

钢渣集料在道路面层中的应用及环保性能检测

郝润姝

内蒙古城市规划市政设计研究院有限公司 内蒙古自治区呼和浩特市 010000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20583

[摘要] 针对钢渣堆存污染与天然集料短缺问题,本文研究钢渣集料预处理工艺,优化沥青混合料级配、配合比及施工参数,并搭建多维度环保检测体系。试验证实,稳定化处理后的钢渣集料路用性能优于天然集料,环保指标全面达标,可替代玄武岩用于高等级道路面层。研究成果助力钢渣低碳高值利用,顺应绿色道路发展方向。

[关键词] 钢渣集料;道路面层;路用性能;环保检测;稳定化处理

引言

我国钢渣年产生固废超1.5亿吨,累计堆存超10亿吨,露天堆放易产生扬尘、重金属渗漏等污染,固废处置压力严峻。同时,交通基建持续发展致使天然砂石需求激增,过度开采引发生态破坏,集料供需矛盾突出。依托国家固废资源化利用政策导向,钢渣在交通工程中的绿色应用成为行业转型重点。钢渣活性组分丰富、路用性能优异,是优质再生集料,但因其存在膨胀不稳定问题与微量生态风险,难以在高等级道路面层大规模应用。当前国内外研究多局限于钢渣单一性能改良与简易试用,缺乏集改性预处理、路面应用、环保安全于一体的系统性研究,配套技术与管控标准不完善。为此,本文依托现行行业规范,系统开展钢渣集料性能改性、配比优化、施工管控及环保评价研究,明确关键技术与安全

指标,完善其路面应用技术体系,为规模化工程推广提供理论与技术支撑。

1 钢渣集料基本特性与预处理技术

1.1 物化特性

本文研究所用集料为转炉钢渣,经热闷、滚筒工艺处理后杂质少、级配均匀。其主要化学成分为氧化钙、二氧化硅与氧化铁,含少量重金属元素;核心矿物组分为硅酸二钙、硅酸三钙,其中游离氧化钙是导致钢渣体积不稳定的核心诱因,也是预处理需要重点消解的组分。钢渣集料表观密度显著高于玄武岩等天然集料,压碎值、磨耗损失、磨光值等力学指标均满足高等级道路面层标准。其多孔粗糙的表面结构可与沥青形成高强度粘结界面,粘附性可达5级,有效提升沥青混合料密实度与抗水损害能力,路面耐久性性能优势显著。

表1 道路面层用钢渣集料核心技术指标

指标类型	检测项目	单位	高速公路/一级公路要求	二级及以下公路要求
体积稳定性	浸水膨胀率	%	≤ 1.0	≤ 1.5
	游离氧化钙含量	%	≤ 1.5	≤ 2.5
力学性能	压碎值	%	≤ 24	≤ 28
	洛杉矶磨耗损失	%	≤ 28	≤ 32
力学性能	磨光值	BPN	≥ 420	≥ 380
物理性能	表观密度	g/cm^3	≥ 3.2	≥ 3.0
	针片状颗粒含量	%	≤ 10	≤ 15
	含泥量	%	≤ 1.0	≤ 1.5
界面性能	沥青粘附性等级	级	≥ 5	≥ 4

1.2 稳定化预处理关键技术

为消除钢渣不稳定组分、抑制膨胀病害，本文对比自然陈化、加速碳化、机械活化三种预处理工艺的技术参数与应用效果，筛选最优工程应用方案。自然陈化为基础稳定化工艺，将钢渣置于通风排水场地自然消解。其控制参数：陈化周期 ≥ 12 个月、堆高 $\leq 5\text{m}$ ，含水率稳定在 $8\%\sim 12\%$ 。处理后钢渣游离氧化钙 $\leq 2.5\%$ 、浸水膨胀率 $\leq 1.5\%$ ，体积稳定性满足常规道路面层使用要求。加速碳化是高效改性技术，通过 CO_2 与钢渣游离氧化钙反应生成稳定碳酸钙，快速消除膨胀隐患。工艺参数： CO_2 浓度 $\geq 20\%$ 、温度 $20\sim 30^\circ\text{C}$ 、湿度 $60\%\sim 70\%$ ，处理周期 $7\sim 14\text{d}$ 。处理后钢渣膨胀率 $\leq 1.0\%$ ，稳定效果与力学性能优于自然陈化，适用于高等级道路工程。机械活化通过破碎研磨、分级筛分细化钢渣粒径、破坏不稳定结构、优化级配。核心指标：粒径 $0.075\sim 16\text{mm}$ 、针片状含量 $\leq 10\%$ 、含泥量 $\leq 1.0\%$ 、研磨 $30\sim 60\text{min}$ 。该工艺可优化颗粒形貌与沥青粘结效果，提升混合料和易性，适配规模化摊铺施工。

1.3 预处理后钢渣集料核心技术指标

结合现行绿色道路工程地方标准，整理得到不同等级道路面层用预处理钢渣集料的核心技术指标，涵盖稳定性、力学、物理及界面性能，具体参数如表 1 所示。

2 钢渣集料在道路面层中的应用技术

2.1 矿料级配设计

稳定化钢渣集料可适配 AC-13、AC-16、SMA-13 等主流道

路面层结构。基于钢渣高密度、多孔、高粗糙度的材料特性，本文针对性优化矿料级配与骨料配比，精准控制混合料空隙率、密实度等核心指标。钢渣粗集料为混合料核心骨架，采用 $4.75\sim 16\text{mm}$ 三级配分级搭配，掺量占比 $60\%\sim 70\%$ ，各级粒径筛分通过率严格遵循规范区间控制。细集料采用石灰岩机制砂与钢渣细料复配，细度模数控制在 $2.6\sim 3.0$ ；填料选用亲水系数 ≤ 0.8 的石灰岩矿粉，掺量 $5\%\sim 8\%$ ，可有效填充集料空隙，提升混合料密实度与水稳定性。

以高速公路常用 SMA-13 面层为应用场景，采用 100%钢渣粗集料替代玄武岩集料，最优配比为 65%钢渣粗集料、22%石灰岩细集料、7%矿粉、6%SBS 改性沥青，成型混合料各项核心指标均满足高等级道路面层施工标准。

2.2 沥青混合料配合比设计

基于马歇尔设计方法，结合钢渣多孔高吸油特性，优选 I-D 级 SBS 改性沥青适配施工需求。相较于玄武岩混合料，钢渣混合料最佳沥青用量上调 $0.3\%\sim 0.5\%$ ，SMA-13 与 AC-13 沥青用量分别控制在 $5.8\%\sim 6.5\%$ 、 $5.2\%\sim 5.8\%$ ，可实现沥青充分裹附，规避路面松散脱落病害。为强化界面粘结与抗老化性能，掺加 $0.3\%\sim 0.5\%$ 胺类抗剥落剂提升粘附性能；SMA 骨架结构额外掺加 $0.2\%\sim 0.4\%$ 木质素纤维，增强混合料整体性与抗水损害能力。马歇尔试验结果表明，钢渣沥青混合料稳定度、水稳定性、冻融劈裂性能均优于传统玄武岩混合料，力学性能与结构稳定性更具优势，具体指标如表 2 所示。

表 2 钢渣沥青混合料马歇尔试验核心指标

混合料类型	稳定度 (kN)	流值 (0.1mm)	空隙率 (%)	水稳定度 (%)	冻融劈裂强度比 (%)
SMA-13 (钢渣)	≥ 8.5	25~35	3.5~4.5	≥ 90	≥ 85
AC-13 (钢渣)	≥ 7.5	20~30	4.0~5.0	≥ 88	≥ 82
SMA-13 (玄武岩)	≥ 7.0	20~40	3.0~5.0	≥ 85	≥ 80

2.3 施工工艺精准管控

钢渣沥青混合料施工工序与常规沥青混合料相近，但因其高密度、高导热特性，需优化工艺参数。拌和温度控制：集料 $180\sim 190^\circ\text{C}$ 、沥青 $160\sim 170^\circ\text{C}$ 、混合料 $170\sim 180^\circ\text{C}$ ，干拌 $15\sim 20\text{s}$ 、湿拌 $35\sim 40\text{s}$ ，防止混合料离析、花白。运输全程保温控温；摊铺速度 $2\sim 3\text{m}/\text{min}$ 、温度 $\geq 160^\circ\text{C}$ ，松铺系数 $1.15\sim 1.25$ ，保证成型厚度达标。施工采用钢轮、胶轮组合分

级温控碾压：初压 $\geq 150^\circ\text{C}$ 静压 2 遍，复压 $\geq 130^\circ\text{C}$ 碾压 $4\sim 6$ 遍以保障密实度，终压 $\geq 110^\circ\text{C}$ 静压收光消弭轮迹。路面降温至 50°C 以下方可通车，可有效抑制路面早期变形破损。

2.4 路用性能综合分析

通过高温、低温、水稳定、抗滑及疲劳试验，系统对比钢渣与玄武岩沥青混合料路用性能，具体数据如表 3 所示。试验结果表明，钢渣集料高硬度、高耐磨特性使混合料高温

动稳定度提升 50%以上，抗车辙能力显著增强；粗糙的表面结构优化路面抗滑性能，提升行车安全性。同时，优异的界面粘结性能可有效抵御水分侵蚀与车辆往复荷载作用，水稳

定性、低温抗裂性及抗疲劳耐久性均大幅提升，可有效延长道路服役年限、降低后期养护成本，综合路用性能全面优于传统天然集料混合料。

表 3 钢渣与天然集料沥青混合料路用性能对比

性能指标	钢渣沥青混合料	天然玄武岩沥青混合料	提升幅度
高温稳定性（动稳定度，次/mm）	≥6000	≥4000	50%以上
低温抗裂性（弯曲破坏应变，μ ε）	≥2500	≥2000	25%以上
抗滑性能（构造深度，mm）	≥0.7	≥0.5	40%以上
水稳定性（冻融劈裂强度比，%）	≥85	≥80	6%以上
耐久性（疲劳寿命，次）	≥10 ⁶	≥8×10 ⁵	25%以上

3 钢渣集料环保性能检测体系

3.1 重金属浸出毒性检测

重金属浸出毒性为核心环保检测指标，重点检测铜、锌、铅、镉、铬类污染物，采用标准醋酸缓冲浸出法结合 ICP-MS 仪器检测。结果表明，稳定化钢渣集料重金属浸出浓度远低于国标限值与地下水Ⅳ类水质标准，污染物迁移风险极低。同时沥青包裹致密结构可进一步降低 90%以上的重金属浸出量，彻底规避服役期渗漏污染风险，具体指标如表 4 所示。

表 4 钢渣集料重金属浸出毒性技术要求（mg/L）

检测项目	技术限值 (mg/L)	地下水Ⅳ类标准限值 (mg/L)
铜（Cu）	≤100	≤1.0
锌（Zn）	≤100	≤5.0
铅（Pb）	≤5	≤0.1
镉（Cd）	≤1	≤0.01
总铬（Cr）	≤15	≤0.1
六价铬（Cr ⁶⁺ ）	≤5	≤0.05

3.2 放射性核素检测

采用 γ 能谱法检测钢渣集料内外照射指数，检测结果显示，钢渣内照射指数≤0.5、外照射指数≤0.8，远低于道路集料安全限值 1.0 和 1.3，无放射性危害，可安全应用于道路面层工程。

3.3 碳化稳定性与生态毒性检测

自然碳化与室内加速碳化试验表明，钢渣集料长期服役碳化深度小、强度损失低，抗风化性能优异，长期露天应用不会出现结构破碎、性能衰减问题，结构稳定性良好。采用发光细菌法开展生态毒性检测，钢渣浸出液

3.4 环保性能综合评价

综合全维度环保检测结果可知，经标准化稳定化预处理的钢渣集料，重金属浸出、放射性、碳化稳定性、生态毒性等各项环保指标均达标，且大幅优于规范限值，生态安全等级高于常规天然集料。同时，沥青混合料的包裹封闭结构可长期阻隔钢渣内部微量污染物的迁移与扩散，在全服役周期内不会对周边土壤、地下水、大气环境造成二次污染，完全满足绿色道路工程的环保建设要求。

4 结语

本文研究稳定化钢渣集料在道路面层的应用及环保性能，确定了预处理、配合比与施工关键参数。经处理的钢渣集料克服体积稳定性问题，力学、抗滑及粘附性能优于玄武岩；对应的沥青混合料高低温性能与耐久性大幅提升，可优化路面使用效果。检测表明，钢渣环保指标全部达标，应用安全可靠。该技术既能消纳工业固废、节约天然骨料，又能实现低碳减排，综合效益突出。后续可围绕低成本改性、长期性能监测等方向深入研究，推动钢渣路面技术产业化落地。

[参考文献]

[1] 俞春荣;杨凤鸣;郑炳锋. 钢渣在沥青路面面层中的应用研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2018(01)

[2] 李超;陈宗武;谢君;吴少鹏;肖月. 钢渣沥青混凝土技术及其应用研究进展[J]. 材料导报, 2017(03)

[3] 马宇. 钢渣改性沥青混合料的可持续性评价与长期路用性能研究[J]. 江西建材, 2025(05)

[4] 李慧娟;李斌斌. 钢渣集料在沥青路面中的应用研究[J]. 甘肃科技, 2025(02)