

可高效吸收 CO₂ 的低共熔溶剂及其性能研究

齐明, 王文豪, 惠向伟, 吴复忠*, 杨森, 丁忠林
(贵州大学材料与冶金学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 由于 CO₂ 在全球范围内的排放量逐日剧增, 给环境造成了巨大的压力, 针对这一问题, 通过一步合成法制备了一种可用于高效吸收 CO₂ 的亲水型低共熔溶剂 (DES), 采用液体核磁和红外光谱等表征手段探究了其吸收机理, 同时对相关物化参数和不同因素对 CO₂ 吸收性能的影响规律进行了测定和讨论。结果表明, 在控制吸收时间为 60 min 的情况下, 在 30°C、气体流速为 20 L/h、Urea-MEA 摩尔比为 1:6 时得到最大的 CO₂ 吸收量为 0.3397 g/g。

关键词: 低共熔溶剂; CO₂; 吸收性能; 吸收机理

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)S1-0123-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.023

Deep eutectic solvents for high-efficient CO₂ absorption and performance study

QI Ming, WANG Wen-hao, HUI Xiang-wei, WU Fu-zhong*, YANG Sen, DING Zhong-lin

(College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: As the global CO₂ emission continues to surge daily, exerting significant pressure on the environment. A hydrophilic deep eutectic solvent (DES), capable of highly efficient CO₂ absorption, is synthesized via one-step method to address this challenge. Characterization techniques such as liquid nuclear magnetic resonance (NMR) and infrared spectroscopy are utilized to explore the mechanism of the prepared DES in absorbing CO₂. Concurrently, the influences of the related physicochemical parameters and various factors on the absorption performance of the prepared DES for CO₂ are determined and discussed. The findings demonstrate that the maximum CO₂ absorption capacity obtained is 0.3397 g CO₂/g DES under a controlled absorption time of 60 minutes, a temperature of 30°C, a gas flow rate of 20 L·h⁻¹, and a molar ratio of 1:6.

Key words: deep eutectic solvent; CO₂; absorption performance; absorption mechanism

为了减缓温室效应, 碳捕集、利用与封存技术 (CCUS) 已成为重要的研究方向^[1-2], 低共熔溶剂 (DES) 以较高的溶解度和环境友好性在 CO₂ 吸收方面展现出巨大的潜力。Abbott 等^[3]首次以氯化胆碱 (ChCl) 和尿素 (Urea) 为原料在室温下制备出这种合成后的熔点低于各个组分熔点的混合物溶剂^[4], 并定义为 DES, 由于其有着和离子液体相似的性质, 被广泛用于电化学、萃取分离和气体吸收等众多领域, 随着在气体吸收方面的开发^[5], 越来越多的科研工作者将 DES 用作 CO₂ 吸收溶剂。

随着 DES 在 CO₂ 吸收领域的研究逐渐深入, 相当一部分研究者尝试通过改变组成成分或优化操作参数等条件实现更高的 CO₂ 捕获。Zhao 等^[6]使用聚乙二醇 400 (PEG400) 和 1,3-丙二胺 (PDA) 制备获得了一种新型 DES, 研究发现 (PEG400-PDA) DES 中存在特定的分子间氢键相互作用。在分子间力最强的摩尔分数下, CO₂ 气体流速为 150 mL/min 时, 每 1 mol PDA 的 CO₂ 最大溶解度为 0.99 mol。Wibowo

等^[7]采用 ChCl 和 MEA 以 1:5 的最佳摩尔配比制成 DES, 在 40°C、1 MPa、水体积分数 50% 情况下 CO₂ 的吸收容量最高, 为 0.379 mol/mol, 且压力和含水量对 CO₂ 的吸收速率有正向影响, 而吸收温度对其有负面影响。Shi 等^[8]在探究咪唑型 DES 对 CO₂ 的吸收量时, 得到 Im-MEA DES 在温度为 303.15 K 时达到最大的吸收量为 0.323 g/g, 发现其对 CO₂ 有较高的吸收量是由于与 CO₂ 反应生成了氨基甲酸酯。Cui 等^[9]采用 NRTL 模型对所制备的一系列膦基 DES 的 CO₂ 溶解度数据进行关联, 得到 1-羧乙基三丁基溴化磷-二乙二醇 ([P_{4,4,4,2}COOH][Br]-DEG) 在 303.15 K、2.5 MPa 条件下获得最大 CO₂ 的吸收容量, 为 0.5335 mol/mol。并通过理论计算表明, 氨基、羧基和羟基官能团的引入会增加 DES 与 CO₂ 之间的相互作用能, 并提升 CO₂ 的吸收容量。

在这项工作中, 本课题组制备了 Urea 和 MEA 的 DES 用于 CO₂ 的捕获, 对所制备 DES 相关物理

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-12-30

基金项目: 开展规模化碳捕获利用试点课题研究 (GZWH-2022-22413)

作者简介: 齐明 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为冶金环境保护, yanjiusheng2580@163.com; 吴复忠 (1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为冶金能源节约与环境保护、冶金过程模拟, 通讯联系人, gutwz@163.com。

化学参数和对 CO₂ 的吸收性能进行了表征测定,并研究了不同操作参数对 DES 吸收 CO₂ 性能的影响。

1 实验部分

1.1 实验试剂

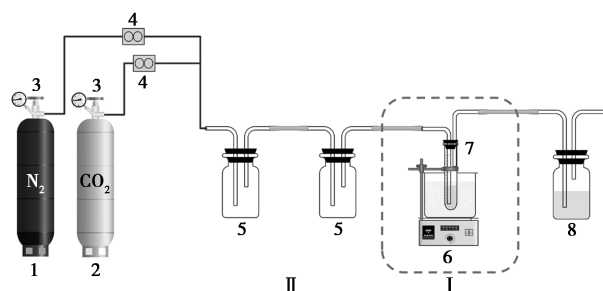
本文中使用的实验试剂规格等信息列于表 1 中,无需进一步纯化,均可直接使用。

表 1 实验试剂及其规格

试剂名称	规格	生产厂家
Urea	分析纯	上海阿拉丁试剂有限公司
MEA	分析纯	上海阿拉丁试剂有限公司
N ₂	高纯	贵州三合气体有限公司
CO ₂	高纯	贵州三合气体有限公司

1.2 DES 的制备及吸收 CO₂ 实验

本实验中制备的 DES 及其吸收 CO₂ 实验在图 1 所示装置中进行,实验前检查装置的气密性是否良好。



1—N₂ 气体钢瓶;2—CO₂ 气体钢瓶;3—气体减压阀;
4—玻璃转子流量计;5—气体缓冲瓶;6—集热式恒温磁力
搅拌水浴锅;7—气体吸收瓶;8—尾气处理装置(NaOH 溶液)

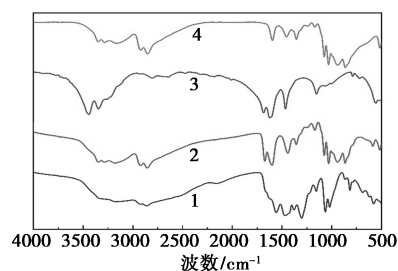
图 1 DES 的制备 (I) 及吸收 CO₂ (II) 的
实验流程

DES 的制备采用一步合成法^[10],将 Urea 和 MEA 混合置于图 1 I 装置中搅拌加热,直至形成均一稳定的液体,置于恒温干燥箱中干燥 12 h 后无晶体析出,则制备完成。所制备的 DES 对 CO₂ 的吸收实验在图 1 II 中进行,CO₂ 吸收容量可以通过称重法进行描述^[8,11-12],为保证实验的准确性,每个 DES 的 CO₂ 吸收实验重复进行 3 次,取平均值。

2 结果与讨论

2.1 CO₂ 吸收机理分析

为了探究本工作中制备的 Urea-MEA 吸收 CO₂ 的机理,本章节采用红外光谱对 Urea-MEA 及其各组分纯物质进行了表征,测试波数范围为 400 ~ 4 000 cm⁻¹。测试结果见图 2 所示。

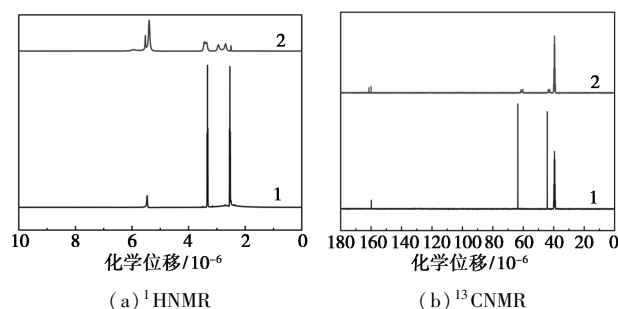


1—MEA;2—Urea;3—Urea-MEA;4—Urea-MEA+CO₂

图 2 吸收 CO₂ 前后的 Urea-MEA 及其
纯组分的红外谱图

红外谱图结果显示,对于纯 MEA 来说在 3 354、3 285 cm⁻¹处为伯胺基团中 N—H 的反对称和对称伸缩振动峰,2 925、2 860 cm⁻¹处对应亚甲基中 C—H 中的伸缩振动峰,1 596 cm⁻¹处对应伯胺中 N—H 的弯曲振动峰,1 457、1 356 cm⁻¹处是—CH₂ 基团中 C—H 的剪式振动峰,1 077、1 031 cm⁻¹处对应 C—H 的伸缩振动峰和 C—O 的振动峰;对于纯 Urea 来说在 3 444、3 342 cm⁻¹处可归结于 N—H 的伸缩振动峰,1 685、1 626 cm⁻¹处可归结于 N—H 的变形振动峰,1 604、1 465 cm⁻¹处为 C=O 的伸缩振动和 C—N 的拉伸振动,而在 719 cm⁻¹处的信号峰对应 N—H 的扭转振动;在形成 DES 后,红外谱图可以看成是前两者的重叠组合,前两者的峰在 DES 中均有体现,同时吸收 CO₂ 前后在 3 000 ~ 3 500 cm⁻¹处的羟基峰相较 MEA 的峰型明显变宽,表明了吸收 CO₂ 前后溶液中均有氢键形成,并且,在吸收 CO₂ 后,DES 在 2 150、1 560 cm⁻¹处出现了新的吸收峰,前者代表 DES 与 CO₂ 的物理吸收过程,后者则证明 DES 与 CO₂ 发生反应生成了氨基甲酸酯,在吸收方式上属化学吸收。

为了进一步确定 Urea-MEA 与 CO₂ 的反应机理,采用液体核磁共振氢谱和碳谱讨论了其吸收 CO₂ 前后的结构变化,测定结果见图 3。



1—吸收前;2—吸收后

图 3 吸收 CO₂ 前后的 Urea-MEA 的
¹H NMR 和 ¹³C NMR 谱图

由¹H NMR谱图中数据可以看出,在吸收CO₂之前5.46×10⁻⁶处为结构中—NH₂的氢信号,3.33×10⁻⁶处为结构中氧原子相连接的亚甲基的氢信号,2.54×10⁻⁶处为结构中氮原子相连接的亚甲基的氢信号。吸收CO₂后,在5.95×10⁻⁶和2.95×10⁻⁶附近出现了2个新的吸收峰,且吸收峰的位置发生了偏移,说明在吸收CO₂之后,溶剂体系的化学环境发生了变化,生成了氨基甲酸酯。

由¹³C NMR谱图中数据可知,对于吸收CO₂之前在159.84×10⁻⁶处为结构中C=O碳信号,63.57×10⁻⁶处为结构中氧原子相连接的亚甲基的碳信号,44.30×10⁻⁶处为结构中氮原子相连接的亚甲基的碳信号;而对于吸收CO₂之后的Urea-MEA来说,在160.02×10⁻⁶处为结构中C=O上碳的信号,61.54×10⁻⁶和60.40×10⁻⁶处为结构中氧原子相连接的亚甲基的碳信号,43.62×10⁻⁶和42.66×10⁻⁶处为结构中氮原子相连接的亚甲基的碳信号,而162×10⁻⁶附近出现了一个新峰,可归因于氨基甲酸酯的生成。

综合上述表征测试结果,本工作中制备的DES吸收CO₂后生成了氨基甲酸酯,与相关文献一致,DES与CO₂发生的化学反应见图4所示。

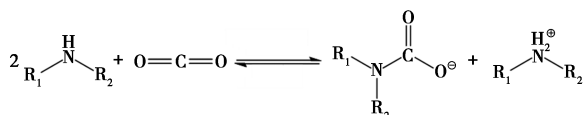
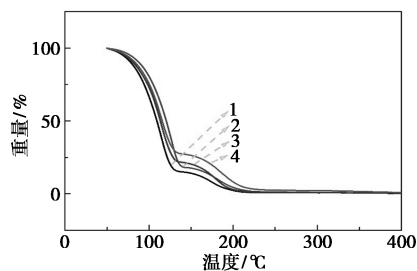


图4 DES与CO₂的吸收机理

2.2 物化性质分析

2.2.1 热稳定性

DES的热稳定性是衡量其在加热到工作条件之后是否会发生分解的重要指标,本研究对以不同摩尔比制备的DES采用热重分析仪(TGA 550)测量了其热稳定性,结果如图5所示。



Urea-MEA: 1—1:6; 2—1:5; 3—1:4; 4—1:3

图5 Urea-MEA的热重分析图

由图中数据可以看出,所制备的一系列DES是

分步进行分解,且为两步分解。Urea-MEA不同摩尔比的初始热分解温度分别为92.6、92.34、100.29、89.72℃,可以视为Urea-MEA体系的解体和MEA的挥发;第二步分解为Urea的挥发,温度分别为166.05、162.26、165.37、159.18℃。

2.2.2 黏度

DES的黏度是影响CO₂在溶液体系中传质效率的重要指标^[13],使用旋转黏度计(Brookfield DV3T)测量其黏度,DES的黏度随不同温度的变化如图6所示。

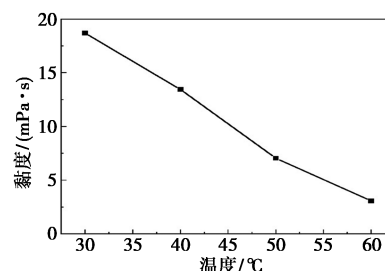


图6 Urea-MEA黏度随温度的变化

由图可知,Urea-MEA的黏度值随温度的升高而降低^[14],这是因为温度的升高降低了体系中的氢键作用,促进了分子的运动,从宏观的角度来讲会导致体系黏度的降低,在温度为30℃时,该溶剂体系的黏度为18.68 mPa·s,当温度升高至40℃时,黏度降低至13.44 mPa·s,降低了约30%,而当溶剂体系温度升高至50、60℃时,溶剂体系的黏度随之降低至7.04、3.06 mPa·s,约降低50%,可以看出,黏度和温度之间存在明显的负相关性,且温度对该溶剂体系的影响较大

黏流活化能是研究流体性质的重要参数,本工作还通过Arrhenius方程对DES的温度和黏度进行拟合、计算,得出黏流活化能^[15],计算结果显示该DES的黏流活化能为50.56 kJ/mol,为揭示化学反应的微观机制和优化反应条件提供了参考。

2.2.3 含水量

由于CO₂的排放过程中有时也会夹杂着一定量的水分,所以研究不同含水量的DES的CO₂吸收容量是极其有意义的,在本工作中选用卡尔费休水分测定仪对不同摩尔比的Urea-MEA的水含量进行测定。测定结果见表2。

表2 不同摩尔比的Urea-MEA含水量(质量分数)的变化

摩尔比	1:3	1:4	1:5	1:6
水含量/%	0.465	0.780	0.646	0.507

根据表中数据可得,本工作中制备的二元 DES 在不同摩尔比下的含水质量分数均在 1% 以下,但总体上呈现出先增后减的趋势,其中当摩尔比为 1:4 时,该二元 DES 体系的含水量最高,达到质量分数 0.780%,造成此类 DES 具有较高含水量的原因是由于此类二元 DES 组成成分中含有—OH,所以合成的 DES 具有一定的亲水性,导致不同摩尔比的 DES 中有一定程度的水含量,同时证明,此类 DES 与水有一定的相溶性,根据文献报道,适当的水含量会降低 DES 的黏度,提升 CO₂ 在溶剂中的传质效率^[16],进而对 CO₂ 的吸收容量产生积极影响^[17]。

2.2.4 熔点

DES 的熔点在 N₂ 保护下通过差示扫描量热仪 (DSC3) 测定,测定结果如图 7 所示。

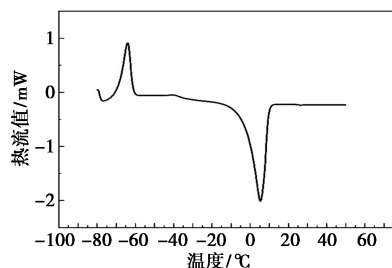


图 7 Urea-MEA 的熔点

从图中可知,Urea-MEA DES 的熔点为 5.38°C,低于体系中各组分的熔点(Urea 的熔点为 132.7°C, MEA 的熔点为 10.5°C^[18]),证明了 DES 的形成^[19]。造成 Urea-MEA 体系熔点下降的原因,是因为体系中各组分之间形成了氢键网络。同时,DES 的熔点越低,表明该溶剂体系的工作温度范围越广泛,体系的稳定性也相应更高,本工作中制备的 DES 的熔点低于工业中烟道气温度,所以该溶剂体系可以在烟道气环境下进行 CO₂ 吸收工作。

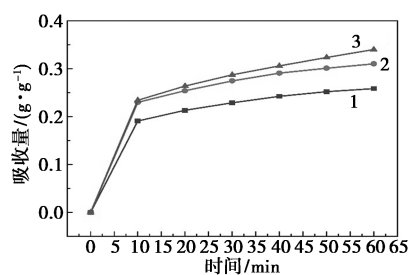
2.3 不同因素对 Urea-MEA 吸收 CO₂ 性能的影响规律

本工作探究了 Urea-MEA DES 在不同温度、气体流速和摩尔比下的 CO₂ 吸收量,以确定此 DES 最佳的反应条件和最大 CO₂ 吸收量。

2.3.1 摩尔比对 Urea-MEA 吸收 CO₂ 的影响

在常压和 30°C 的条件下,探究了由不同的摩尔比构成的 Urea-MEA 溶剂体系对 CO₂ 的吸收容量,吸收 CO₂ 的吸收量随时间的变化见图 8。

由图可知,不同的摩尔比对 Urea-MEA DES 吸收 CO₂ 有一定的影响,Urea-MEA (1:6) DES 在



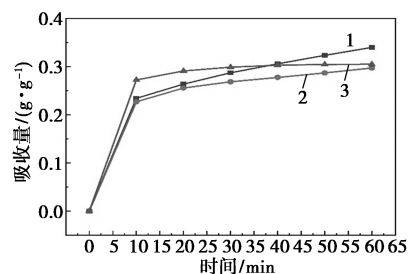
Urea-MEA:1—1:3;2—1:4.1;3—1:6

图 8 不同摩尔比下的 Urea-MEA 的 CO₂ 吸收量随时间的变化

30°C、一个标准大气压下吸收 CO₂ 60 min 达到最大的 CO₂ 吸收量,为 0.339 7 g/g,CO₂ 的吸收量随着 MEA 在该 DES 中的含量升高而增大,拥有较大摩尔比的 DES 在前 10 min 的吸收速率也高于拥有较小摩尔比的 DES,之后吸收速率变缓,因此,较高的摩尔比会对 DES 吸收 CO₂ 产生积极影响,并会提高对 CO₂ 的吸收效率。

2.3.2 温度对 Urea-MEA 吸收 CO₂ 的影响

设置气体流速为 20 L/h,在 30、55、80°C 下对 Urea-MEA (1:6) 吸收 CO₂ 的性能进行了测定。实验结果见图 9 所示。



1—30°C;2—55°C;3—80°C

图 9 不同温度下的 Urea-MEA 的 CO₂ 吸收量随时间的变化

由图可知,在不同温度下,最大吸收速率主要集中在前 10 min 内,在 60 min 内总体 CO₂ 吸收量差别不大,但在低温情况下,CO₂ 的吸收量仍有上升趋势,因此当工作环境处于低温时,从整体上看 CO₂ 吸收量比高温时拥有更大的增长潜力^[20-21],表明该 DES 的最佳工作环境为低温,造成这种现象可能是高温不利于 CO₂ 的固定,并且由于接近解吸温度,可能也造成了一定程度的解吸。

2.3.3 气体流速对 Urea-MEA 吸收 CO₂ 的影响

在低温情况下,Urea-MEA DES 不同气体流速的 CO₂ 吸收量如图 10 所示。

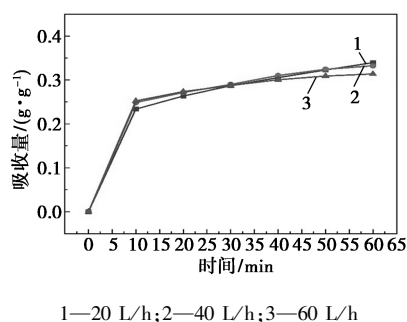


图 10 不同气体流速下的 Urea-MEA 的 CO₂ 吸收量随时间的变化

从数据上看,该溶剂体系在 20、40、60 L/h 条件下,前 10 min 的吸收量分别为 0.233 9、0.248 8、0.252 5 g/g,当吸收时间达到 60 min 时,吸收量分别为 0.339 6、0.332 6、0.313 9 g/g,可以看出在前 10 min 内,CO₂ 吸收量随着气体流速的增大而增大,之后吸收速率趋于平缓,而在 60 min 时,在气体流速为 20 L/h 时,获得最大的 CO₂ 吸收量,因此较高的气体流速并没有从整体提高 CO₂ 吸收性能,而是加快了对 CO₂ 的吸收速率。

相关的报道中在进行 CO₂ 吸收实验时,通常采用较高的气体压力,但是本课题组在常压和低温的条件下进行实验得到了较高的 CO₂ 吸收量,意味着此类 DES 可以在保持较高的 CO₂ 吸收容量的同时还拥有较低的能耗。

3 结论

本工作中以不同的摩尔比采用一步合成法制备一系列的 Urea-MEA DES,通过液体核磁和红外光谱研究了其对 CO₂ 的吸收机理,并对其物化性质进行了分析,同时讨论了不同因素对 DES 吸收 CO₂ 性能的影响规律,主要得到以下结论:①本工作中制备的 DES 黏度随温度的变化符合 Arrhenius 方程,通过拟合计算得到黏流活化能为 50.56 kJ/mol,且该 DES 具有良好的热稳定性和一定的亲水性;②研究了不同摩尔比、温度和气体流速对 CO₂ 吸收性能的影响规律,实验结果表明,Urea-MEA (1:6) 的 CO₂ 吸收性能随着温度和水含量的升高而降低,随 MEA 含量的升高而升高,并在温度为 30℃、气体流速为 20 L/h 时,获得最大的 CO₂ 吸收容量,为 0.339 7 g/g;③进一步探究了 DES 对 CO₂ 的吸收方式,对其吸收 CO₂ 前后进行了液体核磁共振和傅里叶变换红外光谱表征,证明该 DES 对 CO₂ 的吸收方式为化学吸收和物理吸收并行,但化学吸收占据主导。

参考文献

- [1] 刘均隆,成怀刚,刘倩,等.非胺类 CO₂ 吸收剂的研究进展[J].化学通报,2024,87(4):449-455.
- [2] Biswas R, Metya A K, Abebe K M, *et al.* Carbon dioxide solubility in choline chloride-based deep eutectic solvents under diverse conditions[J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2023, 29(8):236.
- [3] Abbott A P, Capper G, Davies D L, *et al.* Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures [J]. *Chemical Communications*, 2003, (1):70-71.
- [4] Zhang Q, de Oliveira Vigier K, Royer S, *et al.* Deep eutectic solvents: Syntheses, properties and applications [J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(21):7108-7146.
- [5] Paiva A, Craveiro R, Aroso I, *et al.* Natural deep eutectic solvents-solvents for the 21st century[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2014, 2(5):1063-1071.
- [6] Zhao Z, Dong Y, Liu X, *et al.* Density, viscosity, refractive index and molecular interaction of polyethylene glycol 400 + 1, 3-propanediamine deep eutectic solvent for CO₂ capture[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 367:120542.
- [7] Wibowo H, Liao W, Zhou X, *et al.* Study on the effect of operating parameters towards CO₂ absorption behavior of choline chloride-monoethanolamine deep eutectic solvent and its aqueous solutions[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2020, 157:108142.
- [8] Shi S, Li S, Liu X. Mechanism study of imidazole-type deep eutectic solvents for efficient absorption of CO₂ [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(51):48272-48281.
- [9] Cui Y, Wang X, Zhang X, *et al.* Performance and mechanism study on functionalized phosphonium-based deep eutectic solvents for CO₂ absorption[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2023, 44(7):98.
- [10] Rodriguez Rodriguez N, van den Bruinhorst A, Kollau L J B M, *et al.* Degradation of deep-eutectic solvents based on choline chloride and carboxylic acids [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(13):11521-11528.
- [11] Yan H, Zhao L, Bai Y, *et al.* Superbase ionic liquid-based deep eutectic solvents for improving CO₂ absorption[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(6):2523-2530.
- [12] Zeng S, Gao H, Zhang X, *et al.* Efficient and reversible capture of SO₂ by pyridinium-based ionic liquids [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 251:248-256.
- [13] Biswas R. Physicochemical properties and applications of deep eutectic solvents for CO₂ capture[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2023, 47(1):20-35.
- [14] Xu L, Wang S. Density, viscosity, and N₂O solubility of aqueous solutions of MEA, BmimBF₄, and their mixtures from 293.15 to 333.15 K [J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2018, 63(8):2708-2717.
- [15] Omar K A, Sadeghi R. Database of deep eutectic solvents and their physical properties: A review [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 384:121899.

(下转第 131 页)

质量百分比先后加入 1 000 L 加药桶中与水充分混合,启动变频恒压自吸旋涡电泵将混合均匀后的药剂分别注射到加药井中。

4.3 修复效果评估

原位修复后土壤水平方向上采用系统布点法,采样点数参照表 5 布置;垂直方向采样深度应不小于调查评估确定的污染深度以及修复可能造成污染迁移的深度,根据土层性质设置采样点,原则上垂向采样点之间距离不大于 3 m。

表 5 原位修复水平方向布点方法

水平方向面积/m ²	采样点数量/个
<100	2
100~1000	3
1000~1500	4
1500~2500	5
2500~5000	6
5000~7500	7
7500~12500	8
>12500	网格大小不超过 40 m×40 m

本次石油烃污染土壤修复工程效果评估共采集了 12 个土壤样品,石油烃检出值均低于修复目标(826 mg/kg),土壤样品检出结果如表 6 所示。

表 6 土壤样品检测结果

点位编号	检出限/(mg·kg ⁻¹)	检出浓度/(mg·kg ⁻¹)	深度/m	标准限值/(mg·kg ⁻¹)	是否超标
S-1	6	112	0.5	826	否
S-2	6	89	0.5	826	否
S-3	6	56	0.5	826	否
S-4	6	29	0.5	826	否
S-5	6	78	0.5	826	否
S-6	6	101	0.5	826	否
S-7	6	143	2.5	826	否
S-8	6	179	2.5	826	否
S-9	6	213	2.5	826	否
S-10	6	334	5.5	826	否
S-11	6	298	5.5	826	否
S-12	6	263	5.5	826	否

(上接第 127 页)

[16] Zhang Y, Zhu C, Fu T, *et al.* CO₂ absorption performance of ChCl-MEA deep eutectic solvent in microchannel[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6):108792.

[17] Wibowo H, Zhong L, Huan Q, *et al.* Experimental study on the effect of water addition to ChCl-MEA DES towards its performance in CO₂ removal from syngas[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, 12(S1):61-71.

[18] 石升友,李水娥,刘祥伟.四乙基氯化胺-乙醇胺低共熔溶剂高效捕集 CO₂ 的研究[J]. *化学研究与应用*, 2022, 34(3):589-

5 结论

采用原位化学高级氧化法修复地块中部一级防汛墙与垂直阻隔搅拌桩之间受污染土壤。实验室小试结果显示,石油烃的降解率随着药剂投加量的增加而提高,当药剂投加比为 1:1 能够满足修复要求。现场中试进一步确认药剂投加比的适用性和加药井的设计和施工参数。项目地块污染土壤修复结果显示,修复后土壤合格率为 100%,满足修复目标。结合地块特性,设计针对特殊地块的土壤修复技术,为后续类似特殊类型地块及石油烃污染地块的修复治理提供借鉴经验。

参考文献

- [1] 邹春景,傅晓文,马荣辉,等.石油污染土壤的生物-化学联合修复技术研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43(10):36-40.
- [2] 刘五星,骆永明,滕应,等.我国部分油田土壤及油泥的石油污染初步研究[J]. *土壤*, 2007, (2):247-251.
- [3] 魏淑梅,李春琴,王瑞兵,等.石油污染土壤修复技术的研究现状[J]. *绿色科技*, 2019, (10):118-119.
- [4] Tang J C, Wang M, Wang F, *et al.* Eco-toxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(5):845-851.
- [5] 李佳,曹兴涛,隋红,等.石油污染土壤修复技术研究现状与展望[J]. *石油学报(石油加工)*, 2017, 33(5):811-833.
- [6] 陈果,王景瑶,李聚揆.石油烃污染土壤修复技术的研究进展[J]. *应用化工*, 2018, 47(5):1014-1018.
- [7] 郑嘉如,方战强,易云强,等.基于化学氧化法修复石油烃污染土壤研究进展[J]. *环境化学*, 2023, 42(2):608-626.
- [8] 牛婧,李琼,和利钊,等.活化过硫酸盐技术修复老化石油污染土壤[J]. *广州化工*, 2022, 50(2):62-66.
- [9] Liang C J, Guo Y Y. Remediation of diesel-contaminated soils using persulfate under alkaline condition[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2012, 223:4605-4614.
- [10] 方楠,刘润韬,王醇.活化过硫酸钠修复总石油烃污染土壤效果研究[J]. *上海节能*, 2021, (8):859-863.
- [11] 仇奕沁,郭昱锋.活化过硫酸盐氧化处理某深基坑土壤高浓度石油烃污染[J]. *广东化工*, 2024, 51(6):88-90. ■
- [12] 596.
- [19] Ahmad N, Qian W, Sun P, *et al.* Understanding the side chain effect on regulation of CO₂ capture by amino acid-based deep eutectic solvents[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 368:120660.
- [20] Wang L, Liu S, Wang R, *et al.* Regulating phase separation behavior of a DEEA-TETA biphasic solvent using sulfolane for energy-saving CO₂ capture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(21):12873-12881.
- [21] 陈家伟,杨柳,李新令,等. MAP-DMSO-PMDETA 三元相变吸收剂的 CO₂ 捕集性能[J]. *化工环保*, 2024, 44(2):213-220. ■