

文章编号:1674-7607(2021)02-0160-07

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2021.02.011

# 外部扰动对 $\text{TiO}_2$ -MDEA 纳米流体 吸收 $\text{CO}_2$ 影响的研究

杨 柳, 孔成栋, 张忠孝, 刘 健  
(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘 要:** 采用“两步法”制备分散性良好的  $\text{TiO}_2$ -MDEA 纳米流体作为吸收剂, 在鼓泡实验装置上进行  $\text{CO}_2$  吸收实验。研究了纳米颗粒质量分数和粒径对纳米流体强化  $\text{CO}_2$  吸收的影响, 以及气体体积流量、电磁搅拌和超声振动 3 种外部扰动方式对强化效果的影响。结果表明: 纳米流体主要通过阻止气泡聚并、增大有效反应面积来强化  $\text{CO}_2$  吸收, 并且强化效果与纳米颗粒质量分数和粒径相关, 最佳强化值可达 81.7%; 增大气体体积流量会减弱纳米流体的强化效果, 电磁搅拌在颗粒质量分数为 0.08% 左右时起促进作用, 施加超声振动会显著抑制纳米流体的强化作用。

**关键词:** 纳米流体;  $\text{CO}_2$  化学吸收; 外部扰动; 阻止气泡聚并机理; 有效反应面积

**中图分类号:** X511

**文献标志码:** A

**学科分类号:** 610.30

## Effects of External Disturbances on $\text{CO}_2$ Absorption by $\text{TiO}_2$ -MDEA Nanofluids

YANG Liu, KONG Chengdong, ZHANG Zhongxiao, LIU Jian

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:**  $\text{TiO}_2$ -MDEA nanofluids with good dispersity were prepared by the two-step method to absorb  $\text{CO}_2$  in a bubbling reactor, so as to analyze the influence of the mass fraction and size of nanofluids on the enhancement of  $\text{CO}_2$  absorption and to study the effects of the following three external disturbances on the  $\text{CO}_2$  absorption enhanced by nanofluids, such as the gas velocity, electromagnetic stirring and ultrasonic vibration, etc. Results show that the enhancement of nanofluids on  $\text{CO}_2$  absorption is realized by preventing the bubble coalescence to increase the effective reaction area; the mass fraction and the size of nanoparticles can both influence the enhancement effect, and the optimal effect can reach 81.7%. High gas velocity would result in low enhancement effect, while the electromagnetic stirring can promote the enhancement when the mass fraction is around 0.08%. The ultrasonic vibration would significantly inhibit the enhancement of nanofluids.

**Key words:** nanofluid;  $\text{CO}_2$  chemical absorption; external disturbance; mechanism of preventing bubble coalescence; effective reaction area

收稿日期:2020-04-10 修订日期:2020-06-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603403)

作者简介:杨 柳(1995—),女,四川万源人,硕士研究生,主要从事二氧化碳捕集方面的研究。

孔成栋(通信作者),男,副教授,电话(Tel.):021-34204915;E-mail:kongcd19@sjtu.edu.cn.

化学吸收法是一种较成熟的  $\text{CO}_2$  捕集技术<sup>[1-2]</sup>,其对  $\text{CO}_2$  的去除率高达 95%<sup>[3-4]</sup>,但是由于存在设备腐蚀、吸收剂降解和吸收剂再生能耗高<sup>[5-7]</sup>等问题,其发展受到限制。因此,大量新型吸收剂开发研究工作正在广泛开展,以解决化学吸收法存在的问题。

在众多新型吸收剂中,纳米流体自提出以来,在强化气液传质方面受到研究者的广泛关注。Krishnamurthy 等<sup>[8]</sup>通过观察荧光染料液滴在纳米流体和水中的扩散情况,发现纳米流体可强化传质过程。之后,纳米流体被应用于  $\text{CO}$  吸收,并被证明可提高常规吸收剂的  $\text{CO}_2$  吸收速率<sup>[9-11]</sup>。如唐忠利等<sup>[9]</sup>通过鼓泡实验研究了基于乙醇( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )的纳米流体对  $\text{CO}_2$  的吸收效果。结果表明,纳米流体可以强化乙醇吸收  $\text{CO}_2$ ,并且强化效果随着纳米颗粒质量分数的增加而增强。孙超杰<sup>[10]</sup>则采用实验与模拟相结合的方法研究了不同种类的纳米流体对  $\text{CO}_2$  吸收的强化效果,指出基于乙醇胺(MEA)的不同纳米流体强化效果排序为: $\text{TiO}_2\text{-MEA} > \text{MgO-MEA} > \text{SiO}_2\text{-MEA}$ 。Salimi 等<sup>[11]</sup>研究了磁性纳米流体在磁性环境中对水吸收  $\text{CO}_2$  的影响,指出  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -水和  $\text{NiO}$ -水纳米流体在最佳颗粒体积分数分别为 0.005%和 0.01%时强化效果达到最大,分别为 12%和 9.5%;磁性环境更能增强  $\text{CO}_2$  的吸收效果。

关于纳米流体的强化机理,学者们利用实验和模拟方法进行了深入研究,已得到 3 种主要强化机理,包括传输理论、边界层混合理论和阻止气泡聚并理论<sup>[12]</sup>。但由于实际工况复杂多变,且 3 种机理相互耦合、共同强化  $\text{CO}_2$  吸收过程,导致许多研究仅停留于宏观现象解释,不能得出不同工况下的具体控制机理。事实上,3 种控制机理具有空间尺度差异。传输理论和边界层混合理论主要解释气-液界面处的强化效果,具有局部小尺度特征;阻止气泡聚并理论则由于气泡可大可小,因而具有多尺度特征。如果能根据尺度上的差异设计实验,将有助于相关机理的研究。

针对气泡的多尺度特点,通过引入不同外部扰动来改变气泡尺寸分布和数量,从而分析阻止气泡聚并机理在实际纳米流体强化  $\text{CO}_2$  吸收中的作用。笔者通过改变气体体积流量、添加电磁搅拌和超声振动 3 种不同尺度的扰动方法,来改变纳米流体吸收系统中的气泡尺寸分布和数量,进而对比分析纳米流体强化  $\text{CO}_2$  化学吸收的内在机理。基于 N-甲基二乙醇胺(MDEA)溶液的实用性以及吸收速率慢、解吸能耗低的特性<sup>[13]</sup>,笔者采用  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒

与 MDEA 溶液的混合液作为吸收剂,首先研究纳米颗粒质量分数和颗粒粒径对强化作用的影响,再研究纳米流体强化  $\text{CO}_2$  吸收效果随外部扰动的变化规律,从而明确阻止气泡聚并机理的重要性。

## 1 实验系统

### 1.1 纳米流体的制备

采用“两步法”制备纳米流体。首先,量取一定体积、纯度为 99.99%的 MDEA 溶液(由上海侨怡生物科技有限公司提供,99.99%指 MDEA 的质量分数),与去离子水混合配置成 MDEA 水溶液, MDEA 质量分数为 30%。其次,称取一定质量的  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒(由上海麦克林生化有限公司提供),加入到 MDEA 水溶液中搅拌均匀。最后,为得到分散性和稳定性良好的纳米流体,采用 TL-1000Y 超声波细胞破碎仪将得到的颗粒悬浮液超声处理 1 h。图 1 为同一纳米流体静置 0 h 和 12 h 后的状态图片,其中  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒质量分数为 0.1%、粒径为 40 nm, MDEA 质量分数为 30%。由图 1 可知,所制备纳米流体具有良好的分散性和稳定性。

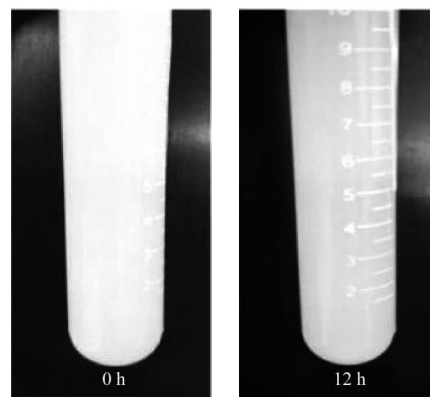


图 1 同一纳米流体静置 0 h 和 12 h 后的状态图片  
Fig. 1 States of the same nanofluid after standing for 0 hour and 12 hours, respectively

### 1.2 实验装置及步骤

设计和搭建了在线鼓泡实验系统,进行  $\text{CO}_2$  吸收实验,如图 2 所示。本实验系统主要包括进气系统、反应系统和检测系统 3 部分。进气系统包括  $\text{CO}_2$  高压钢瓶气、 $\text{N}_2$  高压钢瓶气以及 2 个质量流量计(MFC)。其中,质量流量计通过信号转换器连接到电脑端,可实现气体质量流量的在线控制。反应系统由多角烧瓶、恒温加热套和干燥设备组成。检测系统由 GXH-3010 E1 华云烟气分析仪组成,可对  $\text{CO}_2$  体积分数进行实时测量和记录。

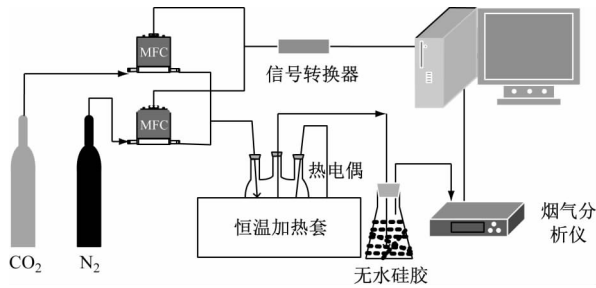


图 2 鼓泡吸收实验系统

Fig. 2 Schematic diagram of the bubble absorption experimental setup

实验过程中,在 MFC 的控制下高压钢瓶中的高纯度(99.99%)CO<sub>2</sub> 气体(由上海伟创标准气体分析技术有限公司提供)和 N<sub>2</sub> 气体(由上海液化空气压缩气体有限公司提供)以 1:1 的体积流量进行混合,得到待分离混合气体,其中 CO<sub>2</sub> 体积分数为 50%。本研究主要针对膜分离-化学吸收联合法<sup>[3]</sup>中第二级(膜分离后)较高 CO<sub>2</sub> 体积分数的烟气进行纳米吸收剂的开发,故采用体积分数为 50%的 CO<sub>2</sub>。随后,混合气体通入装有 400 mL 吸收剂的多角烧瓶中,由位于多角烧瓶底部的喷嘴喷出,并均匀产生气泡。气泡在上升过程中与吸收剂进行反应。多角烧瓶放置在恒温套内以控制反应温度。实验中,吸收剂温度保持在 25℃。反应后的余气采用无水硅胶进行干燥处理,随后进入烟气分析仪检测其 CO<sub>2</sub> 体积分数。每次实验反应时间 60 min,实时记录不同时刻烟气分析仪显示的 CO<sub>2</sub> 体积分数。通过与初始 CO<sub>2</sub> 体积分数进行比较,得到 CO<sub>2</sub> 体积分数减少量  $\Delta\varphi$ ,来表征系统的 CO<sub>2</sub> 吸收速率。

### 1.3 数据处理

相同时刻,不同纳米流体对应的 CO<sub>2</sub> 体积分数减少量  $\Delta\varphi$  与 30% MDEA 水溶液对应的 CO<sub>2</sub> 体积分数减少量的比值可用来表示不同溶液对 CO<sub>2</sub> 吸收的强化效果。图 3 给出了 CO<sub>2</sub> 体积分数减少量

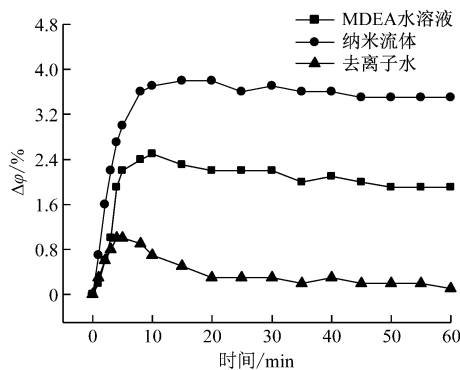


图 3 CO<sub>2</sub> 体积分数减少量  $\Delta\varphi$  随反应时间的变化曲线

Fig. 3 Variation of CO<sub>2</sub> concentration reduction  $\Delta\varphi$  with reaction time

$\Delta\varphi$  随反应时间的变化曲线。由图 3 可以看出,随着时间的推移,CO<sub>2</sub> 体积分数减少量  $\Delta\varphi$  在 60 min 内先增大,而后趋于稳定,即  $\Delta\varphi$  与反应时间有关。为了减小瞬时误差,引入 60 min 内总的 CO<sub>2</sub> 体积分数减少量  $\Delta\varphi_{1-60\text{ min}}$  来表征平均吸收速率。

$$\Delta\varphi_{1-60\text{ min}} = \sum_{t=1}^{60} \Delta\varphi_t = \sum_{t=1}^{60} (\varphi_{\text{in}} - \varphi_{\text{re},t}) \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi_t$  为  $t$  时刻 CO<sub>2</sub> 体积分数的减少量; $\varphi_{\text{in}}$  为反应前 CO<sub>2</sub> 的初始体积分数; $\varphi_{\text{re},t}$  为反应后  $t$  时刻 CO<sub>2</sub> 的体积分数。

此外,为了说明纳米流体的强化效果,分别引入强化因子  $E_1$  和  $E_2$ ,其计算如式(2)和式(3)所示。 $E_1$  表示纳米流体的强化效果, $E_2$  表示扰动(电磁搅拌和超声振动)对纳米流体强化效果的影响。

$$E_1 = \left[ \frac{(\Delta\varphi_{1-60\text{ min}})_{\text{nanofluid}}}{(\Delta\varphi_{1-60\text{ min}})_{\text{pure-MDEA}}} \right]_{\text{相同流动条件}} \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{E_{1,\text{tur}}}{E_{1,\text{no-tur}}} \quad (3)$$

式中: $(\Delta\varphi_{1-60\text{ min}})_{\text{nanofluid}}$  和  $(\Delta\varphi_{1-60\text{ min}})_{\text{pure-MDEA}}$  分别为 60 min 反应时间内,通过纳米流体和 MDEA 水溶液吸收后 CO<sub>2</sub> 体积分数减少量; $E_{1,\text{tur}}$  和  $E_{1,\text{no-tur}}$  分别为在吸收过程中施加和不施加电磁搅拌、超声振动等扰动时,纳米流体相对于 30% MDEA 水溶液的强化因子。

根据  $E_1$  和  $E_2$  的定义,当  $E_1$  大于 1 时,表示在相同流动条件下,纳米流体具有强化作用,即吸收速率相对增大;反之,当  $E_1$  小于 1 时,吸收速率相对减小。当  $E_2$  大于 1 时,说明扰动的存在使纳米流体的强化效果得到增强;当  $E_2$  小于 1 时,说明扰动使纳米流体的强化效果减弱。为了保证实验结果的可靠性,进行了多次重复实验,取实验平均值为最终实验值,以消除系统误差。实验所涉及的具体工况见表 1。

表 1 实验工况

Tab. 1 Experimental conditions

实验 工况	实验 变量	TiO <sub>2</sub> 质量分数/%	TiO <sub>2</sub> 颗粒 粒径/nm	气体体积流量/ (L·min <sup>-1</sup> )
1	颗粒质量分数	0~0.12	40	1
2	颗粒粒径	0.03、0.06	25、40、60	1
3	气体体积流量	0.08、0.09	40	1~2
4	电磁搅拌、超声振动	0~0.12	40	1

## 2 结果与分析

### 2.1 颗粒质量分数的影响

图 4 给出了混合气体总体积流量为 1 L/min,

MDEA 质量分数为 30%, TiO<sub>2</sub> 颗粒粒径为 40 nm 时,  $E_1$  随 TiO<sub>2</sub> 颗粒质量分数的变化曲线。由图 4 可知, 在 TiO<sub>2</sub> 颗粒质量分数为 0~0.12% 时,  $E_1$  始终大于 1, 说明纳米流体对 CO<sub>2</sub> 的吸收具有强化效果; 随着 TiO<sub>2</sub> 颗粒质量分数的增大,  $E_1$  先逐渐增大, 在 TiO<sub>2</sub> 颗粒质量分数为 0.09% 时, 达到最大值 1.699, 随后又逐渐减小。

$$X = A \times \alpha \quad (4)$$

式中:  $X$  为总表观 CO<sub>2</sub> 吸收速率(吸收 CO<sub>2</sub> 的量/吸收时间);  $A$  为参与反应的有效反应面积;  $\alpha$  为单位面积上的吸收速率。

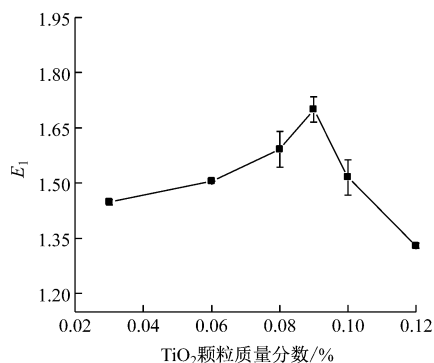


图 4 TiO<sub>2</sub> 颗粒质量分数对 CO<sub>2</sub> 吸收强化因子  $E_1$  的影响

Fig. 4 Effects of mass fraction of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on CO<sub>2</sub> absorption enhancement factor  $E_1$

如式(4)所示, 对于所用实验系统, 总表观 CO<sub>2</sub> 吸收速率( $X$ )主要受有效反应面积( $A$ )和单位面积上的吸收速率( $\alpha$ )的控制。相比常规吸收剂, 纳米流体一方面会改变单位面积传质系数, 从而改变单位面积上的吸收速率, 另一方面还会影响有效反应面积。Wang 等<sup>[14]</sup>通过湿壁塔实验发现, 纳米流体对单位面积上的吸收速率的提升不超过 15%。而本实验结果显示, 纳米流体的强化值均大于 30%。因此, 在本实验系统中, 纳米流体对有效反应面积的影响应大于对单位面积上的吸收速率的影响, 有效反应面积的变化占主导。

纳米颗粒对有效反应面积的改变主要包括以下两方面: 一方面, 纳米颗粒可吸附在气泡表面, 在气液界面处产生排斥力, 阻止气泡聚并<sup>[15]</sup>, 延长小气泡的寿命, 从而增大有效反应面积; 另一方面, 随着纳米颗粒质量分数的增大, 纳米流体中纳米颗粒数量浓度增大, 溶液黏度增大<sup>[16]</sup>, 从而导致气泡上升速度减小, 同时气泡聚并速度降低<sup>[17]</sup>, 最终增大了纳米流体中的气含率和有效反应面积。因此, 随着颗粒质量分数的增大, 气泡聚并困难, 并且气含率升高, 使得气液有效反应面积增大。

当颗粒质量分数超过 0.09% 时,  $E_1$  逐渐减小,

这主要是因为纳米流体的不稳定性和流体中气泡数量减少两方面因素所致。一方面, 纳米颗粒拥有极高表面能, 易相互碰撞团聚形成较稳定的团聚体<sup>[18]</sup>, 随着颗粒质量分数的增大, 颗粒数量浓度增大, 颗粒间距减小, 碰撞团聚现象更易发生。另一方面, 较大的颗粒质量分数会带来较大的溶液黏度, 导致气泡液膜强度增大<sup>[19]</sup>, 单个气泡的直径增大, 液相中气泡数量减少, 有效反应面积有所减小, 最终使得强化因子  $E_1$  在高颗粒质量分数时减小。

## 2.2 颗粒粒径的影响

纳米颗粒粒径对纳米流体吸收 CO<sub>2</sub> 强化效果的影响见图 5。在 TiO<sub>2</sub> 颗粒质量分数为 0.03% 和 0.06% 时, 随着 TiO<sub>2</sub> 颗粒粒径的增大, 强化因子  $E_1$  先减小后增大。当 TiO<sub>2</sub> 颗粒质量分数维持 0.03% 不变、TiO<sub>2</sub> 颗粒粒径为 25 nm 时, 对应的强化因子  $E_1$  为 1.499, TiO<sub>2</sub> 颗粒粒径为 40 nm 时  $E_1$  下降为 1.448, 而当 TiO<sub>2</sub> 颗粒粒径变为 60 nm 时  $E_1$  又上升至 1.630。当 TiO<sub>2</sub> 颗粒质量分数维持在 0.06% 不变、TiO<sub>2</sub> 颗粒粒径为 25 nm 时强化因子  $E_1$  达到 1.817, TiO<sub>2</sub> 颗粒粒径为 40 nm 时  $E_1$  下降为 1.504, 而 TiO<sub>2</sub> 颗粒粒径为 60 nm 时  $E_1$  又上升到 1.773。

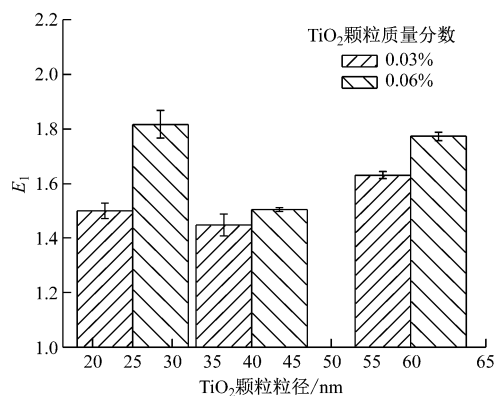


图 5 TiO<sub>2</sub> 颗粒粒径对 CO<sub>2</sub> 吸收强化因子  $E_1$  的影响

Fig. 5 Effects of size of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on CO<sub>2</sub> absorption enhancement factor  $E_1$

在相同颗粒质量分数条件下, 不同颗粒粒径对应不同的颗粒数量浓度。一方面, 颗粒粒径增大, 纳米颗粒数量浓度和溶液黏度下降, 其抗气泡聚并的能力减弱, 气含率降低, 有效反应面积相对减小, 吸收速率下降。另一方面, 增大颗粒粒径可以减弱纳米颗粒的尺度效应, 减少颗粒团聚。采用纳米粒度分析仪(Zetasizer Nano S, 英国 Malvern 公司生产)得出 TiO<sub>2</sub>-MDEA 纳米流体中平均有效粒径与初始颗粒粒径的关系, 如图 6 所示。相同颗粒质量分数条件下, 纳米流体中颗粒的平均有效粒径随着初始

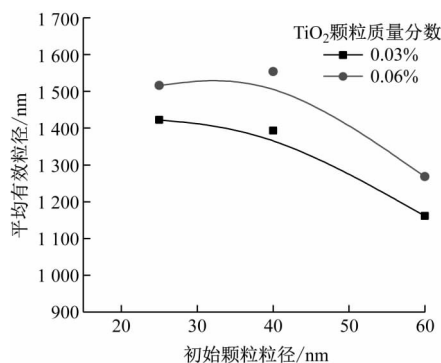


图6 TiO<sub>2</sub>-MDEA 纳米流体中平均有效粒径与初始颗粒粒径的关系

Fig. 6 Average effective particle size vs. primary particle size in TiO<sub>2</sub>-MDEA nanofluids

颗粒粒径的增大而减小,说明初始颗粒粒径的增大降低了纳米颗粒团聚簇的尺寸。团聚簇尺寸的相对降低可以相对提高纳米流体中颗粒的抗气泡聚并能力,增大有效反应面积,提高总吸收速率。以上2种相反机制的共同作用使得随着颗粒粒径的增大,强化因子  $E_1$  先减小后增大。从实验中还可以得知,当颗粒质量分数较小时,颗粒粒径的影响强于颗粒质量分数的影响。

### 2.3 混合气体体积流量的影响

图7给出了混合气体体积流量对CO<sub>2</sub>吸收强化因子  $E_1$  的影响。由图7可以看出,当颗粒质量分数相同时,随着混合气体体积流量从1 L/min 增加至2 L/min,强化因子  $E_1$  降低,因而纳米流体的强化效果随气体体积流量的增大而减弱。其原因是混合气体体积流量增大导致所产生的气泡动能增大,气泡聚并速度加快,有效反应面积减小,总吸收速率下降。然而,在60.8~150.5 mL/min 的较小气体体积流量下,Jiang 等<sup>[20]</sup>发现随着气体体积流量增大,纳米流体的强化效果增强。结合本实验结果,说明存在一个最佳气体体积流量,使得纳米流体吸收CO<sub>2</sub> 的效果最优。

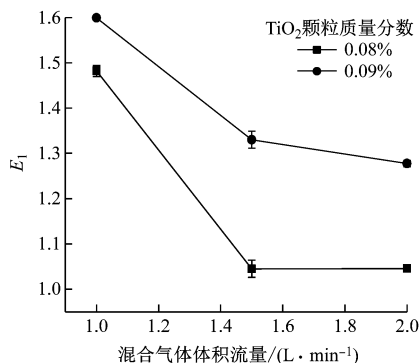


图7 混合气体体积流量对CO<sub>2</sub>吸收强化因子  $E_1$  的影响

Fig. 7 Effects of mixed gas velocity on CO<sub>2</sub> absorption enhancement factor  $E_1$

从图7还可以看出,随着颗粒质量分数的增大,强化因子随气体体积流量增大下降幅度变缓。这是因为在高颗粒质量分数下颗粒数量浓度大,其阻止气泡聚并的能力强。气体体积流量增大引起的负面影响相对减弱,导致强化因子下降变缓。

### 2.4 电磁搅拌和超声振动的影响

采用定转速电磁搅拌和定功率超声振动,研究了电磁搅拌和超声振动2种扰动形式对纳米流体强化CO<sub>2</sub>吸收的影响,结果如图8所示。实验中TiO<sub>2</sub>颗粒粒径为40 nm,混合气体体积流量为1 L/min。结果表明,电磁搅拌对纳米流体强化效果的影响  $E_2$  与纳米颗粒质量分数有关。随着颗粒质量分数的增大,电磁搅拌的作用由抑制变为增强,在颗粒质量分数为0.08%时  $E_2$  达到最大值,之后逐渐降低,接近于1。外加超声振动时,  $E_2$  始终小于1,说明超声振动可抑制纳米流体的强化作用,而且超声振动的抑制作用在低颗粒质量分数时较为稳定,当颗粒质量分数大于0.06%后,随着颗粒质量分数增大,超声振动的抑制作用迅速增强。

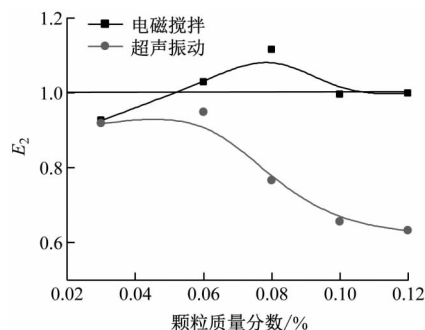


图8 电磁搅拌和超声振动对CO<sub>2</sub>吸收强化因子  $E_2$  的影响

Fig. 8 Effects of electromagnetic stirring and ultrasonic vibration on CO<sub>2</sub> absorption enhancement factor  $E_2$

电磁搅拌对纳米流体强化效果的影响主要是因为电磁搅拌在宏观尺度上可加速大气泡破碎成小气泡,使得溶液中气泡数量增加,气泡间距减小,而且气泡动能相应增大,气泡聚并的概率增大。当颗粒质量分数较小时,纳米颗粒阻止气泡聚并的能力弱,所以当颗粒质量分数为0.03%时,电磁搅拌出现了抑制纳米流体强化CO<sub>2</sub>吸收的情况。随着颗粒质量分数的增加,纳米颗粒阻止气泡聚并的能力增强,因此电磁搅拌的强化作用提高。在颗粒质量分数为0.08%时,达到11.5%的最大强化值。强化峰值的出现主要是因为随着颗粒质量分数的进一步增大,颗粒数量浓度增加,纳米颗粒的不稳定性和溶液黏度的综合影响导致颗粒阻止气泡聚并的能力有所减弱。因此,在超过最佳颗粒质量分数后,电磁搅拌的

强化效果降低。

与机械搅拌相比,超声振动属于微尺度扰动。在吸收过程中,超声的引入会带来巨大能量。一方面,MDEA 水溶液吸收 CO<sub>2</sub> 的反应为可逆反应,能量的输入可能使得该可逆反应向着解吸方向进行。如 Liu 等<sup>[21]</sup>研究了超声对 CO<sub>2</sub> 从 MDEA 富液中脱附的影响,发现超声有助于 CO<sub>2</sub> 解吸。另一方面,超声的微尺度扰动可以破坏界面层,使得气泡更容易聚并<sup>[22]</sup>。加入超声振动减弱了纳米流体阻止气泡聚并的能力,因此超声振动抑制了纳米流体的强化效果。在高颗粒质量分数时,超声振动的抑制作用更强。

### 3 结 论

(1) 纳米颗粒可以阻止气泡聚并,增大有效反应面积,强化吸收剂吸收 CO<sub>2</sub> 的效果,并且强化效果随着纳米颗粒质量分数和粒径的变化而改变。在相同颗粒粒径下,存在最佳颗粒质量分数以达到最好的强化效果。而在相同颗粒质量分数下,随着颗粒粒径从 25 nm 增大到 60 nm,强化因子  $E_1$  呈现先减小后增大的趋势。

(2) 随着气体体积流量从 1 L/min 增大至 2 L/min,气泡动能增加,气泡聚并速度加快,纳米流体的强化效果降低。然而,增大颗粒质量分数会强化纳米流体阻止气泡聚并的能力,削弱气体体积流量增大引起的负面影响。

(3) 不同尺度的机械扰动可导致不同的效果。当颗粒质量分数为 0.03 % 时,电磁搅拌抑制了纳米流体的强化效果,但当颗粒质量分数为 0.08 % 时则达到最大强化值 11.5 %。微尺度的超声振动可促进气泡聚并,减小有效反应面积,最终充分抑制纳米流体的强化效果。

#### 参考文献:

- [1] 江文敏. 化学吸收法捕集二氧化碳工艺的模拟及实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [2] 吉华丽. 基于旋流反应的天然气脱硫脱碳模拟实验研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [3] JIANG Yanchi, ZHANG Zhongxiao, FAN Haojie, et al. Experimental study on hybrid MS-CA system for post-combustion CO<sub>2</sub> capture[J]. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, 2018, 8(2): 379-392.
- [4] WANG M, LAVAL A, STEPHENSON P, et al. Post-combustion CO<sub>2</sub> capture with chemical absorption: a state-of-the-art review[J]. **Chemical Engineering Research and Design**, 2011, 89(9): 1609-1624.

- [5] 凌凡, 张忠孝, 樊俊杰, 等. 膜分离法、化学吸收法以及联合法分离 CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> 试验比较[J]. **动力工程学报**, 2015, 35(3): 245-250.  
LING Fan, ZHANG Zhongxiao, FAN Junjie, et al. Experimental study on CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> separation respectively by membrane, chemical and the combined method[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2015, 35(3): 245-250.
- [6] 林海周, 杨晖, 罗海中, 等. 烟气二氧化碳捕集胺类吸收剂研究进展[J]. **南方能源建设**, 2019, 6(1): 16-21.  
LIN Haizhou, YANG Hui, LUO Haizhong, et al. Research progress on amine absorbent for CO<sub>2</sub> capture from flue gas[J]. **Southern Energy Construction**, 2019, 6(1): 16-21.
- [7] YU Wei, WANG Tao, PARK A H A, et al. Review of liquid nano-absorbents for enhanced CO<sub>2</sub> capture[J]. **Nanoscale**, 2019, 11(37): 17137-17156.
- [8] KRISHNAMURTHY S, BHATTACHARYA P, PHELAN P E, et al. Enhanced mass transport in nanofluids[J]. **Nano Letters**, 2006, 6(3): 419-423.
- [9] 唐忠利, 彭林明, 张树杨. 纳米流体强化 CO<sub>2</sub> 鼓泡吸收实验[J]. **天津大学学报**, 2012, 45(6): 534-539.  
TANG Zhongli, PENG Linming, ZHANG Shuyang. Experiment on enhancement of bubble absorption of gaseous CO<sub>2</sub> with nanofluids[J]. **Journal of Tianjin University**, 2012, 45(6): 534-539.
- [10] 孙超杰. 纳米颗粒强化胺法吸收 CO<sub>2</sub> 的实验及模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [11] SALIMI J, HAGHSHEENASFARD M, ETEMAD S G. CO<sub>2</sub> absorption in nanofluids in a randomly packed column equipped with magnetic field[J]. **Heat and Mass Transfer**, 2015, 51(5): 621-629.
- [12] 姜家宗, 赵博, 曹萌, 等. 微细颗粒强化气液传质研究综述[J]. **中国电机工程学报**, 2014, 34(5): 784-792.  
JIANG Jiazong, ZHAO Bo, CAO Meng, et al. Overview of studies on gas-liquid mass transfer enhancement in the presence of fine particles[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2014, 34(5): 784-792.
- [13] 康顺吉, 沈喜洲, 向丽. MDEA 及其复合胺溶液对 CO<sub>2</sub> 吸收与解吸研究进展[J]. **天然气化工**, 2019, 44(4): 124-130.  
KANG Shunji, SHEN Xizhou, XIANG Li. Research progresses in carbon dioxide absorption and desorption from MDEA and its activated amine solutions[J]. **Natural Gas Chemical Industry**, 2019, 44(4): 124-130.
- [14] WANG Tao, YU Wei, FANG Mengxiang, et al.

- Wetted-wall column study on CO<sub>2</sub> absorption kinetics enhancement by additive of nanoparticles[J]. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, 2015, 5(5): 682-694.
- [15] 李舒宏, 丁一, 杜垲, 等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 颗粒强化 MDEA 溶液鼓泡吸收 CO<sub>2</sub> 的特性[J]. **东南大学学报(自然科学版)**, 2013, 43(4): 830-834.  
LI Shuhong, DING Yi, DU Kai, et al. CO<sub>2</sub> bubble absorption performance enhancement by TiO<sub>2</sub> nanoparticles in MDEA solution[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2013, 43(4): 830-834.
- [16] 李舒宏, 丁一, 杜垲, 等. TiO<sub>2</sub>-MDEA-H<sub>2</sub>O 纳米流体热物理性质测量[J]. **江苏大学学报(自然科学版)**, 2013, 34(5): 579-583.  
LI Shuhong, DING Yi, DU Kai, et al. Measurement of thermophysical properties of TiO<sub>2</sub>-MDEA-H<sub>2</sub>O nanofluids[J]. **Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)**, 2013, 34(5): 579-583.
- [17] 李昕晨. 双气泡聚并的流体力学行为研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- [18] 袁文俊, 周勇敏. 纳米颗粒团聚的原因及解决措施[J]. **材料导报**, 2008, 22(增刊3): 59-61.
- YUAN Wenjun, ZHOU Yongmin. Reasons for aggregation of nanoparticles and solutions[J]. **Materials Review**, 2008, 22(Sup3): 59-61.
- [19] 吕其超, 李兆敏, 李宾飞, 等. 纳米颗粒与黏弹性表面活性剂稳定的泡沫体系滤失性实验研究[J]. **中国科技论文**, 2017, 12(3): 241-248.  
LÜ Qichao, LI Zhaomin, LI Binfei, et al. Experimental study on filtration behavior of nanoparticles and viscoelastic surfactants stabilized foam[J]. **China Sciencepaper**, 2017, 12(3): 241-248.
- [20] JIANG Jiazong, ZHAO Bo, ZHUO Yuqun, et al. Experimental study of CO<sub>2</sub> absorption in aqueous MEA and MDEA solutions enhanced by nanoparticles[J]. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 2014, 29: 135-141.
- [21] LIU Hongchen, ZHAO Shuainan, ZHOU Feng, et al. Ultrasonic enhancement of CO<sub>2</sub> desorption from MDEA solution in microchannels[J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2019, 58(4): 1711-1719.
- [22] ASHOKKUMAR M, LEE J, KENTISH S, et al. Bubbles in an acoustic field: an overview[J]. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2007, 14(4): 470-475.