

SCO₂布雷顿循环耦合海水淡化系统的优化

滕一非^{1,2}, 陆道纲^{1,2}, 隋丹婷^{1,2}

¹华北电力大学核科学与工程学院, 北京

²非能动核能安全技术北京市重点实验室, 北京

收稿日期: 2023年2月21日; 录用日期: 2023年3月3日; 发布日期: 2023年4月20日

摘要

超临界二氧化碳布雷顿循环由于其紧凑的系统布置和较高的热电转换效率, 是非常有前景的新型核动力系统热电转换装置的技术方案。在传统的布雷顿循环中, 超临界二氧化碳在进入压缩机前需要冷却, 因此在系统中存在废热。本文研究用于小型铅冷快堆的能量转换系统, 将海水淡化装置与超临界二氧化碳布雷顿循环耦合, 进行废热利用, 扩展能量转换系统的多用途应用方向, 实现淡水生产, 提高系统总体的效率。

关键词

超临界二氧化碳, 布雷顿再压缩循环, 海水淡化

Optimization of SCO₂ Brayton Cycle Coupled Seawater Desalination System

Yifei Teng^{1,2}, Daogang Lu^{1,2}, Danting Sui^{1,2}

¹School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

²Beijing Key Laboratory of Passive Safety Technology for Nuclear Energy, Beijing

Received: Feb. 21st, 2023; accepted: Mar. 3rd, 2023; published: Apr. 20th, 2023

Abstract

Supercritical carbon dioxide Brayton cycle is a promising technical scheme for the thermoelectric conversion device of new nuclear power system due to its compact system layout and high thermoelectric conversion efficiency. In the traditional Brayton cycle, supercritical carbon dioxide needs to be cooled before entering the compressor, so there is waste heat in the system. In this paper, the energy conversion system for small lead-cooled fast reactor is studied. The seawater desalination device is coupled with the SCO₂ Brayton cycle to carry out waste heat utilization, ex-

pand the multi-purpose application direction of the energy conversion system, realize freshwater production, and improve the overall efficiency of the system.

Keywords

Supercritical Carbon Dioxide, Brayton Cycle, Desalination

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在作为清洁能源代表的第四代核能领域,超临界二氧化碳(SCO₂)布雷顿循环拥有广泛的应用前景[1]。SCO₂布雷顿循环研究始于上世纪40~50年代,由Feher提出[2]。Angelino随之对循环进行了详细的研究,并引入新的循环配置,如再压缩循环和预压所循环等,以克服内部传热问题并提高循环性能[3]。在高效率和小型模块化的发展理念下,SCO₂布雷顿循环具有高效率、高安全性、紧凑的布置等优势[4],可以被应用于小型核反应堆中,在深海区域、岛屿等地提供可靠的能源供应。而这些地区不仅具有较高的能源需求,淡水资源也同样短缺[5]。一种解决方案便是将能量转换循环与海水淡化装置耦合,利用发电过程产生的废热进行海水淡化[6]。

海水淡化可以作为解决深海开发平台、岛屿等地生产生活用水需求的可行手段[7],与依靠补给船运输淡水相比,受运输条件影响较小,经济性较强[8]。经过多年发展,现在主流的海水淡化技术可分为多级闪蒸法(MSF)、低温多效蒸馏法(MED)和反渗透法(RO) [9]。多级闪蒸法具有设备简单,能较好地预防结垢等优点但成本较高;低温多效蒸馏法可以有效利用低温热源,同时减缓设备腐蚀,具有较长的使用寿命;反渗透法采用压力驱动,能耗低且投资小[5]。上述方法可分为热法与膜法两种路线,均需要利用电能。核反应堆在提供电能又具有可利用的热能,因此主流的海水淡化技术均可以用核能进行海水淡化。在此基础上,清华大学提出了一种新型海水淡化实验方案,结合低温热源与高温竖直蒸发管蒸发法[10]。

本文在SCO₂布雷顿循环的基础上,将海水淡化装置与循环进行耦合,提高系统综合效率,扩展能量转换系统的多用途。

2. 系统简介

在SCO₂再压缩布雷顿循环的基础上,将海水淡化装置与之耦合,组成多功能的高效能量转换系统,实现废热利用,从而进一步提高系统效率。接下来将分别对能量转换系统和海水淡化装置以及本文所使用的计算软件进行介绍。

2.1. 能量转换系统

本文研究的能量转换系统设计适用于一体化小型铅冷快堆平台,为离岸较远的深海区域、岛屿等提供电力供应。堆芯设计中一回路使用铅冷却剂,在常压条件下运行。二回路的能量转换系统采用SCO₂再压缩布雷顿循环,实现较高的系统效率并减小系统体积。

高效能量转换系统的布置图如图1所示,SCO₂经过透平做功后,经过高、低温回热器,一部分进入冷却器进行冷却,之后进入压缩机压缩到超临界状态后经过低温回热器继续加热;另一部分进入再压缩

机压缩后两部分流体汇合，进入高温回热器进行回热，最终进入透平完成一次循环。

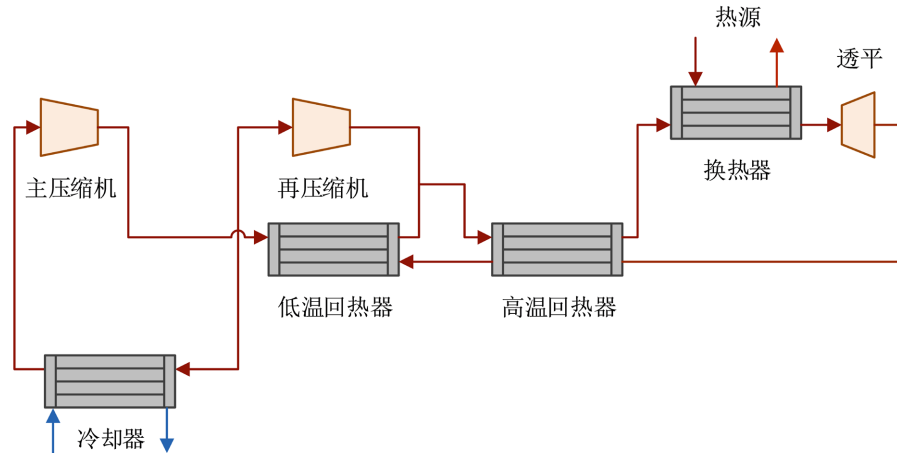


Figure 1. Layout of energy conversion system
图 1. 能量转换系统布置图

设定系统最高工作压力 20 MPa，工作温度为 15℃ (海水温度)~580℃。系统设定的热源热功率为 50 MW，设置压缩机与透平同轴，透平输出功即为循环净功。系统循环效率为每秒钟透平输出净功与系统热功率之比。

2.2. 海水淡化装置

针对一体化小型铅冷快堆平台中能量转换系统的废热再利用，设置海水淡化装置满足海水淡化的应用需求。

本海水淡化装置模型图如图 2 所示，分为蒸发器、换热器和冷凝器三个主要部件。海水经过冷凝器被加热后进入换热器被进一步加热，之后进入海水蒸发器后利用 SCO_2 的热量将其中一部分蒸发为水蒸气，水蒸气经过冷凝器冷凝为最终的淡水，剩余浓缩后的海水被排出。装置工作最低温为海水温度 15℃。

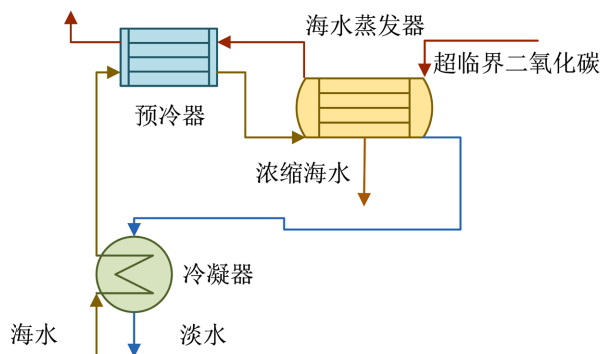


Figure 2. Schematic diagram of seawater desalination unit model
图 2. 海水淡化装置模型示意图

加上海水淡化装置后系统效率的计算为，在原有系统的基础上，装置的输入功为 SCO_2 在装置进出口的焓差以及海水的焓值，而排出的浓缩海水为未被利用的功，输入功与未被利用的功之差即为利用的功。每秒钟海水淡化装置利用的功与透平输出净功之和，与系统热功率之比即为系统综合效率。

2.3. THERMOFLEX

本文使用的计算软件为来自 THERMOFLOW 公司的 THERMOFLEX。1995 年，该公司推出 THERMOFLEX 软件，软件用户通过内置的组件库以可视化的方式进行热力系统建模，最终可以灵活地进行工程热力计算[11]。

3. 方案计算与对比

在使用 SCO_2 布雷顿循环的能量转换系统中， SCO_2 在透平中做功后经过回热，在重新进入压缩机前一般要经过冷却器进行冷却，此过程中的废热没有得到有效利用。本文将海水淡化装置耦合到能量转换系统中，利用能量转换过程中的部分废热对海水进行淡化处理，获得生产生活必备的淡水，成为多功能的能量转换系统，更适合在偏远海域、岛屿等地的应用。

3.1. 海水淡化装置布置方案

在方案设计上，有如图 3、图 4 两种布置方式。其中图 3 是将海水淡化装置放置在透平出口的位置，此时 SCO_2 的能量较高，在经过海水淡化装置后再进行回热、冷却、压缩后重新进入透平做功。图 4 的方案则是将冷却器替换为海水淡化装置， SCO_2 在经过回热后仍然具有较高的温度，可以满足海水淡化装置的温度需求。

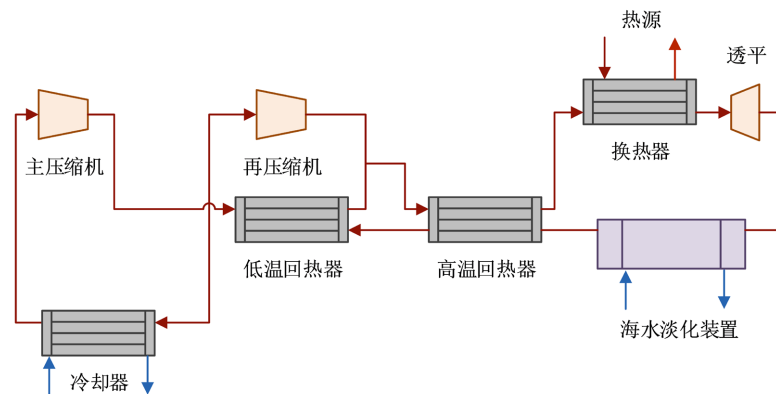


Figure 3. Layout of seawater desalination unit I

图 3. 海水淡化装置布置方式一

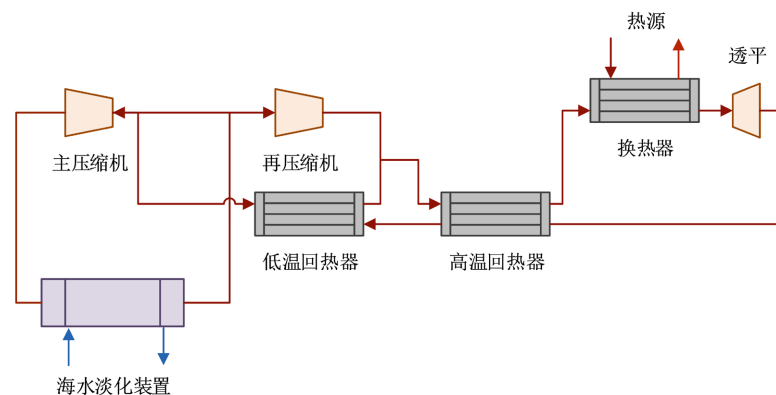


Figure 4. Layout of seawater desalination unit II

图 4. 海水淡化装置布置方式二

3.2. 计算与对比

系统压力分别选取 12 MPa、16 MPa、20 MPa 三种工况，对两种方案进行计算，图 5 为两种方案下海水淡化量与系统最终效率的对比。

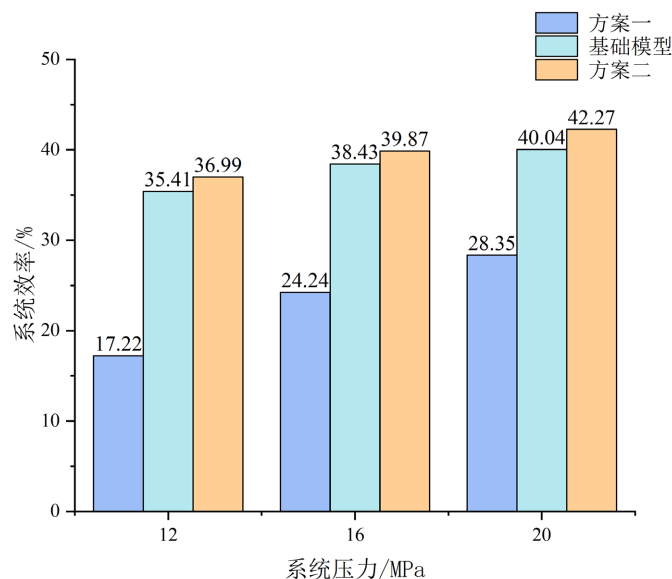


Figure 5. System efficiency under different arrangement schemes of seawater desalination plant

图 5. 不同海水淡化装置布置方案下系统效率

由图 5 可知，布置方式为方案一时，由于透平出口的 SCO_2 依旧为高品质热源，如果在此加入海水淡化装置，则使得后续在高、低温回热器中的热源品质降低，系统的效率与不加入海水淡化装置的基础模型的效率相比，均有大幅度的降低，不是最佳布置方式。

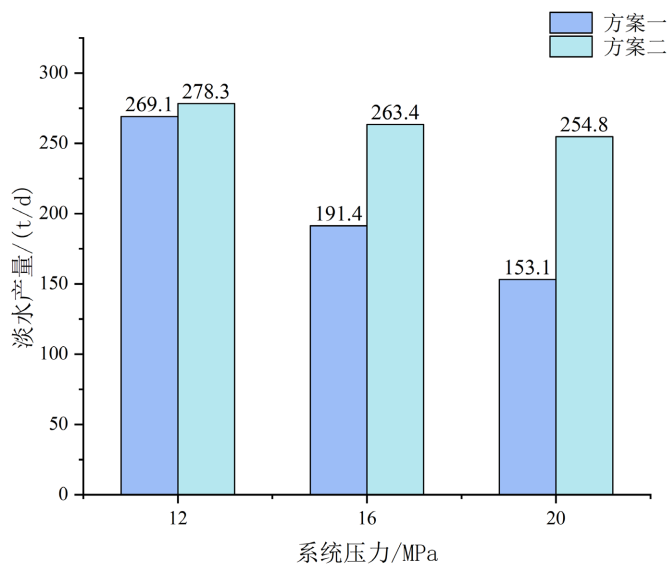


Figure 6. Fresh water production

图 6. 淡水产量

对方案二来说,在不同工况下,得益于加入了海水淡化装置,实现了系统总体效率的提高。能量转换系统在不加入海水淡化装置的情况下,系统的效率在 20 MPa 时可达 40.04%。方案二的条件下,由于海水淡化装置再利用了废热,使得效率进一步提高至 42.27%。因而将冷却器替换为海水淡化装置的方案二为最优布置方案。

在淡水产量方面,存在着热量分配方面的权衡,如果在海水淡化装置利用的热量较多,就会导致原本的 SCO_2 布雷顿循环利用的热量就要减少,因而需要合理的分配。图 6 为不同工况下的淡水产量,由图可见,方案一不仅在系统综合效率方面低于方案二,淡水产量也同样低于相同工况下的方案二。在方案二中海水淡化产量可达 254.8 t/d。热带岛屿在除了雨水收集、淡水透镜体外,如果具有日 100 t 的海水淡化量,即可满足 2100 人的安全承载量[12];而以岭澳核电站一期为标准,在正常运行状态下,常规岛生活用水为 333 t/d。所以可以类比,在本文研究的系统中,只要海水淡化量在 100~333 t/d 的区间内,就可以满足基本的生活用水需求[13]。

4. 结论

在原有 SCO_2 再压缩布雷顿循环的基础上,将能量转换系统与海水淡化装置进行耦合,可以提高系统总体利用效率,同时得到生产生活所需淡水,拓展了能量转换系统的多用途。但是本文工作中关于海水淡化部分仅采用预冷器、蒸发器等简单装置,而且在不同布置方式中并没有设置一致的海水淡化产量,在下一步的工作中将设置多效海水淡化装置,并将进一步统一海水淡化产量这一目标,进行更为详细的对比工作。

在本文研究设定的布置方案中,最佳布置方式为将海水淡化装置设置在冷却器处,代替原有的冷却器,实现废热利用,在 20MPa 时总体效率最优,在原有效率为 40.04%的基础上提高至 42.27%,同时能日产淡水 254.8 吨,基本满足淡水需求。

参考文献

- [1] 唐鑫, 钱奕然, 方华伟, 李洋, 李思广, 易经纬, 陈伟雄, 严俊杰. 超临界二氧化碳布雷顿循环控制策略研究综述[J/OL]. 发电技术, 2022: 1-10, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.TK.20221214.0931.001.html>.
- [2] Feher, E.G. (1968) The Supercritical Thermodynamic Power Cycle. *Energy Conversion*, **8**, 85-90.
- [3] Angelino, G. (1968) Carbon Dioxide Condensation Cycles. *Journal of Engineering for Power*, **90**, 287-295.
- [4] Ahn, Y. and Lee, J.I. (2014) Study of Various Brayton Cycle Designs for Small Modular Sodium-Cooled Fast Reactor. *Nuclear Engineering and Design*, **276**, 128-141.
- [5] 刘宏帅, 郑超颖, 李丹, 于竹芹. 核能海水淡化的应用分析[J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(5): 51-52.
- [6] 贾海军. 核能海水淡化技术的研究及发展[C]//中国土木工程学会. 科技、工程与经济社会协调发展——中国科协第五届青年学术年会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2004: 2.
- [7] Esmailion, F. (2020) Hybrid Renewable Energy Systems for Desalination. *Applied Water Science*. Springer International Publishing, Berlin.
- [8] 于开录, 吕庆春, 阮国岭. 低温多效蒸馏海水淡化工程与技术进展[J]. 中国给水排水, 2008, 24(22): 82-85.
- [9] 宋瀚文, 宋达, 张辉, 付赫, 彭昌盛. 国内外海水淡化技术、产能、用途综述[J/OL]. 膜科学与技术, 2021: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1049.TB.20210607.1102.004.html>
- [10] 贾海军, 姜胜耀, 吴少融, 李毅, 肖志, 李胜强, 仲翔平, 张佑杰, 杨巾农, 查美生, 薄涵亮. 双塔竖直蒸发管高温多效蒸发海水淡化实验系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003(10): 1336-1338+1358.
- [11] THERMOFLEX®. Version 30.0 ThermoFlow Inc., USA. <https://www.thermoflow.com>
- [12] 谢长坤. 热带岛屿淡水供需分析与模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [13] 郭磊, 黄本胜, 邱静, 邱颂曦. 核电站淡水用水特征综合分析研究[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 615-621. <https://doi.org/10.13243/j.cnki.slx.2013.05.018>