

# 工业固废再生骨料在绿色公路基层中的环境与力学性能研究

高峰 许雪峰 武宏伟

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:** 资源约束趋紧与环境污染加剧,推动交通基础设施绿色低碳转型成国家战略要点。工业固废大规模堆存占用土地、潜藏生态风险,公路建设对天然砂石骨料高强度消耗加剧资源枯竭与生态退化。将工业固废资源化制备再生骨料用于公路基层,是实现“以废代材、减污降碳”协同增效的关键。本文梳理钢渣等典型工业固废再生骨料特性,剖析其在公路基层应用的力学性能形成机制与环境安全控制原理,通过对比分析论证不同因素对基层材料综合性能的影响规律,指出标准体系等方面存在的关键科学问题。研究表明,科学配比与工艺调控下,工业固废再生骨料能满足绿色公路基层要求,前景广阔。未来应强化多源固废协同利用理论,构建评价模型,加快标准化与政策引导。

**关键词:** 工业固废;再生骨料;绿色公路;力学性能;环境安全性

## 引言

在全球气候变化与生态文明建设的双重驱动下,“双碳”目标(碳达峰、碳中和)已成为我国经济社会高质量发展的核心约束与战略导向。交通运输领域作为能源消耗与碳排放的重要来源,其绿色化转型势在必行。公路基础设施作为交通系统的物理载体,其全生命周期的资源消耗与环境影响备受关注。传统公路建设高度依赖天然砂石骨料,年消耗量以数十亿吨计,导致山体破坏、河床下切、生物栖息地丧失等一系列生态问题。同时,伴随工业化进程加速,钢铁、电力、煤炭、建材等行业产生的工业固废总量持续攀升,综合利用率仍有较大提升空间。大量固废采用填埋或露天堆存方式处置,不仅造成资源浪费,还可能因雨水淋溶、风蚀扩散等途径释放有害物质,威胁土壤、水体及人体健康。在此背景下,推动工业固废在道路工程中的高值化、规模化利用,既是破解资源环境瓶颈的现实需要,也是践行循环经济理念、构建绿色低碳交通体系的战略选择。公路基层作为承上启下的关键结构层,对材料的力学稳定性与环境相容性具有较高要求,是工业固废再生骨料最具潜力的应用场景之一。

## 1 典型工业固废再生骨料的物化特性与适用性

### 1.1 高硬度惰性类固废:以钢渣为代表

钢渣是炼钢过程的副产品,经陈化、破碎、筛分后可获得高密度、高硬度的粗细骨料。其主要矿物组成为硅酸二钙( $C_2S$ )、硅酸三钙( $C_3S$ )及铁铝酸盐相,具有潜在水硬性。钢渣骨料的洛杉矶磨耗值低、压碎值小,可有效提升基层混合料的骨架强度与抗变形能力。但其高碱性( $pH > 12$ )及未完全反应的游离氧化钙

( $f-CaO$ )、氧化镁( $f-MgO$ )可能引发体积膨胀,需通过充分陈化或添加抑制剂加以控制。总体而言,经适当处理的钢渣再生骨料适用于对强度和模量要求较高的中低等级公路基层。

### 1.2 火山灰活性类固废:以粉煤灰、煤矸石为代表

粉煤灰是燃煤电厂的细灰,富含非晶态 $SiO_2$ 和 $Al_2O_3$ ,具有显著的火山灰活性。在碱性激发剂(如水泥、石灰)存在下,可参与二次水化反应生成C-S-H、C-A-H等胶凝产物,填充孔隙、增强界面粘结。其球形颗粒形态还能改善混合料的工作性。煤矸石虽活性较低,但经煅烧活化后亦可表现出一定火山灰效应<sup>[1]</sup>。此类固废通常作为细集料或矿物掺合料使用,有助于提升基层的密实度与后期强度,但早期强度发展较慢,需配合早强措施。

### 1.3 多组分混合类固废:以建筑垃圾为代表

建筑垃圾成分复杂,包含废弃混凝土、砖瓦、砂浆等,经处理后所得再生骨料孔隙率高、吸水率大、强度离散性大。其直接用于基层易导致干缩开裂与强度不足。通常需与高活性固废(如粉煤灰)或胶凝材料复配,通过“骨架-填充-胶结”协同机制改善整体性能。适用于对强度要求不高的底基层或内部道路。

## 2 再生骨料基层力学性能形成机制

### 2.1 强度发展机理

强度是基层抵抗荷载破坏的核心指标。对于水泥或石灰稳定的再生骨料基层,其强度主要来源于胶凝相硬化、骨料骨架嵌挤以及微填充效应的综合作用。水泥水化或石灰-火山灰反应生成的胶凝产物(如C-S-H凝胶)将骨料颗粒胶结成整体,形成连续的承载网络;高硬度

再生骨料（如钢渣）则构成稳定的骨架结构，承担主要荷载；而细颗粒固废（如粉煤灰）则填充粗骨料间空隙，提高密实度，减少应力集中。不同固废对强度的贡献机制各异：钢渣侧重于骨架支撑与潜在胶凝；粉煤灰则通过火山灰反应提升后期强度；煤矸石主要起填充作用。合理设计级配与胶凝体系，可实现“刚柔并济”的强度发展模式，既保证早期施工稳定性，又确保长期服役可靠性。

### 2.2 回弹模量与抗变形能力

回弹模量反映材料在弹性阶段的应力-应变关系，直接影响路面结构设计厚度。高模量意味着更好的荷载扩散能力与抗车辙性能。钢渣等高模量骨料的引入可显著提升基层整体刚度，这源于其自身高弹性模量及与胶凝相的良好界面结合。此外，致密的微观结构（由细颗粒填充与胶凝产物填充共同形成）也有助于模量提升，因为孔隙率的降低减少了材料在受力时的内部滑移与压缩变形。然而，需注意的是，过高的模量可能导致基层脆性增加，与柔性面层之间的变形协调性变差，从而诱发反射裂缝<sup>[2]</sup>。因此，在追求高模量的同时，应兼顾材料的韧性与变形适应能力，通过调整骨料级配、控制胶凝材料用量或引入柔性组分，实现刚度与韧性的平衡。

### 2.3 耐久性保障机制

耐久性关乎基层长期服役性能，主要包括抗冻性、抗冲刷性与抗疲劳性。抗冻性依赖于低孔隙率与封闭孔结构，以减少水分侵入与冰胀压力。钢渣基材料因致密性好，通常抗冻性优异。抗冲刷性则要求胶结相与骨料间具有强界面粘结力，而火山灰反应生成的胶凝产物可有效增强界面，防止水流冲刷导致的颗粒流失。抗疲劳性与材料内部缺陷（如微裂纹、连通孔隙）数量密切相关，这些缺陷在反复荷载作用下易扩展为宏观裂缝。优化配合比、提高密实度、减少有害孔隙，是提升抗疲劳性的根本途径。此外，良好的施工质量控制（如压实度、含水率）也是保障耐久性的关键环节，任何施工缺陷都可能成为耐久性劣化的起点。

## 3 环境安全性控制原理

### 3.1 重金属固化/稳定化机制

工业固废中常含有As、Pb、Cr、Cd等重金属元素。在再生骨料基层中，这些元素可通过多种机制被有效固定。首先，胶凝产物（如C-S-H凝胶）在水化过程中包裹固废颗粒，形成致密的物理屏障，阻碍污染物向外迁移；其次，水化产物表面通常带负电荷，能够通过静电吸附作用捕获阳离子态重金属；再次，在高碱性环境（ $\text{pH} > 12$ ）下，重金属易形成氢氧化物、碳酸盐等难溶

沉淀，大幅降低其溶解度；最后，部分重金属离子还可通过同晶取代机制进入水化产物的晶格结构中，实现原子尺度的结构固化。其中，钢渣、粉煤灰等高碱性固废自身即可提供稳定的碱性环境，有利于重金属的长期稳定化，这使得以它们为主要组分的再生骨料基层在环境安全性方面具有天然优势。

### 3.2 浸出行为影响因素

重金属浸出是一个受多重因素调控的动态过程。pH值是最关键的影响因子，酸性条件（如酸雨或酸性土壤环境）会溶解已形成的沉淀物，显著增加浸出风险；而碱性环境则能有效抑制浸出。液固比与接触时间同样重要，长期雨水浸泡可能使浸出液不断更新，突破物理屏障，导致累积浸出量增加。此外，固废本身的种类与预处理方式也决定其重金属赋存形态的稳定性<sup>[3]</sup>。例如，经高温熔融处理的钢渣，其重金属多以玻璃相或晶格形式存在，浸出毒性远低于未经处理的原始固废。因此，环境安全性评估不能仅依赖于标准条件下的短期浸出试验，还需结合工程所在地的实际气候、水文与地质条件，进行多情景、长周期的浸出行为模拟与风险预测。

### 3.3 长期环境稳定性

基层材料服役期长达10至20年，期间经历干湿交替、冻融循环、碳化作用等复杂环境耦合效应。其中，碳化是最值得关注的长期老化过程，它会消耗体系中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，降低pH值，理论上可能削弱重金属的固化效果。然而，研究表明，即使表层发生碳化，由于再生骨料基层通常具有较低的渗透性， $\text{CO}_2$ 难以快速深入内部，因此内部仍可维持高碱性环境，整体浸出风险依然可控。此外，随着时间推移，水化反应持续进行，微观结构进一步致密化，反而可能增强对污染物的物理阻隔能力。因此，从长期来看，合理设计的工业固废再生骨料基层不仅不会成为污染源，反而可能因其稳定的矿物相和致密结构，成为一种环境友好的工程屏障。

## 4 综合性能协同优化路径

实现环境安全与力学性能的协同提升，需从材料设计源头入手。

### 4.1 多源固废协同利用

单一固废往往难以兼顾所有性能需求。例如，钢渣强度高但可能存在膨胀风险；粉煤灰活性好但骨架支撑弱。通过多源固废复配（如“钢渣+粉煤灰”），可发挥“1+1 > 2”的协同效应：钢渣提供坚固的骨架结构，承担主要荷载；粉煤灰则以其微细球形颗粒填充孔隙，并在碱性环境下参与火山灰反应，生成额外的胶凝产物，增强界面粘结与整体密实度。这种协同不仅提升了力学

性能, 还通过粉煤灰的稀释效应降低了钢渣中潜在膨胀组分的浓度, 同时利用钢渣的高碱性激发粉煤灰活性, 形成良性循环。类似地, 将建筑垃圾再生骨料与煤矸石、粉煤灰组合, 也可在保证基本强度的前提下, 最大化固废消纳量, 实现资源效率与环境效益的统一。

#### 4.2 稳定化技术集成

除常规水泥、石灰稳定外, 可引入新型稳定化技术以进一步提升综合性能。碱激发技术利用NaOH、水玻璃等强碱激发粉煤灰、矿渣等固废的潜在活性, 形成高强度、低收缩的地质聚合物基体, 其力学性能与耐久性往往优于传统水泥体系。化学稳定剂如磷酸盐、硫化物, 则可与重金属离子反应生成极难溶的磷酸盐或硫化物沉淀(如 $Pb_3(PO_4)_2$ 、CdS), 其溶度积极低, 能从根本上降低浸出风险<sup>[4]</sup>。将这些先进技术与传统稳定方法有机结合, 可构建“力学增强-环境阻控”一体化的再生骨料基层材料体系, 为高环境敏感区域(如水源地、生态保护区附近)的道路建设提供安全可靠的技术方案。

#### 4.3 级配与孔隙结构调控

优化再生骨料的粒径分布, 构建紧密堆积结构, 是提升性能、降低成本的关键策略。理想级配应兼顾粗骨料的骨架作用与细料的填充效应, 最大限度减少空隙率, 从而降低对胶凝材料的需求量。这不仅节约成本, 还能减少因胶凝材料水化带来的收缩开裂风险。通过Fuller曲线、Talbot公式等理论指导, 结合固废骨料的实际颗粒形状与表面特性, 可设计出适用于特定固废组合的最优级配。致密的孔隙结构不仅能提升力学性能与耐久性, 还能有效阻隔水分和污染物的迁移通道, 从物理层面保障长期环境安全。因此, 级配设计不仅是力学问题, 更是环境安全的重要防线。

### 5 挑战与展望

尽管前景广阔, 工业固废再生骨料在绿色公路基层中的规模化应用仍面临多重挑战。现行公路设计与施工规范对再生骨料的技术指标、检验方法、验收标准缺乏明确规定, 导致工程实践中“不敢用、不会用”的现象普遍存在。同时, 缺乏基于材料组成-微观结构-宏观性能关联的寿命预测理论, 难以支撑全生命周期设计理念的落地。此外, 全生命周期环境效益的量化仍存在方法学障碍, 需建立涵盖固废收集、运输、加工、施工、服

役、拆除全过程的LCA(生命周期评价)模型, 才能科学评估其真实碳减排与生态效益。更为深层的问题在于跨行业协同机制不畅, 固废产生、处理与道路建设分属不同行业, 信息壁垒与利益分割制约了资源的高效配置与技术的快速推广。未来研究应着力于构建“环境-力学-经济”多目标协同优化设计方法, 发展基于人工智能的再生骨料基层性能智能预测与调控技术, 推动制定国家级或行业级技术标准与认证体系, 并完善绿色采购、碳交易等政策激励机制, 从而真正打通“技术研发—标准制定—工程应用—市场推广”的全链条, 释放工业固废的巨大资源潜力。

### 6 结语

工业固废再生骨料在绿色公路基层中的应用, 是实现资源循环利用与交通绿色发展的双赢策略。通过对典型固体废物化特性的深入解析, 可知钢渣、粉煤灰等经适当处理后具备作为基层骨料的基本条件。其力学性能的形成源于骨架嵌挤、胶凝硬化与微填充的协同作用, 而环境安全性则依赖于高碱性环境下的重金属固化与致密结构的物理阻隔。通过多源固废复配、稳定化技术集成与级配优化, 可有效实现环境安全与力学性能的协同提升。然而, 该技术从实验室走向大规模工程应用, 仍需突破标准缺失、长期性能不确定、全生命周期效益不明等瓶颈。唯有通过跨学科融合、产学研协同与政策制度创新, 方能真正释放工业固废的资源价值, 为构建资源节约、环境友好、安全耐久的绿色公路基础设施体系提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1]陈涛.再生骨料在公路基层施工维修中的强度特性与环境效益研究[J].建设机械技术与管理,2025,38(04):17-18+25.
- [2]孙立敏.再生骨料混凝土在公路工程中的碳排放分析[J].中国水泥,2025,(09):136-138.
- [3]赵振宇,张立群,樊旭英,等.再生骨料生产调查与其在普通公路中的应用研究[J].河北建筑工程学院学报,2020,38(01):20-24.
- [4]李兴峰.改性再生骨料公路透水沥青混凝土性能研究[J].中国新技术新产品,2025,(13):86-88.