

矿化养护碱激发固废胶凝材料性能 与环境影响的综合评价

王一晓¹, 许耀群², 张 昂^{1,3}, 林新昊¹, 杨媛媛¹

(1. 中原科技学院土木建筑学院, 郑州 451400; 2. 郑州大学水利与交通学院, 郑州 450001; 3. 武汉大学继续教育学院, 武汉 430072)

摘要: CO₂ 矿化养护固废胶凝材料可实现固废的多样化、减量化消纳, 同时固定封存 CO₂, 具有双重减碳效益。为综合考虑材料的力学性能、固碳效果与环境影响, 选取抗压强度、固碳率、固碳程度、碳化效率、碳排放和能源消耗为评价指标, 设计 11 组配合比试件进行综合性能的量化分析和评分。结果表明, 与标准养护相比, 矿化养护碱激发固废胶凝材料的抗压强度和整体固碳效果有显著提升。固废具有优异的减排和降耗优势, 但碱激发剂的使用对环境影响较大。当粉煤灰、赤泥和钢渣质量比为 7:2:1, 水固比、碱胶比和水玻璃模数分别为 0.28、0.26、1.2 时, 矿化养护碱激发固废胶凝材料的综合性能最优。CO₂ 矿化养护技术与固废资源化利用相结合可释放巨大的固碳潜能, 是推动减污、降碳协同增效的重要举措。

关键词: CO₂ 矿化养护; 固废胶凝材料; 固碳; 碳排放; 能源消耗; 综合评价

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1001-1625(2024)03-0977-10

Comprehensive Evaluation of Performance and Environmental Impact of Mineralization Curing Alkali Activated Solid Waste Cementitious Materials

WANG Yixiao¹, XU Yaoqun², ZHANG Ang^{1,3}, LIN Xinhao¹, YANG Manman¹

(1. School of Civil Engineering, Zhongyuan Institute of Science and Technology, Zhengzhou 451400, China;

2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. College of Continuing Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: CO₂ mineralization curing solid waste cementitious materials can achieve diversified and reduced consumption of solid waste, while fixing and storing CO₂, which has dual carbon reduction benefits. To comprehensively consider the mechanical properties, carbon sequestration effect, and environmental impact of materials, this article selected compressive strength, carbon sequestration rate, carbon sequestration degree, carbonization efficiency, carbon emission, and energy consumption as evaluation indicators, and designed 11 sets of mixed proportion specimens for quantitative analysis and evaluation of comprehensive performance. The results show that compared with standard curing, the compressive strength and carbon sequestration effect of mineralization curing alkali activated solid waste cementitious materials have been significantly improved. Solid waste has excellent emission and consumption reduction advantages, but the use of alkali activator has a significant impact on the environment. When the mass ratio of fly ash, red mud, and steel slag is 7:2:1, the water-solid ratio, alkali adhesive ratio, and water glass modulus are 0.28, 0.26, and 1.2, the comprehensive performance of mineralization curing alkali activated solid waste cementitious materials is the best. The combination of CO₂ mineralization curing technology and solid waste utilization can unleash enormous carbon sequestration potential, which is an important measure to promote the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction.

Key words: CO₂ mineralization curing; solid waste cementitious material; carbon sequestration; carbon emission; energy consumption; comprehensive evaluation

收稿日期: 2023-10-18; 修订日期: 2023-11-30

基金项目: 河南省科技攻关项目(232102230129); 国家自然科学基金(52130901); 许昌市科技攻关项目(20230213058)

作者简介: 王一晓(1993—), 女, 讲师。主要从事固废资源化利用与低碳材料的研究。E-mail: wys2811004@163.com

0 引言

CO₂ 矿化技术是利用天然矿石以及其他具有矿化活性的原料中的碱性组分进行碳酸化反应,实现 CO₂ 固定封存的技术,在应对全球气候变化的“双碳”目标中已展现出了巨大的潜力。天然矿石(如蛇纹石、橄榄石等)所需的研磨和活化阶段通常在高温、高压下进行,成本高且碳化率低。相比之下,碱性固废由于相对较高的反应活性,具有快速反应动力学,更适合 CO₂ 矿化固定^[1]。

钢铁和水泥等能源密集型行业是全球 CO₂ 排放的主要贡献者,同时在资源开采和生产过程中会产生大量的碱性固废^[2]。利用碱性固废进行 CO₂ 矿化可减少原料生产阶段的碳排放,同时可以有效捕获、利用与封存 CO₂^[3-4],是协同解决碱性固废处理问题和对抗全球变暖的重要途径之一。马卓慧等^[5-6]利用碱性矿物材料激发水化活性,促使水化硅酸钙凝胶和钙矾石的生成,碳化产物具有胶凝特性,可用作建筑材料。任国宏等^[7]对粉煤灰-电石渣进行了制浆矿化,矿化后的试件抗压强度可提升 37.1%~82.1%,碳化度为 7.9%~10.2%。矿化养护后试件的抗压强度通常取决于矿化养护温度、压力、时间,以及原料配比、添加剂等,试件微观结构较自然养护更为致密,具有良好的固碳增强效应^[8]。

我国每年通过 CO₂ 矿化技术可实现超 1×10^9 t 工业废物的资源再利用,同时可减少碳排放超 1×10^8 t,预计到 2050 年全球 CO₂ 排放量将减少 $(5.5 \sim 8.2) \times 10^8$ t^[9-10]。目前,CO₂ 矿化养护胶凝材料的研究主要集中于力学性能和固碳率,大多数研究结果只是针对单一性能的分析^[11-12],对环境综合影响效应的研究和评估方法仍比较模糊。生命周期评价法是国内外量化胶凝材料潜在环境影响的方法之一,已在熟料生产过程碳足迹和碳排放评估方面得到了广泛的应用^[13-14]。同时,降低能源消耗也是实现低碳经济的有效方式,有必要对能耗进行核算。目前同时考虑减碳、降耗的需求,结合力学性能、固碳效果和环境影响等多方面的综合评价体系还需要深入地研究。

本研究以固废为原材料,在 CO₂ 矿化养护条件下,选取抗压强度、固碳率、固碳程度、碳化效率、碳排放和能源消耗分析结果为评价指标,对 CO₂ 矿化养护碱激发固废胶凝材料进行多维度的综合性能评价,量化碳排放和能耗差异。在满足力学强度的基础上,为选取固碳潜力大、环境效益良好的配合比提供支撑。

1 实验

1.1 原材料

粉煤灰为河南铂润铸造材料有限公司生产,采用细度(45 μm 筛余)为 10.5%、含水量为 0.35% 的中钙粉煤灰。赤泥为河南省许昌市某铝厂的烧结法赤泥。钢渣由钢厂的转炉钢渣粉碎筛分得到,来自巩义市铂润耐火材料有限公司。粉煤灰、赤泥和钢渣的主要化学成分如表 1 所示。碱激发剂为水玻璃(Na₂SiO₃)和 NaOH 调整模数后的试剂,为灰色半透明液体。水玻璃模数为 2.4,Na₂O、SiO₂ 和水不溶物的质量分数分别为 14.91%、35.48% 和 0.72%。

表 1 粉煤灰、赤泥和钢渣的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of fly ash, red mud and steel slag

Material	Mass fraction/%					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
Fly ash	54.94	24.86	12.63	2.52	0.81	0.35
Red mud	22.86	7.64	45.32	8.42	1.26	—
Steel slag	19.72	6.39	39.21	23.62	6.12	0.79

1.2 试验配合比

为研究不同固废掺量、水玻璃模数、碱胶比对碱激发固废胶凝材料性能和环境效益的影响,保证水固比为不变,共设计了 11 组不同配合比,如表 2 所示。

表2 碱激发固废胶凝材料的配合比

Table 2 Mix proportion of alkali activated solid waste cementitious materials

Group	Fly ash mass fraction/%	Red mud mass fraction/%	Steel slag mass fraction/%	Water-solid ratio	Alkali adhesive ratio	Water glass modulus
F60	60	30	10	0.28	0.26	1.5
F70	70	20	10	0.28	0.26	1.5
F80	80	10	10	0.28	0.26	1.5
M1.2	70	20	10	0.28	0.26	1.2
M1.4	70	20	10	0.28	0.26	1.4
M1.7	70	20	10	0.28	0.26	1.7
M1.9	70	20	10	0.28	0.26	1.9
A0.22	70	20	10	0.28	0.22	1.5
A0.24	70	20	10	0.28	0.24	1.5
A0.28	70	20	10	0.28	0.28	1.5
A0.30	70	20	10	0.28	0.30	1.5

1.3 试件制备及试验方法

将粉煤灰、钢渣、赤泥混合搅拌,并在搅拌过程中加入碱激发剂和水,拌和均匀后倒入钢模中成型,振捣密实。部分试件因碱激发剂模数较大,制备过程中出现凝固较慢的现象,因此所有试件均在72 h后脱模。设置标准养护和矿化养护对照,标准养护环境设置相对湿度不低于95%,温度为(20±2)℃,矿化养护环境设置养护压力、温度分别为1.0 MPa和25℃,通入纯度为99.9%(体积分数)的CO₂气体矿化养护4 h后将试件取出并进行称重,后续置于标准养护环境中继续养护至7、28 d指定龄期。试验所用试件为40 mm×40 mm×160 mm的立方体。参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671—2021)测定胶凝材料的抗压强度。

1.4 试验数据处理

固碳率可直观体现出碱激发固废胶凝材料对CO₂的矿化固定能力,基于Steinour公式^[15-16],对碱激发固废胶凝材料的理论固碳率进行计算。理论固碳率是假设材料中所有可与CO₂进行碳酸化反应的组分100%充分反应而得到的,为材料理想状态下的最大固碳率。CaO、MgO、Na₂O和K₂O组分都可以与CO₂进行碳酸化反应,因为Na₂O和K₂O的含量较少,本文未考虑Na₂O和K₂O组分的碳酸化反应活性,同时扣除CaO组分与SO₃结合生成硫酸盐的部分。结合组分分析中氧化物与CO₂反应的化学计量数的配比来估算原材料的理论固碳率,根据式(1)计算得到。

$$\omega_{\text{理论}} = 0.785(\omega_{\text{CaO}} - 0.7\omega_{\text{SO}_3}) + 1.091\omega_{\text{MgO}} \quad (1)$$

式中: $\omega_{\text{理论}}$ 为理论固碳率,%; ω_{CaO} 、 ω_{SO_3} 、 ω_{MgO} 分别为CaO、SO₃和MgO的质量分数,%。

实际固碳率一般与理论固碳率存在较大偏差,通过计算矿化养护后试件质量的变化率来评估碱激发固废胶凝材料的实际固碳能力,计算公式如式(2)所示。

$$\omega_{\text{实际}} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 \times \left(\frac{1}{1 + w/b} \right)} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\omega_{\text{实际}}$ 为实际固碳率,%; m_2 为矿化养护后试件质量,g; m_1 为矿化养护前试件质量,g; w/b 为剩余水灰比。

为了量化实际固碳率与理论固碳率之间的差异,综合分析不同材料对CO₂的捕获量以及固化能力,用实际固碳率与理论固碳率的比值表示固碳程度,用实际固碳率与单位质量的CaO含量的比值表示碳化效率。试件的固碳程度及碳化效率分别根据式(3)和式(4)得到。

$$\varepsilon = \frac{\omega_{\text{实际}}}{\omega_{\text{理论}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\omega_{\text{实际}}}{\omega_{\text{CaO}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ε 为固碳程度,% ; η 为碳化效率,% 。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

不同配合比碱激发固废胶凝材料在标准养护和矿化养护条件下7、28 d抗压强度如图1所示。由图1可知,与标准养护相比,所有配合比试件经矿化养护后,抗压强度显著提升。矿化养护后,F60~80组试件28 d抗压强度可提升13.00%~57.83%,M1.2~1.9组试件28 d抗压强度可提升18.90%~29.84%,A0.22~0.30组试件28 d抗压强度可提升27.74%~37.39%,说明矿化养护对碱激发固废胶凝材料的抗压强度有明显的增强效应,其中7 d抗压强度提升效果更显著。

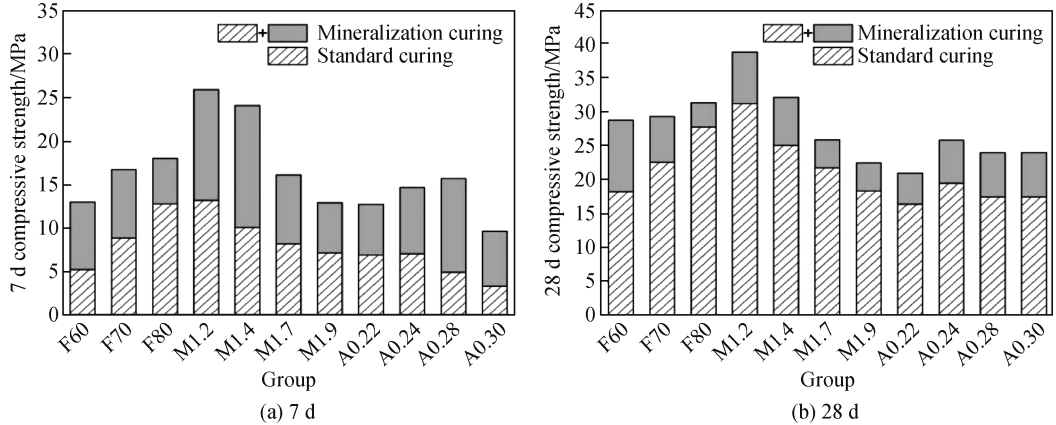


图1 碱激发固废胶凝材料在标准、矿化养护下的抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of alkali activated solid waste cementitious material under standard and mineralization curing

2.2 固碳效果

2.2.1 粉煤灰掺量对固碳效果的影响

F60~80组试件的理论固碳率分别为21.15%、18.52%和15.88%,标准养护28 d后,实际固碳率仅为2.9%~3.4%,28 d固碳程度为16.08%~18.26%,碳化效率仅为13.55%~15.63%。

图2为矿化养护条件下F60~80组试件的固碳效果。由图2可知,矿化养护后F60~80组试件的实际固碳率有明显提高,7 d实际固碳率分别为6.42%、5.97%和5.68%,28 d实际固碳率分别为7.11%、6.50%和6.05%,固碳程度和碳化效率均有相应提高。但由于试件组分中存在不参与矿化反应的成分,实际固碳率与理论固碳率仍存在一定差值。

矿化养护后,试件的实际固碳率随粉煤灰掺量的增加而不断减小,与理论固碳率基本吻合,当试件中粉煤灰掺量从60%提高至70%、80%时,28 d实际固碳率分别降低8.58%、15.05%。在钢渣掺量相同的情况下,矿化反应中赤泥的活性大于粉煤灰,具有更好的固碳效果和矿化潜力。试件的固碳程度和碳化效率随粉煤灰掺量的增加反而增大。F60~80组试件的7 d实际固碳率为28 d实际固碳率的90%~94%,由此可知在前7天内矿化反应速率较高,矿化反应基本在前7天内完成。

2.2.2 水玻璃模数对固碳效果的影响

图3为水玻璃模数对试件固碳效果的影响。由图3可以看出,随着水玻璃模数的增加,试件的实际固碳率、固碳程度和碳化效率均呈逐渐下降的趋势。当水玻璃模数为1.2时,碱激发固废胶凝材料的固碳效果最

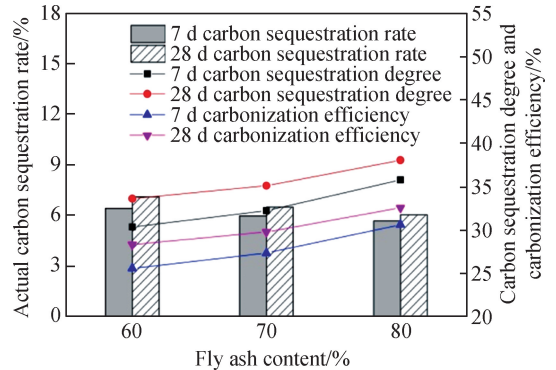


图2 粉煤灰掺量对试件固碳效果的影响

Fig. 2 Influence of fly ash content on carbon sequestration effect of specimens

佳,28 d 实际固碳率达到 7.21%, 固碳程度为 38.93%, 碳化效率为 33.03%。当水玻璃模数为 1.9 时,28 d 实际固碳率为 5.44%, 固碳程度为 29.37%, 碳化效率为 24.92%, 与水玻璃模数为 1.2 的试件的 28 d 实际固碳率、固碳程度和碳化效率相比均降低约 25%。水玻璃模数是通过调配 NaOH 的浓度而改变的,NaOH 添加越少,水玻璃模数越高,游离 Na⁺ 和 OH⁻ 的数量越少。随着模数的增加,水玻璃中的双电层变薄,生成的类沸石和莫来石产物数量减少,结构变得松散,这也是图 1 中 M1.2 ~ 1.9 组试件的抗压强度随水玻璃模数的增加而逐渐减低的原因。

2.2.3 碱胶比对固碳效果的影响

图 4 为碱胶比对试件固碳效果的影响,当水玻璃模数保持 1.5 不变,碱胶比在 0.22 ~ 0.30 时,随碱胶比的增加,试件的实际固碳率、固碳程度和碳化效率均呈先升高再降低的趋势。试件在碱胶比为 0.28 时的固碳效果最佳,28 d 实际固碳率、固碳程度和碳化效率均达到最大值,分别为 6.72%、36.29% 和 30.79%。当碱胶比较低(0.22 ~ 0.26)时,增大碱胶比可有效提高碱激发固废胶凝材料的固碳效果。当碱胶比超过 0.28 时,试件的固碳效果有大幅度下降。

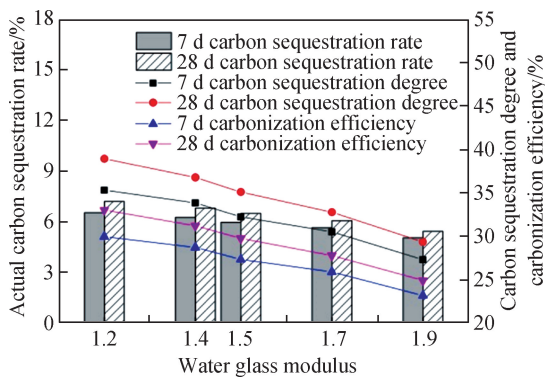


图 3 水玻璃模数对试件固碳效果的影响

Fig. 3 Influence of water glass modulus on carbon sequestration effect of specimens

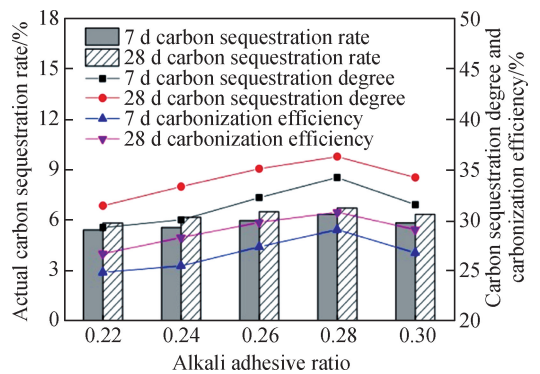


图 4 碱胶比对固碳效果的影响

Fig. 4 Influence of alkali adhesive ratio on carbon sequestration effect of specimens

3 环境影响评价

根据文献[17-22],胶凝材料在全生命周期对环境的影响可分为原材料生产阶段、原材料运输阶段、胶凝材料制备阶段、胶凝材料运输阶段和建造施工阶段。考虑到胶凝材料运输阶段和建造施工阶段中不同配合比的材料影响差别较小,选取原材料生产和胶凝材料制备两个阶段,量化分析水泥胶凝材料与碱激发固废胶凝材料标准养护和矿化养护的 CO₂ 排放和能源消耗情况。

3.1 原材料生产阶段

表 3 为水泥胶凝材料和固废胶凝材料中各主要原材料在生产过程中产生的环境影响。表 3 中,水泥、水的碳排放量来自文献[17-18]。粉煤灰、赤泥和钢渣都属于固废,在原材料获取过程中的碳排放可以忽略不计,仅考虑在加工处理过程中产生的碳排放,因此粉煤灰、赤泥和钢渣的单位碳排放量均较低,固废数据来自文献[18-21]。水玻璃、NaOH 在生产过程中能耗较大,碳排放较高,数据来自中国生命周期基础数据库(Chinese Life Cycle Database, CLCD)和文献[18]。

表 3 单位原材料的环境影响清单

Table 3 Environmental impact list of unit raw materials

Raw material	Cement	Fly ash	Red mud	Steel slag	Water	Sodium silicate	NaOH
Carbon emission/(kgCO ₂ · t ⁻¹)	842	22.8	4.76	1.01	0.189	1 238	745
Energy consumption/(MJ · t ⁻¹)	3 330	2 850	1 318	11	2.5	10 200	20 557

胶凝材料在生产过程中产生的碳排放和能源消耗,根据式(5)和式(6)计算。

$$C = \sum_{i=1}^n (C_{i\text{CO}_2} \times m_i) \quad (5)$$

$$E = \sum_{i=1}^n (E_{i\text{PED}} \times m_i) \quad (6)$$

式中: C 为胶凝材料生产阶段的碳排放量, kgCO_2/m^3 ; $C_{i\text{CO}_2}$ 为第*i*种原材料的单位碳排放量, kgCO_2/t ; m_i 为第*i*种原材料的用量, t/m^3 ; E 为胶凝材料生产阶段的能源消耗, MJ/m^3 ; $E_{i\text{PED}}$ 为第*i*种原材料的单位能源消耗, MJ/t ; n 为原材料种类。

不同配合比的碱激发固废胶凝材料在原材料生产阶段的碳排放和能源消耗及其占比如图5和图6所示。由图5可知,在11组不同配合比试件中,A0.30组试件的碳排放和能源消耗最大,分别为 $308.35 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ 和 $3889.84 \text{ MJ}/\text{m}^3$,A0.22组试件的碳排放和能源消耗最小,分别为 $233.62 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ 和 $3274.12 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 。选取传统的水泥胶凝材料作为对照组,经计算可知,若水灰比设置为0.28,则传统水泥胶凝材料的碳排放和能源消耗分别为 $378.92 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ 和 $1498.8 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 。碱激发固废胶凝材料因采用固废全部替代水泥,碳排放较传统水泥胶凝材料可减少18.62%~38.35%,但由于在制备过程中采用了高能耗的碱激发剂,碱激发固废胶凝材料的能源消耗高于传统水泥胶凝材料。

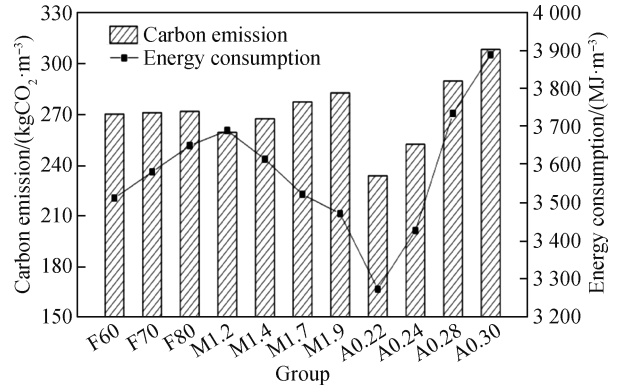


图5 原材料生产阶段的碳排放和能源消耗
Fig. 5 Carbon emission and energy consumption during production stage of raw materials

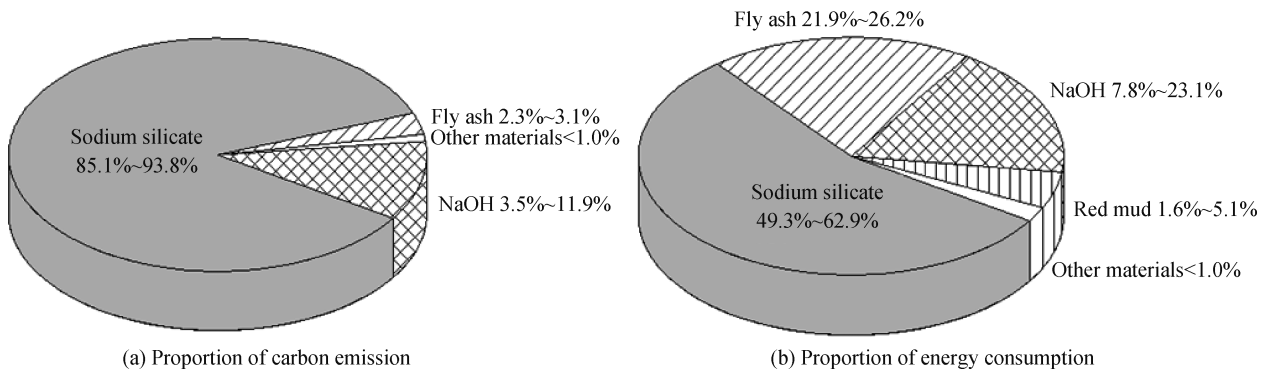


图6 原材料生产阶段各原材料的碳排放占比和能源消耗占比

Fig. 6 Proportion of carbon emission and energy consumption of various raw materials during production stage of raw materials

粉煤灰、赤泥和钢渣都属于固废,在原材料获取过程中的碳排放均小于 $30 \text{ kgCO}_2/\text{t}$,能源消耗也处于相对较低水平,分别约为水泥能源消耗的85.6%、39.6%和0.3%。因此,当粉煤灰、赤泥和钢渣掺比改变时,碱激发固废胶凝材料碳排放的波动很小,能源消耗为 $3513.04 \sim 3650.93 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 。

当水玻璃模数从1.2逐渐增加至1.9时,碱激发固废胶凝材料的碳排放逐渐增加,而能源消耗逐渐降低。分析其原因,随着水玻璃模数逐渐增加,氢氧化钠的用量逐渐减少,水玻璃的碳排放为氢氧化钠的1.66倍,但能源消耗约为氢氧化钠的一半。水玻璃模数每增加0.2,碱激发固废胶凝材料的碳排放增加1.94%~3.09%,能源消耗降低1.45%~2.04%。

由图5可以看出,碳排放和能源消耗随碱胶比的增大均显著提升,由表3的单位原材料的环境影响清单可知,水玻璃的碳排放和能源消耗为所有原材料中最高水平,分别为水泥的1.47倍和3.06倍。水玻璃的用量增加,在原材料生产阶段产生的环境影响也更加显著。碱胶比每增加0.02,碱激发固废胶凝材料的碳排放增加6.45%~8.00%,能源消耗增加4.12%~4.70%。

由图6可以看出,粉煤灰、赤泥和钢渣对碳排放的贡献可忽略不计,对能源消耗的贡献在30%以下。水

玻璃在各原材料中的碳排放和能源消耗占比均最高,分别达 85.1% 和 49.3% 以上。在碱激发固废胶凝材料的配合比设计中,从环境影响角度分析,采用粉煤灰、赤泥等固废取代水泥,可有效降低对环境的影响,在减排和降耗方面有显著的正向优势,在配合比设计中可尽量降低水泥的用量。同时,碱激发剂的使用是原材料中碳排放和能源消耗的大户,在满足基本性能的基础上,有必要合理减少碱激发剂的用量,从而有效降低能源消耗,减少环境成本。在配合比设计中可以选用其他碳排放和能源消耗相对较少的激发剂,并与矿化养护技术相结合,增大绿色低碳胶凝材料的发展空间和综合效益。

3.2 胶凝材料制备阶段

水泥胶凝材料与固废胶凝材料在制备阶段中的碳排放和能源消耗主要来自于搅拌、浇筑和养护环节,如碳酸盐分解过程、电耗、蒸汽能耗等,大部分情况下不作为胶凝材料生产过程碳排放和能源消耗的主要考虑因素^[22-23]。标准养护过程中,碳排放和能源消耗相对较小,可取为 0。矿化养护过程中,胶凝材料能够固定 CO₂,碳排放应为负值,对减少碳排放的贡献随各组试件的实际固碳率增加而提升。以矿化养护 F60 组试件为例,28 d 实际固碳率为 7.11%,则 1 t 碱激发固废胶凝材料可以吸收 71.1 kgCO₂。矿化养护与传统标准养护相比,单位质量的胶凝材料可矿化固定 54.4 ~ 72.1 kgCO₂。矿化养护时长仅为 4 h,在此过程中较标准养护额外产生的能耗忽略不计。仅依靠胶凝材料在制备阶段固定 CO₂ 产生的减碳效果有限,在确保基本力学性能的基础上,将矿化养护技术与固废的资源化利用相结合,可实现原材料生产阶段和胶凝材料制备阶段的综合环境效益最大化。

4 综合性能评价

为评估 CO₂ 矿化养护碱激发固废胶凝材料的综合性能,以 28 d 龄期的材料各项性能为指标,选取抗压强度、实际固碳率、固碳程度、碳化效率、胶凝材料在生产制备过程中的碳排放量以及能源消耗六个方面进行综合分析。将抗压强度、实际固碳率、固碳程度和碳化效率最大值设为 1,碳排放量和能源消耗最小值设为 1,其他按照比例关系赋予相应分值。图 7 给出了 F60 ~ 80 组、M1.2 ~ 1.9 组和 A0.22 ~ 0.30 组试件综合性能分析结果。

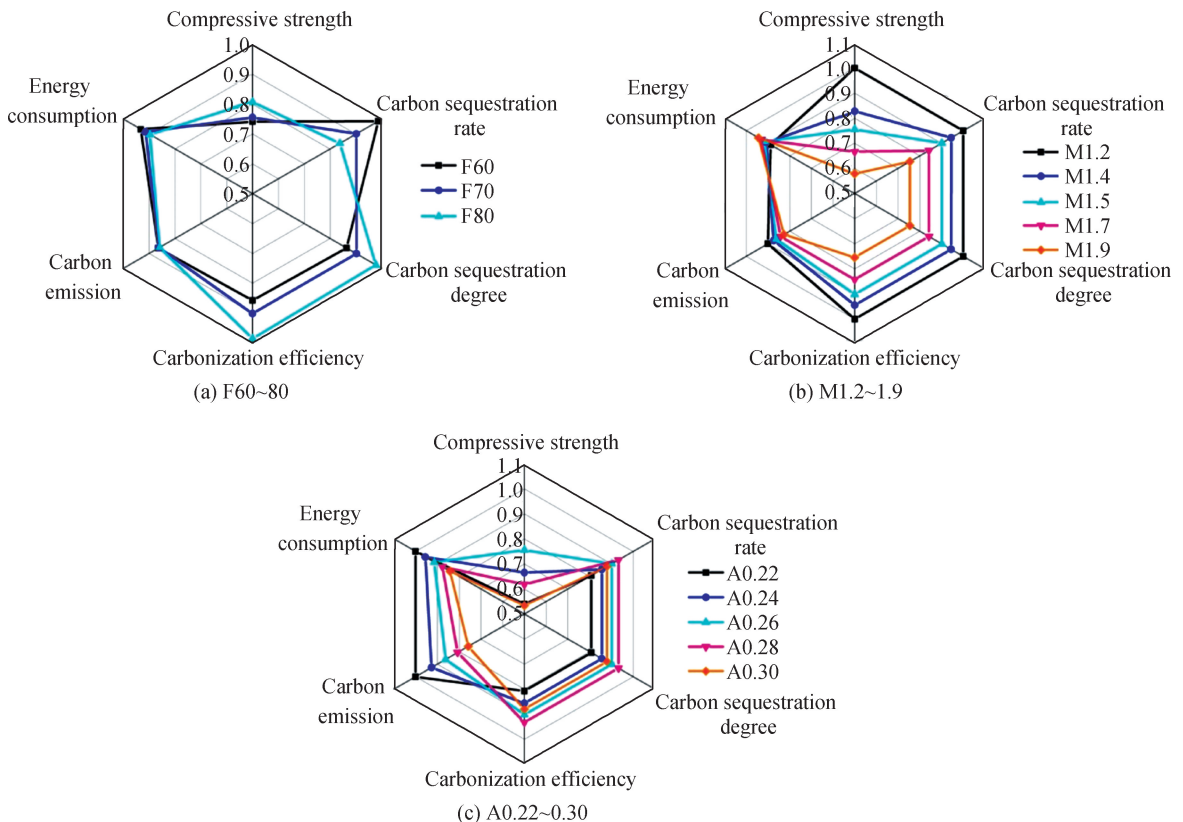


图 7 碱激发固废胶凝材料的综合性能分析

Fig. 7 Comprehensive performance analysis of alkali activated solid waste cementitious materials

以碱激发固废胶凝材料的力学性能、固碳效果和环境影响三方面为指标建立综合评价体系,一级权重设置为0.333。参考文献[18],根据层次分析法量化矩阵元素的重要程度,构造判断矩阵 A_1 作为环境影响评价判断矩阵,分为碳排放(a_1)和能源消耗(a_2)两个指标。构造判断矩阵 A_2 作为固碳效果评价判断矩阵,分为固碳率(b_1)、固碳程度(b_2)和碳化效率(b_3)三个指标。判断矩阵 A_1 和 A_2 见式(7)。各评价指标的综合权重如表4所示。根据图7得到的性能分析基础数据,得到碱激发固废胶凝材料的综合性能评分和评价结果,如表5所示。总分为100分,90分以上为一级,80~90分为二级,80分以下为三级。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 & 1 \\ \frac{1}{3} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

表4 碱激发固废胶凝材料各性能的综合权重

Table 4 Comprehensive weights of various properties of alkali activated solid waste cementitious materials

Performance	Weight	Index	Weight	Comprehensive weight
Mechanical property	0.333	Compressive strength	1.00	0.333 0
		Carbon sequestration rate	0.60	0.199 8
Carbon sequestration effect	0.333	Carbon sequestration degree	0.20	0.066 6
		Carbonization efficiency	0.20	0.066 6
Environmental impact	0.333	Carbon emission	0.75	0.249 7
		Energy consumption	0.25	0.083 3

表5 碱激发固废胶凝材料综合性能评分和评价结果

Table 5 Comprehensive performance score and evaluation results of alkali activated solid waste cementitious materials

Group	Compressive strength	Carbon sequestration rate	Carbon sequestration degree	Carbonization efficiency	Carbon emission	Energy consumption	Comprehensive score	Evaluate
F60	24.69	19.70	5.75	5.71	21.59	7.76	85.21	Level 2
F70	25.15	18.01	6.00	6.00	21.53	7.61	84.31	Level 2
F80	26.88	16.74	6.51	6.56	21.46	7.47	85.62	Level 2
M1.2	33.30	19.98	6.66	6.66	22.48	7.39	96.47	Level 1
M1.4	27.57	18.87	6.29	6.29	21.81	7.54	88.38	Level 2
M1.7	22.19	16.82	5.61	5.61	21.04	7.74	79.01	Level 3
M1.9	19.27	15.08	5.02	5.02	20.64	7.85	72.89	Level 3
A0.22	17.97	16.13	5.38	5.38	24.97	8.33	78.15	Level 3
A0.24	22.16	17.10	5.70	5.70	23.12	7.96	81.74	Level 2
A0.28	20.60	18.62	6.21	6.21	20.14	7.30	79.07	Level 3
A0.30	17.78	17.57	5.86	5.86	18.92	7.01	72.99	Level 3

根据表5的评价结果,抗压强度、碳排放和固碳率为影响评价结果的最重要的三个因素,抗压强度越高、碳排放越低、固碳率越高,胶凝材料会取得更显著的综合性能优势。其中,M1.2组试件综合性能最好,即粉煤灰、赤泥、钢渣质量比为7:2:1,水固比为0.28,碱胶比为0.26,水玻璃模数为1.2,抗压强度和固碳率最高,碳排放量相对稍高,但能源消耗较低,综合评价等级为一级。F60~80组、M1.4组、A0.24组的综合性能较好,评价等级为二级。M1.7组、M1.9组、A0.22组、A0.28组和A0.30组试件的综合性能较差,评价等级为三级。在后续的研究中,提高矿化反应速度以实现更优的增强效应和固碳效益是核心问题,可以通过调整矿化养护压力、温度、时间等环境参数,改进制备工艺,同时进一步对配合比进行设计和优化,选用减碳潜力大的固废和活性激发剂等原材料,实现矿化养护胶凝材料的规模化应用。随着国家碳交易价格的提高,挖掘矿化养护胶凝材料的巨大潜能,可为实现“双碳”目标提供有力支撑。

5 结论

为分析不同因素对矿化养护碱激发固废胶凝材料性能的影响,选取力学性能、固碳效果和环境影响为指

标进行综合性能分析和评价,得出以下结论:

1) 碱激发固废胶凝材料的固碳率随 CaO 含量增大而增加,随水玻璃模数增大而降低,随碱胶比的增大先增加后降低,固碳率最高可达 7.21%。不同配合比的试件的固碳程度和碳化效率波动范围较小,分别在 29.37%~38.93%、24.92%~33.03%。

2) 固废胶凝材料的碳排放较传统水泥胶凝材料可减少 18.62%~38.35%。水玻璃在原材料生产阶段的碳排放、能源消耗占比最高,分别达 85.1% 和 49.3% 以上,对环境影响较大。CO₂ 矿化养护过程中的碳排放为负值,环境效益随各组试件的实际固碳率增加而提升。

3) 当粉煤灰、赤泥和钢渣质量比为 7:2:1,水固比、碱胶比和水玻璃模数分别为 0.28、0.26、1.2 时,CO₂ 矿化养护碱激发固废胶凝材料的综合性能最优。

4) CO₂ 矿化养护技术与固废资源化利用相结合具有显著的正向环境效益。为进一步推广矿化养护固废胶凝材料,需要对矿化反应机理进行深入研究,实现更优的增强效应和固碳效益。同时,在配合比设计中,选用减排、节能潜力大的固废和活性激发剂等原材料,实现固废胶凝材料的绿色生产和综合减排。

参 考 文 献

- [1] MATTER J M, STUTE M, SNÆBJÖRNSDOTTIR S Ó, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions[J]. *Science*, 2016, 352(6291): 1312-1314.
- [2] SCRIVENER K L, JOHN V M, GARTNER E M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 114: 2-26.
- [3] 赵珂萍, 李晓玉, 李瑞红, 等. 固废源 CaO 基 CO₂ 捕集材料的制备与捕集性能研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(2): 520-530.
ZHAO K P, LI X Y, LI R H, et al. Research progress on preparation and capture performance of CaO-based CO₂ capture materials from solid wastes[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(2): 520-530 (in Chinese).
- [4] MORANDEAU A, THIÉRY M, DANGLA P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties[J]. *Cement and Concrete Research*, 2014, 56: 153-170.
- [5] 马卓慧, 廖洪强, 程芳琴, 等. 粉煤灰提铝硅钙渣矿化固定 CO₂[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(4): 1224-1229 + 1236.
MA Z H, LIAO H Q, CHENG F Q, et al. CO₂ sequestration by mineralization of silica calcium slag generated in process of extracting alumina from fly ash[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(4): 1224-1229 + 1236 (in Chinese).
- [6] WEE J H. A review on carbon dioxide capture and storage technology using coal fly ash[J]. *Applied Energy*, 2013, 106: 143-151.
- [7] 任国宏, 廖洪强, 程芳琴, 等. 发泡混凝土碱浸试块碳酸化增强固碳特性研究[J]. *材料导报*, 2019, 33(增刊2): 300-303 + 308.
REN G H, LIAO H Q, CHENG F Q, et al. Study on carbonation enhanced carbon fixation characteristics of foamed concrete alkali immersed test block[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(supplement 2): 300-303 + 308 (in Chinese).
- [8] 石信超, 房晶瑞, 郑 晓, 等. 孔结构和含水量对水泥净浆矿化养护性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(8): 2692-2702.
SHI X C, FANG J R, ZHI X, et al. Effects of pore structure and water content on carbonation curing performance of cement paste[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(8): 2692-2702 (in Chinese).
- [9] PAN S Y, CHEN Y H, FAN L S, et al. CO₂ mineralization and utilization by alkaline solid wastes for potential carbon reduction[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(5): 399-405.
- [10] XI F M, DAVIS S J, CIAIS P, et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(12): 880-883.
- [11] 孙一夫, 李凤军, 何 文, 等. 二氧化碳矿化养护加气混凝土试验研究[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(2): 237-245.
SUN Y F, LI F J, HE W, et al. Investigation on CO₂ mineralization curing of aerated concretes[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(2): 237-245 (in Chinese).
- [12] WANG D C, NOGUCHI T, NOZAKI T. Increasing efficiency of carbon dioxide sequestration through high temperature carbonation of cement-based materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117980.
- [13] VARGAS F, LOPEZ M, RIGAMONTI L. Environmental impacts evaluation of treated copper tailings as supplementary cementitious materials[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 160: 104890.
- [14] 王佃超, 肖建庄, 夏 冰, 等. 再生骨料碳化改性及其减碳贡献分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(11): 1610-1619.
WANG D C, XIAO J Z, XIA B, et al. Carbonation modification of recycled aggregate and carbon dioxide sequestration analysis[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(11): 1610-1619 (in Chinese).
- [15] LI Z, HE Z, SHAO Y X. Early age carbonation heat and products of tricalcium silicate paste subject to carbon dioxide curing[J]. *Materials*, 2018, 11(5): 730.
- [16] STEINOUR H H. Some effects of carbon dioxide on mortars and concrete-discussion[J]. *ACI Journal*, 1959, 30(2): 905-907.
- [17] 章玉容, 徐雅琴, 姚泽阳, 等. 配合比设计方法对再生混凝土生命周期评价的影响[J]. *浙江工业大学学报*, 2020, 48(6): 648-653.

- ZHANG Y R, XU Y Q, YAO Z Y, et al. Effect of mix design methods on life cycle assessment of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2020, 48(6): 648-653 (in Chinese).
- [18] 梁永宸, 石膏爽, 张 聪, 等. 粉煤灰地聚物混凝土性能与环境影响的综合评价[J]. 材料导报, 2023, 37(2): 82-87.
LIANG Y C, SHI X S, ZHANG C, et al. Comprehensive evaluation of the performance and environmental impact of fly ash geopolymer concrete[J]. Materials Reports, 2023, 37(2): 82-87 (in Chinese).
- [19] 蒋旭光, 龙 凌, 赵晓利, 等. 固化材料在生活垃圾焚烧飞灰处置中的应用概况及前景[J]. 化工进展, 2019, 38(增刊1): 216-225.
JIANG X G, LONG L, ZHAO X L, et al. Application and prospect of solidified materials in fly ash disposal of domestic waste incineration[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(supplement 1): 216-225 (in Chinese).
- [20] FRUEHAN R, FORTINI O, PAXTON H, et al. Theoretical minimum energies to produce steel for selected conditions[R]. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA (US); Energetics, Inc., Columbia, MD (US), 2000.
- [21] 章玉容. 粉煤灰混凝土生命周期环境影响综合评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
ZHANG Y R. Comprehensive evaluation of life cycle environmental impact of fly ash concrete[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016 (in Chinese).
- [22] 汪振双, 宁 欣, 赵一健. 基于价值工程原理的混凝土物化阶段碳排放评价[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4308-4313.
WANG Z S, NING X, ZHAO Y J. Carbon emissions evaluation on building embodied stage based on value engineering[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(12): 4308-4313 (in Chinese).
- [23] 丁 超, 贾子杰, 王振华, 等. 基于生命周期评价的UHPC碳排放控制潜力评估[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(4): 1242-1251.
DING C, JIA Z J, WANG Z H, et al. UHPC carbon emission control potential based on life cycle assessment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(4): 1242-1251 (in Chinese).