

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406145

高温卡诺电池关键技术及应用现状

封官斌¹, 李跃林², 程孝峰², 侯冰², 曲大伟², 徐冉³, 张磊³

(1.国家能源集团山东电力有限公司, 山东 济南 250000;

2.国家能源蓬莱发电有限公司, 山东 烟台 265800;

3.北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211)

[摘要] 随着可再生能源的快速发展, 为应对间歇性和可变电力生产带来的挑战, 电网侧能源存储解决方案的需求不断增加。卡诺电池作为多种成熟电热转换和存储技术的集成, 因其可扩展性和不受地理限制的优势, 正受到越来越多的关注。综述卡诺电池的基本原理、关键技术、应用前景及当前研究现状; 探讨了高温卡诺电池技术的定义, 以及关键设备如压缩机和膨胀机的运行特性与技术挑战; 分析了基于电加热和双向循环(如布雷顿循环和朗肯循环)的卡诺电池系统的实际应用案例和技术前景, 为未来研究和技术开发提供参考。

[关键词] 储能技术; 卡诺电池; 高温技术; 热泵; 朗肯循环

[引用本文格式] 封官斌, 李跃林, 程孝峰, 等. 高温卡诺电池关键技术及应用现状[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 1-9.
FENG Guanbin, LI Yuelin, CHENG Xiaofeng, et al. Key technologies and current applications of high-temperature Carnot batteries[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 1-9.

Key technologies and current applications of high-temperature Carnot batteries

FENG Guanbin¹, LI Yuelin², CHENG Xiaofeng², HOU Bing², QU Dawei², XU Ran³, ZHANG Lei³

(1.National Energy Group Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan 250000, China;

2.National Energy Penglai Power Generation Co., Ltd., Yantai 265800, China;

3.National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: With the rapid development of renewable energy, the demand for grid-scale energy storage solutions is increasing to address the challenges posed by intermittent and variable power generation. As an integration of various mature electrothermal conversion and storage technologies, Carnot battery is gaining increasing attentions due to its scalability and independence from geographical constraints. The fundamental principles, key technologies, application prospects and current research status of Carnot battery are reviewed. The definition of high-temperature Carnot battery technology and the operational characteristics and technical challenges of related key equipment such as compressors and expanders are discussed. Additionally, practical application cases and technological prospects of Carnot battery systems based on electric heating and bidirectional cycles (such as Brayton and Rankine cycles) are analyzed, providing a reference for future research and technological development.

Key words: energy storage technology; Carnot battery; high-temperature technology; heat pump; Rankine cycle

随着可再生能源的不断发展, 电网侧能源存储解决方案的需求也不断增加, 以应对间歇性和可变电力生产带来的挑战。尽管受地理限制, 抽水蓄能和压缩空气储能由于成本低、效率高, 已在大规模应用中得到商业化部署。电化学电池(如锂离子电池和液流电池)适用于中小规模应用, 但面临安全

性、高成本和寿命短等挑战^[1]。

卡诺电池作为多种成熟电热转换和存储技术(压缩热能存储、液态空气储能等)的组合, 因其可扩展性和不受地理限制的优势, 正受到越来越多的关注, 有望成为未来能源系统中重要的低成本、长时储能解决方案。卡诺电池的历史发展可以追溯到 19 世

收稿日期: 2024-06-12

基金项目: 国家能源集团科技项目(GJNY-23-74)

Supported by: Technology Project of CHN ENERGY (GJNY-23-74)

第一作者简介: 封官斌(1969), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为储能系统管理, 16010082@chnenergy.com.cn。

通信作者简介: 张磊(1986), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为热力系统仿真和优化, 20097250@chnenergy.com.cn。

纪和 20 世纪初。1833 年，埃里克森 (Ericsson) 首次探索了这一技术^[2]，随后在 1924 年，弗里茨·马格 (Fritz Marguerre) 为热能存储方案申请了专利^[3]。然而，直到最近 10 年，由于电力生产的高度波动与需求的不匹配，卡诺电池才引起了关注。卡诺电池是一种热力学能量存储系统，其核心思想是通过热力循环将电能转换成热能并存储，再通过逆热力学循环将热能转换回电能。在更加广义角度下，卡诺电池可理解为以热能为能量存储方式，充放电过程主要通过多类型热力循环的电能存储释放系统。卡诺电池具有受地理和环境因素影响较小，较大储存容量，并且成本效益高的优势^[4]。采用废热回收等创新设计可以进一步提高其效率和环境影响^[5]。尽管与电化学储能选项相比效率较低，但由于其技术成熟、安全、低成本和长寿命，相较于其他储能形式仍旧具有竞争优势。

目前，卡诺电池相关研究已经逐渐成为热点，但高温卡诺电池的定义和应用开展的相关综述仍是空白。本文通过系统分析高温卡诺电池所涉及的关键技术和商业用现状，为进一步研究和技术开发提供参考。

1 卡诺电池关键技术

卡诺电池涉及 3 个主要阶段：充电阶段、储能过程和放电阶段。在充电过程中，电能通过电加热器或热泵等设备转换成热能，并与储能系统进行热量交换。储能阶段热能以高温形式在热能存储系统中稳定保存，直到需要使用电能时。当需要电能时，储存的热能通过发电热力循环（朗肯循环或布雷顿循环）转换成机械能，随后转换成电能。卡诺电池系统组成如图 1 所示。

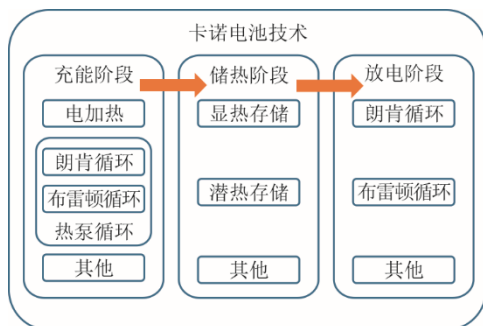


图 1 卡诺电池系统组成

Fig.1 System components of Carnot batteries

卡诺电池作为多种热电转换存储技术的集成，具有许多可能的技术变化。除了通过焦耳热效应进

行热电转换的电加热方法外，任何热力学热泵循环都可以实现充电。放电过程则可通过布雷顿、朗肯或斯特林循环的多种热力过程单独或联合组成^[6]。

1.1 储热技术

卡诺电池系统使用的储热技术主要依赖于其能够有效存储和释放热能的能力。储热技术可以大致分为显热存储（水、沙子、岩石和熔融盐等^[7-8]）、潜热存储（有机物质、无机盐、金属或金属合金^[9-10]）。结合上述中的一种或多种储热技术可优化储能性能和系统的热响应^[11]。

以上储热介质和技术具有各自的温度适用范围和应用场景，后面章节将对适用于高温卡诺电池的储热技术进行具体讨论。

1.2 电加热技术

电加热技术是通过电阻加热元件直接将电能转换为热能的一种方法。在卡诺电池系统中利用电阻加热元件的电加热技术将电能转化为热能，能够快速加热储能介质，从而提高系统效率和响应时间。这种方法的优势在于设计简单、快速响应能力，以及适用于需要快速热调整的场景。通过将电加热集成到储能系统中（例如使用熔盐），该技术可以改善能源管理和整体系统性能，尤其是在需要快速热响应和高热容量材料的应用中^[6]。

1.3 布雷顿循环热泵、热机

布雷顿循环是一种以气体为工作介质的热循环，包括 2 个等压过程和 2 个绝热过程^[12]。在卡诺电池应用中，充电采用逆向布雷顿循环实现热泵功能，通过压缩低温气体，然后在高压状态下加热、扩张并释放热量的方式，来实现热量从低温热源向高温热源的热量移动。

1.4 卡诺循环热泵、热机

卡诺循环是理论上效率最高的热循环，包括 2 个等温过程和 2 个绝热过程。在热泵系统中，卡诺循环的热泵通过在较低温度下吸收热量并在较高温度下释放热量工作，其效率理论上是所有热泵中最高的。

1.5 其他技术

除了以上涉及的关键技术，卡诺电池可以根据其基本原理进行扩展。例如液态压缩空气储能技术^[13]和具有斯特林发电机的发电技术^[14]都可包含进卡诺电池技术范畴。也有学者提出通过替代锅炉设备对燃煤电站进行卡诺电池化改造（图 2）。将现

有的燃煤电厂转换为储能系统，同时利用目前电厂 现有基础设施和主要动力设备^[6,15]。

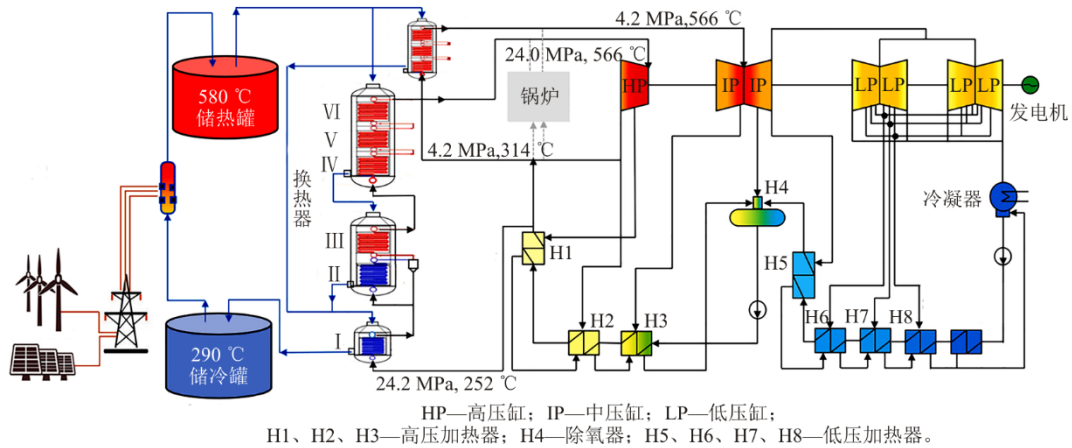


图 2 燃煤机组卡诺电池改造示意
Fig.2 Schematic diagram of Carnot battery transformation of coal-fired units

2 高温卡诺电池技术

卡诺电池为多种已有技术的集合，温度作为系统设计中及其重要的参数，能够影响系统设计、储热过程和由此产生的操作。组成卡诺电池技术的储热技术、热泵技术和压缩储热技术中的高温定义目前并不统一。

Paul 等人指出，储热技术可以根据其温度范围分为低（低温）、中等（中等温）、高（高温）和超高（超高温）4 个阶段。超过 600 °C 属于高温区间，而超过 1 500 °C 的温度应被划分为超高温^[16]。Kronhardt 等人^[17]提出，中等温度存储的范围应为 100~500 °C。而超过 500 °C 的区间则被视为高温区域。Gil 等人^[18]指出储热系统工作在 120~600 °C 应定义为高温系统。

在压缩储热研究中，大量学者认同应当将压缩机技术对于不同排气温度的成熟度作为高温区间的划分依据，并可以区分出 3 种过程类型：高温工艺（存储温度高于 400 °C）、中温工艺（存储温度在 200~400 °C）和储存温度低于 200 °C 的低温工艺。目前，所采用的成熟压缩机技术，能够满足在 400 °C 以下压缩储热系统的应用中，而不需要进行额外的技术开发，同时能够和多种广泛使用的储热技术配合使用^[18]。

目前，卡诺电池研究中为了追求更高的能量效率，多采用以压缩储、转热为基础的充电过程。故本文采用与压缩储热相同的温度划分方法，将 400 °C 划分为高温区间。

2.1 高温循环工质

在对于卡诺电池适用工质的研究中，涉及多种

常见工质，包括氩气、空气、超临界二氧化碳、超临界氦、超临界氮等。通过对关键文献循环工质和储热温度范围的分析，获得常见工质对应的温度应用范围如图 3 所示。

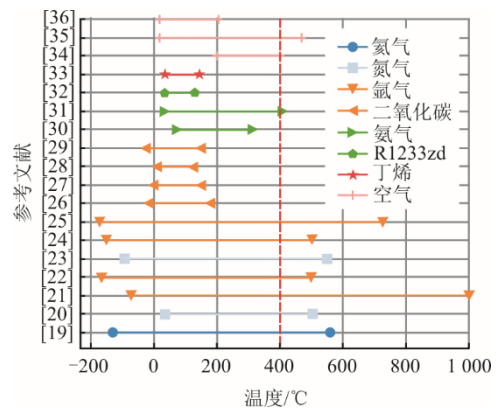


图 3 不同工质应用温度范围
Fig.3 Temperature ranges for different working fluid applications

通过分析文献中适用于高温储热的循环工质可以总结特性如下。

1) 氩气 操作温度范围从-173~1 000 °C，适用于极端低温和高温应用。研究显示，其在高温卡诺电池中的应用潜力最大。

2) 氮气 适用于中低温储能系统，操作温度范围为-93~505 °C，其中温卡诺电池中的表现尤为出色。

3) 二氧化碳 操作温度范围为-32~560 °C，其中高温卡诺电池中的广泛应用潜力。

4) 氦气 操作温度范围为-150~480 °C，适合低温至中高温储能系统，可应用在低温和中温卡诺电池中。

5) 空气 适用于中高温储能系统，操作温度范围从环境温度到 468 °C，由于其易得的特性，在中高温卡诺电池中表现优异。

氩气、氮气、二氧化碳和氨气在广泛的温度范围内表现出色，能够满足卡诺电池在不同温度条件下的需求。

2.2 高温储热介质

卡诺循环系统中的热能存储多种多样，包括显热、潜热和热化学方法。储存系统可以在多种温度下运行（包括环境温度和低温），具体取决于应用。可以使用多种存储介质，储热技术分为显热存储、潜热存储和热化学能存储。

显热存储通过增加单相材料（液体或固体）的温度来存储能量。相关储热介质可以分为液体介质和固体介质。液体介质包括导热油、加压水等，具有高体积热容量，但温度范围有限；而固体介质温度范围宽，但需要大体积和二次热传递流体。常用材料包括耐火材料、矿石、混凝土块、叠砖和钢块。技术包括床段分割、结合岩石床和潜热存储材料，使用各种形状和尺寸的填充床可提高效率和能量密度。

潜热存储利用相变材料在几乎恒定的温度下存储和释放热量。潜热存储体积和存储容量均高于显热存储（高出 5~14 倍）。常见材料包括 NaNO₃、NaNO₃-KNO₃ 共晶混合物和 LiNO₃ 等熔融盐，不同介质的储热温度范围如图 4 所示。

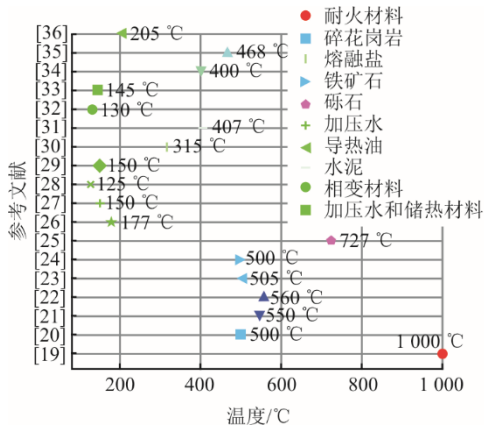


图 4 储热介质温度范围

Fig.4 Temperature ranges of heat storage mediums

1) 固体储热介质

耐火材料：最高温度 1 000 °C，具有高耐热性和热稳定性，适用于工业窑炉和高温反应器的保温储热。

碎石：最高温度 500 °C，因为廉价、易得，适用于中温储热系统，如太阳能热发电和地热储热系统。

玄武岩：最高温度 560 °C，为天然材料，具有高热稳定性和高导热性能，适用于中高温储热。

铁矿石：最高温度 500 °C，具有高密度和较好的热容量，适用于中高温储热系统，常用于热电联产和工业加热。

砾石：最高温度 727 °C，为天然材料，适用温度范围广，常用于地热储热系统。

2) 液体储热介质

熔融盐：最高温度 560 °C，具有高热容量和导热性能，适用于宽温度范围的储热系统，特别适用于太阳能热发电和高温工业过程。

导热油：最高温度 468 °C，适用于宽温度范围的储热系统，广泛用于工业过程加热和太阳能热发电。

2.3 关键设备

卡诺电池循环中使用的关键设备主要包括压缩机、膨胀机和换热器。目前，换热器已经能够实现成熟地工业应用；膨胀机技术来源于燃气轮机能够承受约 1 000 °C 的工质温度；而压缩机是制约高温卡诺电池发展关键，其所涉及的形式和功率范围如图 5 所示。

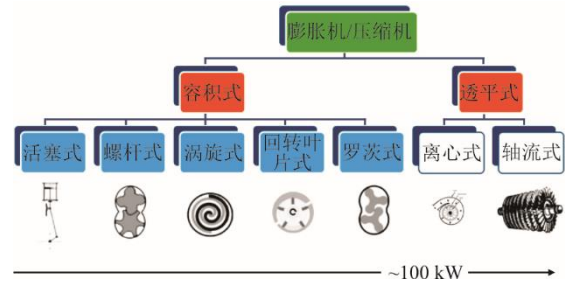


图 5 卡诺电池涉及压缩膨胀设备

Fig.5 Compression and expansion equipment involved in Carnot batteries

压缩膨胀设备可以根据工作原理分为容积式和透平式 2 类。容积式包括活塞式、螺杆式、涡旋式、回转叶片式和罗茨式等，而透平式包括离心式和轴流式 2 种类型。透平式设备适用于大流量和高功率需求，且具有较高的工作速度。离心式设备在高压下性能更优，适合大型工业应用，但对运行条件变化较为敏感。轴流式则以高效率 and 低维护成本著称，但其压缩比相对较低。容积压设备通常适用于需要高压比和高排气压力的场合。

由于工作特性和高温燃气轮机技术多年的积累，目前膨胀设备能够满足不同储热温度下的高效

稳定运行要求。但压缩机受到了温度的严重制约。Périlhon 等人^[37]指出, 考虑到预期的寿命和可靠性目标, 实际应用中认为实用的最高温度应不超过 950 °C。目前, 已有成熟技术可以满足透平式压缩机 500 °C 的排气温度, 而容积式压缩机通常用于 200 °C 以下的低功率场景^[38]。高温对于压缩机的影响主要体现在材料性能、机械部件稳定性、冷却需求和运行效率等方面。

1) 材料性能下降

高温对压缩机材料的性能有显著影响, 包括强度降低、氧化和腐蚀。许多金属材料在高温下会发生蠕变, 导致其强度和硬度降低, 影响机械部件的稳定性和耐久性。高温加速了材料的氧化和腐蚀过程, 削弱材料的结构完整性和寿命^[39]。

2) 热膨胀和机械应力

高温会导致压缩机部件热膨胀, 可能引起部件之间的配合松动或过紧, 影响机械运转的平稳性^[40]。由于热膨胀不均匀, 部件之间的应力增加, 可能导致机械疲劳、裂纹和最终的机械失效^[41]。

3) 冷却需求增加

高温条件下, 压缩机需要更高效的冷却系统来保持运行温度在安全范围内, 这增加了冷却系统的设计复杂性和成本^[42]。冷却不充分会导致压缩机部件过热, 进一步降低效率和寿命^[43]。

4) 运行效率降低

高温引起的材料性能下降和热膨胀问题会导致压缩机效率降低。由于压缩机的效率与其温度密切相关, 温度过高会导致多变过程和等熵效率下降^[43]。高温导致的能量损耗, 不仅表现在热传导和散热中, 还表现在由于材料性能下降引起的机械能损失中^[44-47]。

解决高温影响的方法包括: 使用镍基超合金等材料^[44]、在金属基材上涂覆陶瓷层^[45]、在压缩机叶片内部设计冷却通道^[37]等。由于技术成熟且具有较高的能量转换效率, 换热设备在卡诺电池研究中并不作为重点研究对象。常规换热设备包括: 壳管式换热器、板翅式换热器螺旋盘管换热器, 而其他类型换热器诸如印刷电路换热器、陶瓷换热器、混合换热器等常用于储热系统换热, 也同样适用于卡诺电池。

壳管式换热器适用于大规模应用, 温度范围为 100~420 °C, 具有良好的热交换能力, 但面临流动分布不均的问题, 在大规模压缩空气储能技术所需

的气/气换热中得到了大量应用^[46]。

由于设计紧凑, 具有高热传导效率, 板翅式换热器适用于低于 300 °C 的情况。但在快速冷却和加热过程中, 钎焊接头易受热应力集中和热冲击影响, 通过采用不锈钢、钛或者陶瓷技术, 可以将换热温度提升至 1 000 °C 以上^[47]。但特种材料也面临成本高、制造困难, 难以应用于大容量储能系统中的难题。

印刷电路换热器适用于高温、高压的情况, 最高可达 900 °C, 具有高机械强度和导热性。螺旋盘管换热器适用于耐受热冲击并快速启动的工况, 但制造成本较高, 适用于中小规模应用。

高温换热器应用中的技术挑战主要是材料选择和制造问题, 高温应用需要耐高温材料, 但这些材料成本较高。尽管陶瓷材料在高温下稳定且耐腐蚀, 但其脆性和制造难度限制了应用推广。键合技术替代传统的垫片密封, 可提高换热器的最高操作温度。采用新型陶瓷材料和陶瓷基复合材料, 可解决传统陶瓷换热器的脆性问题。结合陶瓷和金属材料的优点开发混合换热器, 有望实现低成本、易制造和高强度的目标。

3 高温卡诺电池应用情况

3.1 基于电加热技术的卡诺电池

基于电加热的卡诺电池技术, 属于高温卡诺电池技术。电加热技术设备简单, 同时能够为储热系统提供更高的温度以提升放电过程循环效率, 进而弥补充电过程效率降低的不足, 所以储热温度普遍高于 400 °C。1414Degrees 公司的高温卡诺电池储能系统采用硅基合金, 储热温度可达 1 414 °C, Store2Powe 公司的高温卡诺电池储能系统采用基于熔融盐储热, 其存储温度也在 400 °C 以上。由于储热温度过高, 所以基于有机工质的循环技术全部被排除在外^[48]。

由于技术成熟度高, 电加热卡诺电池技术成为最受关注的技术, 目前开展商业化应用的公司见表 1。其中, Siemens Gamesa 公司的卡诺电池储能系统已经进入示范阶段, 2019 年在汉堡建造的 130 MW·h 系统是目前最大规模的卡诺电池系统之一。

目前除了独立建造储能电站外, 电加热系统可将燃煤电厂转换为储能系统, 利用现有基础设施降低设备和场地投资, 为老旧电厂转型提供了新的可能^[15]。

根据已公布数据, Siemens Gamesa 公司所提出 ETES 系统 (electric thermal energy storage, ETES) 的系统回路效率约为 25% (表 1) [49-59], 而目前通过放电过程采用联合循环能够使最高循环效率达到约 55%。对比同为长时物理储能技术的压缩空气储能将近 70% 的循环效率 [60], ETES 系统回路效

率相对较低。为了实现高效率, 必须达到更高的温度, 这对材料提出了严苛的要求。目前, 采用硅基合金材料的 1414Degrees 系统能够在 1 414 °C 的高温下运行 [52], 而 CCT Energy Storage 的储热温度能够高达 1 400 °C [56], 但也存在材料耐高温和抗腐蚀问题。

表 1 商用电加热卡诺电池公司
Tab.1 Commercial electrically heated Carnot battery companies

公司/系统	储能技术	放电方式	循环效率/%	工程状态
Siemens Gamesa ETES ^[49]	火山岩, 最高温度 750 °C	蒸汽朗肯循环	25~40	示范阶段
RWE, Store2Power ^[50]	熔融盐, 400 °C 以上	蒸汽朗肯循环	~40	未公布具体状态
E2S Power ^[51]	铝-石墨合金 (MGA), 温度达到 700 °C	蒸汽朗肯循环	25~40	概念验证阶段
247Solar, Heat2Power Turbine ^[52]	硅砂, 最高温度 970 °C	布雷顿循环	30	概念设计阶段
1414Degrees, TESS ^[53]	硅基合金, 熔点 1 414 °C	朗肯、布雷顿、斯特林	无	已完成示范, 规划电网规模试点
Peregrine Turbine Technologies ^[54]	铝-石墨合金 (MGA), 温度达到 800 °C	二氧化碳布雷顿循环	45	二氧化碳涡轮/压缩机测试阶段
Azelio ^[55]	铝基相变材料 (PCM), 达到 600 °C	斯特林发动机	~30	多个试点、生产线、商业化
CCT Energy Storage ^[56]	硅基相变材料 (PCM), 达到 1 400 °C	斯特林发动机	无	试点
TEXEL Energy Storage ^[57]	金属氢化物 (MH) / 金属碳酸盐	斯特林发动机	40	商业安装阶段
Kraftlagn München ^[58]	陶瓷系统, 达到 1 000 °C	斯特林发动机和有机朗肯循环	无	试点
NREL ENDURING LDES (GE, PEI, Allied) ^[59]	流化床, 固体材料, 温度达到 1 100 °C	布雷顿循环和朗肯循环结合	50~55	部件原型、试点准备阶段

3.2 基于双向朗肯、布雷顿循环的卡诺电池

卡诺电池系统可以通过在放电阶段使用正向朗肯循环或卡诺循环技术, 同时在充电过程采用基于逆向朗肯循环的热泵技术或逆向布雷顿循环的压缩制热技术, 进行效率提升, 可以在理论上实现多种技术配置。通用电气利用二氧化碳布雷顿循环作为热泵进行充电, 蒸汽朗肯循环放电, 并使用熔盐储存 70 °C 高温热, 水箱储存低温热, 设计功率输出为 20~100 MWe, 循环效率 42%~62% [61]。但在实际商用过程中, 科技公司倾向于采用图 6、图 7 所示的双向朗肯/布雷顿循环作为卡诺电池技术, 以实现关键设备的复用, 减少设备总体投资。

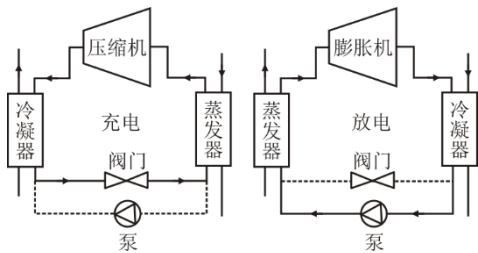


图 6 双向卡诺循环

Fig.6 Schematic diagram of bidirectional Carnot cycle

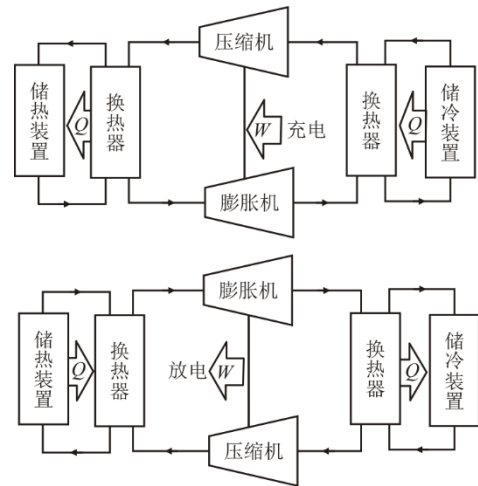


图 7 双向布雷顿循环

Fig.7 Schematic diagram of bidirectional Brayton cycle

目前, 有多家商业公司采用双向朗肯循环作为商业系统的循环基础, 但受限于充电过程为热泵循环技术限制, 多采用适于低于 400 °C 的中低温技术, 以有机工质循环和二氧化碳循环为代表。而同为卡诺电池范畴的液态空气能量存储技术, 其唯一已实现商业化应用的系统 Highview Power 存储温度也

约为 200 °C，处于中低温储热技术范畴^[62]。非电加热高温卡诺电池技术几乎全部采用基于逆布雷顿循环的双向循环技术（表 2^[63]）。其中，Stiesdal 公司的 GridScale 系统技术成熟度最高，其通过 1 个可逆布雷顿循环卡诺电池，使用低成本的碎石床作为热储存，充电时将热能从冷储罐泵送到热储罐。

计划在丹麦 Olland 建造 1 个 4 MWe/2 MWe 充、放电功率和 10 MWe·h 储存容量的示范项目^[63]，其循环效率预计达到 60%。其他公司的技术往往都处于设计实验阶段。分析所有商用高温卡诺电池的储热温度发现，600 °C 的储热温度可用来平衡系统效率和高温带来的技术复杂度和成本的升高。

表 2 双向布雷顿循环的商业高温卡诺电池项目
Tab.2 Commercial high-temperature Carnot battery project with bidirectional Brayton cycle

公司/系统	储能技术	循环效率/%	工程状态
Malta,Pumped Heat Energy Storage ^[23]	熔盐+防冻剂 550 °C	无	概念设计阶段
Stiesdal, GridScale ^[64]	破碎玄武岩填充床 600 °C	最高 60	试点建设阶段
Enolcon, OPTES ^[65]	硅砂填充床（硅砂、铁基砂、玄武岩）565 °C	58~66	概念设计阶段（试点设计/建设中）
WindTP ^[66]	砾石床，间接传热 605 °C	最高 85	部件试验阶段
GE, AMSSSES ^[61]	熔盐，水箱 570 °C	42~62	概念阶段

4 结 论

本文对卡诺电池的概念、技术原理及其在高温储热系统中的应用进行了综述研究，获得如下结论。

1) 显热存储技术相比于潜热存储，具有更多的可选择工质，和更宽的温度适用范围，但对比潜热存储技术其储能密度相对较低。

2) 电加热技术具有技术难度低、响应快速和工作温度高的特点，但其商用系统循环效率为 25%~40%，相对较低。

3) 双向朗肯循环和布雷顿循环技术在卡诺电池中具有重要应用，通过单一设备实现压缩和膨胀过程，实现降低设备投资成本、提高系统效率。

4) 压缩机和膨胀机在高温条件下的运行效率和可靠性是卡诺电池系统性能的关键。采用镍基超合金、陶瓷涂层和先进冷却技术，可以有效提升设备在高温环境下的耐久性和性能。

5) 目前，商用技术倾向于将卡诺电池应用于独立电站，而燃煤机组改造未开始商业化应用。

卡诺电池技术在电网侧长时储能中的应用前景广阔，其地理独立性、环境友好性和高储能密度，使其在可再生能源与电网的整合中具有显著优势。目前，多项商业化和试点项目正在全球范围内进行，有望推动该技术的进一步发展和应用。

[参 考 文 献]

[1] KITTNER N, SCHMIDT O, STAFFELL I, et al. Technological learning in the transition to a low-carbon energy system[M]. Grid-scale Energy Storage, 2020: 119-43.
[2] DUMONT O, FRATE GF, PILLAI A, et al. Carnot

battery technology: a state-of-the-art review[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101756.
[3] MARGUERRE F. Thermodynamic energy storage: US2065974A[P]. 1936-01-01.
[4] XU J, SUN P, LIN X. Thermodynamic calculation and optimal design of steam Carnot battery[C]. 2022 IEEE 6th conference on energy internet and energy system integration (EI2), 2022: 2435-2442.
[5] ZHANG M, SHI L, HU P, et al. Carnot battery system integrated with low-grade waste heat recovery: toward high energy storage efficiency[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106234.
[6] NOVOTNY V, BASTA V, SMOLA P, et al. Review of Carnot battery technology commercial development[J]. Energies, 2022, 15: 647.
[7] LIU M, TAY N S, BELL S, et al. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1411-1432.
[8] GIL A, MEDRANO M, MARTORELL I, et al. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1: concepts, materials and modellization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 31-55.
[9] CÁRDENAS B, LEÓN N. High temperature latent heat thermal energy storage: phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 724-737.
[10] JOUHARA H, ŻABNIENSKA-GÓRA A, KHORDEHGAH N, et al. Latent thermal energy storage technologies and applications: a review[J]. International Journal of Thermofluids, 2020, 5: 100039.
[11] CHAVAN S, GUMTAPURE V, PERUMAL D A. A review on thermal energy storage using composite phase change materials[J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2018, 11: 298-310.
[12] HUANG R, HU B, WANG R, et al. Thermodynamic and economic analysis of two-stage CO₂ heat pump with reverse Brayton cycle[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 143: 157-165.
[13] BORRI E, TAFONE A, ROMAGNOLI A, et al. A review

- on liquid air energy storage: history, state of the art and recent developments[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110572.
- [14] SAADON S. Possibility of using stirling engine as waste heat recovery-preliminary concept[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 268: 012095.
- [15] YONG Q, TIAN Y, QIAN X, et al. Retrofitting coal-fired power plants for grid energy storage by coupling with thermal energy storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 215: 119048.
- [16] PAUL A, HOLY F, TEXTOR M, et al. High temperature sensible thermal energy storage as a crucial element of Carnot Batteries: overall classification and technical review based on parameters and key figures[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56: 106015.
- [17] KRONHARDT V, ALEXOPOULOS S, REIßEL M, et al. High-temperature thermal storage system for solar tower power plants with open-volumetric air receiver simulation and energy balancing of a discretized model[J]. *Energy Procedia*, 2014, 49: 870-877.
- [18] BUDDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: basic principles, past milestones and recent developments[J]. *Applied Energy*, 2016, 170: 250-68.
- [19] WANG L, LIN X, CHAI L, et al. Cyclic transient behavior of the Joule-Brayton based pumped heat electricity storage: modeling and analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 111: 523-34.
- [20] WANG L, LIN X, CHAI L, et al. Unbalanced mass flow rate of packed bed thermal energy storage and its influence on the Joule-Brayton based pumped thermal electricity storage[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 185: 593-602.
- [21] DESRUES T, RUER J, MARTY P, et al. A thermal energy storage process for large scale electric applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30: 425-32.
- [22] HOWES J. Concept and development of a pumped heat electricity storage device[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100: 493-503.
- [23] LAUGHLIN R B. Pumped thermal grid storage with heat exchange[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2017, 9: 044103.
- [24] SAPIN P, SIMPSON M C, OLYMPIOS A V, et al. Cost-benefit analysis of reversible reciprocating-piston engines with adjustable volume ratio in pumped thermal electricity storage[C]. *Proceedings of the 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS)*, 2020: 1534-1545.
- [25] DAVENNE T R, PETERS B M. An analysis of pumped thermal energy storage with de-coupled thermal stores[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, 8: 160.
- [26] MORANDIN M, MARÉCHAL F, MERCANGÖZ M, et al. Conceptual design of a thermo-electrical energy storage system based on heat integration of thermodynamic cycles: Part A: methodology and base case[J]. *Energy*, 2012, 45: 375-385.
- [27] KIM Y M, SHIN D G, LEE S Y, et al. Isothermal transcritical CO₂ cycles with TES (thermal energy storage) for electricity storage[J]. *Energy*, 2013, 49: 484-501.
- [28] MERCANGÖZ M, HEMRLE J, KAUFMANN L, et al. Electrothermal energy storage with transcritical CO₂ cycles[J]. *Energy*, 2012, 45: 407-415.
- [29] WANG G B, ZHANG X R. Thermodynamic analysis of a novel pumped thermal energy storage system utilizing ambient thermal energy and LNG cold energy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 148: 1248-1264.
- [30] FRATE G F, ANTONELLI M, DESIDERI U. A novel pumped thermal electricity storage (PTES) system with thermal integration[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 121: 1051-1058.
- [31] STEINMANN W D. The CHEST (compressed heat energy storage) concept for facility scale thermomechanical energy storage[J]. *Energy*, 2014, 69: 543-552.
- [32] ABARR M, GEELS B, HERTZBERG J, et al. Pumped thermal energy storage and bottoming system part A: concept and model[J]. *Energy*, 2017, 120: 320-331.
- [33] JOCKENHÖFER H, STEINMANN W D, BAUER D. Detailed numerical investigation of a pumped thermal energy storage with low temperature heat integration[J]. *Energy*, 2018, 145: 665-676.
- [34] SCIACOVELLI A, VECCHI A, DING Y. Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage-from component to system level performance through dynamic modelling[J]. *Applied Energy*, 2017, 190: 84-98.
- [35] SHE X, PENG X, NIE B, et al. Enhancement of round trip efficiency of liquid air energy storage through effective utilization of heat of compression[J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1632-1642.
- [36] HAMDY S, MOROSUK T, TSATSARONIS G. Exergoeconomic optimization of an adiabatic cryogenics-based energy storage system[J]. *Energy*, 2019, 183: 812-824.
- [37] PÉRILHON C, LACOUR S, PODEVIN P, et al. Thermal electricity storage by a thermodynamic process: study of temperature impact on the machines[J]. *Energy Procedia*, 2013, 36: 923-938.
- [38] UNTERLUGGAUER J, SULZGRUBER V, KROISS C, et al. Design for a heat pump with sink temperatures of 200 °C using a radial compressor[J]. *Energies*, 2023, 16(13): 4916.
- [39] BAMIGBETAN O, EIKEVIK TM, NEKSÅ P, et al. Theoretical analysis of suitable fluids for high temperature heat pumps up to 125 °C heat delivery[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 92: 185-195.
- [40] KRONBERG A E, GLUSHENKOV M, ROOSJEN S, et al. Isobaric expansion engine compressors: Thermodynamic analysis of the simplest direct vapor-driven compressors[J]. *Energies*, 2022, 15: 5028.
- [41] 周昌玉, 夏翔鸣, 翟羽. 压缩机螺栓联接结构的有限元模拟及疲劳寿命分析[J]. *压缩机技术*, 2005(6): 3. ZHOU Changyu, XIA Xiangming, ZHAI Yu. Finite element simulation and fatigue life analysis of compressor bolt connection structure[J]. *Compressor Technology*, 2005(6): 3.
- [42] 朱玉峰. 往复式压缩机冷却系统的研究[J]. *河北工业科技*, 2007, 24(1): 3. ZHU Yufeng. Research on cooling system of reciprocating compressor[J]. *Hebei Industrial Science and Technology*, 2007, 24(1): 3.
- [43] CHEN C, YAN S, ZHANG T. Study on high temperature energy loss mechanism of energy storage polymer composite based on interface structure regulation[C].

- 2022 4th International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing (ICMSP), 2022.
- [44] DONCHEV A, SCHÜTZE M. Novel protection solutions against environmental attack for light weight high temperature materials[J]. MRS Proceedings, 2013, 1492: 155-160.
- [45] ADELL R F C, BURKINSHAW M, LINDSAY M P, et al. The tribological performance of coated and non-coated materials in high temperature environments[C]. The 13th International Conference on Turbochargers and Turbocharging, 2018.
- [46] 张新敬, 陈海生, 刘金超, 等. 压缩空气储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2012, 1(1): 26.
ZHANG Xinjing, CHEN Haisheng, LIU Jinchao, et al. Research progress of compressed air energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 26.
- [47] 钟水库, 马宪国, 赵无非, 等. 蜂窝陶瓷蓄热体换热器热性能的实验分析[J]. 上海理工大学学报, 2004(4): 333-335.
ZHONG Shuiku, MA Xianguo, ZHAO Wufei, et al. Thermal performance experimentation for honeycomb potter heat storage bed[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2004(4): 333-335.
- [48] MOORE J, CICH S, DAY-TOWLER M, et al. Development and testing of a 10 MWe supercritical CO₂ turbine in a 1 MWe flow loop[C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. 2020. DOI:10.1115/GT2020-15945.
- [49] SIEMEN S, GAMES A. Electric thermal energy storage-technology and commercial proposition[EB/OL]. (2021-10-11) [2024-06-28]. <https://www.siemensgamesa.com/en-int/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/hybrid-power-and-storage/etes/siemens-gamesa-etes-general-introduction-3d.pdf>.
- [50] WITOLD A. StoreToPower pilot plant for the development of a heat storage power plant[C]. Stuttgart, Germany: 2nd International Workshop on Carnot Battery, DLR, 2020.
- [51] E2S power. Turning fossil fuel power plants into clean energy storage[EB/OL]. (2022-05-01) [2024-06-28]. <https://e2s-power.com/our-product/>.
- [52] PARHAM J, VRETTOS P, LEVINSON N. Commercialisation of ultra-high temperature energy storage applications: the 1414 degrees approach[J]. Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion, 2021. DOI:10.1016/B978-0-12-819955-8.00013-2.
- [53] MORIARTY K. Prospectus 1414 degrees[EB/OL]. (2018-12-01) [2024-06-28]. <https://1414degrees.com.au/wp-content/uploads/2018/12/1414Degrees-Limited-Replacement-Prospectus-14D.pdf>.
- [54] Peregrine Turbine Technologies Technology: peregrine turbine technologies 2021[EB/OL]. (2020-01-01) [2024-06-28]. <https://www.azelio.com/>. <https://www.peregrineturbine.com/technology/>.
- [55] Azelio. Clean power when & where you need it 2021[EB/OL]. (2022-08-01) [2024-06-28]. <https://www.azelio.com/>.
- [56] CCT energy. Thermal energy storage specialists[EB/OL]. (2024-02-01) [2024-06-28]. <https://www.Cctenergy.com/>.
- [57] Texel. TEXEL energy storage[EB/OL]. (2024-06-01) [2024-06-28]. <https://www.texeles.com/>.
- [58] HERRMANN U. Projects energy storage: FH aachen. Solar-institut jülich[EB/OL]. (2022-01-01) [2024-06-28]. <https://www.fh-aachen.de/en/research/solar-institute-jueli ch/focus-areas/projects-energy-storage>.
- [59] ETES. Electric thermal energy storage (ETES) ETES: SWITCH 2021[EB/OL]. (2023-06-13) [2024-06-28]. <https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-et es-switch>.
- [60] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2022 年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(5): 1516.
CHEN Haisheng, LI Hong, XU Yujie, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(5): 1516.
- [61] AGA V, CONTE E, CARRONI R, et al. Supercritical CO₂-based heat pump cycle for electrical energy storage for utility scale dispatchable renewable energy power plants[C]//Proceedings of the 5th International Symposium-Supercritical CO₂ Power Cycles, San Antonio, TX, USA: 2016.
- [62] ROSS K. Highview hires MAN energy for UK cryogenic energy storage project[EB/OL]. (2021-04-20) [2024-06-06]. <https://www.powerengineeringint.com/energy-storage/highview-hires-man-energy-for-uk-cryogenic-energy-storage-project/>.
- [63] ANDREA V, KAI K, TING L, et al. Carnot battery development: a review on system performance, applications and commercial state-of-the-art[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105782.
- [64] Stiesdal. The GridScale technology explained[EB/OL]. (2020-12-23) [2024-06-29]. <https://www.stiesdal.com/storage/the-gridscale-technology-explained/>.
- [65] SCHNEIDER G, MAIER H, HÄCKER J, et al. Electricity storage with a solid bed high temperature thermal energy storage system (HTTES): a methodical approach to improve the pumped thermal grid storage concept[J]. Atlantis Highlights in Engineering, 2021, 6: 26-33.
- [66] WindTP. WindTP: wind driven thermal pumping 2021[EB/OL]. (2024-04-08) [2024-06-06]. <https://www.wind-tp.com/>.

(责任编辑 杨嘉蕾)