



中国科学院理化技术研究所  
Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS

第九届全国储能科学与技术大会

# 二氧化碳储能技术研究进展

张振涛 研究员

中国科学院理化技术研究所

2024年3月23日 江苏·溧阳

zzt@mail.ipc.ac.cn  
微信tomzhangipc

# 报告 目录

contents

1. 新型储能机遇与挑战
2. 二氧化碳储能系统概述
3. 二氧化碳储能技术研究现状
4. 二氧化碳储能技术多元应用场景
5. 二氧化碳储能应用现状
6. 团队介绍

第九届全国储能科学与技术大会

# 1.0

## CHAPTER

新型储能的  
机遇与挑战

第九届全国储能科学与技术大会

## 头埋在土里能保命吗？



央视新闻

31分钟前 播放人数超过12万

【#南京一小区火灾15人遇难44人受伤##南京火灾初查系电动车停放处起火#】昨天4时39分，江苏省南京市消防救援支队指挥中心接到报警：南京市雨花台区明尚西苑6栋发生火灾。支队调派20多台消防车赶赴现场处置，约6时许明火被扑灭。

## 底色是绿，安全是根本

3月5日  
政府工作报告  
首次提出：  
**要发展新  
型储能**



今日头条 头条 推荐 北京 视频 财经 科技 热点 更多

消除“歧视”！全国政协委员张振涛：给予  
新型长时物理储能项目同等政策支持 | 两  
会声音

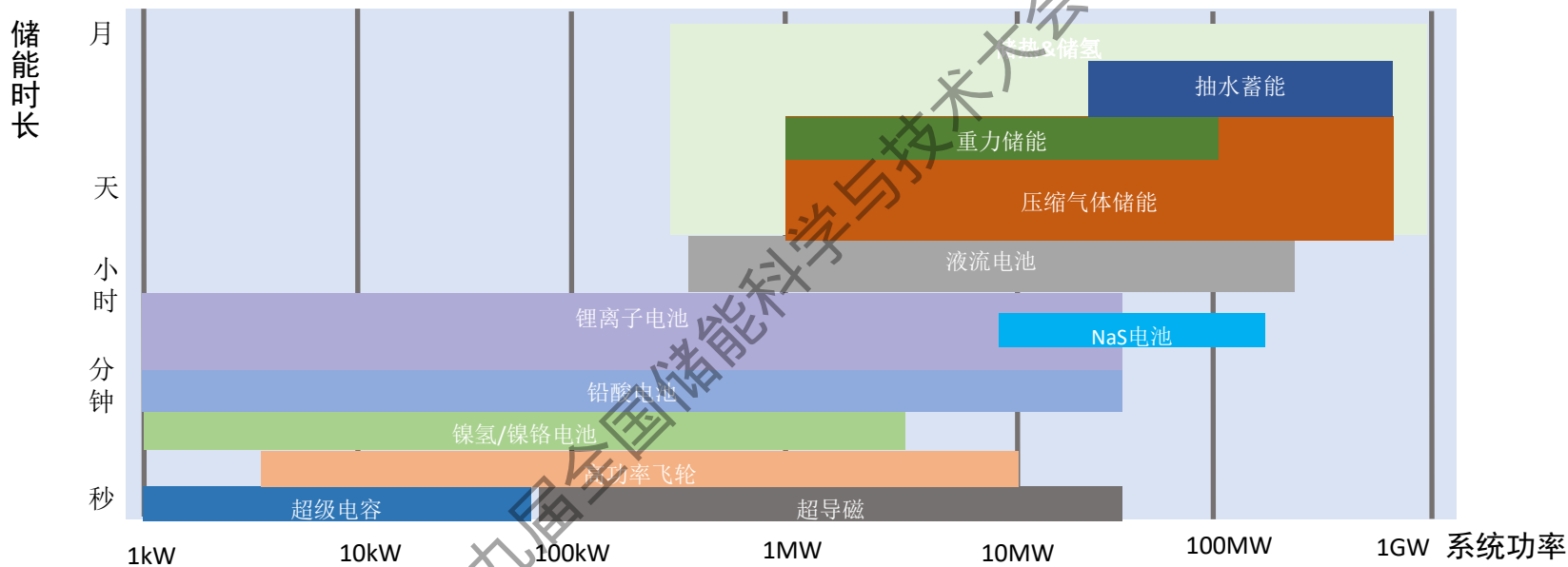
退役电池，何去何从？

“振涛，你的提案  
写得怎么样了？我们都很关  
心啊！”全国政协...



人民政协报

储能本质上是一种**能量转换**过程，将多余电能转化为另一种可储存的能量，需要时重新转化为电能输出。



| 备用型      | 功率型      | 能量型       | 容量型       |
|----------|----------|-----------|-----------|
| 时长≤15min | 时长≤30min | 时长1~2h    | 时长≥4h     |
| 不间断电源    | 调频等      | 负荷调节、辅助调频 | 削峰填谷、离网储能 |

长时储能 (Long Duration Energy Storage) 将是在未来脱碳电力系统中提供灵活性和可靠性的关键技术，填补了从日到多日/周的角色。  
**LDES: 日间 LDES (10-36 小时) 和多日 LDES (36-160+小时)**

NON-EXHAUSTIVE – HYDROGEN AND HYBRID LONG DURATION STORAGE EXCLUDED

△ Faces geologic constraints<sup>1</sup>    Not enough public datapoints to obtain a reliable value    Inter-day    Can function as both    Multi-day / week

Less Desirable    More Desirable

| Duration         | Energy storage form | Technology   | Nominal duration, hrs | LCOS <sup>5</sup> , \$/MWh | Min. deployment size, MW | Average RTE <sup>1</sup> , % | TRL |
|------------------|---------------------|--|-----------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|-----|
| Inter-day        | Mechanical          | Traditional pumped hydro (PSH) △   | 0-15                  | 70-170                     | 200-400                  | 70-80                        | 8   |
|                  |                     | Novel pumped hydro (PSH)   | 0-15                  | 70-170                     | 10-100                   | 50-80                        | 3-3 |
|                  |                     | Gravity-based △  | 0-15                  | 90-120                     | 20-1,000                 | 70-90                        | 3-3 |
|                  |                     | Compressed air (CAES) △  | 6-24                  | 80-150                     | 200-500                  | 40-70                        | 7-9 |
|                  |                     | Liquid air (LAES) <sup>1</sup>   | 10-25                 | 175-300                    | 50-100                   | 40-70                        | 6-9 |
|                  |                     | Liquid CO <sub>2</sub> <sup>1</sup>  | 4-24                  | 50-60                      | 10-500                   | 70-80                        | 4-6 |
| Multi-day / week | Thermal             | Sensible heat (e.g., molten salts, rock material, concrete) <sup>2</sup>                         | 10-200 <sup>2</sup>   | 300                        | 10-500                   | 55-90                        | 6-8 |
|                  |                     | Latent heat (e.g., aluminum alloy)   | 25-100                | 300                        | 10-100                   | 20-50                        | 3-5 |
|                  |                     | Thermochemical heat (e.g., zeolites, silica gel)   | XX                    | XX                         | XX                       | XX                           | XX  |
|                  | Electrochemical     | Aqueous electrolyte flow batteries   | 25-100                | 100-140                    | 10-100                   | 50-80                        | 4-5 |
|                  |                     | Metal anode batteries  | 50-200                | 100                        | 10-100                   | 40-70                        | 4-9 |
|                  |                     | Hybrid flow battery, with liquid electrolyte and metal anode (some are Inter-day) <sup>2,3</sup> | 8-50 <sup>2</sup>     | XX                         | >100                     | 55-75                        | 4-9 |

资料来源: 美国能源部 (DOE) 《长时储能商业起飞之路》报告

# 2.0

## CHAPTER

### 二氧化碳储能 系统概述

第九届全国储能科学与技术大会



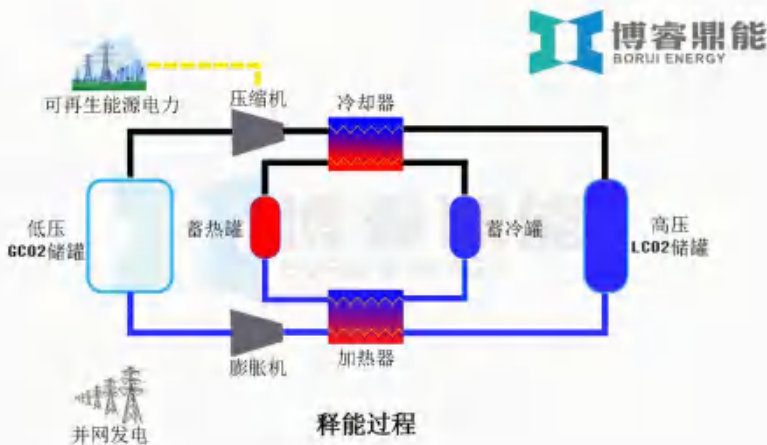
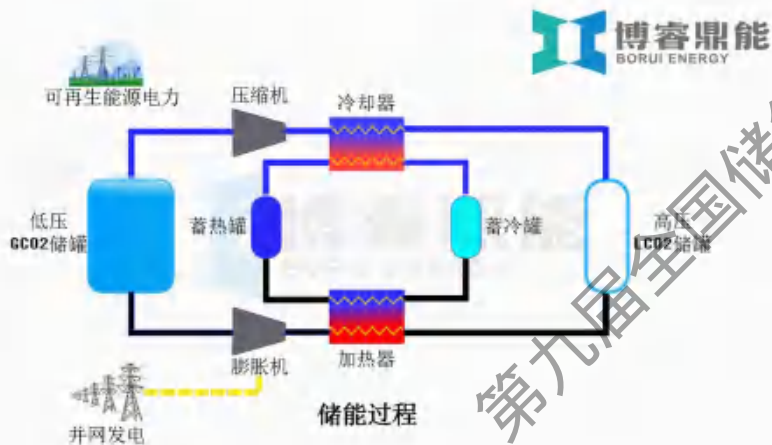
二氧化碳储能 (CES) 是一种以CO<sub>2</sub>作为储能循环工质、以“电-机-热-势”四种不同品位和形式能量的转化实现电力高效储能的新型物理储能技术。

## ➤ 储能过程

储能侧CO<sub>2</sub>被压缩机压缩至超临界状态，利用再冷器吸收压缩热，即将电能以热能和势能形式储存。

## ➤ 释能过程

释能侧CO<sub>2</sub>经再热器升温，进入透平中膨胀，推动透平发电，即将热能和势能转化为电能输出。



CO<sub>2</sub>储存方式多样(气态/高压液态/低压液态/超临界状态)，可结合当地地理环境特点灵活选择

## 0 依赖

无地理条件限制，无气候条件限制，对寒冷及炎热气候适应性强

## 真安全

无燃烧爆炸风险，无二次污染，对环境无害  
运行最高压力 < 7.5 Mpa

## 长寿命

> 30年使用寿命，使用期限内储能释能循环次数约1万次

## 低成本

初投资较低，后期维护成本低，大规模效应明显，度电成本低至0.2元左右。

## 高效率

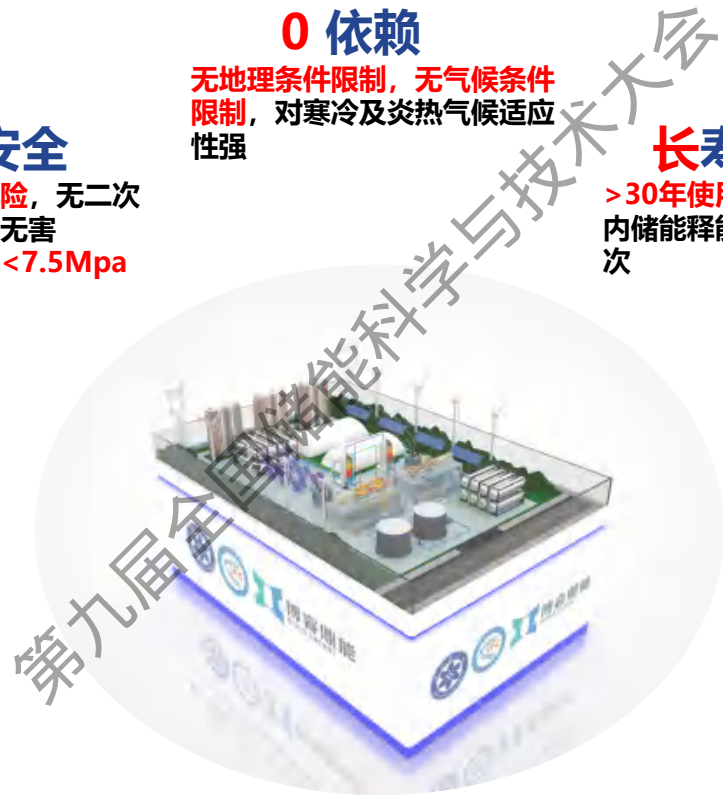
设计效率最高可达75%，分钟级响应速度

## 易扩容

储存容量无衰减，系统充放电系统可平滑扩容

## 多场景

聚焦风光大基地及源网荷储一体化场景；强耦合余热利用，热电联供



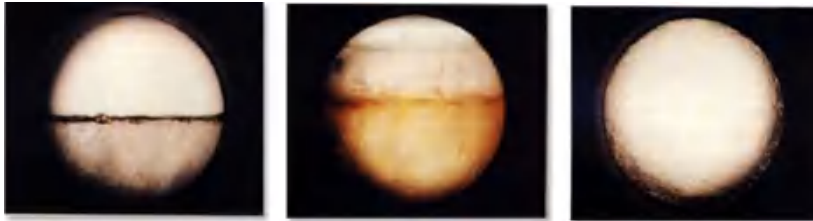
# 3.0

## CHAPTER

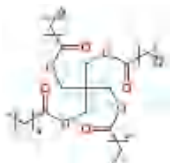
二氧化碳储能  
技术研究现状  
--基础与系统

第九届全国储能科学与技术大会

## 超临界二氧化碳工质低碳能源动力系统新体系 (中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划) 项目 高精度算法 全新测试方法



亚临界    跨临界    超临界



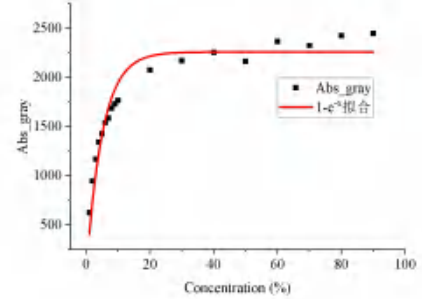
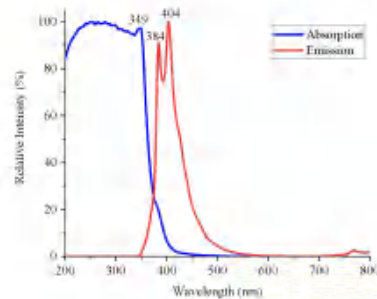
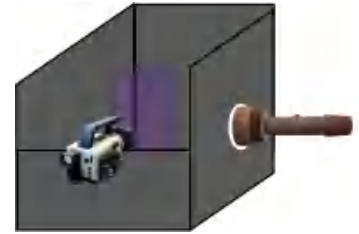
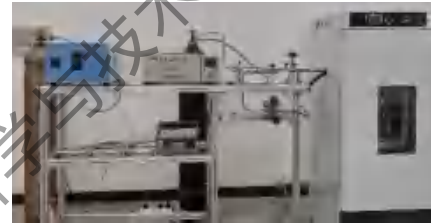
PECs



二氧化碳

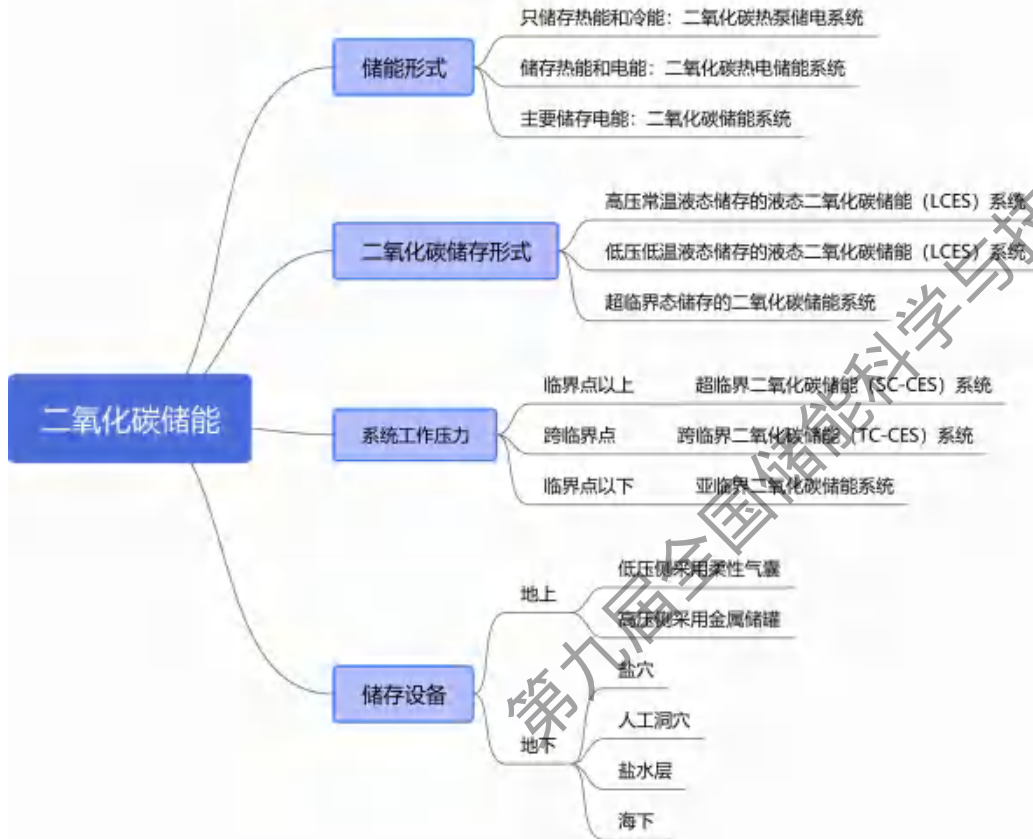


超临界二氧化碳  
储气储能原理  
超临界二氧化碳  
物理化学性质  
超分子  
相互作用



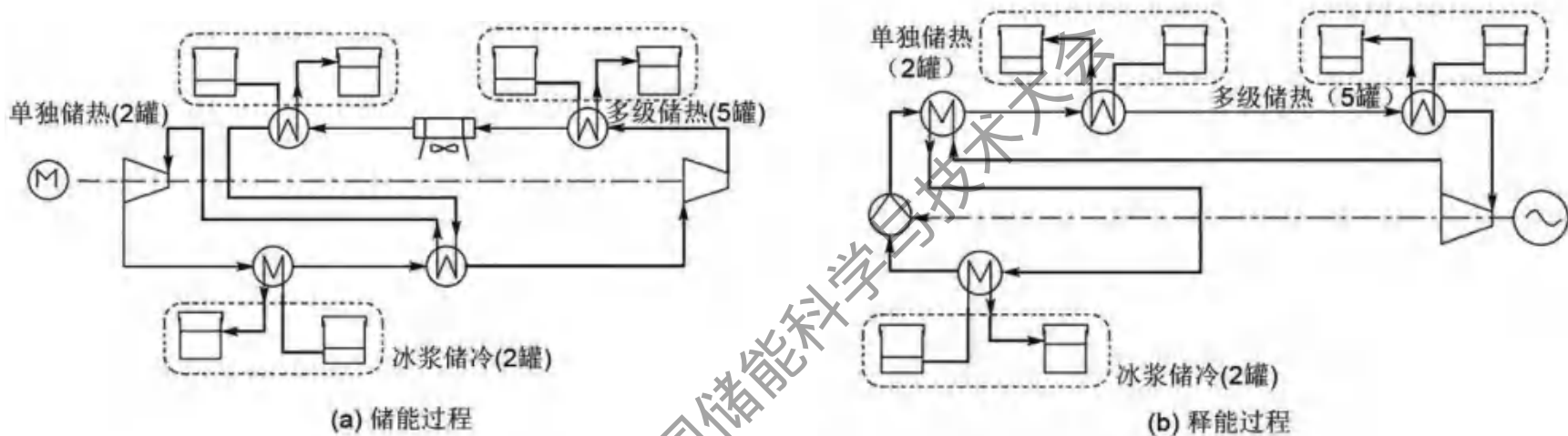
利用SAFT-Mie参数化方法与分子-温度关联相互作用因数对实际商业润滑油与CO<sub>2</sub>的相平衡计算精度相较于PC-SAFT平均提升超过30%。

灰度处理后的荧光强度与浓度具有显著的指数关系，在稀溶液时有一定的正比例关系



二氧化碳储能技术分类

二氧化碳储能技术按照储能形式、介质储存形式、系统工作压力和储存设备形式可以细分为不同种类，但基本上都采用**无需补燃的自回馈式储能**技术，具体形式随着使用条件具有不同优势和劣势。以下从目前研究及应用相对较多的**二氧化碳热电 (TE-CES) 储能**、**跨临界二氧化碳储能 (TC-CES)**、**液态二氧化碳储能 (LCES)** 和新形式二氧化碳储能集成技术展开具体介绍。



CO<sub>2</sub>作为工质应用于储能系统最早由瑞士洛桑埃科尔理工大学的Morandin教授于2012年提出，他设计了一种基于热水蓄热、冰浆蓄冷的二氧化碳电热储能(Thermo-electrical Carbon Dioxide Energy Storage, TE-CES)系统。

二氧化碳电热储能系统在蓄热端进行显热交换，CO<sub>2</sub>处于单相区；在蓄冷端进行潜热交换，CO<sub>2</sub>处于两相区。因此，系统换热过程具有良好的热匹配性。

**但该系统存在蓄热蓄冷容积较大，高品位热损失较多等制约因素，整体储能效率较低。**

## ◆ 基于TE-CES的冷热电联供系统仿真模拟

### ➤ 数学模型

$$T_c^{out} = T_c^{in} \beta_c \frac{\gamma - 1}{\gamma(\eta_{c,r} - \alpha_c(\beta_c - \beta_{c,r})^2)} \quad W_c = mc_p(T_c^{out} - T_c^{in}) = P_c t_c$$

$$T_e^{out} = T_e^{in} \beta_e \frac{1 - \gamma}{\gamma(\eta_{e,r} - \alpha_e(\beta_e - \beta_{e,r})^2)} \quad W_e = mc_p(T_e^{in} - T_e^{out}) = P_e t_d$$

$$Q_{h,c} = \int_0^{t_c} c_w m_{w1} (T_{hw} - T_{aw}) dt \quad Q_{c,c} = \int_0^{t_c} c_w m_{w2} (T_{lw} - T_{cw}) dt$$

典型工况下该系统电-电效率为**23.60%**，供热COP为**3.33**，供冷COP为**2.33**。

### ➤ 多目标优化

针对某典型日冷热电需求场景，对该系统的两个目标**能源利用率**和**出售收益**进行多目标优化，选择最优运行策略制定系统的运行时长，如图**C点为最优工况点**，充放电时长分别为7.10h和6.55h。

$$G_1 = \frac{Q_e + Q_h + Q_c}{W_c}$$

$$G_2 = Q_e p_p + Q_h p_h + Q_c p_c - W_c p_v$$

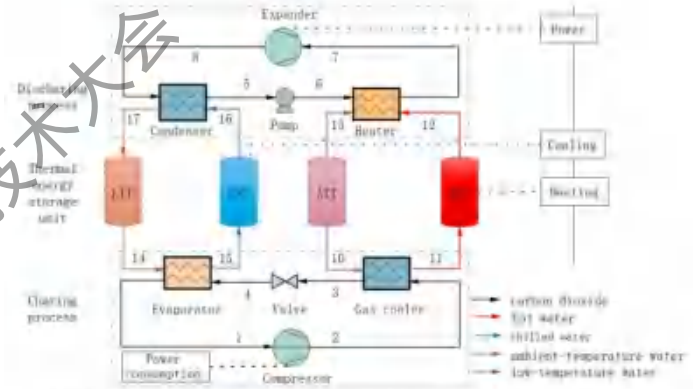
$$0 \leq t_d \leq 8; 0 \leq t_c \leq 8; t_d \leq t_c$$

$$Q_e = P_e \eta_e t_d$$

$$Q_h = P_h \eta_h t_c - P_h t_d$$

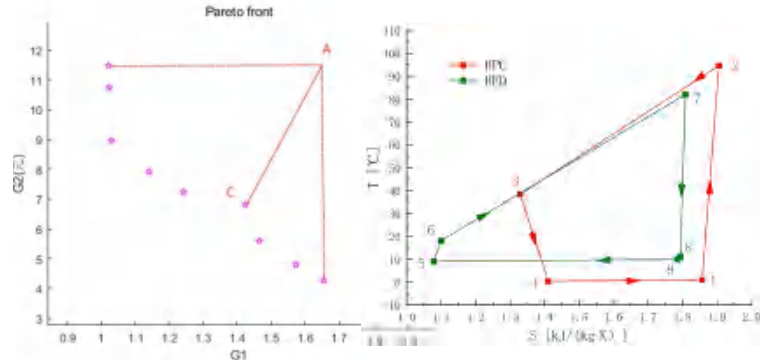
$$Q_c = P_c \eta_c t_c - P_c t_d$$

$$Q_e \geq 60; Q_h \geq 30; Q_c \geq 5$$

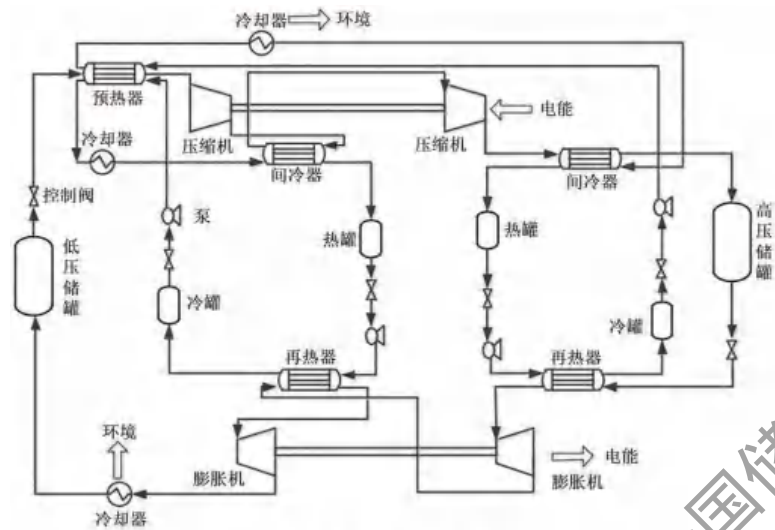


LTT: low-temperature tank; ATT: ambient temperature tank;

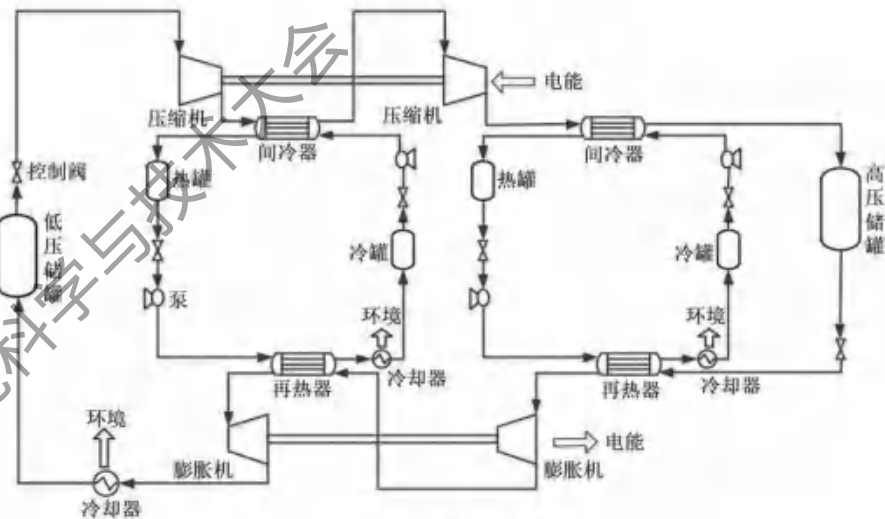
Fig.2. The scheme of CES-CCHP







(a) 跨临界二氧化碳储能系统

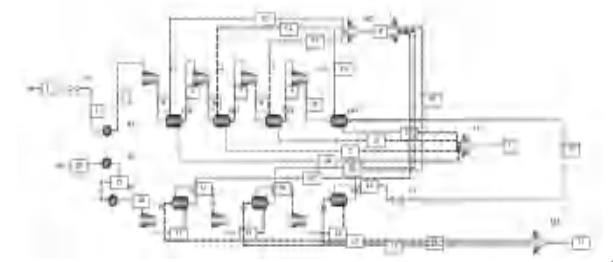
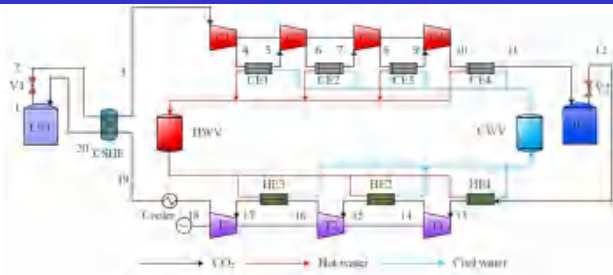


(b) 超临界二氧化碳储能系统

根据透平出口压力划分，若透平出口压力低于临界压力称为TC-CES系统，若高于临界压力则称为SC-CES系统。中科院工热所张远研究了两种系统，跨临界系统循环效率为**60%**，储能密度为2.6 kWh/m<sup>3</sup>；超临界系统循环效率为**71%**，储能密度为23 kWh/m<sup>3</sup>。相较于传统CES，**SC-CES 拥有更高的循环效率和储能密度，但系统承压一般在15MPa以上。**



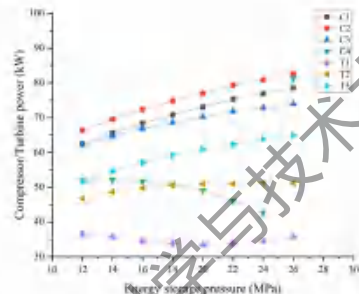
◆ 理化所跨临界二氧化碳储能系统仿真模拟



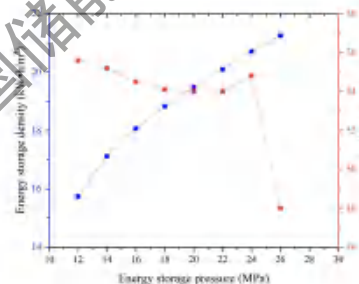
- ◆ 基于**低压液态、高压超临界两态**储存，压缩热回收-自回馈；
- ◆ 设计工况下，系统循环效率**63.8%**，储能密度**21.1kW·h/m<sup>3</sup>**，热利用效率可达**77.9%**

考虑滑压运行

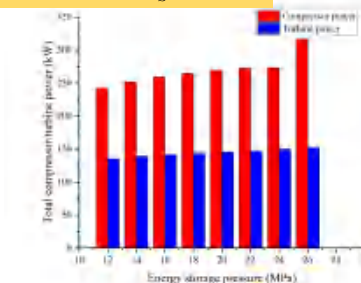
$$P_{S,C} = P_{S,L} + \frac{q_{CO_2} \rho_{CO_2} R_g T_s}{V_s} t_C$$



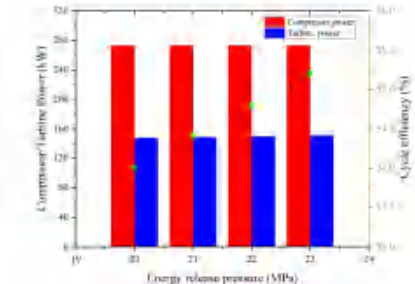
储能压力的提高对压缩机和膨胀机影响趋势不同



针对循环效率和储能密度作用储能压力存在最优值

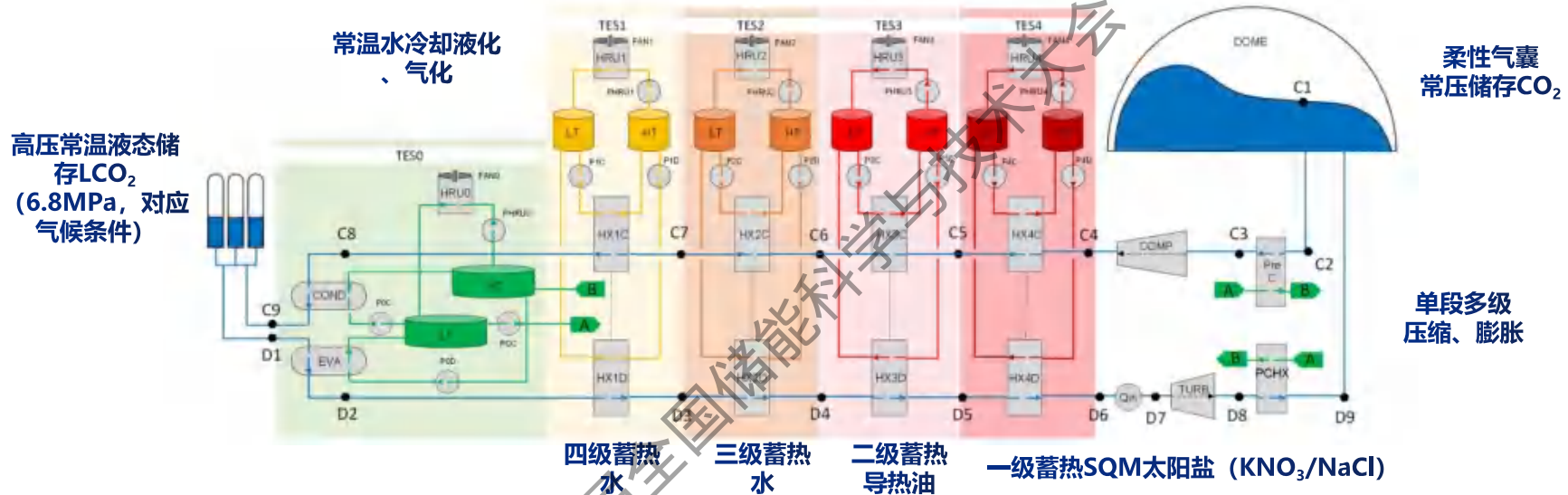


一定压力范围内，储能压力对透平性能的影响较小



通过节流控制释能压力使RTE从54.0%增加到55.2%

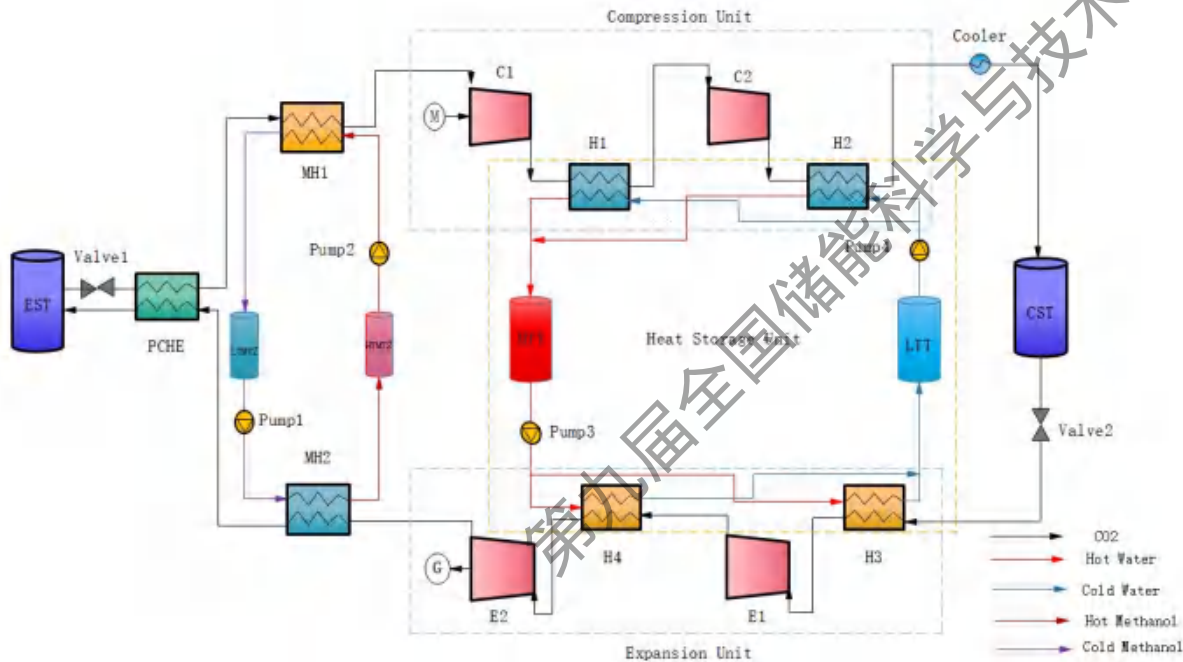
## ◆ 复合多阶蓄热的二氧化碳储能系统



- ◆ 结果参考案例和灵敏度分析, 往返效率约**77% ( $\pm 2\%$ )**, 20MW/100MWh系统占地**21459m<sup>2</sup>=32.2亩**;
- ◆ 低压气态和高压液态储存, 单位工质流量发电功率为**130kW/[1kg/s]**, 所用工质总量较少, **每MWh对应5万t $\text{CO}_2$** , 但储存容积大; 液罐**173m<sup>3</sup>**, 气库**12266m<sup>3</sup> (18亩)**;
- ◆ 系统限制: (1) **低压储气库材料及滑压运行保证**; (2) **高温离心压缩机**

## ◆ 基于显热+潜热分级液化复温的液态二氧化碳储能系统

■ 利用Aspen plus 软件建立了LCES系统模型，并进行了热力学性能和经济性分析



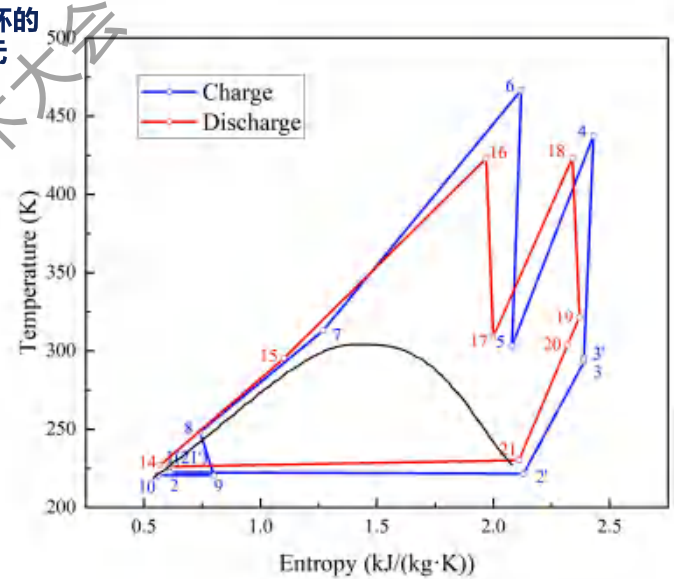
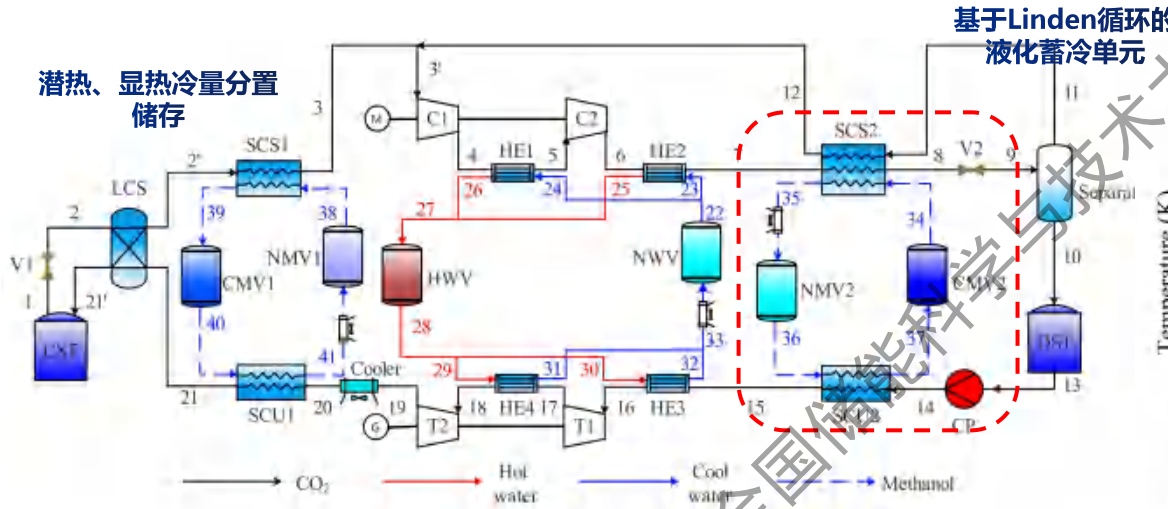
### ● 热力学特性

典型设计工况下，该系统储能效率可达56.2%；  
储能密度可达16.23kWh/m<sup>3</sup>，相较于常规气液两相存储的二氧化碳储能系统储能密度提升了近30倍；可显著减小占地面积，发展前景广阔。

### ● 经济性特性

系统回收期约为7.76年，投资收益率为12.89%，具有较好的经济收益潜力。

## ◆ 理化所基于低压储存的液态二氧化碳储能系统研究



储释能过程T-s图

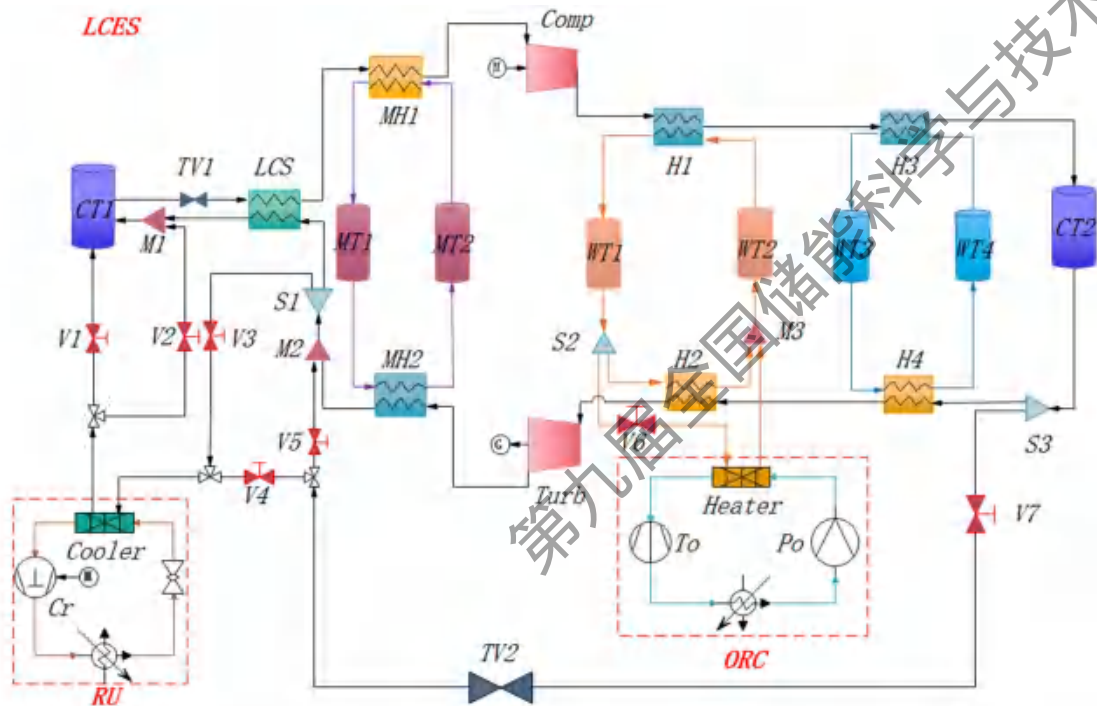
**储能：逆循环 释能：正循环**

CST: 充电储罐; DST: 放电储罐; LCS: 相变蓄冷换热器; C1~C2: 压缩机; T1~T2: 膨胀机; HE1~HE4: 换热器; HWV: 热水罐; NWV: 常温水罐; SCS1~SCS2: 显冷储存单元; SCU1~SCU2: 显冷回用单元; HMV: 高温甲醇罐; NMV: 常温甲醇罐; Separator: 气液分离器; CP: 低温泵; V1~V2: 减压(节流)阀

- ◆ 双罐低压液态储存，储存容积小，以甲醇作为蓄冷介质，节流损失占比最大，**储能侧相变蓄冷材料需要重点筛选**；
- ◆ 基本设计工况下，系统储能密度**23.94kW·h/m<sup>3</sup>**，热利用效率可达**80.6%**

## ◆ 考虑非理想蓄/释冷特性的液态二氧化碳储能系统

- 建立了耦合制冷机组和有机朗肯循环的LCES系统模型，考虑蓄冷效率对系统运行特性的影响



### ● 问题背景

由于冷能传递的非对称性、漏冷等原因，蓄冷效率  $\beta$  往往小于1，造成膨胀过程  $\text{CO}_2$  不能充分液化

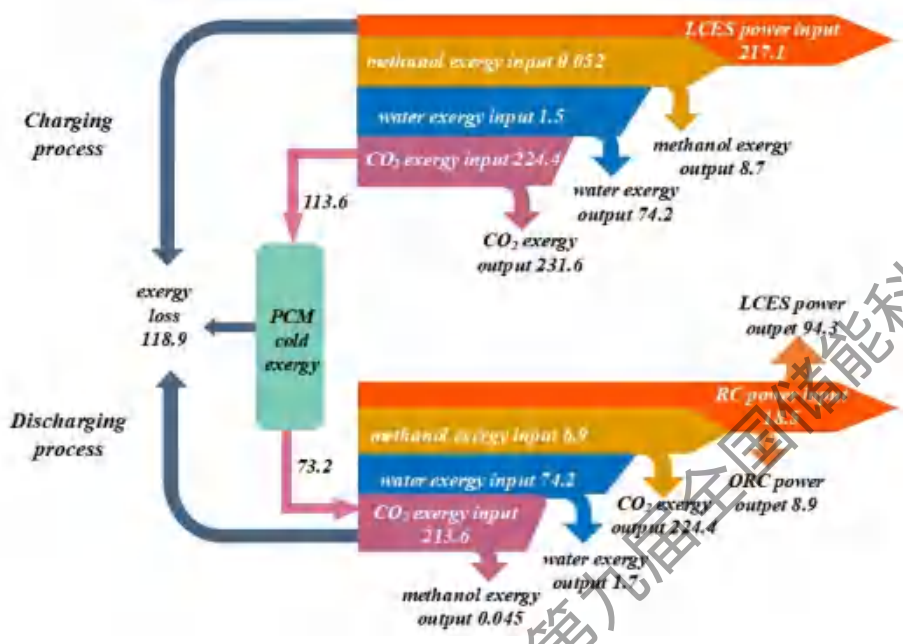
$$\beta = \frac{Q_r}{Q_s} < 1$$

### ● 解决方案

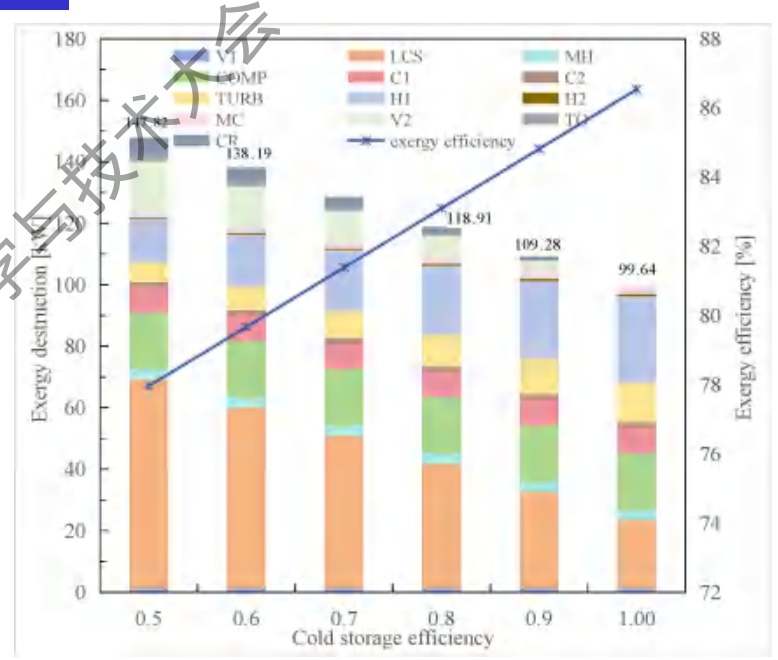
耦合制冷机组进行冷量补充，耦合ORC系统进行系统余热回收利用，提出系统的三种非设计工况运行策略。



## ◆ 考虑非理想蓄/释冷特性的液态二氧化碳储能系统



蓄冷效率为80%时系统焓流程图



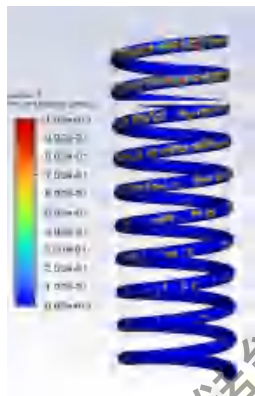
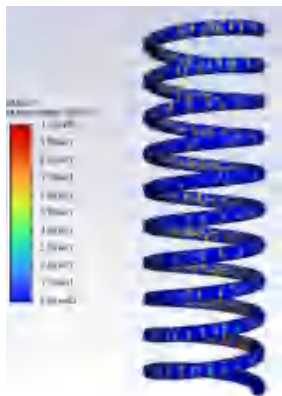
蓄冷效率对系统焓效率及各部件焓损失的影响

- 随着蓄冷效率的下降，系统能量效率和焓效率不断下降，先进焓分析表明相变蓄冷器、压缩机、膨胀机、加热器及制冷机组压缩机是最具优化潜力的部件。提升蓄冷单元效率是提升系统综合性能的重要手段。

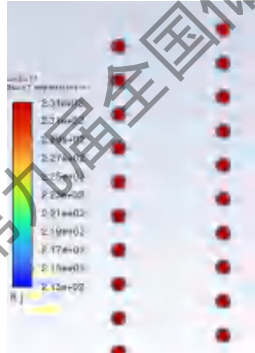
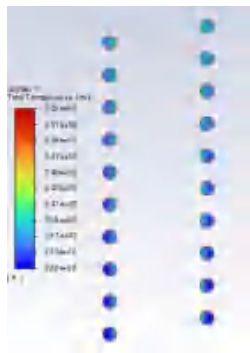
蒸发过程

冷凝过程

➤ 气液相分布



➤ 温度分布



◆ 结论

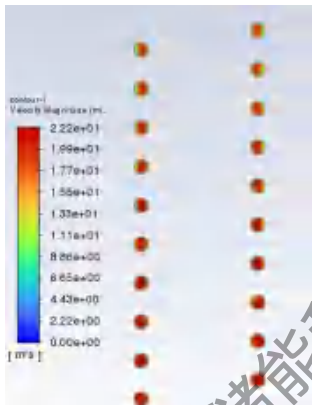
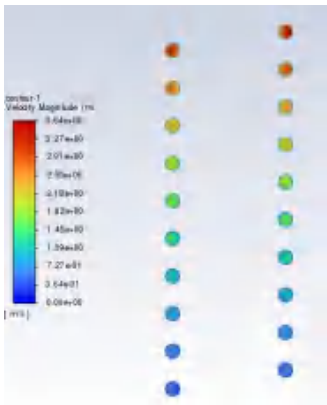
- 计算工况下，自然对流效应可以忽略不计，因此流动过程主要考虑**重力**和**离心力**的影响
- 蒸发过程相变主要发生在管道内侧，冷凝过程主要发生在管道外侧，因为在离心力作用下，高密度流体（液体）流向外侧；
- 流动相同时间下，蒸发过程进行得更快，产生相变后流体的体积分数更大，平均换热系数也更高；
- 蒸发时沿程流体温度不断上升，冷凝时沿程流体温度不断下降，截面周向温度分布不均匀，内侧温度明显高于外侧；

第十届全国储能科学与技术大会

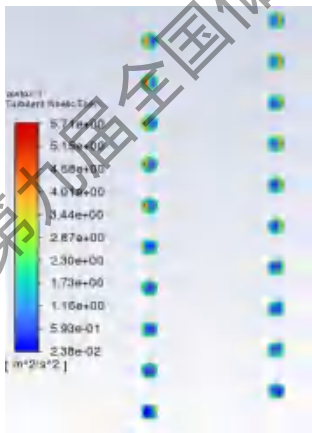
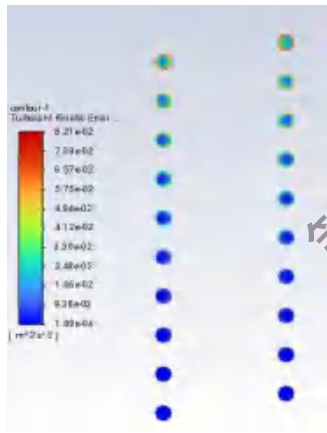
蒸发过程

冷凝过程

➤ 速度分布



➤ 湍动能分布



◆ 结论

对于蒸发过程：

- 沿着流动方向，速度不断增加，湍动能不断增加，这是因为气相逐渐产生，扰动逐渐加剧；
- 截面周向速度分布不均匀，始终表现为外侧速度大于内侧，因为受到离心力作用；
- 截面周向湍动能分布不均匀，内侧湍动能大于外侧，因为内侧速度梯度大，且产生相变多，扰动更大；

对于冷凝过程：

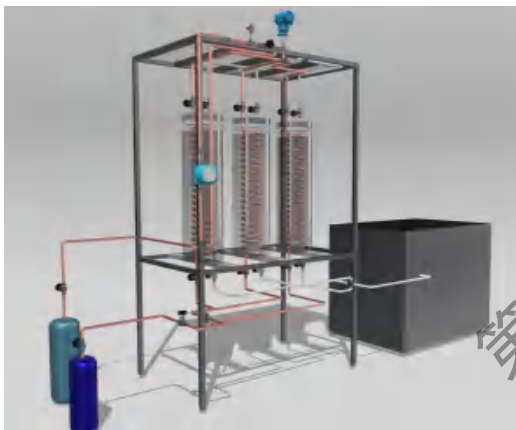
- 沿着流动方向，速度不断减小，湍动能不断增加，因为液相逐渐产生，扰动逐渐加剧
- 截面周向速度分布不均匀，前半程即管道下部分外侧速度大，因为受到离心力作用，而随着外侧液相占比的增加，速度也逐渐下降
- 截面周向湍动能分布不均匀，外侧湍动能大于内侧，外侧速度梯度大，且产生相变多，扰动更大；



## ◆ 二氧化碳储能系统相变蓄冷液化实验平台建设

### ➤ 实验目的

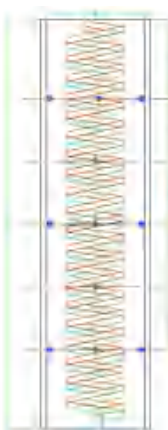
观察蓄冷/释冷过程材料相分离与衰减情况，探究相变材料和二氧化碳之间的冷能传递与损失特性，变工况实验分析CO<sub>2</sub>的流量、压力等关键参数的影响，提炼双侧相变传热关联式。



相变蓄冷实验平台示意图



预冷系统



温度测点



蓄冷液化实验台

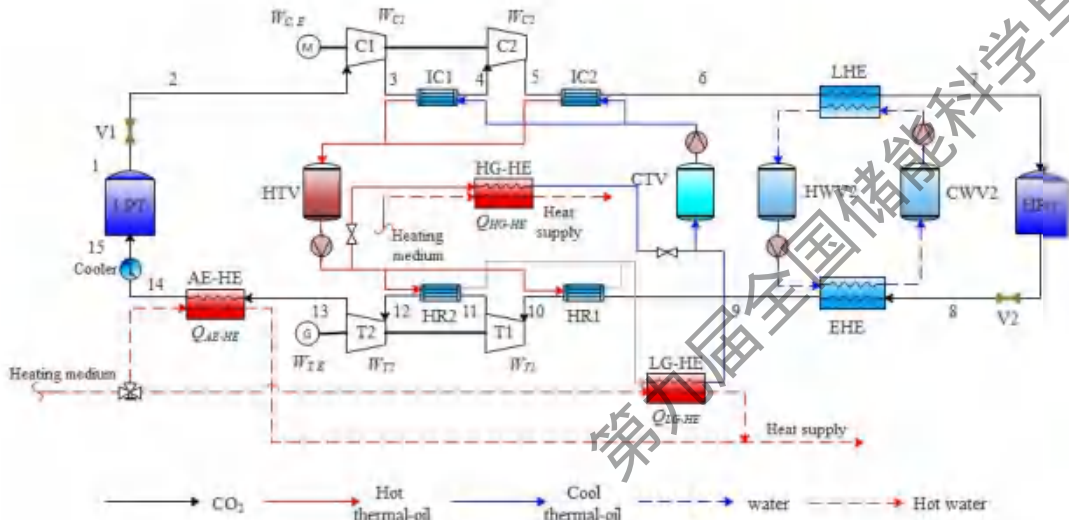
# 4.0

## CHAPTER

二氧化碳储能技术  
多元应用场景

第九届全国储能科学与技术大会

压缩二氧化碳储能 (CCES) 通过将电能以热能、势能形式储存并释放, 从而使系统具备热电联供的能力, 这对于实现能量高效综合利用和促进储能技术发展具有积极意义。构建了一种**基于压缩二氧化碳储能的热电联供 (CCES-CHP) 系统**及其数学计算模型, 根据系统多工况运行特点, 建立了反映系统储/释能功率和冷却/放热功率耦合关系的无量纲因数 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ , 提出了一种针对该系统的运行可行域分析方法, 并进一步研究了热电联供模式下运行可行域的形状和特征, 分析了热电分配比变化和考虑宽工况运行的运行可行域影响规律, 从而为评价系统运行热电联供能力和灵活性提供了一种思路。



CCES-CHP系统原理图



CCES-CHP系统双SOC模型

## ➤ 压缩过程

$$W_C(t) = \sum_{i=1}^{N_{com}} \frac{nR_g m_C(t) T_i^{C,in} (\beta_i^C)^{\frac{n-1}{n}} - 1}{n-1} \frac{1}{\eta_i^C}$$

$$T_i^{C,out} = T_i^{C,in} \left[ \frac{(\beta_i^C)^{\frac{n-1}{n}} - 1}{\eta_i^C} + 1 \right]$$

## ➤ 膨胀过程

$$W_T(t) = \sum_{i=1}^{N_{exp}} \frac{nR_g m_T(t) T_i^{T,in} \left[ 1 - (\beta_i^T)^{\frac{n-1}{n}} \right]}{n-1} \cdot \eta_i^T$$

$$T_i^{T,out} = T_i^{T,in} \left\{ \eta_i^T \left[ (\beta_i^T)^{\frac{1-n}{n}} - 1 \right] + 1 \right\}$$

## ➤ 换热器 (压缩热回收和反馈)

$$\sum_{i=1}^{N_{com}} T_i^{C,TSM} = (N_{com} - \varepsilon_{N_{com}}) T^{CTV} + \varepsilon_{N_{com}} T_{i=N_{com}}^{C,out} + \sum_{i=1}^{N_{com}-1} (T_i^{C,out} - T_{i+1}^{C,in})$$

冷却器效能关系式

$$Q_{IC}(t) = m_C(t) \left[ \sum_{i=1}^{N_{com}-1} (h_i^{C,out} - h_{i+1}^{C,in}) + (h_{i=N_{com}}^{C,out} - h_{IC-end}^C) \right] = m_C(t) c_{p,t}^{C,CO_2} \left( \sum_{i=1}^{N_{com}} T_i^{C,TSM} - N_{com} T^{CTV} \right)$$

热回收

$$\sum_{i=1}^{N_{exp}} T_i^{T,TSM} = N_{exp} T^{HTV} + T_{HR-start}^T + \sum_{i=1}^{N_{exp}-1} T_i^{T,out} - \sum_{i=1}^{N_{exp}} T_i^{T,in}$$

加热器效能关系式

$$Q_{HR}(t) = m_T(t) \left[ \sum_{i=1}^{N_{exp}-1} (h_{i+1}^{T,in} - h_i^{T,out}) + (h_{i=1}^{T,in} - h_{HR-start}^T) \right] = m_T(t) c_{p,t}^{T,CO_2} \left( N_{exp} T^{HTV} - \sum_{i=1}^{N_{exp}} T_i^{T,TSM} \right)$$

热反馈

在系统经历一个全周期循环过程中定义X为蓄热子系统供热率，反映高温供热量和低温供热量与总蓄热量的比例。定义Y为热回馈率，反映膨胀发电过程用于加热CO<sub>2</sub>的热量与总蓄热量的比例。

$$X = \frac{\int_0^{t_{HG}} Q_{HG-HE}(t) dt + \int_0^{t_{discharge}} Q_{LG-HE}(t) dt}{\int_0^{t_{charge}} Q_{IC}(t) dt} \quad Y = \frac{\int_0^{t_{discharge}} Q_{HR}(t) dt}{\int_0^{t_{charge}} Q_{IC}(t) dt} \quad X + Y = 1$$

反映压缩机耗电、压缩热、透平发电三者的相互转换关系

两个无量纲因数

$$\gamma_1 = \frac{Q_{IC}(t)}{W_{C,E}(t)} = \frac{\varepsilon_{N_{com}} T_{i=N_{com}}^{C,out} - \varepsilon_{N_{com}} T^{CTV} + \sum_{i=1}^{N_{com}-1} (T_i^{C,out} - T_{i+1}^{C,in})}{\sum_{i=1}^{N_{com}} (T_i^{C,out} - T_i^{C,in}) / \eta_i^{C,E}}$$

$$\gamma_2 = \frac{Q_{HR}(t)}{W_{T,E}(t)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{exp}} T_i^{T,in} - \sum_{i=1}^{N_{exp}-1} T_i^{T,out} - T_{HR-start}^T}{\sum_{i=1}^{N_{exp}} (T_i^{T,in} - T_i^{T,out}) \cdot \eta_i^{T,E}}$$

## ➤ 储热SOC和储气SOC表达式

储热SOC以高温储热罐储热量  $Q_{HTV}$  来描述

$$Q_{HTV}(t) = \begin{cases} Q_{HTV}(t-1) + [\gamma_1 W_{C,E}(t) - Q_{HG-HE}(t) - Q_{LG-HE}(t)] \Delta t & \text{Charging-Heating condition} \\ Q_{HTV}(t-1) - [\gamma_2 W_{T,E}(t) + Q_{HG-HE}(t) + Q_{LG-HE}(t)] \Delta t & \text{Discharging-Heating condition} \end{cases}$$

储气SOC以CO2高压储罐储存压力  $p_{HPT}$  来描述

$$p_{HPT}(t) = \begin{cases} p_{HPT}(t-1) + \frac{R_g}{V_{HPT}} T_{HPT} \alpha_1 W_{C,E}(t) \Delta t & \text{Charging-Heating condition} \\ p_{HPT}(t-1) - \frac{R_g}{V_{HPT}} T_{HPT} \alpha_2 W_{T,E}(t) \Delta t & \text{Discharging-Heating condition} \end{cases}$$

## ➤ 约束条件

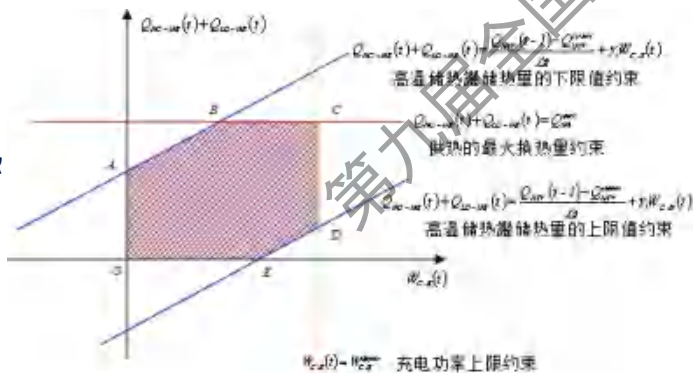
$$W_{C,E}(t) \leq W_{C,E}^{upper} = \min \left\{ \frac{Q_{IC}^{max}}{\gamma_1}, \frac{W_C^{max}}{\eta^{C,E,min}}, W_{C,E}^{upper} \left( \text{When } p_{HPT}(t) = P_{HPT}^{max} \right) \right\}$$

$$W_{T,E}(t) \leq W_{T,E}^{upper} = \min \left\{ \frac{Q_{HR}^{max}}{\gamma_2}, W_T^{max} \overline{\eta^{T,E,max}}, W_{T,E}^{upper} \left( \text{When } p_{HPT}(t) = P_{HPT}^{min} \right) \right\}$$

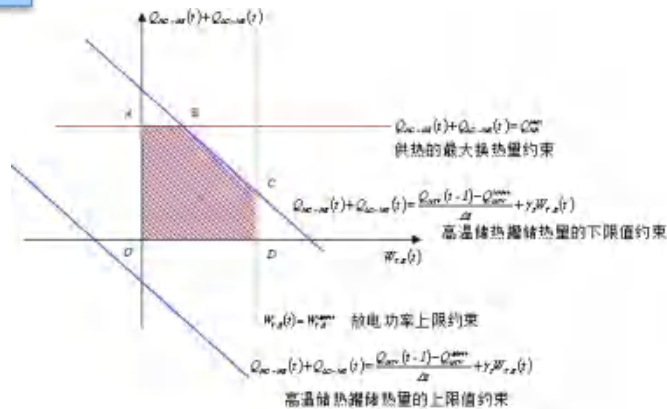
压缩机功率和透平功率都存在上限值，且与换热功率、设备做功能力和CO<sub>2</sub>高压储罐压力密切相关

## CCES-CHP系统运行可行域刻画

### ➤ 充电-供热工况

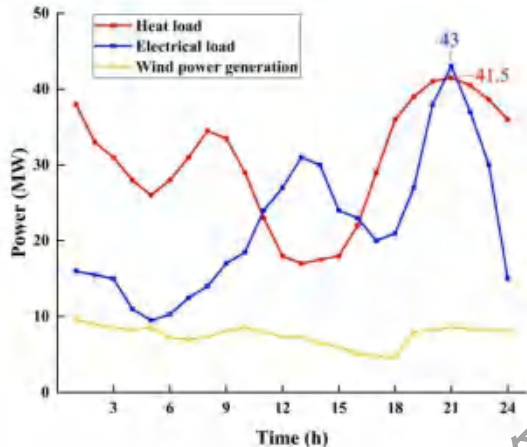


### ➤ 放电-供热工况

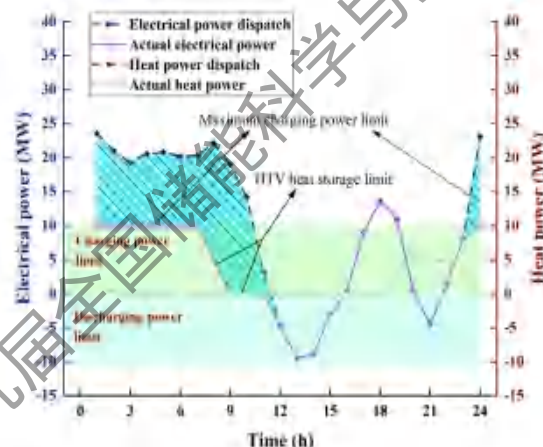


## 算例分析

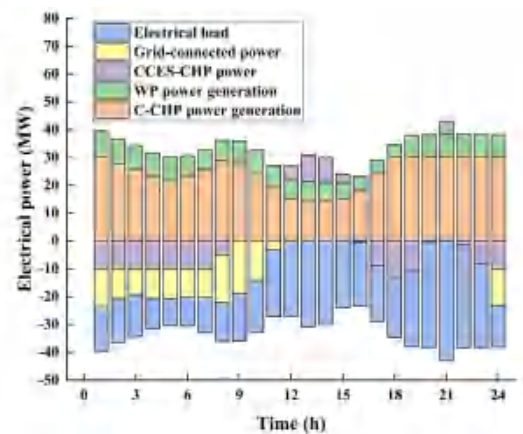
某个综合能源系统为例，配置一套20MW风力发电机组（WP），一套30MW传统热电联产机组（C-CHP），一套10MW/50MW·h的CCES-CHP系统。优化目标是：以用户的热负荷、电负荷为指令，让C-CHP按以热定电方式运行，将去掉风力发电量的电负荷、热负荷缺额作为CCES-CHP的调度指令。



➤ 热负荷、电负荷、风力发电曲线



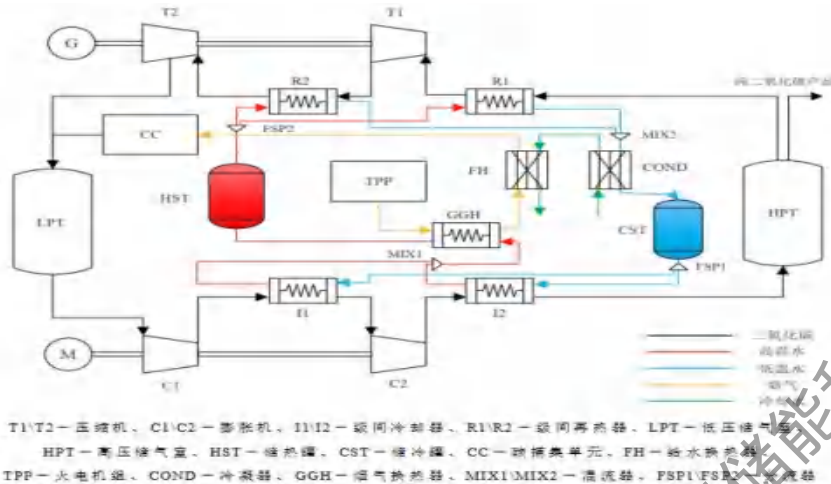
➤ CCES-CHP对电、热调度的实际响应



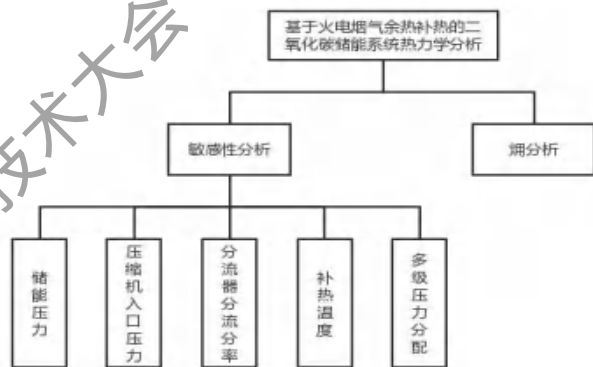
➤ 电能的生产、调度和消纳

初始参数下，CCES-CHP的 $\eta_{electricity}$ 和 $\eta_{heating,total}$ 分别达**66.7%**和**21.4%**，综合能源利用效率达**88.1%**。





基于火电烟气余热补热的二氧化碳储能系统原理

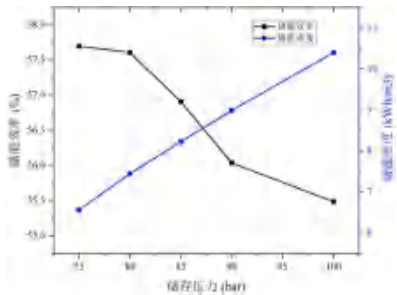


研究分析思路

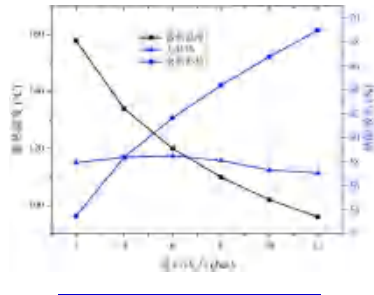
为了提高火电厂发电机组调峰灵活性，解决火电厂烟气余热及碳排放处理等问题，提出了一种基于火电烟气余热补热的二氧化碳储能系统。建立了该储能系统的热力学模型，通过模型研究了**高压储气室压力、低压储气室压力、补热温度、压缩比和膨胀比分配以及分流器分流分率**等关键参数对系统性能的影响，获得系统最优储能效率，为**67.89%**；同时对关键部件进行焓分析，结果表明，**压缩机和膨胀机、第一级再热器以及分流器**占焓损失的主要部分，其效率的提高更有利于系统的优化。

将火电烟气余热用于二氧化碳储能系统可增加膨胀阶段二氧化碳做功，提高系统储能效率，同时对烟气余热也有较好的利用。

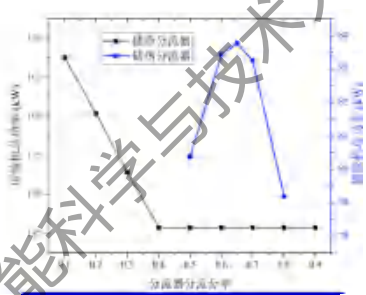
## 敏感性分析



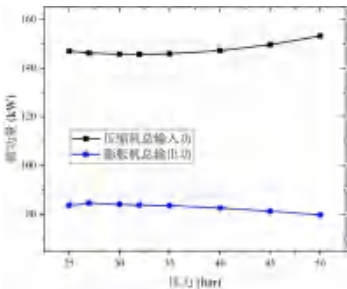
储能压力



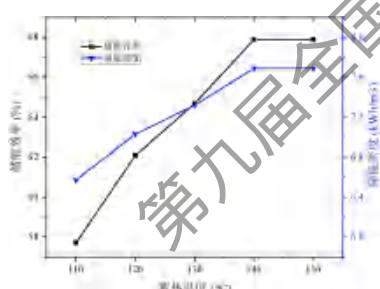
压缩机入口压力



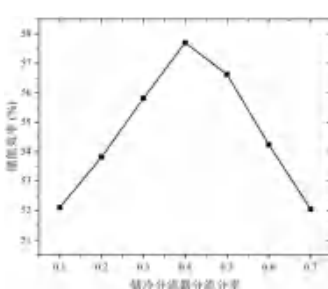
储热分流器分流分率



压缩机和膨胀机压力分配

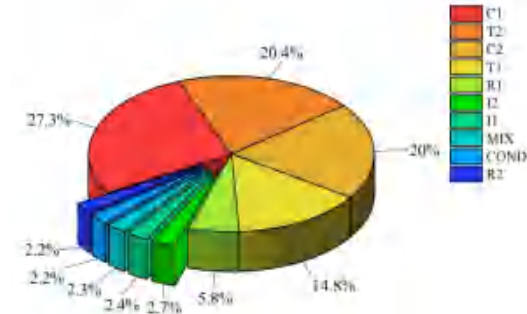


补热温度



储冷分流器分流分率

## 焓分析



T1\T2 - 压缩机、C1\C2 - 膨胀机、I1\I2 - 级间冷却器、R1\R2 - 级间再热器、COND - 冷凝器、MIX1\MIX2 - 混流器

系统关键部件焓损分布

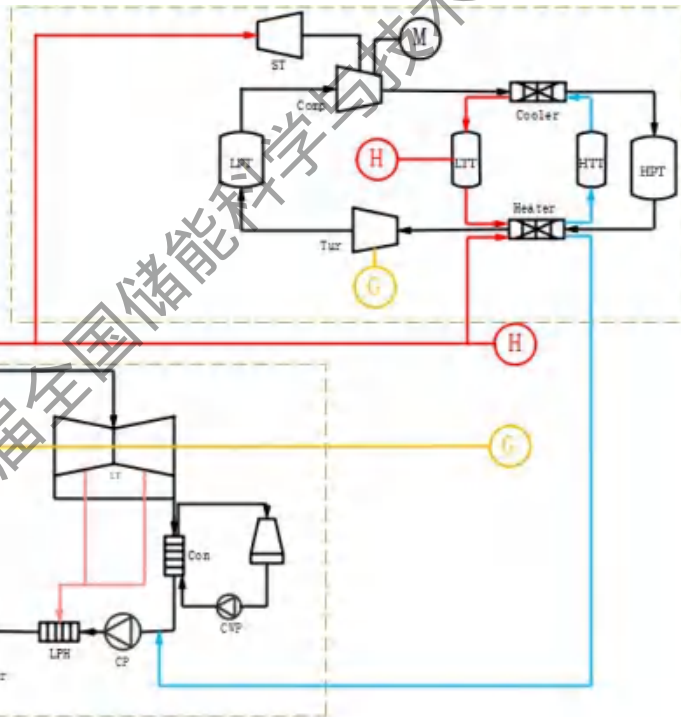
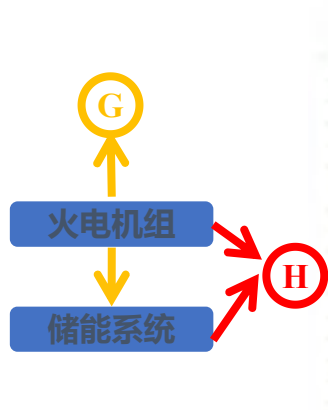




在满足供热需求的同时**灵活响应**电网调度指令，扩大负荷调节范围，提高交易市场竞争力

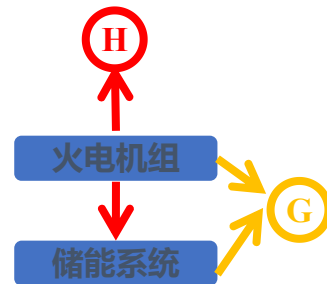
### 降负荷阶段

- 大量风光电需消纳或用电需求较小时，火电机组响应调度减小上网电量。
- 为保证供热需求，机组无需大幅降负荷，可将多余电量存入二氧化碳储能系统，同时储能过程压缩热也可用于供热。



### 升负荷阶段

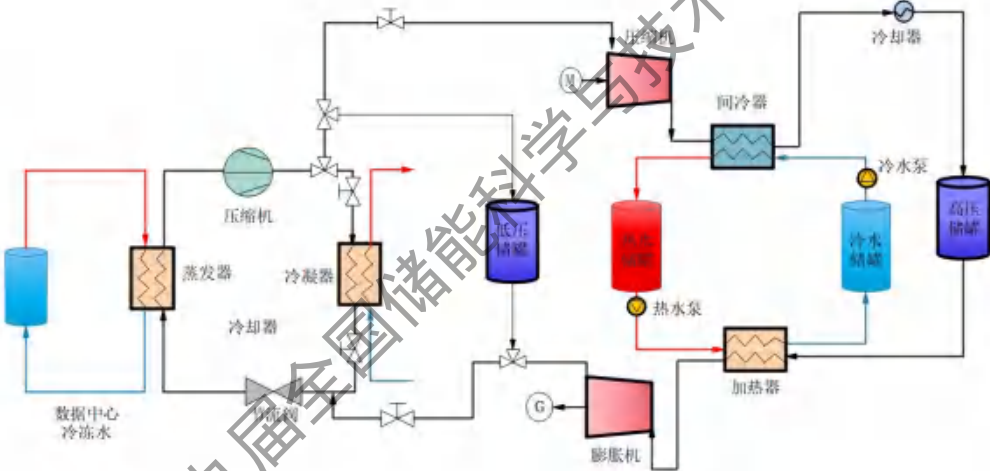
- 风光出力不足或用电需求较大时，火电机组响应调度增加上网电量。
- 满足供热需求下的额外热量可为储能系统补热，储能系统释能联合供电。



在满足数据中心冷却需求的同时**回收废热**，降低用电成本，显著提升数据中心PUE

## ■ 储能+热泵运行模式

- 电价低谷期开启储能循环。低压储罐内的二氧化碳经节流降压后流经蒸发器提供冷冻水。再依次经过热泵压缩机和储能压缩机被压缩冷却后进入高压储罐储存。



## ■ 热泵运行模式

- 考虑到数据中心需要全天制冷，在无储/释能需求时，热泵循环可单独运行，以满足数据中心冷却需求。

## ■ 释能+热泵运行模式

- 电价高峰期开启释能循环。高压液态二氧化碳利用压缩热加热后进入膨胀机。膨胀机出口的二氧化碳进一步节流后进入蒸发器制取冷冻水，再利用热泵压缩机升压后进入低压罐储存。

# 5.0

## CHAPTER

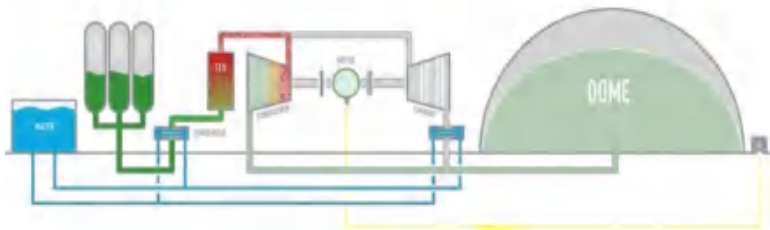
### 二氧化碳储能应用 现状

第九届全国储能科学与技术大会

## ■ 意大利Energy Dome公司

□ 2022年6月建成了一套4MW·h的“二氧化碳电池”试点项目，成为世界上首个二氧化碳储能示范项目。

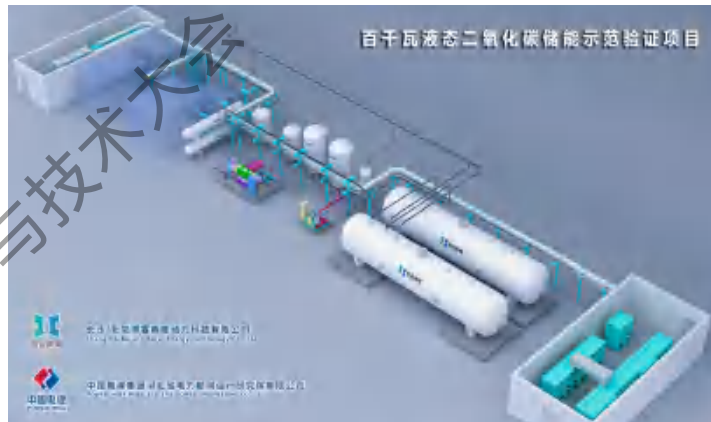
□ 2022年9月，Energy Dome公司宣布和丹麦能源公司Ørsted签署协议，以其二氧化碳电池储能技术为基础，拟合作部署一个或多个20MW/200MWh长时储能系统。



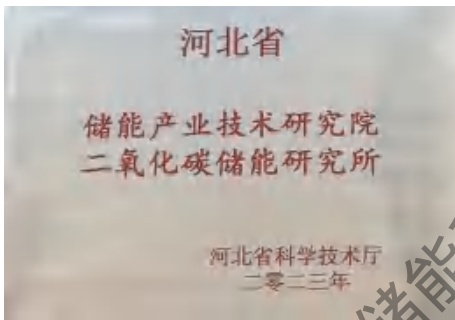
## ■ 中科院理化所、博睿鼎能

□ 2023年10月建成国内首台百千瓦液态二氧化碳储能示范验证项目。项目于2023年8月正式建设施工完成，2023年10月完成首轮系统联调联试。

□ 2023年7月，博睿鼎能与陕西储能公司计划在陕北榆林建设一套 100MW/400MW 压缩二氧化碳储能系统，储能时长 8h，发电时长 4h。



## 2023年8月，建成国内首套百千瓦液态二氧化碳储能示范验证项目



- 项目地址：河北省固安县高新工业园区
- 占地面积：厂区约2000m<sup>2</sup>,系统占地面积500m<sup>2</sup>
- 项目建设单位：博睿鼎能（廊坊）动力科技有限公司
- 技术提供方：中国科学院理化技术研究所
- 项目建设规模：100kW/200kW·h

- 油、水双工质双级高效蓄热
- 恒压进气压缩及膨胀
- 中低压(<7.6MPa)LCO<sub>2</sub>储存
- 系统及时性运行调度



长沙博睿鼎能动力科技有限公司成立于2022年10月，是由中国科学院理化技术研究所科研团队成果转化新兴科技公司，是**新型二氧化碳储能技术的开拓者**，致力于双碳背景下新型储能技术革新和能源结构转型发展。公司技术及研发团队均来自中国科学院理化技术研究所，具备**完整自主知识产权和核心技术**。

公司主营业务是为源侧/网侧/荷侧提供多场景二氧化碳储能技术解决方案与技术产品、工程、装备成套及运维服务。



二氧化碳  
储能  
技术

- ▶ 场景 二氧化碳储能电站整体系统设计&建设
- ▶ 场景 工业园区源-网-荷-储智慧能源服务
- ▶ 场景 综合零碳电厂及海洋牧场工艺方案服务
- ▶ 场景 CCUS全链条工艺方案咨询服务
- ▶ .....

第九届全国储能科学与技术大会



张振涛

产业化团队首席科学家

- 十四届全国政协委员
- 博士，中国科学院理化技术研究所研究员，博士生导师
- 民进民进北京市委常委、中国科学院基层委员会主任委员

### 学术成就

- 中国科学院**关键技术人才**
- 中国高技术产业发展促进会未来能源分会**主任委员**
- 国家重点研发专项“农特产品绿色节能干燥技术装备研发（2018YFD0700200）”**首席科学家**
- 中国轻工业食品药品保质加工储运装备与节能技术**重点实验室主任**
- 获得**太湖人才、锡山英才、龙城英才**称号
- 主持国家及省部级项目**30**余项，获得河南省科技进步3等奖1项，行业科技进步特等奖1项
- 出版学术专著**1**部，发表学术论文**170**余篇，申请及授权专利**300**余项，参与制定相关标准**10**余项，参编专著、行业白皮书**3**部。

### 曾任职

- 参与创立青岛海信日立
- 美的集团华北区**销售总监**
- 技术孵化创立河南佰衡节能科技股份有限公司（新三板上市）



- **储能技术具有广阔的应用前景，是“双碳”战略的关键支撑技术**
- **各种储能技术具有有不同的技术特点和应用场合**
- **长时大规模储能技术是当下以及今后很长一段时间的研究热点**
- **储能技术创新和应用迫切需要更多的人才、资源和政策的支持**
- **二氧化碳储能技术具有储能效率高、寿命长，成本低、不受地理条件限制等优势，将是最具发展潜力的储能技术之一**

# 谢谢大家



张振涛

[zzt@mail.ipc.ac.cn](mailto:zzt@mail.ipc.ac.cn)

微信tomzhangipc

第九届全国储能科学与技术大会