◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

磷石膏硫钙回收耦合二氧化碳捕集技术研究进展

刘禹辰，马丽萍，杨　杰，戴取秀，何宾宾

（昆明理工大学 环境科学与工程学院，云南 昆明　650500）

［摘　要］磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的一种工业废弃物，大量堆积占用土地资源，同时对环境造成严重影响。介绍磷石膏产生与利用现状，总结磷石膏硫钙回收耦合二氧化碳捕集相关技术的研究进展，包括磷石膏氨法捕集二氧化碳技术、磷石膏低温分解渣捕集二氧化碳技术，以及磷石膏复合氧载体增强褐煤制合成气耦合二氧化碳捕集技术，旨在实现磷石膏中硫、钙等重要资源的有效回收利用，减少资源浪费并减轻对环境的污染，为缓解全球温室效应、推动可持续发展做出积极贡献。

［关键词］磷石膏；硫钙回收；二氧化碳捕集

［中图分类号］X781　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2024）12-0056-07

Research progress of sulfur and calcium recovery in phosphogypsum coupled with carbon dioxide capture technology

LIU Yuchen, MA Liping, YANG Jie, DAI Quxiu, HE Binbin

(*Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*)

Abstract: Phosphogypsum is an industrial waste generated during the wet-process phosphoric acid production, its large accumulation occupies land resources and has a serious impact on the environment. The current status of production and utilization of phosphogypsum is introduced, the research progress of calcium and sulfur recovery in phosphogypsum coupled with carbon dioxide capture related technologies is discussed in detail, including phosphogypsum ammonia method for capturing carbon dioxide, phosphogypsum low-temperature decomposition slag for capturing carbon dioxide, and phosphogypsum composite oxygen carrier enhanced lignite to produce syngas coupled with carbon dioxide capture technology. The aim is to realize the effective recycling of sulfur, calcium and other important resources in phosphogypsum, to reduce the waste of resources and pollution to the environment, and to make positive contributions to the mitigation of the global greenhouse effect and the promotion of sustainable development.

Key words: phosphogypsum; sulfur and calcium recovery; carbon dioxide capture

0　引言

磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的固体废弃物，其主要成分是$CaSO_4 \cdot 2H_2O$，同时还含有少量磷、氟、硅等杂质。随着磷化工产业快速发展，磷石膏排放量逐年增多，不仅占用了大量土地资源，还对环境造成了严重的污染[1-2]。因此，当前迫切需要解决的问题是如何有效地对磷石膏进行回收和再利用。硫钙回收是磷石膏资源化利用的重要途径之一，通过对磷石膏中硫钙资源的有效提取和利用，可以实现资源循环利用，从而减少对环境的负面影响[3]。同时，二氧化碳捕集技术是应对全球气候变化的关键技术之一，将磷石膏硫钙回收与二氧化碳捕集技术相结合，在实现废弃物资源化利用的同时，还可以减少二氧化碳排放，具有重要的经济和环境意义。近年来，人们对环境保护和可持续发展的关注度不断提高，磷石膏硫钙回收耦合二氧化碳捕集技术研究得到了广泛关注。许多学者和研究机构致力于开发高效、经济的耦合技术，以实现磷石膏的资源化利用和二氧化碳减排[4]。笔者旨在总结该领域的研究进展，介绍昆明理工大学固废资源化创新团队以及其他作者在此方面的研究成果，探

［收稿日期］2024-09-09

［作者简介］刘禹辰(2001-)，男，辽宁朝阳人，硕士研究生，主要从事固体废物处理与处置研究。E-mail：2248217310@qq.com

［通信作者］马丽萍(1966-)，女，云南昆明人，教授，博士生导师，主要研究方向为固废资源化。E-mail：lipingma_kmust@163.com

讨当前存在的问题和挑战，并对未来的发展趋势进行展望，为相关研究和应用提供参考。

1　我国磷石膏产生与利用现状

磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的副产物，一般来说，每生产磷酸 1 t，副产磷石膏 4.5 ~ 5.5 t。湿法磷酸生产主要是通过硫酸与磷矿石反应，生成磷酸和硫酸钙。硫酸钙在水中的溶解度较低，会以二水（或半水）硫酸钙的形式结晶析出，形成磷石膏 [5]。

当前磷石膏产生与利用现状具有以下特点。

（1）产生量与堆存量大。我国是世界上磷石膏产生量最大的国家之一。全球范围内，磷石膏的累计堆存量已经超过 60 亿 t，而我国的磷石膏累计堆存量达到了 8.7 亿 t，每年还会产生大约 8 000 万 t。2010—2022 年我国磷石膏产生和利用情况见图 1。2023 年我国磷石膏年产生量约 8 100 万 t，利用率为 55.6%，仅昆明市的 17 户湿法磷酸生产企业磷石膏产生量就达到 1 902.14 万 t。

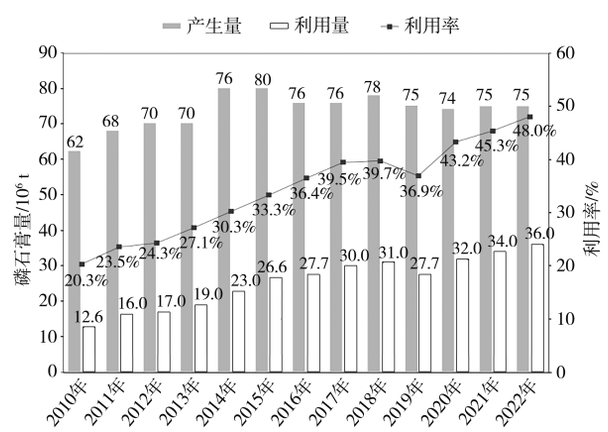

图 1　2010—2022 年我国磷石膏的产生和利用情况 [6-7]

Fig. 1　Production and utilization of phosphogypsum in China in 2010—2022

（2）地区分布集中。磷石膏主要集中在湖北、贵州、四川和云南等省份，这些地区的磷化工产业发达，磷石膏产生量较大 [5-7]。湖北省是磷石膏的重要产生地区，目前共有 31 家企业产生磷石膏，每年大约新增磷石膏 3 000 万 t，磷石膏堆存量约 3.07 亿 t；云南省在册的规模以上磷化工原料和产品制造企业有 113 家，每年产生磷石膏量较大，堆存量超过 2 亿 t [8-10]。

（3）政府对磷石膏利用支持力度大。国家对大宗固体废物的处理、处置与资源化利用给予了高度重视，并制定了一系列相关政策，为包括磷石膏在内的大宗固体废物的处理和处置工作明确了发展方向和路径。预计到 2025 年，建设大约 100 个“无废城市”，促进磷石膏等大宗工业固体废物在多个领域的规模化应用；到 2026 年，计划将全国磷石膏综合利用率提高到 65%，综合消纳量（包括综合利用量和无害化处理量）与产生量实现动态平衡；并计划在云贵川鄂皖等地打造 10 个磷石膏综合利用特色产业基地 [11-13]。

（4）应用领域广。当前磷石膏利用主要集中在作为产品销售或供应、建筑材料行业、化学工业、农业生产，以及磷矿山采空区回填等多个领域。在建材领域，磷石膏应用广泛，常用于制备水泥、石膏板、石膏砌块等 [14]；在化工领域主要是转化为其他硫形式利用，或者用于制备硫酸钙晶须等物质；在农业领域，可以作为土壤调理剂或缓释肥料来使用。此外，研究者也在不断探索一些新的应用，如无水石膏包装箱、磷石膏基储能材料等 [15]。

（5）行业竞争激烈。一些企业在磷石膏的综合利用上已经取得了一定的成效，但是这些综合应用技术项目投资金额相对较大，偏向低端产品，产品市场利用量小，且同质化严重，存在区域发展不平衡等问题。

（6）技术创新需求迫切。磷石膏中包含多种杂质，在进行综合利用之前，需要先进行预处理。但目前的处理技术仍存在如杂质多，处理成本高、效果不佳，品质不稳定，后延产品附加值低等问题 [1]。另外，由于不同地区的磷石膏成分存在显著差异，使得工艺参数难以实现统一标准化，在某些特定区域可能需要单独设计专门的处理工艺。因此，我们需要进一步强化技术创新，并积极推进关键共性技术的研究和攻关工作，研发新工艺、新设备、新产品，以提高磷石膏的综合利用水平和产品附加值 [16-17]。

（7）部分企业正在积极地进行磷石膏利用探索和尝试。贵州磷化（集团）有限责任公司将磷石膏应用于包装材料、矿山生态修复及建材制造等多个方面，2024 年 3 月将新型无水石膏基胶凝剂浆料引入磷矿井下充填作业，显著增强了矿山作业的安全性，有效促进了磷石膏的更大规模消耗。湖北宜化集团有限责任公司采取净化石膏制备建筑石膏粉、路基材料，生产高品质水泥缓凝剂及磷石膏制硫酸等多重手段，全面提高磷石膏在各个领域的综合利用效率和效果。安徽省司尔特肥业股份有限公司在 2022 年实现了 88 万 t 磷石膏副产品的生产，这些产品被广泛供应给下游企业，用于纸面石膏板、水泥

缓凝剂及抹墙石膏等产品的制造，有效促进了产业链的循环发展。

2 磷石膏硫钙回收耦合二氧化碳捕集技术研究进展

2.1 磷石膏氨法捕集二氧化碳技术研究进展

磷石膏氨法捕集二氧化碳并制备碳酸钙的技术主要是建立在化学反应的基础上。在碱性条件下（如氨水存在时），磷石膏中的$CaSO_4$溶解并释放出钙离子。随后，这些钙离子与通入的二氧化碳发生反应，形成碳酸钙沉淀[18]。具体反应过程可能涉及多个步骤，包括磷石膏的溶解、钙离子的释放、二氧化碳的吸收以及碳酸钙的生成和沉淀，其主要反应如下：

$$CO_2+2NH_3+CaSO_4\cdot 2H_2O \longrightarrow (NH_4)_2SO_4+CaCO_3\downarrow+H_2O。(1)$$

彭雨惠[19]在三相流化床中，通过控制磷石膏粒径、氨水量、反应时间、反应温度等条件，对磷石膏捕集二氧化碳制备碳酸钙的机制进行分析，并研究这一过程对硫酸钙固碳量以及硫酸钙转化率的具体影响。研究结果表明，在磷石膏颗粒直径为0.12 mm、氨水使用量为25 mL、反应时间持续90 min以及环境温度保持在30 ℃的情况下，硫酸钙的转化效率能够达到99.3%。此外，还利用X射线衍射仪以及扫描电子显微镜等多种表征技术对固体产物碳酸钙进行了详细分析，探究不同杂质对其晶体结构以及转化率和固碳量的具体影响（见表1）。具体而言，杂质Na^+、Mg^{2+}、P的存在会降低转化率和固碳量，而F^-的影响则呈现出一种复杂的趋势：起初，随着F^-含量增加，转化率和固碳量均有所提升；然而，当w(F)超过2%时，转化率和固碳量均呈现下降趋势。在产物晶型方面，Na^+和P的影响相对有限，而Mg^{2+}和F^-则表现出较强的调控作用。加入少量的Mg^{2+}能够促进碳酸钙从球霰石型转变成方解石型，但是当$w(Mg^{2+})$增加到超过5%的时候，其晶体结构又会反转回球霰石型。当$w(F^-)$超过0.5%的时候，碳酸钙的晶体结构会从球霰石型转变为方解石型。此外，杂质还显著影响了碳酸钙的形貌特征。F^-的加入使得碳酸钙的形态变得更加规则，但是颗粒的大小分布并不均匀。P杂质导致碳酸钙形貌极不规则，并伴有严重的团聚现象。Mg^{2+}的影响则表现为：在低浓度时（少量添加），会促进形成形状规则的方形方解石型碳酸钙；而当质量分数增至10%时，碳酸钙晶体的聚集会变得更加严重，颗粒增大，并且会伴随着许多细小颗粒的产生。

表1 不同杂质对应的转化率和固碳量[19]

Table 1 Conversion rates and carbon sequestration corresponding to different impurities

杂质	w/%	转化率/%	固碳量①/g
NaCl	5.0	93.80	2.06
NaCl	10.0	94.00	2.07
NaCl	15.0	94.69	2.08
KF	0.1	93.53	2.06
KF	0.5	90.20	2.09
KF	1.0	97.95	2.16
KF	2.0	96.30	2.11
MgO	1.0	93.10	2.04
MgO	5.0	91.00	2.01
MgO	10.0	89.50	1.97
P_2O_5	5.0	87.43	0.93
P_2O_5	10.0	83.15	0.88
P_2O_5	15.0	80.86	0.85
空白		95.60	2.10

注：①每5 g石膏固定CO_2的质量。

左启银等[20]使用化工模拟软件Aspen Plus构建了一个用于预测NH_3–CO_2–H_2O体系气液平衡的模型，认为低温虽可减少尾气NH_3含量，但受体系汽液平衡限制，仍需专设尾气脱氨装置。此外，还探讨了磷石膏浆脱氨湍球塔的作用，以及磷石膏与尾气中NH_3和二氧化碳的反应机制，避免了额外能耗和复杂工艺的需求。

李季等[21]基于化学活性颗粒强化气液吸收机制，建立了磷石膏悬浮液强化氨法烟气CO_2捕集模型，并进行了实验验证。结果表明增强因子随颗粒固含量增加而增大，随搅拌转速变化不明显，颗粒固含量和溶解速率是影响增强因子的关键因素，模型计算值与实验值吻合度高，为二氧化碳矿化磷石膏气液吸收过程设计提供了宝贵的参考价值。

磷石膏氨法捕集二氧化碳技术能减少温室气体排放和磷石膏污染，实现资源循环利用。在技术创新方面，建立的传质模型为其发展提供了理论支持。然而，该技术需要使用氨水作为原料，在考虑其运输和存放问题的同时，存在着模型需完善以及大规模应用有待验证等问题，需要在技术完善和工业化应用等方面做进一步的研究和努力。

2.2 磷石膏低温分解渣捕集二氧化碳技术研究进展

磷石膏低温分解渣捕集二氧化碳技术是一种利用工业废弃物磷石膏低温分解过程产生的分解渣来捕集和固定二氧化碳的技术。与传统的高温分解不同，低温分解旨在通过较低的温度和特定的工艺条

件，促使磷石膏中的硫酸钙发生分解反应，生成以CaS为主要成分的分解渣。这一过程通常需要与还原剂（如煤粉、焦炭等）混合，并在氮气等惰性气体氛围中进行，以避免氧化反应的发生。作为磷石膏低温分解的产物，在特定的反应条件下（如温度、压力、液固比等），CaS能够与二氧化碳充分反应，实现二氧化碳的有效捕集。这一技术旨在实现废渣的资源化利用和温室气体的减排，具有显著的环保和经济价值。磷石膏低温分解渣捕集二氧化碳技术路线见图2。

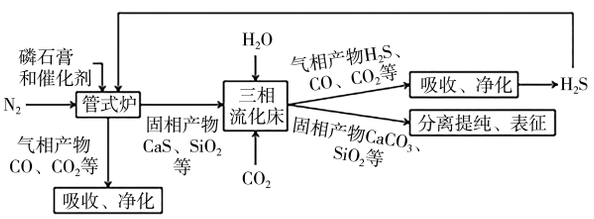

图2　磷石膏低温分解渣捕集二氧化碳技术路线[22]

Fig. 2　Technology route for carbon dioxide capture with phosphogypsum cryogenic decomposition slag

闫贝[22]深入探讨了磷石膏在低温条件下的催化分解过程，将CO作为还原剂，通过Ellingham能图和FactSage热力学软件分析，确定Fe、Ni为优先级催化剂，后经过实验对比不同催化剂的效果，发现Fe–Ni复合催化能够有效降低磷石膏的分解温度，$FeCl_3$的最佳浸渍浓度为0.7 mol/L，$NiCl_2$的最佳浸渍浓度为0.3 mol/L，此时磷石膏起始分解温度降至590 ℃，分解温度区间降至590 ~ 800 ℃，磷石膏失重为39.70%。此外，还深入研究了磷石膏在低温条件下的催化分解机制，建立了相应的催化反应体系，并由此揭示了在磷石膏低温催化分解过程中，钙和硫的迁移与转化路径。研究显示，在磷石膏的分解过程中，存在着一系列复杂的气–固相反应、固–固相反应。$CaSO_4$与CO反应生成CaO、SO_2和二氧化碳的反应与$CaSO_4$与CO反应生成CaS和二氧化碳的反应为平行竞争反应，钙和硫的存在形式发生变化的温度范围是在1 000 ~ 1 050 ℃，CO与$CaSO_4$的摩尔比保持在（2.50 ~ 2.75）:1.00。基于此，运用缩芯反应模型来解释磷石膏在低温下的催化反应过程（见图3），反应首先发生在磷石膏与二氧化碳接触的表面及其间隙中，随着反应的持续进行，磷石膏不断地分解和减少，反应区域也逐渐缩小，最终仅剩下磷石膏的核心部分，直到反应彻底完成，磷石膏被完全消耗殆尽。

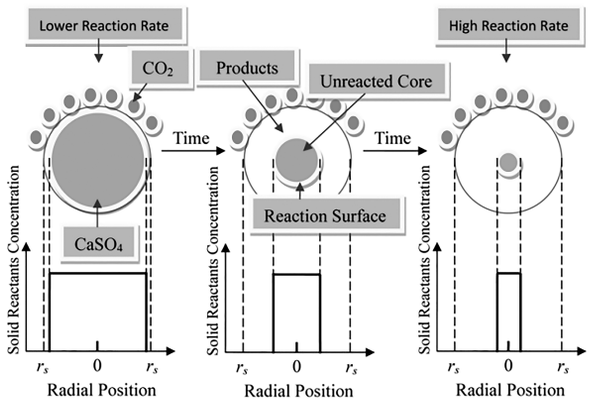

图3　磷石膏低温催化分解缩芯反应模型[23]

Fig. 3　The schematic diagram of shrinking core model

在此基础上，ZHAO等[23–25]选择三相流化床反应器将磷石膏分解产物用作钙基吸收剂，耦合CO_2捕集技术，探讨了反应温度、压力以及液固体积质量比等多个关键因素对二氧化碳捕集效率的影响，研究了反应产物中H_2S的浓度与液固体积质量比之间的内在关系。实验结果显示，当液固体积质量比降低时，分解渣在捕集二氧化碳的过程中表现出了更快的捕集速率和更高的捕集效率，伴随产生的H_2S气体量也显著增加。此外，该研究还将捕集实验过程中所产生的H_2S气体直接作为磷石膏热分解过程中的辅助还原剂来使用，解决了H_2S这一有毒有害气体的排放问题，避免了其对环境和人体健康的潜在危害，实现了实验物料在体系内的循环利用，显著提升了资源利用效率和环保效益。不仅为磷石膏的资源化利用开辟了新途径，也为二氧化碳减排技术提供了新的思路和方法。

磷石膏低温分解渣捕集二氧化碳技术能够有效地捕集二氧化碳，降低大气中二氧化碳的浓度。磷石膏低温分解渣中的钙等成分，作为钙基吸收剂来捕集二氧化碳，降低了捕集成本，实现了以“废”治“废”的目的，为减少工业过程中的二氧化碳排放提供了新的解决方案。

2.3　磷石膏复合氧载体增强褐煤制合成气耦合二氧化碳捕集技术

磷石膏复合氧载体增强褐煤制合成气耦合二氧化碳捕集技术旨在通过利用磷石膏作为复合氧载体，在褐煤气化过程中提高合成气（主要为CO和H_2）的产量，同时还可减少二氧化碳的排放。通过磷石膏与过渡金属（如铜、铁、镍等）复合，制备成复合氧载体。这些复合氧载体在化学链气化过程中释放晶格氧，促进褐煤的氧化和气化，而避免二

氧化碳的产生，并且采用气化渣捕集二氧化碳实现二氧化碳的减排并获得硫酸原料 H_2S。磷石膏复合氧载体增强褐煤制合成气耦合二氧化碳捕集技术工艺流程见图 4。

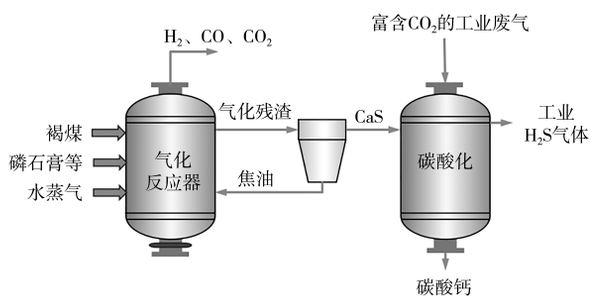

图 4　磷石膏复合氧载体增强褐煤制合成气耦合二氧化碳捕集技术工艺流程

Fig. 4　Flowchart of phosphogypsum composite oxygen carrier enhanced lignite to syngas coupled carbon dioxide capture technology

YANG 等[26] 探讨了使用磷石膏作为氧载体在褐煤化学链气化过程中的应用情况。通过热力学分析、理论计算以及实验验证的方法，揭示了磷石膏及其复合氧载体（如负载 Ce、Fe、Ni、Cu 元素）对褐煤气化性能的影响。研究指出，磷石膏与褐煤的摩尔比、反应温度、水蒸气含量等条件显著影响合成气的生成，特别是 H_2 和 CO 的产量。此外，深入分析了 Cu/磷石膏复合氧载体的反应机制，包括还原与氧化过程的动力学及机制，探讨了流态化化学链气化的可行性。研究结果表明，磷石膏复合氧载体不仅能有效促进褐煤气化，实现清洁燃烧，还可以促进磷石膏的资源化循环利用，为实现褐煤的高效利用以及环境保护提供了全新的方法和途径。在此基础上，对减少二氧化碳排放和实现二氧化碳捕集的可能性及相关影响因素进行分析。具体而言，磷石膏直接作为氧载体时，可在褐煤化学链气化制备合成气过程中参与消耗二氧化碳的反应，有利于减少二氧化碳排放。负载过渡金属的复合氧载体，如 Fe/磷石膏、Ni/磷石膏和 Cu/磷石膏，也会在化学链气化过程中对二氧化碳的生成造成影响，为二氧化碳的捕集和控制提供了参考。

PAN 等[27] 探讨了钢渣/磷石膏复合氧载体在褐煤化学链气化（CLG）技术中制备富氢合成气的过程。研究表明，CLG 技术能够有效实现二氧化碳的内部分离与捕集，显著降低碳排放，符合碳捕集、封存与利用（CCS）的战略需求[27]。该技术在捕获并转化低成本的二氧化碳资源供其他领域使用的同时，还推动了碳中和目标的实现。具体而言，在气化过程中，褐煤经气化产生多种气体组分，磷石膏作为氧载体之一，与褐煤及其气化产物发生还原反应。同时，钢渣与磷石膏相互作用生成 $Ca_2Fe_2O_5$，该物质促进褐煤及其气化产物的反应，有效提升了富氢合成气产量，同时还可作为钙基吸收剂，实现二氧化碳的内部分离与捕集，从而大幅度减少碳排放量。此外，钢渣的引入还能将硫元素以 FeS 的形式固定下来，显著减少了 H_2S 的排放，实现了固硫的环保目标。研究还发现，适当提高反应温度有助于优化 CLG 过程，但温度过高会抑制 $Ca_2Fe_2O_5$ 的生成，进而影响反应效率。值得注意的是，增加钢渣的含量虽能提升氢气浓度和固硫效果，但也会带来能耗增加的问题。另外，调节褐煤与水蒸气的比例对 CLG 过程及气体转化效率具有积极影响。

ZHANG 等[28-29] 研究化学链气化渣捕集二氧化碳的反应机制，见图 5。采用三相流化床代替传统的釜式反应器作为碳酸钙的合成反应器，研究表明，降低温度和增加二氧化碳分压有利于二氧化碳的吸收，通过将少量碳酸钙产品煅烧获得氧化钙，将其添加到水解溶液中，可以提高液相捕集二氧化碳的效率。此外，建立了反应器内碳酸钙结晶颗粒粒径分布的群体平衡模型，并通过特征线方法结合积分矩方法耦合对模型求解以确定结晶过程动力学模型，确定结晶的成核、成长动力学参数。

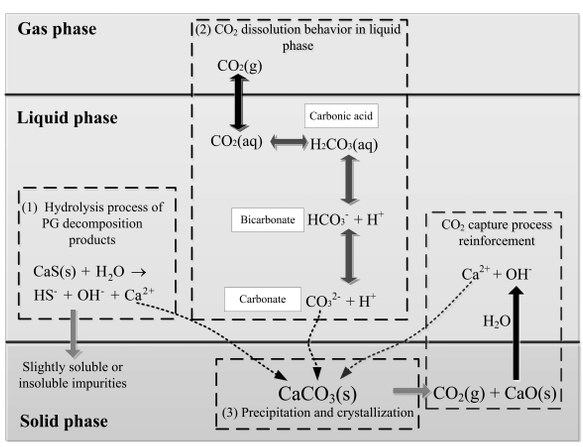

图 5　褐煤化学链气化渣捕集二氧化碳反应机制

Fig. 5　Reaction mechanism of carbon dioxide capture with chemical chain gasification slag

磷石膏复合氧载体增强褐煤制合成气耦合二氧化碳捕集技术将磷石膏作为复合氧载体应用于褐煤制合成气过程，为磷石膏的处理提供了新的途径。同时实现了煤炭资源的高效转化，为煤炭清洁利用和工业废弃物处理提供了新的思路和方法。

3　展望

磷石膏硫钙回收耦合二氧化碳捕集技术具有重要意义，展现出多方面的优势。该技术在实现磷石膏中硫、钙等重要资源的有效回收利用，显著降低资源浪费并减轻对环境污染的同时，还可以通过捕捉减少二氧化碳排放，对缓解全球温室效应、推动可持续发展战略具有积极作用。此外，该技术还能有效缓解磷石膏堆积对生态环境的潜在威胁，带来显著的环保效益。从经济层面看，它不仅为企业开辟了新的收入来源，还可以获得政府的政策扶持与优惠，进一步提升了其经济价值。这一创新技术是解决当前环境和资源问题的有效途径，更代表了技术革新的新方向，为相关领域的发展提供了宝贵的思路与启示[21]。然而，值得注意的是，该技术目前尚未建立完整的工程示范，需要科研人员与产业界共同努力，持续进行技术研发与优化，以提升其运行效率与稳定性，推动该技术的落地应用与普及。

[参考文献]

[1] 陈攀,李梦迪,胡磊,等.磷石膏资源化利用的现状、方法、趋势和挑战[J].广东化工,2024,51(14):68-70.
CHEN P, LI M D, HU L, et al. The Current Situation, Methods, Trends, and Challenges of Resource Utilization of Phosphogypsum [J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(14): 68-70.

[2] 陈霞,周显,邓闪闪,等.磷矿固废污染物释放与扩散研究现状综述及展望[J/OL].长江科学院院报.https://link.cnkinet/urlid/42.1171.TV.20240409.1221.012.
CHEN X, ZHOU X, DENG S S, et al. The-State-of-Art and Prospect of Researches on Release and Diffusion of Phosphate Solid Wastes [J/OL]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute. https://link.cnkinet/urlid/42.1171.TV.20240409.1221.012.

[3] 邓华,侯硕旻,李中军,等.磷石膏综合利用现状及展望[J].无机盐工业,2024,56(1):1-8,22.
DENG H, HOU S M, LI Z J, et al.Current situation and prospect of comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(1): 1-8, 22.

[4] 高志刚,王靖宇,罗纯仁,等.我国脱硫石膏的综合利用现状与展望[J].工业安全与环保,2024,50(1):103-106.
GAO Z G, WANG J Y, LUO C R, et al. Present situation and prospect of comprehensive utilization of desulfurization gypsum in China [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2024, 50(1): 103-106.

[5] YANG J, HAN C Y, SHAO L, et al. Chemical looping gasification of lignite to syngas using phosphogypsum: Overview and prospects [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 445: 141329.

[6] 胡敏.我国磷矿产业现状与发展趋势[J].磷肥与复肥,2023,38(11):1-5.
HU M. Current situation and development trends of phosphate rock industry in China [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(11): 1-5.

[7] WANG S H, JIN H X, DENG Y, et al. Comprehensive utilization status of red mud in China: a critical review [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289: 125136.

[8] 李晓丹,王春连,黄可可,等.中国石膏分布、类型、产业应用现状及找矿前景分析[J/OL].中国地质.https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240819.1414.009.
LI X D, WANG C L, HUANG K K, et al. Distribution, origin, industrial application status and prospecting prospect of gypsum in China [J/OL]. Geology in China. https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240819.1414.009.

[9] 李浩洋,胡波,童军.磷石膏在工程填料上的研究现状[J].长江技术经济,2024,8(1):83-89.
LI H Y, HU B, TONG J. Research Status of Phosphogypsum Used for Engineering Filler [J]. Technology and Economy of Changjiang, 2024, 8(1): 83-89.

[10] 郭旭东,张晖,钟晋,等.磷石膏制备建筑材料现状及技术路线分析[J].工程研究——跨学科视野中的工程,2023,15(4):313-325.
GUO X D, ZHANG H, ZHONG J, et al. Analysis of Current Situation and Technical Route of Building Materials Prepared by Phosphogypsum [J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(4): 313-325.

[11] 王欢,康玲,牟廷敏,等.建筑固废材料资源化再生利用的研究现状[J].四川水泥,2023(12):118-120.
WANG H, KANG L, MOU T M, et al. Current Research Status of Resourceful Recycling of Building Solid Waste Materials [J]. Sichuan Cement, 2023(12): 118-120.

[12] WU F H. The treatment of phosphogypsum leachate is more urgent than phosphogypsum [J]. Environmental Research, 2024, 264(Part 1): 119849.

[13] ASFAS F, ELGHALI A, ABOULAICH A, et al. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? [J]. Science of the Total Environment, 2024, 908(15): 168196.

[14] JIA W K, LI J C, SHEN C P, et al. Research advances in phosphogypsum flotation purification: Current status and prospects [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 354(Part 6): 129244.

[15] JIANG Z Y, SUN X P, LUO Y Q, et al. Recycling, reusing and environmental safety of industrial by-product gypsum in construction and building materials [J]. Construction and Building Materials, 2024, 432: 136609.

[16] 姜国庆,田华,高璐阳.工业固废磷石膏综合治理现状及对策[J].云南化工,2024,51(7):4-7.
JIANG G Q, TIAN H, GAO L Y. Present Situation and Countermeasures of Comprehensive Treatment of Industrial Solid Waste Phosphogypsum [J]. Yunnan Chemical Technology, 2024, 51(7): 4-7.

[17] 蒋太光,杜丽梅,赵雅.云南省化工产业现状简析及发展方向探讨[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(6):6-10.
JIANG T G, DU L M, ZHAO Y. Current situation and development direction of chemical industry in Yunnan province [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(6): 6-10.

[18] 谢龙贵,马丽萍,张伟,等.石膏类工业固废固碳技术研究进展[J].磷肥与复肥,2022,37(1):32-35.

XIE L G, MA L P, ZHANG W, et al. Research progress of carbon sequestration technology of industrial solid waste gypsum[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37(1): 32-35.

[19] 彭雨惠.磷石膏氨法捕集CO_2制备碳酸钙机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2019.
PENG Y H. Study on Mechanism of Preparation of Calcium Carbonate by Phosphogypsum Ammonia Method for CO_2 Capture [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.

[20] 左启银,姬存民,朱家骅,等.利用磷石膏净化氨法CO_2捕集尾气[J].四川化工,2014,17(3):9-12.
ZUO Q Y, JI C M, ZHU J H, et al. Using Phosphogypsum to Clean Exhaust Gas from CO: Capture by Aqueous Ammonia[J]. Sichuan Chemical Industry, 2014, 17(3): 9-12.

[21] 李季,周加贝,朱家骅,等.磷石膏强化氨法CO_2捕集机理与模型[J].化工学报,2015,66(8):3218-3224.
LI J, ZHOU J B, ZHU J H, et al. Mechanism and model of ammonia-based carbon dioxide trapping enhanced by gypsum particles[J]. CIESC Journal, 2015, 66(8): 3218-3224.

[22] 闫贝.磷石膏低温催化分解及过程物相迁移研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.
YAN B. Mechanism analysis of phosphogypsum decomposition with catalyst in low temperature and Ca, S transformation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.

[23] ZHAO S Q, MA L P, YANG J, et al. Mechanism of CO_2 capture technology based on phosphogypsum reduction thermal decomposition process [J]. Energy & Fuels, 2017, 31(9): 9824-9832.

[24] YAN B, MA L P, XIE L G, et al. Reaction mechanism for iron catalyst in the process of phosphogypsum decomposition[J].Ind Eng Chem Res, 2013, 52(49): 17383-17389.

[25] ZHAO S Q, MA L P, WANG D D, et al. Sulfur-Looping Mechanism for the Two-Step Cyclic Process of Fluidized-Bed CO_2 Capture and Phosphogypsum Thermal Decomposition Assisted by H_2S[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(11): 12582-12593.

[26] YANG J, DONG S L, MA L P, et al. Review on high-value utilization of phosphogypsum: Utilization of calcium and oxygen resources present in phosphogypusm [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 344: 127246.

[27] PAN Q H, MA L P, DU W, et al. Hydrogen-enriched syngas production by lignite chemical looping gasification with composite oxygen carriers of phosphogypsum and steel slag[J]. Energy, 2022, 241: 122927.

[28] ZHANG W, ZHANG F Z, MA L P, et al. An efficient methodology to use hydrolysate of phosphogypsum decomposition products for CO_2 mineral sequestration and calcium carbonate production[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259: 120826.

[29] ZHANG W, ZHANG F Z, MA L P, et al. CO_2 capture and process reinforcement by hydrolysate of phosphogypsum decomposition products[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2020, 36: 253-262.

****

欢迎订阅2025年《生态产业科学与磷氟工程》（原《磷肥与复肥》）

经国家新闻出版署批准（国新出审〔2024〕609号），《磷肥与复肥》更名为《生态产业科学与磷氟工程》，国内统一连续出版物号CN 41-1471/TQ，国际标准刊号ISSN 2097-4566。《生态产业科学与磷氟工程》（月刊）由郑州大学主管，郑州大学、中国磷复肥工业协会主办，郑州大学出版社有限公司出版，是中国磷复肥工业协会会刊，被美国化学文摘（CA）摘录；荣获第五至八届“全国石油和化工行业优秀期刊一等奖”、2015年中国高校技术类优秀期刊、2016年中国高校优秀科技期刊、2020年全国石油和化工行业百强期刊。更名后，期刊栏目及内容将传承、覆盖、包容《磷肥与复肥》，并扩展、提升到相关资源加工流程型产业生态化转型升级、技术进步；刊载绿色低碳循环发展政策技术体系创新成果，反映磷氟元素为代表的资源加工传统产业生态化转型动态，促进磷氟等资源产业耦合，加快生态产业学术技术交流和成果转化，推动资源产业绿色低碳高质量发展。主要栏目：简评与要讯，新质生产力与产业态势，研究开发与生态设计，磷及关联产业工艺创新，提质增效产品创制技术，磷氟产业耦合与高端材料创制，减污降碳协同与资源全元素高效利用，健康保育与环境修复，产业赋能与业态融合，其他。

《生态产业科学与磷氟工程》主要面向以磷氟（包括但不限于）元素为代表的资源加工流程型工业规划设计、生产销售、设备制造及农业应用领域的企业管理、工艺技术、产品研发和应用等部门，管理机关、学会协会、制造企业、高校科研设计、农业农资等单位集体和个人读者。

期刊为大16开版本，每月15日出版。全国各地邮局（所）均可订阅，邮发代号36—189。编辑部常年办理订阅手续。

邮局订阅：纸质版每期定价20元，全年（12期）定价240元。

编辑部订阅：纸质版含挂号邮费每期定价23元，全年（12期）定价276元（若需快递请与编辑部联系）；PDF版每期定价65元，全年定价780元。

联系方式：电话 0371—6388 7309，6778 1991；电子邮箱 espfe2024@126.com；网址 lfyf.cbpt.cnki.net。