

CCES+CCUS：打造“零碳”能源存储新范式

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42676.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

CCES+CCUS：打造“零碳”能源存储新范式。在“双碳”目标驱动下，可再生能源大规模并网对储能技术提出了更高要求。传统储能技术难以同时解决能源存储与碳排放控制两大挑战。压缩CO₂储能（CCES）技术应运而生——以CO₂为工质，利用其接近环境温度（31.4 °C）的临界特性，实现高效液化和能量转换。更值得关注的是，CCES与碳捕集利用与封存（CCUS）技术的集成，正在开创一种全新的“碳-能源协同”模式：既储电、又固碳，实现基础设施共享与双重收益。

上海交通大学碳中和发展研究院副院长、机械与动力工程学院研究员林千果研究团队近日在ENGINEERING Energy 2026年第1期发表综述文章，系统梳理CCES技术原理、系统构型与前沿进展，深度解析CCES-CCUS集成机制，为长时储能技术发展和碳中和路径提供重要参考。

CCES 技术基础：原理、构型与性能

CCES是压缩气体储能（CGES）的先进形态，以化学惰性、易液化的CO₂为工质，通过 充电 - 放电 闭环热力学循环实现电能时空转移：充电时利用低谷电驱动压缩机加压CO₂并储存热量，放电时高压CO₂经预热后膨胀发电，低压CO₂循环复用。其核心性能指标包括往返效率（RTE）、储能密度（ESD）和效率，经济可行性则通过平准化能源成本（LCOE）评估。

目前已发展出四种主流系统构型，各有优劣：

1) 液态CO₂储能（LCES）：高低压侧均为液态，ESD 最高（可达19.90kWh/m³），储存空间需求小，但液化/气化部件复杂，资本支出较高。

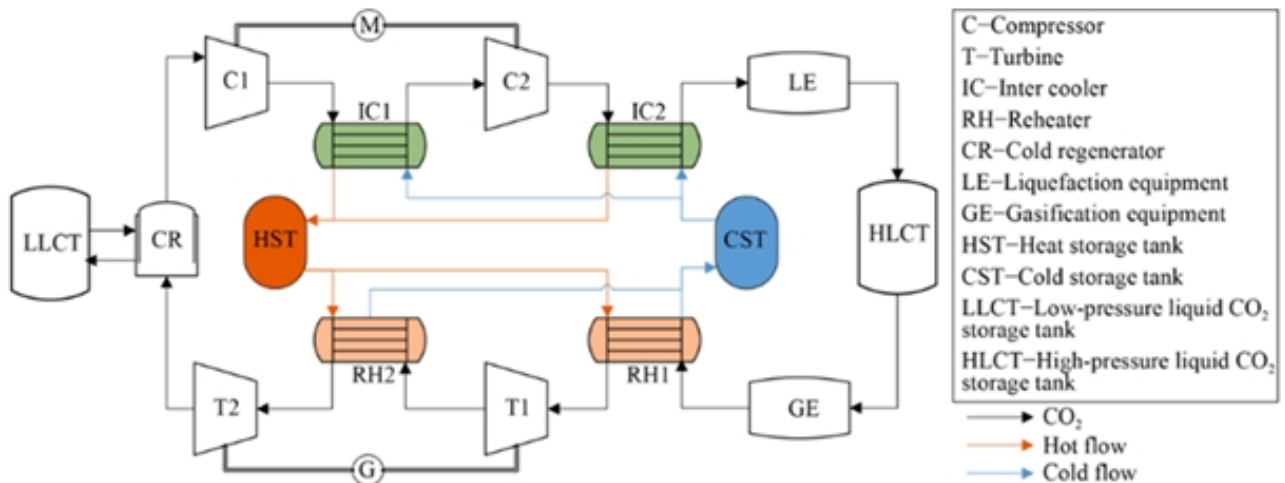


图1.液态 CO₂储能 (LCES) 系统流程图

2) 跨临界CCES (TC-CCES)：高压侧超临界、低压侧液态，RTE可高达74.07%，无需特殊地理条件。

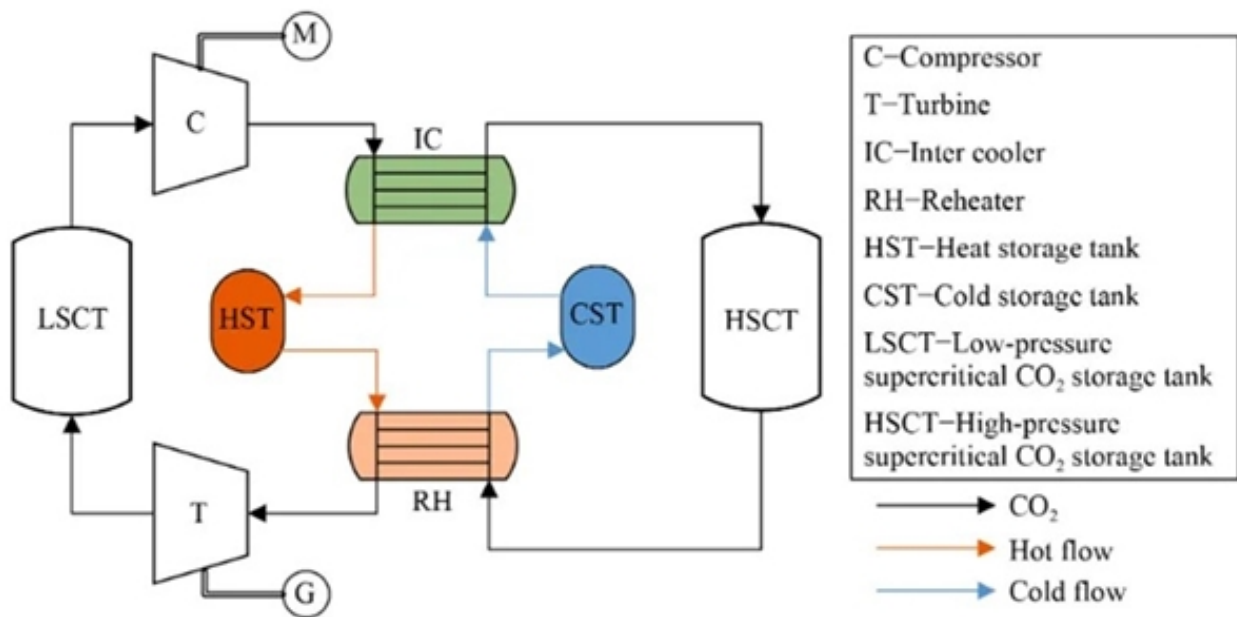


图2.跨临界压缩 CO₂储能 (TC-CCES) 系统流程图

3) 超临界 CCES (SC-CCES)：全程保持超临界状态，结构最简单，RTE达71%，但受高压安全约束。

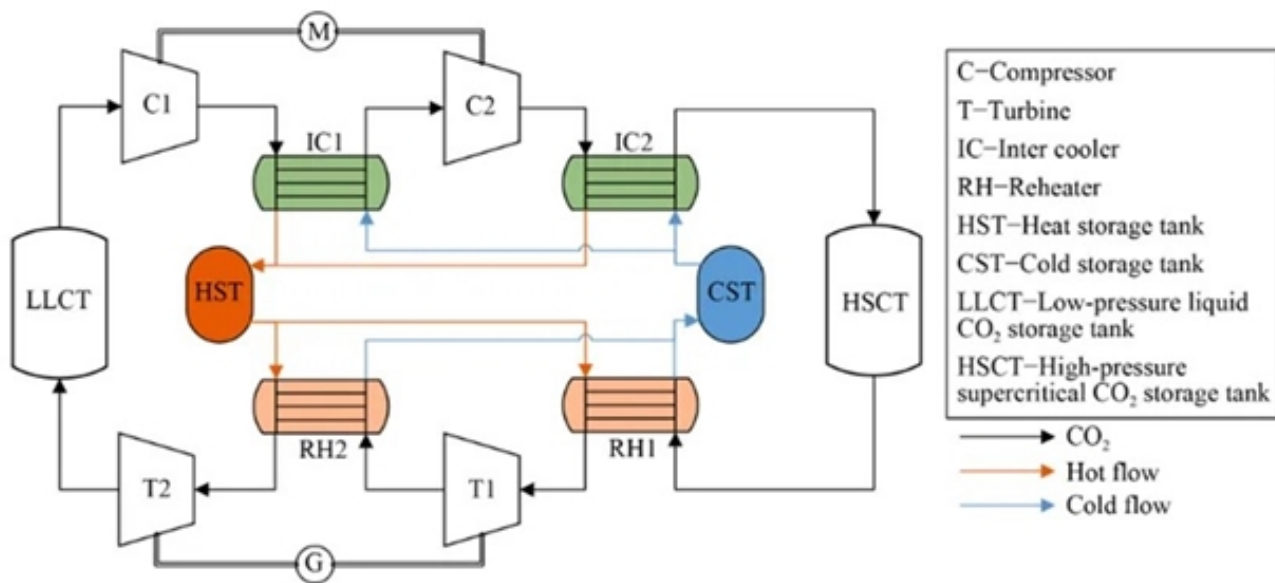


图3.超临界压缩 CO₂储能（SC-CCES）系统流程图

4) 气-液CCES（VL-CCES）：高压侧液态、低压侧气态，技术可行性强，已在示范项目中验证，如意大利Energy Dome的2.5MW/4MWh项目。

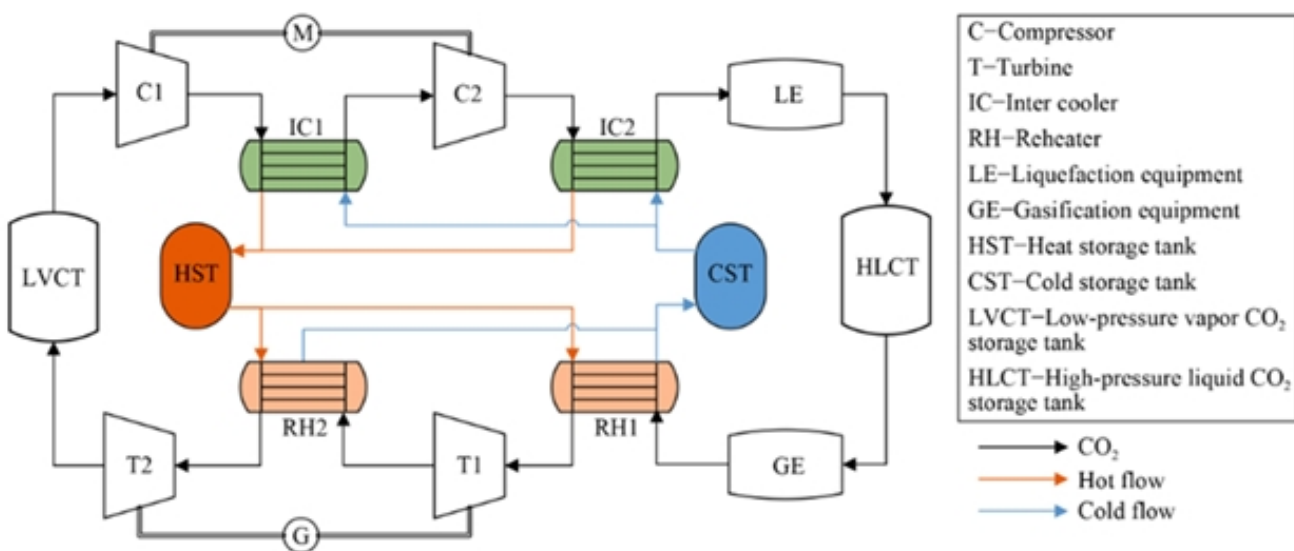


图4.气-液压缩 CO₂储能（VL-CCES）系统流程图

全球范围内，CCES示范项目正从试点向商业化推进：中国芜湖海螺10MW/80MWh项目实现废热利用+碳循环+储能模式，LCOE低至0.028元/kWh；华电-东方电气木垒项目以1000MWh储能容量成为全球最大，电能转换效率达60.4%；山东肥城100MW/400MWh项目集成熔盐储热，电能转换效率达63%。

CCES 的关键挑战与前沿突破

尽管 CCES 优势显著，大规模部署仍面临五大核心挑战，相关前沿研究正持续推进：

混合工质优化：CO₂与R134a、R32等有机流体混合，可降低临界压力、提升系统效率，如与纯CO₂系统相比，CO₂-丙烷系统的RTE可提高10%；

低压CO₂液化：通过喷射冷凝循环、相变材料（PCMs）级联储冷等技术，减少液化过程的冷能损失，蓄冷器是当前最有效的液化装置；

CO₂储存设施：地上采用柔性气囊或高压储罐，地下利用咸水层等地质构造；

系统集成提升：与有机朗肯循环（ORC）、太阳能热、火电厂余热集成，实现多级能源利用，如 CCES-Kalina混合系统RTE达59.38%；

动态行为评估：稳态模型易高估RTE（最高达23.9%），动态模型更能捕捉负荷波动下的系统响应，为实时控制提供支撑。

CCES与CCUS集成：协同机制与应用场景

CCES与CCUS的集成核心是 物质流+能量流 的协同管理：CCUS提供低成本CO₂工质（初始充注+泄漏补充），过剩捕集CO₂可用于化学品合成或地质封存；CCES则利用低谷电压缩CO₂储能，压缩热可为CCUS的溶剂再生提供低品位热能，实现能量交叉利用。这种集成带来三大优势：基础设施共享降低成本、地质储层实现 储能+储碳 双重功能、提升整体经济性与脱碳效益。

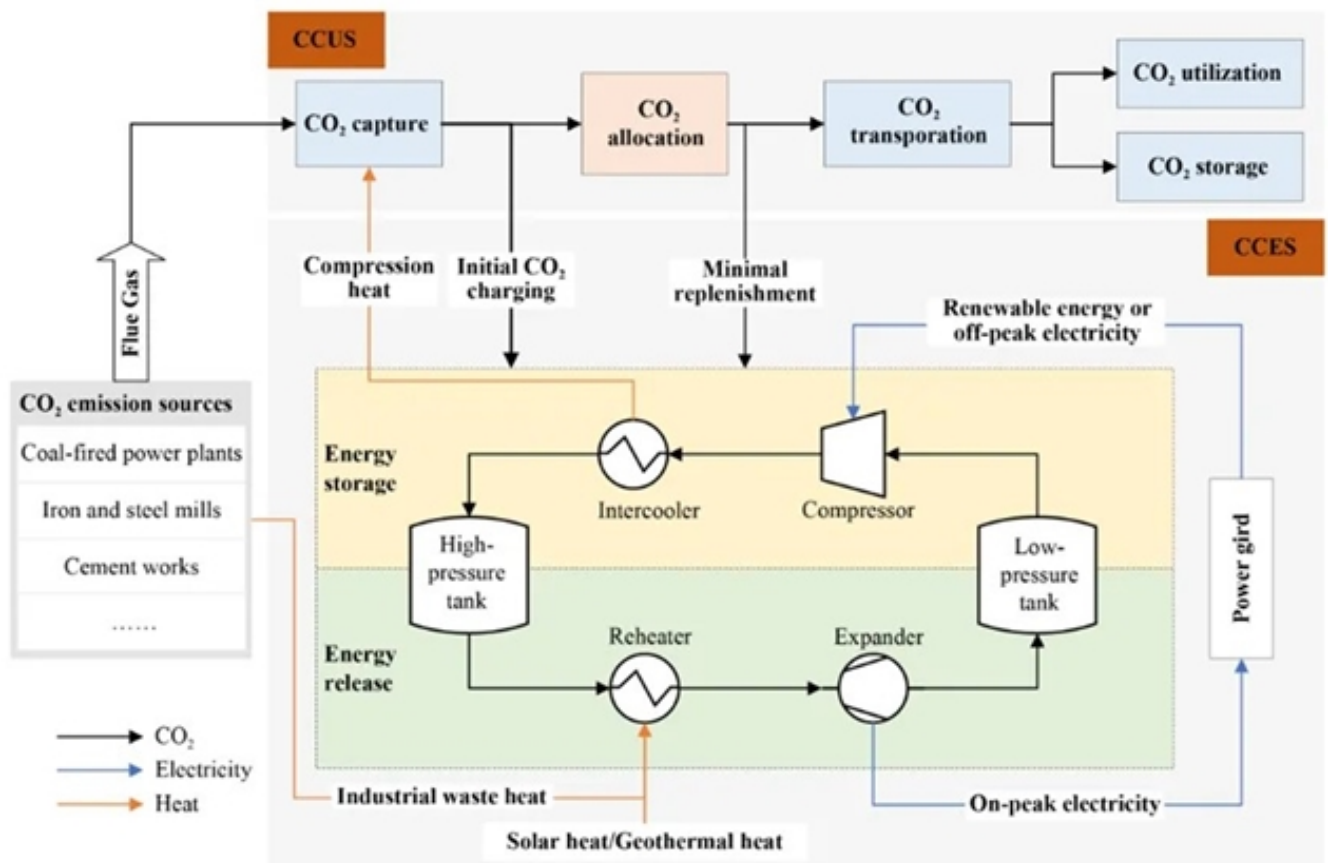


图5.压缩CO₂储能（CCES）与碳捕集、利用与封存（CCUS）集成示意图

其应用场景已覆盖多个领域：

火电厂：捕集尾气CO₂，利用电厂余热提升储能效率，增强调峰能力；

高排放工业：水泥、钢铁行业通过 捕集 - 储能 - 调峰 - 封存 模式降低碳排放强度；

可再生能源电站：与风电、光伏集群耦合，平衡电网波动，提升消纳率；

SC-CO₂管道集成：跨区域调度CO₂，实现电网调峰与地质封存协同。

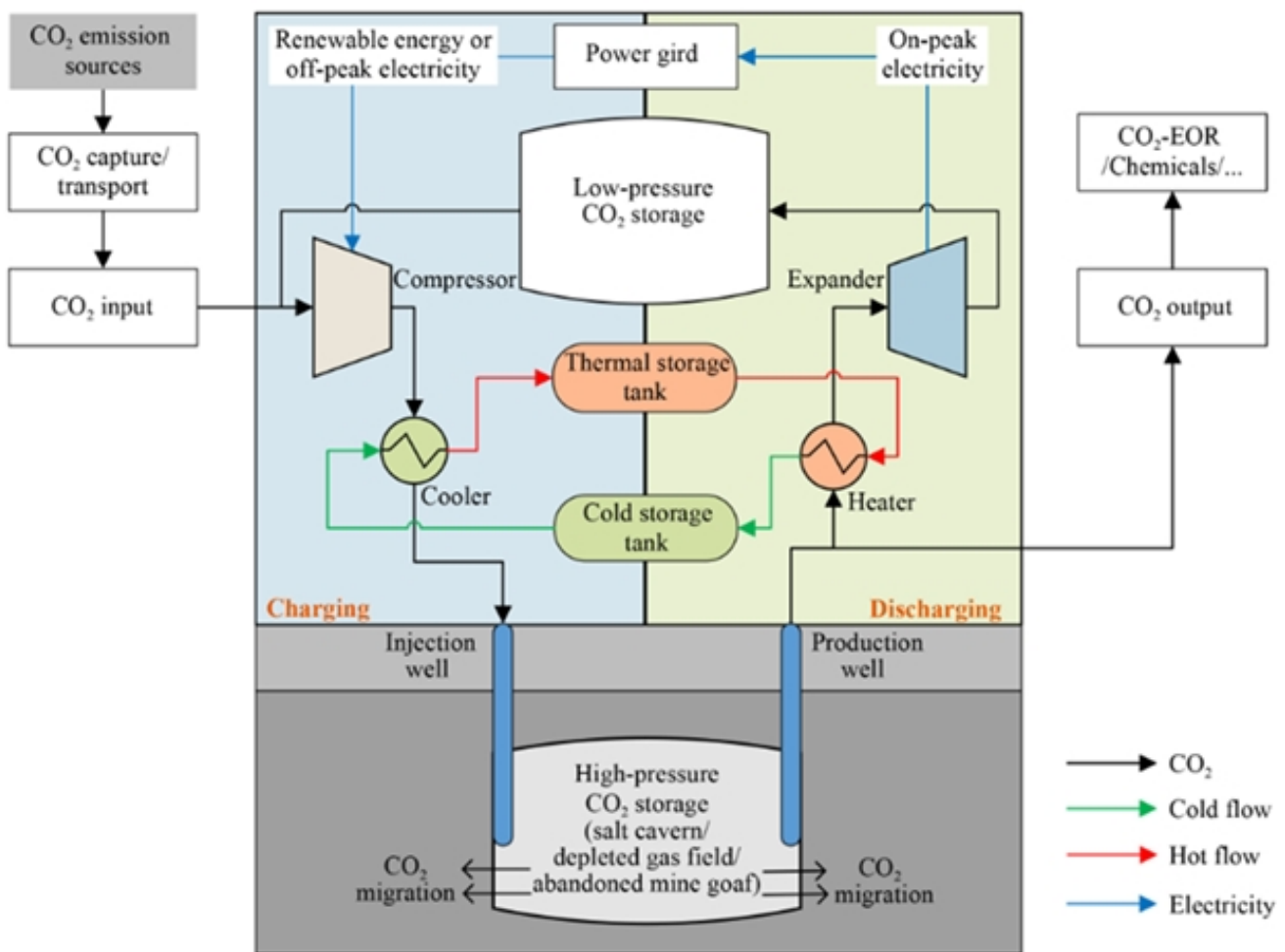


图6.碳捕集、利用与封存（CCUS）枢纽与碳 - 能源协同

核心结论：不同CCES构型性能差异显著，LCES的ESD 最优，TC-CCES和SC-CCES的RTE更具优势，压缩机、透平与换热器损失主要来源，CO₂基混合工质、分级储冷、地质储存是解决CCES 关键挑战的核心路径；CCES与外部能源系统的集成可实现 电 - 热 - 冷

联产，动态建模是优化运行的关键；CCES-CCUS集成实现了从 单一储能 到 碳 - 能源协同管理的转变，是碳中和的重要技术路径。

未来展望

推进高效集成：开发新型余热回收技术，设计 储能+储碳
双重功能地质储层，探索多能源耦合策略；

强化动态管控：建立高精度瞬态仿真模型，研发动态优化算法与控制策略，适配可再生能源波动；

保障地质安全：研究循环注采下地质储层的长期稳定性，制定双模式运行完整性评价标准；

完善评估体系：构建多目标优化模型，建立涵盖技术、经济、环境、社会的综合评估框架，支撑商业化部署。

CCES与CCUS的集成不仅为大规模储能提供了新方案，更开辟了脱碳与能源安全协同推进的新路径。随着技术成熟与成本下降，这项技术有望成为支撑高比例可再生能源并网、推动工业脱碳的核心力量，为全球碳中和目标的实现注入强劲动力。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fie/EN/10.1007/s11708-026-1043-7>

作者：林千果等 来源：《工程·能源》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发