

引用格式: 王东雷, 陈琦, 徐达前, 等. 热核聚变电站发电岛动力循环技术路线选择 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(4): 20-34. WANG Donglei, CHEN Qi, XU Daqian, et al. The selection of power cycle technology for the power generation island of a thermonuclear fusion power plant [J]. Southern energy construction, 2025, 12(4): 20-34. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-190.

## 热核聚变电站发电岛动力循环技术路线选择

王东雷<sup>✉</sup>, 陈琦, 徐达前, 孙潇, 罗贤勇, 朱光涛  
(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的] 通过增加储能回路可以将核聚变堆产生的间隙能量转化为连续能量, 若进一步转变为经济社会发展最常用的电能, 则需要选择合适的动力循环技术路线。[方法] 文章以中国聚变工程实验堆 (China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR) 为边界, 采用 Aspen HYSYS 软件和 REFPROP 物性计算方法分别建立了超临界二氧化碳 (SCO<sub>2</sub>) 分流再压缩布雷顿循环模型和氦气布雷顿循环模型, 研究了循环中主要参数对循环效率的影响, 并对蒸汽朗肯循环、SCO<sub>2</sub> 分流再压缩布雷顿循环和氦气布雷顿循环进行对比分析。[结果] 推荐 SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环作为热核聚变电站动力循环技术路线。[结论] 对热核聚变电站发电岛动力循环技术路线的分析及结论, 可为后续聚变发电技术研究以及工程设计提供重要参考。

**关键词:** 聚变; 超临界二氧化碳; 布雷顿循环; 物性计算方法; 循环效率

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-190

文章编号: 2095-8676(2025)04-0020-15

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-190

中图分类号: TL4; TK114



论文二维码

## The Selection of Power Cycle Technology for the Power Generation Island of a Thermonuclear Fusion Power Plant

WANG Donglei<sup>✉</sup>, CHEN Qi, XU Daqian, SUN Xiao, LUO Xianyong, ZHU Guangtao

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Objective] By adding an energy storage loop, the intermittent energy produced by a thermonuclear fusion reactor can be converted into continuous energy. If this continuous energy is to be further transformed into electricity, which is the most commonly used form of energy for economic and social development, an appropriate power cycle technology must be selected. [Method] Models for both the supercritical carbon dioxide (SCO<sub>2</sub>) split-flow recompression Brayton cycle and the helium Brayton cycle were established by using Aspen HYSYS software along with the REFPROP physical property calculation method under the China fusion engineering test reactor (CFETR). The effects of main parameters on the cycle efficiency were studied and a comparative analysis of the steam Rankine cycle, the SCO<sub>2</sub> split-flow recompression Brayton cycle, and the helium Brayton cycle was conducted. [Method] The SCO<sub>2</sub> Brayton cycle is recommended as the power cycle technology for thermonuclear fusion power plants. [Conclusion] The analysis and conclusions regarding the power cycle technology for the power generation island of a thermonuclear fusion power plant can provide important references for subsequent research on fusion power generation technology and engineering design.

**Key words:** fusion; SCO<sub>2</sub>; Brayton cycle; physical property calculation method; cycle efficiency

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2025-07-05 修回日期: 2025-07-14

基金项目: 中国能源建设股份有限公司“揭榜挂帅”重点研发项目“新型核能技术研究”(CEEC2023-ZDYF-03)

## 0 引言

能源是推动经济社会运行的核心要素,为工业生产、交通运输和居民生活等各领域注入源源不断的动力,驱动人类文明进程不断迈向更高阶段。当前我国正处于经济发展的转型期,能源需求量大,碳排放压力大,环境负担较重。我国资源禀赋为富煤贫油少气,2024年,煤炭消费占比为53.2%,原油对外依存度为73.1%,天然气对外依存度为43.6%,能源对外依存度较高。可以预见,未来我国对能源需求还会持续增加,找到一种规模足够大且可持续的能源供应方式对我国经济社会持续发展尤为重要。以风能、太阳能为代表的可再生能源以及核裂变能源虽然能够在一定程度上满足能源需求,但也并不能满足未来社会对于可持续低碳能源的长期需求<sup>[1]</sup>。可控核聚变能源作为一种清洁、高效并且原料广泛的新型能源被认为是未来有希望彻底解决能源问题的重要途径<sup>[2]</sup>。

核聚变又称核融合,其为在极端条件下,原子核发生碰撞融合,并伴随大量能量释放的过程<sup>[3]</sup>。在实现上,其通常可根据粒子约束形式分为磁约束、惯性约束和引力约束3种类型。其中磁约束聚变方案凭借其稳定性和技术基础成熟等多重优势,被认为是未来最有可能推进聚变能源商业发电的可控聚变方式<sup>[4]</sup>。磁约束类型主要有磁镜、仿星器和托卡马克3种<sup>[5]</sup>,其中托卡马克为当下研究最为广泛、未来最有可能实现的可控核聚变方案<sup>[4]</sup>。中国聚变工程实验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)是我国自主设计研制并联合国际合作的重大科学工程,旨在验证超导托卡马克聚变的可行性,并为未来商业化聚变堆的建设提供基础,是连接当前核聚变研究与未来能源应用的桥梁,其建设和发展具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。其概念设计已于2014年完成<sup>[8]</sup>,计划于2035年前完成建设,并于2050年开展试验。

在未来20~30年内,核聚变堆产生的能量具有间歇性,即聚变堆额定功率运行一段时间,然后零功率运行一段时间,如此往复进行。通过增加储能回路可以将间歇性的聚变能量转化为连续能量。如何将转化后的连续聚变能量转变为经济社会最常用的能源形式——电,具有容量优势的常用转化方式即为各种动力循环:蒸汽朗肯循环<sup>[9]</sup>、超临界二氧化碳

(Supercritical Carbon Dioxide,  $\text{SCO}_2$ )布雷顿循环<sup>[10]</sup>和氦气布雷顿循环<sup>[11]</sup>。

## 1 蒸汽朗肯循环

### 1.1 蒸汽朗肯循环技术原理

朗肯循环是热力发电厂的典型热力循环之一,是一种基于水-水蒸气的热力学循环,用于将热能转化为机械能,主要包括以下4个基本过程(如图1所示)<sup>[9]</sup>:

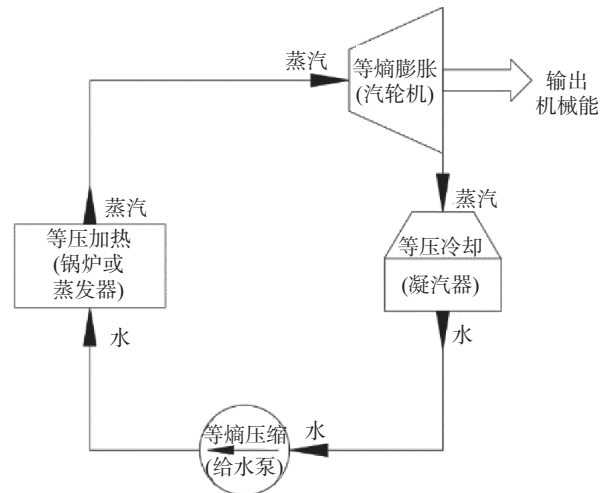


图1 蒸汽朗肯循环过程图

Fig. 1 Diagram of the steam Rankine cycle process

1) 等熵压缩: 液态工质(通常是水)在泵中被压缩,压力升高,温度略有上升。

2) 等压加热: 液态工质在锅炉(或蒸发器)中吸收热量,变为高温高压的蒸汽。

3) 等熵膨胀: 高温高压蒸汽在汽轮机中膨胀,对外做功转化为机械能,温度和压力降低。

4) 等压冷却: 膨胀后的蒸汽在凝汽器中放热,凝结成液态,完成循环。

### 1.2 蒸汽朗肯循环在发电领域的应用与发展

蒸汽朗肯循环以其系统结构简单、工质与环境兼容、能量转换可靠等特点,自19世纪中叶问世以来,便在发电领域推广应用,到20世纪末,已发展成为世界主要的电力生产工艺循环,普遍应用于光热发电、生物质发电、地热发电、火力发电和核裂变发电等热力发电领域。目前,蒸汽朗肯循环发电技术依然在高参数超超临界<sup>[12]</sup>和有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, ORC)<sup>[13]</sup>2个方面持续发展,前者旨在

通过提高系统初参数以探索高品位热源利用效率,后者旨在利用有机工质低沸点和高蒸发潜热的特性探索低品位热源利用效率。

目前,成熟的超超临界蒸汽朗肯循环发电机组,主蒸汽参数达到 32 MPa(a)/605 °C,再热蒸汽温度达到 623 °C。分别采用更高参数 630 °C 和 650 °C 的大唐郟城项目和和华能玉环四期项目已进入工程建设阶段,标志着我国在耐高温材料开发以及设备制造方面取得了突破,电力行业发展进入了新阶段。

## 2 超临界二氧化碳布雷顿循环

SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环发电技术是一种新兴的高效热功转换技术,近年来在能源领域备受关注。它利用 SCO<sub>2</sub> 作为工质,结合布雷顿循环原理,具有效率高、体积小和环境友好等特点,被认为在光热发电、核能和余热利用等领域具有广阔应用前景。

### 2.1 超临界二氧化碳布雷顿循环技术原理

CO<sub>2</sub> 是一种常见物质,通常以气态形式呈现,但当其超过临界参数(31.1 °C、7.38 MPa)时,其液态与气态之间的相界面消失,兼具气体(低黏度、高扩散性)和液体(高密度、高导热性和强溶解)的双重特性,可实现低压压缩功耗和高热传递效率。

SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环作为基于布雷顿循环将热能转换为机械能的闭式动力循环。其主要分为以下 4 个过程(其温熵图见图 2)<sup>[14]</sup>:

等熵压缩(过程 1—2): SCO<sub>2</sub> 经过压缩机压缩后,温度和压力均得到提升。

等压加热(过程 2—3): SCO<sub>2</sub> 通过换热器从热源吸收热量,温度得到进一步提升。

等熵膨胀(过程 3—4): 高温高压 SCO<sub>2</sub> 在膨胀机中膨胀对外做功,输出机械能。

等压冷却(过程 4—1): SCO<sub>2</sub> 经外部冷源冷却后重新进入压缩过程,构成闭式循环。

### 2.2 超临界二氧化碳布雷顿循环在发电领域的应用与发展

SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环发电技术的研究可以追溯到 20 世纪 40 年代<sup>[15]</sup>,在 20 世纪 60—70 年代收获了阶段性的成果<sup>[16-17]</sup>。Angelino 和 Feher 最先发现,以 SCO<sub>2</sub> 作为循环工质的闭式布雷顿循环,存在特定的最佳温度范围,能让系统在压缩功处于最小值时,达成最高的循环效率<sup>[15-16]</sup>。不过,后续由于动力机械和换热器的设计制造水平无法满足整体循环需求等多种原因,该发电系统的研究陷入停滞,未能取得实质性进展。直至 2003 年,美国能源部核能办公室率先启动了 SCO<sub>2</sub> 循环评估工作<sup>[18]</sup>。在 Sandia 国家实验室牵头下,麻省理工学院对 SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环应用于核能发电的可行性、热力学性能、经济性、核心部件选型、系统总体布置及控制方式等展开全面分析,证实这种循环方式是提升循环效率的理想选择,且具备实际可行性<sup>[19]</sup>。Knolls 原子能实验室与 Bettis 原子能实验室合作搭建了 100 kW 级超临界二氧化碳布雷顿循环系统整体试验平台<sup>[20]</sup>。2010 年, Sandia 国家实验室联合 Barber Nichols 公司设计建造了 2 套 250 kW 超临界二氧化碳分流再压缩式布雷顿循环装置,并针对压缩机性能、透平组件、启动特性、平衡发电技术、管道系统、气膜轴承、密封部件以及二氧化碳混合循环工质等进行了测试,积累了大量宝贵数据和经验<sup>[21]</sup>。该实验室还建造了机组功率 125 kW、涡轮机转速 7500 r/min 的试验装置,并详细分析了各关键部件的能量损失及分配情况,成功研发出发电效率大于 50%、体积为相同功率等级传统蒸汽设备 1/30 的超临界二氧化碳布雷顿循环涡轮机<sup>[22]</sup>。2016 年 10 月,美国能源部批准一项为期 6 年、投资 8000 万美元的 10 MW 闭式超临界二氧化碳布雷顿循环实验装置建设项目,目标是实现透平入口温度 700 °C、循环效率超 50%<sup>[23]</sup>。近年来,美国不断加大投入,加速推动该发电技术发展,目前技术成熟度已较高,距离商业化应用越来越近<sup>[24]</sup>。除美国外,

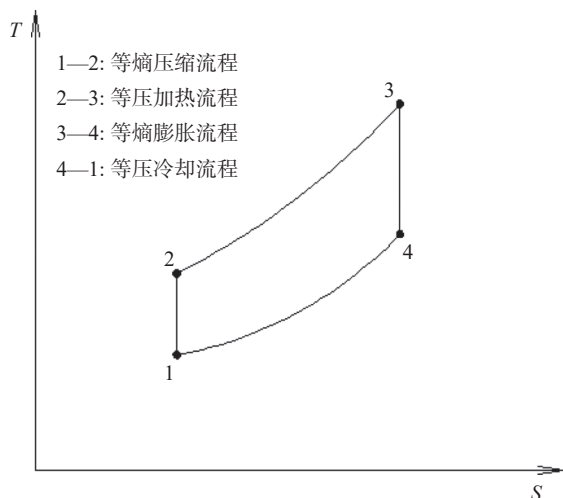


图 2 SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环温熵图

Fig. 2 SCO<sub>2</sub> Brayton cycle temperature entropy diagram

韩国先进科技研究所(KAIST)也深入开展了超临界二氧化碳布雷顿循环试验系统研究,制定了从压缩机试验到简单回热循环试验,再到实现再压缩循环试验的研究路线,现已搭建好超临界二氧化碳压缩试验台<sup>[25-27]</sup>。日本东京工业大学的 Y. Muto 等<sup>[28]</sup>开展了超临界二氧化碳布雷顿循环在火力发电领域的应用研究,并完成了 300 MW 电厂的系统设计及关键部件初步设计。法国 EDF 公司的 Moullec 提出将超临界二氧化碳循环应用于火力发电的概念电厂,且该电厂可与二氧化碳捕集技术相结合<sup>[24]</sup>。从 2010 年起,国内部分高校和科研院所也开始涉足相关领域的理论与实验研究。西安交通大学何雅玲对太阳能和核能  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环构建、优化及经济性评价进行了系统研究<sup>[29-30]</sup>。中国核动力研究设计院已完成了核能  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环国防 973 项目<sup>[10]</sup>。西安热工研究院有限公司建成了 5 MW 燃气驱动  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环实验设施<sup>[31]</sup>。清华大学姜培学在微小尺度管内  $\text{SCO}_2$  对流传热方面取得了丰富的研究成果<sup>[32-33]</sup>。

在核能发电领域,超临界二氧化碳布雷顿循环最适合应用于第四代高温气冷快堆、钠冷快堆、铅冷快堆和钍基熔盐堆,在这些反应堆出口温度范围  $400 \sim 750 \text{ }^\circ\text{C}$  时,具有热效率高、结构紧凑、便于模块化建造、缩短建设周期和降低建设成本的优势<sup>[34]</sup>。

在火力发电领域,通过与蒸汽朗肯循环发电比较,超临界二氧化碳布雷顿循环具有高循环效率,尤其在超临界状态下,由于避免了工质相态的改变,减少了压缩功的消耗,使得整体发电效率得到显著提升。经模拟分析,1 GW 超超临界二氧化碳燃煤发电系统发电效率比传统蒸汽朗肯循环提高 1.21%<sup>[35]</sup>。

在太阳能光热发电领域,超临界二氧化碳布雷顿循环在  $500 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  范围具有高效率、高密度和循环简单的优势,恰好与太阳能光热发电的运行温度相匹配<sup>[36]</sup>。以太阳能作为热源,将超临界二氧化碳布雷顿循环应用于聚光型太阳能光热发电系统,技术集成难度较小,可提高太阳能光热发电效率、降低成本,提高太阳能发电的竞争力。

在舰船发电及推进领域,  $\text{SCO}_2$  发电系统在提高发电效率、节省能源、减小发电系统体积和重量、降低噪声影响等诸多方面具有优势,在舰船上有巨大的应用价值。

当前,超临界二氧化碳在发电领域已基本完成工程试验并向示范项目落地推进,透平、压缩机、换热器、参数优化、系统调试和控制等关键技术随着工程试验项目的建成和成功运行得到验证,为行业走向规模化发展奠定基础。

### 2.3 超临界二氧化碳布雷顿循环典型布局

典型  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环有简单回热布雷顿循环、分流再压缩布雷顿循环、再热再压缩布雷顿循环和间冷再压缩布雷顿循环 4 种,其流程分别见图 3—图 6。简单回热布雷顿循环中,高温高压  $\text{SCO}_2$  经透平膨胀对外做功后,经回热器将剩余能量传递给压缩机出口工质,并经外部冷却剂进一步降温后进入压缩机增压,经压缩后的  $\text{SCO}_2$  在回热器中由透平出口工质进行预热,然后进入热源吸热后进入透平膨胀做功,进而进入下一个循环。分流再压缩布雷顿循环在简单回热布雷顿循环的基础上将回热器扩展为低温回热器和高温回热器,并将压缩机分为主压缩机和再压缩机,低温回热器出口工质分流为两路,一路经外部冷却剂冷却后进入主压缩机,另一路直接进入再压缩机,二者在低温回热器出口进行汇合同进入高温回热器。分流再压缩循环降低了回热器中高、低压侧流体热容量差距,规避了回热器内部由于传热恶化产生的夹点问题,提高了循环效率<sup>[37]</sup>。再热再压缩布雷顿循环在分流再压缩循环的基础上将透平扩展为低压透平和高压透平,高压透平出口工质进入热源再热后进入低压透平进行二次做功,通过提高整个循环的平均吸热温度,从而提高循环效率。间冷再压缩布雷顿循环在分流再压缩循环的

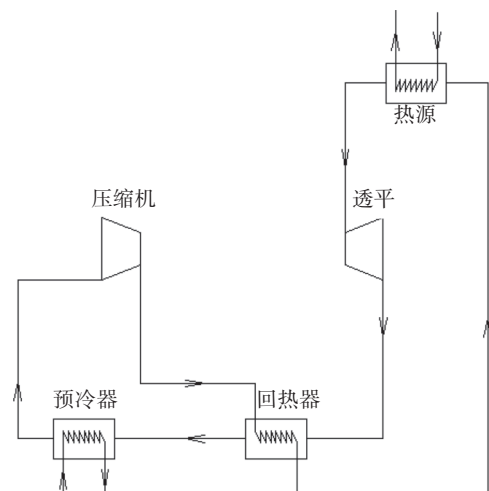


图3 简单回热布雷顿循环工艺流程

Fig. 3 The process flow of the simple regenerative Brayton cycle

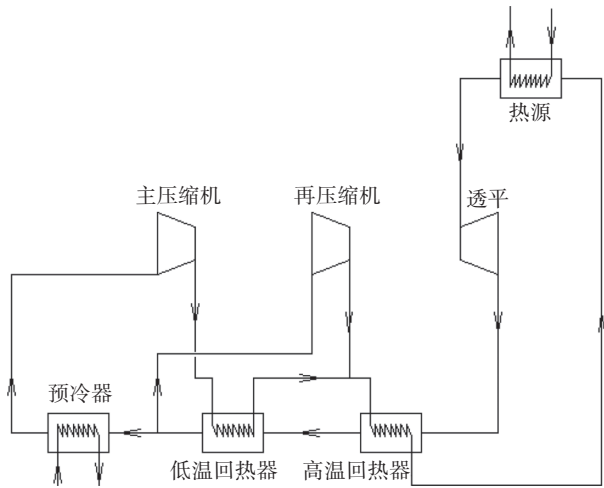


图 4 分流再压缩布雷顿循环工艺流程

Fig. 4 The process flow of the split-flow and recompression Brayton cycle

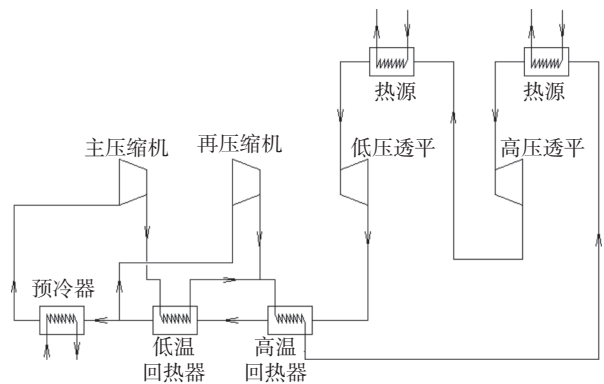


图 5 再热再压缩布雷顿循环工艺流程

Fig. 5 The process flow of the reheating and recompression Brayton cycle

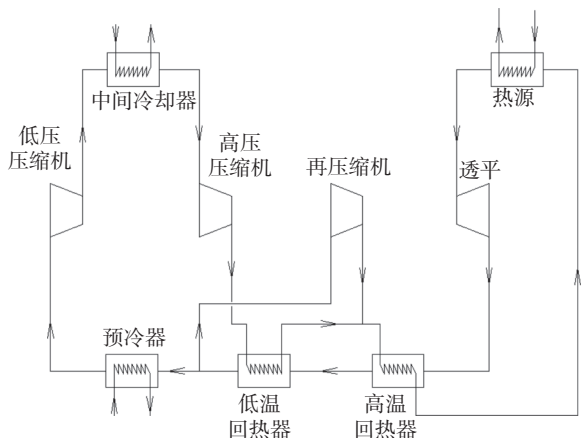


图 6 间冷再压缩布雷顿循环工艺流程

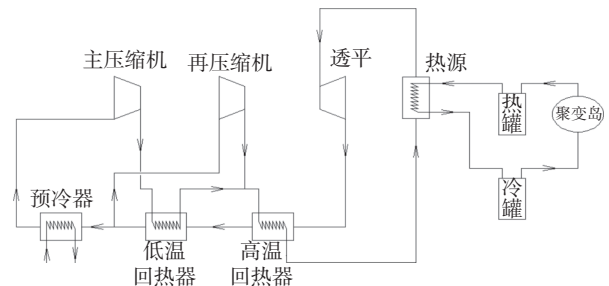
Fig. 6 The process flow of the intercooling and recompression Brayton cycle

基础上将主压缩机扩展为低压压缩机和高压压缩机,并在二者之间增加中间冷却器利用外部冷却剂冷却  $\text{SCO}_2$ , 通过对进入高压压缩机的工质进行预冷压缩, 以减少压缩机的功耗, 从而提高循环效率<sup>[37]</sup>。

由上述分析可以看出, 分流再压缩布雷顿循环是各种先进循环研究的基础, 在膨胀机进口温度为  $500\text{ }^\circ\text{C}$  时, 简单回热、分流再压缩、再热再压缩和间冷再压缩的理论循环效率分别为 29%、34%、37% 和 36%<sup>[38]</sup>。综合考虑系统复杂性以及循环效率高效性, 本文选取分流再压缩循环作为超临界二氧化碳布雷顿循环的典型循环。

## 2.4 超临界二氧化碳布雷顿循环在核聚变发电领域的应用

$\text{SCO}_2$  布雷顿循环和核聚变反应堆均为当前发电领域处于试验和工程探索阶段的前沿技术, 随着基于  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环在需要储能的光热发电领域和高参数四代核电领域应用的持续研发和工程试验, 将为  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环应用于核聚变示范电站积累丰富的经验, 目前  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环研究试验进展也快于核聚变相关研究和试验, 在时间顺序上也存在极大的可行性。典型的  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环和核聚变耦合的工艺流程见图 7。

图 7 基于熔盐储能的  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环核聚变电站工艺流程Fig. 7 The process flow of the  $\text{SCO}_2$  Brayton cycle nuclear fusion power station based on molten salt energy storage

## 3 氦气布雷顿循环

### 3.1 氦气布雷顿循环技术特点

氦气布雷顿循环与  $\text{SCO}_2$  布雷顿循环均为闭式布雷顿循环基于不同工作介质的应用, 其循环过程是一致的。与  $\text{SCO}_2$  相比, 氦气的稳定性和热传导性更好, 但其密度更小且更难于压缩。作为布雷顿循环工质, 与  $\text{SCO}_2$  相比, 其需要更高的温度才能达到

较好的效率,压缩过程需要更多的功耗,换热和做功部件的体积也会相应更大<sup>[39]</sup>。

### 3.2 氦气布雷顿循环在发电领域的应用与发展

氦气具有很好的稳定性、化学相容性和热传导性,因此,世界上的高温气冷堆均使用氦气作为冷却工质<sup>[39]</sup>。高温气冷堆堆芯最高温度低于 1600 °C,能够提供 700 ~ 950 °C 的高温氦气。采用传统蒸汽朗肯循环不能充分发挥其高温潜力,若能采用氦气布雷顿循环直接发电,则可充分发挥其出口温度高的优势,提高发电效率并降低发电成本<sup>[40]</sup>。

氦气布雷顿循环伴随高温气冷堆技术发展逐步开展研究。联邦德国在 20 世纪 70 年代开展了 HHT 项目研究,建成透平和压气机组的实验装置 HHV 和 50 MW 的以焦炉煤气为燃料、氦气为工质的试验电厂 Oberhausen-2,并在 1975—1978 年间在 30 MW 负荷下运行近 10000 h<sup>[40]</sup>。美国 GA 公司在 20 世纪 70 年代开展设计一个 800 ~ 1200 MW 的大型高温气冷堆氦气透平电厂 HTGR-GT,但遇到了利用储气罐进行负荷调节难以实现、利用旁通调节负荷将大大降低循环效率、透平检修遭遇放射性物质、换热设备体积庞大导致造价升高的技术难题<sup>[40]</sup>。随着模块式高温气冷堆技术发展,20 世纪 80 年代中叶,美国麻省理工学院 L.M.Lidsky、J.E.Staudt 和 X.L.Yan 等开发了直接氦气布雷顿循环装置 MGR-GT 和 MGR-GTS,采用板翅式回热器、磁悬浮轴承、采用储气罐调节负荷<sup>[40]</sup>。为了避免直接氦气布雷顿循环放射性在透平叶片上的沉积以及氦气透平断轴、飞车等事故引起的压力波对反应堆产生冲击,X.L.Yan 和 L.M.Lidsky 等提出了在反应堆和氦气透平回路间增加中间换热器的间接氦气布雷顿循环方案 MGR-GTI<sup>[40]</sup>。清华大学核能技术设计研究院结合 10 MW 小型高温气冷试验堆的建造研究气体透平循环<sup>[40]</sup>。美国和俄罗斯合作开发的 GT-MHR 计划<sup>[41]</sup>、日本的 GTHT300 计划<sup>[42-43]</sup> 和我国清华大学核研院的 HTR-10GT 计划<sup>[44]</sup> 均采用直接氦气布雷顿循环。南非的 PBMR 计划原设计为直接氦气布雷顿循环,后由于财政等问题于 2009 年更改为蒸汽朗肯循环<sup>[44]</sup>。

我国华能石岛湾高温气冷堆核电站于 2023 年 12 月 6 日建成并投运,是全球首座实现商业化运行的第四代核电站,也是中国具有完全自主知识产权的国家科技重大专项标志性成果,完成世界首台大

功率、高温热态、采用电磁轴承结构支撑的主氦风机投产应用,实现氦气在热源端的工程应用,为推动下一阶段采用氦气透平直接能量转换实现氦气布雷顿循环发电奠定基础。

### 3.3 氦气布雷顿循环典型布局

氦气布雷顿循环是一个带有中间冷却器、预冷器和回热器的闭式布雷顿循环,其温熵图见图 8,循环流程图见图 9。氦气透平的排气仍然具有较高温度,其通过回热器将热量传递给压缩机出口的工质,在低压压气机和高压压气机之间设置中间冷却器,以降低压缩机功耗,设置回热器和中间冷却器均可以提高循环效率。

### 3.4 氦气布雷顿循环在核聚变发电领域的应用

与 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环一样,氦气布雷顿循环为当前发电领域处于试验和工程探索阶段的前沿技术,

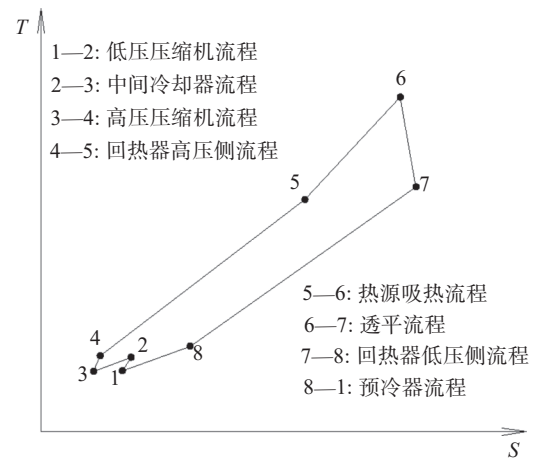


图 8 氦气布雷顿循环温熵图

Fig. 8 Helium Brayton cycle temperature entropy diagram

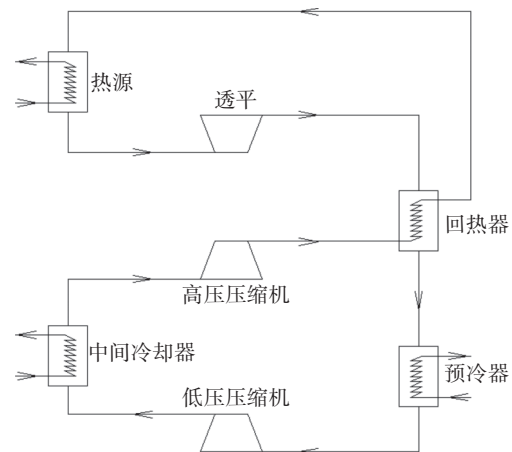


图 9 氦气布雷顿循环工艺流程

Fig. 9 The process flow of the helium Brayton cycle

随着氦气布雷顿循环在高温气冷堆发电领域应用的持续研发和工程试验,将为氦气布雷顿循环应用于核聚变示范电站积累丰富的经验。典型的氦气布雷顿循环和核聚变耦合的工艺流程见图 10。

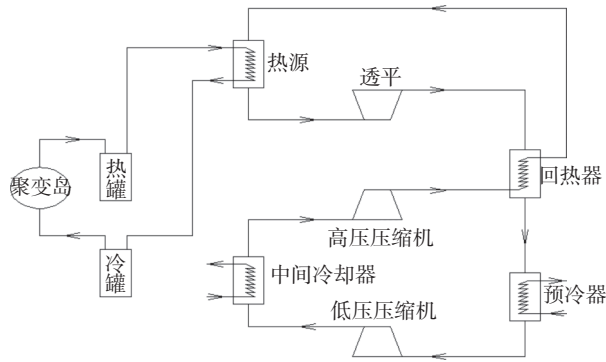


图 10 基于熔盐储能的氦气布雷顿循环核聚变电站工艺流程

Fig. 10 The process flow of the helium Brayton cycle nuclear fusion power station based on molten salt energy storage

## 4 动力循环发电技术路线选择

核聚变电站动力循环发电技术路线选择基于我国自主设计研制并联合国际合作的 CFETR, 其额定热功率按 1.25 GW, 运行规律为: 以额定功率稳定运行 2 h, 而后无功率输出 20 min, 接着再以额定功率运行 2 h, 如此周而复始。聚变堆采用氦气作为包层冷却介质, 氦气工作温度按 300 ~ 600 °C。采用二元硝酸盐(太阳盐, 40% KNO<sub>3</sub> 和 60% NaNO<sub>3</sub> 的混合盐)<sup>[45]</sup> 作为中间储能介质, 储能容量为 357.14 MWh, 熔盐工作温度为 292.7 ~ 560 °C。通过中间熔盐储能系统将聚变岛间断输出功率转换为连续输出功率 1.07143 GW, 考虑熔盐蓄热过程和放热过程中的能量损失, 储能效率暂按 99.5%, 即动力循环接收到的热功率按 1.0661 GW。考率太阳盐低于 238 °C 时开始结晶, 动力循环进入热源吸热的工质温度限制为不低于 250 °C。

### 4.1 蒸汽朗肯循环效率

罗贤勇等针对中国聚变工程实验堆 CFETR, 基于仿真软件 Epsilon 对热核聚变发电岛三回路参数进行了优化, 推荐蒸汽朗肯循环采用 9 级回热方案(3 台高压加热器+5 台低压加热器+1 台除氧器), 其中主蒸汽参数为 12.4 MPa(a)/540 °C 的朗肯循环汽轮发电机组功率为 477.48 MW<sup>[46]</sup>, 主蒸汽流量为约 403.469 kg/s, 考虑发电机效率 98.5%, 凝泵功率

496 kW, 给水泵功率 10.903 MW, 折算循环效率(汽轮机功率扣除凝结水泵和给水泵功率后, 与热源吸热功率 1.0661 GW 的比值)为 44.4%。

## 4.2 超临界二氧化碳布雷顿循环效率

### 4.2.1 模型建立及计算误差对比

SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环采用典型的分流再压缩循环, 见图 4。利用可以模拟复杂工艺过程的软件 Aspen HYSYS 对 SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环进行建模, 采用的模块及输入参数如表 1 所示, 物性包采用学术界公认的 REFPROP<sup>[47-49]</sup>。分流再压缩循环主要工况参数和主要设备参数如表 2 所示<sup>[50]</sup>, 循环模型如图 11 所示。

表 1 Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环模型中模块及输入参数

Tab. 1 Modules and input parameters in the Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> Brayton cycle model

设备	模块	输入参数
透平	膨胀器	入口温度及效率
高温回热器	板式换热器	冷端温差及压降
低温回热器	板式换热器	冷端温差及压降
预冷器	换热器	出口温度压力及压降
主压缩机	压缩机	入口温度压力、出口压力及效率
再压缩机	压缩机	效率
分流器	三通	流量份额
汇合器	混合器	无
热源	加热器	出口温度、功率及压降

透平(K-102) 出口的低压高温 CO<sub>2</sub> 工质(2) 经高温回热器(Plate-101) 和低温回热器(Plate-100) 换热后(4) 被分为 2 个部分, 一部分(4-1) 进入预冷器(E-101) 降温后进入主压缩机(K-100), 另一部分(4-2) 被直接送入再压缩机(K-101) 经加压后(8) 与经主压缩机加压(6) 在低温回热器换热后的工质(7) 合流后(9) 在高温回热器中换热, 换热后工质(10) 在热源(E-100) 吸热后(1) 进入透平做功。

SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环模拟计算各状态点计算结果见表 3, 各主要设备模拟结果见表 4。

由表 4 可以看出, Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环效率计算结果与文献 [50] 相比, 误差仅为 -1.39%, 表明本文选用的模拟软件 Aspen HYSYS、物性包 REFPROP 以及所选模块完全适用于 SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环的模拟计算。

表 2 Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环模型中初始条件及设备参数

Tab. 2 Initial conditions and device parameters in the Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> Brayton cycle model

参数名称	数值
透平效率	0.93
压缩机效率	0.89
热源功率/MW	600
冷却水入口温度/°C	25
回热器冷端端部温差/°C	10
主压缩机入口温度/°C	32
主压缩机入口压力/MPa(a)	7.7
系统总压降/MPa	0.65
系统最高温度/°C	550
系统最高压力/MPa(a)	20
热源入口温度/°C	395.5
主压缩机流量份额	0.6

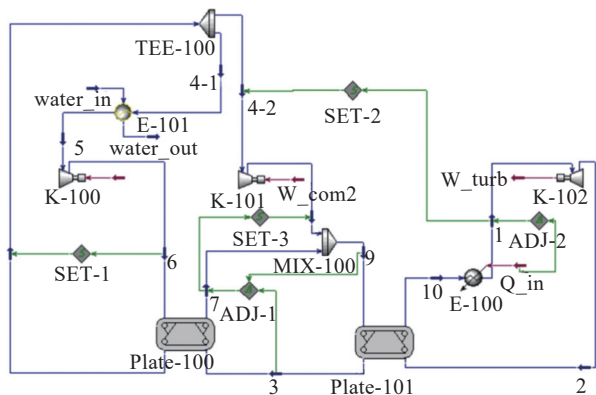


图 11 Aspen HYSYS 建立的 SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环模型  
Fig. 11 The SCO<sub>2</sub> split-flow and recompression cycle model established by Aspen HYSYS

4.2.2 针对 CFETR 边界条件的 SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环模拟分析

1) 与 CFETR 边界条件相匹配的 SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环主要工况参数

CFETR 一回路热量经二元硝酸盐作为储热介质转换后传递给 SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环工质的热功率为 1.0661 GW, 进入热源换热器吸热的 SCO<sub>2</sub> 温度不应

表 3 Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环各状态点计算结果  
Tab. 3 The calculation results of each state point of the Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> Brayton cycle

状态点	温度/°C	压力/MPa(a)	流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	550	19.64	3 133.58	1 035.4
2	439.3	7.99	3 133.58	913.14
3	162.5	7.87	3 133.58	597.22
4	70.9	7.75	3 133.58	480.22
4-1	70.9	7.75	1 880.15	480.22
4-2	70.9	7.75	1 253.43	480.22
5	32	7.7	1 880.15	306.23
6	60.9	20	1 880.15	326.75
7	148.8	19.88	1 880.15	521.76
8	158.5	19.88	1 253.43	537.35
9	152.6	19.88	3 133.58	527.99
10	394.3	19.76	3 133.58	843.91

低于 250 °C。高温回热器和低温回热器一般采用可耐高温高压的印刷电路板式换热器(PCHE), 可在控制换热设备体积的前提下实现较低的端部温差和较高的效率, 本文计算取回热器冷端端部温差为 10 °C<sup>[50]</sup>。主压缩机入口温度和压力取略高于临界点的温度和压力, 即 32 °C 和 7.7 MPa(a)<sup>[50]</sup>。透平效率取 93%, 压缩机效率取 89%, 与文献 [50] 一致。热源换热器为熔盐和 SCO<sub>2</sub> 换热, 其热端端差参考间接式 SCO<sub>2</sub> 塔式太阳能热发电系统取为 20 °C<sup>[48]</sup>, 熔盐进口温度为 560 °C, 则 SCO<sub>2</sub> 出口温度取 540 °C, 该温度与蒸汽朗肯循环主蒸汽温度相同, 利于二者进行比较。系统最高压力取 20 MPa(a), 系统压降取 0.65 MPa<sup>[50]</sup>, 冷却水入口温度取 25 °C, 主压缩机流量份额取 0.6。SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环主要工况参数如表 5 所示。

2) 系统主要参数对循环效率的影响

以 Aspen HYSYS 建立的 SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环模型和与 CFETR 边界条件相匹配的主要工况参数为基础, 分析主压缩机流量份额、主压缩机入口压力和主压缩机出口压力对循环效率的影响。

(1) 主压缩机流量份额

表 4 Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环各主要设备计算结果

Tab. 4 The calculation results of the main devices of the Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> Brayton cycle

热源功率/MW	高温回热器功率/MW	低温回热器功率/MW	预冷器功率/MW	主压缩机功率/MW	再压缩机功率/MW	透平功率/MW	循环效率/%	文献循环效率 <sup>[50]</sup> /%	误差/%
600.00	989.96	366.63	327.11	38.58	71.61	383.08	45.48	46.12	-1.39

表 5 Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环模型中  
初始条件及设备参数

Tab. 5 Initial conditions and device parameters in the Aspen  
HYSYS SCO<sub>2</sub> Brayton cycle model

参数名称	数值
透平效率	0.93
压缩机效率	0.89
热源功率/GW	1.066 1
冷却水入口温度/°C	25
回热器冷端端部温差/°C	10
主压缩机入口温度/°C	32
主压缩机入口压力/MPa(a)	7.7
系统总压降/MPa	0.65
系统最高温度/°C	540
系统最高压力/MPa(a)	20
热源入口温度/°C	≥250
主压缩机流量份额	0.6

主压缩机流量份额与循环效率的关系如图 12 所示,由图可以看出,循环效率随着主压缩机流量份额的升高而逐渐降低,几成线性变化。进入主压缩机的工质会先经过预冷器由外部冷却介质进行冷却,这也意味着热量会被带出循环外,从而降低整个循环效率。因此,为取得较高的循环效率,应尽可能降低主压缩机流量份额,但随着主压缩机流量份额逐渐减小,主压缩机后工质在低温回热器后温度会随着流量减少而逐渐增高,并接近低温回热器热侧入口工质温度,考虑低温回热器热端端差不小于 0,则主压缩机流量份额取为 41%。

### (2) 主压缩机入口压力

主压缩机入口压力与循环效率的关系如图 13

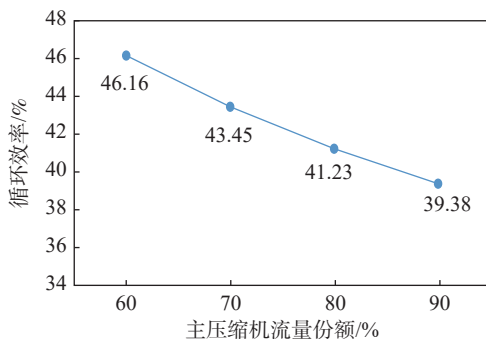


图 12 主压缩机流量份额对循环效率影响

Fig. 12 Effect of the flow share of the main compressor  
on the cycle efficiency

所示,由图可以看出,循环效率随着主压缩机入口压力的升高而逐渐降低。主压缩机入口压力升高,再压缩机入口压力和透平出口压力会相应升高,在压缩机出口和透平入口压力不变的条件下,压缩机功耗会减小,透平做功也会减少,透平减少的做功大于压缩机减少的耗功,循环效率逐渐降低。因此,为取得较高的循环效率,应尽可能降低主压缩机入口压力,但随着主压缩机入口压力逐渐减小,主压缩机后工质温度会逐渐升高,导致低温回热器冷侧出口工质温度升高并接近热侧入口工质温度,考虑低温回热器热端端差不小于 0,主压缩机入口压力取为 7.7 MPa(a)。

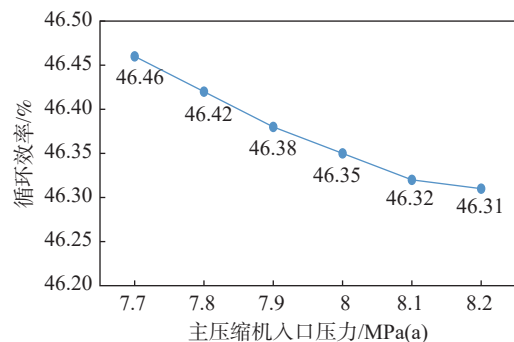


图 13 主压缩机入口压力对循环效率影响

Fig. 13 Effect of the inlet pressure of the main compressor  
on the cycle efficiency

### (3) 主压缩机出口压力

主压缩机出口压力与循环效率的关系如图 14 所示,由图可以看出,循环效率随着主压缩机出口压力的升高而逐渐升高。主压缩机出口压力升高,在其他条件不变的情况下,透平做功和压缩机耗功均会增加,透平增加的做功大于压缩机增加的耗功,循

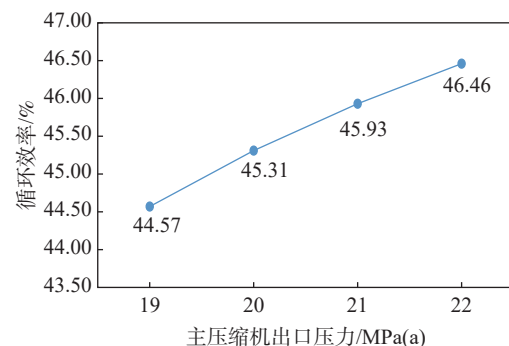


图 14 主压缩机出口压力对循环效率影响

Fig. 14 Effect of the outlet pressure of the main compressor  
on the cycle efficiency

效率逐渐升高。因此,为取得较高的循环效率,应尽可能增加主压缩机出口压力,考虑低温回热器热端端差不小于0,主压缩机出口压力取为22 MPa(a)。

### 3)SCO<sub>2</sub>布雷顿循环最终优化成果

经过对系统主要参数与循环效率的关系进行分析,取得最优的系统参数,即主压缩机流量份额41%、主压缩机入口压力7.7 MPa(a)、主压缩机出口压力22 MPa(a)。经计算,SCO<sub>2</sub>分流再压缩循环效率为46.46%,工质流量为5400.20 kg/s,各状态点计算结果见表6,各主要设备模拟结果见表7。

表6 Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub>布雷顿循环各状态点优化计算结果

Tab. 6 The optimization calculation results of each state point of the Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> Brayton cycle

状态点	温度/℃	压力/MPa(a)	流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	540	21.64	5400.20	1021.6
2	418.6	7.99	5400.20	889.03
3	193.1	7.87	5400.20	632.3
4	74.2	7.75	5400.20	485.37
4-1	74.2	7.75	3186.12	485.37
4-2	74.2	7.75	2214.08	485.37
5	32	7.7	3186.12	306.23
6	64.2	22	3186.12	329.84
7	190.9	21.88	3186.12	578.86
8	172.2	21.88	2214.08	550.95
9	183.1	21.88	5400.20	567.42
10	380.4	21.76	5400.20	824.15

表7 Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub>布雷顿循环各主要设备优化计算结果

Tab. 7 The optimization calculation results of the main devices of the Aspen HYSYS SCO<sub>2</sub> Brayton cycle

热源	高温回热器	低温回热器	预冷器	主压缩机	再压缩机	透平	循环效率/%
功率/GW	功率/GW	功率/MW	功率/MW	功率/MW	功率/MW	功率/MW	
1.0661	1.38639	793.40	570.75	75.19	145.18	715.63	46.46

## 4.3 氦气布雷顿循环效率

### 4.3.1 模型建立及计算误差对比

氦气布雷顿循环采用带有中间冷却器、预冷器和回热器的闭式循环,见图9。利用软件Aspen HYSYS对氦气布雷顿循环进行建模,采用的模块及输入参数如表8所示,物性包采用学术界公认的

REFPROP。循环主要工况参数和主要设备参数如表9所示<sup>[11]</sup>,循环模型如图15所示。

表8 Aspen HYSYS 氦气布雷顿循环模型中模块及输入参数

Tab. 8 Modules and input parameters in the Aspen HYSYS helium Brayton cycle model

设备	模块	输入参数
透平	膨胀器	入口温度及效率
回热器	换热器	冷端端差及压降
预冷器	冷却器	出口温度压力及压降
中间冷却器	冷却器	入口压力、出口温度及压降
低压压缩机	压缩机	入口温度压力、出口压力及效率
高压压缩机	压缩机	入口温度及效率
热源	加热器	出口温度、功率及压降

表9 Aspen HYSYS 氦气布雷顿循环模型中初始条件及设备参数

Tab. 9 Initial conditions and device parameters in the Aspen HYSYS helium Brayton cycle model

参数名称	数值
透平效率	0.90
压缩机效率	0.89
热源功率/MW	310
压缩机入口温度/℃	35
低压压缩机入口压力/MPa(a)	2.56
压力损失/%	5
系统最高温度/℃	900
系统最高压力/MPa(a)	7
热源入口温度/℃	550

透平(K-102)出口的低压高温氦气工质(5)经回热器(E-102)换热后(6)进入预冷器(E-103)降温后进入低压压缩机(K-100),经压缩后(2-1)进入中间冷却器(E-104)二次降温后(2-2)进入高压压缩机(K-101),出口工质(2)经回热器升温后(3)在热源(E-100)吸热后(4)进入透平做功。

氦气布雷顿循环模拟计算各状态点计算结果见表10,各主要设备模拟结果见表11。

由表11可以看出,Aspen HYSYS 氦气布雷顿循环效率计算结果与文献[11]相比,误差仅为1.38%,表明本文选用的模拟软件Aspen HYSYS、物性包REFPROP以及所选模块完全适用于氦气布雷顿循

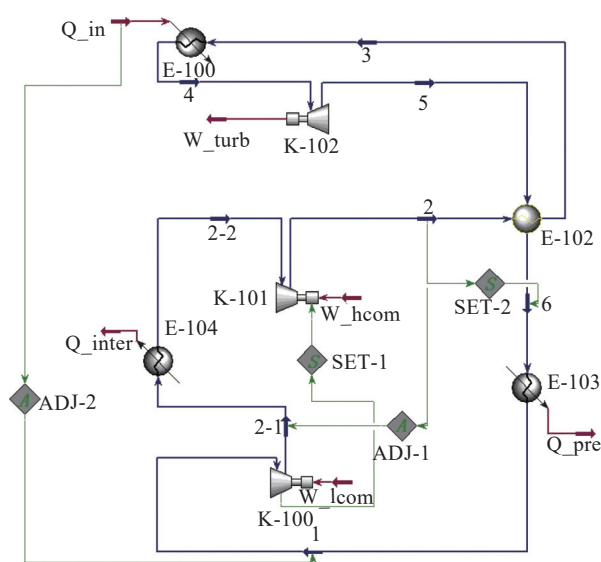


图 15 Aspen HYSYS 建立的氦气布雷顿循环模型

Fig. 15 The helium Brayton cycle model established by Aspen HYSYS

表 10 Aspen HYSYS 氦气布雷顿循环各状态点计算结果

Tab. 10 The calculation results of each state point of the Aspen HYSYS helium Brayton cycle

状态点	温度/℃	压力/MPa(a)	流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	35	2.56	170.7	1613.8
2	112.7	7.00	170.7	2032
2-1	112.7	4.25	170.7	2023
2-2	35	4.22	170.7	1619.2
3	550	6.92	170.7	4300.9
4	900	6.83	170.7	6117
5	574.1	2.71	170.7	4413.1
6	137.1	2.63	170.7	2144.2

环的模拟计算。

#### 4.3.2 针对 CFETR 边界条件的氦气布雷顿循环模拟分析

1) 与 CFETR 边界条件相匹配的氦气布雷顿循环主要工况参数

与上文 SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环模拟相同, 热源功率按 1066.1 MW, 进入热源换热器吸热的氦气温度不应低于 250 ℃。回热器采用印刷电路板式换热器

(PCHE), 冷端端部温差为 10 ℃<sup>[50]</sup>。低压压缩机入口温度和压力取 35 ℃ 和 2.56 MPa(a)<sup>[11]</sup>。透平效率取 90%, 压缩机效率取 89%, 与文献 [11] 一致。热源出口氦气温度取 540 ℃, 该温度与蒸汽朗肯循环以及 SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环最高介质温度相同, 利于进行比较。系统最高压力取 7 MPa(a), 系统压降取 5%<sup>[11]</sup>, 冷却水入口温度取 25 ℃。氦气布雷顿循环主要工况参数如表 12 所示。

#### 2) 系统主要参数对循环效率的影响

以 Aspen HYSYS 建立的氦气布雷顿循环模型和与 CFETR 边界条件相匹配的主要工况参数为基础, 分析高压压缩机出口压力、低压压缩机入口温度和高压压缩机入口温度对循环效率的影响。

##### (1) 高压压缩机出口压力

高压压缩机出口压力与循环效率的关系如图 16 所示, 由图可以看出, 循环效率随着高压压缩机出口压力的升高而先升高后降低, 存在一个循环效率最高值对应的高压压缩机出口压力。根据优化结果, 高压压缩机出口压力取为 5.5 MPa(a)。

##### (2) 低压压缩机入口温度

低压压缩机入口温度与循环效率的关系如图 17 所示, 由图可以看出, 循环效率随着低压压缩机入口温度的升高而线性降低。低压压缩机入口温度升高, 低压压缩机耗功增加, 高压压缩机耗功和透平做功不变, 循环效率逐渐降低。因此, 为取得较高的循环效率, 应尽可能降低低压压缩机入口温度, 由于外部冷却水温度为 25 ℃, 预冷器端差按 5 ℃, 低压压缩机入口温度最低取为 30 ℃。

##### (3) 高压压缩机入口温度

高压压缩机入口温度与循环效率的关系如图 18 所示, 由图可以看出, 循环效率随着高压压缩机入口温度的升高而线性降低。与低压压缩机入口温度分析类似, 高压压缩机入口温度最低取为 30 ℃。

#### 3) 氦气布雷顿循环最终优化成果

经过对系统主要参数与循环效率的关系进行分析, 取得最优的系统参数, 即高压压缩机出口压

表 11 Aspen HYSYS 氦气布雷顿循环各主要设备计算结果

Tab. 11 The calculation results of the main devices of the Aspen HYSYS helium Brayton cycle

热源 功率/MW	回热器 功率/MW	预冷器 功率/MW	中间冷却器 功率/MW	低压压缩机 功率/MW	高压压缩机 功率/MW	透平 功率/MW	循环 效率/%	文献循环 效率 <sup>[11]</sup> /%	误差/%
310.00	387.30	90.54	68.94	69.86	70.46	290.86	48.56	47.9	1.38

表 12 Aspen HYSYS 氦气布雷顿循环模型中  
初始条件及设备参数

Tab. 12 Initial conditions and device parameters in the Aspen  
HYSYS helium Brayton cycle model

参数名称	数值
透平效率	0.9
压缩机效率	0.89
热源功率/GW	1.066 1
冷却水入口温度/℃	25
回热器冷端端部温差/℃	10
低压压缩机入口温度/℃	35
低压压缩机入口压力/MPa(a)	2.56
系统总压降/%	5
系统最高温度/℃	540
系统最高压力/MPa(a)	7
热源入口温度/℃	≥250

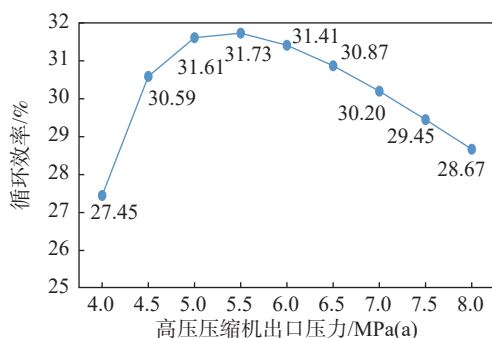


图 16 高压压缩机出口压力对循环效率影响

Fig. 16 Effect of the outlet pressure of the high-pressure  
compressor on the cycle efficiency

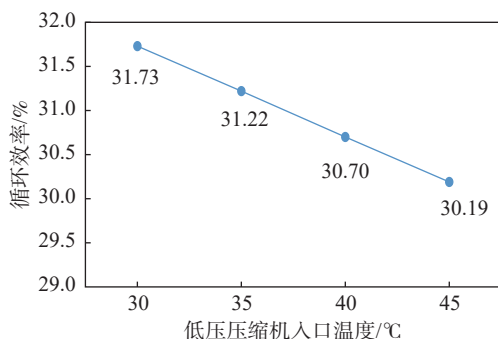


图 17 低压压缩机入口温度对循环效率影响

Fig. 17 Effect of the inlet temperature of the low-pressure  
compressor on the cycle efficiency

力 5.5 MPa(a)、低压/高压压缩机入口温度 30 ℃。经计算, 氦气布雷顿循环效率为 32.24%, 工质流量为

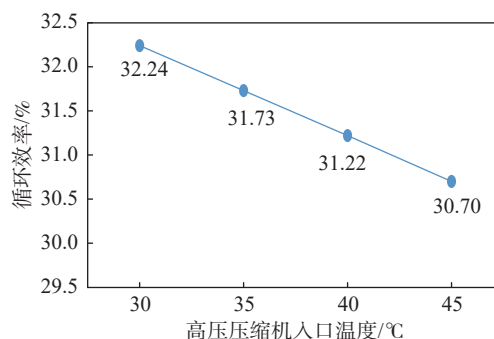


图 18 高压压缩机入口温度对循环效率影响

Fig. 18 Effect of the inlet temperature of the high-pressure  
compressor on the cycle efficiency

1 122.61 kg/s, 各状态点计算结果见表 13, 各主要设备模拟结果见表 14。

表 13 Aspen HYSYS 氦气布雷顿循环各状态点  
优化计算结果

Tab. 13 The optimization calculation results of each state point  
of the Aspen HYSYS helium Brayton cycle

状态点	温度/℃	压力/MPa(a)	流量/(kg·s <sup>-1</sup> )	焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	30.00	2.56	1 122.61	1 587.8
2	86.92	5.50	1 122.61	1 893
2-1	86.92	3.77	1 122.61	1 887.4
2-2	30.00	3.74	1 122.61	1 591.7
3	356.97	5.42	1 122.61	3 294.5
4	540.00	5.33	1 122.61	4 244.1
5	366.81	2.71	1 122.61	3 337.1
6	96.92	2.63	1 122.61	1 935.6

#### 4.4 3 种循环对比分析

针对 CFETR 边界条件, 文献 [46] 对蒸汽朗肯循环进行了优化分析, 根据其结论推算蒸汽朗肯循环的循环效率为 44.40%, 主蒸汽流量为约 403.469 kg/s。本文利用工艺模拟软件 Aspen HYSYS, 采用物性包 REFPROP 对 SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环和氦气布雷顿循环进行了模拟分析, 优化得出两者循环效率分别为 46.46%、32.24%, 工质流量分别为 5 400.20 kg/s、1 122.61 kg/s。

与蒸汽朗肯循环相比, SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环效率可以提高 2.06%。另外, SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环具有循环效率高、对管道设备腐蚀速率低、耗水少、结构紧凑、成本低和可将 CO<sub>2</sub> 资源化等显著优势<sup>[51]</sup>, 推荐作为热核聚变电站发电技术路线。建议对透平、压缩机、印刷电路板式换热器和干气密封等关键设备开

表 14 Aspen HYSYS 氦气布雷顿循环各主要设备优化计算结果

Tab. 14 The optimization calculation results of the main devices of the Aspen HYSYS helium Brayton cycle

热源 功率/GW	回热器 功率/GW	预冷器 功率/MW	中间冷却器 功率/MW	低压压缩机 功率/MW	高压压缩机 功率/MW	透平 功率/MW	循环 效率/%
1.0661	1.57335	390.41	331.98	336.28	338.30	1018.29	32.24

展进一步研究,以推动其应用于未来热核聚变电站。针对中国聚变工程实验堆 CFETR 边界条件,氦气布雷顿循环效率比蒸汽朗肯循环降低 12.16%,氦气布雷顿循环由于效率过低而不适合应用于与中国聚变工程实验堆 CFETR 匹配的热核聚变电站,但由于其在更高温度时循环效率会得到显著提升<sup>[51]</sup>,未来核聚变电站温度若得到提升可以进一步研究其适用性。

## 5 结论

本文对蒸汽朗肯循环、SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环和氦气布雷顿循环进行了研究分析,得出如下结论:

1) 针对 CFETR 边界条件,蒸汽朗肯循环效率为 44.40%,主蒸汽流量约为 403.469 kg/s; SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环效率为 46.46%,工质流量为 5400.20 kg/s; 氦气布雷顿循环效率为 32.24%,工质流量为 1122.61 kg/s。

2) 针对 CFETR 边界条件,与蒸汽朗肯循环相比,SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环效率可以提高 2.06%。另外,SCO<sub>2</sub> 布雷顿循环具有循环效率高、对管道设备腐蚀速率低、耗水少、结构紧凑、成本低和可将 CO<sub>2</sub> 资源化等显著优势,推荐作为热核聚变电站发电技术路线。建议对透平、压缩机、印刷电路板式换热器和干气密封等关键设备开展进一步研究,以推动其应用于未来热核聚变电站。

3) 针对 CFETR 边界条件,与蒸汽朗肯循环相比,氦气布雷顿循环效率会降低 12.16%,不适合应用于与 CFETR 匹配的热核聚变电站,但由于其在更高温度时循环效率会得到显著提升,未来核聚变电站温度若得到提升可以进一步研究其适用性。

4) 对于 SCO<sub>2</sub> 分流再压缩循环,循环效率随着主压缩机流量份额的升高而逐渐降低、随着主压缩机入口压力升高而逐渐降低、随着主压缩机出口压力升高而逐渐升高,为取得较高的循环效率,应尽可能降低主压缩机流量份额、降低主压缩机入口压力和增加主压缩机出口压力,但应满足低温回热器换热条件的限制。

5) 对于氦气布雷顿循环,循环效率随着高压压

缩机出口压力升高而先升高后降低,存在一个循环效率最高值对应的最佳压力;循环效率随着压缩机(低压压缩机和高压压缩机)入口温度升高而线性降低,为取得较高的循环效率,应尽可能降低压缩机入口温度,但受外部冷却条件限制。

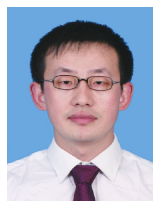
### 参考文献:

- [1] 张家龙, 宋彭, 瞿体明. 磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述 [J]. 发电技术, 2024, 45(6): 995-1015. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24119.  
ZHANG J L, SONG P, QU T M. Overview of magnetic confinement controlled nuclear fusion reactors and superconducting magnet technologies [J]. Power generation technology, 2024, 45(6): 995-1015. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24119.
- [2] 徐浩睿, 王苏鑫, 李留江, 等. 聚变装置高温超导磁体系统电磁仿真方法研究 [J]. 发电技术, 2024, 45(6): 1030-1038. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24128.  
XU H R, WANG S X, LI L J, et al. Research on electromagnetic simulation method of fusion high-temperature superconducting magnet system [J]. Power generation technology, 2024, 45(6): 1030-1038. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.24128.
- [3] WALKER M L, DE VRIES P, FELICI F, et al. Introduction to Tokamak plasma control [C]//IEEE. Proceedings of the 2020 American Control Conference (ACC). Denver, 2020: 2901-2918. DOI: 10.23919/ACC45564.2020.9147561.
- [4] 王志斌, 沈扬, 余羿, 等. 我国磁约束核聚变能源的发展路径、国际合作与未来展望 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 1-13. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.01.  
WANG Z B, SHEN Y, YU Y, et al. The development path, international cooperation and future prospects for magnetic confined fusion energy in China [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 1-13. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.01.
- [5] BARBARINO M. A brief history of nuclear fusion [J]. Nature physics, 2020, 16(9): 890-893. DOI: 10.1038/s41567-020-0940-7.
- [6] WU Y, LI J, SHEN G, et al. Preliminary design of CFETR TF prototype coil [J]. Journal of fusion energy, 2021, 40(1): 5. DOI: 10.1007/s10894-021-00291-8.
- [7] ZHU C, ZHENG J, LIU X, et al. Electromagnetic and mechanical analysis of CFETR toroidal field coils [J]. Fusion engineering and design, 2015, 101: 9-16. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.09.010.
- [8] SONG Y, WU W, DU S. Tokamak engineering mechanics [M]. Berlin: Springer, 2014.
- [9] 王军, 张超群, 戴洪刚, 等. 基于朗肯热力循环模型修正的热电厂热耗改进分析与实践 [J]. 汽轮机技术, 2024, 66(3): 217-220. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2024.03.013.  
WANG J, ZHANG C Q, DAI H G, et al. Analysis and practice of heat rate improvement in thermal power plants based on Rankine thermal cycle model correction [J]. Turbine technology, 2024,

- 66(3): 217-220. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5884.2024.03.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5884.2024.03.013).
- [10] 王天堃,刘天野,乔加飞,等.超临界二氧化碳混合工质布雷顿循环研究进展[J].*发电技术*,2025,46(3):617-626. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23170](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23170).  
WANG T K, LIU T Y, QIAO J F, et al. Research progress on supercritical CO<sub>2</sub>-based mixture Brayton cycle [J]. *Power generation technology*, 2025, 46(3): 617-626. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23170](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23170).
- [11] 王捷.高温气冷堆氦气透平循环热工特性的初步研究[J].*高技术通讯*,2002,9(9):91-95. DOI: [10.3321/j.issn:1002-0470.2002.09.021](https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-0470.2002.09.021).  
WANG J. Preliminary study on thermal features for high temperature gas-cooled reactor gas turbine cycle [J]. *Chinese high technology letters*, 2002, 9(9): 91-95. DOI: [10.3321/j.issn:1002-0470.2002.09.021](https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-0470.2002.09.021).
- [12] 丁湧.1000 MW 超超临界燃煤锅炉深度调峰研究[J].*发电技术*,2024,45(3):382-391. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23156](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23156).  
SHUUI Y H, LIU Q, ZHANG L, et al. Research on deep peak shaving performance of 1000 MW ultra-supercritical coal-fired boiler [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(3): 382-391. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.23156](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.23156).
- [13] 屈岩,李焯,谷志攀,等.基于Aspen的低温余热有机朗肯循环系统研究[J].*山东化工*,2025,54(5):67-70. DOI: [10.3969/j.issn.1008-021X.2025.05.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-021X.2025.05.017).  
QU Y, LI Y, GU Z P, et al. Research on low-temperature waste heat organic rankine cycle system based on Aspen [J]. *Shandong chemical industry*, 2025, 54(5): 67-70. DOI: [10.3969/j.issn.1008-021X.2025.05.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-021X.2025.05.017).
- [14] 黄彦平,王俊峰.超临界二氧化碳在核反应堆系统中的应用[J].*核动力工程*,2012,33(3):21-27.  
HUANG Y P, WANG J F. Applications of supercritical carbon dioxide in nuclear reactor system [J]. *Nuclear power engineering*, 2012, 33(3): 21-27.
- [15] FEHER E G. The supercritical thermodynamic power cycle [J]. *Energy conversion*, 1968, 8(2): 85-90. DOI: [10.1016/0013-7480\(68\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0013-7480(68)90105-8).
- [16] ANGELINO G. Carbon dioxide condensation cycles for power production [J]. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 1968, 90(3): 287-295.
- [17] COMBS O V. An investigation of the supercritical CO<sub>2</sub> cycle (Feher cycle) for shipboard application [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1977.
- [18] National Energy Technology Laboratory. Supercritical carbon dioxide technology project portfolio [EB/OL]. (2016-11-30) [2025-07-05]. <http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-system/SCO2-technology/projectportfolio,2016-11-30>.
- [19] DOSTAL V, DRISCOLL M J, HEJZLAR P. A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [20] KIMBALL K J, CLEMENTONI E M. Supercritical carbon dioxide Brayton power cycle development overview [C]//ASME. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012. Copenhagen: ASME, 2012.
- [21] WRIGHT S A, CONBOY T M, PARMA E J. Summary of the Sandia supercritical CO<sub>2</sub> development program [C]//Sandia National Laboratories. Proceedings of the 3rd International Symposium on Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles. Boulder: Sandia National Laboratories, 2011.
- [22] CONBOY T, WRIGHT S, PASCH J. Performance characteristic of an operating supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle [J]. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2012, 134(11): 111-116. DOI: [10.1115/1.4007199](https://doi.org/10.1115/1.4007199).
- [23] DOSTAL V, DRISCOLL M J, HEJZLAR P, et al. A supercritical CO<sub>2</sub> gas turbine power cycle for next generation nuclear reactors [C]//ASME. Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Engineering. Arlington: ASME, 2002: 567-574.
- [24] 赵煜,董自春,张羽,等.超临界二氧化碳发电系统研究进展[J].*热能动力工程*,2019,34(1):11-16. DOI: [10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.01.002](https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.01.002).  
ZHAO Y, DONG Z C, ZHANG Y, et al. Research progress of supercritical carbon dioxide power generation system [J]. *Journal of engineering for thermal energy and power*, 2019, 34(1): 11-16. DOI: [10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.01.002](https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.01.002).
- [25] AHN Y, LEE J, KIM S G, et al. The design study of supercritical carbon dioxide integral experiment loop [C]//ASME. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013. San Antonio: ASME, 2013.
- [26] KIM S G, AHN Y, LEE J, et al. Numerical investigation of a centrifugal compressor for supercritical CO<sub>2</sub> as a working fluid [C]//ASME. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014. Dusseldorf: ASME, 2014.
- [27] BAE S J, AHN Y, LIM H S, et al. Comparison of gas system analysis code GAMMA+ to S-CO<sub>2</sub> compressor test data [C]//ASME. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015. Montreal: ASME, 2015.
- [28] MUTO Y, ISHIYAMA S, KATO Y, et al. Application of supercritical CO<sub>2</sub> gas turbine for the fossil fired thermal plant [J]. *Journal of energy and power engineering*, 2010, 4(9): 7-15.
- [29] WANG K, HE Y L, ZHU H H. Integration between supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles and molten salt solar power towers: a review and a comprehensive comparison of different cycle layouts [J]. *Applied energy*, 2017, 195: 819-836. DOI: [10.1016/j.apenergy.2017.03.099](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.099).
- [30] ZHU H H, WANG K, HE Y L. Thermodynamic analysis and comparison for different direct-heated supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles integrated into a solar thermal power tower system [J]. *Energy*, 2017, 140: 144-157.
- [31] LI H Z, ZHANG Y F, YAO M Y, et al. Design assessment of a 5 MW fossil-fired supercritical CO<sub>2</sub> power cycle pilot loop [J]. *Energy*, 2019, 174: 792-804. DOI: [10.1016/j.energy.2019.02.178](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.178).
- [32] ZHAO C R, LIU Q F, ZHANG Z, et al. Investigation of buoyancy-enhanced heat transfer of supercritical CO<sub>2</sub> in upward and downward tube flows [J]. *The journal of supercritical fluids*, 2018, 138: 154-166. DOI: [10.1016/j.supflu.2018.03.014](https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.03.014).
- [33] XU R N, LUO F, JIANG P X. Buoyancy effects on turbulent heat transfer of supercritical CO<sub>2</sub> in a vertical mini-tube based on continuous wall temperature measurements [J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2017, 110: 576-586. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.063](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.063).
- [34] 梁墩煌,张尧立,郭奇勋,等.核反应堆系统中以超临界二氧化碳为工质的热力循环过程的建模与分析[J].*厦门大学学报(自然科学版)*,2015,54(5):608-613. DOI: [10.6043/j.issn.0438-0479.2015.05.003](https://doi.org/10.6043/j.issn.0438-0479.2015.05.003).  
LIANG D H, ZHANG Y L, GUO Q X, et al. Modeling and analysis of nuclear reactor system using supercritical-CO<sub>2</sub> Brayton cycle [J]. *Journal of Xiamen University (natural science)*, 2015, 54(5): 608-613. DOI: [10.6043/j.issn.0438-0479.2015.05.003](https://doi.org/10.6043/j.issn.0438-0479.2015.05.003).

- [35] 赵世飞, 王为木, 刘军. 1000 MW 超临界二氧化碳燃煤发电系统热力学性能分析 [J]. *热力发电*, 2020, 49(12): 9-16. DOI: 10.19666/j.rlfid.202003044.  
ZHAO S F, WANG W S, LIU J. Thermodynamic performance analysis for a 1000 MW coal-fired supercritical carbon dioxide power plant [J]. *Thermal power generation*, 2020, 49(12): 9-16. DOI: 10.19666/j.rlfid.202003044.
- [36] 周昊, 裘闰超, 李亚威. 基于超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿再压缩循环的塔式太阳能光热系统关键参数的研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4451-4458. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.171938.  
ZHOU H, QIU R C, LI Y W. Parameter analysis of solar power tower system driven by a recompression supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4451-4458. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.171938.
- [37] 王迪, 谢欣言, 周云龙, 等. 典型超临界二氧化碳循环动态特性分析与比较 [J]. *工程热物理学报*, 2024, 45(10): 2945-2957.  
WANG D, XIE X Y, ZHOU Y L, et al. Analysis and comparison of dynamic characteristics of typical supercritical carbon dioxide cycle [J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2024, 45(10): 2945-2957.
- [38] 郭瑞阳, 杨红义, 庄毅, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环系统关键参数对循环效率的影响研究 [J]. *核科学与工程*, 2024, 44(5): 1018-1029. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2024.05.008.  
GUO R Y, YANG H Y, ZHUANG Y, et al. Study on the influence of key parameters of supercritical carbon dioxide Brayton cycle system on cycle efficiency [J]. *Nuclear science and engineering*, 2024, 44(5): 1018-1029. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2024.05.008.
- [39] 段承杰, 王捷, 杨小勇, 等. CO<sub>2</sub> 与 He 动力循环比较 [J]. *核动力工程*, 2010, 31(6): 64-69.  
DUAN C J, WANG J, YANG X Y, et al. Comparison of CO<sub>2</sub> power cycle to He cycle [J]. *Nuclear power engineering*, 2010, 31(6): 64-69.
- [40] 王大中, 张作义. 模块式高温气冷堆气体透平循环发电的研究 [J]. *高技术通讯*, 1992, 2(9): 1-3.  
WANG D Z, ZHANG Z Y. 模块式高温气冷堆气体透平循环发电的研究 [J]. *Chinese high technology letters*, 1992, 2(9): 1-3.
- [41] BAXI C B, SHENOY A, KOSTIN V I, et al. Evaluation of alternate power conversion unit designs for the GT-MHR [J]. *Nuclear engineering and design*, 2008, 238(11): 2995-3001. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2007.12.021.
- [42] YAN X, KUNITOMI K, NAKATA T, et al. GTHTR300 design and development [J]. *Nuclear engineering and design*, 2003, 222(2-3): 247-262. DOI: 10.1016/S0029-5493(03)00030-X.
- [43] YAN X, TAKIZUKA T, TAKADA S, et al. Cost and performance design approach for GTHTR300 power conversion system [J]. *Nuclear engineering and design*, 2003, 226(3): 351-373. DOI: 10.1016/S0029-5493(03)00212-7.
- [44] 曲新鹤, 杨小勇, 王捷. 商用高温气冷堆氦气透平循环发电热力学参数分析和优化 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(10): 1114-1120. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.25.054.  
QU X H, YANG X Y, WANG J. Thermodynamic analysis and optimization of helium turbine cycle of commercial high temperature gas-cooled reactor [J]. *Journal of Tsinghua University (science and technology)*, 2017, 57(10): 1114-1120. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2017.25.054.
- [45] 李广, 付一川, 余海, 等. 光热发电储能熔盐研究进展 [J]. *材料岛报*, 2025, 39(4): 1-10. DOI: 10.11896/cldb.24010158.  
LI G, FU Y C, YU H, et al. Research progress in thermal energy storage molten salts for concentrated solar power systems [J]. *Materials reports*, 2025, 39(4): 1-10. DOI: 10.11896/cldb.24010158.
- [46] 罗贤勇, 李斌, 林燕, 等. 热核聚变发电岛三回路参数优化研究 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(3): 126-136. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.14.  
LUO X Y, LI B, LIN Y, et al. Research on optimization of three-circuit parameters for thermonuclear fusion power generation island [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(3): 126-136. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.14.
- [47] 何欣欣, 裴东升, 陈会勇, 等. 二氧化碳热物性方程研究进展及应用 [J]. *热力发电*, 2021, 50(5): 27-33. DOI: 10.19666/j.rlfid.202008223.  
HE X X, PEI D S, CHEN H Y, et al. Research progress and applications of thermophysical equations of carbon dioxide [J]. *Thermal power generation*, 2021, 50(5): 27-33. DOI: 10.19666/j.rlfid.202008223.
- [48] 何欣欣, 薛志恒, 陈会勇, 等. 间接式超临界二氧化碳塔式太阳能热发电系统仿真优化 [J]. *热力发电*, 2019, 48(7): 53-58. DOI: 10.19666/j.rlfid.201902014.  
HE X X, XUE Z H, CHEN H Y, et al. Simulation and optimization of solar thermal tower power system with indirect-heated supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycles [J]. *Thermal power generation*, 2019, 48(7): 53-58. DOI: 10.19666/j.rlfid.201902014.
- [49] 谢蓉, 于健尧. 基于 Aspen 的超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环性能研究 [J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(10): 2544-2552.  
XIE R, YU J Y. Study on the performance of supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle based on Aspen [J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2021, 42(10): 2544-2552.
- [50] 黄潇立, 王俊峰, 臧金光. 超临界二氧化碳布雷顿循环热力学特性研究 [J]. *核动力工程*, 2016, 37(3): 34-38. DOI: 10.13832/j.jnpe.2016.03.0034.  
HUANG X L, WANG J F, ZANG J G. Thermodynamic analysis of coupling supercritical carbon dioxide Brayton cycles [J]. *Nuclear power engineering*, 2016, 37(3): 34-38. DOI: 10.13832/j.jnpe.2016.03.0034.
- [51] 唐鑫, 钱奕然, 方华伟, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环控制策略研究综述 [J]. *发电技术*, 2023, 44(4): 492-501. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22079.  
TANG X, QIAN Y R, FANG H W, et al. A review of control strategies for supercritical carbon dioxide Brayton cycle [J]. *Power generation technology*, 2023, 44(4): 492-501. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22079.

## 作者简介:



王东雷

王东雷(第一作者, 通信作者)  
1982-, 男, 高级工程师, 热能工程硕士, 主要从事发电厂热机设计研究工作(e-mail: wangdonglei@gedi.com.cn)。

(编辑 叶筠英)