

掺加赤泥和煤矸石的泡沫轻质土制备及强度研究

连伟建, 高宏升, 刘晟玮

吉林大学交通学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年4月20日; 录用日期: 2025年5月12日; 发布日期: 2025年5月22日

摘要

本研究以工业固废资源化利用为核心理念, 聚焦赤泥与煤矸石的高效协同利用技术, 针对公路工程沉降防控、路基置换及脱空注浆加固等关键技术需求, 成功开发出环境友好型固废基泡沫轻质土。通过对抗压强度、干密度等核心性能指标的系统测试, 完成了材料配合比的科学优化。主要研究成果可归纳为: 通过活性指数法研究赤泥与煤矸石在水泥泡沫轻质土进行定量表征。实验数据结果表明: 赤泥与煤矸石在水泥基中的活性指数趋近, 验证了作为辅助胶凝材料制备泡沫轻质土的技术可行性; 通过单因素试验揭示材料性能的关键控制参数, 分析得到各个因素对各个性能指标影响, 确定赤泥和粉煤灰单因素的优化区间为: 赤泥掺量5%~15%、煤矸石掺量5%~15%。本实验制备的泡沫轻质土可以有效地节约材料, 提高材料的利用率, 确保施工便捷高效。同时, 该材料的强度优于标准的泡沫轻质土。

关键词

赤泥, 煤矸石, 泡沫轻质土

Study on Preparation and Strength of Foamed Lightweight Soil Mixed with Red Mud and Coal Gangue

Weijian Lian, Hongsheng Gao, Shengwei Liu

Transportation College, Jilin University, Changchun Jilin

Received: Apr. 20th, 2025; accepted: May 12th, 2025; published: May 22nd, 2025

Abstract

Based on the core concept of resource utilization of industrial solid waste, this study focused on the

文章引用: 连伟建, 高宏升, 刘晟玮. 掺加赤泥和煤矸石的泡沫轻质土制备及强度研究[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1063-1073. DOI: 10.12677/hjce.2025.145114

efficient collaborative utilization technology of red mud and coal gangue. It addresses key technical needs in highway engineering, such as settlement control, subgrade replacement, and void grouting reinforcement. As a result, it has successfully developed an environmentally friendly solid waste-based foamed lightweight soil. Through systematic testing of core performance indexes such as compressive strength and dry density, the scientific optimization of the material mix ratio was completed. The main research achievements can be summarized as follows: The reactivity index method was employed to quantitatively characterize red mud and coal gangue in cement-based foamed lightweight soil. The experimental data show that the activity index of red mud and coal gangue in cement base is close to each other, which verifies the technical feasibility of preparing foamed lightweight soil as auxiliary cementing material. The key control parameters of material properties were revealed through a single factor test, and the influence of each factor on each performance index was analyzed. The optimal range of single factors for red mud and fly ash was determined as follows: red mud content 5%~15%, coal gangue content 5%~15%. The foamed lightweight soil prepared in this experiment can effectively save materials, improve the utilization rate of materials, and ensure convenient and fast construction. At the same time, the strength of the material is better than that of standard foamed lightweight soil.

Keywords

Red Mud, Coal Gangue, Foamed Lightweight Soil

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

日前,随着我国经济社会的迅速发展,人民对于出行的需求逐年增加,对于好路率与道路养护水平的要求也不断提高。在资金与政策的支持下,我国有关交通运输领域内的技术不断突破,成功走在了世界前列,在为本国带来发展的同时也为各国带来了机遇与挑战。由于当年的技术十分落后,国内道路无法满足市场对于车辆高效舒适运行的需求,而改扩建是改善道路的通行能力的最好手段之一[1]。泡沫轻质土有效回收并利用了工业固废,研发了新型环保材料,降低成本并提高性能,减少后期维修费用,在公路工程减少沉降、路基换填等场景下提供材料参考,在我国大力推广和使用泡沫轻质土,可有效降低地基应力,减小地基差异沉降,从而有效解决软基路堤的桥头跳车、软基处理、道路拓宽以及高寒地区路堤隔热保温等问题,增大道桥工程的安全系数;同时,还能降低工程造价,减少后期维修费用,提升道桥工程综合经济和社会效益。

赤泥作为铝土矿提取氧化铝的副产物,具有潜在的胶凝活性[2]。目前,我国赤泥年新增量已超 8000 万吨,历史堆存总量已超 10 亿吨,赤泥在堆存过程易产生扬尘污染和渗滤液风险。Dong [3]等使用赤泥替代粉煤灰(高达 30%)制备泡沫轻质土,实验结果表明,赤泥导致泡沫轻质土浆液粘性较高,冷冻后强度较差。赵正峰[4]等将烧结法赤泥、铝土矿尾矿和钛石膏等原材料脱水后研磨制得胶凝材料,加入泡沫混合得到的泡沫轻质土抗压强度高于水泥泡沫轻质土。赤泥由于颗粒较细,适量掺入可填充泡沫轻质土的部分孔隙,降低孔隙率,但过量掺入可能因赤泥自身密度较高导致整体密度上升,削弱轻质性。赤泥中的部分活性金属氧化物可与水泥水化产物发生火山灰反应,生成 C-S-H 凝胶,提升后期强度。但过量赤泥(如高于 30%)会因未反应颗粒堆积导致强度下降。

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中产生的固体废弃物,颗粒棱角多、表面粗糙。目前我国煤矸石现有

存量超过 50 亿吨，并且以每年 3.0~3.5 亿吨的速度在持续增长，煤矸石长期堆存会占用土地、污染水土和空气[5]。Li [6]等利用煤矸石取代碎石，发现煤矸石混凝土的流动性和抗压强度均低于普通混凝土，但煤矸石混凝土的整体密实度高于普通的混凝土。李月香[7]等研究表明煤矸石在泡沫混凝土中不仅有火山灰效应，还有形成骨架和弥补孔隙缺陷的作用。煤矸石本身密度较低，满足工程对轻质填充材料的需求。经过高温煅烧的煤矸石具有火山灰活性，可与水泥水化产物发生二次反应，生成 C-S-H 凝胶，提高材料后期强度和耐久性[8]。煤矸石在泡沫轻质土中的应用，通过资源化利用实现了环境效益与工程性能的双重提升，实现材料性能与环境安全性的平衡。

Hailin J [9]等通过正交试验法设计了不同比例的胶凝材料、纤维和复合发泡材料制成的泡沫混凝土并观察其微观性能以印证宏观性能。冯璐[10]等人采用压汞法、SEM 和 XRD 分析了 3 种不同密度的泡沫混凝土的水化机理和微观结构，得出结论：泡沫混凝土密度越大，孔径越小，气孔间基质更紧密。肖军[11]在分析我国现浇泡沫混凝土施工技术时指出大多数企业全部采用水泥生产泡沫混凝土，会产生了较大的生产成本和运输成本，因此如何降低水泥用量，节约成本成为了全行业的重要课题。

泡沫轻质土的研究与推广，既是我国绿色建筑发展的必然选择，也是提升基建质量与效率的关键因素。由于存在规范缺失、配合比设计依赖经验、检测技术不完善等问题，国内尚无统一的配合比设计标准，需进一步推动行业标准的完善，实现规模化应用。

2. 原材料、仪器设备及实验方法

2.1. 原材料

2.1.1. 水泥

试验用水泥应满足《通用硅酸盐水泥》GB175 的相关性能规定。本次试验使用吉林亚泰水泥有限公司产 P·O42.5 的普通硅酸盐水泥，水泥的化学组成及主要性能指标见表 1 和表 2，实物如图 1d。

Table 1. Chemical composition of cement

表 1. 水泥的化学成分

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	总碱量	烧失量
含量(%)	60.21	23.03	6.23	2.42	1.87	2.03	0.41	1.12

Table 2. Main performance indicators of cement

表 2. 水泥的主要性能指标

比表面积(m ² /Pa)	标准稠度/%	初凝时间/min	终凝时间/min	安定性 (试饼法)	抗压强度(Mpa)		抗折强度(Mpa)	
					3 d	28 d	3 d	28 d
377	27.1	93	165	合格	19.2	44.9	4.1	8.3

2.1.2. 赤泥

赤泥外观为红色固体。其化学成分组成见表 3，实物如图 1b。

Table 3. Chemical composition of red mud

表 3. 赤泥的化学成分

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SO ₃	烧失量
质量分数/%	12.4	17.1	45.2	4.8	6.8	0.9	1.2	1.3	10.3

2.1.3. 煤矸石

煤矸石呈黑色，其化学成分组成见表 4，实物如图 1a。

Table 4. Chemical composition of coal gangue

表 4. 煤矸石的化学成分

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
质量分数/%	49.02	22.6	6.3	3.4	1.3	1.5	0.68	15.2

2.1.4. 发泡剂

本文选取河南大造化工产品有限公司生产的 QW 复合型发泡剂，棕色粘稠状液体，发泡剂主要性能指标如表 5，实物如图 1c。

Table 5. Main performance indexes of foaming agent

表 5. 发泡剂的主要性能指标

外观	密度(g/cm ³)	泡沫密度(kg/m ³)	ph 值	发泡倍数	1 h 沉降距/mm	1 h 泌水量/ml
深褐色	1.06	54.3	7.3	10~60	≤5	≤2.5

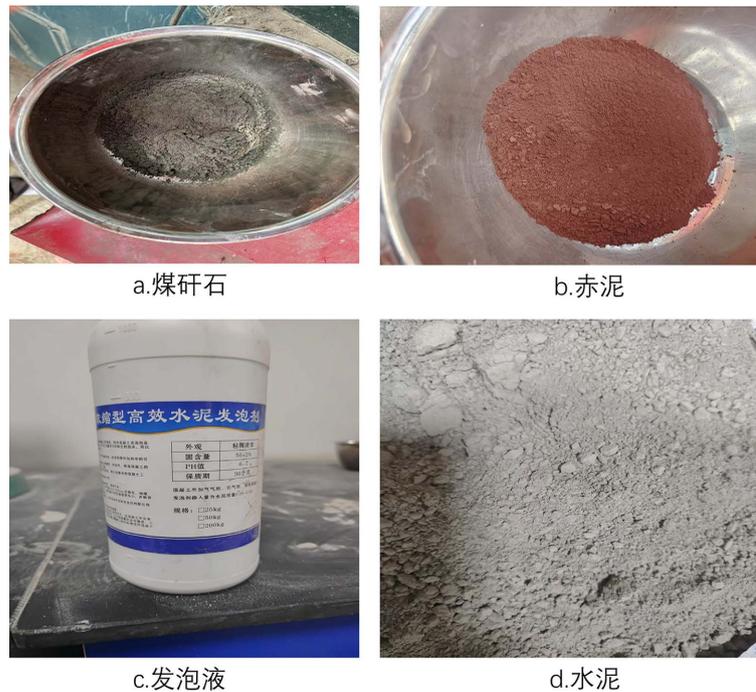


Figure 1. Experimental material

图 1. 实验材料

2.2. 实验方法

2.2.1. 干密度

本试验对混凝土干表观密度测试方法按照《泡沫混凝土》(JG/T 266-2011)、《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 5008 1-2019)以及《泡沫混凝土制品性能试验方法》(JC/T 2357-2016)中的试验方法进行。将脱模后的试块放入烘箱中进行烘干，随后将试件冷却至室温，测量各试件的体积 V ，用电子秤称取

试件的质量,以三个试块的干表观密度的算术平均值表示最终结果,精确至 0.1 g,干密度计算公式如下:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V} \times 10^6$$

ρ_0 ——试件干密度,单位(kg/m³),精确至 0.1;

m_0 ——试件烘干后质量,单位(g);

V ——试件体积,单位(mm³)。

2.2.2. 抗压强度

泡沫混凝土试块的抗压强度测试根据《泡沫混凝土》(JG/T266-2011)进行测定。抗压强度测试使用仪器为吉林省金力试验技术有限公司生产的 YAW 系列微机控制电液伺服压力试验机。试样尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm。每次取三块试样进行测试,抗压强度结果取三次测试结果的算术平均值。抗压强度计算公式为:

$$f = \frac{F_{\max}}{A}$$

f ——试件的抗压强度,单位为(MPa),精确至 0.01 MPa;

F_{\max} ——最大破坏荷载,单位为牛(N);

A ——试件的受压面积,单位为二次方毫米(mm²)。

3. A 泡沫轻质土的制备及性能研究

3.1. A 泡沫轻质土的研究及制备

3.1.1. A 泡沫轻质土的配合比设计

在本文中,配合比设计方法基于李应权[12]等人的研究成果,在设计配合比时,必须全面综合考量包括强度、干密度等多个关键性能指标。因此在设计试验配合比时,原料土、水泥、水、泡沫共同组成泡沫轻质土的质量。单位体积泡沫轻质土所需泡沫体积及其他各种材料用量计算公式应满足安全性、适用性和经济性三大原则。配合比设计应满足抗压强度、湿密度和流值的要求。现浇泡沫轻质土的施工湿密度范围控制在 500 kg/m³~1100 kg/m³,流值宜在 160 mm~200 mm,计算公式如下:

$$\rho_{\text{设}} = S_a (M_c + M_{\text{rm}} + M_{\text{cg}} + M_w) \quad (1)$$

$$M_w = \beta (M_c + M_{\text{rm}} + M_{\text{cg}}) \quad (2)$$

$$V_f = \omega \left(1 - \frac{M_c}{\rho_c} - \frac{M_{\text{rm}}}{\rho_{\text{rm}}} - \frac{M_{\text{cg}}}{\rho_{\text{cg}}} - \frac{M_w}{\rho_w} \right) \quad (3)$$

$$M_f = \rho_f \cdot V_f \quad (4)$$

$$f_{\text{cu-28d}} \geq 1.05 f_{\text{cu-k}} \quad (5)$$

$\rho_{\text{设}}$ ——泡沫轻质土设计干密度(kg/m³);

S_a ——以干物料总量与非蒸发物总量所确定的质量系数,普通硅酸盐水泥取 1.2;

M_c ——1 m³ 泡沫轻质土的水泥用量(kg/m³);

M_{rm} ——1 m³ 泡沫混凝土的赤泥用量(kg/m³);

M_{cg} ——1 m³ 泡沫混凝土的煤矸石用量(kg/m³);

M_w ——1 m³ 泡沫混凝土的用水量(kg/m³);

β ——水胶比($M_w/M_c + M_{\text{rm}} + M_{\text{cg}}$);

V_f ——每立方泡沫轻质土的泡沫添加量(L);
 ω ——富余系数, 通常大于 1, 一般情况下取 1.1~1.3;
 ρ_c ——水泥的密度(kg/m³);
 ρ_{rm} ——赤泥的密度(kg/m³);
 ρ_{cg} ——煤矸石的密度(kg/m³);
 ρ_w ——水的密度(kg/m³);
 V_f ——每立方泡沫轻质土的泡沫添加量(L);
 ρ_f ——实测泡沫密度(kg/m³);
 M_f ——1 m³ 泡沫混凝土的泡沫用量(kg/m³)。

3.1.2. A 泡沫轻质土的制备

本课题选用预制泡混合法制备 A 泡沫轻质土, 主要步骤由料浆的制备, 预制稳定泡沫, 泡沫与料浆的混合三个工序组成; 预制泡混合法制备出的泡沫轻质土浆体流动性好, 可以实现远距离泵送, 且发泡剂用量较少, 更适合实体工程的应用。制备过程如图 2 所示。

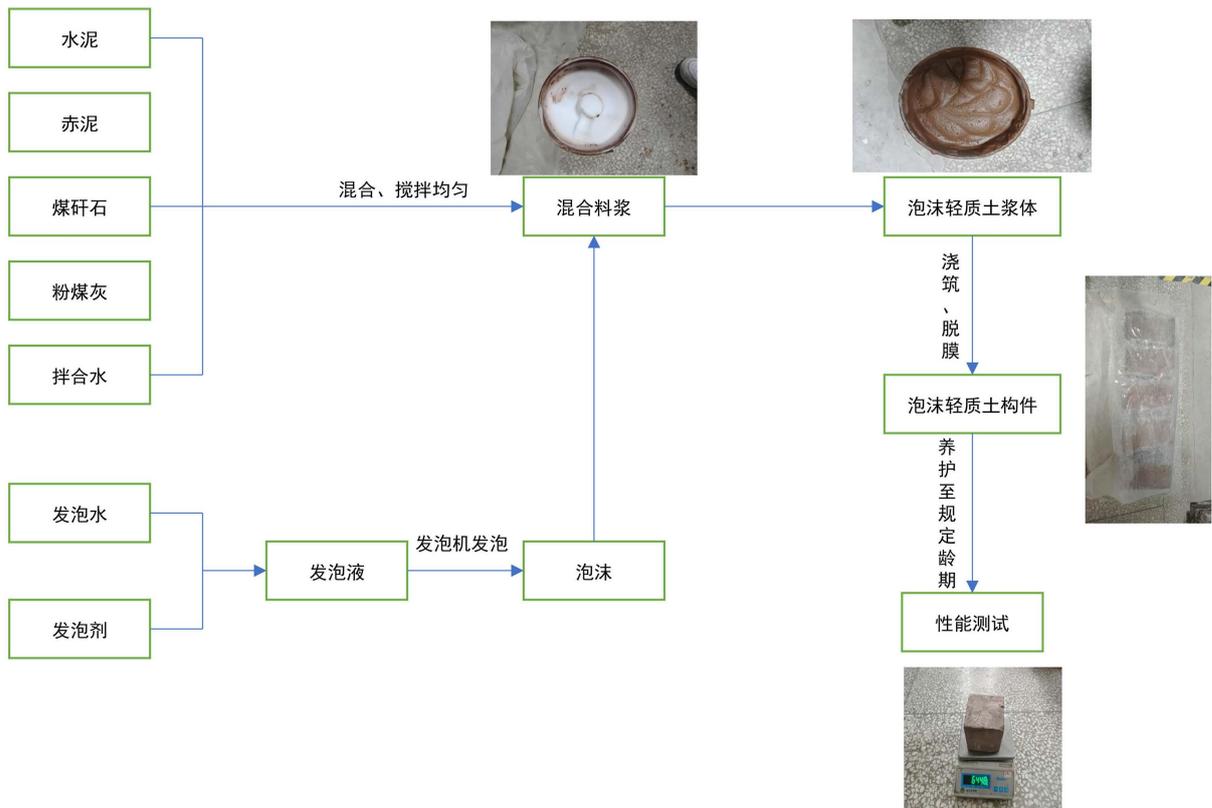


Figure 2. Preparation process of foam light weight chart
 图 2. 泡沫轻质土的制备过程

制备的具体过程如下:

- (1) 按配合比设计质量称取水泥、煤矸石、粉煤灰、拌合水、赤泥、发泡水;
- (2) 将称量好的干料倒入搅拌机中慢拌 30 s 混合均匀;
- (3) 将一半拌合水加入搅拌机中, 慢拌 30 s, 再将剩下的拌合水加入搅拌机中, 慢拌 30 s, 得到胶凝

浆体；

(4) 将发泡剂和发泡水按照 1:30 的比例稀释成发泡剂溶液，搅拌均匀，通过发泡机对发泡剂溶液进行发泡得到质量密度都均匀的泡沫；

(5) 称取一定量泡沫倒入制备好胶凝浆体的搅拌机中，采用行星式搅拌方式，搅拌叶片自转速度为 125 r/min，公转速度为 285 r/min，快速搅 10 s 或慢速搅 30 s，使泡沫与胶凝浆体混合均匀，制备得到 A 泡沫轻质土浆体；

(6) 将混合均匀的 A 泡沫轻质土浆体倒入刷好脱模剂的模具中，轻微振捣之后刮平表面，静置 72 h 后脱模，脱模后转入标准养生室养护至规定龄期。

3.2. 赤泥与煤矸石在水泥混凝土中的活性试验研究

本研究旨在探讨赤泥、煤矸石部分替代水泥时对水泥水化过程性能及活性的影响，计划运用活性指数法进行试验评估，考虑到煤矸石与粉煤灰的性质相近，选择以粉煤灰掺煤矸石作为平行参照组。活性指数的定义：掺一定比例矿物掺合料的水泥胶砂抗压强度与同龄期不掺矿物掺合料的水泥胶砂抗压强度的比值。该方法能有效反映矿物掺合料在实际水泥基材料中的活性响应特征[13]。鉴于工程实践中矿物掺合料掺量通常维持在 30% 水平，本次试验特别选取该替代率开展对比研究，以增强试验结果对实际应用的指导价值。其中，粉煤灰使用河南大唐电厂生产的 I 级粉煤灰，其化学组成见表 6。具体的实验设计配合比方案如表 7 所示，实验结果如表 8 所示。

Table 6. Chemical composition of fly ash

表 6. 粉煤灰的化学组成

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量
质量分数/%	45.14	24.2	0.85	5.6	1.34	2.12	2.8

Table 7. Experimental design mix ratio

表 7. 实验设计配合比

组别	掺和料种类	水泥/kg	赤泥/kg	煤矸石/kg	粉煤灰/kg	水/kg
1	赤泥	1.26	0.54	0	0	0.99
2	煤矸石	1.26	0	0.54	0	0.99
3	粉煤灰	1.26	0	0.27	0.27	0.99
4	水泥	1.80	0	0	0	0.99

试验数据表明，赤泥、煤矸石与粉煤灰在 3 天、7 天和 28 天龄期的活性指数均小于 100%，由此可知，赤泥、煤矸石、粉煤灰的掺入会对水泥混凝土的抗压强度产生减弱效果。强度排序为赤泥、煤矸石、粉煤灰，其中粉煤灰与煤矸石活性表现相近，掺和料与纯水泥差距随龄期逐渐缩小。赤泥由于早期水化反应更活跃，3 d 活性指数(63.21%)最高，煤矸石(52.44%)与粉煤灰(52.29%)早期活性接近。赤泥在 28 d 活性指数保持稳定(74.26%)，但 3 d 到 28 d 的增幅缩小，煤矸石后期活性增长显著(28 d 较 3 d 增长 13.36%)，粉煤灰火山灰效应有所激发，但增幅弱于其他掺和料。总的来看，煤矸石与粉煤灰整体活性水平接近，因此可以使用煤矸石替代粉煤灰进行混合掺料，且煤矸石与赤泥活性指数相差不大，基于煤矸石在泡沫轻质土中的成熟应用经验，可推断赤泥同样具备作为辅助胶凝材料的工程价值。由于所有掺和料 30% 掺量仍导致强度存在损失(赤泥 28 d 强度下降 25.7%)，因此需试验更低掺量，且尝试以赤泥与粉煤灰复配，利用赤泥早期活性和煤矸石后期火山灰效应协同提升性能。以平衡成本与强度损失来确定最佳经济掺比。

Table 8. Experimental result**表 8.** 实验结果

组别	掺和料种类	掺量/%	抗压强度			3 d 活性指数/%	7 d 活性指数/%	28 d 活性指数/%
			3 d	7 d	28 d			
1	赤泥	30	12.56	19.18	33.35	63.21	56.51	74.26
2	煤矸石	30	10.42	17.35	29.55	52.44	51.12	65.80
3	粉煤灰	30	10.39	16.19	26.37	52.29	47.70	58.72
4	水泥	0	19.87	33.94	44.91	100	100	100

3.3. 单因素对 A 泡沫轻质土的影响

3.3.1. 基准配合比

查询文献后, 以前期大量探索性试验为基础, 基于文献与实验结果的综合考虑后, 选取水胶比为 0.55 作为基本水胶比, A 泡沫轻质土性质所用的基准配合比如表 9 所示。

Table 9. Reference mix ratio**表 9.** 基准配合比

水胶比	设计容重(kg/m ³)	水泥(kg)	赤泥(kg)	煤矸石(kg)	水(kg)	泡沫(kg)
0.55	600	400.0	50.0	50.0	275.0	35.4

3.3.2. 赤泥掺量对 A 泡沫轻质土的影响

赤泥添加比例是影响 A 泡沫轻质土性能的关键参数。为探究其掺量变化对材料性能指标的作用规律, 本研究基于基准配比参数设计, 赤泥掺量由 0% 增加到 20% 来开展配合比优化研究。表 10 详细列出了不同赤泥掺量下的 A 泡沫轻质土配合比方案, 相应的性能测试数据汇总于表 11 中。

Table 10. Mix proportion schem**表 10.** 配合比方案

编号	赤泥掺量/%	设计容重(kg/m ³)	水泥(kg)	赤泥(kg)	煤矸石(kg)	水(kg)	泡沫(kg)
C-1	0	600	450.0	0.0	50.0	275.0	35.2
C-2	5	600	425.0	25.0	50.0	275.0	35.3
C-3	10	600	400.0	50.0	50.0	275.0	35.4
C-4	15	600	375.0	75.0	50.0	275.0	35.5
C-5	20	600	350.0	100.0	50.0	275.0	35.6

Table 11. Performance test data**表 11.** 性能测试数据

编号	赤泥掺量/%	3 d 抗压强度(MPa)	7 d 抗压强度(MPa)	28 d 抗压强度(MPa)	干密度(kg/m ³)
C-1	0	1.39	1.70	2.41	656.16
C-2	5	1.78	2.36	3.27	647.36
C-3	10	1.64	2.13	2.91	634.64
C-4	15	1.45	1.81	2.66	628.32
C-5	20	1.34	1.69	2.37	616.64

(1) 3 d、7 d、28 d 抗压强度

由表 11 可以看出 A 泡沫轻质土随着赤泥掺量变大, A 泡沫轻质土的 3 d、7 d、28 d 抗压强度均呈现先上升后下降先增大后减小的趋势。在赤泥掺量为 5% 时, 试样的早期与长期强度指标均取得峰值, 对应 3 d、7 d、28 d 强度分别为 1.78 MPa、2.36 MPa、3.27 MPa。在赤泥掺量从 0% 增加到 5% 时, 3 d、7 d、28 d 抗压强度分别提升了 28.1%、38.8%、35.7%; 赤泥掺量从 5% 增加到 20% 时, 3 d、7 d、28 d 抗压强度分别减小了 32.8%、39.6%、38.0%。分析结果可以看出, 掺入适量赤泥可以提高 A 泡沫轻质土的抗压强度。这主要是因为适量掺入赤泥会提高浆液碱度, 激活粉煤灰的早期火山灰活性, 促进煤矸石的提前解聚, 从而提高 A 泡沫轻质土的抗压强度。但过量赤泥则会减弱胶凝作用, 削弱整体的胶结性能, 降低抗压强度。

(2) 干密度

由图 3 可以看出, 随着赤泥的掺量不断增大, A 泡沫轻质土干密度呈现出减小的趋势。赤泥掺量从 0% 增加到 20%, A 泡沫轻质土的干密度下降了 40 kg/m^3 , 主要是因为赤泥活性成分少于水泥, 等质量赤泥水化产物质量小于水泥, 随着赤泥掺量增加, A 泡沫轻质土干密度下降。

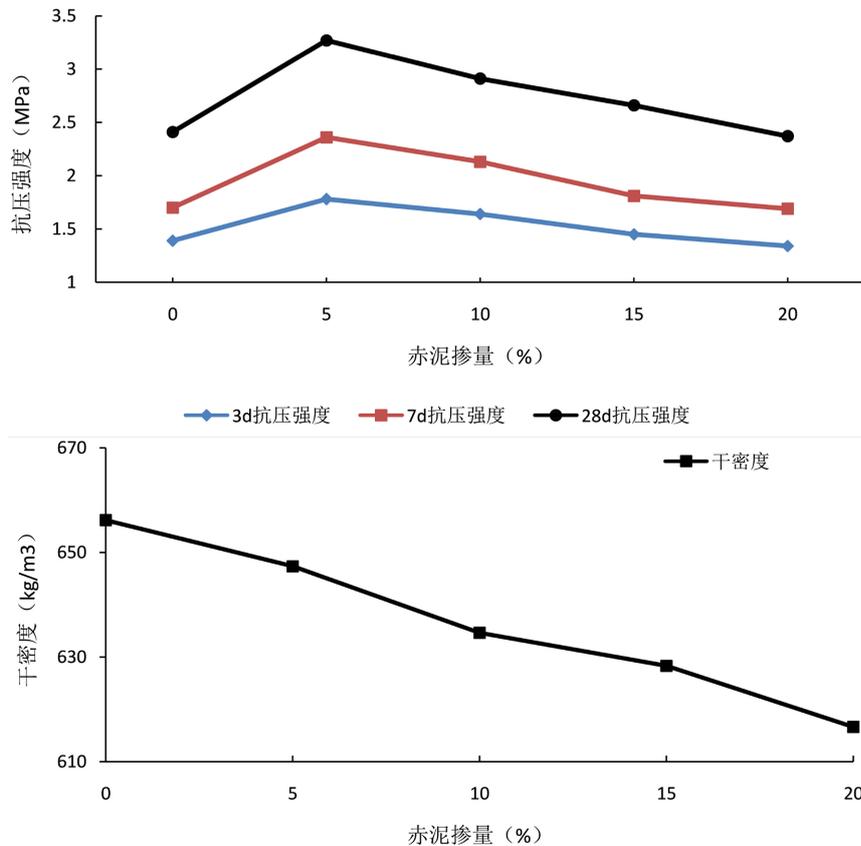


Figure 3. Relationship between red mud content and compressive strength, dry density

图 3. 赤泥含量与抗压强度、干密度关系

3.3.3. 煤矸石掺量对 A 泡沫轻质土的影响

煤矸石的引入是优化 A 泡沫轻质土性能的重要技术路径。通过部分替代水泥可降低材料成本, 同时能有效改善浆体工作性能。为系统分析煤矸石掺量对材料性能指标的影响规律, 本研究基于基准配合比, 体积密度 600 kg/m^3 , 水固比 0.55, 采用梯度替代法将煤矸石掺量从基准组 0% 逐步提升至 20% 进行实验。具体配比如表 12 所示, 对应实验结果详见表 13 所示。

Table 12. Mix proportion scheme
表 12. 配合比方案

编号	煤矸石掺量/%	设计容重(kg/m ³)	水泥(kg)	赤泥(kg)	煤矸石(kg)	水(kg)	泡沫(kg)
M-1	0	600	450.0	50.0	0.0	275.0	35.6
M-2	5	600	425.0	50.0	25.0	275.0	35.5
M-3	10	600	400.0	50.0	50.0	275.0	35.4
M-4	15	600	375.0	50.0	75.0	275.0	35.3
M-5	20	600	350.0	50.0	100.0	275.0	35.2

Table 13. Performance test data
表 13. 性能测试数据

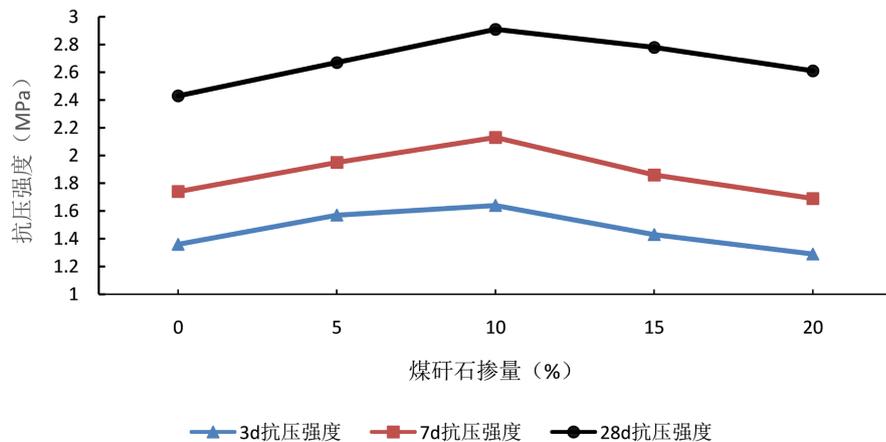
编号	煤矸石掺量/%	3 d 抗压强度(MPa)	7 d 抗压强度(MPa)	28 d 抗压强度(MPa)	干密度(kg/m ³)
M-1	0	1.36	1.74	2.43	648.56
M-2	5	1.57	1.95	2.67	642.24
M-3	10	1.64	2.13	2.91	634.64
M-4	15	1.43	1.86	2.78	625.20
M-5	20	1.29	1.69	2.61	619.68

(1) 3、7、28 d 抗压强度

由表 13 可知,随着煤矸石掺量的增加,A 泡沫轻质土的 3 d、7 d、28 d 抗压强度呈现出先上升后下降的趋势,煤矸石强度峰值出现在掺量为 10%时,A 泡沫轻质土的 3 d、7 d、28 d 抗压强度均达到最大值,分别为 1.64 MPa、2.13 MPa、2.91 MPa。煤矸石掺量从 0%上升到 10%时,3 d、7 d、28 d 抗压强度大幅提升。这主要是因为,适量煤矸石通过活性成分参与水化反应,生成额外凝胶,提升强度,同时赤泥与煤矸石混合料的碱性环境会加速其活性效应与水泥水化协同作用效率。但当煤矸石掺量继续增加时,A 泡沫轻质土浆体胶凝作用减弱,结构内部孔隙率增加,密实度下降,均匀性变差,导致 A 泡沫轻质土强度下降。

(2) 干密度

由图 4 可知,当煤矸石掺量从 0%逐渐上升到 20%时,A 泡沫轻质土的干密度呈现出一直下降的趋势,A 泡沫轻质土的干密度下降了 28.88 kg/m³,这主要是因为煤矸石的表观密度比水泥小,煤矸石替换水泥的比例上升时,A 泡沫轻质土的干密度减小。



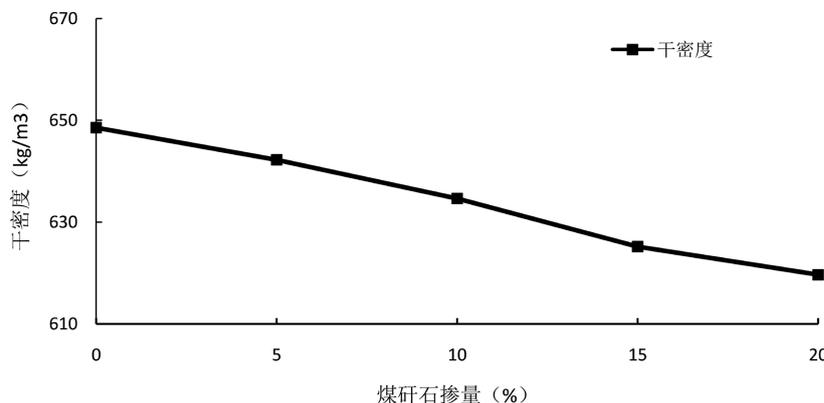


Figure 4. Relationship between content of coal gangue and compressive strength, dry density
图 4. 煤矸石含量与抗压强度、干密度关系

4. 结论

本研究以工业固废资源化利用为导向，聚焦赤泥与煤矸石的综合利用，针对公路工程减少沉降，路基换填、脱空注浆加固工程需求，成功研制出环境友好型固废基泡沫轻质土材料。通过系统研究抗压强度、干密度等关键性能指标，开展材料配比参数优化工作。经实验数据分析，获得以下研究成果：

(1) 实验表明赤泥与煤矸石在水泥基体中的活性指数接近，展现出显著胶凝特性，证实其作为辅助胶凝材料制备泡沫轻质土的技术可行性。

(2) 通过赤泥及煤矸石掺量的单因素试验，对赤泥与煤矸石进行 3 d、7 d、28 d 的抗压强度与干密度测试，确定最优掺量区间为：赤泥 5%~15%、煤矸石 5%~15%，并得出赤泥在掺量为 5% 时，试样的抗压强度取得峰值，煤矸石的掺量为 10% 时出现抗压强度峰值，为工程应用提供依据。

参考文献

- [1] 张鹏恒. 泡沫轻质土性能及在公路工程中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
- [2] 张健, 王川, 李召峰, 等. 赤泥基绿色高性能注浆材料工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3339-3352.
- [3] Dong, M., Ruan, S., Zhan, S., Shen, S., Sun, G., Qian, X., *et al.* (2022) Utilization of Red Mud with High Radiation for Preparation of Autoclaved Aerated Concrete (AAC): Performances and Microstructural Analysis. *Journal of Cleaner Production*, **347**, Article 131293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131293>
- [4] 赵正峰, 王笑风, 王国栋, 等. 工业废渣复合胶凝材料泡沫轻质土制备及性能[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(6): 2108-2116.
- [5] 白应华, 潘秋阳. 煤矸石对泡沫混凝土孔结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(6): 2047-2052, 2070.
- [6] Li, Y., Liu, S. and Guan, X. (2021) Multitechnique Investigation of Concrete with Coal Gangue. *Construction and Building Materials*, **301**, Article 124114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124114>
- [7] 李月香, 李超刚, 俞心刚. 煤矸石掺量对泡沫混凝土性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(11): 117-120.
- [8] 迟骋. 低熟料煅烧煤矸石胶凝材料的研发及其在泡沫混凝土中的应用[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北民族大学, 2024.
- [9] Jia, H., Zou, Q., Cui, B. and Zeng, J. (2023) Thermal Insulation Properties and Simulation Analysis of Foam Concrete Regulated by Mechanical and Chemical Foaming. *ACS Omega*, **8**, 48091-48103. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06929>
- [10] 冯璐, 宁英杰, 陈徐东, 等. 不同龄期及密度泡沫混凝土微观结构及水化特性[J]. 混凝土, 2022(7): 1-5.
- [11] 肖军. 解析现浇泡沫混凝土施工技术[J]. 中国水泥, 2024(2): 108-114.
- [12] 李应权, 朱立德, 李菊丽, 等. 泡沫混凝土配合比的设计[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2011, 26(2): 1-5.
- [13] 陈锦浩. 皂化渣粉煤灰泡沫轻质土的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.