节能环保与综合利用

钢渣低液固比湿法矿化固定 CO_2 的工艺优化与固碳性能

金秋彤，房洪彬，张小霞，龚志军
（内蒙古科技大学 能源与环境学院，内蒙古 包头 014010）

摘要：在“双碳”战略目标背景下，矿化固定技术作为一种重要的 CO_2 减排途径日益受到重视。作为一种富含碱性物质的钙基工业固废，钢渣已成为固定 CO_2 的理想廉价原料。本文采用低液固比湿法矿化方法研究不同液固比、温度及压力对固碳率的影响及最佳工艺条件，并采用 XRD、XRF 等手段分析钢渣和固碳产物的矿相组成和微观结构。结果表明：低液固比湿法矿化方法通过降低水耗与能耗，强化反应的传质效率，协同实现经济高效的钢渣固废资源化与 CO_2 封存。受水膜厚度的影响，液固比存在最优值。100 ℃、0.85 MPa、450 r/min 条件下，当液固比由 0.2 mL/g 提升至 0.4 mL/g 时，固碳率由 11.8% 提升到 21.2%，继续提高液固比至 1 mL/g 后固碳率反而下降为 9.3%，说明适当的水膜厚度有助于传质过程；固碳率随着温度、压力的升高呈现增加的趋势，在液固比为 0.6 mL/g 的条件下，当温度由 25 ℃提升至 100 ℃时，固碳率由 4.8% 提升至 20.9%，压力由 0.85 MPa 提升至 2.85 MPa，固碳率由 20.9% 提升至 27.6%，过高的温度及压力会导致固碳率的增幅下降及能耗增加。综合来看，在反应温度为 100 ℃、液固比为 0.6 mL/g、压力为 2.85 MPa、时间为 1 h 及搅拌速率为 450 r/min 的最优工艺组合条件下，钢渣的固碳率为 27.6%，即最大固碳量为 276 g/kg。

关键词：低液固比湿法；钢渣；矿化封存 CO_2；水膜；溶解度
中图分类号：X757 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)02－0108－07
doi：10.13403/j.sjqt.2026.02.035

Process optimization and carbon sequestration performance of CO_2 fixation by low liquid-solid ratio wet process mineralization of steel slag

JIN Qiutong, FANG Hongbin, ZHANG Xiaoxia, GONG Zhijun
(School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In the context of the “dual carbon” strategic goal, mineralization fixation technology has received increasing attention as an important CO_2 emission reduction pathway. As a calcium-based industrial solid waste rich in alkaline substances, steel slag has become an ideal and inexpensive raw material for CO_2 fixation. In this paper, the effects of different liquid-solid ratios, temperature and pressure on carbon sequestration rate and the optimal process conditions are studied by low liquid-solid ratio wet process mineralization method, and the phase composition and microstructure of steel slag and carbon sequestration products are analyzed by XRD and XRF. The results show that the low-liquid-solid radio wet process mineralization method synergistically realizes cost-effective steel slag solid waste recycling and CO_2 storage by reducing water consumption and energy consumption and enhancing the mass transfer efficiency of the reaction. Affected by the thickness of the water film, there is an optimal value of liquid-solid ratio. Under the conditions of 100 ℃, 0.85 MPa, and 450 r/min, when the liquid-solid ratio is increased from 0.2 mL/g to 0.4 mL/g, the carbon sequestration rate is

收稿日期：2025－07－31；**修回日期**：2025－11－20
基金项目：国家自然科学基金地区科学基金资助项目(22068029)；内蒙古自然科学基金资助项目(2022QN05015)
作者简介：金秋彤(2001—)，女，硕士研究生，从事工业烟气碳减排方面的研究。
通信作者：龚志军(1977—)，男，博士，副教授，从事洁净燃烧、烟气净化方面的研究。

increased from 11.8% to 21.2%. However, when the liquid-to-solid ratio is further increased to 1 mL/g, the carbon sequestration rate is decreased to 9.3%, indicating that an appropriate thickness of the water film is beneficial for the mass transfer process. The carbon sequestration rate shows an increasing trend with rising temperature and pressure. For a liquid-solid ratio of 0.6 mL/g, when the temperature is increased from 25 ℃ to 100 ℃, the carbon sequestration rate is increased from 4.8% to 20.9%; when the pressure is increased from 0.85 MPa to 2.85 MPa, the carbon sequestration rate is increased from 20.9% to 27.6%. However, excessively high temperatures and pressures can lead to a decrease in the increase in carbon sequestration rate as well as an increase in energy consumption. In summary, under the optimal process combination of reaction temperature of 100 ℃, reaction liquid-solid ratio of 0.6 mL/g, reaction pressure of 2.85 MPa, reaction time of 1 h and stirring rate of 450 r/min, the carbon sequestration rate of steel slag is 27.6%, that is, the maximum carbon sequestration is 276 g/kg.

Key words: low liquid-solid ratio wet process; steel slag; mineralization and storage of CO_2; water film; solubility

随着全球范围内工业化进程的深化，温室气体排放持续增加，进一步增强了温室效应。CO_2作为影响最大的温室气体，深刻影响着生态系统的稳态机制。“双碳”战略目标背景下，钢铁领域已是实施低碳化转型、减少碳排放的关键环节[1]。CO_2矿化封存技术在助力钢铁行业达成碳减排目标方面显得尤为关键，有望在未来展现出不可替代的重要价值[2-3]。矿物矿化封存技术最早由SEIFRITZ[4]提出，是指 CO_2 与蛇纹石等天然矿物[5]或钢渣[6]、粉煤灰[7]等工业废弃物中的含钙/镁离子的碱性物质发生反应，将其固化为热力学稳定的碳酸盐矿物，从而实现 CO_2 的永久性封存。相较天然矿物，工业固废产品的堆积量大且其中碳化活性成分较为丰富，该资源逐渐成为矿物固碳的首选原料。该方法不仅能将废气中 CO_2 固定，还能将固体废弃物利用起来进而达到“以废治废”的效果。

我国作为钢铁生产大国，2024 年粗钢产量达 10.05 亿吨，约占全球总产量的 53.9%，且每生产 1 t 钢渣将会伴随产生 0.15～0.25 t 钢渣的副产物[8]。但钢渣的综合利用率长期偏低，巨量钢渣的露天堆存不仅污染周边土壤与地下水，还长期占用大量宝贵的土地资源[9]。钢渣中高含量的碱土金属氧化物 CaO、MgO 等的质量分数通常为 30%～60%，具有更高的反应活性，可高效实现 CO_2 的矿物矿化封存。采用钢渣捕获 CO_2，不仅省去了复杂冗余的操作流程，还可回收具有高附加值的产品，进而在经济层面拥有更为突出的竞争优势[10]。钢渣矿化过程中的温度、压力、液固比等均会对固碳效果产生一定的影响。CHANG 等[11]的研究表明，温度升高可以加速矿化进程，提升固碳效果。YADAV 等[12]发现在同等条件下，从室温升至 90 ℃时，钢渣的固碳量提高了 40 g/kg。SU 等[13]在反应温度为 100 ℃的条件下将 CO_2 的压力从常压升高至 30 MPa，CO_2 的吸收量增长 3%。在直接矿化法中，液固比会影响钢渣颗粒与水的接触程度，并对液相中的离子浓度和反应的平衡性产生影响。赵静瑞[14]发现，直接干法矿化的转化率并不高，当液固比为 0 mL/g 时，矿化动力学过程缓慢，反应过程中需要更高的能量。国内外许多研究人员倾向采用液固比为 5～20 mL/g 进行钢渣固碳研究。ZHANG 等[15]采用液固比为 1∶10、反应温度为 60 ℃、时间为 60 min 时，得到固碳量为 16 kg/t。LEVENTAKI 等[16]将固液比控制在 50～200 g/mL，反应 24 h 后固碳量可达 220.0 kg/t。但高液固比工艺存在高水耗、产物干燥、能耗大以及富余废水污染等风险[17]。

截至目前，针对低液固比条件下钢渣矿化过程的反应特性与工艺优化研究仍相对有限。为此，本文开展低液固比条件下反应温度、反应压力、液固比工况对钢渣固碳率的影响研究，并对其影响程度及规律进行探究，为提高该工艺固碳率提供借鉴与参考。

1　试验部分

1.1　试验原料

试验原料来自包钢炼钢厂的转炉钢渣，其化学成分表如表 1 所示。由表 1 可知，钢渣的主要成分包括 CaO、SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3，三者的质量分数总和在 85% 以上。该原料中含有大量可用于

矿化固碳的 CaO，属于工业富钙原料，可用于矿化固碳。因此，将原料研磨成粉末后进行后续的矿化试验。试验采用钢瓶高纯 CO_2 气体供气，其 CO_2 体积分数为 99.99%。液体采用去离子水。

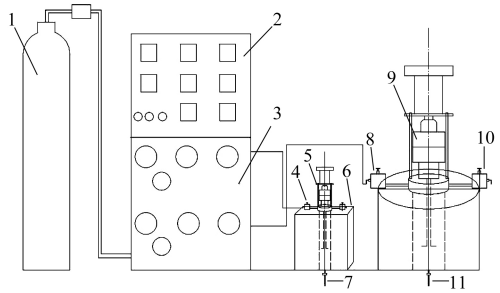
表 1 钢渣的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of the steel slag

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	其他
50.07	28.12	10.17	4.34	1.47	5.83

1.2 试验方法

为进一步分析钢渣固碳的可行性及探究其影响因素，开展矿化试验。试验采用 HAYX-2 型反应釜进行，该设备由 CO_2 气瓶、仪表箱、高压反应釜、显示器组成。矿化试验装置如图 1 所示。试验过程中，首先用 CO_2 吹扫反应器以除去高温高压反应釜内残留的空气气体，并完成气体气密性检验。将 10 g 钢渣粉与去离子水按照不同的液固比进行混合，将其放入高温高压大反应釜(容积为 500 mL)内。随后设定反应温度，打开加热器，待反应釜温度达到设定温度后，通入一定压力的 CO_2 气体开始试验。试验采用 X 射线衍射仪(型号为 Rigaku SmartLab SE)定性分析不同阶段钢渣的化学成分，采用扫描电子显微镜(型号为 ZEISS Sigma 300)对钢渣的形貌结构进行观测。



1—CO_2 气瓶；2—温度、压力显示表；3—压力阀；
4、8—反应釜进气口；5、9—反应釜搅拌器；
6、10—反应釜排气口；7、11—反应釜泄料口。

图 1 矿化装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the mineralization device

1.3 反应机理

低液固比矿化是在干法反应基础上加入液相，形成气－液－固三相反应。碳化反应的各个阶段主要包括：CO_2 与液相中的水分子相互作用，形成碳酸；随后钢渣中的 Ca^{2+} 通过溶解过程从固相进入液相，并在其中发生扩散；最后 Ca^{2+} 与 CO_3^{2-} 结合，最终沉淀析出 $CaCO_3$。碳化反应如式(1)～(3)所示。

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \quad (1)$$

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (2)$$

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (3)$$

钢渣的固碳率测定采用碳化增重法。该方法需测定固碳反应前后钢渣粉的干燥质量，并依据式(4)、(5)分别计算固碳量及固碳率。

$$m(CO_2) = m_{fin} - m_{ini} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{m(CO_2)}{m_{ini}} \times 100\% \quad (5)$$

式中：m_{fin} 为钢渣矿化前且经过干燥后的质量，kg；m_{ini} 为钢渣矿化后且经过干燥后的质量，kg；$m(CO_2)$ 为固碳量；ω 为固碳率，%。

2 结果与讨论

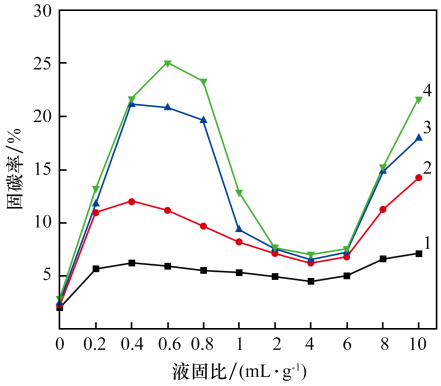
2.1 工艺参数对钢渣固碳率的影响

2.1.1 反应液固比

试验设置压力为 0.85 MPa、时间为 1 h、搅拌速率为 450 r/min，选取液固比从 0 mL/g 到 10 mL/g，探究液固比对钢渣矿化的影响程度。试验结果如图 2 所示。因搅拌器与反应釜底部的间距较大，在液固比 <6 mL/g 条件下，搅拌作用仅体现为驱动气体流动，未能对试验物料形成有效搅拌。

结合试验现象与数据特征，图 2 中钢渣矿化可分为 3 个阶段，即干法矿化阶段(液固比为 0 mL/g)、低液固比(液固比 <1 mL/g)矿化阶段及湿法矿化阶段(液固比 >1 mL/g)。在上述统一条件下，干法矿化阶段的固碳率低为 2.8%。低液固比条件下的固碳率明显高于干法矿化阶段，最高固碳率为 25.1%。湿法矿化阶段的最高固碳率为 21.7%。但是此条件下的液体用量为低液固比矿化阶段的 16.67 倍。综上，低液固比矿化在保证高固碳效率的同时可显著降低水耗，具有更优的经济性与规模化应用潜力。

在如图 3 所示的液固比较低(液固比 < 0.4 mL/g)的水相碳捕集体系中，钢渣与水混合不充分，会影响 CO_2 和 Ca^{2+} 在气液固相中的传质效率。在低液固比条件下，随着液固比的增加，固



温度/℃：1—50；2—75；3—100；4—125。

图 2　不同液固比对钢渣矿化的影响

Fig. 2　Effect of different liquid-solid ratio on steel slag mineralization

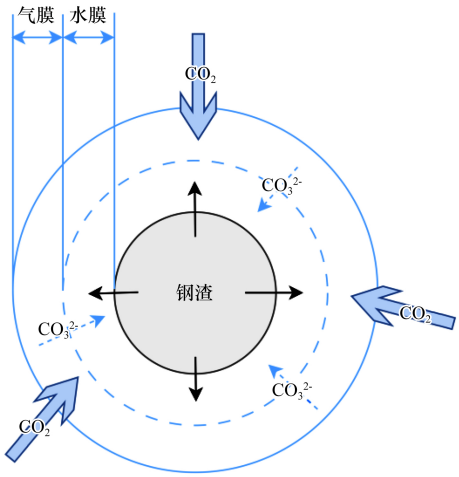


图 3　低液固比状态下钢渣碳化示意

Fig. 3　Steel slag carbonization schematic diagram under low liquid-solid ratio

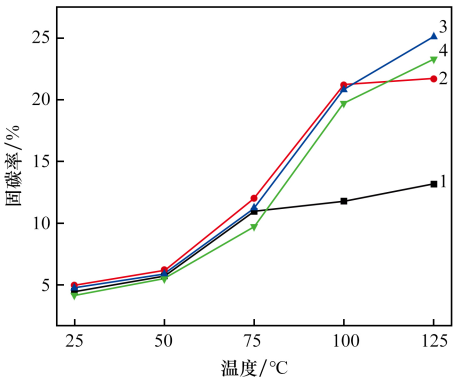
碳率呈现上升趋势。CO_2 在固体基质中的矿化效率受其扩散动力学特性与表面反应活性的协同调控[18]。液相占比的增加促进了钢渣颗粒的解聚，增大固液接触界面面积，同时提高 CO_2 在水相中的溶解度，足够量的水能够保证反应充分[19]。然而，液固比较高且超过某一临界点时，过量的水相会产生负面效应；液相中 Ca^{2+} 浓度的降低，增厚的水膜形成传质屏障，导致 CO_2 的渗透率下降，因此转化率不再显著增加[20-21]。当液固比超过 6 mL/g 以后，随着液体量的增加，搅拌转子带动物料搅动，促进 CO_2 与物料之间的接触，固碳率呈现上升趋势。因此，选取合适的固液比对固碳效果有重要影响。

试验结果表明，在特定的反应温度下，存在一个最优的液固比以达到最大固碳率。当温度在 100 ℃以下时，最佳液固比为 0.4 mL/g；温度升高后，最优液固比则提高至 0.6 mL/g。这是因为温度升高加剧了分子热运动并加速了液相蒸发。过少的液相难以在钢渣颗粒表面形成连续且厚度适中的水膜，导致气－固－液界面反应效率降低，所以温度升高后最优液固比有所变化。

2.1.2　反应温度

在压力为 0.85 MPa、时间为 60 min、搅拌速率为 450 r/min，液固比分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 mL/g 的条件下，探究温度变化对钢渣矿化的影响。试验结果如图 4 所示。由图 4 可知，随着温度的升高，4 组不同液固比钢渣的固碳率均出现随温度的升高而增大的趋势。该现象主要归因于温度升高可提高矿物在水溶液中的溶解度，升温增加 Ca^{2+} 的溶解，从而增强碳矿化的动力学条件[22-23]。

此外，100 ℃时固碳率提升明显。以液固比为 0.4 mL/g 为例，100 ℃的固碳率达到 21.2%，较 75 ℃的固碳率提高了 43.4%，而后续升温到 125 ℃时相较于 100 ℃时的固碳率仅提高了 2.3%；以液固比 0.6 mL/g 为例，100 ℃的固碳率为 20.9%，相较 75 ℃的固碳率提升 46.41%，而升温至 125 ℃时较 100 ℃固碳率提升 16.7%。综合不同液固比的试验结果，100 ℃时固碳率较高且后续升温的增益并不显著，表明该温度点(100 ℃)是本文研究体系下实现高效矿化反应较为适宜的条件。



液固比/(mL·g⁻¹)：1—0.2；2—0.4；3—0.6；4—0.8。

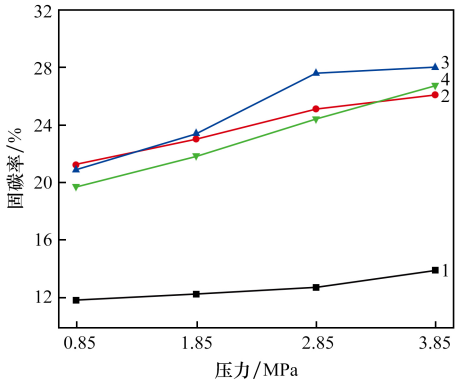
图 4　不同反应温度对钢渣矿化的影响

Fig. 4　Effects of different reaction temperatures on the mineralization of steel slag

2.1.3 反应压力

在温度为 100 ℃、时间为 1 h、搅拌速率为 450 r/min，液固比分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 mL/g 的条件下，探究不同压力对钢渣的矿化的影响。结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，无论何种液固比下的钢渣固碳率均随着压力的升高而增大。当液固比为 0.6 mL/g、压力为 3.85 MPa 时，钢渣的固碳率最高可达 28%。这是由于升压增强了 CO_2 的溶解，根据亨利定律，恒温条件下溶解于水相中的 CO_2 浓度与其 CO_2 分压成正比。CO_2 压力升高，CO_2 的溶解增加且加速了其与溶出的 Ca^{2+} 离子之间的碳酸化反应速率，显著影响碳矿化的动力学和效率[24]；并且升高的压力可以使反应平衡向固体形成的方向移动，通过降低沉淀的能垒来促进稳定碳酸盐的沉淀[25]。这些机制共同作用，显著提升了碳酸化反应的动力学速率和最终固碳效率，但是由于液相有限，后续升压对固碳率的影响并不显著。

此外，在液固比为 0.2 mL/g(液相相对受限)的条件下，当压力由 0.85 MPa 升高至 2.85 MPa 时，固碳率提高 7.63%；当压力由 0.85 MPa 升高至 3.85 MPa 时，固碳率提高 17.79%。在液固比为 0.6 mL/g(液相相对足够)时，当压力由0.85 MPa升高至 2.85 MPa 时，固碳率提高 32.08%；当压力由 0.85 MPa 升高至 3.85 MPa，固碳率提高 33.97%。这表明充足液相的存在有利于更充分地发挥高压对反应速率的促进作用。虽然高压可显著提高固碳效率，但需权衡其伴随的较高的能量成本[26]。



液固比/(mL·g^{-1})：1—0.2；2—0.4；3—0.6；4—0.8。

图 5 不同反应压力对钢渣矿化的影响

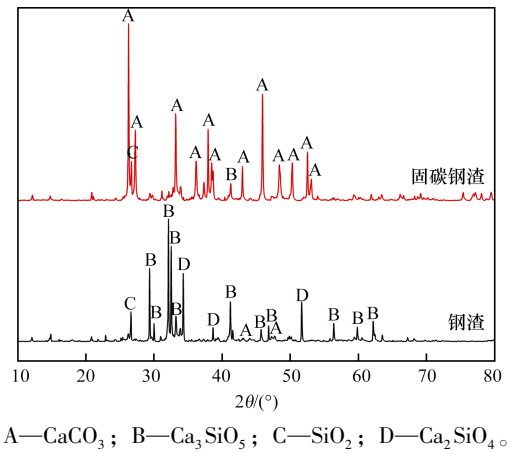
Fig. 5 Effect of different reaction pressure on steel slag mineralization

综上，最佳反应温度为 100 ℃、液固比为 0.6 mL/g、压力为 2.85 MPa、时间为 60 min、搅拌速率为 450 r/min 的条件下固碳率为 27.6%，即最大固碳量(CO_2)为 276 g/kg。

2.2 原料及产物表征方法

2.2.1 反应前后钢渣的物相变化

控制温度为 100 ℃、压力为 0.85 MPa、时间为 60 min、液固比为 0.6 mL/g 时，采用 XRD 对矿化反应前后的钢渣物相进行测试。测试结果如图 6 所示。由图 6 可知：钢渣原料中的主要相物为 C_3S、$CaCO_3$、SiO_2 及 C_2S。C_3S 和 C_2S 作为钢渣中主要的活性钙硅酸盐矿物，其特征衍射峰强度显著，是潜在的固碳反应活性相。SiO_2 则主要以结晶态石英形式存在，化学惰性相对较高。微量 $CaCO_3$ 的存在表明钢渣本身已具有一定程度的初始碳化。矿化后钢渣内出现了明显的 $CaCO_3$、SiO_2 的衍射峰。与矿化前的钢渣 XRD 相比，C_2S、C_3S 的衍射峰明显减弱但并没有完全消失，PANG 等[27]研究发现，$Ca(OH)_2$ 与 *f*-CaO 衍射峰基本消失，出现了明显的 $CaCO_3$ 衍射峰。XRD 结果明确证实了矿化固碳反应可有效将钢渣中的活性钙组分转化为稳定的碳酸钙。



A—$CaCO_3$；B—Ca_3SiO_5；C—SiO_2；D—Ca_2SiO_4。

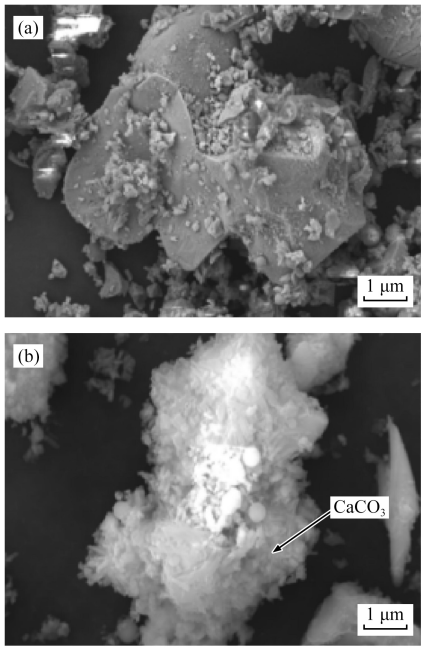
图 6 钢渣与固碳钢渣的 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns of steel slag and carbon-fixing steel slag

2.2.2 反应前后钢渣的形貌变化

采用 SEM 对矿化处理前后的钢渣粉末样品进行微观结构表征，分析钢渣的物相形貌变化及结晶物生成情况。由图 7 可以看出，原始钢渣颗粒的表面粗糙度较高，固碳后在钢渣颗粒表面原位

生长并覆盖了一层新生成的固碳产物，这些产物以碳酸钙为主。新生成的碳酸盐晶体彼此间紧密堆积、交错生长，在钢渣基底表面形成了相对连续、致密的覆盖层，这表明 CO_2 以碳酸盐矿物的形式被有效固定。



（a）钢渣；（b）固碳钢渣

图 7　钢渣与固碳钢渣的微观形貌

Fig. 7　Morphology of steel slag and carbon-fixing steel slag

3　结　论

（1）相较于直接干法矿化、直接湿法矿化，低液固比湿法矿化的固碳率更高且更具有经济性。低液固比条件下适当的液固比有利于矿化反应进行，使钢渣与水的混合不充分，导致固液接触界面的面积减小；而增厚的水膜形成传质屏障，会导致 CO_2 的渗透率下降，转化率不再显著增加。因此，当反应压力为 0.85 MPa、时间为 1 h、搅拌速率为 450 r/min 时，100 ℃以下的最优液固比为 0.4 mL/g。

（2）低液固比条件下，随着温度的升高，Ca^{2+} 溶解得更加充分，固碳率增加，但 125 ℃时固碳率增幅不足 5%。从经济的角度来看，最佳反应温度为 100 ℃。

（3）压力对矿化的影响呈增长趋势，高压增效依赖充足的液相。随着压力的升高，CO_2 的溶解度增加，但过低液固比状态下液膜的厚度有限，增长速率变缓慢且过高的压力会导致能源损耗。因此，在反应温度为 100 ℃、液固比为 0.6 mL/g、时间为 1 h、搅拌速率为 450 r/min 的条件下，最优压力为 2.85 MPa 时的固碳率为 27.6%，即最大固碳量为 276 g/kg。

参考文献：

[1] 张琦,沈佳林,籍杨梅. 典型钢铁制造流程碳排放及碳中和实施路径[J]. 钢铁,2023,58(2):173－187.
ZHANG Qi,SHEN Jialin,JI Yangmei. Analysis of carbon emissions in typical iron- and steelmaking process and implementation path research of carbon neutrality[J]. Iron and Steel,2023,58(2):173－187.

[2] 孟鑫,李晨晓,赵鹏,等. 钢铁生产全流程中 CO_2 资源化利用技术进展[J]. 烧结球团,2024 49(6):21－34.
MENG Xin, LI Chenxiao, ZHAO Peng, et al. Technological progress of CO_2 resource utilization in whole process of iron and steel production[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(6):21－34.

[3] 田京雷,柴雅宁,崔永康,等. 钢铁工业 CCUS 全流程降碳体系构建与技术进展[J]. 钢铁,2024,59(9):226－235.
TIAN Jinglei, CHAI Yaning, CUI Yongkang, et al. Construction and technological progress of CCUS whole-process carbon reduction system in iron and steel industry[J]. Iron & Steel,2024,59(9):226－235.

[4] SEIFRITZ W. CO_2 disposal by means of silicates[J]. Nature,1990,345(6275):486.

[5] LU X Y, DIPPLE G M, PAWLIK M. A surface charge approach to characterize serpentine reactivity for carbon mineralization[J]. Applied Clay Science, 2025, 270: 107777.

[6] WANG H L,ZHOU G,MU Y Q,et al. Enhanced carbon dioxide sequestration and Cr detoxification: Direct carbonation of AOD slag with additives under ambient conditions[J]. Journal of Cleaner Production,2024,443: 141181.

[7] QIN L,LIN S H,LIN H F,et al. Characteristics of alkali-activated fly ash-CO_2 mineralization reaction and micro carbon sequestration mechanism[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2025,144:104377.

[8] 郝帅,罗果萍,卢元元,等. 钢渣改性与固碳研究现状及展望[J]. 烧结球团,2022,47(6):31－38;153.
HAO Shuai,LUO Guoping,LU Yuanyuan,et al. Research

status and prospect of slag modification and carbon fixation[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(6):31 – 38;153.

[9] 张恒飞,刘茂举,王东哲,等. 钢渣碳化技术影响因素的研究进展[J]. 中国建材科技,2023,32(1):74 – 78.
ZHANG Hengfei, LIU Maoju, WANG Dongzhe, et al. Research progress of influencing factors of steel slag carbonation technology[J]. China Building Materials Science & Technology,2023,32(1):74 – 78.

[10] 刘军,王泽培,曹志众,等. 钢渣在碳捕集领域的研究进展[J]. 烧结球团,2024,49(6):11 – 20;34.
LIU Jun, WANG Zepei, CAO Zhizhong, et al. Research progress of steel slag in field of carbon capture[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(6):11 – 20;34.

[11] CHANG E E, PAN S Y, CHEN Y H, et al. Accelerated carbonation of steelmaking slags in a high-gravity rotating packed bed[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 227:97 – 106.

[12] YADAV S, MEHRA A. Experimental study of dissolution of minerals and CO_2 sequestration in steel slag[J]. Waste Management,2017,64:348 – 357.

[13] SU T H, YANG H J, SHAU Y H, et al. CO_2 sequestration utilizing basic-oxygen furnace slag: Controlling factors, reaction mechanisms and V-Cr concerns[J]. Journal of Environmental Sciences,2016,41:99 – 111.

[14] 赵静瑞. 钢渣干法矿化封存 CO_2 及其产物胶凝材料性能实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2024.
ZHAO Jingrui. Experimental study on dry mineralization and storage of CO_2 by steel slag and properties of its product cementitious materials[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2024.

[15] ZHANG N N, DENG G, LIAO W Y, et al. Aqueous carbonation of steel slags: A comparative study on mechanisms[J]. Cement and Concrete Composites, 2025,155:105838.

[16] LEVENTAKI E, COUTO QUEIROZ E, KRISHNAN PISHARODY S, et al. Aqueous mineral carbonation of three different industrial steel slags: Absorption capacities and product characterization[J]. Environmental Research, 2024,252:118903.

[17] 伍勇华,匡玉峰,易昂,等. 钢渣粉低液固比固碳工艺及固碳钢渣粉对水泥基材料性能的影响[J]. 材料导报,2024,38(13):155 – 162.
WU Yonghua, KUANG Yufeng, YI Ang, et al. Low liquid-solid ratio carbon fixation process with steel slag powder and the effect of carbon fixation steel slag powder on the properties of cement-based materials[J]. Materials Reports,2024,38(13):155 – 162.

[18] FERNÁNDEZ BERTOS M, LI X, SIMONS S J R, et al. Investigation of accelerated carbonation for the stabilisation of MSW incinerator ashes and the sequestration of CO_2[J]. Green Chemistry,2004,6(8): 428 – 436.

[19] SANNA A, DRI M, HALL M R, et al. Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation (CCSM): A UK perspective[J]. Applied Energy,2012,99:545 – 554.

[20] WANG J Y, ZHONG M, WU P F, et al. A review of the application of steel slag in CO_2 fixation[J]. ChemBioEng Reviews,2021,8(3):189 – 199.

[21] 郑旭帆. 碱性固体废弃物分选强化 CO_2 矿化实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2022:48 – 50.
ZHENG Xufan. Experimental study on enhanced CO_2 mineralization by alkaline solid waste separation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022:48 – 50.

[22] JO H, LEE M G, PARK J, et al. Preparation of high-purity nano-$CaCO_3$ from steel slag[J]. Energy, 2017, 120:884 – 894.

[23] DAVAL D, HELLMANN R, MARTINEZ I, et al. Lizardite serpentine dissolution kinetics as a function of pH and temperature, including effects of elevated $p(CO_2)$[J]. Chemical Geology,2013,351:245 – 256.

[24] GUO L J, PENG X P, WANG Q Q, et al. Research progress on carbon dioxide mineralization sequestration technology by tailings[J]. Green and Smart Mining Engineering,2024,1(3):307 – 321.

[25] 杨宏楠,乐平,范伟,等. CO_2 溶解度实验及预测模型[J]. 新疆石油地质,2025,46(3):360 – 366.
YANG Hongnan, LE Ping, FAN Wei, et al. CO_2 solubility experiments and prediction model[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2025,46(3):360 – 366.

[26] MÄLKKI M, MÄKIKOURI S. Extraction of magnesium from mine tailings for carbon dioxide mineralization: A preliminary study of the effect of ammonium sulfate to tailings ratio on products and yield[J]. Hydrometallurgy, 2024,225:106268.

[27] PANG B, ZHOU Z H, XU H X. Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 454 – 467.