基于中空纤维膜的飞灰水洗液脱钙固碳研究

李宗阳[1,3*],张勇骏[2],赵峰娃[4],邓会宁[5],刘 燕[5]
(1.安徽海螺集团有限责任公司,安徽 芜湖 241000; 2.芜湖海螺环保科技有限责任公司,安徽 芜湖 241000; 3.安徽海螺产业技术研究院有限公司,安徽 芜湖 241000; 4.安徽海螺环保集团有限公司,安徽 芜湖 241000; 5.河北工业大学化工学院,天津 300401)

摘要:提出了一种基于中空纤维膜气体分布器的飞灰水洗脱钙固碳协同处理方法,系统研究了气体流量、液体流量、曝气面积和混合气比例对脱钙固碳效果的影响。实验结果表明:增加进气流量可以加快飞灰水洗液吸收 CO_2 的速率,但是会对 CO_2 的固定率产生负面影响;进气过程中通入 N_2 可以提高出口气速,使气泡分布更均匀,但是会降低 CO_2 的分压,不利于 CO_2 溶解吸收;加快液相流速可以在一定程度上降低液膜厚度,促进气液传质;增加曝气面积可以改善气泡分散效果,进一步提升气液传质效率。实验证明,中空纤维膜能够高效生成微小气泡,显著提高气液传质效率,从而优化脱钙固碳过程。

关键词:CO_2 吸收;水洗液;中空纤维膜;气泡;传质
中图分类号:X701 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-4320(2026)11-0150-07
DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.11.025

Research on decalcification and carbon sequestration of fly ash washing liquid based on hollow fiber membranes

LI Zong-yang[1,3*], *ZHANG Yong-jun*[2], *ZHAO Feng-wa*[4], *DENG Hui-ning*[5], *LIU Yan*[5]
(1.Anhui Conch Group Co., Ltd., Wuhu 241000, China; 2.Wuhu Conch Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhu 241000, China; 3.Anhui Conch Industry Technology Research Institute Co., Ltd., Wuhu 241000, China; 4.Anhui Conch Environmental Protection Group Co., Ltd., Wuhu 241000, China; 5.School of Chemical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: This paper proposes a synergistic treatment method for decalcification and carbon sequestration of fly ash washing liquid based on a hollow fiber membrane gas distributor. The effects of gas flow rate, liquid flow rate, aeration area, and mixed gas ratio on the efficiency of decarbonization and carbon sequestration were systematically investigated. The results indicate that increasing the gas flow rate accelerates the CO_2 absorption rate by the fly ash washing liquid but negatively impacts the CO_2 fixation rate. Introducing N_2 during the gas inflow process increases the outlet gas velocity, leading to more uniform bubble distribution; however, it reduces the partial pressure of CO_2, which is unfavorable for CO_2 dissolution and absorption. Increasing the liquid flow rate can reduce the liquid film thickness to some extent, thereby promoting gas-liquid mass transfer. Expanding the aeration area improves bubble dispersion, further enhancing gas-liquid mass transfer efficiency. The experiments demonstrate that the hollow fiber membrane can efficiently generate micro-bubbles, significantly improving gas-liquid mass transfer efficiency and thus optimizing the decalcification and carbon sequestration process.

Key words: CO_2 absorption; washing liquid; hollow fiber membrane; bubbles; mass transfer

全球气候变化已成为21世纪人类面临的最严峻挑战之一,而二氧化碳(CO_2)作为最主要的温室气体,其排放量的持续增加是导致气候变暖的主要原因。根据国际能源署(IEA)的数据,2022年全球 CO_2 排放量达到历史新高,凸显了碳减排的紧迫性。在此背景下,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术被视为实现碳中和目标的关键途径之一[1]。目前,主流的固碳方法包括地质封存、海洋封存以及矿物碳化等[2]。其中,矿物碳化技术将 CO_2 转化为稳定的碳酸盐矿物(如碳酸钙),不仅能够实现 CO_2 的长期封存,还能产生具有经济价值的副产品,因而备受关注[3-5]。垃圾焚烧飞灰水洗液中富含钙离子,而且其具有一定的碱度,因此可以用来吸收 CO_2 并将其转化为碳酸钙进行固定,从而实现“以废制废”的双重目标:既固定了 CO_2,又脱除了水洗液中的钙,为飞灰的资源化利用开辟了新途径[6]。

收稿日期:2026-01-21;**修回日期**:2026-08-20
基金项目:安徽省省级科技创新攻坚计划项目(202523050012);湖南省生态环境科研项目(HBKYXM-202501)
作者简介:李宗阳(1994-),男,硕士,研究方向为固体废弃物资源化利用,通讯联系人,15529581752@163.com。

在飞灰水洗液脱钙固碳过程中,气液接触装置的性能直接影响 CO_2 的传质效率和反应速率。传统的气液接触装置,如鼓泡塔和填料塔等,存在气泡尺寸大、传质效率低、体积大、能耗高等缺点,难以满足高效固碳的需求。近年来,微孔扩散作为一种新型气液接触技术,因其能够产生微米级气泡、显著提高气液传质效率而受到广泛关注[7-8]。微孔扩散在臭氧氧化处理污水领域已得到广泛关注,使用微孔扩散器进行臭氧曝气可以提升臭氧的溶解度,提高传质推动力,还可以产生微纳米气泡,增加了气液接触面积,大大提升了气液传质效率[9-13]。此外,利用 CO_2 微纳米气泡制备纳米碳酸钙也已有初步研究,利用微纳米气泡制备得到的碳酸钙产品拥有更窄的粒径分布,而且可以通过改变气量来调控碳酸钙产品的粒径和形貌[14-15]。本文使用中空纤维膜作为微孔扩散器,具有比表面积大、气泡尺寸小、占地面积小等优势,特别适用于高精度气液反应过程。通过中空纤维膜向飞灰水洗液中通入 CO_2,不仅可以实现微气泡的高效分散,还能优化气液接触条件,从而显著提升脱钙固碳效率。

本文以中空纤维膜作为气体分布器,系统研究了不同操作参数对飞灰水洗液脱钙固碳效率的影响,旨在提供一种先进的分离设备,为飞灰资源化利用同步固碳技术的大规模推广理论依据和技术支持。

1　实验材料与试剂

1.1　材料

本实验所用垃圾焚烧飞灰水洗液由芜湖海螺环保科技有限责任公司提供。

1.2　试剂

PTFE 中空纤维膜购自南京中科碧盾新膜科技有限公司(膜参数如表 1 所示);氢氧化钠(NaOH,分析纯),天津市风船化学试剂科技有限公司;盐酸(HCl,分析纯),福晨化学试剂有限公司;乙二胺四乙酸二钠(EDTA,分析纯),上海麦克林生化科技有限公司;钙试剂(分析纯),天津市光复精细化工研究所;二氧化碳(CO_2,工业级),天津威斯特科技发展有限公司;氮气(N_2,工业级),天津威斯特科技发展有限公司;去离子水(实验室自制)。

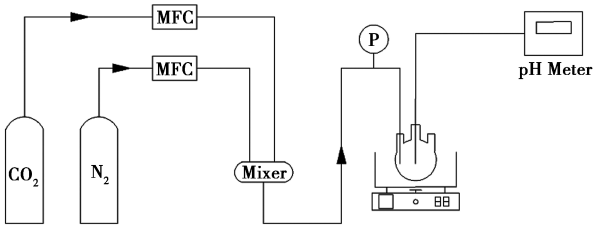
表 1　PTFE 中空纤维膜基础参数

内径和外径/mm	平均孔径/μm	孔隙率/%
0.8/1.6	0.1	45

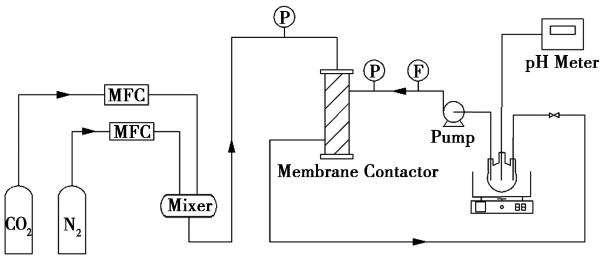
2　实验方法

2.1　实验内容

图 1 所示为飞灰水洗液固碳脱钙实验装置流程图。图 1(a)中使用 0.45 mm 注射器针头作为气体分布器,并辅以搅拌对气泡进行破碎,以此模拟鼓泡塔中的气液传质过程;图 1(b)中使用 PTFE 中空纤维膜组件作为气液接触反应器,膜组件能提供更大的气液接触面积,提高气液传质效率。



(a)使用 0.45 mm 注射器针头作为气体分布器



(b)使用 PTFE 中空纤维膜组件作为气液接触反应器

图 1　实验装置流程图

实验以 CO_2 气瓶作为碳源,通过质量流量控制器(CS200,Sevenstar)调节 CO_2 的进气流量。实验时取 250 mL 飞灰水洗液置于三口烧瓶中,使用恒温加热磁力搅拌器进行控温搅拌。进行图 1(b)的实验时,使用磁驱齿轮泵(MG209XK,南京欧瑞克)调节飞灰水洗液的循环流量。

2.2　测试方法

实验过程中飞灰水洗液的 pH 由 pH 计(a-AB33pH ZH,奥豪斯)实时监测,以水洗液的 pH 下降速率反映 CO_2 的吸收速率;CO_2 的通气总量由 MFC 控制软件(Digital-MFC-Tools V1)读取;脱钙前后水洗液的钙离子含量采用 EDTA 容量法测定。

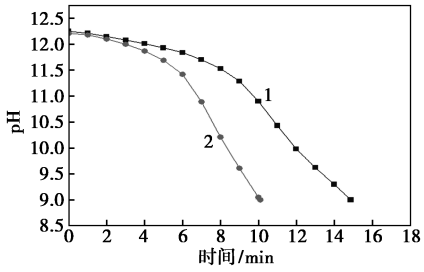
3　结果与讨论

3.1　膜分散和鼓泡效果对比

使用图 1 中的实验装置进行了脱钙固碳实验,分别测试了鼓泡和中空纤维膜组件作为气体分布器时的传质效率。使用图 1(a)装置以针头作为气体分布器进行实验,CO_2 通气流量设置为 20 mL/min,

搅拌速率设置为 500 r/min;使用图 1(b)装置以中空纤维膜组件作为气体分布器进行实验,CO_2 通气流量设置为 20 mL/min,不开启磁力搅拌。实验过程中记录水洗液的 pH,并在实验结束后取样测定水洗液的钙离子含量,以此计算脱钙率和 CO_2 利用率。

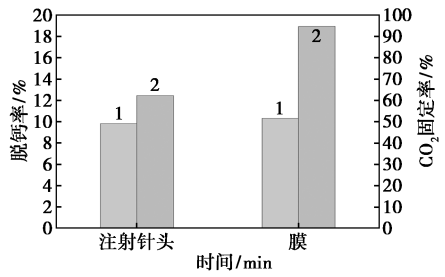
实验结果如图 2 所示,在相同的 CO_2 进气流量下,以中空纤维膜组件作为气体分布器时,水洗液的 pH 下降速率显著快于鼓泡装置,表明中空纤维膜组件具有更优的气液传质性能。这一现象主要归因于膜组件的多孔结构特性,其能够显著增加曝气面积,并在相同通气流量下生成更多的微小气泡。此外,流动的水洗液在循环过程中产生的剪切力有助于气泡从膜丝表面迅速脱离,使气泡尺寸更小,从而促进了 CO_2 向水洗液中的传递。相比之下,鼓泡装置由于气泡尺寸较大且分布不均匀,气泡与水洗液的接触时间较短,导致 CO_2 的溶解效率显著降低。因此,中空纤维膜组件在气液传质过程中表现出明显的优势,能够有效提升 CO_2 的吸收速率和传质效率。



1—注射针头;2—膜

图 2 水洗液 pH 随通气时间的变化

图 3 所示为 2 组实验下飞灰水洗液的脱钙率和 CO_2 固定率,从图中可以看出,2 组实验的脱钙率几乎相同,而使用中空纤维膜组件通气时,CO_2 固定率显著高于鼓泡装置。这一差异主要归因于膜组件能够生成更小、更多的气泡,从而大幅增加了 CO_2 与水洗液的气液接触面积,显著提升了传质效率。此外,微气泡在液相中的停留时间更长,进一步促进了 CO_2 的溶解和反应,提高了 CO_2 的利用率。相比之下,鼓泡装置生成的气泡尺寸较大且数量较少,气泡与水洗液的接触时间较短,导致大量 CO_2 未能充分溶解便逸出液面,从而降低了 CO_2 的固定率。因此,中空纤维膜组件在 CO_2 固定方面表现出显著优势,能够有效提高 CO_2 的利用效率。



1—脱钙率;2—CO_2 固定率

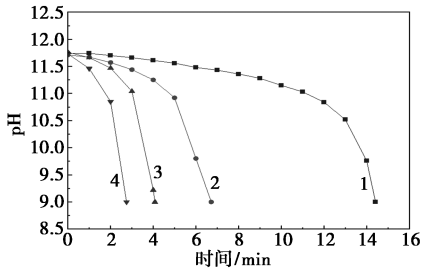
图 3 不同 CO_2 通气装置下的脱钙率和固碳

3.2 膜鼓泡操作条件的影响

3.2.1 CO_2 流量的影响

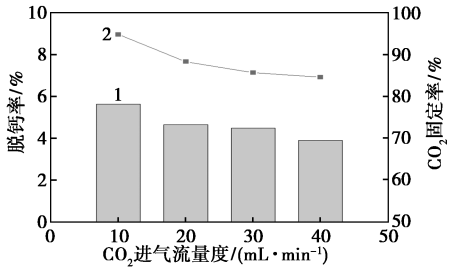
采用图 1(b)所示的实验装置进行脱钙固碳实验,重点探究了 CO_2 进气流量对脱钙固碳效果的影响。实验中,使用填装 6 根中空纤维膜丝的膜组件作为气体分布器,CO_2 进气流量分别设置为 10、20、30、40 mL/min,水洗液的循环流量固定为 40 L/h。实验过程中,实时监测水洗液的 pH 变化,以评估 CO_2 的吸收速率;实验结束后,取样测定水洗液的钙离子含量,并据此计算脱钙率和 CO_2 利用率。

首先考察了纯 CO_2 进气流量对脱钙固碳效果的影响,实验结果如图 4 所示。从图中可以看出,在液相流量保持不变的情况下,随着 CO_2 进气流量的增加,水洗液的 pH 下降速率显著加快,而脱钙率和 CO_2 固定率则随进气流量的增加而降低。这一现象的原因在于,增加 CO_2 进气流量会导致单位时间内更多的 CO_2 进入水洗液中参与反应,从而加速了



1—CO_2 进气流量为 10 mL/min;2—CO_2 进气流量为 20 mL/min;3—CO_2 进气流量为 30 mL/min;4—CO_2 进气流量为 40 mL/min

(a)水洗液 pH 随通气时间的变化



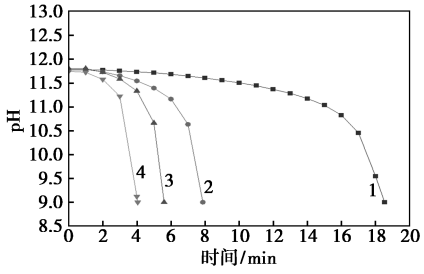
1—脱钙率;2—CO_2 固定率

(b)不同 CO_2 流量下的脱钙率和固碳率

图 4 纯 CO_2 进气流量对脱钙固碳效果的影响

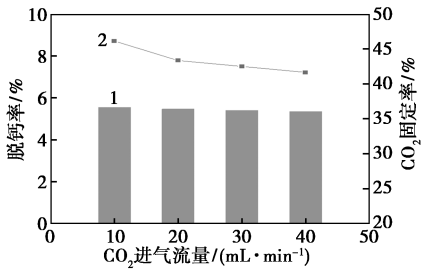
OH^-的消耗,使得水洗液的 pH 迅速下降。然而,CO_2 在气液两相间的传质以及化学反应需要一定的时间来完成,较高的气体流量缩短了 CO_2 在水洗液中的停留时间,导致部分 CO_2 未能充分参与反应便被排出,从而降低了 CO_2 的固定率。此外,随着 CO_2 进气流量的增加,反应装置内残余气泡的数量增多,这些气泡在停止通气后继续溶解并参与反应,导致水洗液的 pH 进一步下降。同时,生成的碳酸钙部分转化为碳酸氢钙并重新溶解到水洗液中,进一步降低了脱钙率。因此,尽管增加 CO_2 进气流量可以加快反应速率,但过高的流量会降低 CO_2 的利用效率和脱钙效果。

进一步考察了 CO_2 与 N_2 混合进气情况下 CO_2 进气流量对脱钙固碳效果的影响。实验中,CO_2 与 N_2 的体积比为 2∶8,CO_2 进气流量分别设置为 10、20、30 mL/min 和 40 mL/min,水洗液的循环流量固定为 40 L/h,实验结果如图 5 所示。从图中可以看出,在混合进气条件下,随着 CO_2 进气流量的增加,水洗液的 pH 下降速率显著加快,而脱钙率略有下降但变化不大,CO_2 固定率则随进气流量的增加而降低。增加气体流量可以改善气相的流体力学条件,减小气相边界层厚度,从而促进 CO_2 的溶解和吸收。然而,过高的 CO_2 进气流量导致单位时间内通入水洗液的 CO_2 量大幅增加,部分 CO_2 未能及时被吸收便逸出液面,从而降低了 CO_2 的吸收率。此外,N_2 的存在虽然提高了气泡分布的均匀性,但也稀释了 CO_2 的分压,进一步限制了 CO_2 的溶解效率。因此,尽管增加 CO_2 进气流量可以加快反应速率,但过高的流量会降低 CO_2 的利用效率。



1—CO_2 流量为 10 mL/min;2—CO_2 流量为 20 mL/min;3—CO_2 流量为 30 mL/min;4—CO_2 流量为 40 mL/min

(a)水洗液 pH 随通气时间的变化



1—脱钙率;2—CO_2 固定率

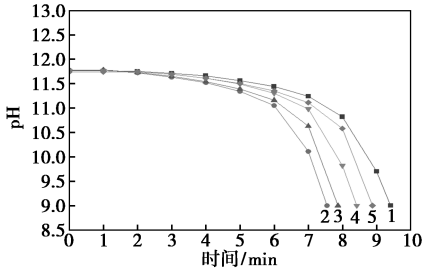
(b)不同 CO_2 流量下的脱钙率和固碳率

图 5　CO_2 与 N_2 混合进气情况下 CO_2 进气流量对脱钙固碳效果的影响

3.2.2　液相流速的影响

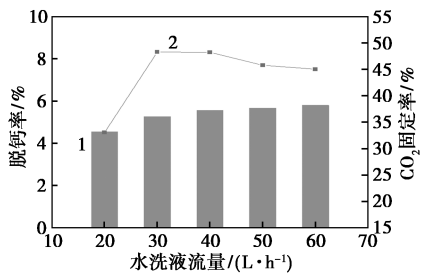
为探究液相流速对水洗液脱钙固碳效果的影响,采用图 1(b)所示的实验装置进行脱钙固碳实验。实验中,保持 CO_2 进气流量不变,水洗液的循环流量分别设置为 20、30、40、50 L/h 和 60 L/h。实验过程中,实时监测水洗液的 pH 变化,以评估 CO_2 的吸收速率;实验结束后,取样测定水洗液的钙离子含量,并据此计算脱钙率和 CO_2 利用率。

首先考察了 CO_2 与 N_2 混合进气条件下液相流速对水洗液脱钙固碳效果的影响。实验中,CO_2 进气流量设置为 20 mL/min,N_2 进气流量设置为 180 mL/min,实验结果如图 6 所示。从图中可以看出,随着液相循环流量的增加,水洗液的 pH 下降速率先升高后降低。当液相流量为 20 L/h 时,pH 下降速率最慢;而当液相流量为 30 L/h 时,pH 下降速率达到最快。此外,水洗液的脱钙率随液相流量的增加呈上升趋势,而 CO_2 固定率则先升高后略有降低。



1—液相流速(20 L/h);2—液相流速(30 L/h);3—液相流速(40 L/h);4—液相流速(50 L/h);5—液相流速(60 L/h)

(a)水洗液 pH 随通气时间的变化



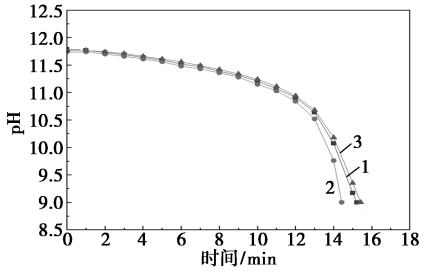
1—脱钙率;2—CO_2 固定率

(b)不同水洗液流量下的脱钙率和固碳率

图 6　CO_2 与 N_2 混合进气条件下液相流速对水洗液脱钙固碳效果的影响

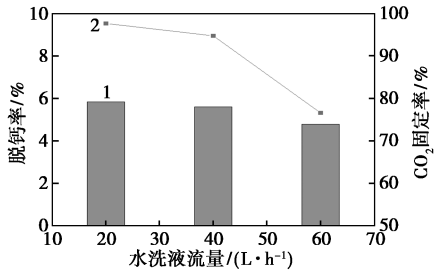
在低液相流速(20 L/h)下,液相提供的剪切力较弱,导致生成的气泡尺寸较大,液相湍流程度较低,液相边界层较厚,从而限制了 CO_2 与水洗液的气液传质效率。当液相流速增加至 30 L/h 时,液相剪切力增强,气泡尺寸减小,液相湍流程度提高,液相边界层厚度减薄,显著改善了气液两相间的传质效率。然而,当液相流速继续增加时,CO_2 与水洗液的接触时间缩短,部分 CO_2 未能及时溶解便逸出装置,导致 CO_2 的吸收速率下降。因此,液相流速对脱钙固碳效果的影响呈现先促进后抑制的趋势。

进一步使用纯 CO_2 进行实验,考察了液相流速对水洗液脱钙固碳效果的影响。实验中,CO_2 进气流量设置为 10 mL/min,水洗液的循环流量分别设置为 20、40、60 L/h,实验结果如图 7 所示。从图中可以看出,随着液相循环流量的增加,水洗液的 pH 下降速率先升高后降低,而脱钙率和 CO_2 固定率则随液相流量的加快而降低,这一规律与混合进气条件下的实验结果相似。



1—液相流速(20 L/h);2—液相流速(40 L/h);
3—液相流速(60 L/h)

(a)水洗液 pH 随通气时间的变化



1—脱钙率;2—CO_2 固定率

(b)不同水洗液流量下的脱钙率和固碳率

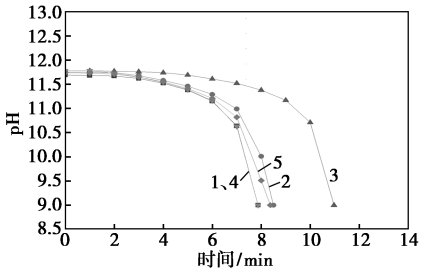
图 7 液相流速对水洗液脱钙固碳效果的影响

在低液相流速(20 L/h)下,液相提供的剪切力较弱,气泡尺寸较大,液相湍流程度较低,导致气液传质效率较差。当液相流速增加至 40 L/h 时,液相剪切力增强,气泡尺寸减小,液相湍流程度提高,气液传质效率显著提升。然而,当液相流速继续增加至 60 L/h 时,CO_2 与水洗液的接触时间缩短,部分 CO_2 未能及时溶解便逸出装置,导致 CO_2 的吸收速率下降。因此,液相流速对脱钙固碳效果的影响呈现先促进后抑制的趋势,与混合进气条件下的实验结果一致。

3.2.3 混合气比例的影响

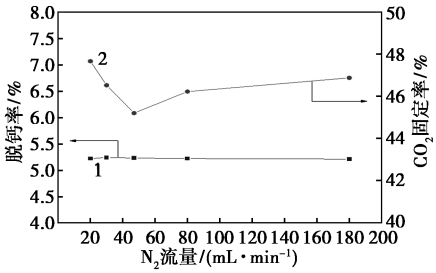
为探究混合气比例对水洗液脱钙固碳效果的影响,采用图 1(b)所示的实验装置进行脱钙固碳实验。实验中,保持 CO_2 进气流量为 20 mL/min,N_2 流量分别设置为 20、30、47、80、180 mL/min。实验过程中,实时监测水洗液的 pH 变化,以评估 CO_2 的吸收速率;实验结束后,取样测定水洗液的钙离子含量,并据此计算脱钙率和 CO_2 利用率。

图 8 展示了不同 N_2 进气流量下水洗液 pH 随通气时间的变化曲线,以及脱钙率和 CO_2 固定率的结果。从图中可以看出,随着 N_2 流量的增加,水洗液的 pH 下降速率先降低后升高,CO_2 固定率也呈现先降低后升高的趋势,而脱钙率则无明显变化。在低 N_2 流量下,增加 N_2 流量会稀释 CO_2 的分压,同时气泡合并现象增多,导致气液接触面积减小,从而降低了 CO_2 的吸收速率。然而,当 N_2 流量进一步增加时,气体流速显著提高,膜组件内的湍流程度增强,液膜厚度减小,气液传质效率得到改善。此



1—N_2 进气流量为 20 mL/min;2—N_2 进气流量为 30 mL/min;
3—N_2 进气流量为 47 mL/min;4—N_2 进气流量为 80 mL/min;
5—N_2 进气流量为 180 mL/min

(a)水洗液 pH 随通气时间的变化



1—脱钙率;2—CO_2 固定率

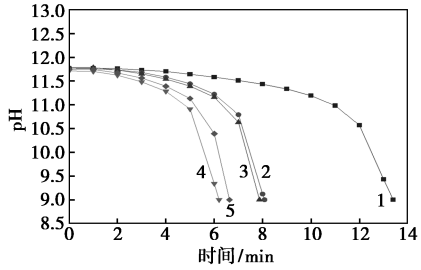
(b)不同 N_2 进气流量下的脱钙率和固碳率

图 8 不同 N_2 进气流量对水洗液脱钙固碳效果的影响

外,高气体流量下生成的气泡尺寸更小,进一步增加了气液接触面积,促进了 CO_2 的吸收。因此,N_2 流量对 CO_2 固定率的影响呈现先抑制后促进的趋势,而脱钙率则相对稳定。

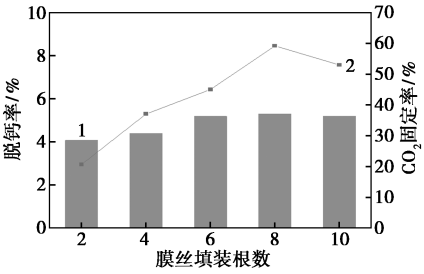
3.2.4　曝气膜面积的影响

本小节考察了曝气面积对水洗液脱钙固碳效果的影响。实验中,CO_2 进气流量设置为 20 mL/min,N_2 进气流量设置为 180 mL/min,水洗液的循环流量固定为 40 L/h,膜组件分别填装 2、4、6、8 根和 10 根中空纤维膜丝,实验结果如图 9 所示。从图中可以看出,随着膜丝填装根数的增加,水洗液的 pH 下降速率显著加快,脱钙率先升高后趋于平缓,而 CO_2 固定率则呈现先升高后降低的趋势。



1—膜丝根数为 2;2—膜丝根数为 4;3—膜丝根数为 6;4—膜丝根数为 8;5—膜丝根数为 10

(a)水洗液 pH 随通气时间的变化



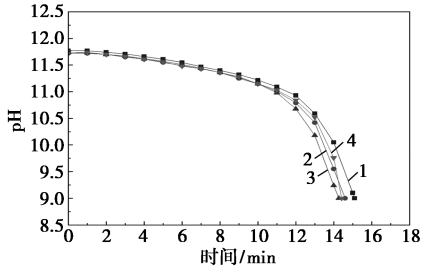
1—脱钙率;2—CO_2 固定率

(b)不同膜丝根数下的脱钙率和固碳率

图 9　曝气面积对水洗液脱钙固碳效果的影响

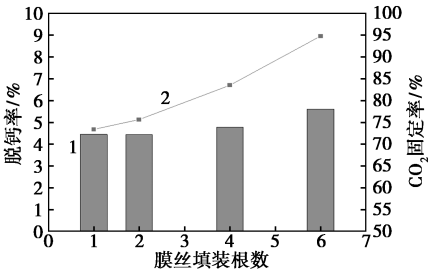
增加膜丝填装根数意味着曝气面积的增大,能够生成更多且更均匀的微小气泡,从而显著提高气液接触面积,促进 CO_2 的传质吸收。此外,气泡数量的增加增强了液相的湍流程度,减小了气液两相边界层厚度,进一步提升了 CO_2 的吸收速率。然而,当膜丝填装根数过多(如 10 根)时,CO_2 出气气速过低,未能达到膜丝全部出气的临界气速,导致气泡分布不均匀,气泡尺寸增大且上升速度加快,缩短了气液接触时间,从而降低了 CO_2 的吸收效率。因此,曝气面积对脱钙固碳效果的影响存在一个最优范围,过小或过大的曝气面积均会限制 CO_2 的固定效率。

为进一步探究膜组件曝气面积对水洗液脱钙固碳效果的影响,采用纯 CO_2 进行实验。实验中,CO_2 进气流量设置为 10 mL/min,水洗液的循环流量固定为 40 L/h,膜组件分别填装 1、2、4 根和 6 根中空纤维膜丝,实验结果如图 10 所示。从图中可以看出,随着膜丝填装根数的增加,水洗液的 pH 下降速率显著加快,脱钙率和 CO_2 固定率也呈现上升趋势。这一规律与混合气条件下的实验结果一致,但在本次实验中未出现膜丝出气不均匀或达不到临界气量的情况。



1—膜丝根数为 1;2—膜丝根数为 2;3—膜丝根数为 4;4—膜丝根数为 6

(a)水洗液 pH 随通气时间的变化



1—脱钙率;2—CO_2 固定率

(b)不同膜丝根数下的脱钙率和固碳率

图 10　膜组件曝气面积对水洗液脱钙固碳效果的影响

增加膜丝填装根数意味着曝气面积的增大,能够生成更多且更均匀的微小气泡,从而显著提高气液接触面积,促进 CO_2 的传质吸收。此外,气泡数量的增加增强了液相的湍流程度,减小了气液两相边界层厚度,进一步提升了 CO_2 的吸收速率。与混合气条件相比,纯 CO_2 实验中的气体流量较低,避免了膜丝出气不均匀的问题,确保了气泡分布的均匀性和气液传质效率的稳定性。

4　结论

本文采用以中空纤维膜为核心的气液接触反应器,系统研究了飞灰水洗液脱钙固碳过程中通气装

置、气体流量、液相流速、混合气比例及曝气面积等因素的影响,得出以下结论。

(1)气泡尺寸是影响气液传质效率的关键因素。中空纤维膜能够生成更小、更分散的气泡,相较于针头鼓泡装置,其传质效率显著提高。

(2)在保持其他条件不变的情况下,随着进气流量的增加,气液两相传质速率加快,但 CO_2 固定率降低。这一规律在纯 CO_2 进气和混合气进气条件下均得到验证。

(3)液相流速对脱钙固碳效率的影响较为复杂。在 20 L/h 至 60 L/h 的流量范围内,气液传质效率随液相流速的增加先升高后降低,表明存在一个最优液相流速范围。

(4)在保持 CO_2 流量不变的情况下,增加 N_2 流量会导致水洗液脱钙固碳效率先降低后升高。CO_2 分压和总气量的变化共同影响气液传质效率。

(5)在保持进气量不变的情况下,适当增加曝气面积能够生成更多的微小气泡,使气泡分布更加均匀,从而显著提升气液传质效率。

参考文献

[1] Ro Y H, Kim K Y, Jeong S K, *et al*. Membrane-separated reactor for an integrated CO_2 capture-mineralization process using carbonic anhydrase[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 477: 146847.

[2] 王露蓉. 双极膜电渗析法海水脱钙与烟气固碳脱硫脱硝的集成研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.

[3] Wang Y, Song L, Ma K, *et al*. An integrated absorption-mineralization process for CO_2 capture and sequestration: Reaction mechanism, recycling stability, and energy evaluation[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9(49): 16577-16587.

[4] Jang K, Lee D, Choi W Y, *et al*. A novel approach to mineral carbonation using deep eutectic solvents for the synthesis of nano-sized amorphous $CaCO_3$[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 311: 123118.

[5] Yoo Y, Kim I, Lee D, *et al*. Review of contemporary research on inorganic CO_2 utilization via CO_2 conversion into metal carbonate-based materials[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2022, 116: 60-74.

[6] 何玉清, 张佳, 岳阳, 等. 飞灰水洗液处理工艺及其资源化利用研究进展[J]. 环境保护科学, 2023, 49(3): 1-9.

[7] 翟霖晓, 崔怡洲, 李成祥, 等. 微气泡发生器的研究与应用进展[J]. 化工进展, 2024, 43(1): 111-123.

[8] Sharma H, Nirmalkar N, Zhang W. Nanobubbles produced by nanopores to probe gas-liquid mass transfer characteristics[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 665: 274-285.

[9] 孙景彤, 梁家豪, 盛丹娜, 等. 臭氧微气泡协同氧化处理己内酰胺生产废水的效能研究[J]. 化工环保, 2024, 44(4): 495-502.

[10] Liu T, Zhang B, Li W, *et al*. The catalytic oxidation process of atrazine by ozone microbubbles: Bubble formation, ozone mass transfer and hydroxyl radical generation[J]. Chemosphere, 2023, 325: 138361.

[11] 马云飞, 张靖仪, 王建兵, 等. 陶瓷膜臭氧曝气强化传质工艺优化研究[J]. 工业水处理, 2023, 44(8): 61-69.

[12] 王兵, 师雯, 孙玉波, 等. 陶瓷膜曝气强化臭氧传质研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(3): 61-64, 69.

[13] Yang X, Chen L, Oshita S, *et al*. Mechanism for enhancing the ozonation process of micro-and nanobubbles: Bubble behavior and interface reaction[J]. ACS ES&T Water, 2023, 3(12): 3835-3847.

[14] Wu Y, Huang M, He C, *et al*. The influence of air nanobubbles on controlling the synthesis of calcium carbonate crystals[J]. Materials, 2022, 15(21): 7437.

[15] Bang J H, Jang Y N, Kim W, *et al*. Precipitation of calcium carbonate by carbon dioxide microbubbles[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 174(1): 413-420.■

(上接第 149 页)

[4] Mahmud M A P, Ejeian F, Azadi S, *et al*. Recent progress in sensing nitrate, nitrite, phosphate, and ammonium in aquatic environment[J]. Chemosphere, 2020, 259: 127492.

[5] 王贺敏. 固体接触式硝酸根聚合物膜离子选择性电极的构建及应用[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021.

[6] Lal K, Jaywant S A, Arif K M. Electrochemical and optical sensors for real-time detection of nitrate in water[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2023, 23(16): 7099.

[7] Zhai J, Luo B, Li A, *et al*. Unlocking all-solid ion selective electrodes: Prospects in crop detection[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2022, 22(15): 5541.

[8] Wan C, Cheng M, Zhang Q, *et al*. Preparation of MnO_2 nanostructures by controlled crystal growth and its pseudocapacitive properties[J]. Powder Technology, 2013, 235: 706-711.

[9] Zou Y, Xiang C, Yang L, *et al*. A mediatorless microbial fuel cell using polypyrrole coated carbon nanotubes composite as anode material[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(18): 4856-4862.

[10] Xie Z, Li X, Li W, *et al*. Graphene oxide/lithium titanate composite with binder-free as high capacity anode material for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015, 273: 754-760.

[11] 王含梅. 导电聚合物和 MnO_2 修饰阳极的制备及其在海底底泥微生物燃料电池中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.

[12] 邓锋, 赵敏, 鲍彦舟, 等. 基于 RGO-RuO_2 复合材料的超疏水全固态硝酸根离子选择性电极的研制[J]. 现代化工, 2025, 45(8): 261-266.

[13] Biesinger M C, Payne B P, Grosvenor A P, *et al*. Resolving surface chemical states in XPS analysis of first row transition metals, oxides and hydroxides: Cr, Mn, Fe, Co and Ni[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7): 2717-2730.

[14] Audi A A, Sherwood P M A. Valence-band x-ray photoelectron spectroscopic studies of manganese and its oxides interpreted by cluster and band structure calculations[J]. Surface and Interface Analysis, 2002, 33(3): 274-282.

[15] Bene C, Laborde A, Légnani M, *et al*. Study of ion-to-electron transducing layers for the detection of nitrate ions using FPSX (TD-DAN)-based ion-sensitive electrodes[J]. Sensors, 2024, 24(18): 5994.■