

二氧化碳热力循环在新型能源系统应用中的研究现状与发展趋势

何雅玲*, 李梦杰, 郭嘉琪, 刘占斌

西安交通大学能源与动力工程学院, 热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: yalinghe@mail.xjtu.edu.cn

2025-01-17 收稿, 2025-02-04 修回, 2025-02-07 接受, 2025-02-08 网络版发表

国家重点研发计划(2023YFB2406500)和国家自然科学基金(52306273)资助

摘要 新型能源系统的发展亟须突破传统能源系统的效率瓶颈, 并提高清洁能源的消纳水平, 而传统热力循环形式难以满足新型能源系统对高效性、经济性及灵活性的迫切需求. 因此, 发展新型热力循环对突破能源利用瓶颈具有重要意义. 二氧化碳作为天然工质, 在能量转化和能量存储方面具有经济、高效的优势, 将二氧化碳热力循环应用于新型能源系统的潜力正被逐步挖掘. 为阐明二氧化碳热力循环的应用前景, 本文阐述了二氧化碳热力循环的分类、原理及特征, 分析了其应用于发电领域和规模化储能领域的技术难点, 总结了二氧化碳热力循环在不同发电和储能领域的研究现状和发展趋势, 探索了在新型能源系统中应用的可行性. 最后, 对二氧化碳热力循环的未来技术发展方向提出了一些建议.

关键词 二氧化碳热力循环, 新型能源系统, 压缩二氧化碳储能, 超临界二氧化碳发电



何雅玲 中国科学院院士, 工程热物理学家. 长期从事能源科学与工程、工程热物理、新能源开发与利用及储能方面的基础研究及重大工程技术创新研究, 研究成果在能源、航天和化工等领域得到广泛应用. 曾获何梁何利基金科学与技术进步奖, 国家自然科学基金二等奖2项, 国家技术发明奖二等奖1项, 国家科学技术进步奖一等奖(创新团队奖)1项, 省部级科技成果一等奖3项, 国家级教学成果奖一等奖3项、二等奖2项等奖励. 任教育部高等学校能源动力类专业教学指导委员会主任, 国务院学位委员会学科(动力工程及工程热物理)召集人, 中国制冷学会理事长, 中国动力工程学会副理事长等.

近年来, 在应对气候变化和推动能源结构转型的背景下, 我国积极响应“碳达峰、碳中和”目标, 大力推进可再生能源的开发与利用. 风能和太阳能作为主要的可再生能源, 其装机规模和发电量持续增长. 相关数据显示, 我国风电和光伏发电的装机容量已连续多年位居全球前列, 成为推动能源结构绿色低碳转型的重要力量(<https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-capacity-statistics-2024>). 然而, 尽管可再生能源发展迅速, 但其固有的随机性、间歇性和波动性特

征, 给电网的安全稳定运行带来了严峻挑战. 具体而言, 风电和光伏发电的出力受自然条件影响较大, 风速和光照强度的变化导致其发电量不稳定, 尤其是在无风或阴雨天气下, 发电量大幅下降. 这种随机性不仅增加了电网调度的难度, 还可能导致电力供需失衡, 降低电网平衡的稳定性. 此外, 可再生能源的波动性还可能引发电网频率和电压跳变, 进一步影响电网运行的安全性. 为应对这些挑战, 推动可再生能源的规模化并网与高效利用, 有效解决路径是构建清洁波动的可再生

引用格式: 何雅玲, 李梦杰, 郭嘉琪, 等. 二氧化碳热力循环在新型能源系统应用中的研究现状与发展趋势. 科学通报, 2025, 70: 872–887

He Y-L, Li M-J, Guo J-Q, et al. Advances and development trend of carbon dioxide thermodynamic cycles applied in novel energy systems (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 872–887, doi: [10.1360/TB-2025-0076](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0076)

能源发电与高效连续的常规能源发电互补、大规模储能技术相配合的新型能源系统。二氧化碳(CO₂)作为一种环保、经济的工质,近年来在热力循环高效发电与规模化储能领域引起了广泛关注,有望成为未来新型能源系统的重要组成部分。

在高效发电领域,采用CO₂作为热力循环工质的发电技术具有如下优势:CO₂在临界点附近的压缩性小,所消耗的压缩功相对较小,因此能够实现更高的循环效率;当CO₂处于超临界状态时,其比水蒸气的腐蚀性小,降低了高温高压条件下对材料的苛刻要求,相比传统蒸汽朗肯循环容易实现更高的运行参数,有助于发电效率的提升;整个循环在超临界状态下运行,CO₂密度大,体积流量小,能够成倍地减小设备尺寸,使循环更加紧凑。超临界CO₂透平、压缩机、换热器等主要部件的尺寸约为蒸汽循环的1/10^[1],不但使得机组占地面积小,设备初期投资和运行维护成本少,而且变工况响应灵活,有望实现6%/min的10%~100%变负荷调节^[2]。因此,CO₂热力循环发电可与风能、太阳能等可再生能源发电结合,不仅可以实现发电系统的高效运行,还能在负荷波动时提供灵活的响应能力,为新型能源系统提供稳定的能量输入。国内外主流研究机构将超临界CO₂循环视为“一种基于新原理的革新性、颠覆性动力转换技术”^[3]。

在规模化储能领域,抽水蓄能与压缩空气储能是现阶段可与电网匹配的大规模储能技术。目前抽水蓄能电站功率可高达吉瓦级,具有技术成熟、效率高且寿命长的优点。然而,由于其选址条件苛刻,需具备较大落差的水库,合适的建设地点选择及庞大的工程建设等是一大挑战。近些年来得到快速发展的压缩空气储能电站,其储气形式可以有岩洞、盐穴、废弃矿井、人工硐室、刚性储气罐等,选址更加灵活一些,是未来大规模可再生能源消纳和电网调峰的关键储能技术之一。我国正积极投入压缩空气储能技术的原创研究,在理论研究与商业化应用方面展现出蓬勃态势。目前我国压缩空气储能技术已突破百兆瓦规模,并实现了系统效率的领先。例如2024年4月,中国能源建设集团有限公司在湖北应城建设的300 MW压缩空气储能电站成功实现了并网发电(<http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c30497573/content.html>)。然而,压缩空气储能能量密度较低,虽然通过液化或超临界转化可提升密度,但技术难度和经济成本也随之增加。将压缩空气储能中的循环工质由空气替换为CO₂,一方

面,CO₂易液化,更便于实现气相、液相与超临界相的相互转化;另一方面,相同状态和压力下,CO₂密度明显高于空气,可缩小存储体积。因此,基于CO₂热力循环的储能技术可为新型能源系统提供高密度、高效率的储能解决方案,是有望更好地适应大规模可再生能源的接入需求的另一技术路线。

本文旨在系统梳理基于二氧化碳热力循环的发电与储能技术的发展现状,分析其在技术实现、系统优化和工程应用中的关键问题与挑战。首先,介绍基于CO₂热力循环的内涵/分类及难点;其次,分别探讨应用于高效发电领域与规模化储能领域的CO₂热力循环的研究现状与挑战;最后,总结当前研究中的技术瓶颈和未来发展方向,为CO₂热力循环技术的进一步研究与应用提供参考。

1 二氧化碳热力循环的内涵/分类及难点

二氧化碳热力循环技术是指采用CO₂为工质的热力循环。CO₂作为自然工质,具有环保、经济等特征。根据CO₂工质在能源系统中所起的主要作用不同,可分为用于能量转换的CO₂动力循环和用于能量存储的CO₂储能循环(图1)。

1.1 二氧化碳动力循环技术

在用于发电的能量转换系统中,根据CO₂循环运行工况与临界参数的关系,主要可分为跨临界二氧化碳循环和超临界二氧化碳循环。其中,超临界CO₂ (super-critical carbon dioxide, S-CO₂)循环是一种以二氧化碳为工作流体并在超临界状态(即压力和温度超过其临界点: 31.1°C和7.38 MPa)下运行的高效热力循环,如图1(a)所示。其主要工作原理如下:状态1相对低温低压的CO₂经过压缩机压缩至低温高压状态2后,通过回热器、加热器等成为高温高压状态5的CO₂,进入透平膨胀做功,带动发电机发电。之后状态6的CO₂依次经过高温回热器(低压侧出口状态点7)、低温回热器(低压侧出口状态点8)、冷却器后,再次变为低温低压状态1的CO₂,实现循环。为减少压缩机耗功,于低温回热器低压侧出口状态点8处采用分流过程,一部分工质进入再压缩机压缩后达到状态点3',并与低温回热器高压侧出口状态点3'汇合于状态点3。根据表1所示不同状态下CO₂物性可知,S-CO₂既具有气体CO₂的流动性,又具备液体CO₂的密度和传热载热能力。

早在20世纪60年代,一些研究机构就开展了S-CO₂

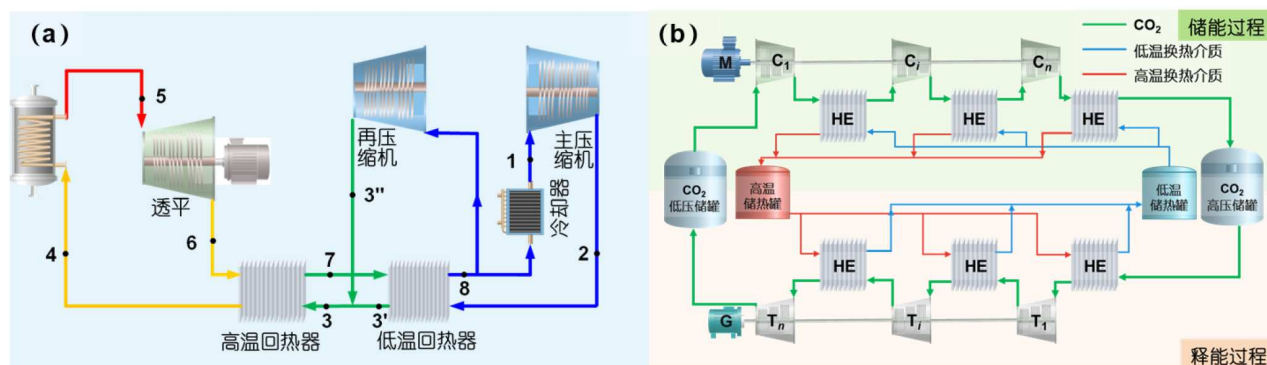


图1 典型二氧化碳热力循环示意图。(a) CO_2 动力循环。(b) CO_2 储能循环

Figure 1 Schematic diagram of typical carbon dioxide thermodynamic cycles. (a) CO_2 power cycle. (b) CO_2 energy storage cycle

循环的相关研究,主要将其用于太空发电和船舶推进,但受限于当时透平机械的制造技术水平,以及缺乏紧凑的换热器、没有适宜的热源等原因,研究工作未能持续。随着透平机械和换热器研发技术的发展, S-CO_2 循环的研究在许多国家逐渐兴起^[4-7]。 S-CO_2 循环通过压缩、加热、膨胀和冷却等阶段完成了能量转换,利用 CO_2 在超临界状态下的高密度、低黏度和优异的热传递性能,实现高热效率和紧凑系统设计,广泛应用于核能发电、太阳能热发电、废热回收和燃气轮机联合循环等领域^[5]。

1.2 压缩二氧化碳储能技术

当 CO_2 工质发挥储能作用时,压缩二氧化碳储能系统(compressed carbon dioxide energy storage, CCES)是主要的利用形式。CCES是通过 CO_2 的热力循环过程实现电能的存储与释放的技术,既能存储 CO_2 的压力势能,同时也可存储循环过程中产生的热量和冷量,如图1(b)所示。CCES的主要工作原理如下:在储能阶段,电力驱动压缩机将低压 CO_2 压缩至高压,冷却后存储于高压储气容器中,例如地下岩洞、盐穴或人工储罐。压缩过程中产生的热量可通过换热器收集并储存于储热装置中。在电力需求高峰期,利用存储的压缩热或外部热源加热高压 CO_2 , 高温高压的 CO_2 驱动膨胀机做功发电,完成能量释放。膨胀后的低压 CO_2 被存储于低压储气容器中。

整个储释能过程中, CO_2 作为做功与储能工质循环使用,不排放至环境,是低碳环保的储能方式。此外,可利用 CO_2 易液化、临界点低的特性,通过调整存储的 CO_2 压力和温度实现气、液、超临界状态之间的转换,

减少对储气容积的需求,从而提高储能密度。

1.3 二氧化碳热力循环实施的主要难点

CO_2 热力循环通过复杂热物性变化对系统性能产生显著影响,特别是在临界点附近急剧变化的物性,进一步增加了热力学、传热学分析和系统动态控制的复杂性。总体来看, CO_2 热力循环研究的主要难点如下。

(1) 高温或高压工况下设备的可靠性与效率优化亟须探索: CO_2 热力循环系统通常在高温或高压等工况下运行,核心设备(如压缩机、透平和换热器)不仅需要承受极端环境对材料强度和热稳定性的严苛要求,还需兼顾高效率 and 可靠性。尤其是在临界点附近,工质的热物性剧烈变化对设备的流体动力学性能、结构稳定性和密封性能提出了更高的技术要求。此外,设备在长期运行中的疲劳损伤、腐蚀耐受性和失效风险也亟须通过更为系统的理论分析与实验研究加以明确,从而为高性能设备的设计提供理论依据。

(2) 参数协同匹配及运行控制的动态适应性有待明晰: CO_2 热力循环的高效运行依赖于系统中多个关键参数(如压力、温度、流量)的协同优化。然而,在实际工况中环境条件的变化以及负载波动会显著影响循环性能,特别是在临界点附近,工质热物性对温度、压力等参数的变化高度敏感,可能导致系统运行的不稳定性和控制复杂度显著增加。因此,需要进一步发展适应多变工况的运行控制策略,包括建立精准的动态模型、设计高效的控制算法以及开发自适应的参数优化方法,以确保系统在动态运行条件下能够保持稳定性与高效率。

(3) 系统经济性和工程可行性尚需验证: 尽管 CO_2

表 1 不同状态CO₂工质物性对比Table 1 Comparison of physical properties of CO₂ in different states

物性	气体(0°C/0.1 MPa)	超临界流体(32°C/7.6 MPa)	液体(-55°C/0.6 MPa)
动力黏度(Pa s)	1.37×10^{-5}	4.05×10^{-5}	25.00×10^{-5}
密度(kg m ⁻³)	1.95	557.50	1173.00
导热系数(W m ⁻¹ K ⁻¹)	1.47×10^{-2}	9.31×10^{-2}	17.86×10^{-2}
定压比热(kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	0.83	34.66	1.96

热力循环在理论研究和初步实验中展现出高热效率和环境友好等优势,但其实际工程化应用仍面临许多挑战。一方面,核心设备的研发成本、运行维护成本以及系统集成的复杂性可能限制其经济竞争力;另一方面,系统在复杂实际工况下的长期稳定性和操作可行性尚未得到充分探讨。因此,需要通过生命周期成本分析、示范工程试验以及多场景实际应用的验证,系统性评估其经济性与工程可行性,从而为该技术的大规模推广和应用奠定基础。

这些技术挑战需要通过热力学分析、高性能设备及材料开发和实验验证来解决,以推动CO₂热力循环在能源转化与储存领域的广泛应用。以下结合具体的技术应用特征及现状进行详细阐述。

2 应用于高效发电领域的二氧化碳热力循环研究现状

CO₂热力循环与热源的良好匹配是充分发挥循环优势的关键。鉴于新型能源发电系统的发展趋势,本节重点以装机容量较大的清洁光热发电领域和传统燃煤发电系统领域为例,探讨CO₂动力循环应用的现状与难点,并进一步阐明在未来综合能源系统中的应用前景。

2.1 二氧化碳热力循环在光热发电领域的应用

太阳能的开发与利用是清洁能源应用领域的重要议题。新一代高温太阳能光热发电技术作为太阳能利用的重要发展方向,已引起世界各国的广泛关注与研究。然而,太阳能光热技术的发展仍面临诸多技术难题与挑战。例如,在现有技术条件下,光热发电系统的效率提升和成本降低亟须突破,发展高效、低成本的光热发电技术成为迫切需求。近年来,CO₂循环技术被广泛提议应用于太阳能热发电系统,其具有效率高、布局简单、装置结构紧凑、适宜空冷等优点,是提高太阳能电站效率、降低系统成本的有效途径之一。因此,CO₂热力循环技术在光热发电系统中的应用已成为新的研究热点^[8,9]。

在太阳能光热发电系统中,一方面,吸热器是太阳能热能高效传递至工质侧的关键部件,其设计和性能直接影响系统效率、热损失和运行稳定性。由于CO₂强变物性特性和吸热器受热面通常暴露于非均匀太阳辐射条件下的特殊性,因此非均匀热流条件下CO₂工质的传热特性与吸热器流道优化设计研究受到了关注^[10,11]。此外,面对CO₂循环的高温高压运行环境,吸热器在运行过程中会经历极高的热应力和机械应力,在大温差下,吸热器结构会产生显著的热膨胀差异,可能导致机械应力集中、变形甚至失效,因此许多学者开展了吸热器的模块化设计、热膨胀应力的控制等方面的研究,通过优化结构设计(如分区设计、柔性连接等)以减小热应力影响,从而提高吸热器的运行安全性^[12,13]。适用于高温高压运行工况的吸热器有颗粒吸热器、容积式吸热器^[14,15],尚需深入探索与储热系统、循环系统的耦合特性。另一方面,鉴于太阳能光热电站的运行易受光照强度和外部环境温度波动的显著影响,开展太阳能CO₂循环发电系统在非设计工况下的动态特性研究,并制定快速响应的自动控制策略,是确保光热电站在波动条件下可靠、持续、稳定运行的关键。文献^[16,17]研究了光照强度、循环最高温度、循环最低温度等典型参数变化对发电系统瞬态特性的影响规律。目前,太阳能CO₂循环发电系统常用的控制策略包括库存控制、柔性再压缩机控制和主压缩机出口压力控制等;未来,随着智能技术的应用,有望在复杂运行工况下实现对光热发电系统的全局优化,构建高效热力循环构型,并通过实时监测和控制进一步提升系统的稳定性和效率^[18-21]。

在工程应用与验证方面,美国率先开展了S-CO₂循环发电系统示范项目,并由美国能源部启动了“利用太阳能发电的创新纲领”计划,逐步形成了涵盖新型聚光器、高效接收器、系统集成、透平机械和紧凑式换热器等关键技术的研发路线^[22,23]。总体来看,发电系统的发展路径是从小试机组向中大规模机组过渡:(1)第一阶段(2015~2020年),实现S-CO₂循环在工业余热利用领

域的应用,要求发电系统效率超过同等参数条件下有机朗肯循环机组;(2)第二阶段(2020~2025年),实现S-CO₂循环在太阳能光热发电领域的应用,要求在10~100 MW功率等级内系统效率超过蒸汽轮机机组;(3)第三阶段(2025年以后),研发化石燃料S-CO₂电厂、第四代核电和直燃式S-CO₂发电装置.预计到2030年,包含12小时储热的光热发电系统成本将降低到50美元/兆瓦时(约合0.35元/kWh).我国也在太阳能光热S-CO₂发电系统的研制方面进行了积极探索.在国家重点研发计划的支持下,中国科学院电工研究所牵头完成了“超临界二氧化碳太阳能热发电关键基础问题研究”项目,并搭建了光热S-CO₂循环发电系统.

2.2 二氧化碳热力循环在燃煤领域的应用

作为成熟且稳定的供能方式,燃煤蒸汽发电系统在我国新型能源系统中仍将发挥不可替代的作用,特别是在保障能源供应的定性、可靠性以及负荷调节和应急备用电力方面.S-CO₂动力循环具有结构简单、适宜空冷等优势,其容积惯性和传热惯性较小,有望提高燃煤机组的变负荷速率.这一特性对满足大规模间歇性新能源并网条件下燃煤机组灵活性的提升具有重要意义.

与传统蒸汽朗肯循环相比,CO₂循环应用于燃煤系统主要面临以下挑战:(1)当CO₂工质替换水蒸气时,传统通流式水冷壁构型的适用性尚不明确,需重点关注因工质物性变化导致的炉内传热差异及其对受热面结构的影响.其主要原因在于炉内受热面布置方式决定了结构参数,进而影响CO₂工质的水动力特性,最终改变系统的热力学参数分布.鉴于CO₂循环与锅炉的深度耦合关系,需明确CO₂锅炉与传统水蒸气锅炉的区别,并选择适合新型系统的受热面结构.(2)工质物性变化对涡轮和换热部件性能有显著影响.与汽轮机相比,CO₂透平机组进出口侧压差较大(~18 MPa),焓差较小(汽轮机约180 kJ kg⁻¹, CO₂透平约30 kJ kg⁻¹),质量流量较大(S-CO₂机组质量流量约是汽轮机组的8倍),导致其直径较小、转速较高.在动态变工况条件下,S-CO₂叶轮机响应速率较快,但等熵效率变化剧烈.此外,S-CO₂布雷顿循环的余热是蒸汽朗肯循环的约3倍,回热量较高,使得回热器尺寸较大,容积惯性和传热惯性较高.因此,在动态变工况条件下,S-CO₂换热器热惯性造成的时滞影响不可忽略.鉴于此,无法照搬燃煤电站中传统蒸汽朗肯循环的规律,S-CO₂发电系统全

工况动态响应特性仍需进一步研究.

针对热源侧与循环侧的匹配特性,现有研究主要从炉内传热特性、压降特性等角度探讨了CO₂循环与炉侧热源的耦合机制,并以锅炉燃烧热全温区吸收为目标探索了CO₂循环的新构型.为了减少发电系统的焓损失,降低锅炉排烟温度和减少空气预热器的不可逆性,通常采用的方法有增加再热、中间冷却等热力学过程实现循环侧构型的优化,采用循环侧工质或烟气分流策略等实现热量的回收.例如,Liu等人^[24]开展了以再热再压缩循环为基准的发电系统优化设计研究,建立了低温余热回收系统,实现了较高的集尘效率和电厂效率.Zhang等人^[25]综合分析了S-CO₂锅炉和S-CO₂循环之间的耦合关系,提出了3种改进的S-CO₂循环构型以实现烟气余热的充分利用.对比结果表明采用二次分流的S-CO₂循环燃煤发电系统表现出较优的热力学性能,在31 MPa/600°C/620°C条件下,发电系统净效率可达50.71%.Moullec等人^[26]指出S-CO₂燃煤锅炉内煤粉燃烧温度可高达1400°C,锅炉排烟温度为500°C,远高于传统水蒸气锅炉,因此建议采用烟气分流策略对烟气余热进行回收利用.Sun等人^[27,28]基于能量梯级利用和协同的思想构建了顶底复合循环,将S-CO₂锅炉的排烟温度降低至120°C,以有效利用锅炉尾部烟气余热.为了减少系统大流量引起的大压降损失,Xu等人^[29]将分流策略应用于S-CO₂锅炉并提出了锅炉模块设计方法,使得流经炉内每个模块冷却壁的流量和长度都减为原来的1/2,最终实现锅炉压降降低为全流模式的1/8.Guo等人^[30]基于分流构型分析了冷却壁的水动力特性和结构参数,建立了S-CO₂燃煤发电系统的能量、焓和经济分析模型,研究结果表明采用中间冷却循环的S-CO₂燃煤电厂热效率可达47.69%~49.09%,当涡轮进口参数为620°C/620°C/30 MPa时,S-CO₂燃煤电厂更有优势.

针对CO₂燃煤发电系统全工况动态响应特性分析,现有研究多集中于理论论证,从CO₂动力循环叶轮机、换热器等关键部件的动态建模入手,按工质流动方向传递参数和逐级连接,建立完整系统的动态响应模型.在CO₂叶轮机动态特性研究方面,重点聚焦于物性剧烈变化条件下的全工况热力学与气体动力学建模分析,主要建模方法有性能曲线图法、相似准则法和经验关联式法.例如,Balje^[31]介绍了基于性能曲线图法的叶轮机设计方法,Gong等人^[32]和Lee等人^[33,34]利用该方法对S-CO₂循环中的叶轮机进行了

设计, 并对其在非设计工况下的等熵效率进行了修正。在换热器动态特性分析方面, 研究主要集中于揭示热惯性和非稳态的流动传热特性, 精确获得非稳态工况的 Nu 数、阻力系数。基于上述部件模型的构建, 可集成系统动态分析模型, 用于探索热力学参数变化对系统动力循环性能的影响规律。然而, 结合燃煤热源特征的发电系统调控策略仍需深入研究, 未来需从工质压力与温度调节、锅炉负荷控制、负荷预测与调度等方面综合考虑, 以进一步提高发电系统的灵活性。

在S-CO₂燃煤发电系统的工程实证与应用方面, 西安热工研究院在阎良科研试验基地搭建了5 MWe超临界CO₂试验平台, 核心设备国产化率达到100%^[2]。该试验平台透平入口最高温度的设计值可达到600℃, 高压透平入口压力最大设计值为20 MPa, 以再压缩S-CO₂循环为研究对象时系统发电效率的设计值达到33.49%^[35]。

2.3 二氧化碳热力循环应用于源-网-荷-储综合能源系统的应用

综合能源供能系统在满足多元化用能需求的同时, 可显著提高能源利用率。鉴于S-CO₂循环的经济性及高效性, 其在综合能源系统中的应用可行性正被逐步探索。综合能源系统中, 不同子系统具有不同的物理特性与时间尺度, 涉及多种能量转化与传递过程, 热力学特性复杂, CO₂循环与其他子系统的动态耦合涉及多参数匹配、跨时间尺度协调等问题。因此, 需明晰CO₂循环与其他能源子系统的能量耦合关系, 并探索考虑CO₂循环变负荷特性的综合能源系统能量管控方法。Altinkaynak等人^[36]提出了一种新型混合能源系统, 该系统集成了S-CO₂循环、T-CO₂循环和有机朗肯循环, 并且能够通过单一热源同时实现发电、供热、制冷和制氢。经过热力学分析可知, 该系统的能效和烟效率分别可达44.69%和42.03%。Ran等人^[37]设计了一种由固体氧化物燃料电池系统、微型燃气轮机系统、S-CO₂布雷顿循环系统和溴化锂吸收式制冷循环系统所组成的综合能源系统, 并分析了其热力学特性。结果表明, 在设计工况下, 该多联产能源系统的总发电量为696.9 kW, 产热量为24.98 kW, 制冷量为88.81 kW, 能量往返效率为70.49%, 电效率为60.59%。Li等人^[38]提出了由S-CO₂作为主要能量转换单元的一种新型综合能源系统, 并对其中的储能系统^[39]、动力循环^[40,41]的动态响应特性开展了详细分析, 为构建高效、经济的能源转换系统提

供了潜在的解决方案。为进一步探究新型能源系统的动态运行特性, 他们还搭建了“源-网-荷-储”综合能源系统动态调控实验平台^[42](图2), 该实验平台充分考虑了太阳能波动性及CO₂循环灵活性调峰潜力, 集成光伏发电子系统、S-CO₂循环发电子系统、全钒液流电池储能子系统和用户负荷组成“源-网-荷-储”新型综合能源系统, 从而实现对多系统、多过程、多时间尺度和多工况特性的分析。

3 应用于规模化储能领域的二氧化碳热力循环研究现状

规模化储能技术是实现新型能源系统稳定性与高效利用的关键环节。基于CO₂热力循环的储能技术具有高效、环保、高储能密度和灵活性等特征, 是未来大规模储能领域的重要技术路径之一。鉴于新型能源系统对大规模储能技术的需求, 本节聚焦于压缩二氧化碳储能技术(CCES)的研究现状及其关键问题, 探讨其在热力学循环优化、二氧化碳的规模化存储与高效转化过程中的研究进展和发展趋势。

3.1 多循环构型CCES热力学循环理论研究

目前CCES处于理论研发阶段, 技术路线众多, 主要包括绝热与非绝热系统、CO₂存储状态(液态、气态、超临界态)、储气容器放置位置(地上或地下)、CO₂液化方法(蓄冷、外界冷源、制冷系统)、多级压缩与多级膨胀以及储热形式等。不同技术路线下的系统循环构型在参数水平、运行方式以及储能特性等方面存在显著差异。为了更好地理解循环构型对储能特性的影响规律, 本文通过分析近几年国内外发表的有关CCES研究的相关文献^[43-81], 总结不同CCES循环构型中CO₂存储状态、运行温度与压力范围对储能密度与储能往返效率的影响规律。

热力循环结束后存储的CO₂状态很大程度上决定了系统的储能密度, 因此为了揭示循环构型对储能密度的影响规律, 根据高压与低压侧所存储的CO₂状态, 将CCES分为三类: 高压储存侧与低压储存侧的CO₂均为超临界状态的储能系统(supercritical state-compressed carbon dioxide energy storage, S-CCES)、有一侧存储的CO₂为气态的储能系统(gas-compressed carbon dioxide energy storage, G-CCES)、至少一侧存储的CO₂为液态且两侧均无气态的储能系统(liquid-compressed carbon dioxide energy storage, L-CCES)。基于该



图2 “源-网-荷-储”综合能源系统动态调控实验平台

Figure 2 Dynamic experimental platform of the generation-grid-load-storage integrated energy system

分类方法, 分类结果整理成图3和4进行展示. 由图3可见, 高压侧存储的CO₂温度与压力通常为280~430 K、10~40 MPa, 主要为液态或超临界态; 低压侧为220~330 K、0.1~8 MPa, 涵盖气态、液态及超临界态. 由于低压侧CO₂以超临界状态存储时, 降低压力至临界点附近有助于提高压比和压缩热, 因此图3显示S-CCES的低压侧CO₂多接近临界状态; 而当低压侧CO₂以液态存储时, 降低CO₂压力会导致相变温度下降且潜热显著增加, 使液化过程更加困难, 因此图3显示L-CCES的低压侧CO₂多接近饱和状态. 图4展示了不同CO₂存储状态下的储能密度分布情况: L-CCES的储能密度较高, 为3.7~55 kW/m³, 而G-CCES的储能密度范围较广但整体偏低. 由此可见, 液化低压侧CO₂是提高储能密度的重要途径.

热力循环过程中CO₂状态变化反映了系统的运行温度与压力范围, 其中压缩机入口CO₂状态为循环中压力和温度的最低点, 体现了储能潜力, 而膨胀机入口CO₂状态多为最高点, 体现了释能潜力, 二者直接影响系统的储能往返效率 η_{RT} . 因此, 为了揭示循环构型对储能往返效率的影响规律, 根据压缩机和膨胀机入口的CO₂是否为超临界态, 从另一角度将CCES循环分为三类: 亚临界储能循环(subcritical-compressed carbon dioxide energy storage, sub-CCES), 即压缩机入口与膨胀机入口均处于亚临界状态; 跨临界储能循环(transcritical-compressed carbon dioxide energy storage, tran-CCES), 即压缩机入口处于亚临界状态而膨胀机入口处于超临界状态; 以及超临界储能循环(supercritical-compressed carbon dioxide energy storage, sup-CCES), 即压缩机入口与膨胀机入口均处于超临界状态. 基于该分类方法, 本文总结了CCES压缩机和膨胀机入口状

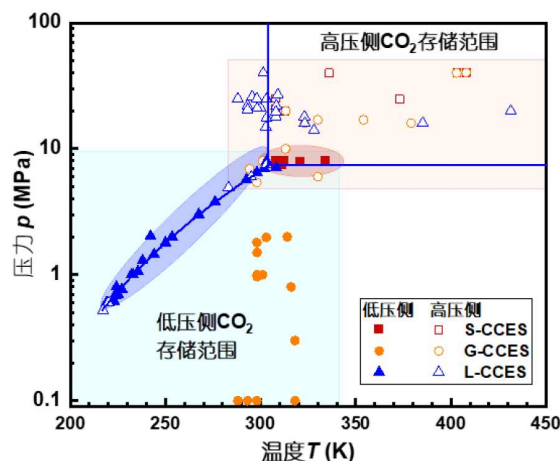

 图3 CCES高压侧与低压侧存储的CO₂状态

Figure 3 CO₂ state at high-pressure and low-pressure sides of CCES

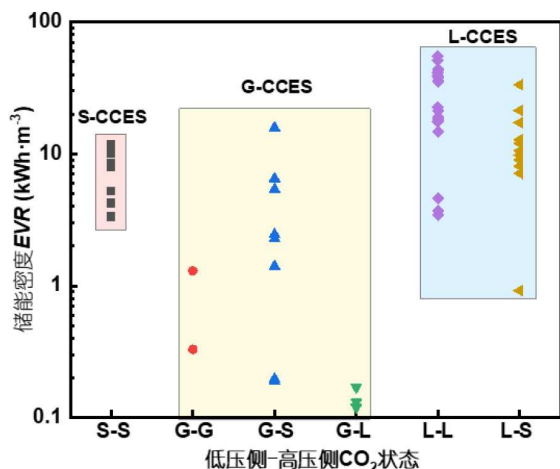


图4 CCES的储能密度

Figure 4 Energy storage density of CCES

态以及储能往返效率的信息, 并将其整理成图5和6进行展示. 由图5可见, 压缩机入口CO₂温度和压力普遍为270~320 K、0.1~8 MPa, 而膨胀机入口则为370~800 K、3.8~30 MPa. 为储存更多电能, 压缩机入口CO₂压力需尽可能低, 因此sup-CCES的压缩机入口CO₂状态集中在临界点附近, 而sub-CCES和tran-CCES则普遍低于2 MPa; 同时, 由于压力提升对焓值影响有限而对设备要求提高, 因此sup-CCES膨胀机入口CO₂压力集中在20~25 MPa; 此外, tran-CCES膨胀机入口CO₂温度覆盖范围广, 通常为360~750 K, 无需额外补热的系统多处于此范围. 部分研究从理论层面提出可

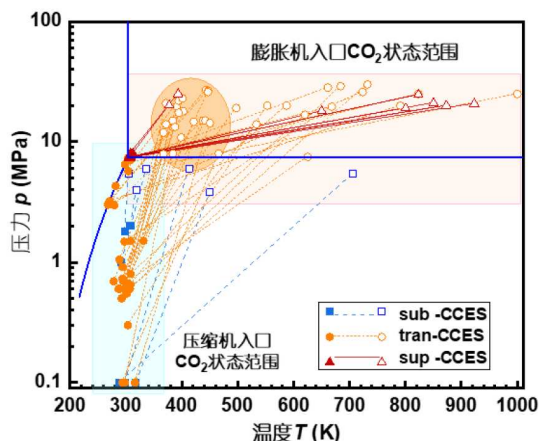


图5 CCES压缩机与膨胀机入口处CO₂状态

Figure 5 CO₂ state at the inlet of CCES compressor and expander

通过补热将tran-CCES膨胀机入口温度增加到1000 K,以期提升CCES性能^[75]。然而,鉴于当前尚未有能够耐受高达1000 K高温高压CO₂环境的成熟商业化材料,该CCES系统的相关研究仍局限于理论探讨阶段。

图6展示了CCES系统的储能往返效率分布情况。由图6可见,sub-CCES的 η_{RT} 最高可达近80%,而sup-CCES普遍低于55%,tran-CCES因运行温度和压力范围广, η_{RT} 差异较大。 η_{RT} 变化可通过压缩或膨胀过程中CO₂的焓变与温变解释。超临界区的焓升远小于气体区域,导致热力循环的比功较低。为提高比功,通常需结合外部热源提升膨胀机入口CO₂的焓值,但额外补热会导致sup-CCES的 η_{RT} 偏低。而等熵压缩提升相同压力时,亚临界区的温升远大于超临界区。因此,sub-CCES可通过高效换热与储热技术回收高品位压缩热,并在膨胀过程中回收再利用,一般无需外界补热,从而使得sub-CCES的 η_{RT} 较高。例如,Astolfi等人^[59]通过梯级储换热匹配CO₂比热变化,实现了77%的 η_{RT} 。

目前,CCES的稳态研究相对完善,主要通过建立热力学模型分析系统在不同工况及设备参数下的性能特性,并通过运行参数优化^[51]、混合循环工质使用^[82]、储换热子系统匹配^[59],以及与太阳能^[73]、液化天然气(Liquefied natural gas, LNG)冷能^[83,84]和废热^[65]等外部能源系统的集成,进一步优化循环构型。稳态热力学分析研究能够快速评估不同循环构型的理论性能上限,筛选出设计工况下的最优构型。然而,实际运行中,CO₂储罐的温度和压力在储释能过程中不断变化,导致实际性能偏离设计值^[85],研究CCES动态性能对明确实际运行性能及指导系统设计与运行具有重要意义。压缩

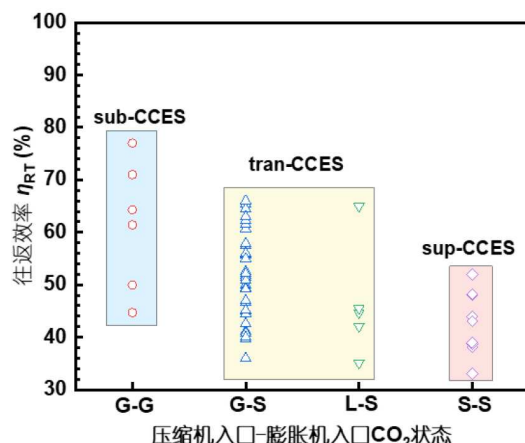


图6 CCES储能往返效率

Figure 6 Round-trip efficiency of CCES

空气储能系统(compressed air energy storage, CAES)的动态特性研究已取得较多进展,常用的动态建模思路是采用一维集总参数的非稳态流动传热模型对换热器建模,并通过经验关联式修正叶轮机械在变工况下的等熵效率,进一步依据储能循环构型逐级连接,形成系统层的一体化动态模型。然而,与CAES相比,CCES在动态运行中表现出显著差异:其一,储释能过程中CO₂相态变化及其热物性对温度和压力的高度敏感性,使得换热过程更为复杂,传统一维集总参数法不再适用;其二,CO₂叶轮机械直径较小、转速较高,其等熵效率随温度、压力和转速的变化更为剧烈,运行特性与空气叶轮机械存在显著差异。因此,需结合CO₂在不同相态下的复杂热物性和流动特性,对CCES系统中的关键部件(如换热器、储热器等热量传递部件,压缩机、膨胀机等热功转换部件)进行高精度动态建模,并通过耦合这些模型构建覆盖全工况的系统动态仿真框架,揭示实际运行中的动态特性,为优化系统运行和提升性能提供理论与技术指导。

3.2 二氧化碳的规模化存储

作为CCES系统的核心组成部分,CO₂储存部件不仅是系统中体积占比最大的子系统,更是实现高效能量转换与长期安全储存的关键环节。CO₂的物理状态与存储形式的选择,直接关系到整个系统的储能密度、经济性和环境适应性,是提升系统性能、降低成本并推动其商业化应用的关键。

在CO₂储存状态方面,低压侧CO₂的高效、低成本液化是维持CCES系统高储能密度优势的关键之一。由

于CO₂压力降低,其液化温度下降,相变潜热增加。例如,当CO₂压力由6 MPa降低到1 MPa时,其液化温度从295 K降至233 K,相变焓从140.5 kJ/kg升至322.6 kJ/kg,这增加了低压侧CO₂液化困难与系统能耗,降低了储能往返效率。目前,低压侧CO₂液化的主要方法包括:(1)补充外部冷源直接液化低压CO₂: LNG在汽化过程中释放大冷量,可作为外部冷源用于液化低压CO₂。Zhao等人^[62]提出了一种耦合LNG冷能利用的CCES系统,利用LNG冷量液化低压CO₂,并通过燃烧气化的天然气(NG)为CCES释能阶段补充热量。然而,由于LNG的沸点约为111 K,而CCES系统中低压侧CO₂的液化温度通常在220~300 K范围内,两者换热温差较大,直接利用LNG冷量去液化CO₂会导致较大的焓损失。此外,LNG的使用限制了CCES系统的灵活性。(2)采用混合工质以提高液化温度:将CO₂与其他沸点不同的工质以特定比例混合形成非共沸混合工质,可以提高工质的临界温度与临界压力,从而降低CCES低压侧循环工质的液化难度与能耗。同时,混合工质的气液相变为变温过程,相较于纯CO₂,更能匹配热源与冷源流体的变温过程,减少换热过程中的不可逆损失,提高CCES系统的储能往返效率。然而,目前基于CO₂的混合工质体系尚不成熟,亟须开发高效的混合工质设计方法,并对工质热物性进行精准测量,以完善混合工质体系。(3)利用蓄冷装置存储CO₂汽化释放的冷量:在L-CCES系统中,释能过程中的膨胀机出口低压气态CO₂需液化(吸收冷量)后进入低压储罐,而储能过程中的低压液态CO₂则需气化(释放冷量)后进入压缩机。为此,可采用蓄冷技术在时间尺度上转移冷量,以匹配释能过程的冷量需求。蓄冷技术可分为显热蓄冷与相变蓄冷两类。显热蓄冷通过调控蓄冷物质的温度实现冷量的存储和释放,其储能密度较低,常见的显热蓄冷剂包括液态水、岩石类固体材料;相变蓄冷储能密度高,且在恒温条件下进行冷量的存储与释放,与CO₂的蒸发和液化过程高度匹配,是L-CCES技术的理想蓄冷方式。目前文献^[64,86]中提出了多种基于相变蓄冷的CCES循环形式,用于实现低压侧CO₂的气液互转。然而,现有研究通常将蓄冷器简化为换热器,未详细考虑其内部的热量传递与相变储热材料的相态变化过程。这种简化无法真实反映蓄冷技术对CCES系统的影响。此外,开发适用于低压气态CO₂液化过程的蓄冷材料及合理的蓄冷结构形式也是重要的研究方向。

在CO₂储存形式方面,CO₂储存形式的选择不仅影

响系统的经济性和灵活性,还直接关系到CO₂的物理状态及其后续处理方式。与压缩空气储能技术类似,目前CO₂储存主要技术包括:(1)天然地下洞穴储气:天然地下洞穴主要有废弃盐穴、地下含水层以及硬岩层洞穴等形式。这类储气方式通常储气规模大,建造成本低。其中,盐穴储气是目前国内外最常见的储气形式,盐穴通过水溶开采技术在主要成分为氯化钠的软性盐岩层中形成。由于盐岩孔隙度低(<0.5%)且渗透率低($\leq 10^{-21}$ m²),其气密性好。此外,盐穴具备自愈能力和较好的塑性,适合存储空气、CO₂、天然气、石油等物质^[87]。德国Huntorf电站作为世界首个压缩空气储能电站,采用的正是盐穴储气形式,其储气压力达到10 MPa。目前我国已建成的江苏金坛、山东肥城和湖北应城等压缩空气储能电站也均采用盐穴储气形式。在使用盐穴存储CO₂时,需要特别关注CO₂对盐穴壁面的渗透、溶解、腐蚀及化学反应等问题。然而,天然地下洞穴受地理条件限制,将影响CCES系统的地理灵活性。(2)人工硐室储气:人工硐室通常建造在硬质岩层中,并设计多层结构以确保密封性、稳定性和耐久性。典型的人工硐室包括密封层、混凝土衬砌、回填层及围岩。自20世纪90年代起,日本^[88]、瑞典^[89]、韩国^[90]等国已经开展了人工硐室的实验研究,储气库多采用圆柱形隧硐室结构。然而,对于人工硐室储气库的选址、设计、建造与运行理论,仍需进一步完善,特别是在存储高压CO₂甚至液态或超临界状态时,需要深入研究CO₂与硐室材料的相容性,以及循环压力与温度变化对密封材料性能的影响。(3)金属罐体储气:当CO₂为液态或超临界状态时,金属管道或罐体成为更合适的存储方式。金属管道或罐体储存高压CO₂技术成熟,密封性好,且安装位置灵活。然而,由于CCES系统中CO₂储存需求体积较大,金属罐体储气的方式成本较高。

3.3 二氧化碳的高效紧凑换热器

CCES中的换热器包括用于冷却压缩机出口的CO₂冷却器、用于加热膨胀机入口的CO₂加热器。一般地,CCES对CO₂换热器有如下要求:首先,在CCES中,CO₂会经历气相、液相与超临界相的相互转化,特别是超临界状态下的CO₂,其比热容对微小温度变化较为敏感,导致CO₂与储热介质之间的传热焓损显著,从而对系统性能产生不利影响,因此CO₂换热器的高效低阻性是优化目标之一;其次是耐高压性,CCES的压力最高可达30 MPa,不仅流体通道自身的承压能力要符合要

求,并且换热器需承受冷热两侧的巨大压力差;最后是紧凑性,换热器是CCES系统中的重要设备,缩小换热器尺寸对提高CCES的紧凑性、提高储能密度具有一定的效果。

印刷电路板换热器(printed circuit heat exchanger, PCHE)是近年来被广泛使用的一种新型换热器^[91],可以适配CCES的高效、耐压力、紧凑等的需求。一方面,PCHE采用光化学蚀刻工艺在换热表面加工直径为0.5~2 mm的微流道,然后采用扩散焊接技术将换热板连接在一起,这种特殊的加工工艺使PCHE能够承受高温高压的工作环境,最大压力超过60 MPa。另一方面,PCHE作为一种微通道换热器,换热比表面积高达2500 m²/m³,在相同功率下,PCHE的体积较管壳式换热器可大幅减小。此外,当量直径小,使得PCHE具有致密性好、传热效率高的特点,换热“夹点温度”可以达到8℃以内,而管式换热器的“夹点温度”通常在12℃以上^[92],因此,PCHE可以实现“小温差换热”,减少不可逆热损失,提高CCES的储能往返效率。PCHE根据翅片连续性可分为连续型和非连续型两类。连续型包括直翅片和Z型翅片,非连续型则包括S型翅片和翼型翅片。直翅片结构简单,但换热能力较弱,紧凑度较低^[93]。Z型翅片通过增强流体扰动提升了换热性能,目前针对这种通道形式的研究相对较多。Lee等人^[94]和Nikitin等人^[95]分别通过数值模拟和实验研究了Z型翅片PCHE在CO₂工质下的流动与传热特性,并拟合了相关传热关联式。虽然Z型翅片PCHE换热性能较强,但其蜿蜒结构导致流动阻力较大。

为了降低CO₂在传统Z型通道中的流动阻力,Yang等人^[96]设计了波浪型翅片,研究了其在CO₂工质下的流动换热特性,并拟合了相应的对流换热关联式。Tsu-zuki等人^[97]设计了一种非连续S型翅片PCHE,并采用CO₂为传热工质,数值研究了该S型翅片PCHE的流动与传热性能。结果表明,在相同的换热性能下,S型翅片结构的压降仅为连续Z型翅片结构的1/5。Ngo等人^[98]采用实验研究了CO₂在S型翅片PCHE中的流动与换热性能。结果表明,S型翅片结构的阻力系数降低为Z型翅片结构的1/5~1/4,但与此同时,换热性能也有所降低。Kim等人^[99]设计了一种非连续的翼型翅片结构,并研究了CO₂在该结构中的流动与传热性能。数值研究表明,其压降仅为Z型翅片的1/20,展现出优异的流动与传热性能。Xu等人^[100]进一步研究了翼型翅片排布方式对CO₂换热器流动与传热特性的影响。

总的来说,目前国内外学者已开展了基于CO₂工质的PCHE流道结构优化研究,包括优化现有PCHE的几何参数和翅片布置方式,同时提出新型流道形式和CO₂换热器,以提高换热性能。未来的研究应加强CO₂换热器耐高压和抗腐蚀性能,确保在大温差、高压差等极端条件下的可靠性,探索设计同时适应压缩储能与膨胀释能工况的高效CO₂换热器,降低换热器投资成本。此外,由于PCHE采用了密集的微通道设计,重量大、制造工艺较为复杂,导致其成本较高,为此目前学者也正在探索其他轻量化、低成本的紧凑式换热器,采用的换热器结构有三周期极小曲面结构^[101]、多孔晶格结构^[102]、针状翅片^[103]、多流道结构^[104]等。这类结构不仅具有较大的换热面积,而且重量较轻,有望满足紧凑空间内的高效换热需求。

3.4 CCES技术示范情况

在CCES技术的工程应用与验证方面,2022年,意大利Energy Dome公司提出了一种低压储气的压缩CO₂储能系统^[59],其系统流程如图7所示。该系统在低压侧采用柔性气囊存储近常温常压的CO₂,其温度与压力分别为26.9℃和0.1 MPa,在高压侧使用金属罐体存储液态CO₂,其温度与压力分别为24.5℃和6.51 MPa。压缩机入口的CO₂温度和压力分别为15℃和0.1 MPa,膨胀机入口则为432.6℃和5.42 MPa。从循环中CO₂的相态变化来看,该方案属于亚临界储能循环,系统的储能往返效率较高,理论上可达约77%。Energy Dome公司建设的兆瓦级CCES项目已投入运行,目前正在建设一个储能功率为20 MW、储能容量为100 MWh的商业储能电站(<https://energydome.com/co2-battery>)。我国在CCES技术领域也取得了重要进展。据报道,由西安交通大学、东方电气集团和百穰新能源科技有限公司联合研发的CO₂+飞轮储能示范项目于2022年8月25日竣工(<https://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c25926182/content.html>),该系统的储能规模为10 MW/20 MWh。2023年12月30日,10 MW/80 MWh二氧化碳储能示范系统成功完成调试并网(<https://news.xjtu.edu.cn/info/1002/205608.html>),这一成果进一步验证了CCES技术在工程应用中的潜力和价值。

4 总结与展望

为推动“碳中和”目标的实现及能源结构的低碳化转型,促进CO₂热力循环技术在新型能源系统中的广泛

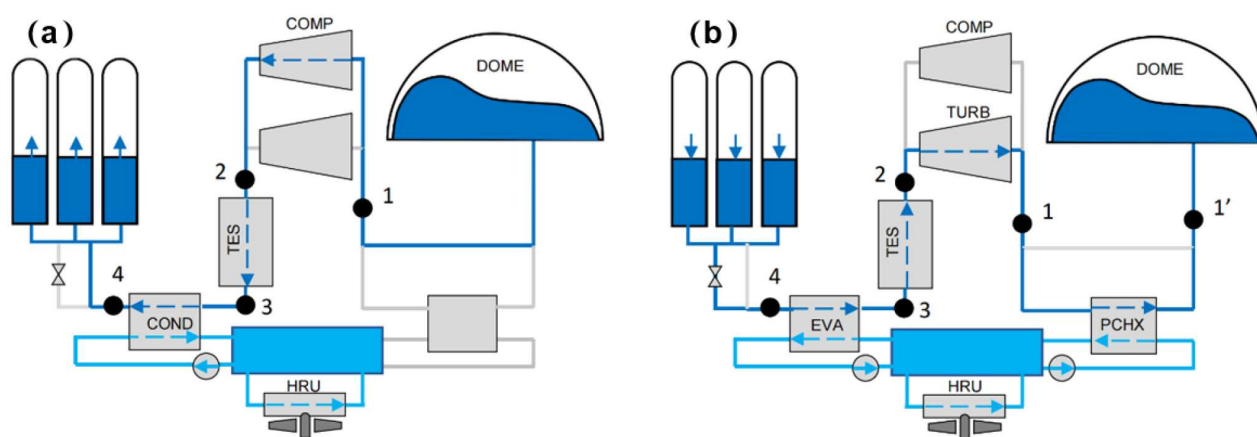


图7 意大利Energy Dome公司提出的低压储气CCES示意图^[59]. (a) 压缩储能过程. (b) 膨胀释能过程

Figure 7 Schematic diagram of low-pressure gas storage CCES proposed by Energy Dome, Italy^[59]. (a) Charging process. (b) Discharging process

应用, 未来还需从理论、技术与示范应用方面开展深入而系统的研究. 具体建议如下.

(1) 突破现有的热力学循环效率瓶颈, 发展CO₂热力循环的多工况高效转换与存储理论. 围绕不同能源(如燃煤、天然气、太阳能、核能等)之间的能量转换、存储与耦合机制, 深入研究CO₂热力循环在多工况下的热效率提升及物性变化规律, 提出多元能源场景下系统的优化设计方法, 推动不同工况条件下的循环系统的高效、稳定运行. 重点研究CO₂热力循环与可再生能源(如太阳能、地热等)和传统能源(如燃煤、天然气)系统的协同工作机制, 实现能量的梯级利用与多能互补.

(2) 攻克CO₂热力循环过程中热功转换、换热、存储等关键技术问题, 提高循环中设备的可靠性与技术成熟度. 深入研究核心设备(如压缩机、透平)的设计优化与材料耐久性, 解决设备在极端工况下的疲劳损伤与失效风险; 探索CO₂规模化存储技术, 优化天然地下洞穴、人工硐室及金属罐体等储气方式, 重点关注CO₂与储气材料的相容性及密封性能; 研究外部冷源补充、蓄冷技术及混合工质等CO₂液化技术, 提升液化效率并

降低能耗. 同时, 发展高效紧凑CO₂换热技术, 提高系统换热效率, 降低不可逆热损失.

(3) 推进机理与数据双驱动的CO₂热力循环智能化设计技术. 结合高性能计算与智能控制, 为CO₂热力循环的实时监控、性能优化与故障预测提供支撑, 实现对CO₂热力循环系统各关键组件(如换热器、涡轮、压缩机等)运行状态的模拟与动态调节, 优化系统的负荷调度与动态响应能力, 进一步提升系统的灵活性.

(4) 推动CO₂热力循环在新型能源系统中的集成应用. 针对大规模可再生能源接入对电网安全稳定运行带来的挑战, 利用CO₂热力发电循环的高效变负荷调节能力, 快速响应发电量波动, 促进其与可再生能源发电的深度融合. 同时, 优化CO₂热力储能循环的设计与运行策略, 提高储能效率与密度, 降低储能成本, 加速其商业化进程.

综上所述, CO₂热力循环技术的发展应着重突破热力学效率、系统控制和技术集成等方面的瓶颈, 推动理论研究、技术应用与产业化进程的深度融合, 最终构建高效、灵活、低碳的新型能源系统, 助力“碳中和”目标的实现.

参考文献

- Allison T C, Moore J, Pelton R, et al. Fundamentals and application of supercritical carbon dioxide based power cycles: Turbomachinery. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. 147–215
- Li H, Zhang Y, Bai W, et al. Control strategies and dynamic experimental tests on the wide-range and rapid load regulation of a first pilot multi-megawatts fossil-fired supercritical CO₂ power system. *Energy Convers Manage*, 2023, 279: 116748
- Brun K, Peter F, Richard D. Fundamentals and applications of supercritical carbon dioxide (sCO₂) based power cycles. Cambridge: Woodhead

Publishing, 2017

- 4 Guo J Q, Li M J, He Y L, et al. A systematic review of supercritical carbon dioxide(S-CO₂) power cycle for energy industries: technologies, key issues, and potential prospects. *Energy Convers Manage*, 2022, 258: 115437
- 5 Li M J, Zhu H H, Guo J Q, et al. The development technology and applications of supercritical CO₂ power cycle in nuclear energy, solar energy and other energy industries. *Appl Therm Eng*, 2017, 126: 255–275
- 6 Xu J, Liu C, Sun E, et al. Perspective of S-CO₂ power cycles. *Energy*, 2019, 186: 115831
- 7 Li M J, Jie Y J, Zhu H H, et al. The thermodynamic and cost-benefit-analysis of miniaturized lead-cooled fast reactor with supercritical CO₂ power cycle in the commercial market. *Prog Nucl Energy*, 2018, 103: 135–150
- 8 Wang K, Li M J, Guo J Q, et al. A systematic comparison of different S-CO₂ Brayton cycle layouts based on multi-objective optimization for applications in solar power tower plants. *Appl Energy*, 2018, 212: 109–121
- 9 Wang K, He Y L, Zhu H H. Integration between supercritical CO₂ Brayton cycles and molten salt solar power towers: a review and a comprehensive comparison of different cycle layouts. *Appl Energy*, 2017, 195: 819–836
- 10 Zhu D, Li Y, Chen Y, et al. Numerical study on the stress and thermal performance of a supercritical CO₂ solar conical cavity receiver. *Sol Energy*, 2024, 267: 112252
- 11 Fernández-Torrijos M, González-Gómez P A, Sobrino C, et al. Economic and thermo-mechanical design of tubular sCO₂ central-receivers. *Renew Energy*, 2021, 177: 1087–11011
- 12 Wang K, Zhang Z D, Li M J, et al. A coupled optical-thermal-fluid-mechanical analysis of parabolic trough solar receivers using supercritical CO₂ as heat transfer fluid. *Appl Therm Eng*, 2021, 183: 116154
- 13 Chen Y, Wang D, Zou C, et al. Thermal performance and thermal stress analysis of a supercritical CO₂ solar conical receiver under different flow directions. *Energy*, 2022, 246: 123344
- 14 Ho C K. A review of high-temperature particle receivers for concentrating solar power. *Appl Therm Eng*, 2016, 109: 958–969
- 15 Chen R, Romero M, González-Aguilar J, et al. Optical and thermal integration analysis of supercritical CO₂ Brayton cycles with a particle-based solar thermal plant based on annual performance. *Renew Energy*, 2022, 189: 164–179
- 16 Wang W Q, Li M J, Guo J Q, et al. A feedforward-feedback control strategy based on artificial neural network for solar receivers. *Appl Therm Eng*, 2023, 224: 120069
- 17 Zhang Y, Li H, Li K, et al. Dynamic characteristics and control strategies of the supercritical CO₂ Brayton cycle tailored for the new generation concentrating solar power. *Appl Energy*, 2022, 328: 120190
- 18 Sun L, Liu T, Wang D, et al. Deep learning method based on graph neural network for performance prediction of supercritical CO₂ power systems. *Appl Energy*, 2022, 324: 119739
- 19 Alsagri A S, Rahbari H R, Wang L, et al. Thermo-economic optimization of an innovative integration of thermal energy storage and supercritical CO₂ cycle using artificial intelligence techniques. *Process Saf Environ Protection*, 2024, 186: 1373–1386
- 20 Zhang C, Yan L, Shi J. Performance prediction of a supercritical CO₂ Brayton cycle integrated with wind farm-based molten salt energy storage: artificial intelligence (AI) approach. *Case Studies Therm Eng*, 2023, 51: 103533
- 21 Son S, Jeong Y, Cho S K, et al. Development of supercritical CO₂ turbomachinery off-design model using 1D mean-line method and Deep Neural Network. *Appl Energy*, 2020, 263: 114645
- 22 Marion J, Macadam S, McClung A, et al. The STEP 10 MWe sCO₂ pilot demonstration status update. In: Proceedings of the Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2022, 86083: V009T28A034
- 23 Mehos M, Turchi C, Jorgenson J, et al. On the path to SunShot-advancing concentrating solar power technology, performance, and dispatchability. Technical Report, EERE Publication and Product Library, Washington DC, 2016
- 24 Liu M, Yang K, Zhang X, et al. Design and optimization of waste heat recovery system for supercritical carbon dioxide coal-fired power plant to enhance the dust collection efficiency. *J Cleaner Production*, 2020, 275: 122523
- 25 Zhang Y, Li H, Han W, et al. Improved design of supercritical CO₂ Brayton cycle for coal-fired power plant. *Energy*, 2018, 155: 1–14
- 26 Le Moullec Y. Conceptual study of a high efficiency coal-fired power plant with CO₂ capture using a supercritical CO₂ Brayton cycle. *Energy*, 2013, 49: 32–46
- 27 Sun E, Xu J, Li M, et al. Synergetics: the cooperative phenomenon in multi-compressions S-CO₂ power cycles. *Energy Convers Manage: X*, 2020, 7: 100042
- 28 Sun E, Xu J, Li M, et al. Connected-top-bottom-cycle to cascade utilize flue gas heat for supercritical carbon dioxide coal fired power plant. *Energy Convers Manage*, 2018, 172: 138–154
- 29 Xu J, Sun E, Li M, et al. Key issues and solution strategies for supercritical carbon dioxide coal fired power plant. *Energy*, 2018, 157: 227–246
- 30 Guo J Q, Li M J, Xu J L, et al. Energy, exergy and economic (3E) evaluation and conceptual design of the 1000 MW coal-fired power plants integrated with S-CO₂ Brayton cycles. *Energy Convers Manage*, 2020, 211: 112713

- 31 Balje OE. Turbomachines—A Guide to Design, Selection, and Theory. New York: John Wiley & Sons, 1981
- 32 Gong Y, Carstens N A, Driscoll M J, et al. Analysis of radial compressor options for supercritical CO₂ power conversion cycles. Massachusetts, USA: Center for Advanced Nuclear Energy Systems, MIT Department of Nuclear Science and Engineering, 2006
- 33 Lee J, Lee J, Ahn Y, et al. Conceptual design of supercritical CO₂ Brayton cycle radial turbomachinery for SMART application. In: Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, 2012. 1–2
- 34 Cho S K, Lee J, Lee J I. Off design performance map similarity study of radial type turbomachinery in supercritical CO₂ Brayton cycle. In: ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2015
- 35 Li H, Zhang Y, Yao M, et al. Design assessment of a 5 MW fossil-fired supercritical CO₂ power cycle pilot loop. *Energy*, 2019, 174: 792–804
- 36 Altinkaynak M, Ozturk M. Thermodynamic analysis of a novel integrated system operating with gas turbine, s-CO₂ and t-CO₂ power systems for hydrogen production and storage. *Int J Hydrogen Energy*, 2022, 47: 3484–3503
- 37 Ran P, Zhou X, Wang Y, et al. Thermodynamic and exergetic analysis of a novel multi-generation system based on SOFC, micro-gas turbine, s-CO₂ and lithium bromide absorption refrigerator. *Appl Therm Eng*, 2023, 219: 119585
- 38 Guo J Q, Li M J, He Y L, et al. A systematic review of supercritical carbon dioxide(S-CO₂) power cycle for energy industries: technologies, key issues, and potential prospects. *Energy Convers Manage*, 2022, 258: 115437
- 39 Ni J W, Li M J, Ma T, et al. The configuration optimized design method based on real-time efficiency for the application of vanadium redox flow battery in microgrid. *Energy Convers Manage*, 2022, 267: 115899
- 40 Ma T, Li M J, Xu J L, et al. Study of dynamic response characteristics of S-CO₂ cycle in coal-fired power plants based on real-time micro-grid load and a novel synergistic control method with variable working conditions. *Energy Convers Manage*, 2022, 254: 115264
- 41 Ma T, Li M J, Xu H. Thermal energy storage capacity configuration and energy distribution scheme for a 1000 MWe S-CO₂ coal-fired power plant to realize high-efficiency full-load adjustability. *Energy*, 2024, 294: 130950
- 42 Li M, Guo J, Ma T, et al. Research status and development trend of generation-grid-load-storage type integrated systems with heterogeneous energy flows (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1941–1958 [李明佳, 郭嘉琪, 马腾, 等. “源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的研究现状及发展趋势. 科学通报, 2023, 68: 1941–1958]
- 43 Zhang T, Zhang S, Gao J, et al. Feasibility assessment of a novel compressed carbon dioxide energy storage system based on 13X zeolite temperature swing adsorption: thermodynamic and economic analysis. *Appl Energy*, 2023, 348: 121562
- 44 Marchionni M, Cipollone R. Liquid CO₂ and liquid air energy storage systems: a thermodynamic analysis. *Energies*, 2023, 16: 4941
- 45 Yan X S, Wang X D, Han X, et al. Study on the coupling scheme of liquid compressed carbon dioxide energy storage and thermal power unit (in Chinese). *Thermal Power Gener*, 2023, 52: 90–100 [严晓生, 王小东, 韩旭, 等. 液态压缩二氧化碳储能与火电机组耦合方案研究. 热力发电, 2023, 52: 90–100]
- 46 Fu H, Shi J, Yuan J, et al. Thermodynamic analysis of photothermal-assisted liquid compressed CO₂ energy storage system hybrid with closed-cycle drying. *J Energy Storage*, 2023, 66: 107415
- 47 Deng Y, Wang J, Cao Y, et al. Technical and economic evaluation of a novel liquid CO₂ energy storage-based combined cooling, heating, and power system characterized by direct refrigeration with phase change. *Appl Therm Eng*, 2023, 230: 120833
- 48 Xu W, Zhao P, Liu A, et al. Design and off-design performance analysis of a liquid carbon dioxide energy storage system integrated with low-grade heat source. *Appl Therm Eng*, 2023, 228: 120570
- 49 Zhao R, Liu Z. Thermo-economic performance of a compressed CO₂ energy storage system with a flexible gas holder. *J Energy Storage*, 2023, 60: 106675
- 50 Xu W, Zhao P, Gou F, et al. A combined heating and power system based on compressed carbon dioxide energy storage with carbon capture: exploring the technical potential. *Energy Convers Manage*, 2022, 260: 115610
- 51 Lu C, He Q, Hao Y, et al. Thermodynamic analysis and efficiency improvement of trans-critical compressed carbon dioxide energy storage system. *J Energy Storage*, 2022, 55: 105480
- 52 Xu W, Zhao P, Gou F, et al. Thermo-economic analysis of a combined cooling, heating and power system based on self-evaporating liquid carbon dioxide energy storage. *Appl Energy*, 2022, 326: 120032
- 53 Zhang Y, Wu Y, Yang K. Dynamic characteristics of a two-stage compression and two-stage expansion compressed carbon dioxide energy storage system under sliding pressure operation. *Energy Convers Manage*, 2022, 254: 115218
- 54 Zhang T, Gao J, Zhang Y, et al. Thermodynamic analysis of a novel adsorption-type trans-critical compressed carbon dioxide energy storage system. *Energy Convers Manage*, 2022, 270: 116268
- 55 Zhang Y, Liang T, Yang K. An integrated energy storage system consisting of compressed carbon dioxide energy storage and organic rankine cycle: exergoeconomic evaluation and multi-objective optimization. *Energy*, 2022, 247: 123566
- 56 Zhang Y, Yao E, Wang T. Comparative analysis of compressed carbon dioxide energy storage system and compressed air energy storage system under low-temperature conditions based on conventional and advanced exergy methods. *J Energy Storage*, 2021, 35: 102274

- 57 Zhang Y, Yang K, Hong H, et al. Thermodynamic analysis of a novel energy storage system with carbon dioxide as working fluid. *Renew Energy*, 2016, 99: 682–697
- 58 Sun L, Tang B, Xie Y. Performance assessment of two compressed and liquid carbon dioxide energy storage systems: thermodynamic, exergoeconomic analysis and multi-objective optimization. *Energy*, 2022, 256: 124648
- 59 Astolfi M, Rizzi D, Macchi E, et al. A novel energy storage system based on carbon dioxide unique thermodynamic properties. *J Eng Gas Turbines Power*, 2022, 144: 081012
- 60 Chae Y J, Lee J I. Thermodynamic analysis of compressed and liquid carbon dioxide energy storage system integrated with steam cycle for flexible operation of thermal power plant. *Energy Convers Manage*, 2022, 256: 115374
- 61 Tang B, Sun L, Xie Y. Comprehensive performance evaluation and optimization of a liquid carbon dioxide energy storage system with heat source. *Appl Therm Eng*, 2022, 215: 118957
- 62 Zhao P, Xu W, Zhang S, et al. Components design and performance analysis of a novel compressed carbon dioxide energy storage system: a pathway towards realizability. *Energy Convers Manage*, 2021, 229: 113679
- 63 Fu H, He Q, Song J, et al. Thermodynamic of a novel solar heat storage compressed carbon dioxide energy storage system. *Energy Convers Manage*, 2021, 247: 114757
- 64 Sun W, Liu X, Yang X, et al. Design and thermodynamic performance analysis of a new liquid carbon dioxide energy storage system with low pressure stores. *Energy Convers Manage*, 2021, 239: 114227
- 65 Liu Z, Yang X, Jia W, et al. Justification of CO₂ as the working fluid for a compressed gas energy storage system: a thermodynamic and economic study. *J Energy Storage*, 2020, 27: 101132
- 66 Liu Z, Cao F, Guo J, et al. Performance analysis of a novel combined cooling, heating and power system based on carbon dioxide energy storage. *Energy Convers Manage*, 2019, 188: 151–161
- 67 Zhang Y, Liang T, Tian Z, et al. A comprehensive parametric, energy and exergy analysis of a novel physical energy storage system based on carbon dioxide Brayton cycle, low-temperature thermal storage, and cold energy storage. *Energy Convers Manage*, 2020, 226: 113563
- 68 Zhang Y, Yao E, Tian Z, et al. Exergy destruction analysis of a low-temperature compressed carbon dioxide energy storage system based on conventional and advanced exergy methods. *Appl Therm Eng*, 2021, 185: 116421
- 69 Jafari S, Ameri Mahabadi M. Performance analysis of a novel compressed carbon dioxide storage model integrated with solar energy. *J Renew Energy Environ*, 2021, 8: 90–100
- 70 Xu M, Wang X, Wang Z, et al. Preliminary design and performance assessment of compressed supercritical carbon dioxide energy storage system. *Appl Therm Eng*, 2021, 183: 116153
- 71 Liu H, He Q, Borgia A, et al. Thermodynamic analysis of a compressed carbon dioxide energy storage system using two saline aquifers at different depths as storage reservoirs. *Energy Convers Manage*, 2016, 127: 149–159
- 72 He Q, Liu H, Hao Y, et al. Thermodynamic analysis of a novel supercritical compressed carbon dioxide energy storage system through advanced exergy analysis. *Renew Energy*, 2018, 127: 835–849
- 73 Xu M, Zhao P, Huo Y, et al. Thermodynamic analysis of a novel liquid carbon dioxide energy storage system and comparison to a liquid air energy storage system. *J Cleaner Production*, 2020, 242: 118437
- 74 Liu Z, Liu Z, Yang X, et al. Advanced exergy and exergoeconomic analysis of a novel liquid carbon dioxide energy storage system. *Energy Convers Manage*, 2020, 205: 112391
- 75 Liu Z, Liu Z, Xin X, et al. Proposal and assessment of a novel carbon dioxide energy storage system with electrical thermal storage and ejector condensing cycle: energy and exergy analysis. *Appl Energy*, 2020, 269: 115067
- 76 Huang R, Zhou K, Liu Z. Reduction on the inefficiency of heat recovery storage in a compressed carbon dioxide energy storage system. *Energy*, 2022, 244: 123224
- 77 Ma H, Liu Z. Techno-economic assessment on a multi-stage compressed carbon dioxide energy storage system with liquid storage. *Energy Rep*, 2022, 8: 11740–11750
- 78 Li Y P. Thermodynamic performance analysis of compressed carbon dioxide energy storage systems (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: North China Electric Power University, 2019 [李玉平. 压缩二氧化碳储能系统的热力学性能分析. 硕士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2019]
- 79 He Q, Hao Y P, Liu W Y. Thermal analysis and improvement of a new transcritical compressed carbon dioxide energy storage system (in Chinese). *J North China Electric Power Univ*, 2020, 47: 93–101 [何青, 郝银萍, 刘文毅. 一种新型跨临界压缩二氧化碳储能系统热力分析与改进. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47: 93–101]
- 80 Wan Y, Wu C, Liu Y, et al. A technical feasibility study of a liquid carbon dioxide energy storage system: integrated component design and off-design performance analysis. *Appl Energy*, 2023, 350: 121797
- 81 Li M. Analysis of a compressed carbon dioxide energy storage system coupled with solar energy (in Chinese). Master Dissertation. Beijing: North China Electric Power University, 2023 [李梦. 耦合太阳能的压缩二氧化碳储能系统分析. 硕士学位论文. 北京: 华北电力大学, 2023]

- 82 Liu X, Yang X Q, Liu Z. A novel liquid energy storage system based on carbon dioxide mixtures (in Chinese). *Energy Storage Sci Technol*, 2021, 10: 1806–1814 [刘旭, 杨绪青, 刘展. 一种新型的基于二氧化碳混合物的液体储能系统. *储能科学与技术*, 2021, 10: 1806–1814]
- 83 Wu Y, Wang X R, Yang Y, et al. Supercritical carbon dioxide-transcritical carbon dioxide cogeneration system with liquefied natural gas as cooling source (in Chinese). *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2015, 49: 58–62, 146 [吴毅, 王旭荣, 杨翼, 等. 以液化天然气为冷源的超临界二氧化碳-跨临界二氧化碳冷热电联供系统. *西安交通大学学报*, 2015, 49: 58–62, 146]
- 84 Bao J, He X, Deng Y, et al. Parametric analysis and multi-objective optimization of a new combined system of liquid carbon dioxide energy storage and liquid natural gas cold energy power generation. *J Cleaner Production*, 2022, 363: 132591
- 85 Huang Q, Feng B, Liu S, et al. Dynamic operating characteristics of a compressed CO₂ energy storage system. *Appl Energy*, 2023, 341: 120985
- 86 Wang M, Zhao P, Yang Y, et al. Performance analysis of energy storage system based on liquid carbon dioxide with different configurations. *Energy*, 2015, 93: 1931–1942
- 87 Liu W, Li Q, Yang C, et al. The role of underground salt caverns for large-scale energy storage: a review and prospects. *Energy Storage Mater*, 2023, 63: 103045
- 88 Ishihata T. Underground compressed air storage facility for CAES-GT power plant utilizing an airtight lining. *Int Soc Rock Eng*, 1997, 5: 17–21
- 89 Glamheden R, Curtis P. Excavation of a cavern for high-pressure storage of natural gas. *Tunnelling Underground Space Tech*, 2006, 21: 56–67
- 90 Kim H M, Rutqvist J, Ryu D W, et al. Exploring the concept of compressed air energy storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: a modeling study of air tightness and energy balance. *Appl Energy*, 2012, 92: 653–667
- 91 Wang W Q, Qiu Y, He Y L, et al. Experimental study on the heat transfer performance of a molten-salt printed circuit heat exchanger with airfoil fins for concentrating solar power. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 135: 837–846
- 92 Iverson B D, Conboy T M, Pasch J J, et al. Supercritical CO₂ Brayton cycles for solar-thermal energy. *Appl Energy*, 2013, 111: 957–970
- 93 Kwon D, Jin L, Jung W S, et al. Experimental investigation of heat transfer coefficient of mini-channel PCHE (printed circuit heat exchanger). *Cryogenics*, 2018, 92: 41–49
- 94 Lee S M, Kim K Y. A parametric study of the thermal-hydraulic performance of a zigzag printed circuit heat exchanger. *Heat Transfer Eng*, 2014, 35: 1192–1200
- 95 Nikitin K, Kato Y, Ngo L. Printed circuit heat exchanger thermal-hydraulic performance in supercritical CO₂ experimental loop. *Int J Refrigeration*, 2006, 29: 807–814
- 96 Yang Y, Li H, Yao M, et al. Investigation on the effects of narrowed channel cross-sections on the heat transfer performance of a wavy-channeled PCHE. *Int J Heat Mass Transfer*, 2019, 135: 33–43
- 97 Tsuzuki N, Kato Y, Ishiduka T. High performance printed circuit heat exchanger. *Appl Therm Eng*, 2007, 27: 1702–1707
- 98 Ngo T L, Kato Y, Nikitin K, et al. Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with S-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles. *Exp Therm Fluid Sci*, 2007, 32: 560–570
- 99 Kim D E, Kim M H, Cha J E, et al. Numerical investigation on thermal-hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model. *Nucl Eng Des*, 2008, 238: 3269–3276
- 100 Xu X, Ma T, Li L, et al. Optimization of fin arrangement and channel configuration in an airfoil fin PCHE for supercritical CO₂ cycle. *Appl Therm Eng*, 2014, 70: 867–875
- 101 Feng J, Fu J, Yao X, et al. Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: from multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications. *Int J Extrem Manuf*, 2022, 4: 022001
- 102 Ho J Y, Leong K C, Wong T N. Additively-manufactured metallic porous lattice heat exchangers for air-side heat transfer enhancement. *Int J Heat Mass Transfer*, 2020, 150: 119262
- 103 Dede E M, Joshi S N, Zhou F. Topology optimization, additive layer manufacturing, and experimental testing of an air-cooled heat sink. *J Mech Des*, 2015, 137: 111403
- 104 Gerstler W D, Erno D. Introduction of an additively manufactured multi-furcating heat exchanger. In: 2017 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). New York: IEEE, 2017. 624–633

Summary for “二氧化碳热力循环在新型能源系统应用中的研究现状与发展趋势”

Advances and development trend of carbon dioxide thermodynamic cycles applied in novel energy systems

Ya-Ling He^{*}, Meng-Jie Li, Jia-Qi Guo & Zhan-Bin Liu

Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

^{*} Corresponding author, E-mail: yalinghe@mail.xjtu.edu.cn

To develop the novel energy system, it is necessary to break through the efficiency bottleneck of traditional energy systems, and improve the accommodation capacity of clean energy. However, traditional thermodynamic cycles make it difficult to meet the urgent demands of novel energy systems in terms of efficiency, cost, and flexibility. Therefore, the development of novel thermodynamic cycles is of great significance in addressing the challenges of energy utilization. As a natural working medium, carbon dioxide has economic and efficient advantages in energy conversion and energy storage, and the potential of applying carbon dioxide thermodynamic cycles to novel energy systems is being progressively explored. Benefiting from its high density, low viscosity and excellent heat transfer performance, the supercritical carbon dioxide provides high thermal efficiency and enables compact system designs in energy conversion systems. In the field of energy storage, carbon dioxide is easily liquefied, and its density is higher than air under the same state and pressure, which can reduce the storage volume. Therefore, energy storage technology based on carbon dioxide thermodynamic cycles can provide high-density and high-efficiency energy storage solutions for new energy systems. In order to elucidate the application prospects of carbon dioxide thermodynamic cycles, this paper systematically reviews the recent advancements in power generation and energy storage technology based on carbon dioxide thermodynamic cycles, and analyzes its key problems and challenges in the aspects of technology realization, system optimization and engineering application. Firstly, according to the distinct roles of the carbon dioxide working medium in the energy systems, we classify various carbon dioxide thermodynamic cycles and provide a detailed overview of their working principles and characteristics. The technical challenges associated with their application in power generation and large-scale energy storage are analyzed from the perspectives of equipment design, operation control, and engineering demonstration. Secondly, in the field of efficient power generation systems, taking the clean solar thermal power generation system with large installed capacity and traditional coal-fired power generation system as examples, the current status and difficulties of the application of carbon dioxide power cycles are discussed, and the application prospects in novel energy systems are further explored. In the field of large-scale energy storage, the research status and key problems of compressed carbon dioxide energy storage technology are reviewed, supplemented by a discussion on the research progress and development trend in thermodynamic cycle optimization, large-scale storage, and efficient conversion of carbon dioxide. Finally, from the aspects of theory, technology and demonstration application, an outlook on the future research direction of dioxide thermodynamic cycles is put forward.

carbon dioxide thermodynamic cycle, novel energy system, compressed carbon dioxide energy storage, supercritical carbon dioxide power generation

doi: [10.1360/TB-2025-0076](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0076)