

## “双碳”相关实验开发 ——蛋壳源CaO的制备、表征及其碳捕集性能

舒蕾, 郝正清, 闫凯, 王宏, 朱丽华, 陈芳, 王楠\*

华中科技大学化学与化工学院, 武汉 430074

**摘要:** 碳捕集技术是实现“双碳”目标的重要途径。高温工业源CO<sub>2</sub>的捕集更宜使用钙基吸收剂。本文立足“双碳”背景, 将碳捕集前沿技术融入仪器分析实验课程, 开发了蛋壳源CaO的制备、表征及其碳捕集性能的设计性综合实验。选择高钙废弃物鸡蛋壳为原料, 采用醋酸处理得到醋酸钙, 再经高温煅烧制备了具有较好碳捕集性能的CaO; 利用EDTA配位滴定、扫描电子显微镜、X射线衍射、红外光谱、拉曼光谱和热重分析等多种分析手段, 测试了CaO的纯度、形貌、结构及其对CO<sub>2</sub>的捕集性能。本实验采用项目式教学方式, 引导学生自行设计实验方案并进行实践和总结, 不仅锻炼了学生综合运用专业知识解决实际问题的能力, 而且培养了学生的科研素养和团队合作精神。

**关键词:** 双碳; 仪器分析实验; 蛋壳; 氧化钙; 碳捕集

**中图分类号:** G64; O6

## Development of a Double-Carbon Related Experiment: Preparation, Characterization and Carbon-Capture Ability of Eggshell-Derived CaO

Lei Shu, Zhengqing Hao, Kai Yan, Hong Wang, Lihua Zhu, Fang Chen, Nan Wang \*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China.

**Abstract:** The carbon capture technology is an important way for achieving the “Double Carbon” goal. Calcium-based absorbents are more suitable for the capture of CO<sub>2</sub> from high-temperature industrial sources. Based on the context of the “Double Carbon”, this work integrated cutting-edge carbon capture technology into instrumental analysis experimental course, and developed a designing and comprehensive experiment about “preparation, characterization and carbon-capture ability of eggshell-derived CaO”. Waste eggshells was selected as the calcium source, then pre-treatment with acetic acid yielded calcium acetate, which was calcined at high temperatures to produce CaO with good carbon capture ability. The purity, morphology, structure, and CO<sub>2</sub> capture ability of as-prepared CaO were tested using various analysis methods such as EDTA compleximetry titration, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, and thermogravimetric analysis. This experiment adopts a project-based teaching approach, which guides students to independently design experimental plans, conduct practical work, and summarize their findings. It not only enhances students’ ability to comprehensively apply professional knowledge to solve practical problems, but also cultivates their scientific research literacy and teamwork spirit.

**Key Words:** Double carbon; Instrumental analysis experiment; Eggshell; CaO; Carbon capture

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的过量排放使得温室效应加剧, 引发众多环境问题。2020年, 习近平总书记提出我国将在2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和, 即“双碳”目标。高校是培养社会主义建设

收稿: 2023-10-31; 录用: 2023-12-29; 网络发表: 2024-01-31

\*通讯作者, Email: nwang@hust.edu.cn

基金资助: 湖北高校省级教学研究项目(2022061); 华中科技大学教学研究项目(202222)

者和接班人的重要阵地。2021年7月,我国教育部制定了《高等学校碳中和科技创新行动计划》,要求“高等院校应为碳达峰、碳中和工作提供科技支撑和人才保障”,鼓励高校开设碳中和相关课程。一些高校逐渐将“双碳”相关实验引入教学,主要集中在绿色能源和光电新材料方面,例如光化学制氢<sup>[1]</sup>、Pd/CuO/Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>异质结纳米管光催化剂的合成及其光催化实验<sup>[2]</sup>、钙钛矿光伏电池制备及性能表征<sup>[3]</sup>、石墨烯绿色制备及典型应用<sup>[4]</sup>等。由于燃煤电厂是CO<sub>2</sub>最大排放源之一,联合国气候变化专门委员会将燃煤电厂碳捕集和封存(CCS)作为温室气体减排最重要的技术方向,我国在此基础上提出了碳捕集、利用与封存(CCUS)技术<sup>[5]</sup>。然而,与此相关的教学类实验仅见1例报道,即活性炭吸附CO<sub>2</sub>和碳压缩封存<sup>[6]</sup>。

燃烧后CO<sub>2</sub>捕集是工业规模上应用最广泛的碳捕集技术,包括吸收法、吸附法和膜分离法等<sup>[7]</sup>。其中,采用固体材料作为吸收/吸附剂的再生能耗低、操作工艺更简单,根据使用温度,这些材料可分为低温型(< 200 °C)、中温型(200–400 °C)和高温型(> 400 °C)<sup>[8]</sup>。活性炭、分子筛、金属有机框架材料等物理吸附剂多为低温型, MgO基和类水滑石基材料为中温型, 锂基和CaO基材料为高温型。燃煤电厂烟气温度较高(400–650 °C), 低温和中温型吸附/吸收材料使用前需先将烟气温度降低, 导致处理能耗和成本增加<sup>[9]</sup>。CaO固体吸收剂成本低、性能稳定, 更适合高温工业源CO<sub>2</sub>的捕集, 被誉为最有应用前景的第二代高温碳捕集技术<sup>[8–10]</sup>。我校煤燃烧国家重点实验室在此领域开展了富有特色的研究工作, 例如, 利用磷石膏、钢渣、电石渣等高钙废弃物制备CaO基吸收剂<sup>[10]</sup>, 不仅解决了碳减排的需求, 而且以废治废, 实现了固体废弃物资源再利用。蛋壳是日常生活中常见的高钙废弃物, 我院学子就曾在分析化学实验课堂上测定过蛋壳中的钙含量<sup>[11]</sup>。鉴于此, 我们开发了一个蛋壳源CaO的制备、表征及其碳捕集性能测试的仪器分析设计型综合实验, 除了制备吸收剂外, 还采用化学滴定法测试CaO产物中钙含量, 利用多种仪器分析技术表征CaO的形貌、结构、比表面积及其捕集CO<sub>2</sub>的性能。通过引导学生思考碳捕集吸收剂的构效关系, 激发学生对科技前沿的兴趣, 培养学生的创新思维能力和科研素养。

## 1 实验目的

立足国家“双碳”战略, 围绕“蛋壳源CaO的制备、表征及其碳捕集性能测试”, 开展以学生为中心的仪器分析设计性综合实验教学实践, 达到以下实验目的:

(1) 以项目为载体, 以解决真实问题为导向, 引导学生独立查阅文献资料, 自主设计实验方案, 锻炼学生利用分析化学知识解决实际问题的能力。

(2) 通过小组合作式实验实践, 掌握多种仪器分析技术研究固体吸收剂形貌、结构和碳捕集性能的原理和方法, 培养科学素养和合作精神。

(3) 交流实验成果, 分享解决实际问题的思路、方法与过程, 总结不同分析方法的特点及解决具体问题的局限性, 学习文献“采用蛋壳制备碳捕集材料”的创新性思维和“以废治废、变废为宝”的环保意识。

## 2 实验原理

碳捕集是实现碳中和的重要技术手段。燃煤电厂是最主要的CO<sub>2</sub>排放源之一, 其排放的烟气温度高、含有的CO<sub>2</sub>浓度低, 低温和中温固体吸附/吸收剂处理这类烟气时受到限制<sup>[8–10]</sup>。CaO由于价廉易得, 且具有优异的碳捕集性能, 被视为高温捕集CO<sub>2</sub>的首选材料。理论上, 每克CaO可以捕集0.786 g CO<sub>2</sub><sup>[12]</sup>。CaO捕集CO<sub>2</sub>的反应原理如式(1)所示:



该反应为可逆反应, 在620 °C以上的高温下, CaO能快速与CO<sub>2</sub>反应生成碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>), 可用于固定封存CO<sub>2</sub>。若升温至800 °C以上, CaCO<sub>3</sub>会逐渐分解为CO<sub>2</sub>和CaO。CaO可循环再利用, CO<sub>2</sub>可采用其他途径封存或再利用, 例如, CO<sub>2</sub>可作为碳资源转化为高值化学品(例如燃料、肥料、制冷剂、

碳酸盐等)再利用,或作为驱油介质提高油田采油率,既能实现碳减排,又可产生一定的经济效益<sup>[13]</sup>。

工业上常采用煅烧石灰石、大理石、方解石等钙质矿石(其主要成分为 $\text{CaCO}_3$ )制备 $\text{CaO}$ 。煅烧前,这些钙质矿石需要经过开采、运输、粉碎等预处理。为了降低钙循环系统捕集 $\text{CO}_2$ 的成本,一些研究者寻找更为廉价易得的钙源,例如高钙废弃物。工业上常见的高钙废弃物有湿法制磷酸工艺产生的磷石膏、炼钢过程中产生的钢渣、燃煤电厂脱硫塔中排放的脱硫石膏等<sup>[10]</sup>。采用高钙废弃物制备 $\text{CaO}$ 不仅可避免天然矿石开采和粉碎过程中的能耗,而且能够实现废弃物资源化利用,因此备受专家学者的广泛关注。生活中最常见的高钙废弃物是蛋壳,其主要成分是 $\text{CaCO}_3$ (含量约为90%),因此,利用蛋壳制备 $\text{CaO}$ 不仅可激发学生的兴趣,而且可培养学生“以废治废、变废为宝”的意识。文献<sup>[14]</sup>报道蛋壳煅烧法制得的 $\text{CaO}$ 在碳捕集循环过程中易烧结且吸收容量低,而经有机酸处理再煅烧制得的 $\text{CaO}$ 具有较高的吸收容量且能保持较好的循环使用性能。这是由于有机酸钙在煅烧过程中会发生分解、脱羧,相比于等摩尔当量的 $\text{CaCO}_3$ 会释放更多 $\text{CO}_2$ 气体,致使生成的 $\text{CaO}$ 内部含有丰富、稳定的介孔通道。因此,本实验以蛋壳为原料,分别采用两种方法制备 $\text{CaO}$ :(1)直接煅烧法;(2)采用醋酸将蛋壳中的钙转化为醋酸钙,然后再煅烧。

为了对比探究两种不同方法制备的 $\text{CaO}$ 的纯度、理化性质及碳捕集性能,本实验采用EDTA配位滴定法来测定试样中钙含量;采用场发射扫描电子显微镜(SEM)、全自动比表面积及孔隙度分析仪(BET)分析样品的形貌结构及比表面积;采用X射线衍射(XRD)、傅里叶红外光谱仪(FTIR)、拉曼光谱仪(Raman)确定样品的晶型及主要组成;采用热重(TGA)研究 $\text{CaO}$ 对 $\text{CO}_2$ 的捕集性能。

### 3 实验内容

#### 3.1 主要试剂与仪器

鸡蛋壳收集来自食堂;乙酸、氢氧化钙、盐酸、无水乙醇均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司;K-B指示剂, $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl}$ 氨性缓冲液( $\text{pH} = 10$ );三乙醇胺水溶液(1:2),EDTA标准溶液( $0.00988 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

使用的仪器设备主要有电子分析天平(BS210S;北京赛多利斯有限公司),电热鼓风干燥箱(101-0AB;天津市泰斯特仪器有限公司),超声波清洗器(SB-3200D;宁波新芝生物科技股份有限公司),箱式节能电阻炉(SX-4-10;湖北英山县建力电炉制造有限公司),恒温水浴锅(HH-4;国华电器有限公司),循环水式多用真空泵(HB-3;郑州长城科工贸有限公司),X射线衍射仪(SmartLab-SE;日本Rigaku),显微拉曼光谱仪(ATR-8100;奥谱天成(厦门)光电有限公司),傅里叶红外光谱仪(Vertex 70v;德国布鲁克),场发射扫描电子显微镜(SU8010;日本日立),全自动比表面积及孔隙度分析仪(ASAP2420-4MP;美国麦克),热重分析仪(Labsys evo;法国塞塔拉姆)。

#### 3.2 钙基吸收剂的制备

由蛋壳制备 $\text{CaO}$ 的实验流程如图1所示。首先,对鸡蛋壳进行清洗、去膜、干燥和粉碎系列预处理。然后,采用醋酸对蛋壳粉末进行处理,具体如下:称量4.00 g蛋壳粉,加入56 mL水,分2次加入4.00 g醋酸并搅拌;置于超声波清洗器中,在100 W、30 °C下超声处理2 min,随后30 °C水浴反应1 h至蛋壳粉完全溶解后,升温至80 °C,缓慢加入适量氢氧化钙,将溶液 $\text{pH}$ 调节至13左右,反应10 min,当溶液中的 $\text{Mg}^{2+}$ 全部转化为氢氧化镁沉淀后,抽滤分离去除沉淀;取抽滤后的滤液,用醋酸调节其 $\text{pH}$ 为7,之后蒸发、浓缩,烘干待用,记为醋酸钙。最后,分别准确称量3.0 g蛋壳粉和上述醋酸钙,在马弗炉里800 °C煅烧3 h,冷却至室温,分别获得 $\text{CaO}$ -1和 $\text{CaO}$ -2。

#### 3.3 自制 $\text{CaO}$ 的纯度测定

分别称取0.1400 g  $\text{CaO}$ -1和 $\text{CaO}$ -2,加入少许盐酸和去离子水促进溶解,待粉末完全溶解后,转入250.0 mL容量瓶中定容。准确移取20.00 mL上述试液加入锥形瓶中,加入5 mL三乙醇胺,10 mL氨性缓冲溶液( $\text{pH} = 10$ ),两滴K-B指示剂,混合均匀。用 $0.00988 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的EDTA标准溶液滴定,溶液由红变蓝,即为滴定终点,记录EDTA用量。平行滴定三次,计算钙离子的浓度和样品纯度。

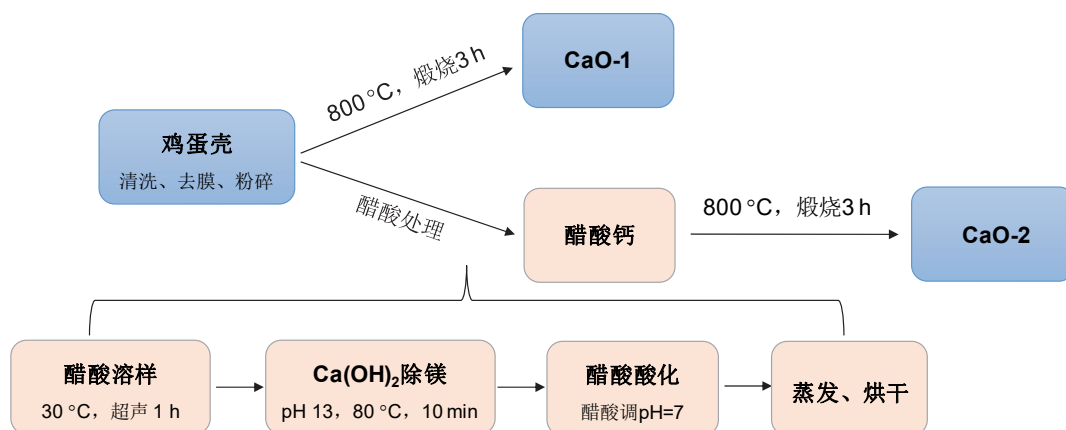


图1 蛋壳制备CaO的流程示意图

### 3.4 自制CaO的理化性质表征

采用XRD对样品进行晶型分析, 采用石墨材质的单色滤光片, 特征射线设定为Cu  $K_{\alpha}$ , 狭缝为SS/DS1°, RS 0.20 mm, 电流90 mA, 工作电压35 kV, 计数器 SC, 扫描范围5°–85°。

采用SEM观察样品的表面形貌, 加速电压5 kV, 放大倍率5 k。采用FT-IR分析其骨架振动结构, 通过衰减全反射(ATR), 在分辨率4  $\text{cm}^{-1}$ , 扫描次数16次, 扫描范围50–4000  $\text{cm}^{-1}$ 的真空条件下, 对样品进行FTIR光谱测试。采用显微拉曼光谱仪, 在激光器波长785 nm、激光功率200 mW、曝光时间3 s的条件下, 测试其Raman光谱。

采用BET对样品的比表面积、孔径、孔容等测定分析。在物理吸附测试前, 需对样品脱气预处理: 称取样品500 mg, 在脱气装置中用氮气( $\text{N}_2$ )气体吹扫, 先在90 °C下恒温一定时间, 然后升温到300 °C, 恒温一定时间。接着再进行降温, 冷却到25 °C。在液氮温度下进行低温吸附测试, 设置压力点吸附时间为10 s。

### 3.5 碳捕集性能测试

采用TGA对样品的碳捕集性能进行测试。称取5.00 mg试样装入样品托盘, 以40 °C· $\text{min}^{-1}$ 升温到640 °C, 以20  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率通入 $\text{N}_2$ 。保温10 min后, 以10  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率通入 $\text{CO}_2$ , 开始气体吸附测试, 时间设置为30 min。吸附完成后, 气氛切换为20  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$   $\text{N}_2$ , 以20 °C· $\text{min}^{-1}$ 程序升温至850 °C, 开始进行气体脱附反应, 时间设置为20 min。

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 晶型及纯度分析

采用XRD对比了蛋壳煅烧前后的晶型变化。如图2a所示, 蛋壳在 $2\theta$ 为23°、29°、36°、39°、43°、47°、48°处明显出现了系列衍射峰, 与 $\text{CaCO}_3$ 的XRD标准谱图(No. 00-002-0629)相似, 表明其主要成分是 $\text{CaCO}_3$ 。无论是直接煅烧还是采用醋酸处理后再煅烧, 得到的产物显示了几乎完全相同的XRD谱图(图2b), 且相较于蛋壳而言均发生了显著变化,  $\text{CaCO}_3$ 的衍射峰完全消失, 在 $2\theta$ 为32°、37°、54°、64°和67°出现了CaO的系列特征衍射峰(No. 00-001-1160), 表明两种产物的主要成分均是CaO。

采用EDTA配位滴定法测试了产物中CaO的含量。测试结果如表1所示, CaO-1和CaO-2中CaO的含量分别高达 $97.2\% \pm 0.1\%$ 和 $97.3\% \pm 0.1\%$ , 表明两种方式制备的产物的主要成分均是CaO。

### 4.2 光谱分析

采用Raman和FT-IR技术对比了蛋壳煅烧前后的组成变化。在蛋壳的Raman光谱图中(图3a), 1083、711和281  $\text{cm}^{-1}$ 处的Raman峰可归属于 $\text{CO}_3^{2-}$ 的对称伸缩和弯曲振动峰。蛋壳直接高温煅烧后, 1083和281  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰强度变弱, 711  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰变宽; 同时, 在357  $\text{cm}^{-1}$ 处出现一个峰宽较窄、强

度较大的新峰，1200–1800  $\text{cm}^{-1}$ 出现多个宽而弱的新峰，这与CaO中Ca–O的特征Raman峰相似，表明直接煅烧得到的CaO-1主要成分是CaO，但仍含有一定量的 $\text{CaCO}_3$ 。采用醋酸处理再高温煅烧得到的CaO-2，其Raman谱图中主要出现了357  $\text{cm}^{-1}$ 处的CaO的特征峰，而 $\text{CO}_3^{2-}$ 的特征峰强度明显减弱，表明CaO-2中 $\text{CaCO}_3$ 含量较少，这是由于醋酸处理使 $\text{CaCO}_3$ 完全溶解转化为了醋酸钙。

图3b为样品的FT-IR谱图。蛋壳在1421  $\text{cm}^{-1}$ 处出现了 $\text{CO}_3^{2-}$ 反对称伸缩振动峰，在876和713  $\text{cm}^{-1}$ 分别出现了 $\text{CO}_3^{2-}$ 的面外和面内弯曲振动峰。对于两种方法制备的产物，未观察到 $\text{CO}_3^{2-}$ 的红外吸收特征峰，但在272  $\text{cm}^{-1}$ 和357  $\text{cm}^{-1}$ 处出现了Ca–O的伸缩振动特征峰，说明已成功制得CaO。同时，两种产物在3641  $\text{cm}^{-1}$ 出现了OH的特征伸缩振动峰，且CaO-2的OH峰更强，表明CaO-2表面含有更多吸附水或 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。以上光谱分析进一步验证了两种产物的主要成分均是CaO，但二者的表面官能团具有一定差异。

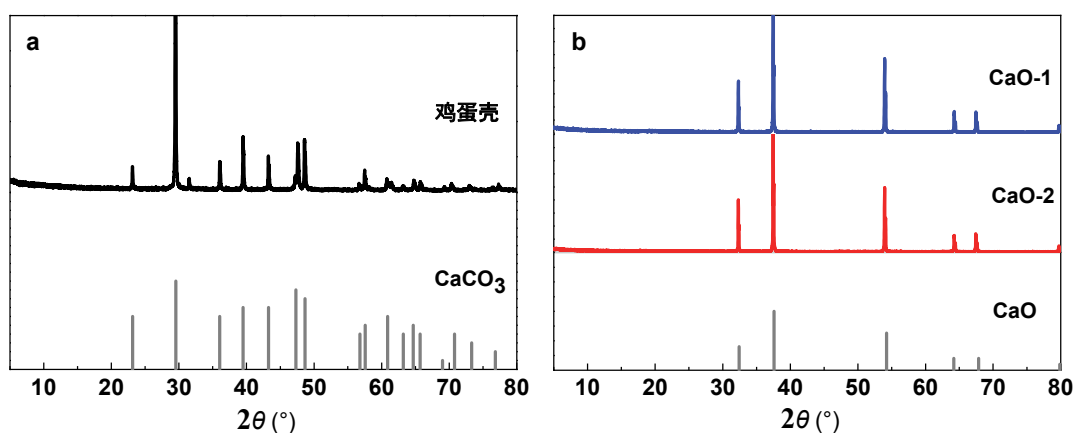


图2 鸡蛋壳(a)和CaO-1、CaO-2 (b)的XRD谱图及其与 $\text{CaCO}_3$ 和CaO标准谱图的对比

表1 自制CaO的纯度、比表面积和孔体积

样品	EDTA滴定体积(mL) <sup>b</sup>	CaO质量(g)	CaO纯度(%)	比表面积( $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )	孔体积( $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ )
CaO-1 (0.1426 g) <sup>a</sup>	20.07; 20.05; 20.02	0.1387	97.2 ± 0.1	2.12	0.0077
CaO-2 (0.1412 g) <sup>a</sup>	19.84; 19.86; 19.91	0.1374	97.3 ± 0.1	6.83	0.0781

<sup>a</sup>此处将试样溶解、定容至250.0 mL，用于EDTA滴定分析；<sup>b</sup>滴定20.00 mL试液所消耗的EDTA体积

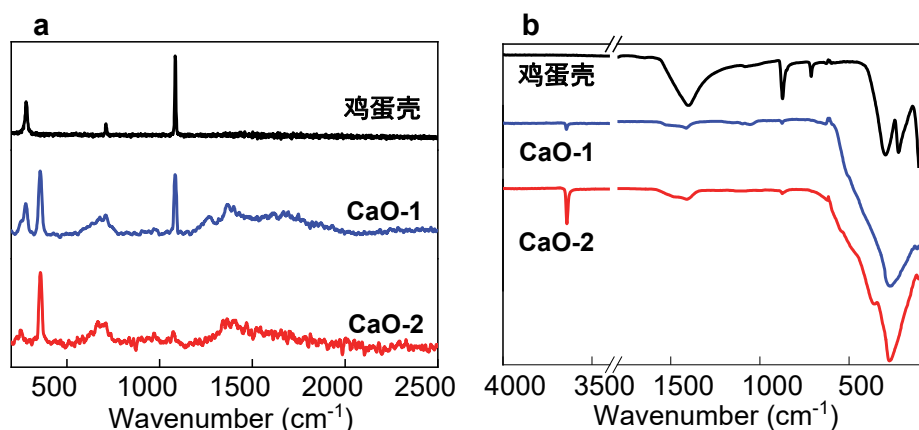


图3 鸡蛋壳、CaO-1和CaO-2的拉曼(a)和红外谱图(b)

### 4.3 表面形貌及比表面积

通过SEM对比观察样品的表面形貌(图4a-c),发现蛋壳微观结构为大块状,表面分布有很多小的孔洞和颗粒。无论是否经醋酸处理,蛋壳煅烧之后,颗粒变小,且呈树枝状结构,表面微观结构变得更疏松多孔。其中,CaO-1粒径约为2–5  $\mu\text{m}$ ;而CaO-2粒径更小,约为1–2  $\mu\text{m}$ ,且孔洞更多、分布更密集。进一步地,采用 $\text{N}_2$ 吸附-脱附法测试了CaO-1和CaO-2的比表面积和孔径分布。如图4d所示,CaO-1的孔径主要分布在5–20 nm,以介孔为主。CaO-2的孔径分布存在两个区域,分别为2–3 nm和20–100 nm,即同时含有介孔和大孔。此外,CaO-2在20–100 nm区间的孔占主导地位,且孔含量比CaO-1更丰富。根据BET测试得到,CaO-2比CaO-1的孔体积增加了10倍,比表面积增加了约3倍(表1),这是由于醋酸处理使蛋壳中的 $\text{CaCO}_3$ 转化为醋酸钙,在煅烧过程中,醋酸钙会分解、脱羧,相比于原始 $\text{CaCO}_3$ 会释放更多的 $\text{CO}_2$ 气体,导致产生更多的孔。

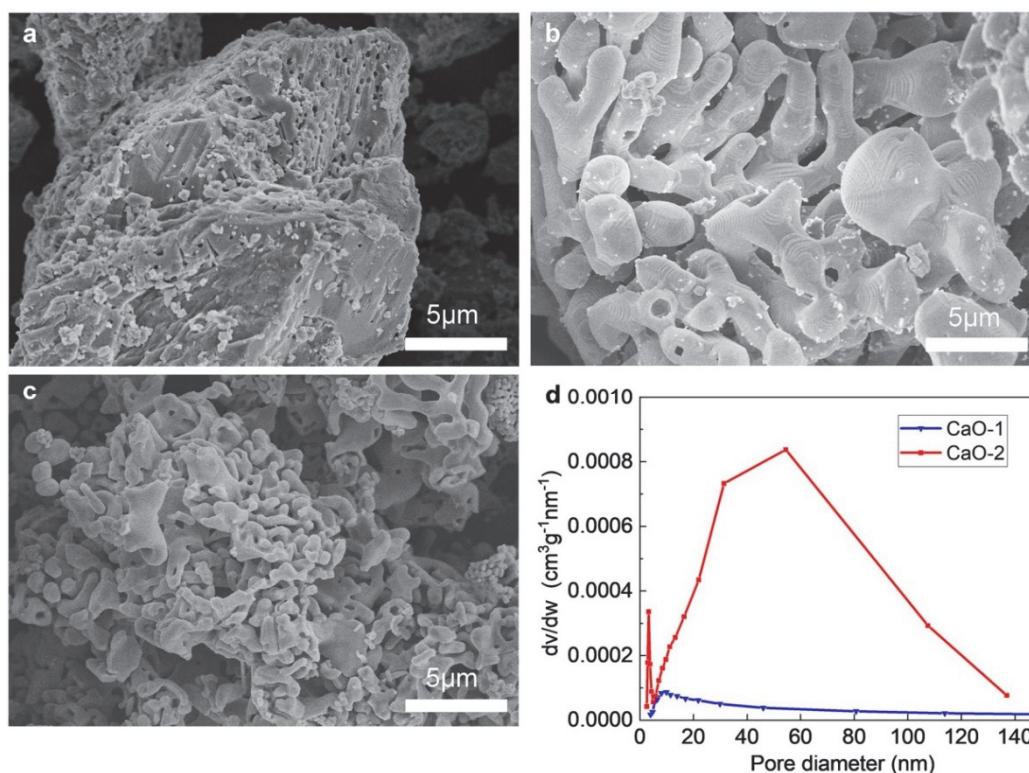


图4 (a) 蛋壳、(b) CaO-1和(c) CaO-2的SEM图; (d) CaO-1和CaO-2的孔径分布图

电子版为彩图,后同

### 4.4 碳捕集性能

在热重分析仪上进行 $\text{CO}_2$ 吸收捕集实验。称取定量CaO置于样品皿中,在氮气气氛下升温至 $640^\circ\text{C}$ ,测试结果如图5所示。在此过程中,发现CaO-1和CaO-2在 $400\text{--}500^\circ\text{C}$ 有一定失重,约为10%–12%,对应于产物脱水过程。 $640^\circ\text{C}$ 恒温10 min后,通入 $\text{CO}_2$ 气体,发现两种CaO的质量均迅速增加,这是由于CaO捕集 $\text{CO}_2$ 并转变为 $\text{CaCO}_3$ ,增重量对应捕集 $\text{CO}_2$ 的量。由图可知,CaO-1和CaO-1分别增重至109.2%和123.6%,计算可知捕集的 $\text{CO}_2$ 容量分别为 $0.209\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.353\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,表明醋酸处理后再煅烧制得的CaO具有更优异的碳捕集性能。继续升温至 $800^\circ\text{C}$ ,试样开始失重,对应于 $\text{CaCO}_3$ 分解生成CaO并释放 $\text{CO}_2$ 的过程。上述过程也模拟了钙基吸收剂在工业中吸附 $\text{CO}_2$ 和再生的过程。当钙基吸收剂吸附 $\text{CO}_2$ 气体时,吸收剂的组成、比表面积和孔径对吸收容量和速率具有重要影响<sup>[15]</sup>。CaO-2比CaO-1的比表面积大,其和 $\text{CO}_2$ 接触及反应位点更多;同时,CaO-2具有更丰富的介孔(2–50 nm)结

构, 在高温条件下较稳定, 且有利于气体扩散进入吸收剂内部, 从而促进 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CaO}$ 反应, 因此 $\text{CaO-2}$ 捕集 $\text{CO}_2$ 的性能显著优于 $\text{CaO-1}$ 。然而, 与 $\text{CaO}$ 捕集 $\text{CO}_2$ 的理论值( $0.786 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ )相比,  $\text{CaO-2}$ 的吸收性能仍有提升空间, 可引导学生查阅文献, 提出改进方法。另外, 引导学生思考多次循环使用后失活的 $\text{CaO}$ 基吸收剂是否有其他再利用价值, 例如可用于电厂烟气脱硫、替代部分石灰石制备水泥熟料等, 让环保意识根植学生心中。

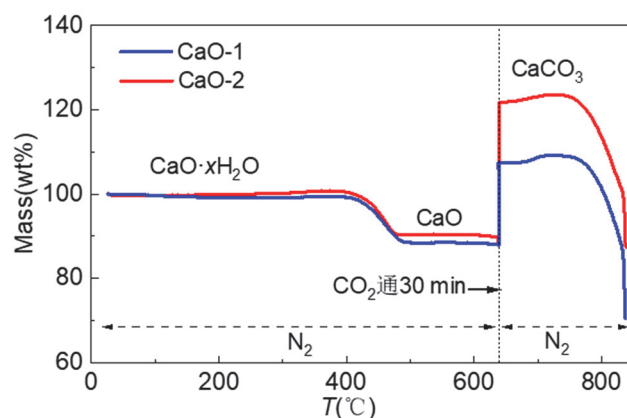


图5  $\text{CaO-1}$ 和 $\text{CaO-2}$ 的热重曲线图

## 5 实验教学实施和效果

本文开发的设计性综合实验, 涉及蛋壳源 $\text{CaO}$ 的制备、结构表征和碳捕集性能测试等内容(图6), 适合在“双碳”相关学科(如化学、材料、能源等)高年级开设。除 $\text{CaO}$ 制备及其碳捕集性能测试为必做实验外(6学时), 其他探索性内容(如吸收剂的纯度、形貌结构及光谱测试)可根据教学平台硬件条件或课堂学时自由选择、组合, 以满足不同专业、不同知识背景学生的实验教学需求。

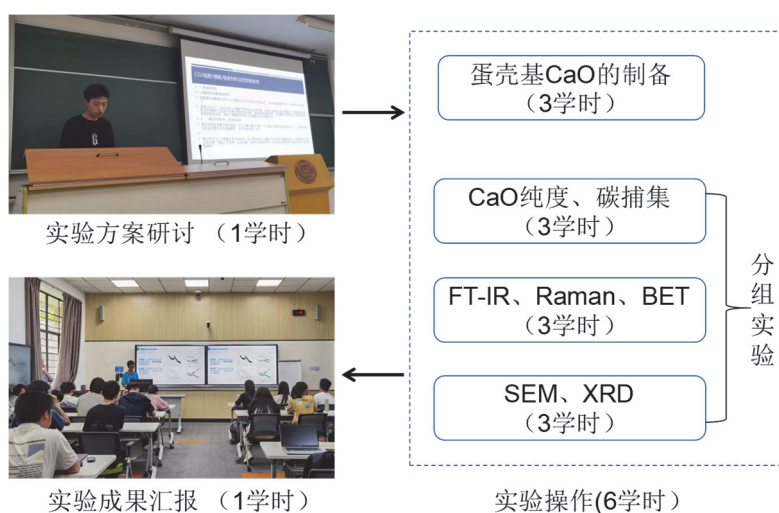


图6 本实验建议的教学实施安排及实践示意图

本实验已在院化学拔尖和化学强基专业大二仪器分析实验课程中进行了教学实践, 取得了良好的教学效果, 故以此为例, 进行教学实施说明。本实验采用项目式教学法, 将学生分为8–10名成员组成的项目组。课前, 预留4周, 要求学生查阅文献、完成方案设计。课堂实验教学为8学时, 分

三个环节进行。首先, 项目组汇报实验方案, 师生共同研讨, 确定实验方案(1学时)。然后, 进入实验操作环节(共计6学时), 在制备蛋壳基CaO时, 由于煅烧耗时较长, 在此期间, 教师向学生介绍SEM、XRD、BET、TG、FT-IR和Raman仪器分析方法与技术的原理及操作事项, 为后续实验内容做准备; 随后, 将学生分为3个小组, 合作完成自制CaO产物纯度测定、产物理论性质表征(SEM、XRD、FTIR、Raman和BET)及碳捕集性能测试(TGA)。最后, 预留2周撰写实验报告并制作PPT, 举行成果报告展示会(1学时), 分享实验结果和经验, 师生共同点评总结, 提升教学质量。

通过此次实验教学实践, 学生主动调研文献, 在课堂上将自己设计的方案进行实践, 学习了多种仪器的原理和使用方法, 并利用这些仪器分析手段研究了吸收剂结构与性能之间的关系。课后, 他们一般都撰写了十几页的实验报告, 有的学生还总结实验经验并提出了实验需要改进的地方, 例如, 制备过程中煅烧温度较低、时间较短, 导致CaCO<sub>3</sub>未分解完全, 可适当提高马弗炉煅烧温度; 从表征结果来看, 空气中的水分和CO<sub>2</sub>易导致CaO变质, 样品需及时测试或放干燥器保存。另外, 也有学生谈到通过小组协作完成项目, 增加了团队合作意识和集体荣誉感; 对国家“双碳”战略的了解进一步加深; 对开发高温碳捕集材料的必要性有了更深的理解; 不要小瞧蛋壳, “以废治废、变废为宝”有妙招。综上可知, 该实验以项目为载体, 将“碳中和”的使命担当、团队合作精神、创新思维和环保意识与实验课程教学内容深度融合, 充分发挥学生的主体作用, 引导学生自主探究, 提升课程“两性一度”, 从而实现“立德树人”之目标。

## 6 结语

本文基于“双碳”背景和前沿科研成果, 开发了一个蛋壳基CaO制备、表征及碳捕集性能的设计性综合实验。学生通过文献调研了解碳捕集相关知识, 并进行实验方案设计与实践, 不仅加深了对多种仪器分析方法原理的理解, 而且学习了运用仪器分析技术解决实际问题的思路, 培养科研素养和实践能力。本实验的内容与国家“双碳”战略紧密相连, 既有利于激发学生的学习兴趣 and 热情, 又能引导学生关注科学前沿、关心国家发展。此外, 本实验以含钙废弃物为原料, 通过资源转化实现再利用, 更体现了“双碳”意识和“以废治废、变废为宝”的绿色化学理念。

## 参 考 文 献

- [1] 欧阳述昕, 高云翔, 范塬嫻, 王灿, 原弘. *大学化学*, **2024**, *39* (1), 218.
- [2] 胡国文, 汪宝堆. *云南化工*. **2023**, *50* (4), 117.
- [3] 许利刚, 李明光, 陈润锋. *大学化学*, **2023**, *38* (11), 180.
- [4] 王楠, 王芹, 王宏, 陈芳, 刘敏, 朱丽华. *大学化学*, **2023**, *38* (9), 218.
- [5] Salaudeen, S. A.; Acharya, B.; Dutta, A. J. *CO<sub>2</sub> Util.* **2018**, *23*, 179.
- [6] 叶竹, 杜涛, 荣军, 孙文强, 杨澈. *实验室研究与探索*, **2022**, *41* (10), 147.
- [7] 杨支秀, 鲁博, 郭丁丁, 吉泽宇, 季长江, 张国杰. *山东化工*, **2020**, *49* (18), 62.
- [8] 温嵩, 韩伟, 车春霞, 高海波, 朱建涛, 张峰. *精细化工*, **2022**, *39* (8), 1584.
- [9] 杨磊. 燃煤电厂烟气固碳研究[博士学位论文]. 天津: 南开大学, 2012.
- [10] 孙健. 高钙废弃物衍生吸收剂脱碳性能及其成型改性机制的研究[博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [11] 龚跃法, 刘红梅, 王宏, 陈芳. *基础化学实验-无机与分析化学分册*. 北京: 高等教育出版社, 2020: 162-165.
- [12] Li, Z. S.; Cai, N. S.; Huang, Y. Y.; Han, H. J. *Energy Fuels* **2005**, *19* (4), 1447.
- [13] 李海峰, 王强. *现代化工*, **2022**, *42* (10), 86.
- [14] Nawar, A.; Ali, M.; Khoja, A. H.; Waqas, A.; Anwar, M.; Mahmood, M. *J. Environ. Chem. Eng.* **2021**, *9* (1), 104871.
- [15] Wang, S. P.; Yan, S. L.; Ma, X. B.; Gong, J. L. *Energ. Environ. Sci.* **2011**, *4* (10), 3805.