

环保

探索 CCUS 系列（二）：CCUS 成本的决定性因素与盈利性分析

CCUS：能源及工业系统深度脱碳的重要抓手

CCUS 指碳捕集、封存及再利用技术，可分为捕集、输送、利用与封存等环节，主要目的是将 CO₂ 从工业过程、能源利用或大气中分离出来，而后加以利用或注入地层、海底，以实现 CO₂ 控制及减排。本篇文章将对 CCUS 的成本决定因素、技术盈利性进行探讨。

什么决定碳排放企业的 CCUS 成本？

CCUS 成本=捕集成本+压缩成本+运输成本+封存/利用成本（封存/利用成本与 CO₂ 后端利用方式有关，暂不泛化讨论）。**捕集成本**：受碳源 CO₂ 浓度和碳捕集技术影响。**1）碳源浓度**：CO₂ 捕集成本与碳源 CO₂ 排放浓度成反比，如煤化工行业的排放浓度达 80% 左右（火电、水泥、钢铁行业的 CO₂ 浓度均在 10%-20% 左右），其耦合 CCUS 成本为四大高碳排放行业中最底。**2）捕集技术**：碳捕集技术种类繁多，材料成本及性能为成本影响关键——①化学溶剂吸收法：吸收剂性能决定捕集成本；②化学链燃烧技术：载氧体性能决定捕集成本；③ CO₂ 矿化技术：矿化原料决定碳捕集成本。**压缩运输**：CO₂ 运输前需先压缩，源汇匹配可节约运输成本。

1）压缩成本：CO₂ 异地运输前需压缩成液态，CO₂ 压缩设备成本及效率影响运输成本；**2）运输成本**：CO₂ 源汇匹配度影响运输成本，若源汇匹配甚至源汇合一，能极大节省运输成本。

CCUS 究竟盈亏几何？

传统模式：CO₂ 驱油项目具有经济性，原油价格是关键。**1）项目原理**：CO₂ 驱油技术是将 CO₂ 注入油层中以提高油田采油率的技术，可使最终采收率提高大约 90% 以上。**2）经济性**：参考我国 4 个典型 CO₂ 驱油项目，我国 CO₂ 驱油项目具备经济性，IRR 可达 11.2%，对原油价格换油率、吨 CO₂ 成本、吨油建设投资四个非油田客观条件、通过努力可以改善、或波动较大的因素对项目 IRR 的影响进行分析，原油价格对项目盈利性影响相对较大，当原油价格大于 77.3 美元/桶（贴现率取 8%）时可实现项目 NPV>0。**3）项目年限**：前述考虑项目期为 10 年，若项目折旧到期、继续出油运行，则若项目运行至 12/15 年，项目 IRR 为 13.0%/14.1%。

新兴模式：钢渣固碳技术变废为宝，修正单价后盈利性降低。**1）项目原理**：使用废弃钢渣捕集烟气中的 CO₂，将其转化成可出售建材（胶凝材料、S95 复合矿粉）。**2）经济性**：仕净科技公告其钢渣固碳项目 IRR 可达 26.6%，测算项目 NPV 为 0.83 亿元（折现率取 8%）、净利率可达 8.5%，具备经济性。当前项目产品、原料价格较公告值有下降，对其进行修正：当原材料价格下降 10% 时，S95 矿粉单价在 256.3 元/吨以上，可实现项目 IRR>0，若此基础上电价降至 0.40 元/度，当 S95 矿粉单价在 233.5 元/吨以上，可实现项目 IRR>0。**3）降本**：当前价格下使用胶凝材料/S95 复合矿粉代替 10% 熟料/20% 水泥可实现水泥/混凝土单吨降本 10/47 元。

降碳收益对 CCUS 项目经济性进一步赋能。**1）**若碳排放企业主动实施 CCUS 项目，则可通过出售多余配额方式获得降碳收益；**2）**若第三方企业做 CCUS 项目可实现减碳但无法获得减排经济回报，可能获得 CCER 补偿。若前文钢渣固碳项目为碳排放企业实施，测算在碳价为 100 元/吨时加上碳配额收益后项目 IRR 可提升 1.71pct 至 28.30%；当原材料价格下降 10%、电价降至 0.40 元/度、考虑碳收益时，S95 矿粉单价在 230.9 元/吨以上可实现项目 IRR>0。

投资建议：关注具备技术、市场等先发优势企业龙净环保、冰轮环境、华光环能、仕净科技等

市场表现对比图(近 12 个月)



资料来源：Wind

相关研究

- 《“双碳”跟踪：全国碳价缘何突破 100 元？》2024-05-20
- 《CCER 交易启动：与碳排放权交易（CEA）构成中国完整的碳市场交易体系》2024-01-24
- 《CCUS：能源及工业系统深度脱碳重要抓手》2021-12-26



更多研报请访问
长江研究小程序

风险提示

1、高排放行业降碳政策力度不及预期；2、碳捕集成本降低速度不及预期。

请阅读最后评级说明和重要声明

目录

CCUS：能源及工业系统深度脱碳的重要抓手.....	6
什么决定碳排放企业的 CCUS 成本？.....	6
捕集成本：受碳源 CO ₂ 浓度和碳捕集技术影响.....	7
压缩运输：CO ₂ 运输前需先压缩，源汇匹配可节约运输成本.....	14
CCUS 究竟盈亏几何？.....	14
CO ₂ 驱油项目具有经济性，原油价格是关键.....	15
钢渣固碳技术变废为宝，修正单价后盈利性降低.....	19
降碳收益对 CCUS 项目经济性进一步赋能.....	23
多企业布局 CCUS.....	24
风险提示.....	26

图表目录

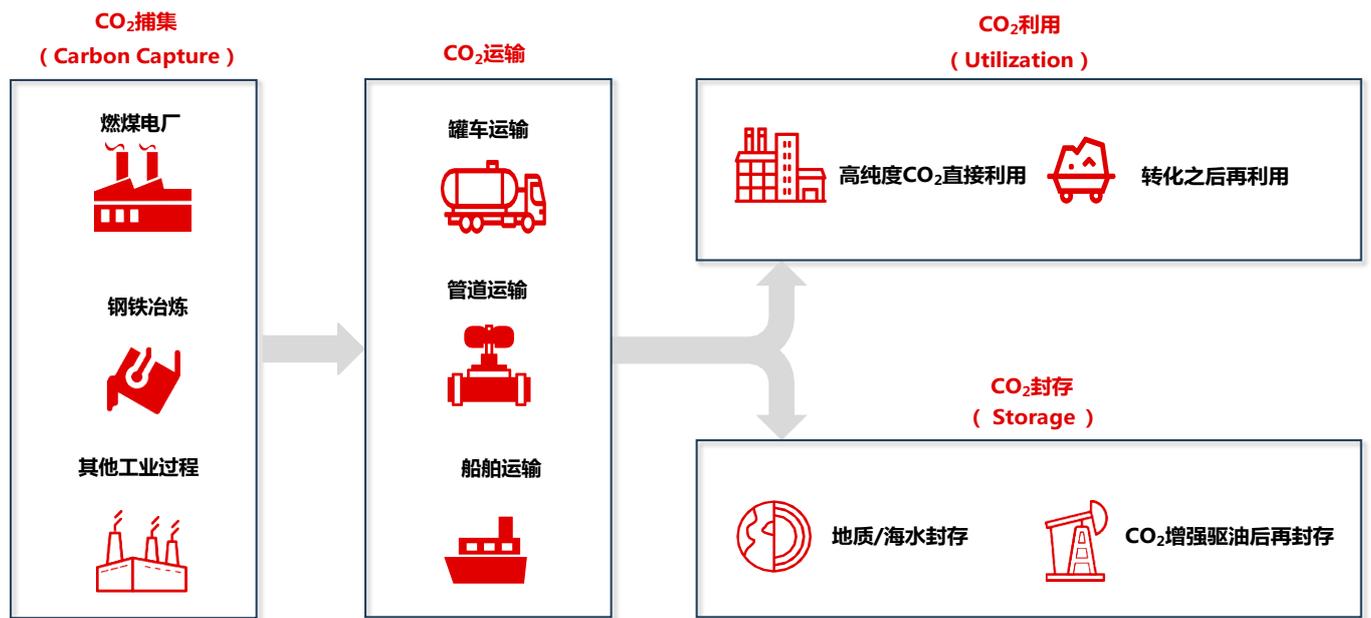
图 1：CCUS 全流程各环节.....	6
图 2：CCUS 各环节成本预测.....	7
图 3：中国主要排放源已投运 CCUS 示范项目捕集成本.....	7
图 4：不同行业排放 CO ₂ 浓度比较（%）.....	8
图 5：典型煤化工项目 CO ₂ 排放浓度（%）.....	8
图 6：CCUS 与主要低碳技术边际减排成本对比.....	8
图 7：化学溶剂吸收法的工艺过程、原理及成本构成（以有机胺吸收剂为例）.....	10
图 8：相变类溶剂与普通的吸收剂区别.....	11
图 9：化学链燃烧技术原理.....	12
图 10：CO ₂ 矿化技术原理.....	13
图 11：CO ₂ 驱油技术原理.....	15
图 12：不同原油价格（美元/桶）下的项目 NPV（亿元）和 IRR 情况.....	18
图 13：不同换油率下的项目 NPV（亿元）和 IRR 情况.....	18
图 14：吨 CO ₂ 成本（元）变动对项目 NPV（亿元）和 IRR 的敏感性分析.....	18
图 15：吨油建设投资（元）变动对项目 NPV（亿元）和 IRR 的敏感性分析.....	18
图 16：钢渣固碳生产低碳水泥流程.....	19
图 17：S95 矿粉-原料单价变动对项目 IRR 敏感性.....	22
图 18：S95 矿粉-电价变动对项目 IRR 敏感性.....	22
图 19：全国各地 S95 矿粉单价（元/吨）.....	22
图 20：全国各地粉煤灰单价（元/吨）.....	22
图 21：使用钢渣固碳所得凝胶材料对水泥生产降本（元/吨）敏感性测算.....	23
图 22：使用钢渣固碳所得 S95 复合矿粉对混凝土生产降本（元/吨）敏感性测算.....	23
图 23：全国碳交易市场碳价及欧盟碳价（截至 2024 年 5 月 16 日）.....	24
图 24：减碳收益为钢渣固碳项目（公告值）带来的盈利弹性情况.....	24

表 1: 碳捕集技术发展现状	9
表 2: 不同吸收剂的优缺点比较	10
表 3: 不同相变类吸收剂相比传统的 MEA 溶剂的再生能耗	11
表 4: 单一载氧体的优缺点比较	12
表 5: 不同矿化原料的反应温度、反应压力、反应时间、CO ₂ 封存能力、碳酸化效率	13
表 6: CO ₂ 运输方式比较	14
表 7: 我国代表性 CCUS 项目基本情况及盈利性测算	16
表 8: 典型项目不同贴现率下的净现值（亿元）	16
表 9: 经济性测算参数设置	17
表 10: CCUS 项目经济性测算（参数取行业平均水平）	17
表 11: 仕净科技钢渣固碳项目参数	20
表 12: 仕净科技钢渣固碳项目测算（单位：万元）	20
表 13: 我国 CCUS 相关企业布局及进展	25

CCUS：能源及工业系统深度脱碳的重要抓手

CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage) 指碳捕集、封存及再利用技术。可分为捕集、输送、利用与封存等环节，主要目的是将 CO₂ 从工业过程、能源利用或大气中分离出来，而后加以利用或注入地层、海底，以实现 CO₂ 控制及减排。我国提出 2030 年前实现碳达峰、2060 年实现碳中和的战略目标，在迈向碳中和的过程中，以 CCUS 为代表的负碳技术将发挥至关重要的作用，是推动碳减排的重要补充。

图 1：CCUS 全流程各环节



资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告（2023）》中国 21 世纪议程管理中心等，

我们在此前发布的报告《CCUS：能源及工业系统深度脱碳重要抓手》中对 CCUS 的概念、项目情况、未来空间及成本进行了分析，本篇文章将进一步研究，对 CCUS 的成本决定因素、技术盈利性进行探讨。

什么决定碳排放企业的 CCUS 成本？

为探讨何种因素决定碳排放企业的 CCUS 成本，我们对 CCUS 的各环节进行拆分。目前捕集环节成本占比相对较高，约占整个 CCUS 工艺过程总成本的 60%-80%¹，各环节成本影响因素不同：

- **捕集成本：**不同二氧化碳源、不同捕集技术的成本存在较大差异。我国煤化工和石油化工领域的一体化驱油示范项目捕集成本相对较低（105~250 元/吨 CO₂），而电力（200~600 元/吨 CO₂）、水泥（305~730 元/吨 CO₂）行业的 CO₂ 捕集成本相对较高，这主要与目标尾气中 CO₂ 浓度有关；此外，不同捕集技术也对捕集成本存在影响——对于捕集环节的成本分析需针对不同行业及不同捕集技术分别进行探讨；

¹ 《燃煤烟气 CO₂ 化学吸收剂研究进展》安山龙等

- **运输成本**：运输方式分为管道输送、罐车运输、船舶运输三种，罐车和船舶运输主要应用于规模 10 万吨/年以下的 CO₂ 输送²，运输成本与运输距离的远近也有关系——对运输成本的探讨需从运输方式的成本和运输距离的远近（源汇匹配情况）两方面入手；
- **封存成本**：封存环节适用于 EOR（强化采油技术）和碳封存，不同的封存方法会对成本造成不同影响，使用何种封存方法主要与最终的 CO₂ 应用方式有关，不同项目存在差异，不可一概而论。

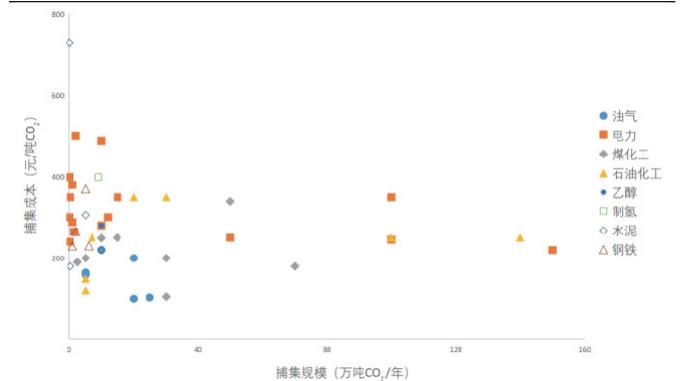
下面将对占比比较大的捕集、运输环节进行探究，深入分析 CCUS 成本影响因素。

图 2：CCUS 各环节成本预测

年份	2025	2030	2035	2040	2050	2060	
捕集成本 (元/吨)	燃烧前	100-180	90-130	70-80	50-70	30-50	20-40
	燃烧后	230-310	190-280	160-220	100-180	80-150	70-120
	富氧燃烧	300-480	160-390	130-320	110-230	90-150	80-130
运输成本 (元/(吨·km))	罐车运输	0.9-1.4	0.8-1.3	0.7-1.2	0.6-1.1	0.5-1.1	0.5-1
	管道运输	0.9	0.7	0.6	0.5	0.45	0.4
封存成本 (元/吨)	50-60	40-50	35-40	30-35	25-30	20-25	

资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告（2021）》生态环境部环境规划院等，

图 3：中国主要排放源已投运 CCUS 示范项目捕集成本



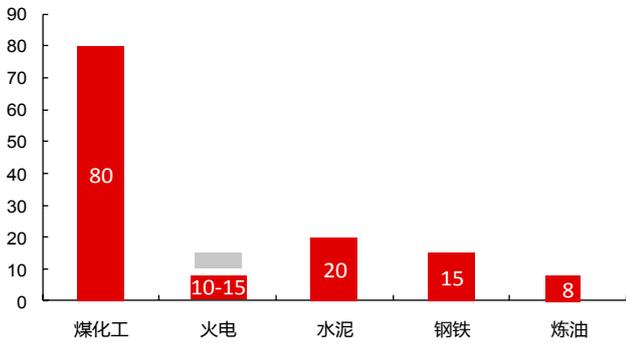
资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告（2023）》中国 21 世纪议程管理中心等，

捕集成本：受碳源 CO₂ 浓度和碳捕集技术影响

碳源浓度：碳捕集成本与废气中 CO₂ 浓度成反比

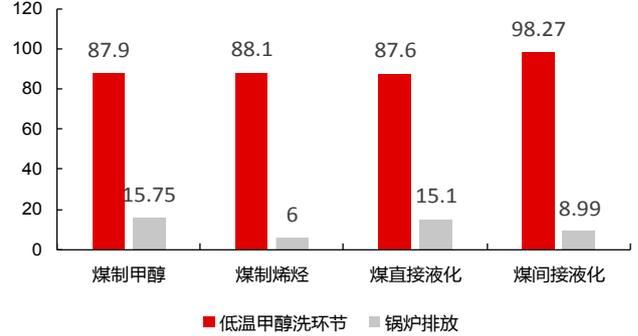
CO₂ 捕集成本与碳源 CO₂ 排放浓度成反比。从高排放行业火电、钢铁、水泥、化工行业的 CO₂ 排放浓度来看，煤化工行业的排放浓度达 80% 左右，典型项目的低温甲醇洗环节 CO₂ 排放浓度高达 98%，而火电、水泥、钢铁行业的 CO₂ 排放浓度均在 10%-20% 左右，根据中国 21 世纪议程管理中心、全球碳捕集与封存研究院和清华大学联合发布的《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告（2023）》公布数据，化工行业耦合 CCUS 成本在四大高碳排放行业中最低，水泥行业相对高（主要相关应用处于发展初期）。

图 4：不同行业排放 CO₂ 浓度比较 (%)



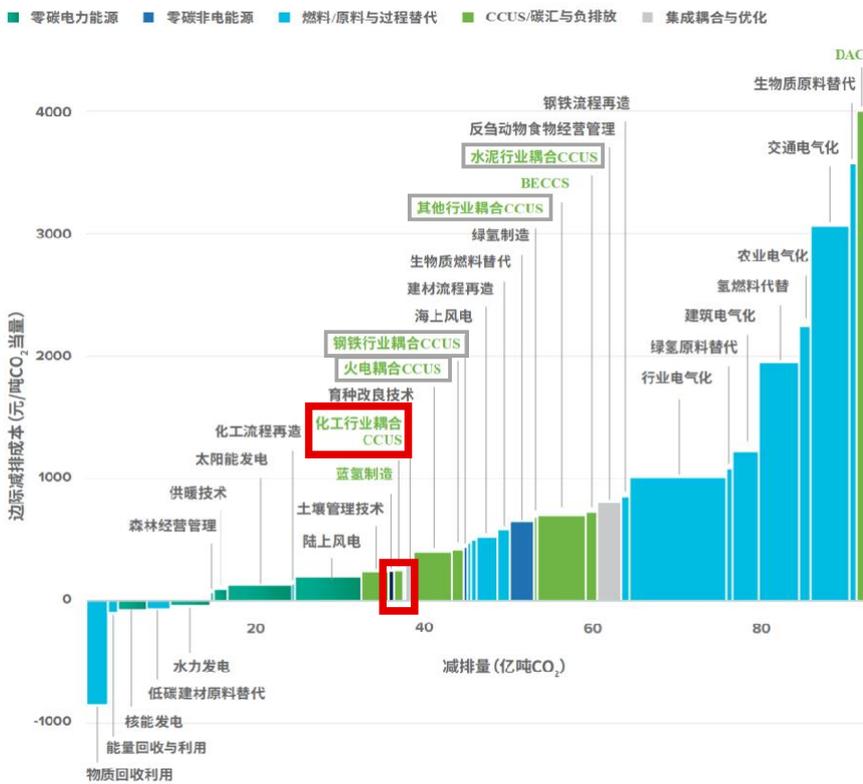
资料来源：《煤化工行业二氧化碳利用技术的分析研究》蔡涛等，

图 5：典型煤化工项目 CO₂ 排放浓度 (%)



资料来源：《煤化工行业二氧化碳利用技术

图 6：CCUS 与主要低碳技术边际减排成本对比



资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告（2023）》中国 21 世纪议程管理中心等，

捕集技术：材料成本及性能为成本影响关键

碳捕集技术种类繁多，目前化学吸收法已达商业应用阶段，应用相对较广。碳捕集方法分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧、化学链和直接空气捕集等方法，其中燃烧前-物理吸收法和燃烧后-化学吸收法目前已经达到商业应用阶段，尤其化学吸收法目前为应用最广泛的碳捕集技术。其他方法目前多处工业示范阶段，富氧燃烧-增压技术（概念阶段）和化学链燃烧技术（中试阶段）是较为新兴的捕集技术。碳捕集技术种类繁多，

过程中所用关键材料对捕集成本有重要影响，下面分别对广泛应用的化学吸收法及新兴的化学链法成本决定因素进行分析。

表 1：碳捕集技术发展现状

	概念阶段	基础研究	中试阶段	工业示范	商业应用
燃烧前-物理吸收法					√
燃烧前-化学吸附法				√	
燃烧前-变压吸附法				√	
燃烧前-低温分馏法				√	
燃烧后-化学吸收法					√
燃烧后-化学吸附法				√	
燃烧后-物理吸附法				√	
燃烧后-膜分离法				√	
富氧燃烧-常压				√	
富氧燃烧-增压	√				
化学链			√		
直接空气捕集				√	

资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告（2023）》中国 21 世纪议程管理中心等，

广泛应用的化学溶剂吸收法：吸收剂性能决定捕集成本

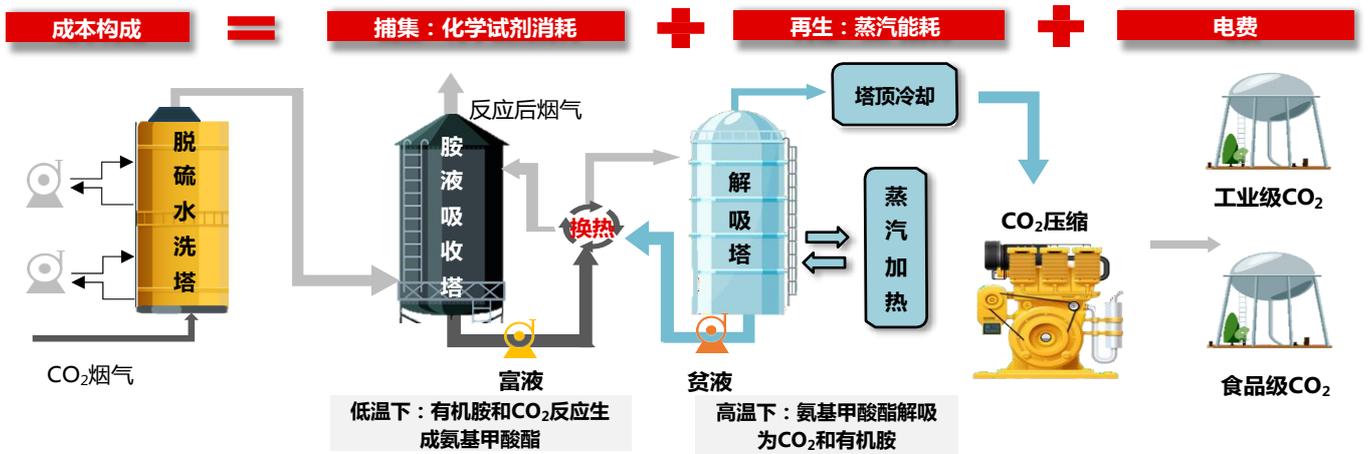
化学溶剂吸收法的设备包含脱硫水洗塔、胺液吸收塔、解吸塔、冷却装置和压缩机等。

➤ **化学原理**：以广泛应用的有机胺吸收剂为例，经过除尘脱硫脱硝处理后的烟气从吸收塔底部进入胺液吸收塔，烟气中的 CO₂ 与塔顶喷淋的吸收剂反应生成氨基甲酸酯（富液），反应后的烟气从塔顶排出，吸收了 CO₂ 的吸收剂富液进入解吸塔通过蒸汽加热解吸为 CO₂ 和有机胺，在塔顶冷却后可得到较高纯度的 CO₂，将 CO₂ 压缩成液态后可进行运输，后续可加工为工业级 CO₂ 产品或食品级 CO₂ 产品。典型有机胺吸收剂乙醇胺（MEA，分子式为 HOCH₂CH₂NH₂）捕集 CO₂ 的化学反应方程式如下：

- **吸收**： $2R-NH_2 + CO_2 \rightarrow R-NH_3^+ + R-NH-COO^-$
- **解吸（乙醇胺再生）**： $R-NH-COO^- + R-NH_3^+ \xrightarrow{\text{热}} CO_2 + 2R-NH_2$

➤ **成本构成**：化学溶剂吸收法成本为：1) 捕集环节化学试剂的消耗；2) 解吸加热的能耗成本，再生环节需要使用蒸汽对氨基甲酸进行加热解吸；3) 各环节的电费等。

图 7：化学溶剂吸收法的工艺过程、原理及成本构成（以有机胺吸收剂为例）



资料来源：《燃煤烟气 CO₂ 化学吸收剂研究进展》安山龙等，

吸收剂对碳捕集成本的影响，主要体现在捕集环节的捕集效率和再生环节的能耗。常见的化学吸收溶剂包括醇胺溶液、氨水、离子液体、氨基酸盐等，高性能吸收剂能够在相同时间内吸收更多 CO₂，减少试剂的使用，同时兼顾解吸环节加热所需的能耗。相变类吸收剂由于可以大幅减少进入解吸塔中的溶剂量，使得再生有效性提升，再生能量消耗显著降低而受到青睐。

表 2：不同吸收剂的优缺点比较

吸收剂	优点	缺点
醇胺溶液	吸收效果好，成本低、吸收剂循环利用	单一有机胺吸收剂也存在再生能耗高、腐蚀性强
氨水	吸收容量大，腐蚀小，再生能耗低，抗氧化降解和热降解	挥发性强，易造成吸收剂的损失和二次污染
离子液体	蒸汽压低、稳定性好、分子结构可调	合成过程复杂且昂贵
氨基酸盐	其挥发性低、抗氧化降解能力强，且来源广泛	再生能量能耗相对较高
相变类吸收剂	CO ₂ 富液与吸收剂在相变装置中分层， 进入解吸塔 的溶剂大幅减小， 再生能耗低	CO ₂ 富液黏度通常较大，流动性差、混合胺价格高

资料来源：《燃煤烟气 CO₂ 化学吸收剂研究进展》安山龙等，

近年兴起的相变类吸收剂能够大幅降低再生能耗，为化学吸收剂法降本的重要改进方向。目前单乙醇胺（MEA）吸收剂被视为 CO₂ 捕集的基准吸收剂³，但其存在运行能耗较高的问题。传统吸收剂 MEA 溶液总再生能耗为 4.22GJ/tCO₂，远高于相变吸收体系，尤其 2-氨基-2-甲基-1-丙醇/哌嗪/二丙二醇二甲醚（AMP/PZ/DME）组成的液-固相变吸收剂能耗仅为 1.61GJ/tCO₂，能够较 30%质量分数的 MEA 溶液再生能耗降低 61.8%，未来在碳捕集方面具备良好应用前景。

- **相变类吸收剂原理**：相变类吸收剂在吸收塔与 CO₂ 发生接触反应后会进入一个分相装置，吸收剂与 CO₂ 反应后在此装置静置并分层（分为 CO₂ 贫液相和富液相），

³ 《烟气二氧化碳捕集胺类吸收剂研究进展》林海周等

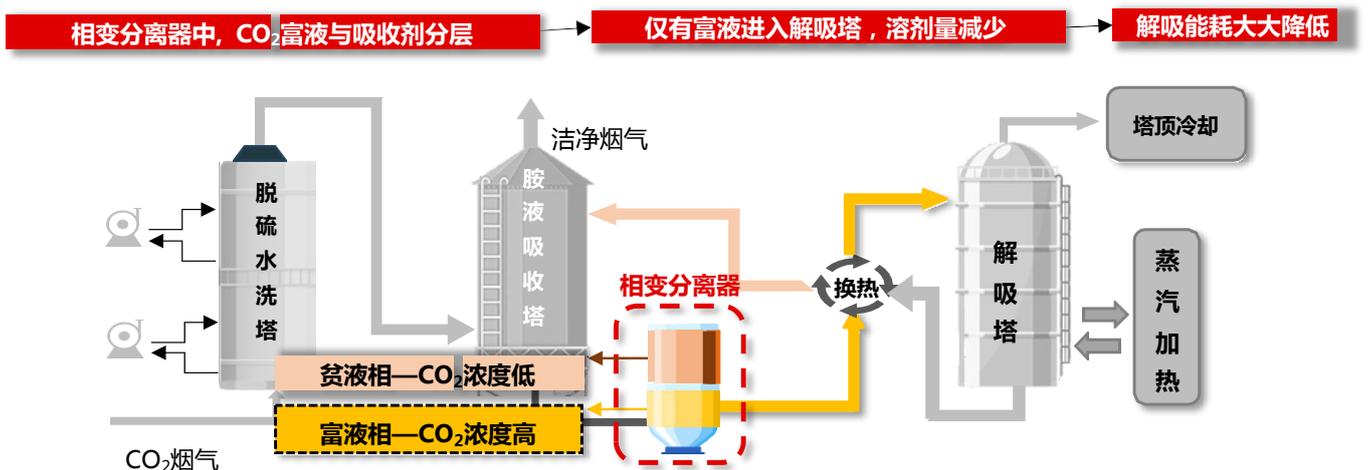
经分离后将 CO₂ 富液送入解吸塔，CO₂ 贫液则返回吸收塔重新利用。通过在相变分离器的处理，进入解吸塔的溶剂量减少，解吸所需的能耗因此降低。

表 3: 不同相变类吸收剂相比传统的 MEA 溶剂的再生能耗

试剂	浓度	相变形式	再生能耗 (GJ/tCO ₂)
传统 MEA 吸收剂			
MEA	30%	-	4.22
相变类吸收剂			
TETADEEA	5 mol/L	液-液	2.70
MEA/环丁矾	4mol/L	液-液	2.67
TETA/DMCA	4 mol/L	液-液	2.60
AEEADEEA	20%+60%	液-液	2.46
MEA/1-丙醇/水	30%	液-液	2.40
MAPADEEA	7 mol/L	液-液	2.20~2.40
DMCA/MCA/AMP	(3+1+1) mol/L	液-液	2.00
牛磺酸钾溶液	4 mol/L	液-固	3.25
肺氨酸钾/乙醇	3.3~5.9mol/kg 乙醇	液-固	2.00~2.50
K.CO.溶液	20%~40%	液-固	2.00~2.50
冷氨水溶液	30%	液-固	2.50
AMP/PZ/DME	1 mol/L	液-固	1.61

资料来源: 《相变吸收捕集烟气中 CO₂ 技术的发展现状》张卫凤等,

图 8: 相变类溶剂与普通的吸收剂区别



资料来源: 《燃煤烟气 CO₂ 化学吸收剂研究进展》安山龙等,

以上内容仅为本文档的试下载部分, 为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文, 请访问: <https://d.book118.com/206131145232010140>