重大科研成果转化本科生实验项目教学案例

CO_2矿化封存

能源与矿业工程学院

王晶钰 副教授

一、基本信息介绍

（一）科研团队或成果基本信息

本项目以“双碳”目标下“二氧化碳封存”为背景，依托“矿山功能性充填技术研究中心”的多项重大科研项目及成果，其中代表性项目如下：

1.国家自然科学基金青年项目 B 类，矿山功能性充填，52222404

2.国家自然科学基金青年项目 C 类，矿化反应中煤-固废吸附 CO_2 的孔-渗特性联动演化机制，42402186

3.陕西省重点研发计划项目，煤矿采空区 CO_2 物理-化学协同封存关键技术研 究，2023-LL-QY－07

（二）团队教师简介

1. 负责人

王晶钰，女，博士（后），副教授，硕士生导师。博士毕业于西安交通大学动力工程及工程热物理专业，博士期间赴瑞典隆德大学交流学习一年。主要从事太阳能与氢能等新能源高效开发与利用、热能存储与强化传热、CO_2 封存及资源化利用等方面的科研与教学工作。

主持国家自然科学基金青年项目、陕西省自然科学基金青年项目、中国博士后基金面上项目、陕西省博士后基金面上项目等纵向课题 5 项，参与国家自然科学基金项目、国家重点研发计划等科研项目 10 余项。在《Applied Energy》、《Energy Conversion and Management》、《Applied Thermal Engineering》、《煤炭学报》等领域内权威期刊上发表论文 20 余篇，其中 SCI 检索 16 篇，EI 检索 7 篇；多次在工程热物理年会等国内外会议上做特邀/学术报告；授权国家发明专利 2 项、实用新型专利 1 项。担任《Energy Storage and Saving》期刊青年编委。

2. 参与教师

表 1 参与教师基本信息

姓名	出生年月	职称	工作部门	学术或业务专长
贾奇锋	1994.02	教授	能源与矿业工程学院	地质资源与地质工程
刘浪	1985.01	教授	能源与矿业工程学院	矿业工程

二、项目转化本科生实验案例

（一）案例简介

1.案例 1：CO_2 与碱性固废的湿法矿化反应实验

（1）实验简介

电石渣（carbide slag，CS）、钢渣（steel slag, SS）、粉煤灰（fly ash, FA）等

碱性固废中含有 CaO 或 $Ca(OH)_2$，可在水的参与下与 CO_2 发生矿化反应，生成 $CaCO_3$，从而实现 CO_2 封存。CO_2 封存效率与固废中碱性成分的含量、固废粒径、搅拌速率、水固比、矿化时间等因素有关。本案例即对不同固废种类和不同参数下的湿法矿化反应开展实验研究。通过本实验，学生可掌握湿法矿化反应的原理，明确固废成分、矿化参数等对固碳潜力的影响。

（2）实验内容

分别对电石渣、钢渣、粉煤灰等固废开展湿法矿化实验，并在实验中设置不同的水固比、搅拌机转速和碳酸化时间，测量每种工况下的固碳量。以电石渣为例，其湿法矿化反应实验工况可按表 1 设置。

表 1 电石渣湿法矿化反应实验方案

组别	实验名称	电石渣质量/g	水的质量/g	质量分数/%	转速/(r·min⁻¹)	碳酸化时间/min
A 组	A-0-60	600	600	50	0	60
	A-50-60	600	600	50	50	60
	A-100-60	600	600	50	100	60
	A-150-60	600	600	50	150	60
	A-200-60	600	600	50	200	60
	A-250-60	600	600	50	250	60
	A-300-60	600	600	50	300	60
B 组	B-40-X	600	900	40	300	X
	B-42-X	600	829	42	300	X
	B-44-X	600	764	44	300	X
	B-46-X	600	704	46	300	X
	B-48-X	600	650	48	300	X
	B-50-X	600	600	50	300	X
	B-52-X	600	554	52	300	X
	B-54-X	600	511	54	300	X
	B-56-X	600	471	56	300	X

A 组固定质量分数 50%、矿化时间 60 min，变量为搅拌速率（0~300 r/min）；B 组固定搅拌速率 300 r/min，变量为质量分数（40%~56%）与矿化时间 X（总时长 120 min）；CO_2 气体流量均固定 5 L/min。取样制度：前 30 min 每隔 10 min 取样一次，后 90 min 每隔 30 min 取样一次；取样后立即加入无水乙醇终止水化反应；样品置于 55 ℃干燥箱干燥固化 24 h，研磨至粒径<75 μm 待测。每个实验重复两次并将产物混合均匀。

（3）实验步骤与数据处理方法

首先测量固废的粒径分布和化学成分，然后将固废、水混合均匀后置于搅拌桶中，通入 CO_2 气体（实验装置如图 1 所示），保持一段时间后，将样品置于干燥箱中干燥停止水化反应，测量样品的孔隙结构、热重微分热重曲线、样品表面的微观形貌图，计算固碳效率，分析固碳效率与样品粒径分布、化学成分和反应参数之间的关系。具体实验步骤如下：

① 用电子计数秤按表 1 分别称取一定量的固废与水。

② 将称量的固废和水加入搅拌桶，把通气管接到搅拌机上，打开 CO_2 气瓶通气阀门并调节气体流量为 5 L/min，同时设置搅拌机为设定转速。

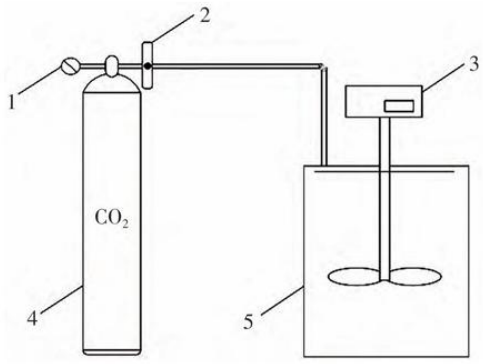
③ 按 60 min 或 120 min 总时长搅拌，按取样制度定期停止搅拌取样，样品中加入无水乙醇终止水化反应并标注实验编号。

④ 全部样品放入 55 ℃干燥箱干燥固化 24 h，研磨至 75 μm 以下进行微观形貌测试和热重测试。

⑤ 根据热重测试结果计算固碳效率 η，如公式（1）所示。

$$\eta = \Delta m_{600\sim1000℃} /(m_0 - \Delta m_{1000℃}) \times 100\% \quad (1)$$

式中，$\Delta m_{600\sim1000℃}$为 600~1000℃区间（$CaCO_3$ 分解）的质量损失，$m_{1000℃}$为 1000℃时剩余样品的质量。



1 压力表、2 转子流量计、3 搅拌机、4 CO_2、 5 搅拌桶

图 1 湿法矿化反应实验装置图

2. 案例 2：多元固废协同矿化反应实验

（1）实验简介

本实验针对二元/多元固废混合体系开展湿法矿化反应实验，旨在探明二元/多元固废在矿化反应过程中的协同特性，了解异相成核、吸附效应等对固碳效果的强化作用。

（2）实验内容

针对电石渣(CS)和钢渣(SS)二元混合体系以及电石渣、钢渣、粉煤灰(FA)三元混合体系开展湿法矿化实验。其中二元混合体系的实验工况可参考表 2 设置。

表 2 电石渣和钢渣二元混合体系湿法矿化实验工况

工况项目	设定值/范围
固废总质量	固定 1 kg/批次
CS:SS 质量比	1:0（纯 CS）、1:1、2:1、3:1、4:1、0:1（纯 SS）
液固比（L/S）	0.55、0.60、0.65（优化段固定 CS:SS=4:1）
CO_2 气体流量	5 L/min

搅拌速率	600 r/min（固定）
反应温度/压力	25 ℃，当地常压
碳酸化时间	60 min（机理分析时对比 0~60 min 不同时间）

（3）实验步骤与数据处理方法

与案例 1 中的操作步骤基本类似，实验流程如图 2 所示。根据热重测试结果，按照公式（1），计算出每种固废的固碳效率和混合体系的固碳效率 η，然后根据公式（2）~（3）计算混合体系的理想固碳效率 η_{ideal} 和实际固碳效率与理想固碳效率的比值，得到协同增长率 β。结合微观形貌测试、Zeta 电位测试等结果分析混合体系中的异相成核作用、吸附效应等对固碳效率的强化作用。

$$\eta_{ideal} = (x\eta_{cs} - y\eta_{ss}) / (x+y) \tag{2}$$

$$\beta = (\eta - \eta_{ideal}) / \eta_{ideal} \tag{3}$$

式中，x、y 分别为混合体系中 CS 与 SS 的质量分数。

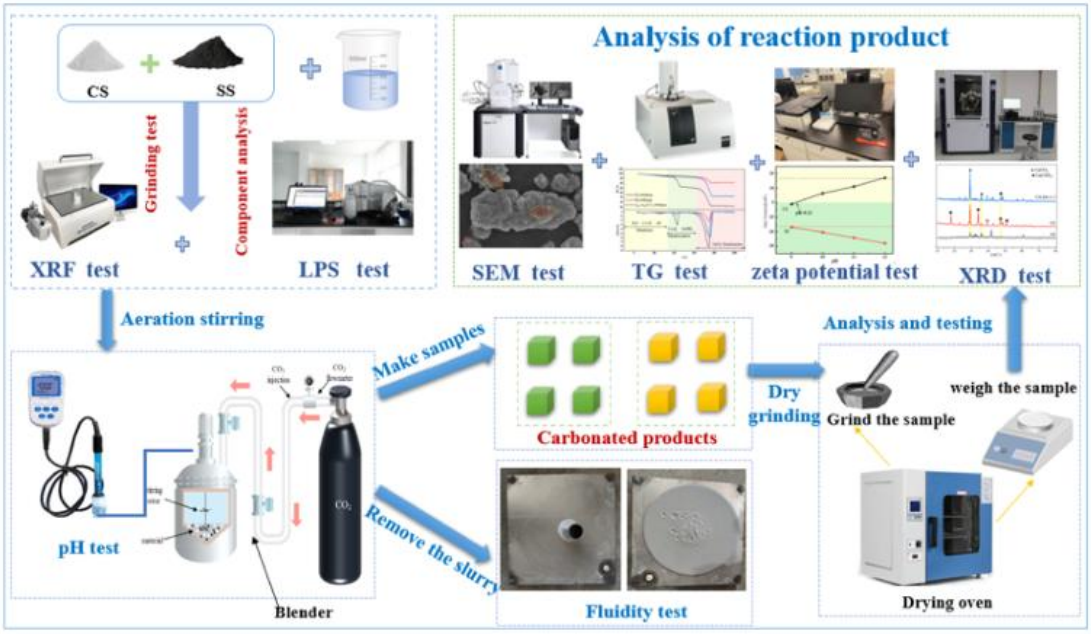


图 2 多元固废协同矿化实验流程图

3. 案例 3：CO_2 矿化养护固废试块实验

（1）实验简介

以钢渣(SS)、粉煤灰(FA)、煤矸石(CG)和水制备料浆(SFC)，运送至煤矿采空区，然后通过 CO_2 矿化养护形成具有一定强度的充填体，可实现充填和固碳的双重功能。本实验需测试新鲜料浆的流变性能以及矿化养护后的固碳和强度性能，通过本实验，学习非牛顿流体的流变特性，明确 CO_2 矿化养护的固碳作用，了解传质作用对矿化反应速率和反应程度的影响规律。

（2）实验内容

以不同配比的钢渣、粉煤灰、煤矸石和水制备充填料浆，采用流变仪测试

料浆的流变性，然后对料浆开展标准养护和 CO_2 矿化养护，在不同的龄期下，取样开展单轴抗压强度测试、热重测试、微观形貌测试等。分析不同养护方式和不同材料配比下，固碳性能和强度性能随养护时间的变化规律，以及宏观性能与微观结构的构效关系。SFC 料浆配比可参考表 3 设置。

表 3 SFC 配比

编号	SS 质量分数/%	SS 质量/g	CG 质量分数/%	CG 质量/g	FA 质量分数/%	FA 质量/g	质量浓度/%
SFC0	60	3744	0	0	40	2496	78
SFC5	60	3744	5	312	35	2184	78
SFC10	60	3744	10	624	30	1872	78
SFC15	60	3744	15	936	25	1560	78
SFC20	60	3744	20	1248	20	1248	78

（3）实验步骤：

①实验材料选用钢渣(SS)、粉煤灰(FA)、筛分至 0~4.75 mm 的煤矸石(CG)及自来水。按不同配比称取材料，保持充填浆料的质量浓度为 78%，其中钢渣恒定占固体总质量的 60%，煤矸石的质量分数在 0%至 20%之间递增替代粉煤灰。

②将原材料加入搅拌桶低速搅拌 2~3 分钟以确保混合均匀，随后抽取部分新拌浆料使用流变仪和微型坍落度仪测试流变与流动特性。剩余浆料浇筑入 70.7×70.7×70.7 mm 模具中，脱模后分为两组：一组在标准养护箱（20℃，65% RH）中养护，另一组在碳化养护箱（20℃，65% RH，99% CO_2 浓度）中养护。分别在 3 天、7 天、14 天和 21 天的目标龄期取出，进行单轴抗压强度(UCS)、X 射线衍射测试、热重微商热重测试和微观形貌测试，实验流程如图 3 所示。

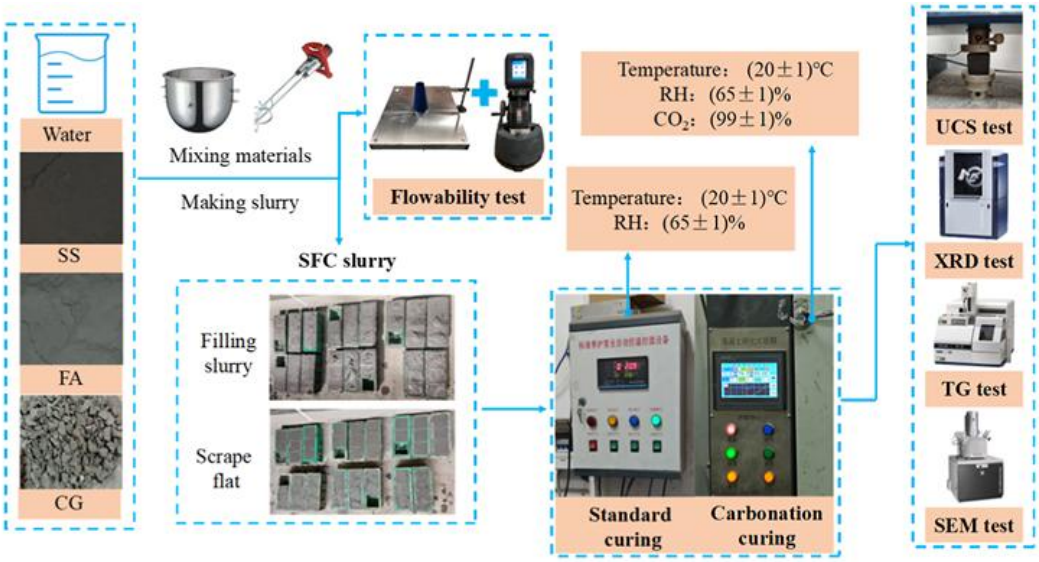


图 3 CO_2 矿化养护固废试块的实验流程图

4. 案例 4：CO_2 矿化养护固废泡沫混凝土实验

（1）实验简介

本实验旨在开发一种兼具固废利用、CO_2 封存和保温性能的多功能建筑材

料。以粉煤灰、钢渣和煤矸石等固废以及水泥为原材料，通过掺入过氧化氢（H_2O_2）发泡剂造孔，并在 CO_2 环境中养护制备泡沫混凝土，以实现 CO_2 封存和保温功能。通过本实验，学生可掌握 H_2O_2 发泡剂掺量对泡沫混凝土孔隙结构的调控作用，并理解孔隙结构对 CO_2 封存能力与隔热保温性能的双重调控作用。

（2）实验内容

以水泥(P.O 42.5)、粉煤灰(FA)、钢渣(SS)、碎煤矸石(CG)和 7.8%浓度的 H_2O_2 溶液为原材料，制备不同发泡剂 H_2O_2 掺量和不同材料配比的水泥-粉煤灰-煤矸石体系（PFC）和水泥-钢渣-粉煤灰-煤矸石（PSFC）泡沫混凝土试块，对试块开展 CO_2 矿化养护，测试不同龄期下的单轴抗压强度、固碳效率、导热系数以及微观结构，分析宏观性能的变化规律。PFC 和 PSFC 泡沫混凝土的配比可按表 4 设置。

表 4 泡沫混凝土两种体系配合比方案

试验组	P.O/%	FA/%	SS/%	CG/%	质量浓度/%	养护龄期/d	水/%	H2O2/%
PFC-0%	5	45	0	50	78	3、7、14、28	22	0
PFC-5%	5	45	0	50	78	3、7、14、28	17	5
PFC-10%	5	45	0	50	78	3、7、14、28	12	10
PSFC-0%	5	10	35	50	78	3、7、14、28	22	0
PSFC-5%	5	10	35	50	78	3、7、14、28	17	5
PSFC-10%	5	10	35	50	78	3、7、14、28	12	10

（3）实验步骤

①按 78%固体质量浓度将粉料与水低速搅拌 2~3 分钟后，加入 H_2O_2 溶液继续低速搅拌 1~2 分钟。

②将浆料倒入 70.7 mm 立方体模具（约填充 2/3 体积）进行自发泡膨胀，室温静置 24 小时后脱模。

③试件在 99% CO_2、20℃、65% RH 条件下进行矿化养护 3 天、7 天、14 天和 28 天。

④取不同养护时间的样品，开展单轴抗压强度测试、热重测试、导热系数测试和微观形貌测试等。实验流程如图 4 所示。



图 4 实验流程图

（二）实验项目效果简介

1. 实验项目所产生的教学成效

(1) 增强理论实践结合：通过固废（电石渣、钢渣、粉煤灰、煤矸石等）与 CO_2 的矿化反应实验，学生可以将课堂上学到的流体力学、反应动力学、传热学、CO_2 封存与利用等相关理论知识应用到“双碳”目标的实际工程问题中，加深对知识的理解和综合应用能力。

(2) 提升实践操作技能：实验需要学生亲自动手，进行材料筛分、浆料配制、CO_2 碳化养护操作，以及 X 射线衍射（XRD）、扫描电子显微镜测试（SEM）、热重微商热重（TG-DTG）、单轴抗压强度（UCS）等大型分析仪器和微型坍落度仪、TPS 热导率仪的实操，这极大提升了学生的实验测试技能、微观表征分析能力和动手解决实际问题的能力。

(3) 培养创新思维：在寻找发泡剂掺量对碳封存与保温隔热性能的平衡点时，以及调控多固废回填浆料的流动性与固碳强度的过程中，学生会面临各种复杂的实验现象。这需要动用创新思维去分析微观机理并寻找材料配比的最优解决方案，对培养学生的创新意识十分有益。

(4) 加深对煤炭冶金行业环境问题的认识：通过参与实验，学生可以更深刻地意识到“以废治废”和 CCUS（碳捕集、利用与封存）技术的重要性，从而增强绿色低碳的环保意识。

(5) 促进跨学科知识学习：实验涉及采矿工程、材料科学、环境工程、物理化学等多个学科领域，开展这些实验有助于学生建立跨学科的知识体系，为未来从事绿色矿山建设及新能源领域的工作打下坚实的基础。

(6) 提高科研素养：学生在参与矿化反应动力学模型（如缩核模型）推导、

浆料流变模型（如 H-B 模型）拟合及复杂数据分析的过程中，会深入接触到科研方法论和数据处理技巧。在学的过程中思考，思考的过程中实验，有助于提高科研素养和学术论文写作水平。

2. 师生的反馈和评价

学生通过实验观察和分析 CO_2 在多固废体系（如电石渣和钢渣）中的矿化反应过程、碳酸钙结晶的微观形貌演化，深入了解了 CO_2 矿化封存的基本原理。学生学会了设计合理的实验方案（如控制搅拌速率、液固比、发泡剂浓度、材料配比等），选择合适的实验设备和方法进行参数测量和记录。通过对 XRD 图谱、TG-DTG 热重曲线的整理和分析，学生熟练掌握了计算固碳效率、推导反应动力学方程等方法。能够将理论知识应用于实际问题中，如评估全固废浆料在煤矿采空区回填管网运输中的流变特性及可泵送性，并提出相应的多固废协同增效措施。实验不仅激发了学生的科研兴趣，更让学生深刻认识到合理管理煤炭资源开发与环境保护的重要性，全面促进了学生对可持续发展和“双碳”理念的认识与实践。