

技术进展

微纳米气泡在 CCUS 的应用研究及未来展望

胡记超^{1,2}, 牛泽栋^{1,2}, 谢睿赓^{1,2}, 刘和木^{1,2}, 王乐萌^{1,2*}

(1. 华北电力大学燕赵电力实验室, 河北 保定 071003;

2. 河北省燃煤电站烟气多污染物协同控制重点实验室, 华北电力大学(保定), 河北 保定 071003)

摘要: 工业二氧化碳(CO₂)排放导致的全球气候变化问题日益严峻, 碳捕获、利用与封存(CCUS)技术是实现碳中和目标的关键途径之一, 但其广泛应用仍受限于高成本、低效率等技术瓶颈。系统详细分析了微纳米气泡技术(MNBs)的作用机理, 并综述了其在CCUS领域的研究进展, 最后对MNBs技术在CCUS领域的未来发展进行了展望, 旨在为MNBs技术在CCUS系统中的深入研究与规模化应用提供参考。

关键词: 微纳米气泡; CCUS; 碳捕集; 传质强化; 气液界面

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)10-0017-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.004

Research and future prospects of micro-nano bubbles in CCUS applications

HU Ji-chao^{1,2}, NIU Ze-dong^{1,2}, XIE Rui-geng^{1,2}, LIU He-mu^{1,2}, WANG Le-meng^{1,2*}

(1. Yanzhao Electric Power Laboratory, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Key Lab of Power Plant Flue Gas Multi-Pollutants Control, North China Electric Power University

(Baoding), Baoding 071003, China)

Abstract: The global climate change problem caused by industrial carbon dioxide (CO₂) emissions is becoming increasingly severe. Carbon capture, utilization, and storage (CCUS) technology is one of the key approaches to achieving carbon neutrality, however, its wide application is still limited by technical bottlenecks such as high cost and low efficiency. This paper systematically and in detail analyzes the mechanism of micro-nano bubbles (MNBs) technology and reviews its research progress in the CCUS field. Finally, it looks forward to the future development of MNBs technology in the CCUS field. This paper aims to provide a reference for in-depth research and large-scale application of MNBs technology in the CCUS system.

Key words: micro-nano bubbles; CCUS; carbon capture; mass transfer enhancement; gas-liquid interface

工业的快速发展导致大量 CO₂ 排放, 加剧了温室效应并引发全球变暖等气候变化问题^[1-2]。在此背景下, CCUS 作为实现深度减排以及碳中和目标的关键路径, 能够直接且有效地降低碳排放。然而, 目前 CCUS 技术在各环节仍存在能耗较高、可靠性不足、反应速率缓慢等问题^[3]。这些瓶颈共同制约了 CCUS 技术的规模化推广。为应对高能耗、低效率等问题, MNBs 技术凭借特有的高效传质性能与界面效应, 在提升反应与捕集效率方面展现出重要潜力, 为突破 CCUS 关键瓶颈提供了新的可能。

MNBs 通常指直径在 0.1~100 μm 之间的气泡, 其中直径大于 1 μm 的为微气泡(MBs), 小于 1 μm 的则为纳米气泡(NBs)^[4]。MNBs 具有体积小、比

表面积大、上升速度慢(停留时间长)、气体溶解率高、气液传质效率高、产生自由基、界面电位高、马太效应等独特的理化性质和生理活性^[5], 在各个领域显示出巨大的应用潜力。本文中综述了 MNBs 在 CCUS 的应用研究现状, 并对其应用前景进行展望, 以开发更高效、低能耗的 CCUS 技术。

1 MNBs 的作用机理

1.1 巨大的比表面积与高传质效率

CO₂ 体积传质系数($K_c a_v$)是衡量 CO₂ 在气液两相中传递速率的核心参数, 直接决定 CO₂ 吸收、溶解等过程的效率, 其数值与传质环境息息相关。 $K_c a_v$ 的值可以用式(1)^[2]计算。

收稿日期: 2025-12-05; 修回日期: 2026-07-27

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(52206011); 中央高校基本科研业务费专项资金面上项目(2024MS175, 2023MS142)

作者简介: 胡记超(2002-), 男, 硕士生; 王乐萌(1990-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大气污染控制, 通讯联系人, wanglm@ncepu.edu.cn。

$$K_c a_v = (G d_{V_{CO_2}}) / [P(y_{CO_2} - y_{CO_2}^*) d_z] \quad (1)$$

式中, $K_c a_v$ 为 CO_2 体积传质系数, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; G 为气相总体积流量, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; P 为总压力, Pa ; y_{CO_2} 为 CO_2 的摩尔分数; $y_{CO_2}^*$ 为气液相界面处 CO_2 的摩尔分数, 该值与液相中 CO_2 的摩尔分数处于平衡状态; d_z 为微元高度, m 。

对于同一种气体, 将其转化为 MNBs 形式时, 因气泡体积与直径的立方呈正比, 而表面积与直径的平方呈正比, 故随着气泡直径减小, 单位体积气体对应的总表面积 (即比表面积 a_v) 会急剧增大。这一特性为气体向液体的传递提供了巨大的气液界面, 使得气体在液体中的溶解效率远高于普通曝气方式, 从而显著提升传质效率。另一方面, 如图 1 所示, MNBs 更大的比表面积可提供更多反应成核位点, 为后续反应的高效进行进一步创造有利条件^[6]。

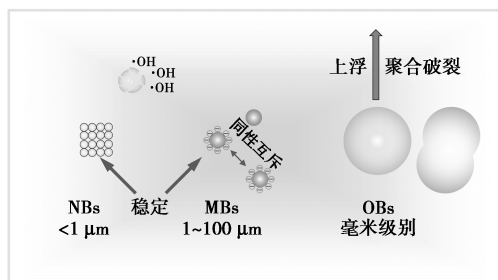


图1 微纳米气泡的性质

此外, 即便气体流量 (G) 等操作参数未发生改变, 根据杨-拉普拉斯方程 (2)^[7], 气泡内部的附加压力与气液界面表面张力呈正比、与气泡半径呈反比, 因此 MNBs 的微小半径会导致其内部压力产生较大变化。

$$\Delta P = 2\gamma/r \quad (2)$$

式中, ΔP 为气泡内部的附加压力, Pa ; γ 为表面张力, N/m ; r 为气泡半径, m 。

因此, 当气泡半径极小时, 其内部会产生巨大的压力 (可达数百个大气压), 巨大的内部压力使气泡内的气体分子被强烈压缩, 极大地增加了气体在气-液界面处的浓度梯度 ($d_{V_{CO_2}}$), 故 CO_2 体积传质系数会大幅度增加, 从而显著加速了气体由内向外溶解到液体中的过程, 同样显著提升了传质效率。Tanaka 等^[8] 的实验证据表明, 当气泡直径从 $62 \mu\text{m}$ 减小到 $16 \mu\text{m}$ 时, 空气-MNBs 在水中的体积传质系数直接增强了 100%。

1.2 长时间悬浮与自收缩溶解

气泡的停留时间和气泡的上浮速度有直接关

系。根据斯托克斯定律 (3)^[9], 气泡的上浮速度与气泡半径的平方呈正比。

$$v = (2/9) \{[(\rho_l - \rho_g)gr^2]/\mu\} \quad (3)$$

式中, v 为气泡的上浮速度, m/s ; ρ_l 为液体的密度, kg/m^3 ; ρ_g 为气体的密度 (远小于 ρ_l , 通常可忽略), kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; r 为气泡的半径, m ; μ 为液体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

MNBs 尺寸极小, 因此其上浮速度极慢, 纳米气泡甚至在布朗运动的作用下可以长时间 (数周甚至数月) 悬浮在水中, 实现“静态”停留, 显著延长气液接触时间。因此, MNBs 具有显著优于常规气泡的稳定性。根据 Epstein 和 Plesset 提出的气泡稳定性理论^[10], MNBs 的理论寿命应处于微秒量级; 然而, 实际观测结果显示, 其实际存在时间可长达数天^[11]。MNBs 更长的稳定周期可有效延缓气泡聚并过程, 显著延长气液两相接触时间, 为气液反应的持续进行提供了有利条件。

最后, MNBs 还具有自收缩溶解特性, 这是 MNBs 最独特的性质之一。在溶解过程中, 气泡会逐渐收缩。当尺寸减小到临界点 ($150 \sim 200 \text{ nm}$) 时, 气泡界面失去稳定性, 会在数十纳秒内瞬间崩溃消失, 将所有的气体彻底溶解入液体中。同时, MNBs 破裂瞬间会产生具有强氧化性的羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$), 该过程可赋予溶液一定的氧化能力^[12]。

1.3 界面带电与 Zeta 电位

MNBs 拥有独特的气-液界面结构, 界面区域的氢键网络与水体本体存在明显差异。这种结构差异会导致 OH^- 或 H^+ 在界面处发生过量分布, 进而使 MNBs 表面形成较高的 Zeta 电位^[13]。首先, 高 Zeta 电位在气泡界面形成强大的静电力, 能有效阻止气泡间的聚并与粗化, 从而保障其纳米尺度与巨大比表面积的长时稳定存在, 为持续高效的气-液传质提供了先决条件。其次, 带负电的界面会通过静电作用主动吸附并富集溶液中带正电的阳离子 (如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}), 在与 CO_2 溶解产生的 CO_3^{2-} 相遇时, 能在界面区域形成局部高反应浓度环境, 显著降低反应能垒, 从而极大地加速碳酸盐沉淀的生成。此外, 研究还揭示了 MNBs 更为独特的界面行为: 其一, 其界面具备特殊的电子转移能力, 能够在微界面区域直接固定额外的 CO_2 分子, 为碳捕集提供了新路径; 其二, 通过界面物理吸附富集的气体分子, 可在温和升温条件下实现可控释放, 这为开发低能耗的 CO_2 富集与再生工艺展现了巨大潜力。这些独特的理化性质共同奠定了 MNBs 在 CCUS 技术中作为高

效介质与反应平台的关键地位。

2 MNBs 在 CCUS 应用研究现状

2.1 在碳捕集环节的应用研究现状

MNBs 在化学吸收法中存在广泛的应用。 CO_2 化学吸收法是通过碱性吸收剂(如胺类、碳酸盐溶液)与 CO_2 发生化学反应生成稳定化合物,实现 CO_2 选择性捕获,而 MNBs 凭借高比表面积等特性,可在不改变反应路径的前提下降低传质阻力、加快传质速率,能够提升多种溶液的 CO_2 吸收与解吸性能。

在碳酸盐捕集体系中,Shen 等^[14]通过构建 $\text{CO}_2\text{-Na}_2\text{CO}_3$ 溶液微界面体系,模拟工业烟气吸收过程,系统测量气泡直径、气含率及传质系数等关键参数,从动力学层面明确揭示了 MNBs 强化气液传质的潜力。Kajolinna 等^[15]研究进一步证实,在常压条件下利用微泡反应器与碳酸钠溶液,即可实现依赖高压环境才能达成的 72%~84% 的 CO_2 捕获率,证明了 MNBs 用于碳捕集工艺的可行性。

在胺法 CO_2 捕集体系中,同样可发挥重要作用。MNBs 通过胺溶液与 CO_2 形成的微界面,能够有效克服部分胺类吸收速率慢、效率低的问题。Wang 等^[16]和 Bae 等^[17]分别通过降液管、小孔径格栅板等方法,在不同胺溶液中制备稳定的 $\text{CO}_2\text{-MNBs}$,并对比其对吸收与解吸过程的影响,结果表明,MNBs 在吸收阶段可强化传质反应、提高 CO_2 负载量;而在再生阶段,MNBs 虽不改变最终 CO_2 负载量,但能通过提高再生速率显著提升吸收剂恢复效率,从而促进解吸过程、恢复吸收剂性能,最终实现能耗降低与效率提升,且适用于乙醇胺(MEA)、2-氨基-2-甲基-1-丙醇(AMP)、二乙醇胺(MDEA)等多种吸收剂。表 1 是将 MNBs 应用于 AMP 体系与其他胺体系的再生能耗对比。

表 1 不同胺体系的胺浓度、再生温度(T_{reg})与再生能耗对比

胺体系	胺浓度/ ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	T_{reg}/K	再生能耗/ ($\text{GJ}\cdot\text{t}^{-1}$)	相对 MEA 能耗/%
MEA	5.0 M	393.15	3.80	100.00
AMP	2.5 M	382.15	2.10	55.26
AMP+MDEA+MEA	5.0 M	363.15	1.69	44.50
MDEA+MEA	6.0 M	363.15	2.22	58.45
AMP+MNBs	5.0 M	368.15	1.89	49.74

如表 1 所示,引入 MNBs 后 AMP 溶液的再生能

耗仅为 MEA 的 49.74%,与 AMP+MDEA+MEA 混合胺体系相当。然而,MNBs 与化学吸收法结合捕集 CO_2 的研究尚未大规模开展。工业应用还需考虑胺与烟气组分反应、设备腐蚀、胺逃逸、大规模聚结影响界面效应及 $\cdot\text{OH}$ 引发副反应等问题。这些难题需进一步研究解决,以推动 MNBs 在 CO_2 捕集中的应用。

2.2 在碳利用环节的应用

2.2.1 工业领域

CO_2 是加氢、碳酸化等反应的重要工业原料,可以合成甲醇、二甲醚(DME)、液态烃(如汽油、柴油)等一系列化工产品,MNBs 在其中同样具有广泛的应用前景,在具体应用场景中,MNBs 的作用已得到多项研究证实:Choi 等^[18]使用 $\text{CO}_2\text{-MNBs}$ 优化了混凝土的孔隙结构以及增强界面黏结、促进水化反应并控制裂纹,显著提升碳封存能力,最大抗压强度提高 5.1%;Bose 等^[19]则在 CO_2 制甲酸过程中构建微界面,利用 MNBs 界面电场驱动水分子解离,结合光催化实现甲酸的高效合成,为该工艺规模化生产提供了新思路。而在 CO_2 加氢反应中,借助 MNBs 可增强气体与催化剂的接触效率,在提高反应速率与原料转化率的同时,有效降低生产成本。MNBs 能提升界面活化能力,减少未反应气体浪费,进一步提高 CO_2 利用率。

2.2.2 农业领域

CO_2 是作物光合作用关键原料,大气中浓度约 400×10^{-6} ,而温室大棚因通风不畅,内部浓度仅 $100\times 10^{-6}\sim 200\times 10^{-6}$,远低于作物最适生长浓度(普遍 $>400\times 10^{-6}$)^[20],导致光合速率偏低。在 CCUS 体系中, CO_2 可作为气肥用于农田,兼具增产提质与减排作用,但传统施用技术存在 CO_2 分布不均、易逸散的问题,作物实际利用效率低,单位碳增产效益不佳。MNBs 技术能有效解决这一痛点。Khan 等^[21]研究表明, $\text{CO}_2\text{-MNBs}$ 处理组苋菜生长状况最佳,空气-MNBs 组次之,证实 MNBs 可通过优化 CO_2 供给方式,为作物生长创造更优环境,且 $\text{CO}_2\text{-MNBs}$ 的效果尤为突出。MNBs 技术优势在于: CO_2 以溶解态供给,避免浓度分布不均,同时 MNBs 高稳定性可间接增加 CO_2 吸收量。综上,MNBs 能提升 CO_2 利用率与作物产量,在农业气肥领域潜力巨大,且有望降低农业碳利用成本。

2.2.3 生物转化领域

CO_2 可为部分工程细菌以及藻类生物的主要碳源。传统宏观气泡因传质效率低、 CO_2 溶解度有限,

成为碳固定步骤中的关键瓶颈,因此在生物转化领域,MNBs 同样应用广泛。Chen 等^[22]在大肠杆菌合成琥珀酸过程中使用 CO₂-MNBs, CO₂ 利用率提高 29.69%。同时 You 等^[23]在微藻的生长过程中引入 CO₂-MNBs 后也取得了相同的结果,在引入 MNBs 后,直接提升了微藻生长速率与碳捕获能力。在引入 CO₂-MNBs 后,提高了培养液中 CO₂ 溶解量,为工程菌以及藻类提供更多碳源以及更高的 CO₂ 浓度,同时产生的·OH 也能够抑制杂细菌生长。

2.3 在封存环节的应用

CO₂ 封存环节主要分为地质封存与矿物封存 2 大场景。在地质封存中,向盐水含水层注入 CO₂ 以及利用 CO₂ 驱油是大规模减排的重要手段,但利用 CO₂-MNBs 可以避免盐水注入时 CO₂ 沿大孔隙迁移而导致小孔隙中残留盐水,提升封存空间的利用效率^[24]。而在利用 CO₂ 进行驱油时,MNBs 不仅能提高石油采收率,还能将 CO₂ 更安全、更永久地封存于地下。

在矿物封存中则是将富含钙、镁元素的天然矿物或工业固废与 CO₂ 发生化学反应生成稳定的碳酸盐矿物,将 CO₂ 以固态形式永久固定,而 MNBs 的引入,能够显著缩短这一过程。在实际工程应用中,Takemura 等^[25]开展了实验室与现场注入试验,验证了将 MNBs 应用于碳封存环节的可行性。但要将其从实验室推广到油田尺度,其扩增效应和长期封存安全性仍然是当前研究的焦点和难点。

2.4 在 CCUS 技术中潜在应用

MNBs 在碳捕集技术中的吸附法以及膜分离法具有潜在应用前景。CO₂ 捕集中的吸附法是借助活性炭、MOFs 等材料对 CO₂ 的选择性吸附与再生实现分离,适用于中低浓度场景且操作温和;膜分离法则利用膜材料的筛分效应,让 CO₂ 优先渗透以完成分离,具有系统紧凑、能耗较低的特点,二者均为重要的 CO₂ 捕集技术。MNBs 依托独特理化特性,未来可能应用于吸附剂与膜的清洁与除污。

在吸附剂再生环节,MNBs 能渗透至吸附剂微小孔隙中,实现深度清洁表面剂孔隙内的极性污染物。而在膜清洁过程中,MNBs 可在液相中长时间稳定存在,有效抑制膜表面颗粒的沉积与积累。Dayarathne 等^[26]的研究已证实,不添加任何化学物质时,MNBs 即可有效控制膜表面结垢的发展;若将 MNBs 与高浓度清洁化学品联用,则能以更经济、高效的方式,对受污染膜进行化学清洁。

3 挑战、未来展望与发展趋势

MNBs 技术凭借独特的物理化学性质,在 CCUS 技术的捕集、利用与封存 3 大环节中展现出显著的应用潜力与创新价值。在 CO₂ 捕集方面,MNBs 通过极大比表面积和高效传质特性,显著提升了胺溶液等吸收剂对 CO₂ 的捕获效率与负载能力,同时有助于降低再生能耗;在 CO₂ 利用方面,MNBs 在化工合成与农业增产中表现出多方面的优势,能通过界面效应促进成核、加速反应,提高了产物纯度与反应效率;在 CO₂ 地质封存与驱油应用中,MNBs 因尺寸小、滞留时间长、溶解效率高等特性,能够有效改善 CO₂ 在储层中的分布性与滞留性,提高封存安全性与石油采收率。尽管 MNBs 在 CCUS 各个环节都展现出巨大潜力,但目前研究仍处于起步阶段,存在基础机理不清晰、应用过程中的副作用和风险未被充分评估等问题。在未来,MNBs 技术在 CCUS 系统中的规模化应用仍需从以下方面持续推进。

(1) 机理深入研究:加强对 MNBs 界面行为、·OH 生成机制、气泡稳定性控制等基础科学问题的研究,尤其需开展多尺度、多条件下的原位观测与模拟工作。

(2) 技术集成与优化:开发高效、低能耗、耐腐蚀的 MNBs 发生装置,推进其与现有捕集、反应和注入设备的兼容性与智能化控制(如 AI 调控气泡参数)。

(3) 跨领域协同创新:探索 MNBs 与其他先进技术(如膜分离、电化学、光催化等)的耦合应用,构建更加高效、低成本的 CCUS 系统。

(4) 环境与安全评估:系统评估 MNBs 技术在全生命周期内的环境影响与安全风险,特别是在农业和地质封存中的长期生态效应。

(5) 通过持续的技术创新与跨学科合作,MNBs 技术有望成为推动 CCUS 系统向高效、低碳、智能化方向发展的重要赋能工具。

参考文献

- [1] International Energy Agency. CO₂ Emissions in 2023 [R]. Paris: IEA, 2024.
- [2] Khaleel M, Yusupov Z, Alderoubi N, et al. Evolution of emissions: The role of clean energy in sustainable development [J]. *Chall Sustain*, 2024, 12(2): 122-135.
- [3] 刘牧心, 梁希, 林千果. 碳中和背景下中国碳捕集、利用与封存项目经济效益和风险评估研究 [J]. *热力发电*, 2021, 50(9): 18-26.

- [4] Temesgen T, Bui T T, Han M, *et al.* Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques; A review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, 246: 40–51.
- [5] 王文锋. 微纳米气泡技术在水处理中的应用研究[J]. *当代化工研究*, 2025, (19): 95–97.
- [6] Jiang Y, Ma Z, Gu Z, *et al.* A novel approach for improving aqueous carbonation kinetics with CO₂ micro- and nano-bubbles[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 500: 157363.
- [7] 杨丽, 廖传华, 朱跃钊, 等. 微纳米气泡特性及在环境污染控制中的应用[J]. *化工进展*, 2012, 31(6): 1333–1337.
- [8] Tanaka S, Kastens S, Fujioka S, *et al.* Mass transfer from freely rising microbubbles in aqueous solutions of surfactant or salt[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 387: 121246.
- [9] 李恒震. 微纳米气泡特性及其在地下水修复中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [10] Epstein P S, Plesset M S. On the stability of gas bubbles in liquid-gas solutions[J]. *Journal of Chemical Physics*, 1950, 18(11): 1505–1509.
- [11] Ushikubo F Y, Furukawa T, Nakagawa R, *et al.* Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2010, 361(1/2/3): 31–37.
- [12] Li R, Hong M, Guo M, *et al.* Oxidation and degradation of nitrobenzene by ozone micro-nano bubbles[J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 302(B): 120903.
- [13] Takahashi M. Zeta potential of microbubbles in aqueous solutions; Electrical properties of the gas-water interface[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2005, 109(46): 21858–21864.
- [14] Shen H, Xu Y, An J, *et al.* Micro-interface enhanced mass transfer sodium carbonate absorption carbon dioxide reaction[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2023, 64(S C): 208–223.
- [15] Kajolinna T, Melin K, Linjala O, *et al.* Performance of novel carbonate-based CO₂ post-combustion capture process[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2024, 136: 104173.
- [16] Wang B, He R, Chen M, *et al.* Intensification on mass transfer between gas and liquid in fine bubble jet reactor[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(1): 104718.
- [17] Bae K, Kim J Y, Go K S, *et al.* Effect of distributor type on micro-bubble dispersion in a pressurized bubble column[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 174: 188–198.
- [18] Choi H J, Kim S, Bae S, *et al.* Enhancing the sustainability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete through CO sequestration[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 489: 142272.
- [19] Bose S, Mehrgardi M A, Zare R N. Selective photochemical conversion of carbon dioxide to formic acid at gas-water interface of micro-bubbles[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(31): 27449–27457.
- [20] He R, Ju J, Liu K, *et al.* Technology of plant factory for vegetable crop speed breeding[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1414860.
- [21] Khan P, Wang H, Gao W, *et al.* Effects of micro-nano bubble with CO₂ treated water on the growth of Amaranth green (*Amaranthus viridis*) [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2022, 29(47): 72033–72044.
- [22] Chen Y, Wu H, Huang Q, *et al.* Carbon dioxide micro-nano bubbles aeration improves carbon fixation efficiency for succinic acid synthesis by *Escherichia coli* [J]. *Fermentation*, 2025, 11(1): 31.
- [23] You X, Yang L, Chu H, *et al.* Micro-nano-bubbles and their application in microalgae production: Wastewater treatment, carbon capture and microalgae separation[J]. *Algal Research*, 2024, 78: 103398.
- [24] Wang D, Fan J, Xue Z. Hydrodynamic Analysis of CO₂ migration in heterogeneous rocks; Conventional and micro-bubble CO₂ flooding experiments and pore-scale numerical simulations[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(5): 1–15.
- [25] Takemura T, Hamamoto S, Sato M, *et al.* Migration behavior and lifetime of CO₂ micro-nano bubbles in shallow aquifer[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2024, 137: 104207.
- [26] Dayarathne N, Jeong S, Jang A. Chemical-free scale inhibition method for seawater reverse osmosis membrane process: Air micro-nano bubbles[J]. *Desalination*, 2019, 461: 1–9. ■

中化资本创投战略复投迪赛新材

近日,中化资本创投完成对国内高端碳氢树脂生产企业迪赛新材的战略复投。

迪赛新材核心产品苯并环丁烯(BCB)树脂作为新一代碳氢材料,可将高速覆铜板介电损耗降至极致,是支撑 AI 与算力产业发展的关键材料。经多年研发,迪赛新材成功攻克 BCB 及系列树脂材料合成工艺复杂、量产难度大等问题,成为全球唯一实现 BCB 材料千吨

级量产的企业,助力国家高端电子化学品实现全产业链自主可控。

本次复投是中化资本创投践行“投早、投小、投硬科技”理念的又一关键落子。自 A+轮完成投资布局以来,公司始终与企业同向同行,在后续融资中持续加码,并主动导入中化产业资源,助力突破更多受制于人的材料技术,推动企业持续向好发展。(中化资本)