

# 市政道路基层再生骨料性能优化与施工工艺

陈文光

中建粤华建设有限公司 广东深圳 518000

**摘要：**本文聚焦于市政道路基层中再生骨料的性能优化与施工工艺，旨在解决其因性能波动大、施工要求高而导致的推广应用难题。首先，在阐述再生骨料来源、特性及应用可行性的基础上，系统分析了其在物理力学性能和长期耐久性方面的固有缺陷。其次，从级配优化、物理化学改性、水泥稳定配合比设计三个层面，提出了针对性的性能优化方法，并建立了完善的性能评价指标体系。最后，围绕施工准备、拌合运输、摊铺压实及养护检测四大环节，制定了精细化的施工工艺控制标准。研究表明，通过实施系统性的性能优化与严格的工艺控制，可有效提升再生骨料基层的综合性能，使其满足市政道路的使用要求。这不仅为建筑废弃物的高值化利用提供了成熟的技术路径，也为推动市政工程建设向绿色、低碳、循环方向发展具有重要的实践指导意义。

**关键词：**再生骨料；市政道路；基层；性能优化；施工工艺

## 引言

随着我国城镇化进程的加快和基础设施的大规模更新，建筑废弃物产量激增，其资源化利用已成为社会关注的焦点。同时，传统天然骨料的过度开采也带来了严重的生态环境问题。在此背景下，将建筑废弃物制备成再生骨料并应用于市政道路基层，是实现建筑垃圾资源化、缓解资源环境压力的有效途径。然而，再生骨料存在吸水率高、强度低、性能不稳定等固有缺陷，且其施工工艺较天然骨料更为复杂，导致其在实际工程中的应用受到诸多限制。因此，如何通过科学的性能优化方法和精细化的施工工艺，提升再生骨料在道路基层中的应用品质，是当前市政工程领域亟待解决的关键技术问题。

## 一、再生骨料在市政道路基层应用的基本理论

### (一) 再生骨料的定义与来源

再生骨料是指通过对建筑废弃物、混凝土路面拆除块、沥青铣刨料等进行破碎、筛分、清洗等处理后，具有一定粒径分布并可用于工程建设的骨料材料。其来源主要包括旧建筑物拆除产生的废弃混凝土、市政道路翻修时产生的混凝土及沥青混合料、工业建筑拆除废料等。根据原材料类型不同，再生骨料可分为混凝土类再生骨料、沥青类再生骨料及混合类再生骨料。其中，混凝土类再生骨料在市政道路基层中应用最为广泛。再生骨料的制备过程需严格控制破碎设备参数、筛分精度及杂质含量，确保其满足工程应用要求。与传统天然骨料相比，再生骨料的来源具有显著的不确定性，其性能受原始材

料强度、使用年限、环境侵蚀等多重因素影响，这对其在道路基层中的应用提出了更高要求。

### (二) 再生骨料的物理力学性能

再生骨料的物理力学性能是决定其工程适用性的核心指标。物理性能方面，再生骨料通常具有较高的吸水率（一般为3%-8%，远高于天然骨料的1%-2%），这主要源于其表面附着的水泥砂浆孔隙及微裂缝。表观密度通常为 $2300\text{--}2500\text{kg/m}^3$ ，略低于天然骨料。级配特征受破碎工艺条件下的长期性能稳定。施工性能要求包括适宜的含水率（最佳含水率2%）、良好的压实性能（压实度96%）和均匀的级配分布。此外，基层材料还需满足环保要求，重金属浸出量需符合《土壤环境质量标准》限值。这些性能要求构成了再生骨料应用的技术门槛，也是性能优化的重要依据<sup>[1]</sup>。

### (三) 再生骨料应用的可行性与限制因素

再生骨料在市政道路基层中的应用具有显著的技术经济可行性。从资源利用角度看，再生骨料可替代30%-50%的天然骨料，有效缓解天然骨料短缺问题，同时减少建筑废弃物堆放占地。经济性分析表明，考虑运输距离因素后，再生骨料综合成本可比天然骨料降低15%-25%。环境效益方面，每利用1吨再生骨料可减少约0.8吨 $\text{CO}_2$ 排放，具有显著的碳减排效果。然而，其应用仍面临多重限制因素：性能波动性导致质量控制难度增加，需建立更严格的检测制度；长期性能数据缺乏，特别是在重载交通条件下的表现尚需验证；部分地区的规范标准对再生骨料应用比例存在限制；施工工艺要求更

高，需专门培训施工人员。此外，再生骨料中的有害物质（如氯离子、硫酸盐）可能影响基层耐久性，需采取针对性处理措施。这些因素共同构成了再生骨料推广应用的技术瓶颈，也是后续研究需要重点突破的方向。

## 二、再生骨料性能优化方法

### (一) 骨料级配优化设计

骨料级配优化设计是提升再生骨料性能的基础环节。级配优化需遵循最大密实度原则，通过调整不同粒径骨料的比例，使混合料达到最佳堆积状态。具体实施中，采用Fuller曲线或Talbol公式作为理论级配曲线，结合再生骨料实际粒径分布特征，确定目标级配范围。针对再生骨料细颗粒含量偏高的问题，可采取以下优化措施：增加4.75–19mm粗骨料比例至40%–50%，控制0.075mm以下颗粒含量不超过5%；采用间断级配设计，减少2.36–4.75mm中间颗粒含量，形成骨架密实结构。级配优化效果需通过击实试验验证，要求优化后再生骨料的最大干密度提高3%–5%，最佳含水率降低1%–2%。实际工程中，建议采用连续式拌合设备进行级配控制，通过实时调整各料仓给料速率，确保级配稳定性。级配优化不仅能显著提高再生骨料的力学性能，还能改善其施工性能，为后续改性处理和稳定处理奠定基础。

### (二) 再生骨料改性处理技术

再生骨料改性处理技术旨在通过物理、化学或复合方法改善其固有缺陷。物理改性主要包括机械强化和热处理两种方式：机械强化采用球磨机或立式磨对再生骨料进行二次破碎，通过磨削作用去除表面附着的水泥砂浆，可使压碎值指标降低8%–12%；热处理则在500–700℃条件下对再生骨料进行煅烧，去除有机杂质并改善界面过渡区，处理后吸水率可降低30%–40%。化学改性主要通过表面活性剂处理或聚合物浸渍实现：采用硅烷偶联剂溶液浸泡再生骨料，可在其表面形成憎水膜，使吸水率降低25%–35%；利用苯乙烯–丁二烯乳液进行浸渍处理，可填充表面微裂缝，使抗磨耗性能提高40%以上。复合改性技术结合物理和化学方法的优势，如先进行机械强化再采用聚合物浸渍，可使再生骨料综合性能提升50%以上。改性处理效果需通过系列物理力学性能试验验证，包括压碎值、磨耗值、坚固性等指标，确保改性后再生骨料满足道路基层使用要求<sup>[2]</sup>。

### (三) 水泥稳定再生骨料配合比设计

水泥稳定再生骨料配合比设计是性能优化的关键环节，需综合考虑强度、稳定性和经济性。设计方法采用正交试验与响应面法相结合，以水泥剂量、再生骨料掺

量、含水率为主要影响因素，以7天无侧限抗压强度、回弹模量和干缩系数为评价指标。试验表明，水泥剂量控制在4%–6%范围内可获得最佳技术经济性，超过6%后强度增长不明显且成本显著增加。再生骨料掺量建议为30%–50%，超过50%需采取改性措施。配合比设计需遵循以下原则：在满足强度要求的前提下，尽量降低水泥用量；通过调整级配减少水泥用量；控制粉料含量以提高抗裂性能。实际工程中，建议采用振动成型法确定最佳含水率和最大干密度，较传统击实法更能反映现场压实状态。配合比验证需进行冻融循环试验、干湿循环试验和疲劳试验，确保水泥稳定再生骨料在复杂环境条件下的长期性能稳定。优化后的配合比可使基层材料强度提高20%–30%，同时减少收缩裂缝发生率<sup>[3]</sup>。

### (四) 性能评价指标与试验方法

再生骨料性能评价需建立科学完整的指标体系和标准试验方法。物理性能评价指标包括表观密度、堆积密度、吸水率、含泥量等，试验方法严格遵循《公路工程集料试验规程》(JTG E42–2005)。力学性能核心指标为压碎值、磨耗值和坚固性，其中压碎值要求控制在26%以下，磨耗值不超过30%，坚固性损失率≤12%。针对水泥稳定再生骨料混合料，需重点检测7天无侧限抗压强度(≥3.5MPa)、回弹模量(≥1000MPa)和劈裂强度(≥0.4MPa)。耐久性评价包括冻融试验(质量损失≤5%)、干缩试验(干缩系数≤120με)和抗冲刷试验(冲刷质量损失≤15g/min)。现场控制指标包括压实度(≥98%)、平整度(≤8mm)和弯沉值(≤0.7mm)。试验方法方面，建议采用加速老化试验评价长期性能，利用CT扫描技术分析内部结构特征，通过数字图像处理技术量化裂缝发展规律。建立室内试验与现场施工的相关性模型，提高试验结果的工程适用性。完善的性能评价体系可为再生骨料在道路基层中的应用提供科学依据和技术支撑。

## 三、市政道路基层再生骨料施工工艺

### (一) 施工准备与材料管理

施工准备与材料管理是确保再生骨料基层施工质量的首要环节。施工前需进行详细的现场勘查，重点调查路基承载力、地下水位及排水条件，确保基层施工基础满足设计要求。材料管理方面，再生骨料进场前必须进行严格的质量检验，包括颗粒级配、含泥量、压碎值等关键指标，每批次材料均需出具合格证明。存储过程中，应采用分区堆放方式，不同规格的再生骨料需设置明显标识，并采取防雨、防污染措施，避免材料性能劣化。

施工设备准备包括检查拌合设备计量系统精度（误差控制在 $\pm 1\%$ 以内）、摊铺机自动找平装置灵敏度及压路机振动频率稳定性。技术准备环节需编制专项施工方案，明确各工序质量控制要点，并对施工人员进行专项技术培训，重点讲解再生骨料与天然骨料的施工差异。建立材料追溯系统，记录每批再生骨料的来源、性能指标及使用部位，为后续质量评估提供数据支持。完善的施工准备与材料管理体系可有效降低施工风险，为后续工序创造有利条件<sup>[4]</sup>。

## （二）混合料拌合与运输工艺

混合料拌合与运输工艺直接影响再生骨料基层的均匀性和稳定性。拌合过程应采用强制式拌合机，严格控制拌合时间（不少于90秒）和投料顺序，建议按再生骨料、水泥、水依次投料，确保混合料搅拌均匀。拌合过程中需实时监测含水率，根据天气条件动态调整加水量，使混合料含水率控制在最佳含水率 $\pm 0.5\%$ 范围内。针对再生骨料吸水率较大的特点，可预先进行润湿处理，减少拌合过程中的水分损失。运输环节应采用覆盖式自卸车，运输时间控制在30分钟以内，避免混合料离析和水分蒸发。长距离运输时需采取分层装料和覆盖保湿措施，确保混合料到达现场时仍保持良好工作性能。建立拌合-运输联动机制，根据现场摊铺进度动态调整拌合产量，减少混合料等待时间。运输车辆需定期清理，防止不同批次材料交叉污染。拌合与运输工艺的精细控制可有效保证混合料质量均匀性，为后续摊铺压实奠定基础。

## （三）摊铺与压实工艺控制

摊铺与压实工艺是决定再生骨料基层平整度和密实度的关键。摊铺前清理并湿润下承层，确保层间结合。用带自动找平系统的摊铺机作业，速度控制在2-3m/min，连续均匀摊铺。因再生骨料摩擦系数大，提高摊铺机螺旋布料器转速，保证混合料分布均匀。压实遵循“先轻后重、先静后振、先慢后快”原则，初压钢轮压路机静压1-2遍，复压振动压路机碾压4-6遍，终压胶轮压路机消除轮迹。严格控制含水率，接近最佳含水率时振动压实获最大干密度。考虑再生骨料易离析，边缘增加碾压遍数。用灌砂法检测压实度，每200m测4个点，要求达98%以上。精确控制此工艺可提高基层性能，确保路面长期稳定<sup>[5]</sup>。

## （四）养护与质量检测

养护与质量检测是保障再生骨料基层性能的最后环

节。养护期不少于7天，覆盖土工布并定期洒水，保持基层湿润，防止水分蒸发，期间禁车辆通行。质量检测分过程和成品检测：过程检测监控拌合含水率等参数，每200m测一次；成品检测在养护后进行，检测压实度等指标，每1000m一组取样，每组不少于3个点。针对再生骨料基层特性，增加抗冻融和干缩性能检测。建立质量追溯档案，记录检测数据。用落锤式弯沉仪等无损检测技术评估整体性能，与传统方法验证。完善的养护与检测体系确保基层达设计要求，为市政道路使用提供保障。

## 结语

再生骨料的成功应用并非简单的材料替代，而是一个涉及材料、设计、施工全链条的系统工程。其核心在于：通过级配优化与改性处理等前端手段，从根本上改善材料自身性能；再通过配合比设计的科学调控，充分发挥其潜在价值；最终依托精细化的施工工艺与严格的质量控制，确保其性能在工程实体中得到稳定实现。展望未来，随着相关标准的不断完善和环保政策的持续加码，再生骨料在市政道路工程中的应用将更加广泛。未来研究应进一步聚焦于再生骨料的长期性能演变规律、智能化施工监控技术以及全生命周期的环境与经济效益评价，从而为构建资源节约型、环境友好型的城市基础设施体系提供更为坚实的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 冯仁科，彭斌，乔建刚.再生集料透水混凝土基层的路用性能研究[J].物流科技，2020, 43 (8)：4.
- [2] 艾洪祥，刘洋，卢霄，等.再生细骨料的级配优化及对混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品，2022 (7)：5.
- [3] 姜涛；赵景峰；李明；裘泳；黄孝；徐亦冬.再生骨料自密实清水混凝土配合比优化及表观性能试验研究[J].硅酸盐通报，2020, 39 (8)：2581-2586.
- [4] 田小风，李基恒，王新，等.路用再生骨料透水混凝土的力学性能优化研究[J].西部交通科技，2021. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2021.07.003.
- [5] 杨晓波，姜丽.再生骨料清水混凝土的制备与施工工艺优化研究[J].河北工程技术高等专科学校学报，2019, 000 (001)：44-47.