

多源固废交通工程附属构件配合比设计及性能研究

何金成¹, 石亚强¹, 牛立可², 李浩¹, 陈俊玮², 陈朋²

(1. 葛洲坝集团交通投资有限公司, 武汉 430000; 2. 山东省交通科学研究院, 济南 250104)

摘要: 为响应国家“碳达峰, 碳中和”的号召, 实现粉煤灰、煤矸石、高炉矿渣等固废资源的再利用, 依托济(宁)商(丘)高速, 开展了多源固废交通工程附属构件的配合比设计及试验研究, 通过坍落度、抗压强度、抗水渗透及冻融循环等试验研究, 分析固废材料掺量及水胶比对混合料工作性能、物理力学性能及耐久性能的影响, 结果表明: 粉煤灰掺量不超过 10% 可改善固废构件的工作性能与抗渗性能, 但会降低混合料的抗压强度与质量(强度)损失率; 采用煤矸石替代部分碎石会降低固废构件的各项性能, 尤其是抗压强度与抗冻性能, 其掺比以 25% 为宜; 燃煤炉渣可提高混合料的抗渗性能, 但会对其他性能产生不利影响, 其影响效果较小; 水胶比是混合料工作性能的主要影响因素, 增大水胶比可提高混合料的工作性能及抗渗性能。综合各项性能及经济效益, 最终配合比确定为水泥:粉煤灰 90:10, 碎石:煤矸石 75:25、砂:燃煤炉渣 50:50、水胶比 0.60。

关键词: 固废材料; 配合比; 路用性能

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249(2026)01-0088-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.016

Research on Mix Proportion Design and Road Performance of Auxiliary Components of Multi-Source Solid Waste Traffic Engineering

HE Jincheng¹, SHI Yaqiang¹, NIU Like², LI Hao¹, CHEN Junwei², CHEN Peng²

(1. Gezhouba Group Transportation Investment Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. Shandong Transportation Research Institute, Ji'nan 250104, China)

Abstract: In response to the national call of "carbon peak, carbon neutralization," the reuse of solid waste resources such as fly ash, coal gangue and blast furnace slag is realized. In this paper, based on Jining-Shangqiu Expressway, the mix ratio design and experimental research of auxiliary components of multi-source solid waste transportation engineering are carried out. Through the experimental study of slump, compressive strength, water penetration resistance and freeze-thaw cycle, the effects of solid waste material content and water-binder ratio on the working performance, physical and mechanical properties and durability of the mixture were analyzed. The test results are as follows: fly ash (not more than 10%) can improve the working performance and impermeability of solid waste components, but it will reduce the compressive strength and mass (strength) loss rate of the mixture; The use of coal gangue to replace part of the gravel will reduce the performance of the solid waste

项目来源: 山东省交通运输厅科技计划项目(2023B47)。

作者简介: 何金成(1981—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路工程。

通信作者: 牛立可(1998—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 地下工程及岩土工程。

收稿日期: 2024-10-11

components, especially the compressive strength and frost resistance, and its blending ratio is appropriate to 25 %; Coal-fired slag can improve the impermeability of the mixture, but it will have adverse effects on other properties, and its effect is small; The water-binder ratio is the main influencing factor of the working performance of the mixture. Increasing the water-binder ratio can improve the working performance and impermeability of the mixture.

Key words: solid waste materials; mix proportion; pavement performance

0 引言

随着我国基础设施建设的高速发展,煤矸石、粉煤灰、高炉矿渣等固废材料保有量逐年递增^[1],不仅造成水、空气、土壤污染,还占用了大量的土地资源,因此煤矸石、粉煤灰、高炉矿渣等材料的再利用亟需解决^[2]。

针对上述现象,许多学者对固废材料的再利用进行研究,孔坤锋等^[3]采用建筑固废做基层填料,通过室内三轴试验,研究了颗粒级配再生骨料变形的影响规律,并建立了相应的预测模型;潘硕等^[4]、张阳等^[5]、马宏强等^[6]基于煤矸石等固废大量堆积的现状,提出采用煤矸石代替同级配碎石制备混凝土,并进行了混合料强度及耐久性能的试验研究,分析了不同煤矸石掺量对混合料强度及耐久性的影响,证实了煤矸石作为混凝土粗集料的可行性;敬耀辉等^[7]利用碱激发手段制备煤矸石基胶凝材料,发现掺入煤矸石可显著提升浆体的流动性能,且不会降低抗压强度;邓温妮等^[8]采用高炉矿渣材料制作固化剂,用于改良淤泥质土,通过流动性及无侧限抗压试验,分析了高炉矿渣基固化剂对淤泥质土的改良效果,证实了该固化方案的可行性;李晓英等^[9]、李艳丽^[10]研究了粉煤灰对混凝土性能的影响,结果表明掺入粉煤灰有利于提高路基材料的保温性能及抗渗性能;为改善水泥稳定再生碎石性能,王冬魁等^[11]、孟凡威等^[12]在其中掺入粉煤灰,研究结果表明,随粉煤灰掺量的增加,混合料抗压强度及劈裂强度均呈先增后减趋势,粉煤灰掺量16%时,改善效果最佳;张亚婕等^[13]使用煤矸石粉替代矿粉制备沥青混凝土,认为可有效改善混合料路用性能;李艳丽^[10]、范利丹等^[14]使用粉煤灰替代部分水泥制备路基填筑材料及注浆材料,研究结果均表明,粉煤灰基胶凝材料具有较好的流动性能及力学性能,使用粉煤灰替代部分水泥是可行的。

综上所述,煤矸石、粉煤灰、高炉矿渣等固废材料的再利用主要集中于路基填筑领域中,且大都为单一应用,多种固废组合应用于交通附属构件方向的研究还鲜有报道,因此开展了多源固废交通工程附属构件配合比设计及路用性能研究,通过坍落度及抗压强度试验,分析了煤矸石、粉煤灰及高炉矿渣对混凝土工作性能及力学性能的影响,筛选确定初步配合比,在此基础上进行混凝土抗渗试验及冻融循环试验,探究固废材料掺量对混合料耐久性的影响,并提出多源固废材料在交通附属构件中的最优配合比。

1 试验设计

1.1 试验材料

试验采用粉煤灰、高炉矿渣、煤矸石等固废材料及水泥、砂、碎石、减水剂、水等传统混凝土材料进行配比研究。其中:粉煤灰为Ⅱ级,主要性质见表1;水泥选用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,性能指标见表2;减水剂采用聚羧酸高性能减水剂;砂、高炉矿渣、碎石、煤矸石均产自济宁(依托济商高速),性能指标见表3~4,同时参照JTG 3430—2020《公路土工试验规程》进行筛分实验,并按照高炉矿渣与煤矸石级配调整砂与碎石粒径,试验骨料级配如图1所示。

表1 粉煤灰性能指标

Table 1 Performance index of fly ash /%

检测项目	烧失量	需水量比	游离CaO含量	SO ₃ 含量	细度45 μm方孔筛余量
标准值	≤8	≤105	≤1.0	≤3	≤25
实测值	2.4	101	0.6	2.3	11.5

表2 水泥性能指标

Table 2 Cement performance index

检测项目	初凝时间/min		比表面积/(m ² /kg)	抗压强度/MPa	
	初凝	终凝		3 d	28 d
标准值	≥45	≤600	≥300	≥17.0	≥42.5
实测值	259	343	351	21.2	44.9

道桥技术

表3 细集料性能指标

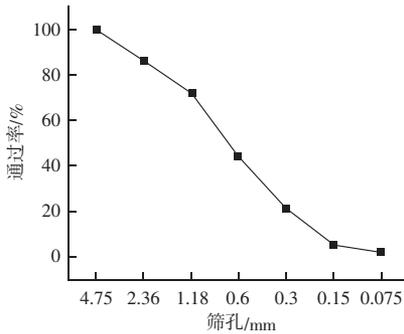
Table 3 Performance index of fine aggregate

检测项目	表观密度 /(kg/m ³)	含水率 /%	烧失量 /%	泥块含量 /%	坚固性 /%
天然砂	2 561	2.4		1.6	0.6
高炉矿渣	2 812	1.1	0.6	2.2	4.0

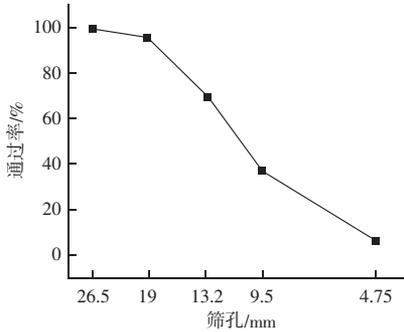
表4 粗集料性能指标

Table 4 Performance index of coarse aggregate

检测项目	压碎值 /%	烧失量 /%	表观密度 /(kg/m ³)	泥块含量 /%	吸水率 /%
碎石	10.5		2 710	2.1	0.7
煤矸石	22.1	7.1	2 312	6.8	5.2



(a) 细骨料级配



(b) 粗骨料级配

图1 骨料级配

Fig. 1 Aggregate gradation

1.2 配合比设计

固废材料替代率及水胶比是混合料路用性能的重要影响因素,采用正交试验设计方法,探究了粉煤灰、煤矸石、燃煤炉渣掺比及水胶比等因素对混合料性能的影响效果试验配合见表5。

针对试验配合比开展了坍落度及抗压强度试验,通过分析混合料工作性能及物理力学性能与固废材料掺量及水胶比间的对应关系,得到多源固废混合料初步配合比,并在此基础上开展抗冻性能及抗渗性能试验,综合材料的各项耐久性指标及固废材料利用率确定最优配合比。

表5 试验配比

Table 5 Test ratio

编号	水泥:粉 煤灰	碎石:煤 矸石	砂:燃 煤炉渣	减水剂 用量/%	水胶比
1	100:0	100:0	100:0	1	0.50
2	100:0	75:25	75:25	1	0.55
3	100:0	50:50	50:50	1	0.60
4	100:0	25:75	25:75	1	0.65
5	100:0	0:100	0:100	1	0.70
6	95:5	100:0	75:25	1	0.60
7	95:5	75:25	50:50	1	0.65
8	95:5	50:50	25:75	1	0.70
9	95:5	25:75	0:100	1	0.50
10	95:5	0:100	100:0	1	0.55
11	90:10	100:0	50:50	1	0.65
12	90:10	75:25	25:75	1	0.70
13	90:10	50:50	0:100	1	0.50
14	90:10	25:75	100:0	1	0.55
15	90:10	0:100	75:25	1	0.60
16	85:15	100:0	25:75	1	0.70
17	85:15	75:25	0:100	1	0.50
18	85:15	50:50	100:0	1	0.55
19	85:15	25:75	75:25	1	0.60
20	85:15	0:100	50:50	1	0.65
21	80:20	100:0	0:100	1	0.55
22	80:20	75:25	100:0	1	0.60
23	80:20	50:50	75:25	1	0.65
24	80:20	25:75	50:50	1	0.70

注: 1. 对照组 1: 水泥:粉煤灰 = 100:0;

2. 对照组 2: 碎石:煤矸石 = 100:0;

3. 对照组 3: 砂:燃煤炉渣 = 100:0。

1.3 试验方法

试验过程中,依照设计配合比进行拌合,并参照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》开展坍落度试验(共 25 组)。

参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》开展抗压强度性能试验,采用 150 mm × 150 mm × 150 mm 标准试件,共成型 25 组试块(每组 9 块,3、7、28 d 强度各三块)。

抗渗性能试件尺寸为上底直径 175 mm,下底直径 185 mm,高 150 mm 的圆台(6 块 1 组),试验采用分级加载方式(每级加载压力 0.1 MPa),每级加载 8 h,第 3 个试件渗水时的压力为渗水压力,最终以渗水压力为评价指标;抗冻性能试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试块(9 块 1 组),以冻融循环 100 次后的质量损失率及强度损失率评价材料的抗冻性能。

2 配合比设计分析

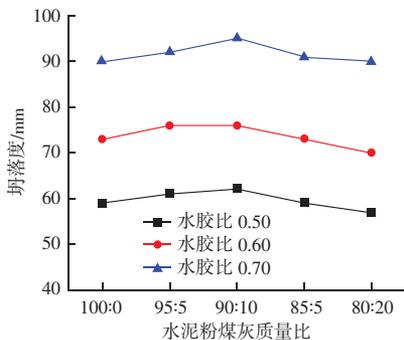
2.1 工作性能

由图 2 (a) 可知, 随粉煤灰占比增加, 混合料坍落度呈先增加后减小趋势, 水泥粉煤灰比为 90:10 处为峰值点, 这表明采用粉煤灰替代部分水泥有利于提高混合料的工作性能, 但随粉煤灰占比逐渐增加, 混合料流动性能下降, 粉煤灰掺比 20% 时的坍落度反而低于素水泥。

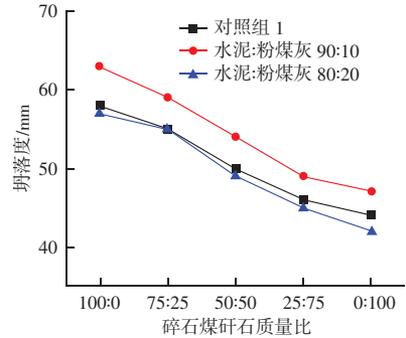
由图 2 (b) 可知, 混合料坍落度与煤矸石掺入量呈负相关, 碎石煤矸石质量比 25:75 对应的坍落度 (对照组 1 为例) 低于 50 mm, 这表明使用煤矸石替代碎石不利于混合料的工作性能, 煤矸石替代率不宜超过 50%, 这与粗集料的吸水性能有关, 煤矸石的吸水率为 5.2%, 远大于碎石的 0.7% (表 4), 煤矸石的掺入会增加粗集料的需水量, 导致颗粒间的自由水分子减少, 颗粒表层的水膜厚度降低, 颗粒间摩阻力增加, 材料流动性能降低。

由图 2 (c) 可知, 对照组 1 及砂燃煤炉渣质量比 75:25、50:50、25:75、0:100 对应的坍落度 (以对照组 2 为例) 分别为 57、62、68、66、55 mm, 二者呈“上凸”型曲线关系, 峰值出现在燃煤炉渣替代率 50% 处。这表明使用燃煤炉渣代替部分砂有利于提高混合料的工作性能, 但替代率超过 50% 后混合料的工作性能有所下降, 实际工程中燃煤炉渣掺量不宜超过 75%。

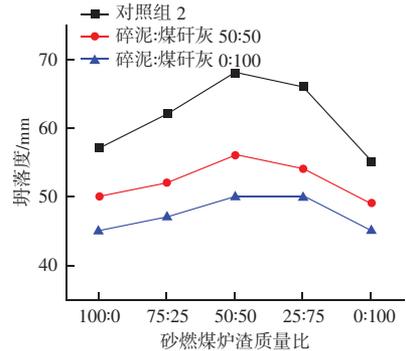
根据图 2 (d) 可知, 水胶比 0.50、0.55、0.60、0.65、0.70 对应的坍落度分别为 58、64、74、81、91 mm, 二者呈正相关, 且相较于其他因素, 水胶比对混合料施工和易性的影响更大, 是主要影响因素。



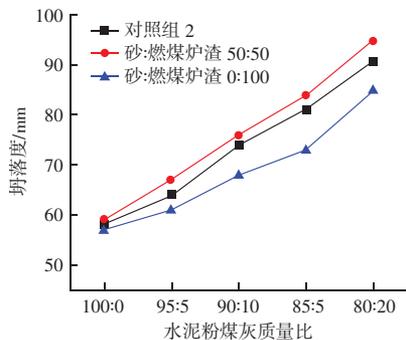
(a) 水泥粉煤灰质量比与坍落度



(b) 碎石煤矸石质量比与坍落度



(c) 砂燃煤炉渣质量比与坍落度



(d) 水胶比与坍落度

图 2 坍落度与配合比相关关系

Fig. 2 Correlation between slump and mix proportion

2.2 物理力学性能

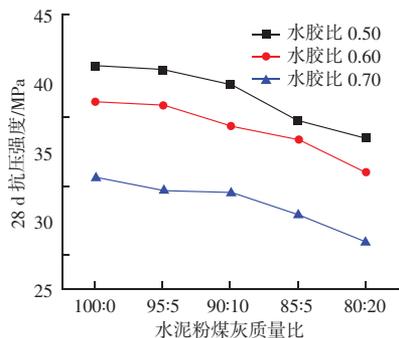
根据图 3 (a) 可知, 水胶比 0.50、0.60、0.70 对应的关系曲线具有相似性, 均呈现出 28 d 抗压强度随粉煤灰质量占比增大而逐渐降低的趋势, 水泥粉煤灰质量比 90:10 对应的 28 d 抗压强度相对对照组 1 降低了 1.8 MPa, 显著低于 80:20 与 90:10 对应的强度减小量 3.4 MPa, 这表明使用粉煤灰替代部分水泥不利于混合料的强度形成, 且随粉煤灰掺量增加, 混合料强度衰减速度增加, 因此, 粉煤灰掺量不宜超过 10%。

道桥技术

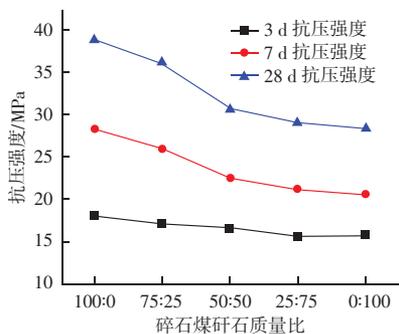
由图 3 (b) 可知, 固废混合料抗压强度与碎石煤矸石质量比呈负相关, 相较于 28 d 抗压强度, 使用煤矸石替代碎石对混合料的 3 d 强度影响不大, 碎石煤矸石质量比 0:100 相较于对照组 2 的 3 d 抗压强度降低了 2.4 MPa, 远小于 28 d 强度的减小值 10.5 MPa, 这表明使用煤矸石替代碎石会降低混合料的强度 (主要影响 28 d 强度)。煤矸石取代率在 25%~50% 时, 强度损失速度较为明显, 52% 的强度损失均发生在该阶段, 因此工程中应控制煤矸石用量, 不宜超过 25%。

由图 3 (c) 可知, 随燃煤炉渣掺比增加, 混合料抗压强度呈下降趋势, 但相较于图 3 (b), 燃煤炉渣对固废材料强度的影响较小。

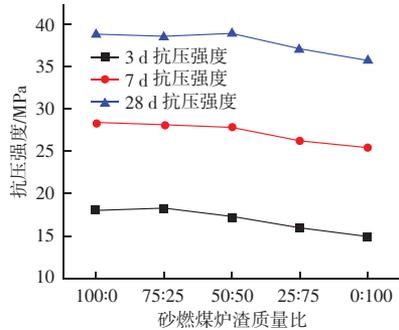
由图 3 (d) 可得, 不同砂燃煤炉渣质量比对应的 7、28 d 抗压强度均与水胶比呈负相关关系, 水胶比 0.50、0.55、0.60、0.65、0.70 对应的 28 d 抗压强度分别为 41.0、39.8、38.2、36.5、32.7 MPa, 强度降低量依次为 1.2、1.6、1.7、3.8 MPa, 这表明随水胶比增加, 混合料强度损失率增加, 综合考虑物理力学性能与工作性能, 水胶比不宜大于 0.65。



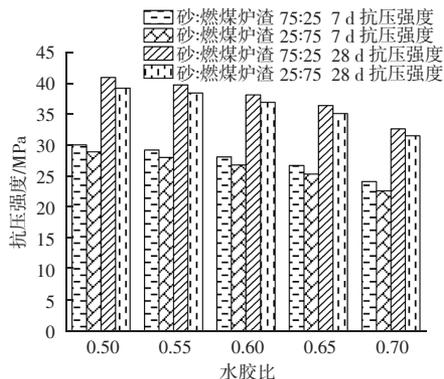
(a) 水泥粉煤灰质量比与抗压强度



(b) 碎石煤矸石质量比与抗压强度



(c) 砂燃煤炉渣质量比与抗压强度



(d) 水胶比与抗压强度

图 3 抗压强度与配合比关系

Fig. 3 Correlation between compressive strength and mix proportion

3 耐久性分析

综合上述试验结果, 初始配合比选定为水胶比 0.50~0.65, 水泥:粉煤灰对照组 1、95:5、90:10, 碎石:煤矸石(砂:燃煤炉渣)对照组 2 (3)、75:25、50:50, 在此基础上展开固废材料的耐久性试验。

3.1 抗渗性能

由图 4 可知, 随水胶比增加, 固废构件渗水压力呈先增后减趋势, 峰值点出现在水胶比 0.60 处, 水胶比在 0.50~0.60 范围内, 渗水压力缓慢增加, 至 0.65 时, 渗水压力发生骤降, 这表明适当增加水胶比有利于提高固废构件的抗渗性能, 但存在一定限值, 水胶比超过 0.60 后再增加水胶比会降低构件的抗渗性能。

同时, 从图 4 中可以看出, 随粉煤灰掺比增加, 试件渗水压力呈上升趋势, 这表明在粉煤灰掺比 0~10% 范围内, 增加粉煤灰用量可增强固废材料的抗渗性能, 这与粉煤灰的“形态效应”有关, 玻璃微珠形态的粉煤灰颗粒对混合料起到致密作用。

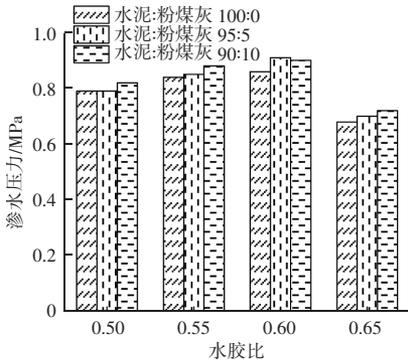


图4 不同水泥粉煤灰质量比下水胶比与渗水压力关系曲线
Fig. 4 The relationship between water - binder ratio and seepage pressure under different cement - fly ash mass ratios

由图5可知，材料渗水压力与煤矸石掺比呈负相关，提高煤矸石用量会降低固废构件的抗渗性能，分析原因可知，相较于碎石而言，煤矸石的含泥量及吸水率更大，需要的水泥浆更多，同等条件下的黏聚性更差，因此增加煤矸石的掺比导致混合料抗渗性能降低。

固废混合料渗水压力与高炉矿渣掺量呈“上凸型”曲线关系，燃煤炉渣掺量25%时出现最大值（与50%掺量对应值相差不大），这表明使用燃煤炉渣替代部分砂可提高固废混合料的抗渗性能。

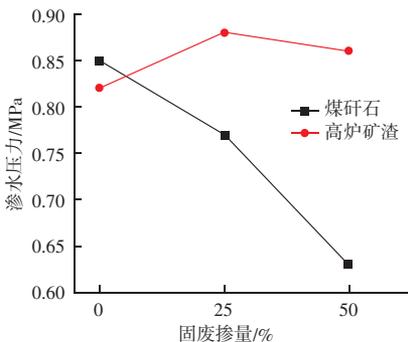


图5 固废掺量（骨料）与渗水压力关系曲线
Fig. 5 Relationship curve between solid waste content (aggregate) and seepage pressure

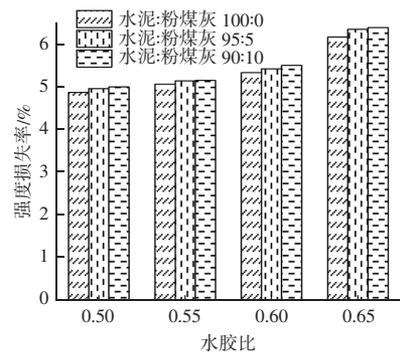
3.2 抗冻性能

根据图6(a)~(b)可知，随水胶比增加，固废试件的强度损失率和质量损失率均呈增加趋势，且当水胶比超过0.60时，损失率发生突增，这表明增加水胶比会导致固废构件的抗冻性能降低，实际工程中水胶比不宜超过0.60，这是因为水胶比的增加使混合料中自由水含量增加，冻融循环作用下，自由水会发生冻胀与蒸发，破坏试件内部结构，使质量和强度损失增加。

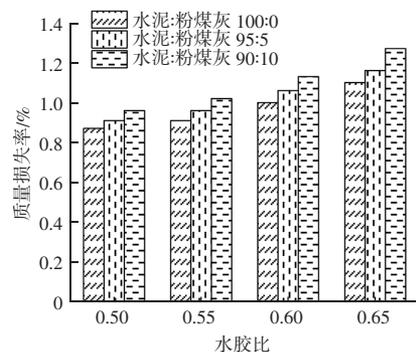
对比图6(a)~(b)中不同水泥:粉煤灰柱状图可知，质量（强度）损失率随粉煤灰掺量增加而增大，这表明采用粉煤灰替代部分水泥会降低构件的抗冻性能，这是因为粉煤灰的密度比水泥小，在拌合浇筑过程中易发生浆料上浮，形成多孔浆层，该结构更易造成松散剥落，降低了固废构件的抗冻性能。

由图6(c)~(d)可知，随煤矸石掺量增加，冻融循环后的强度及质量损失率显著性增加，煤矸石掺量50%时的强度及质量损失率分别是不掺煤矸石的4.07及4.81倍，这表明使用煤矸石替代部分碎石会大大降低固废材料的抗冻性能，这是因为煤矸石的吸水性更强（相较碎石），导致煤矸石在冻融循环过程中的冻胀作用更强，使得质量及强度损失增加。

同时，由图6(c)~(d)中可知，高炉矿渣掺量0%、25%、50%对应的强度及质量损失率分别为5.03%、5.11%、6.35%及0.97%、0.91%、1.06%，这表明燃煤炉渣对混合料抗冻性能的影响较小，炉渣掺量为25%时的抗冻性能与普通混凝土（不掺固废）基本一致。

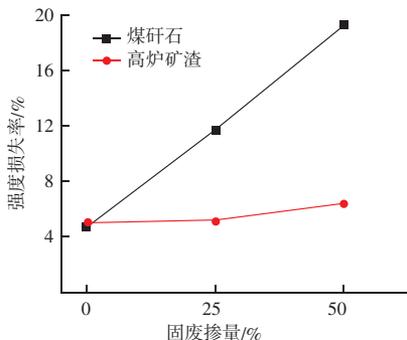


(a) 不同水泥粉煤灰质量比下水胶比与强度损失率关系曲线

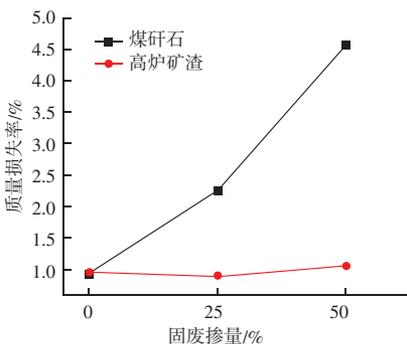


(b) 不同水泥粉煤灰质量比下水胶比与质量损失率关系曲线

道桥技术



(c) 固废掺量 (骨料) 与强度损失率关系曲线



(d) 固废掺量 (骨料) 与质量损失率关系曲线

图 6 抗冻性能与配合比关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between frost resistance and mixture ratio

4 结论

通过物理力学性能、流动性能及耐久性能试验研究,分析了粉煤灰、煤矸石、燃煤炉渣等固废材料用量、水泥掺量及水胶比等因素对多源固废混合料路用性能的影响,并得到以下结论:

(1) 粉煤灰掺比小于 10% 时,增加其掺量可以提高固废构件的工作性能与抗渗性能,但随着粉煤灰替代量的增加,混合料的抗压强度与抗冻性能均有所降低,且降低幅度随粉煤灰占比增加而增大。

(2) 采用煤矸石替代碎石对混合料的工作性能、物理力学性能及耐久性能均会造成不利影响。煤矸石掺量超过 50% 时,混合料坍落度低于 50 mm;随煤矸石掺量增加,会较大幅度的降低材料的抗压强度与抗冻性能。

(3) 采用燃煤炉渣替代部分砂可提高固废混合料的抗渗性能(掺量 25% 时出现峰值点),同时燃煤炉渣对于混合料抗冻性能影响较小,但掺入燃煤炉渣会降低固废材料的工作性能及抗压强度。

(4) 水胶比是固废混合料工作性能的主要影响

因素,增加用水量可有效改善固废材料的施工和易性。水胶比在 0.50~0.60 范围内时,增加用水量,可增强构件的抗渗性能。但增大水胶比会导致混合料的强度及抗冻性能降低。

(5) 综合固废混合料的各项性能指标及经济环保效应,最终确定多源固废交通工程附属构件配合比水泥:粉煤灰 90:10、碎石:煤矸石 75:25、砂:燃煤炉渣 50:50、水胶比 0.60。

参 考 文 献

- [1] 王建华, 赖益梁, 刘刚, 等. 煤矸石粉制备混凝土用复合掺合料的性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 18-21, 51.
- [2] 邓嘉, 鲍文博, 杨宇豪, 等. 粉煤灰基尾矿碱激发地质聚合物耐久性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (5): 58-66.
- [3] 孔坤锋, 陈锋, 肖源杰, 等. 建筑固废再生填料累积变形及临界动应力试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42 (11): 2820-2831.
- [4] 潘硕, 胡雨晴, 王海燕, 等. 煤矸石综合利用技术现状与标准体系研究 [J]. 中国矿业, 2024, 33 (7): 89-98.
- [5] 张阳, 田绍强, 马涛, 等. 固废基地聚物稳定碎石力学性能和干燥收缩特性研究 [J]. 中国公路学报, 2023, 36 (12): 120-130.
- [6] 马宏强, 易成, 朱红光, 等. 煤矸石集料混凝土抗压强度及耐久性能 [J]. 材料导报. 2018, 32 (14): 2390-2395.
- [7] 敬耀辉, 张延年, 汪青杰, 等. 碱激发自燃煤矸石基胶凝材料水化特性研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2025, 44 (6): 659-666.
- [8] 邓温妮, 闫思辰, 张彤. 高炉矿渣淤泥固化土工程特性试验研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2025, 56 (10): 4284-4294.
- [9] 李晓英, 李柱凯, 高文洁. 粉煤灰、渣对水泥基泡沫混凝土性能的影响 [J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39 (10): 9-14.
- [10] 李艳丽. 基于规划求解的水泥粉煤灰混合料配合比设计方法 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (1): 90-93, 101.
- [11] 王冬魁, 陈学武, 席爽, 等. 钢渣、粉煤灰协同增效下水泥稳定再生碎石基层性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1957-1966.
- [12] 孟凡威, 杨涛, 鄧晓, 等. 透水型建筑固废再生水稳材料抗压性能及疲劳性能试验研究 [J]. 北京工业大学学报, 2024, 50 (1): 94-104.
- [13] 张亚婕, 白领群, 吕海将, 等. 煤矸石粉沥青混凝土路用性能试验 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2022, 42 (5): 33-42.
- [14] 范利丹, 杨杰, 余永强, 等. 基于响应面法的地聚合物注浆材料配合比优化及其微观结构分析 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (6): 194-201.