀性）。④低碳低成本：减少高能耗组分（如水泥熟料），降低胶凝材料用量^[3]。

除了传统的采用响应面法、正交试验等方法确定最佳配比。还可以依靠数字技术辅助，进行BIM参数化设计，建立材料数据库，通过200组以上的历史配比数据，实现性能预测，准确率高达85%。通过一系列系统的配比确定方法，可使固废材料在满足工程性能要求的前提下，实现资源化利用率最大化（可达70-90%），同时降低工程成本15%-30%。

4 施工工艺控制

高性能固废材料（如再生骨料、工业废渣基胶凝材料等）在道路、建筑等工程中的应用需严格控制施工工艺，以确保其力学性能、耐久性和环境安全性。以下是关键施工工艺控制要点：

4.1 原材料预处理控制

①固废分类与筛选：按来源（建筑垃圾、工业废渣等）和成分（金属、有机物、惰性材料）分类，剔除杂质。②破碎与分级：采用颚式破碎机、冲击式破碎机等设备控制粒径（如再生骨料宜为0-31.5mm），级配需符合规范（如《GB/T 25177-2010》）。③有害物质处理：通过磁选（去除金属）、风选（轻物质）或化学稳定化（重金属固化）降低污染风险。

4.2 配合比设计优化

①活性激发：针对矿渣、粉煤灰等废渣，添加碱性激发剂（NaOH、水玻璃）或硫酸盐激发剂（石膏），优化胶凝体系。②粒径匹配：采用“间断级配”或“骨架密实结构”设计，如再生骨料替代率≤30%时需补充天然骨料填充空隙。耐久性调整：掺入防水剂（硅烷）或防冻剂（引气剂）提升环境适应性。

4.3 混合料拌和工艺

①搅拌顺序：先干拌固废骨料与胶凝材料30s，再加水湿拌60s以上（双卧轴搅拌机效果更佳）。②均匀性控制：变异系数≤5%（通过筛分试验验证），避免离析。③水灰比动态调整：考虑固废吸水率（如再生骨料吸水率4-10%），实时监测坍落度（建议120-160mm）。

4.4 摊铺与压实控制

分层摊铺：每层厚度≤200mm（振动压路机）或150mm（平板夯），松铺系数1.2-1.3。

压实工艺：

初压：静压1遍（速度1.5-2km/h）；复压：振动压路机3-4遍（频率30-45Hz，振幅0.4-0.8mm）。

终压：轮胎压路机2遍消除轮迹；密实度检测：灌砂法或核子密度仪检测，压实度≥95%（高速公路基层要求）。

4.5 养护与质量控制

①保湿养护：覆盖土工布+洒水养护7天（湿度≥90%），避免收缩裂缝。②强度发展监测：3d强度≥设计值50%，28d强度达标（如路基填料CBR≥8%）。③环保检测：浸出液重金属含量符合《GB 5085.3-2007》标准^[4]。

4.6 特殊工况应对

雨季施工：缩短摊铺段长度（≤50m），备防雨棚。低温环境

添加早强剂 ($\text{CaCl}_2 \leq 2\%$)，养护温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ (覆盖保温膜)。通过上述工艺控制，可确保固废材料达到设计强度 (如基层 7d 无侧限抗压强度 $\geq 3\text{MPa}$) 且浸出毒性达标，实现经济与环保双赢。施工中需结合现场试验段数据动态调整参数。

5 道路工程中的应用浅析

在道路基层施工中，高性能固废处治材料主要用作稳定土或无机结合料稳定基层的材料。建筑垃圾再生骨料可以替代部分或全部天然骨料，与水泥、石灰等结合料拌和形成强度高、水稳定性好的基层材料。工业固废如钢渣、矿渣等经过磨细活化后，可作为矿物掺合料部分替代水泥，不仅能降低成本，还能提高基层的后期强度和耐久性。施工时需特别注意材料的均匀性和压实度控制，确保基层质量。

在路基填筑方面，高性能固废处治材料展现出广阔的应用前景。建筑垃圾再生材料、工业废渣等经过适当处理后，可作为路基填料使用。这些材料具有较好的压实性能和承载能力，能够有效减少路基沉降。特别是一些轻质固废材料，如泡沫玻璃再生料，可用于软土路基的处理，减轻路基自重，防止不均匀沉降。应用时需根据材料特性合理确定填筑厚度和压实工艺，必要时可添加少量水泥或石灰进行稳定化处理。

在路面工程中，高性能固废处治材料的应用形式更为

多样。再生沥青混合料技术已经相对成熟，可将废旧沥青路面材料经过破碎、筛分后，与新集料和沥青重新拌和使用。研究表明，适当比例的再生沥青混合料不仅性能满足要求，还具有更好的抗裂性和耐久性。此外，一些特殊固废如废弃轮胎橡胶粉可用于制备改性沥青，提高路面的抗老化性能和降噪效果。工业固废如粉煤灰、硅灰等可作为矿物填料加入沥青混合料中，改善其高温稳定性和水稳定性。

6 高性能固废材料在道路工程中应用价值

高性能固废材料在道路工程中有一定的资源循环利用价值，我国每年产生建筑垃圾超 20 亿吨，利用率不足 30%，工业固废年产量超 30 亿吨，综合利用率约 55%，但是道路工程可消纳 70% 以上的适宜固废材料。另外在经济成本方面，与传统材料相比，固废材料可降低工程造价 15%-40%，减少运输成本 20-50%，节省土地资源 (每公里道路可减少取土占地 3-5 亩)。另外在环境方面的效益也很显著，可减少碳排放 30-60%，降低天然骨料开采量 40-80%，避免固废填埋造成的土壤污染。

7 应用技术与固废利用率的对比效益

见表 1。

项目类型	应用技术	固废利用率	效益说明
高速公路基层	水泥稳定建筑垃圾再生骨料	40%	节约成本 25%，无沉降病害
城市主干道路面	30%RAP 热再生沥青混合料	30%	裂缝率降低 50%
软土路基	泡沫玻璃再生料 + 水泥固化	100%	工后沉降 $< 5\text{cm}$ (3 年监测)

8 实际案例分析

某城市环线快速路改造工程中，采用了建筑垃圾再生骨料作为基层材料。工程将拆除旧建筑的混凝土废弃物经过破碎、筛分和强化处理后，替代 30% 的天然骨料，与水泥拌和形成稳定基层。经过两年运营监测，该路段基层状况良好，未出现明显病害，弯沉值保持在设计允许范围内^[9]。与使用全天然骨料相比，节约材料成本约 15%，减少碳排放约 20%。

在某高速公路扩建项目中，采用了钢渣作为路基填料。将钢铁厂产生的转炉钢渣经过陈化、破碎和筛分处理后，用于填筑路基。工程实践表明，钢渣路基的压实度和承载能力均满足规范要求，且具有较好的排水性能。与传统土石方填料相比，钢渣路基节约了约 25% 的工程造价，同时解决了钢厂固废处置难题。

某城市主干道采用了 30% 掺量的再生沥青混合料进行路面铺装。将旧路面铣刨料经过精细处理后，与新集料和沥青重新拌和，铺筑了 5 厘米厚的上面层。经过三年交通荷载作用，路面平整度保持良好，裂缝率低于同期建设的传统沥青路面。该工程不仅降低了 30% 的材料成本，还减少了约 40% 的废旧路面材料处置量。

9 结语

高性能固废处治材料在道路工程中的应用已经取得了

显著成效，不仅解决了固废处置难题，还降低了工程成本，减少了资源消耗和环境污染。随着处理技术的不断进步和标准体系的完善，这类材料的应用比例将进一步提高。

未来研究应重点关注以下几个方面：开发更高效的固废活化处理技术，提高材料性能；建立完善的质量评价体系和标准规范；研究不同固废材料的协同利用技术；探索固废材料在特殊环境条件下的应用性能。同时，也需要解决固废材料来源不稳定、性能波动大等挑战，推动其大规模工程应用。

参考文献

- [1] 张明远, 李红梅. 建筑垃圾再生骨料在道路基层中的应用研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(5): 45-52.
- [2] Wang, L., Chen, S.S. Utilization of steel slag as aggregates for stone chip paving blocks[J]. Construction and Building Materials, 2021, 283: 122-135.
- [3] 陈志刚, 王丽华. 固废基道路工程材料的研究进展与应用前景[J]. 材料导报, 2022, 36(3): 78-85.
- [4] Liu, Y., Zhang, H. Performance evaluation of recycled asphalt mixtures incorporating various percentages of RAP materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 298: 126-138.
- [5] 国家发展和改革委员会. 大宗固体废弃物综合利用指导意见[Z]. 2021-05.