

碱性工业废弃物碳酸化封存：机遇与挑战

许 兴, 蔡家铁*, 王若同, 李慧敏, 常钊源, 王雨彤

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2026年8月24日; 录用日期: 2026年9月27日; 发布日期: 2026年10月16日

摘 要

二氧化碳的过量排放已成为导致全球气候变暖的主要因素之一, 开发有效的二氧化碳封存技术是应对气候变化的当务之急。碱性工业废弃物碳酸化技术不仅在CO₂长期稳定封存方面展现出巨大潜力, 还可促进废弃物资源化利用, 是兼顾减排与环境管理的有效途径。本文全面考察了碱性工业废弃物的碳酸化机理, 分析了关键工艺参数对碳酸化效率的影响, 重点评估了钢渣、粉煤灰和废混凝土三类典型废弃物的碳封存潜力。研究表明, 不同废弃物因组成和结构差异, 其碳酸化潜力及适宜反应条件存在明显差异, 应根据原料特性进行针对性优化。碳酸化产物在绿色建材、高附加值碳酸盐及环境修复等领域具有良好的资源化利用前景。

关键词

二氧化碳, 碱性工业废弃物, 资源化利用

Carbonation Sequestration of Alkaline Industrial Waste: Opportunities and Challenges

Xing Xu, Jiatie Cai*, Ruotong Wang, Huimin Li, Zhaoyuan Chang, Yutong Wang

College of Petroleum Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: August 24, 2026; accepted: September 27, 2026; published: October 16, 2026

Abstract

Excessive carbon dioxide emissions have become one of the main factors contributing to global warming, making the development of effective carbon dioxide sequestration technologies an urgent priority in addressing climate change. Carbonation technology for alkaline industrial waste not only

*通讯作者。

文章引用: 许兴, 蔡家铁, 王若同, 李慧敏, 常钊源, 王雨彤. 碱性工业废弃物碳酸化封存: 机遇与挑战[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(10): 1610-1619. DOI: 10.12677/aep.2026.1610161

demonstrates great potential for long-term stable CO₂ sequestration but also promotes the resource utilization of waste, representing an effective approach that balances emission reduction and environmental management. This paper comprehensively examines the carbonation mechanism of alkaline industrial waste, analyzes the impact of key process parameters on carbonation efficiency, and focuses on evaluating the carbon sequestration potential of three typical wastes: steel slag, fly ash, and waste concrete. The study shows that different wastes exhibit significant differences in carbonation potential and suitable reaction conditions due to variations in composition and structure, requiring targeted optimization based on raw material characteristics. Carbonation products show promising prospects for resource utilization in green building materials, high-value-added carbonates, and environmental remediation.

Keywords

Carbon Dioxide, Alkaline Industrial Waste, Resource Utilization

Copyright © 2026 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

近年来,全球气候变化带来的极端天气事件频发,其负面影响已深度渗透至全球经济与社会发展的各个层面。其中,工业部门是全球资源消耗和环境污染的主要来源之一,而制造业作为工业核心领域,其环境管理成效直接关系到全球可持续发展目标的实现。自2018年以来,学术界的研究焦点大规模转向利用工业生产过程中产生的碱性固体废弃物作为CO₂反应原料。这些废弃物包括冶炼钢铁产生的钢渣、火力发电产生的粉煤灰以及建筑拆除过程中产生的废弃混凝土,尽管产量巨大、处置困难,但天然富含CaO和MgO等活性成分,是理想的CO₂捕获剂。

不同于将CO₂封存于地质构造中可能存在的泄漏风险,碱性工业废弃物碳酸化技术将气态CO₂转化为热力学上极其稳定的固态碳酸盐,实现了真正意义上的“永久封存”。该技术通过模拟自然界的矿物风化过程,通过工艺优化大幅加速反应速率,可在几小时至几天内完成传统地质尺度需数千年的碳封存过程,兼具减排与固废治理的双重效益。

本文围绕碱性工业废弃物碳酸化封存CO₂的反应机理、工艺调控及资源化利用展开综述。首先,从直接碳酸化和间接碳酸化两类技术路径出发,分析CO₂溶解、活性Ca/Mg组分释放及碳酸盐沉淀等关键过程。在此基础上,选取钢渣、粉煤灰和废弃混凝土三类具有代表性的碱性工业废弃物,重点比较其原料组成、矿物结构以及粒径、温度和CO₂分压等工艺参数对碳酸化性能的影响,并分析不同研究中最优工艺条件存在差异的原因。进一步结合碳酸化产物的资源化利用,讨论该技术在能源消耗、经济成本、生命周期净减排及规模化应用方面的主要制约因素。最后,在综合现有研究的基础上,提出碱性工业废弃物碳酸化应由单纯追求固碳效率向“固碳效率-能源消耗-环境安全-产品价值”协同优化方向发展。

2. 碳酸化原理

碳酸化过程划分为吸收、转化及稳定3个阶段。首先,二氧化碳和工业废弃物接触后迅速溶于液相形成活性碳酸根离子。其次,碳酸根离子在特定条件下进行化学反应形成碳酸盐沉淀。最后,稳定阶段确保碳酸盐产物能够实现长期固碳且对环境无害,这些碳酸盐经进一步加工后应用于建筑材料、水处理等环境友好型场景中,实现废弃物资源化利用的同时有效减少了二氧化碳的排放。根据反应历程不同,

CO₂ 碳酸化可分为两类，即直接碳酸化和间接碳酸化。如图 1 所示。

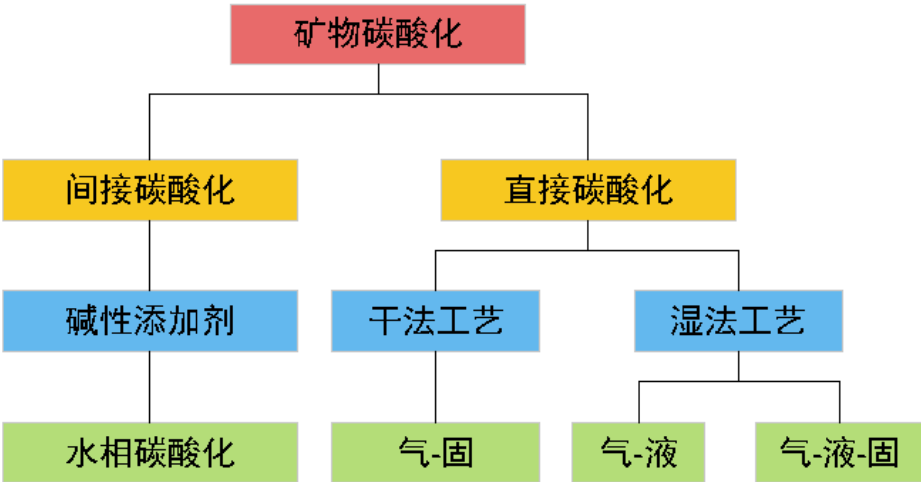


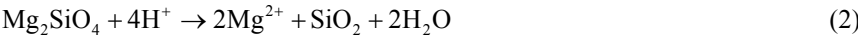
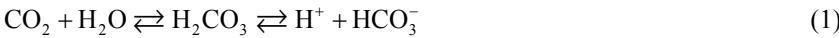
Figure 1. Classification of CO₂ carbonation
图 1. CO₂ 碳酸化分类图

2.1. 直接碳酸化

直接碳酸化通过气 - 固路线(干法)或水溶液路线(湿法)直接与 CO₂ 反应，将工业废料转化为有价值的碳酸盐产品。

直接气 - 固碳酸化也称为直接干碳化，该方法在特定的压力和温度条件下，废弃物中的 Ca 或 Mg 等颗粒状金属氧化物离子与气态 CO₂ 直接发生反应，使硅酸盐或氧化物转化为稳定的碳酸盐产物。废弃物的提取和溶解都在单个反应器中发生，整体操作简便，无需额外添加水溶液介质或复杂分离步骤，反应速率主要取决于原料中 Ca 或 Mg 的含量以及其化合物的组成。该过程会产生高温蒸汽用于发电并稳定封存 CO₂。目前，该路线研究主要集中在使用工业碱性废弃物作为原料，利用 CaO 或 MgO 在循环碳酸化中捕获 CO₂。

相较于干法碳酸化，直接水相碳酸化被认为是最有效的废弃物封存方法，在直接水相碳酸化过程中，CO₂ 首先溶解在水和废弃物(如镁橄榄石(Mg₂SiO₄))的浆液中形成碳酸，碳酸与废弃物反应消耗了大部分 H⁺，并释放出等量的 Mg²⁺和 HCO₃⁻，最终形成固体碳酸盐产物 MgCO₃。理论反应方程式如式(1)~(3)。通过大量文献调研发现，在现有技术条件下，钢渣、粉煤灰等碱性废弃物更适合采用直接水相碳酸化工艺。



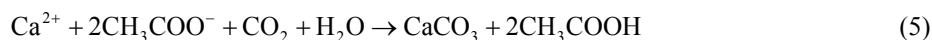
2.2. 间接碳酸化

间接碳酸化是一种精细化的多阶段二氧化碳封存技术，其核心是将复杂的反应分解为两个或多个更易于控制的独立阶段。通常，我们分为浸出和碳酸化两个主要阶段，通过分离步骤，为浸出和碳酸化分别设置最优化的反应条件，从而克服直接碳酸化的动力学瓶颈。

对于间接碳酸化而言，提取活性金属离子是核心步骤，当前研究的重点是如何最大限度地提取具有反应活性的金属阳离子，主要是 Ca²⁺与 Mg²⁺的选择性浸出，这一过程通常使用化学萃取剂来实现。一方

面,反应介质需促进 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 的浸出,另一方面,碳酸化反应过程中介质需易于回收和循环使用。

在众多萃取剂中,氯化铵和乙酸在间接碳酸化工艺中具有天然的优势。Kim 等[1]分别采用乙酸(浓度 0.7M)和氯化铵(浓度 0.3M)为萃取剂,在最佳提取条件下与纸污泥灰(PSA)进行碳酸化反应,结果表明,乙酸作为萃取剂经预处理后,碳化效率为 61.7%,固碳量达 $324\text{kg CO}_2/(\text{ton PSA})$;而氯化钠作为萃取剂经碱处理后,固碳量从 $135.3\text{kg CO}_2/(\text{ton PSA})$ 提升至 $168.4\text{kg CO}_2/(\text{ton PSA})$,该实验使用弱酸代替强酸,实现介质回收循环使用。由此可见,在间接碳酸化工艺中采用乙酸作为萃取剂具有广阔的工业前景,尤其在选择性浸出和可循环性方面,其主要的两步反应过程如式(4)、(5)。



上述反应过程表明,碱性工业废弃物的碳酸化本质上受到活性 Ca/Mg 组分释放、 CO_2 传质以及碳酸盐沉淀三个过程的共同控制。因此,不同废弃物即使处于相同温度和 CO_2 压力条件下,也可能表现出显著不同的碳酸化速率和固碳容量。一方面,Ca、Mg 并非均以相同反应活性的物相存在,游离 CaO 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 通常具有较高反应活性,而存在于硅酸盐或玻璃相中的 Ca、Mg 释放速率相对较慢;另一方面,粒径、孔隙结构以及碳酸盐产物层的形成会进一步影响 CO_2 和离子的传质过程。因此,温度、压力和粒径等工艺参数的最优值并不具有普遍适用性,而应结合废弃物的矿物组成和结构特征进行判断。基于这一认识,以下分别以钢渣、粉煤灰和废弃混凝土为例,对不同原料体系下碳酸化条件及其影响规律进行比较分析。

3. 碱性工业废弃物固碳

碱性工业废弃物全球年产量超 100 亿吨,主要来源于钢铁、水泥、化工、电力等重工业生产过程,因富含钙、镁等碱性金属氧化物,具备天然的 CO_2 吸附与固定潜力[2]。利用这类废弃物进行固碳,可在实现工业固废资源化利用的同时减少大气 CO_2 的排放,是“双碳”目标下兼具环保与经济价值的创新路径。

3.1. 钢渣

在工业碳排放体系中,钢铁工业是全球主要的碳排放源之一,占全球工业能源使用的 22%、二氧化碳碳排放总量的 6%~7%,其冶炼过程产生巨量的副产品——钢渣。平均每生产 1 吨粗钢,会产生 0.15~0.2 吨的钢渣。据不完全统计,全球钢渣年产量约 1 亿吨,且预计该产量将保持高位水平或持续增长[3]。

钢渣的化学成分复杂,因炼钢工艺、原料及冷却方式的不同而存在较大差异。如表 1 所示,其主要化学成分为 CaO, SiO_2 , MgO, Al_2O_3 and Fe_2O_3 。其中,CaO 是钢渣中主要的活性组分,主要以游离氧化钙(f-CaO)、硅酸盐和铁酸盐等化合态形式存在,由于游离氧化钙具有较高的反应活性,其含量直接决定了钢渣理论上 CO_2 封存的上限。

Table 1. Chemical composition of steel slag [4] [5]

表 1. 钢渣化学成分组成[4] [5]

组分	CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3
含量(质量分数, %)	30~60	10~20	5~10	1~3	20~30

钢渣的物理属性对碳酸化反应速率具有重要影响,其中粒径直接影响反应比表面积和传质过程。Mo

等[6]研究发现, 平均粒径为 12.8 μm 和 22.4 μm 的钢渣, 其初期碳化程度上升速度明显快于 118.8 μm 的样品; Liu 等[7]进一步发现, 粒径为 21.75~24.13 μm 的钢渣具有更高的碳化速率和 CO_2 吸收率。上述结果表明, 适度减小钢渣粒径能够增加反应比表面积, 并缩短 Ca^{2+} 释放和 CO_2 扩散路径, 从而促进初期碳酸化。然而, 粒径效应并非简单表现为“越小越好”。颗粒进一步细化会增加破碎和研磨能耗, 同时快速形成的 CaCO_3 产物层可能阻碍后续 Ca^{2+} 释放和 CO_2 传质。因此, 从工程应用角度看, 钢渣粒径优化应在碳酸化效率提升与机械粉磨能耗之间取得平衡。不同研究所得适宜粒径存在差异, 也与钢渣来源、游离 CaO 含量、矿物组成及预处理方式不同有关。

在实际反应过程中, 碳酸化效率的调控受原料自身物理化学性质与外部反应条件的共同制约, CO_2 浓度作为影响钢渣碳酸化进程的关键外部参数, 其具体作用规律尚未得到明确阐释。为此, Lee 等[8]以钢渣为研究对象开展了碳酸化针对性实验, 实验采用气相从反应器底部进入、顶部排出, 液相从顶部进入、底部排出的气液逆向接触设计, 探究 CO_2 浓度对钢渣碳酸化效率的具体影响。研究表明, 当流入气体的 CO_2 浓度为 10.0%时, 经过反应后流出气体 CO_2 浓度降至 1.1%, 平均 CO_2 封存效率高达 89.7%。通过 X 射线荧光分析、干燥失重和灼烧失重的表征结果发现, 钢渣中原始 CaO 含量为 44.6%, 碳酸化产物中 CaO 含量降至 31%, 且碳化反应使产物的干燥失重和灼烧失重显著增加, 这表明碳酸化反应可有效将钢渣中的 CaO 转化为碳酸钙, 为后续产物的稳定利用提供了保障。需要指出的是, 该研究得到的高 CO_2 去除效率与其气液逆流接触反应器设计密切相关, 不能简单等同于所有钢渣体系在 10% CO_2 浓度下均能够达到相同固碳效果。 CO_2 浓度提高通常能够增加气液传质推动力, 但实际效果还受到气液比、浆液循环方式、停留时间以及钢渣活性 Ca 含量的共同影响。因此, 与单纯提高 CO_2 浓度相比, 通过反应器结构强化传质可能更有利于在较低能耗条件下提高工业烟气矿化效率。

3.2. 粉煤灰

粉煤灰是燃煤发电厂锅炉烟气经过除尘装置收集到的主要固体废弃物[9], 其显著特点是与电厂排放的 CO_2 同步产生。据不完全统计, 全球每年的粉煤灰产量约 6 亿~8 亿吨, 但平均利用率仅 25%左右, 每年仍有数亿吨的粉煤灰被送往灰场堆存, 造成了巨大的资源浪费, 这为 CO_2 碳酸化提供了充足的原料基础[10]。从原料特性来看, 粉煤灰呈细小球形颗粒状, 多数为微米至亚微米级, 无需预处理研磨即可直接用于碳酸化。这一优势能有效避免反应产物在颗粒表面形成致密层, 从而减少对后续反应的传质阻碍。如表 2 所示, 其化学成分主要以 CaO 、 SiO_2 、 SO_3 、 Al_2O_3 为主, 还含有少量未燃尽的碳粉煤灰, 整体具备材料成本低、反应活性高、易获取等优点。

Table 2. Chemical composition of fly ash [11]

表 2. 粉煤灰的化学成分组成[11]

组分	CaO	SiO ₂	SO ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
含量(质量分数, %)	30.47	20.64	21.29	12.65	7.1	5.0	1.04	1.03	0.78

研究表明, 不同来源粉煤灰的碳酸化潜力差异显著, 钙含量是其核心影响因素。一项针对欧洲多种粉煤灰的研究对比发现, 钙含量最高的 La Pereda 粉煤灰在蒸汽辅助间歇实验条件下碳酸化效率高达 46.7% [12], 这表明粉煤灰的矿物学特征决定了其碳酸化效率的理论上限。因此, 为实现最高碳酸化效率, 应优先选用高钙粉煤灰, 尤其是高游离氧化钙(f- CaO)粉煤灰。

温度是影响粉煤灰碳酸化的重要参数, 但不同研究报道的最优温度存在明显差异, 其根本原因在于粉煤灰组成以及碳酸化反应体系不同。在水相或具有一定含水率的体系中, 中低温通常更有利于兼顾 CO_2

溶解、 Ca^{2+} 迁移和碳酸盐沉淀。例如,王中辉[13]发现 40℃ 条件下粉煤灰碳酸化效率最高可达 64.8%;李家碧等[14]通过矿物相分析进一步表明,中低温条件能够促进粉煤灰活性组分参与矿化反应。因此,对于液相参与明显的粉煤灰碳酸化体系,40℃~80℃ 通常表现出较好的适用性。

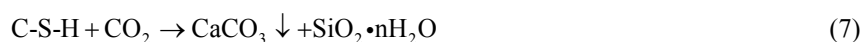
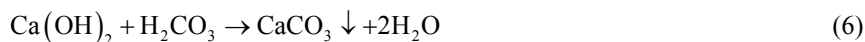
然而,在干法气-固碳酸化条件下,温度的作用机制有所不同。Ćwik 等[15]在干燥条件下研究高钙粉煤灰时发现,提高反应温度可明显促进碳酸化,并在 160℃、6 bar 条件下获得 48.14% 的碳酸化效率。这一结果与水相体系报道的较低最优温度并不矛盾:水相碳酸化同时受 CO_2 溶解、离子浸出及沉淀过程控制,而干法体系更依赖固相反应动力学和 CO_2 在颗粒内部的扩散。因此,粉煤灰不存在脱离反应方式和含水状态而独立存在的统一最佳温度。在实际工艺设计中,应将温度与粉煤灰 CaO 赋存形态、含水率、 CO_2 压力以及反应器类型进行协同优化。

此外,超临界 CO_2 (sc- CO_2 , 压力 > 7.38 MPa) 条件是近年来的研究热点,在超临界状态下, CO_2 兼具液体的高溶解性和气体的高渗透性,能极大地强化传质过程。杨刚[16]针对这一方向提出采用超临界 CO_2 耦合机械力的新型强化方法,用于提升粉煤灰碳酸化效率,研究员对比了超临界态与低压态下的粉煤灰碳酸化实验,结果显示,超临界态下的最佳固碳量为 54.9g CO_2 /kg 粉煤灰,碳化效率为 24.20%; 低压状态下最佳固碳量为 42.3g CO_2 /kg 粉煤灰,碳化效率为 18.65%。与其他仅关注常规条件下 CO_2 封存效率的研究不同,该研究还同步探索了超临界工况下重金属固化特性,为进一步提高粉煤灰碳酸化封存 CO_2 效率提供了新思路。尽管超临界 CO_2 能够强化传质并提高粉煤灰固碳能力,但其运行压力高于 7.38 MPa,对反应器耐压性能、 CO_2 压缩过程和运行安全提出了更高要求,相应能耗与设备投资也明显高于常压或低压工艺。因此,该技术能否实现工程化应用不能仅依据实验室条件下固碳量的提升幅度判断,还需要结合单位 CO_2 压缩能耗、设备成本以及重金属稳定化等协同收益进行综合评价。

3.3. 混凝土

水泥工业是全球主要的二氧化碳排放源之一,根据国际能源署(IEA)数据,水泥行业贡献了全球约 8% 的 CO_2 排放量[17],其中大部分来自生产过程中石灰石分解和燃料燃烧。与此同时,建筑行业的拆除和改造产生的废弃混凝土规模已达数十亿吨,约占建筑行业总废弃物的 30%~40%。在此背景下,利用废弃混凝土碳酸化封存 CO_2 是一种极具前景的“负碳”技术路径,它将水泥生产过程中产生的 CO_2 或从其他工业源捕集的 CO_2 ,重新注入到废弃混凝土中,通过化学反应将其永久固定,最终实现从“碳源”到“碳汇”的转化。

从废弃混凝土的组成来看,其材料构成复杂多样,主要包含水泥浆体(30%~40%)、细骨料(25%~35%)、粗骨料(35%~45%)以及泥土、钢筋等不可避免的杂质[18]。而固碳技术主要发生在硬化的水泥浆体中,在固碳过程中,水泥浆体中的碱性物质 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H 凝胶以及部分未水化的水泥熟料颗粒与 CO_2 发生化学反应,将气态的 CO_2 转化为固态的碳酸盐,实现长期稳定的封存。主要化学反应过程如式(6)、(7)。



废弃混凝土中碱性物质组分含量直接决定了理论上 CO_2 的最大封存量,而粒径、比表面积、孔隙率和渗透性等物理结构也同样至关重要。从粒径与比表面积的关系来看,废弃混凝土粒径越小,比表面积越大, CO_2 与活性组分的接触面积就越大,反应速率也越快。例如,Kaptan 等[19]对比了 50 μm 与 80 μm 的废弃混凝土颗粒对碳化程度的影响,结果发现粒径较小的 50 μm 颗粒表现出较高的碳化程度。然而,这种粒径减小促进碳化的效应并非无限度的。通过大量文献调研发现,当粒径减小到微米级后,继续减小粒径对碳化速率的提升效果会明显减弱[20]。这可能是因为当颗粒过细时,容易发生团聚现象,反而包

裹住部分反应界面,阻碍 CO_2 的有效扩散。此外,极细的粉末在后续处理和应用上也可能面临新的挑战。

进一步来看,研究明确指出碳酸化是一个表面主导、速率依赖的过程,总的可封存 CO_2 量与暴露的总表面积直接相关[21]。通过破碎、研磨等方法能显著提高废弃混凝土单位时间内 CO_2 吸收量和最终的碳化程度[22]。当废弃混凝土被拆除并加工成再生混凝土骨料 RCA 时,其表面积会大幅增加,且 CO_2 吸收量与暴露的表面积呈指数关系。因此,在废弃混凝土碳酸化反应速率的相关研究中,为精准评估其碳封存效能,我们通常把比表面积纳入关键影响因素体系进行定量分析。

温度对废弃混凝土碳酸化的影响表现出明显的体系依赖性,目前报道的适宜温度主要集中在 $60\sim 100^\circ\text{C}$ 。Li 等[23]研究发现,随着温度升高, CO_2 吸收速率提高,并在约 60°C 时达到较高水平。对于具有一定液态水参与的体系而言,适度升温能够同时促进 Ca^{2+} 迁移和碳酸化反应,但温度继续升高可能导致颗粒表面水膜快速蒸发,使 CO_2 溶解和离子输运受到限制。此外,碳酸盐快速沉淀形成的致密产物层也可能增加后续扩散阻力。

部分研究则发现接近 100°C 时仍可获得较高碳酸化效率,这通常与原料含水状态、反应器湿度以及气相传质条件不同有关[24]。在具有蒸汽或高湿环境的体系中,较高温度能够提高气体扩散和反应动力学,同时仍维持碳酸化所需的界面水[25]。因此, 60°C 和 100°C 并非相互冲突的两个普遍最优值,而代表不同反应条件下传质与化学反应控制机制的差异。由此可见,废弃混凝土的温度优化应与含水率、颗粒尺寸、孔隙结构及 CO_2 分压进行协同考虑。

此外,当前最新文献研究提出新型混凝土固碳技术,其核心是在混凝土的搅拌或养护阶段,通过技术手段将水泥生产过程中产生的 CO_2 注入其中,利用水泥基材料的碱性环境,从源头上实现 CO_2 的碳酸化封存[26],该技术不仅有望减少混凝土的碳足迹,还可能带来改善材料性能的协同效益。是一种极具潜力的“源头封存”负碳技术。

4. 资源化利用与工业化评价

4.1. 碳酸化产物资源化利用

碱性工业废弃物碳酸化的环境效益不仅体现在 CO_2 的稳定矿化封存,还体现在碳酸化产物的资源化利用[27]。碳酸化过程可降低部分废弃物的碱度和体积不稳定性,并通过形成 CaCO_3 等稳定矿物改善材料性能,从而为其替代天然矿物原料及传统建筑材料创造条件。目前,碳酸化产物的资源化利用主要集中于绿色建筑材料、高附加值碳酸盐制备以及环境修复等方向。

在现有资源化路径中,绿色建筑材料是研究较为充分且与大宗工业废弃物消纳需求匹配度较高的应用方向。例如,碳化后的产物可用于道路工程材料、免烧砖与墙体材料、高性能混凝土骨料与掺合料等多种工程应用场景[28]。Zhang 等[29]提出利用碳酸化钢渣的力学性能稳定,将碳化钢渣用作道路基层、垫层或沥青混合料的填料,替代天然砂石资源,从而实现大规模消纳。Pan 等[30]提出“碳化养护”技术路径,利用碳酸化过程中的固化作用,将钢渣压制成型,直接生产免烧砖、砌块等建材产品,该技术不仅能消耗 CO_2 ,还规避了传统砖块烧制过程中的巨大能耗和碳排放。此外,吴跃东等[31]研究发现,原始钢渣因其游离氧化钙 $f\text{-CaO}$ 含量较高,易导致体积安定性差,极大限制了其在混凝土中的应用,而经过碳酸化处理后的钢渣可转化为优质的混凝土骨料或水泥替代品,且用其制备的混凝土抗压强度和耐久性均得到显著提升。

除大宗建材利用外,提高碳酸化产物附加值也是改善该技术经济性的另一重要途径。通过间接碳酸化路径可从碱性废弃物中选择性提取 Ca^{2+} ,并进一步制备高纯度轻质或纳米 CaCO_3 [32]。这类产品可用于造纸、塑料、橡胶和涂料等领域,其产品价值通常高于普通建材,有利于提高碳酸化过程的资源化收益。此外,碳酸化过程还可降低部分碱性废弃物的碱度,并改变其中部分金属元素的赋存状态,使其在

酸性废水处理、污染物吸附及其他环境修复领域具有潜在应用价值[33]。

上述资源化路径已逐步由实验室研究向工程示范过渡。例如，加拿大 Carbicrete 利用钢渣作为主要胶凝材料并结合 CO₂ 养护制备低碳混凝土制品；Mineral Carbonation International (MCI) 通过中试装置将工业碱性废弃物碳酸化产物进一步转化为建筑材料原料；Carbon8 Systems 开发的加速碳酸化技术则将碱性工业废弃物与 CO₂ 反应后制备人造骨料，并用于建筑材料生产。这些实践表明，将 CO₂ 矿化封存与碳酸化产物资源化利用相结合，是提高工业固废消纳能力和碳酸化技术经济价值的重要途径。然而，工程示范并不意味着全过程必然实现净减排，其实际环境效益还受到原料预处理、CO₂ 捕集与运输、反应能耗以及产品替代效益等因素影响，因此还需从技术经济性和生命周期角度进行综合评价。

4.2. 技术经济性与生命周期评价

从技术经济角度看，碱性工业废弃物本身多属于低值固体废物，因此原料成本通常不是制约碳酸化工艺工程化的主要因素，真正影响经济性的环节主要包括原料破碎研磨、CO₂ 捕集与压缩、反应升温加压以及浸出剂的使用和再生等。直接碳酸化流程相对简单、化学药剂消耗较少，更适合钢渣、粉煤灰和废弃混凝土等大宗固废的大规模处理；间接碳酸化虽然能够提高 Ca/Mg 提取率并获得纯度较高的碳酸盐产品，但额外的浸出、分离和介质再生环节会增加能耗及运行成本。因此，直接碳酸化更适合以低成本、大规模矿化和建材利用为目标，而间接碳酸化的经济可行性则更依赖高附加值碳酸盐产品所带来的收益。

从生命周期评价(LCA)角度看，实验条件下获得的 CO₂ 固定量并不能直接代表碳酸化技术的实际减排量。原料粉磨、CO₂ 捕集与压缩、运输、反应升温加压以及产物后处理过程均可能产生额外能源消耗和间接碳排放，只有当矿化固定量及碳酸化产品替代传统材料所避免的排放高于全过程新增排放时，才能形成实际的生命周期净减排。因此，将碳酸化设施布置在钢铁厂、电厂或水泥厂等 CO₂ 和碱性固废集中产生区域，并利用工业烟气和低品位余热，可减少 CO₂ 运输、压缩及固废转运所带来的额外环境负荷。同时，若碳酸化产物能够替代天然骨料、水泥熟料或商业 CaCO₃，其资源替代效益也应纳入生命周期评价系统边界。由此可见，未来碱性工业废弃物碳酸化技术的评价应由单纯追求最大固碳量，逐步转向生命周期净 CO₂ 削减量、单位净固碳成本和产品附加值的综合评价。

5. 结论

本文系统分析了钢渣、粉煤灰和废弃混凝土三类典型碱性工业废弃物的 CO₂ 碳酸化机理、关键影响因素及资源化利用路径，主要结论如下：

(1) 钢渣中游离 CaO 及活性钙硅酸盐含量较高，具有较大的矿化潜力，但其矿物组成复杂，适度破碎研磨有利于活性组分释放；粉煤灰颗粒较细，可减少机械粉磨需求，但其固碳潜力高度依赖 CaO 含量及赋存形态；废弃混凝土的活性组分主要来源于附着水泥浆体，其碳酸化同时受到浆体含量、孔隙结构和含水状态控制。因此，原料矿物组成和结构特征应作为工艺参数选择的重要依据。

(2) 温度、CO₂ 压力、粒径及含水率等参数之间存在明显耦合作用。不同研究报道的最优工艺条件存在差异，主要与原料性质、反应介质和反应器类型不同有关。水相体系需要兼顾 CO₂ 溶解、Ca/Mg 浸出和碳酸盐沉淀，而干法及超临界体系更依赖气固传质和反应动力学，因此单因素最优条件难以直接用于工业放大。

(3) 碳酸化技术的环境和经济效益不能仅以实验固碳量衡量。原料粉磨、CO₂ 捕集压缩、升温加压和产物处理均可能产生额外能源消耗，因此应通过生命周期评价和技术经济性分析综合评价其净减排效益。将碳酸化装置与钢铁、电力和水泥等工业源协同布局，并发展绿色建材和高附加值碳酸盐产品，是提高该技术规模化应用可行性的重要路径。

在此基础上,未来研究可重点从以下四个方向展开:(1) 开发低温、低压及低机械能耗的强化碳酸化技术,降低单位 CO₂ 矿化能耗;(2) 揭示碳酸化过程中 Cr、V、Pb 等潜在有害元素的迁移与长期稳定化机制,建立固碳产物环境安全评价体系;(3) 发展钢渣、粉煤灰和废弃混凝土近源或原位碳酸化工艺,并推动其与再生骨料、低碳水泥及建筑拆除废弃物循环利用相结合;(4) 建立覆盖 CO₂ 捕集、运输、矿化及产物利用全过程的 LCA-技术经济耦合评价方法,将生命周期净减排量和单位净固碳成本作为工业化路线筛选的重要指标。

致 谢

感谢辽宁省教育厅给予的支持和帮助。

基金项目

本研究得到辽宁省教育厅科研项目(LJ212510148035)资助。

参考文献

- [1] Kim, M.J. and Kim, D. (2018) Maximization of CO₂ Storage for Various Solvent Types in Indirect Carbonation Using Paper Sludge Ash. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 30101-30109. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2970-6>
- [2] Yang, Z.-B., Ju, X.-T., Hu, X.-Y., Chen, Y.-L., Liu, Y.-L., Cheng, J., Li, Z.-X., Li, J.-F., Zhang, J. and Huang, J. (2026) Preparation of Carbon Dioxide-Adsorbing Materials from Fly Ash-Modified Steel Slag and Their Performance Optimization. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **45**, e70387. <https://doi.org/10.1002/ep.70387>
- [3] Xue, G., Qiu, Y., Liu, J., Zhao, J. and Han, H. (2025) Multidimensional Control Strategy: A Review of Treatment Methods for Volume Stability of Steel Slag. *Chinese Journal of Engineering*, **47**, 2414-2433.
- [4] Lee, Y.H., Eom, H., Lee, S.M. and Kim, S.S. (2021) Effects of pH and Metal Composition on Selective Extraction of Calcium from Steel Slag for Ca(OH)₂ Production. *RSC Advances*, **11**, 8306-8313. <https://doi.org/10.1039/d0ra08497b>
- [5] Tiwari, M.K., Bajpai, S. and Dewangan, U.K. (2016) Steel Slag Utilization—Overview in Indian Perspective. *International Journal of Advanced Research*, **4**, 2232-2246. <https://doi.org/10.21474/ijar01/1442>
- [6] Mo, L., Zhang, F., Deng, M., Jin, F., Al-Tabbaa, A. and Wang, A. (2017) Accelerated Carbonation and Performance of Concrete Made with Steel Slag as Binding Materials and Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, **83**, 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.018>
- [7] Liu, G., Schollbach, K., van der Laan, S., Tang, P., Florea, M.V.A. and Brouwers, H.J.H. (2020) Recycling and Utilization of High Volume Converter Steel Slag into CO₂ Activated Mortars—The Role of Slag Particle Size. *Resources, Conservation and Recycling*, **160**, Article 104883. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104883>
- [8] Lee, H., Kim, T.W., Kim, S.H., Lin, Y.W., Li, C.T., Choi, Y. and Choi, C. (2023) Carbon Dioxide Capture and Product Characteristics Using Steel Slag in a Mineral Carbonation Plant. *Processes*, **11**, Article 1676. <https://doi.org/10.3390/pr11061676>
- [9] Karalis, K., Kollias, K., Bartzas, G., Mystrioti, C. and Xenidis, A. (2022) CO₂ Sequestration Using Fly Ash from Lignite Power Plants. *Materials Proceedings*, **5**, Article 131.
- [10] Song, H., Fan, H., Gao, H.T., Liu, J.A. and Mou, H. (2020) Improving Fly Ash Brightness with Carbon and Iron Oxide Removal. *Recycling*, **5**, Article 5. <https://doi.org/10.3390/recycling5010005>
- [11] Wang, C., Jiang, H., Miao, E., Wang, Y., Zhang, T., Xiao, Y., et al. (2024) Accelerated CO₂ Mineralization Technology Using Fly Ash as Raw Material: Recent Research Advances. *Chemical Engineering Journal*, **488**, Article 150676. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150676>
- [12] Ćwik, A., Casanova, I., Rausis, K. and Zarębska, K. (2019) Utilization of High-Calcium Fly Ashes through Mineral Carbonation: The Cases for Greece, Poland and Spain. *Journal of CO₂ Utilization*, **32**, 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.03.020>
- [13] 王中辉. 粉煤灰耦合混合胺溶液吸收-矿化 CO₂ 实验与反应机理研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [14] 李家碧, 纪龙, 于海, 等. 粉煤灰对烟气中 CO₂ 的吸收特性及矿物相演变机理研究[J]. 环境科学学报, 2023, 43(2): 414-423.

- [15] Ćwik, A., Casanova, I., Rausis, K., Koukoulzas, N. and Zarębska, K. (2018) Carbonation of High-Calcium Fly Ashes and Its Potential for Carbon Dioxide Removal in Coal Fired Power Plants. *Journal of Cleaner Production*, **202**, 1026-1034. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.234>
- [16] 杨刚. 粉煤灰矿化封存 CO₂ 协同重金属固化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [17] Liu, J., Yu, C., Shu, X., Ran, Q. and Yang, Y. (2019) Recent Advance of Chemical Admixtures in Concrete. *Cement and Concrete Research*, **124**, Article 105834. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105834>
- [18] Ghacham, A.B., Pasquier, L.C., Cecchi, E., Blais, J.F. and Mercier, G. (2017) Valorization of Waste Concrete through CO₂ Mineral Carbonation: Optimizing Parameters and Improving Reactivity Using Concrete Separation. *Journal of Cleaner Production*, **166**, 869-878. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.015>
- [19] Kaptan, K., Cunha, S. and Aguiar, J. (2024) A Review of the Utilization of Recycled Powder from Concrete Waste as a Cement Partial Replacement in Cement-Based Materials: Fundamental Properties and Activation Methods. *Applied Sciences*, **14**, Article 9775. <https://doi.org/10.3390/app14219775>
- [20] Walker, I., Bell, R. and Rippy, K. (2024) Mineralization of Alkaline Waste for CCUS. *npj Materials Sustainability*, **2**, Article No. 28. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00031-x>
- [21] Souto-Martinez, A., Delesky, E.A., Foster, K.E. and Srubar III, W.V. (2017) A Mathematical Model for Predicting the Carbon Sequestration Potential of Ordinary Portland Cement (OPC) Concrete. *Construction and Building Materials*, **147**, 417-427. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.133>
- [22] Zhang, Y., Luo, W., Wang, J., Wang, Y., Xu, Y. and Xiao, J. (2019) A Review of Life Cycle Assessment of Recycled Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, **209**, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078>
- [23] Li, L. and Wu, M. (2022) An Overview of Utilizing CO₂ for Accelerated Carbonation Treatment in the Concrete Industry. *Journal of CO₂ Utilization*, **60**, Article 102000. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102000>
- [24] Ghosh, D. (2021) Accelerated Carbonation of Recycled Concrete Aggregates for the Production of CO₂-Negative Construction Materials. Doctoral Dissertation, Ghent University.
- [25] Gholizadeh-Vayghan, A., Bellinkx, A., Snellings, R., Vandoren, B. and Quaghebeur, M. (2020) The Effects of Carbonation Conditions on the Physical and Microstructural Properties of Recycled Concrete Coarse Aggregates. *Construction and Building Materials*, **257**, Article 119486. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119486>
- [26] Ta, X., Zhang, Y., Wan, Z. and Li, J. (2025) Study on Preparation Method and Carbon Fixation Performance of Supercritical CO₂-Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, **491**, Article 142759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142759>
- [27] Wu, S.B., Ma, M.J., Wang, J.Y., Niu, L., Zhang, W.F., Xu, X.W. and Xi, F.M. (2023) Research Progress on Biomass Ash Carbon Capture and Storage. *The Journal of Applied Ecology*, **34**, 3420-3426.
- [28] Guo, Z. and Viacheslav, D. (2025) Study on the Energy Efficiency of Straw Fly Ash Concrete Walls in Rural Residential Buildings. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **44**, e14579. <https://doi.org/10.1002/ep.14579>
- [29] Zhang, H.R., Wang, G.Y., Feng, J., Lan, T.Z., et al. (2023) Experimental Study on Characteristics and Stability of Different Aged Steel Slag Aggregate. *Journal of China & Foreign Highway*, **43**, 203-206.
- [30] Pan, S.Y., Chang, E.E. and Chiang, P.C. (2012) CO₂ Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications. *Aerosol and Air Quality Research*, **12**, 770-791. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.06.0149>
- [31] 吴跃东, 阎文, 岳昌盛, 吴龙, 彭彝. 钢渣碳化及微生物矿化提升技术的理论研究与探索[J]. 环境工程, 2024, 42(3): 171-175.
- [32] 李晓宇. 钢渣间接固碳过程碳酸钙结晶行为及产品应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2025.
- [33] Gomes, H.I., Rogerson, M., Courtney, R. and Mayes, W.M. (2019) Integrating Remediation and Resource Recovery of Industrial Alkaline Wastes: Case Studies of Steel and Alumina Industry Residues. In: *Green Chemistry Series*, Royal Society of Chemistry, 168-191. <https://doi.org/10.1039/9781788016353-00168>