

骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣基层材料路用性能的室内研究

张泽鑫^{1,2} 胡向宇^{1,2} 王庆^{1,2}

1 大宗固废综合利用与绿色建材襄阳市重点实验室, 湖北襄阳, 441100;

2 湖北楚晟科路桥技术开发有限公司, 湖北襄阳, 441100;

摘要: 生活垃圾焚烧灰渣的工程性质类似于天然集料, 由于本身的疏松多孔, 加入道路基层混合料中对性能的影响显得尤为重要。作为与路基直接接触的基层材料, 本文概述了垃圾焚烧灰渣的物理化学性质。同时, 为研究骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣基层材料路用的可行性, 对混合料的力学性能、收缩性能及抗冲刷性能的影响进行研究分析。

关键词: 骨料嵌锁型; 垃圾焚烧灰渣; 道路基层; 路用性能

DOI: 10. 69979/3029-2727. 24. 06. 006

随着城市化进程的加快, 建筑和基础设施的需求不断增加, 随之而来的建筑废弃物和垃圾处理问题日益严重。垃圾焚烧作为一种有效的废物处理方式, 在减少垃圾体积的同时, 能够转化为可利用的能源和材料。然而, 焚烧过程中产生的灰渣往往被视为废弃物, 其处理和利用问题亟待解决。骨料嵌锁型水泥作为一种新型的基层材料, 因其优良的力学性能和耐久性受到了越来越多的关注。将垃圾焚烧灰渣与骨料嵌锁型水泥相结合, 既能有效减少焚烧灰渣的环境负担, 又能提升基层材料的性能, 从而为城市基础设施建设提供一种经济且环保的解决方案。因此, 深入研究骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣基层材料的路用性能, 具有重要的学术价值和实践意义。

1 垃圾焚烧灰渣性质分析

1.1 物理性质

垃圾焚烧灰渣是生活垃圾焚烧后遗留于焚烧炉底部的残渣, 是一种多孔、灰色、质地粗糙的固体物质,

属于非均质混合物。其主要成分包括熔融的渣块、玻璃、石块以及小金属碎片等。本研究采用的灰渣样本, 来源于襄阳市栋梁环保科技有限公司生产的粒径范围为 0~4.75mm 的灰渣。该灰渣的物理特性详见表 1。

表 1 垃圾焚烧余渣的物理性能

性能	实测值
表观密度(kg/cm ³)	2490
压碎指标/%	36.5
天然含水率/%	12.7

1.2 化学性质

利用 X 射线荧光分析法检测到底渣主要化学元素, 如表 2 所示。由表 2 可知底渣中的矿物成分 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 CaO 组成, 表明灰渣具有与天然骨料相似的性能, 具有一定的稳定性和力学性能。而灰渣中含量较高的 SiO₂、Al₂O₃、CaO 在碱性激发作用下, 能够发生火山灰反应, 说明底渣具有一定的水硬性和胶凝性, 使其应用于道路材料时能够一定程度上提高材料的力学性能。

表 2 垃圾焚烧余渣 X 射线荧光分析/%

化学式	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	Na ₂ O	Cl	其它
质量分数	21.42	7.66	6.08	41.62	1.5	2.7	3.64	2.38	3.15	9.86

2 骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣基层材料路用性能研究

使用骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣混合料施工道路基层, 对道路使用寿命至关重要。基层需保持设计年限内的强度、刚度和耐久性。研究确定水泥剂量为 4.0%, 灰渣掺量为 7%。本研究测试了三种不同混合料——无灰渣、7%灰渣掺量和 12%灰渣掺量的水泥稳定碎石——在

不同龄期的无侧限抗压强度、抗劈裂强度、抗压回弹模量、干缩性能和抗冲刷性能。分析灰渣对水泥稳定碎石性能的影响, 旨在为未来研究和工程实践提供参考。

2.1 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度试验是评估骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣基层材料的重要指标之一。该试验主要通过测定试样在无侧限条件下的抗压强度, 反映材料的承载能

力和稳定性。

基于先前的击实试验研究结果,本研究继续对三组不同配比的混合料进行成型,制作圆柱形试件,并对 7 天、28 天、90 天这三个不同龄期的无侧限抗压强度进行了测定。目的在于探究灰渣掺量对混合料无侧限抗压强度的影响,并获得了三种龄期无侧限抗压强度的 95% 保证率数据。

依据 JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》,7 天生龄期的含灰渣水泥稳定碎石的无侧限抗压强度能够满足规范中对基层重交通(4.0~6.0)的要求。三种混合料的无侧限抗压强度随时间增长而提升,灰渣的添加并不会对不同龄期混合料的无侧限抗压强度造成负面影响。然而,随着灰渣掺量的增加,无侧限抗压强度呈现先上升后下降的趋势。这一现象的原因包括:(1)垃圾焚烧灰渣中含有的活性硅铝质成分,在碱性激发作用下与氢氧化钙发生火山灰反应,生成不溶于水的水化硅酸钙和水化铝酸钙等物质,这些物质在颗粒间形成凝胶、棒状及纤维状晶体结构,从而胶结成整体。(2)灰渣的强度低于石灰石集料,随着灰渣替代石灰石集料数量的增加,在试件内部形成明显的薄弱区域,对试件的无侧限抗压强度产生不利影响。

在相同的底渣取代率条件下,水泥稳定碎石的无侧限抗压强度随着固化时间的延长而增加。其原因在于:

(1)硅酸盐水泥水化反应后,水化产物凝结硬化;(2)因此,随着养护时间的延长,活性硅铝质成分在水化反应和火山灰反应的作用下,形成的水泥浆体凝结硬化,从而使得水泥稳定碎石的强度逐渐提高。

2.2 抗弯拉强度试验

抗弯拉强度试验是评估骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣基层材料性能的重要指标之一。试验旨在测定该材料在弯曲负荷作用下的强度特性,为其在实际应用中的可靠性提供数据支持。

依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51-2009)所规定的无机结合料稳定材料弯拉强度试验方法,经由试验测定,三种混合料在 90 天龄期的抗弯拉强度数据如表 3 所展示。

表 3 不同灰渣掺量水泥稳定碎石的 90d 抗弯拉强度试验结果

试样	90d 抗弯拉强度 (MPa)
灰渣掺量 0%水泥稳定碎石	2.88
灰渣掺量 7%水泥稳定碎石	2.95
灰渣掺量 12%水泥稳定碎石	2.86

从表 3 中能够看出,在 90 天龄期时,掺加 7%灰渣的水泥稳定碎石抗弯拉强度最高,达到 2.95MPa,略高于未掺加灰渣的 2.88MPa。而掺加 12%灰渣的试样抗弯拉强度为 2.86MPa,与未掺加灰渣的试样相比,强度略

有下降。这表明在一定范围内增加灰渣掺量可以提高材料的抗弯拉强度,但超过一定比例后,强度反而会有所下降。因此,适量的灰渣掺入对提升水泥稳定碎石的抗弯拉性能是有益的,但掺量需要严格控制。

2.3 抗压弹性模量

抗压弹性模量是衡量材料在受到压缩力作用下抵抗变形能力的重要参数,它直接关联到道路基层材料在实际使用中的承载能力和耐久性。

在长达 90 天的养护龄期内,随着灰渣掺量的逐步增加,我们观察到混合料试件的抗压回弹模量呈现出明显的下降趋势。灰渣,作为一种多孔隙、灰色、表面粗糙的固体材料,其高孔隙率和相对较低的抗压强度特性,意味着在受到外力挤压时,其表面结构容易发生坍塌,且变形之后难以恢复到原有的状态。因此,灰渣的回弹模量相对较低。随着水泥稳定碎石中灰渣掺量的逐步增加,试件的抗变形能力相应地减弱,这直接导致了压缩回弹模量的降低。然而,值得注意的是,灰渣中含有的活性成分在碱性环境下能够发生火山灰反应,生成凝胶状物质,这些物质能够部分地填充材料内部的孔隙,从而在一定程度上提升试样的抗变形能力。因此,适量地掺入灰渣对提升混合料的抗压回弹模量具有一定的积极作用。

2.4 干缩性能

随着时光流逝,水泥稳定碎石的累计失水率呈现上升趋势,然而,在掺入灰渣之后,其后期失水率则表现出下降的倾向。7%与 12%灰渣替代率下的失水率曲线彼此相近,这表明两者在初期具有相似的影响,但 7%的掺量在后期显示出较低的失水率。由于干缩与失水率紧密相关,因此在早期阶段,必须重视保持水分的养护工作。

半刚性材料的收缩主要由水化产物 C—S—H 凝胶体积的收缩以及毛细孔的蒸发所引起。水分的散失导致混合料发生收缩,干缩量随着时间的推移而增加,直至第 25 天后趋于稳定。未掺加灰渣的干缩量最大,12%掺量次之,而 7%掺量的干缩量最小。

掺入灰渣的水泥稳定碎石干缩量随着时间的推移而增加,其中 12%掺量的干缩量低于传统材料,而 7%掺量的累计干缩量最小。适量的灰渣可以有效降低干缩量。

水泥稳定碎石的干缩系数随时间增长而增大,直至第 30 天后趋于稳定。掺入灰渣的平均干缩系数低于传统材料,其中 7%掺量的干缩系数最小。灰渣的加入减少了试样的重量,减少了收缩的源头,并改善了内部结构,但同时也增加了毛细孔的失水,导致干缩系数增大。灰渣替代率在初期具有较大的影响,而后期影响较小,适量的掺入可以降低收缩形变。

2.5 抗冲刷性能

水对路面基层的影响主要体现在以下三个方面：首先，静态水的浸泡效应，即水在浸入后对路面基层造成的长期浸泡。其次，流动水对层间结合部位产生的冲刷

效应。最后，车辆行驶过程中，层间结合部位受到短暂的挤排和铅锤方向的负压抽空效应，这相当于在该部位施加了类似真空泵的泵吸荷载。

通过试验测得三种混合料 7d、14d、28d 龄期下的冲刷质量损失，如表 4 所示。

表 4 不同灰渣掺量水泥稳定碎石的 90d 抗压回弹模量试验结果

灰渣掺量 (%)	0			7			12		
时间龄期 (d)	7	14	28	7	14	28	7	14	28
30 分钟冲刷总量 (g)	77.6	67.8	59.5	85.3	74.6	68.7	90.1	80.7	73.7

从表 4 中能够看出，随着龄期的增长，三种不同灰渣掺量的水泥稳定碎石混合料的冲刷质量损失均呈现下降趋势。具体而言，龄期为 7 天时，掺量为 0% 的混合料冲刷质量损失最大，为 77.6g；而龄期为 28 天时，其冲刷质量损失降低至 59.5g。掺量为 7% 和 12% 的混合料也表现出类似的规律，即龄期增加，冲刷质量损失减少。这说明随着时间的推移，混合料的抗冲刷性能得到提升，掺入灰渣能够有效改善材料的抗冲刷能力。此外，掺量为 12% 的混合料在各个龄期下的冲刷质量损失均低于掺量为 7% 的混合料，表明在一定范围内增加灰渣掺量可以进一步增强混合料的抗冲刷性能。

综上所有试验结果，可以得出以下结论：

(1) 随着底渣替代集料比例的提升，骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣基层材料的无侧限抗压强度、抗弯拉强度以及抗压回弹模量均表现出逐渐降低的趋势。这一现象主要归因于底渣的强度低于石灰石集料，导致试件内部形成薄弱区域，进而引起试件力学性能的下降。

(2) 当掺入 7% 灰渣时，骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣基层材料的无侧限抗压强度、抗弯拉强度和抗压回弹模量相较于普通水泥稳定碎石材料有所提升。这得益于灰渣替代部分细骨料后所展现的一定黏度与塑性，使得粗骨料间孔隙得到更佳填充，从而促进了压力在粗骨料间的有效传递。

(3) 综合比较后发现，掺入 7% 灰渣的骨料嵌锁型水泥-垃圾焚烧灰渣基层材料在无侧限抗压强度、抗弯拉强度和抗压回弹模量方面均能满足 JTG D50-2017 规范对水泥稳定碎石基层的相关要求。

(4) 干缩试验的结果揭示，掺入灰渣后，水泥稳定碎石的干缩性能得到了一定程度的提升。这一现象可归因于底渣中活性物质的参与，它们通过火山灰反应生成了凝胶物质等，这些物质填充了孔隙，优化了内部结构，从而降低了水泥稳定碎石的平均干缩系数。

(5) 试验结果表明，掺入灰渣后，水泥稳定碎石的抗冲刷性能会受到一定程度的影响。因此，在应用于

道路基层时，必须对灰渣的添加量进行适宜的控制。

合理利用垃圾焚烧灰渣作为水泥稳定碎石混合料的掺合料，不仅能够提高材料的使用性能，还能有效解决工业废弃物的处理问题，具有良好的环境效益和经济效益。

3 结语

本文通过系统分析垃圾焚烧灰渣的性质及其与骨料嵌锁型水泥结合的路用性能，验证了灰渣在改善基层材料性能中的潜在价值。实验证明，适量掺入灰渣能够有效提升水泥稳定碎石的力学性能和耐久性，特别是在抗压强度、抗弯拉强度和抗冲刷性能方面表现出显著优势。然而，过量掺入灰渣可能导致材料性能下降，因此，灰渣掺量的控制是实现其优化应用的关键。未来的研究应进一步探讨不同条件下的灰渣掺量优化及其在实际工程中的应用效果，以期为环保型城市建设提供更为可靠的技术支持。此外，还应探索灰渣在其他建筑材料中的应用潜力，如混凝土、砂浆等，以实现灰渣资源的多元化利用。

参考文献

- [1] 白宇帆, 徐永福. 垃圾焚烧炉渣物理化学及力学特性研究[J]. 公路, 2021, 66(11): 318-322.
- [2] 蔡磊, 胡向宇, 兰雪勇, 等. 垃圾焚烧灰渣用于路面基层室内试验研究[J]. 新世纪水泥导报, 2023, 29(4): 39-44.
- [3] 盛燕萍, 乔云雁, 薛哲等. 工业固体废弃物在道路基层应用中的研究进展[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(04): 78-81.
- [4] 尤晓颖. 垃圾焚烧炉渣用于水泥稳定碎石混合料的研究[D]扬州大学, 2020.
- [5] 蔡磊, 胡向宇, 兰雪勇, 等. 垃圾焚烧灰渣用于路面基层室内试验研究[J]. 新世纪水泥导报, 2023, 29(4): 39-44.