

开式布雷顿循环构型对比及优化设计

王鹤兴 钱奕然 代晏冰 韩小渠 陈伟雄 严俊杰

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘要 布雷顿循环具有高效、紧凑的特点, 适合作为核反应堆热电转换系统。本文基于 EBSILON 软件建立了简单循环、简单回热循环、再热回热循环和间冷回热循环四种开式布雷顿循环构型的系统仿真模型, 对循环关键参数进行热力学分析, 以循环效率、功率密度为性能指标进行了循环参数优化, 并与闭式布雷顿循环进行了对比分析。结果表明, 四种开式循环构型中再热回热循环效率最高, 可达 25.44%; 简单回热循环功率密度最高, 可达 $171.13 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$; 将开式循环改进为空冷闭式空气布雷顿循环, 最高循环效率提高 12.56 个百分点, 最高功率密度增加 $11.87 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

关键词 开式布雷顿循环; 热力学分析; 循环参数优化; 构型对比

中图分类号: TK123 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2024)07-1890-07

Comparative Thermodynamic Analysis and Optimization Design of Open Brayton Cycle Configurations

WANG Hexing QIAN Yiran DAI Yanbing HAN Xiaoqu CHEN Weixiong YAN Junjie

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract The Brayton cycle is characterized by high efficiency and compactness, making it suitable for use in nuclear reactor thermal-electric conversion systems. In the present work, a system simulation model was built based on EBSILON software for four open Brayton cycle configurations: simple cycle, simple regenerative cycle, reheat regenerative cycle, and intercooled reheat cycle, and key parameters were analyzed. The cycle parameters were optimized with the objectives of cycle efficiency and power density, and compared with the closed Brayton cycle. The results revealed that among the four configurations, the reheating and recuperative cycle achieved the highest cycle efficiency at 25.44%, while the simple recuperative cycle demonstrated the highest power density, reaching $171.13 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$. Improving the open cycle into the closed Brayton cycle increased the maximum cycle efficiency by 12.56 percentage points and the maximum power density by $11.87 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$.

Key words open brayton cycle; thermodynamic analysis; cycle parameter optimization; configuration comparison

0 引言

随着世界各国核电技术的深入发展, 国内外学者对功率等级在 20 MW 以下的微型反应堆^[1]开展了广泛的探索性研究, 和耦合反应堆常用的朗肯循环、斯特林循环动力系统相比, 开式布雷顿循环具有系统组成简单、部件设计技术成熟的优势, 是可移动微型堆动力转换系统的最佳配置方案之一^[2]。

国内外学者从不同角度展开了对开式布雷顿循环的参数分析与性能优化的研究。Forsberg 等^[3]建立了耦合氟盐冷却高温气冷堆的空气-蒸汽联合循环系统, 循环效率可达 41%, 顶循环效率 27%, 增加天然气补燃后, 联合循环效率显著提升至 58%。

Guo 等^[4]采用开式布雷顿循环耦合有机朗肯循环的联合循环作为能量转换系统, 结果表明循环效率高于 33%。Heiser 等^[5]采用真实空气物性研究了压缩机压比和透平进口温度对循环效率及比功率的影响规律, 得出存在最优压比使得循环效率最高的结论。Guillen 等^[6]对匹配陆基微型核电源的开式布雷顿系统尺寸进行了总体估计, 表明系统总体积随压缩机总压比增大而减小。Zohuri 等^[7]针对开式回热循环构型的研究表明, 当回热度从 0.95 减少到 0.9 时, 系统效率会降低 5%, 但系统总体积会降低 40%, 对回热度进行优化可降低系统尺寸。Meas

等^[8]对比了三种开式循环构型的循环效率与输出功率，并对不同构型的不可逆损失与熵增进行了分析以验证结论。

除了对开式循环的研究，国内外学者针对闭式循环也开展了深入研究。王俊等^[9]应用有限时间热力学理论对内可逆空间闭式布雷顿循环进行优化得到了循环最大三重功率。薛琪^[10]等分别对水冷和空冷下的闭式循环再压缩构型进行了程序开发及优化设计，结果表明，水冷时循环效率可达40.48%，空冷时循环效率可达34.36%。Chen等^[11]详细介绍了闭式空气布雷顿循环的系统-部件设计方法，实现了循环参数和部件参数的同步设计，并提出了将“功率密度”作为循环性能评价指标来评估动力系统的紧凑性。刘秀婷等^[12]对比研究了闭式空气布雷顿循环的不同构型的性能表现，发现简单回热循环构型的热电转换效率高于其他构型。唐鑫等^[13]开展了闭式空气布雷顿循环不同构型优化研究，发现闭式循环效率超过35%，功率密度超过200 kW/m³。Qian等^[14]对不同构型的闭式空气布雷顿循环进行多目标优化分析，再热回热循环具有最高功率密度，是闭式空气布雷顿循环最优构型。

目前针对可移动微型堆动力系统的研究主要为针对单一循环的优化研究，缺乏相同反应堆功率等级下开式循环与闭式循环的定量对比分析，因此本文建立了四种开式布雷顿循环构型的热力学模型，分析了循环参数对循环效率和功率密度的影响，分别以循环效率和功率密度为优化目标对关键参数开展优化，得到适配可移动微型堆的开式布雷顿循环最优构型和设计参数，并进一步改进为空冷闭式空气布雷顿循环系统。

1 系统描述及建模方法

1.1 系统模型

本文研究对象为不同构型的开式布雷顿循环，如图1为开式布雷顿循环构型示意图，空气首先被压缩机压缩至高压状态，然后流经主换热器被加热至高温状态。高温高压的空气在透平内膨胀做功，然后排入大气；简单回热循环(SRC)增加了回热器，透平出口空气先同高压空气换热后再排出环境，余热得到利用。再热回热循环(RRC)在SRC的基础上增加了再热器，工质在高压透平做功后流入再热器吸热，然后进入低压透平做功，提高了循环平均吸热温度；和RRC相比，间冷回热循环(IRC)在压缩机增加了级间冷却器，降低了压缩机耗功。

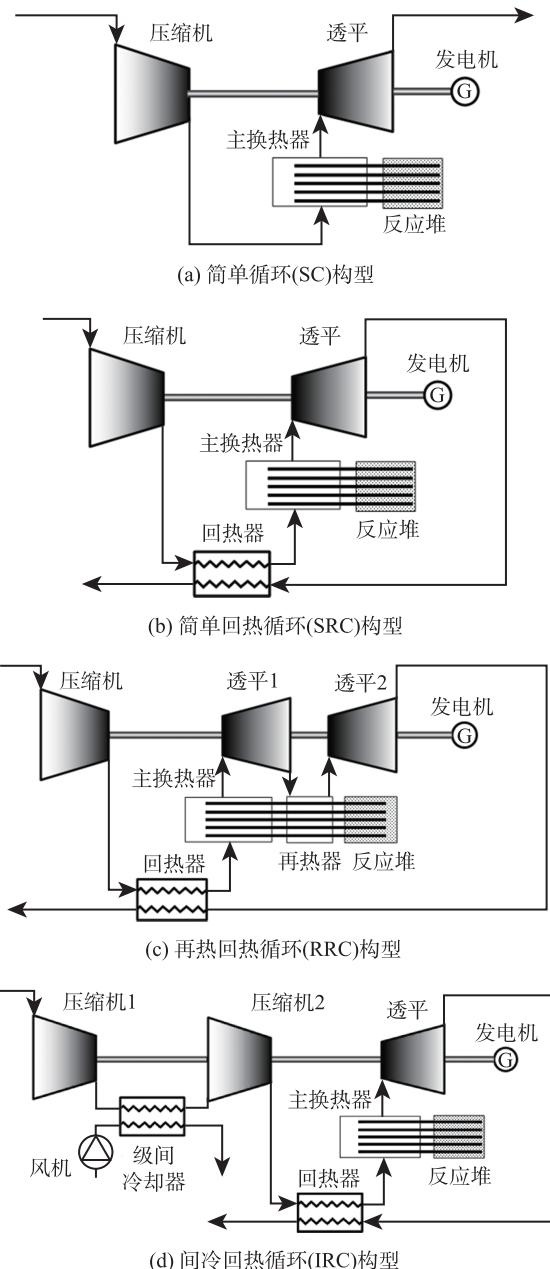


图1 开式布雷顿循环构型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of open Brayton cycle configuration

1.2 热力学模型

基于热力学第一定律和热力学第二定律建立能量转换与守恒关系式，基本关系式为：

$$\sum_j Q_j - \sum_j W_j = \sum_i m_{\text{out}} \cdot h_{\text{out}} - \sum_i m_{\text{in}} \cdot h_{\text{in}} \quad (1)$$

式中： Q 为输入热量，kW； W 为功率，kW； m_{in} 、 m_{out} 分别为进出口工质质量流量，kg·s⁻¹； h 为循环工质比焓，kJ·kg⁻¹。

循环效率为:

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_{\text{in}}} \quad (2)$$

式中: Q_{in} 为系统输入热量, kW; W_{net} 为系统发电功率, kW。

表 1 给出了各部件的能量平衡模型, 下标 TUR、COM 分别代表透平、压缩机; $\eta_{\text{TUR},\text{ise}}$ 、 $\eta_{\text{COM},\text{ise}}$ 分别为透平、压缩机等熵效率; 下标 HT、LT 分别表示高温、低温。

表 1 各部件能量平衡模型

Table 1 Energy balance models for each component

部件	能量平衡
透平	$W_{\text{TUR}} = m \cdot (h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) \cdot \eta_{\text{TUR},\text{ise}}$
压缩机	$W_{\text{COM}} = m \cdot (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \cdot \eta_{\text{COM},\text{ise}}$
主换热器	$Q_{\text{HX}} = m \cdot (m_{\text{out}} - h_{\text{in}})$
其余换热器	$Q = m_{\text{HT}} \cdot (h_{\text{HT,in}} - h_{\text{HT,out}}) = m_{\text{LT}} \cdot (h_{\text{LT,out}} - h_{\text{LT,in}})$

1.3 换热器选型设计

在进行系统部件综合设计时, 需要先在 MATLAB 软件中编写换热器子程序, 然后将部件设计结果参数通过接口传递到 EBSILON 模型进行模型修正计算。换热器子程序首先读取 EBSILON 模型中各点温度、压力、流量等热力参数作为换热器边界条件, 然后初步给定换热器结构参数, 计算理论换热面积, 从 MATLAB 软件中的 REFPROP 物性数据库子程序中调用获取空气热物性参数, 求出实际换热面积与压损, 通过调整结构参数进行修正迭代计算, 最终将满足换热面积、压降要求的换热器冷热侧压损、体积输出到系统主程序中, 进行修正迭代计算, 输出循环效率和功率密度。

主换热器和再热器位于反应堆冷凝段, 本文选用管壳式布置方式, 工质通过折流板与热管进行叉流换热; 回热器选用一次表面式换热器, 这是由于开式循环压力参数较低, 和布雷顿循环常用印刷电路板换热器相比, 采用一次表面式换热器作为回热器既能满足承压要求又能有效降低换热器两侧压损; 级间冷却器选用扁平翅片管式换热器, 翅片管式换热器作为典型的高效间壁式换热器, 具有承压能力强、体积小的优势。

可移动微型堆应用场景多变, 要求系统能够兼顾高效性和紧凑性, 因此本文采用了功率密度(即单位系统体积的净输出功率)作为评价总体方案先进性的性能指标。当发电功率一定时, 功率密度越大, 系统总体积越小, 紧凑性越高。本研究中透平和

压缩机的选型选取径流式透平、离心式压缩机^[12], 和换热器相比二者体积很小, 因此本文忽略了叶轮设备体积对功率密度的影响。循环功率密度模型如下:

$$D_P = \frac{Q_{\text{in}} \cdot \eta_{\text{sys}}}{\sum V_i} = \frac{W_{\text{net}}}{V_{\text{HX}} + V_{\text{REH}} + V_{\text{REC}} + V_{\text{C}}} \quad (3)$$

式中: 下标 HX、HREH、REC、C 分别表示主换热器、再热器、回热器、级间冷却器。

1.4 模型验证

本文与美国爱达荷国家实验室 Sterbentz 等^[15]采用 Aspen HYSYS 仿真软件建立的开式布雷顿循环模型进行了对比验证。表 2 给出了模型验证初始条件, 表 3 给出了本文选取的 SRC 构型和文献模型的计算结果对比。可以看出, 本文建立的 EBSILON 模型与文献中仿真模型的各参数偏差均在 5% 范围内, 表明本文所建立的 EBSILON 模型具有较高的准确性。

表 2 模型验证初始条件

Table 2 Model validation initial conditions

初始条件	数值
压缩机进口温度/°C	25
压缩机进口压力/kPa	101.325
压比	2.48
透平效率/%	90
压缩机效率/%	90
回热度/%	95
回热器热侧压降/kPa	2.3
回热器冷侧压降/kPa	5
主换热器压降/kPa	8.8

表 3 验证结果

Table 3 Validation results

参数	文献 [15] 值	本文值	偏差/%
主换热器进口温度/°C	486.1	492.1	1.23
透平进口压力/kPa	237.5	237.4	0.4
透平出口压力/kPa	103.4	103.5	0.9
透平出口温度/°C	511.1	510.8	0.06
空气质量流量/kg·s ⁻¹	23.54	24.42	3.74
压缩机耗功/kW	2332	2440	4.63
透平做功/kW	4348	4487	3.19
循环效率/%	40.31	40.35	0.09

2 结果分析与讨论

如图 2 给出了开式布雷顿循环的 SRC 构型 EBSILON 模型示意图, 本文基于 EBSILON 软件建立了循环各构型的系统稳态仿真模型, 首先在软件中读取了各部件的边界参数, 然后采用 MATLAB

软件编写换热器等部件热力设计子程序, 通过接口在 EBSILON 和 MATLAB 之间进行数据传递, 通过迭代计算得到系统部件设计结果并输出循环效率及功率密度, 通过迭代计算输出循环效率及功率密度, 在此基础上进行参数分析及优化。本文计算过程中的工质热物性均从 REFPROP 数据库中调用。

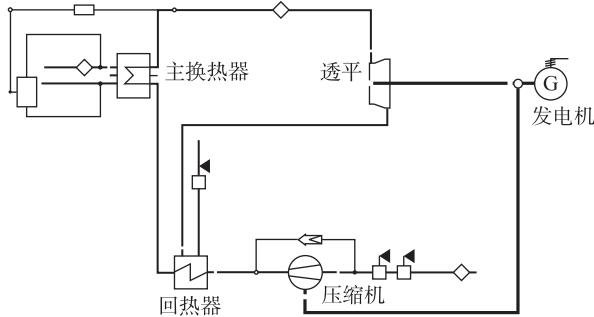


图 2 SRC 构型 EBSILON 模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SRC configuration EBILON model

循环初始设计参数如表 4 所示, 其中压比、温度和回热度等关键参数变化会对循环效率和功率密度产生影响, 本文探究了循环效率和功率密度的变化。

表 4 边界条件
Table 4 Boundary condition

参数	数值	参数	数值
热源温度/°C	675	热功率/MW	5
透平入口温度/°C	650	环境温度/°C	20
间冷温度/°C	30	级间冷却空气出口温度/°C	120
透平等熵效率/%	84.5	压缩机等熵效率/%	81.4
压缩机总压比	6	回热度	0.95
再热压比	2.5	压缩机第一级压比	3

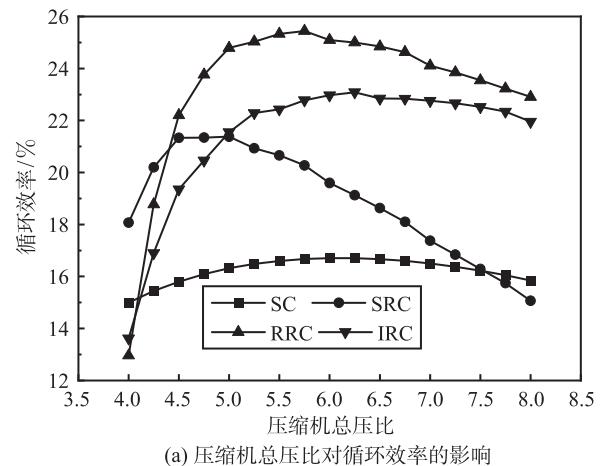
2.1 热力参数分析

2.1.1 压缩机总压比

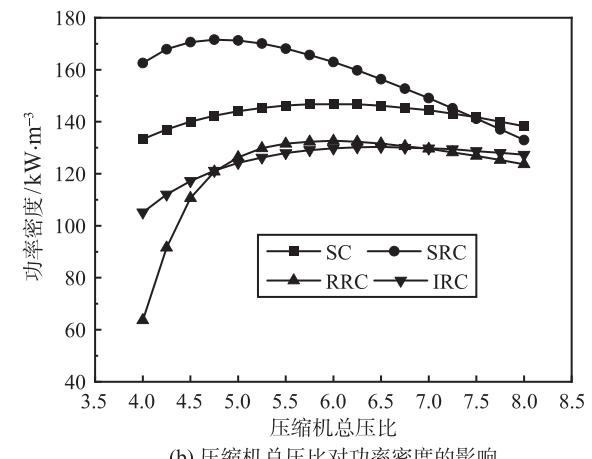
当压缩机总压比在 4~8 范围内变化时, 四种构型的循环效率及功率密度变化规律如图 3 所示, 随着压缩机总压比的增大, 四种构型的循环效率以及功率密度均呈现先增大后减小的趋势, 存在最优压比。从图中可以看出, 当压比超过 4.5 时, RRC 构型的循环效率约为 25%, 高于其他构型。这表明采用再热能够更好地提高循环效率, 而在 SRC 基础上采用间冷构型, 循环效率提升效果不如再热。

当压比高于最优压比时, 压缩机比功变化较透平比功变化更为显著, 压缩机耗功急剧增加, 循环效率急剧减小, 系统总体积变化不大, 因此效率及

功率密度在最优压比后会出现下降的情况。RRC 构型压比低于 4.5 时压比变化对循环效率的影响更大, 且部件体积变化较小, 因此循环效率与功率密度会迅速上升; 低压比时 IRC 构型系统体积变化较大, 因此功率密度变化较循环效率更为平缓。



(a) 压缩机总压比对循环效率的影响



(b) 压缩机总压比对功率密度的影响

Fig. 3 The effect of compressor pressure ratio on cycle efficiency and power density

2.1.2 再热压比

如图 4 给出了再热压比在 1.5~3.5 范围内变化时 RRC 构型循环效率与功率密度的变化规律, 循环效率和功率密度最佳再热压比均在 2.5 左右。

当再热压比较低时, 再热吸收的热量更多通过回热器传给高压低温空气, 循环平均吸热温度低; 当再热压比较高时, 高压透平做功减少, 堆芯热量主要通过主加热器传递, 再热对平均吸热温度的影响变小, 因此存在最优再热压比。

2.1.3 压缩机第一级压比

如图 5 给出了压缩机第一级压比在 3~4.5 变化时对 IRC 构型的影响, 随着压缩机第一级压比的逐

渐增大, IRC构型的循环效率和功率密度均存在最优压比。循环效率的最佳压缩机第一级压比在3.75左右, 功率密度的最佳压缩机第一级压比在4左右。

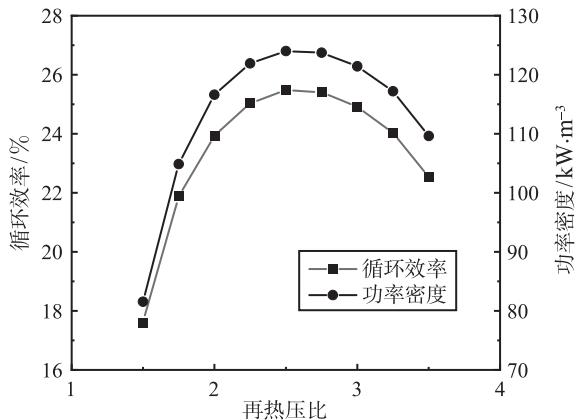


图4 再热压比对循环效率及功率密度的影响

Fig. 4 The effect of reheat pressure ratio on cycle efficiency and power density

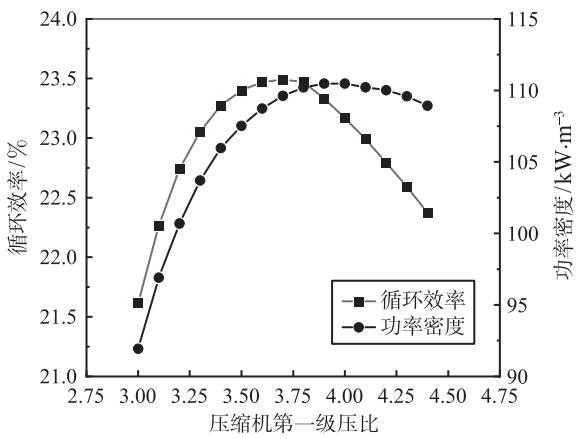


图5 压缩机第一级压比对循环效率及功率密度的影响

Fig. 5 The effect of the first stage pressure ratio of the compressor on cycle efficiency and power density

2.1.4 间冷温度

间冷温度为级间冷却器热侧出口温度, 图6给出了间冷温度在30~100°C范围内变化对IRC构型的影响, 随着间冷温度的逐渐增大, 冷却效果变差, 循环效率单调递减; 而功率密度则存在最佳值, 在间冷温度55°C时取得最大功率密度120 kW·m⁻³。随着间冷温度的升高, 尽管循环效率降低, 但级间冷却器的体积也在减小, 系统总体积减小, 功率密度先增后减。

2.1.5 级间冷却空气出口温度

图7为级间冷却空气出口温度上升时, 循环效率及功率密度变化情况, 可以看出循环效率和功率密度均存在最优值, 循环效率最高可达26%, 功率

密度最高可达160 kW·m⁻³, 这是由于随着级间冷却空气出口温度的升高, 压缩机耗功增加, 冷却风机耗功减少, 而小于最佳温度时前者的影响占主导, 大于最佳温度时则相反。

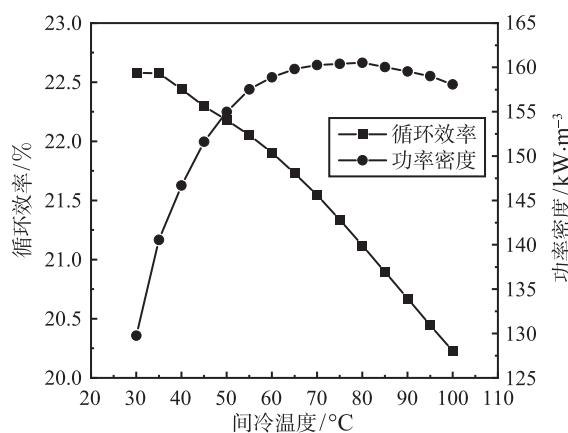


图6 间冷温度对循环效率及功率密度的影响

Fig. 6 The effect of intercooling temperature on cycle efficiency and power density

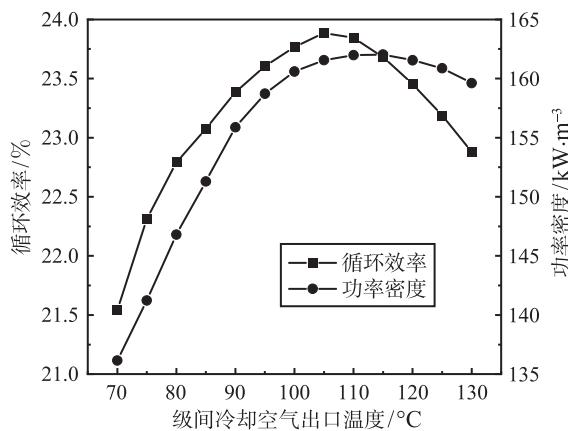


图7 级间冷却空气出口温度对循环效率及功率密度的影响

Fig. 7 The effect of inter stage cooling air outlet temperature on cycle efficiency and power density

2.1.6 回热度

如图8所示, 对于采用回热的SRC、RRC、IRC构型, 回热度增加时循环效率单调递增, 功率密度先增后减, SRC、IRC最佳回热度在7.5左右, RRC最佳回热度约为8。当回热度从0.5增加至0.95时, 循环通过回收透平排气余热降低冷源放热温度, 回热效果得到提升, 循环效率随之提升; 但最佳回热度后回热器换热面积和体积大幅增加, 功率密度先增后减。

2.2 参数优化与对比

热力参数分析可知各参数存在最优值, 为此本文采用遗传算法分别以最高循环效率和最高功率密度为目标, 对不同构型的热力学参数进行全局寻优。

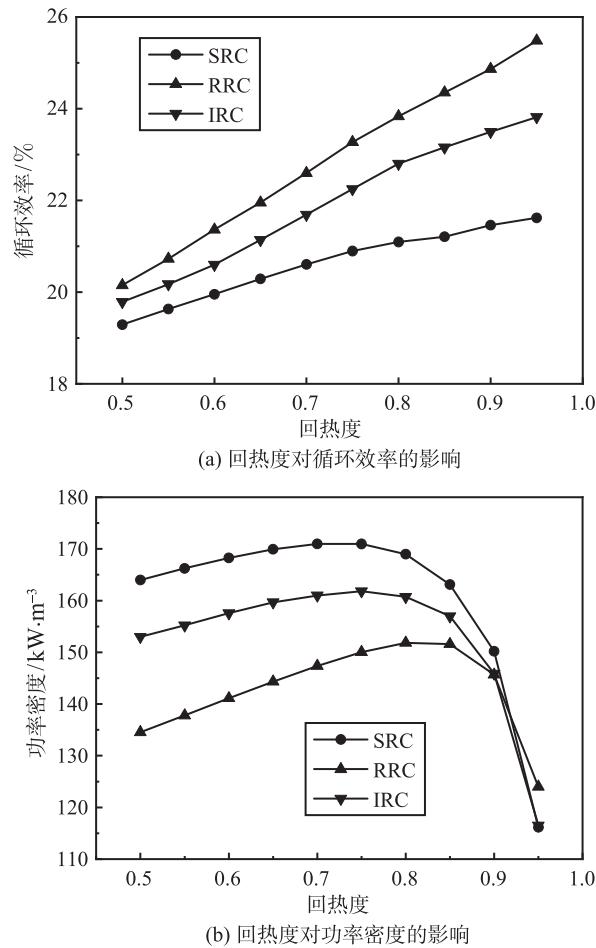


图 8 回热度对循环效率及功率密度的影响

Fig. 8 The effect of heat recovery on cycle efficiency and power density

表 5 给出了循环效率最大时各构型参数优化的结果, 可以看出, 四种构型中循环效率最高的构型为 RRC, 可以达到 25.44%, 和 SC 构型循环效率相比高出 8.73%, 然后依次为 IRC、SRC、SC, 由此可见, 采取再热对循环效率的提升效果优于级间冷却。

表 6 给出了功率密度最大时各构型参数优化结果, 可以看出, 四种构型中功率密度最大的构型为 SRC, 可以达到 $171.13 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$, 然后依次为 IRC、RRC、SC。由此可见, 再热和级间冷却在增大发电功率的同时降低了功率密度, 且级间冷却导致的功率密度降低幅度小于再热。

本文进一步建立了空冷闭式空气布雷顿循环系统, 考虑到闭式循环整体压力、温度水平较高, 因此增加间冷再热回热循环 (IRRC) 构型。

图 9 为开式循环和闭式循环单目标优化结果对比, 相同透平进口温度与环境温度下, 开式循环改进为闭式循环, 最高循环效率提高 12.56 个百分点, 最高功率密度增加 $11.87 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$, 且闭式循环各构型性能表现均更优, 这是由于开式循环压缩机

进口压力较低, 工质体积流量大, 各换热器压损过大, 因此需要更高的压缩机总压比来降低回热器压损, 导致开式循环压缩机耗功更大, 循环效率更低。开式循环无冷却器, 系统总体积较小, 但效率更低, 导致开式循环功率密度仍稍低于闭式循环的相应构型。综上所述, 开式循环具有结构简单、可移动性强的优势, 闭式循环具有循环效率高、功率密度大的优势。

表 5 循环效率单目标优化结果

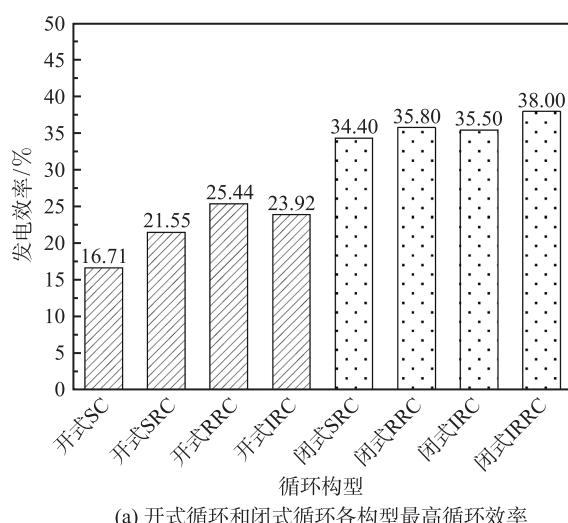
Table 5 Cycle efficiency single-target optimization results

参数	SC	SRC	RRC	IRC
压缩机总压比	6.05	4.81	5.61	6.16
压缩机第一级压比	—	—	—	3.08
回热度	—	0.95	0.95	0.95
再热压比	—	—	2.61	—
间冷温度/°C	—	—	—	37.85
级间冷却空气出口温度/°C	—	—	—	111.05
循环效率/%	16.71	21.55	25.44	23.92
发电功率/kW	836	1081	1272	1196
功率密度/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-3}$	146.78	131.72	132.23	116.55

表 6 功率密度优化结果

Table 6 Power density single-target optimization results

参数	SC	SRC	RRC	IRC
压缩机总压比	5.99	4.58	5.98	5.08
压缩机第一级压比	—	—	—	3.11
回热度	—	0.73	0.82	0.77
再热压比	—	—	2.91	—
间冷温度/°C	—	—	—	96.19
级间冷却空气出口温度/°C	—	—	—	111.05
循环效率/%	16.70	20.99	24.29	21.02
发电功率/kW	835	1045	1215	1051
功率密度/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-3}$	146.79	171.13	153.94	161.92



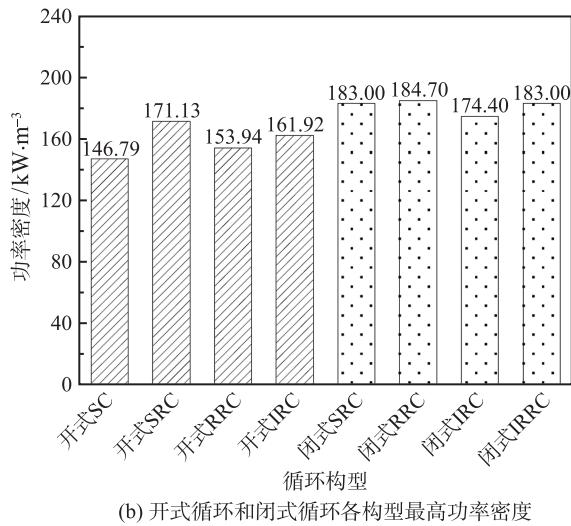


图 9 开式循环和闭式循环单目标优化结果对比

Fig. 9 Comparison of single objective optimization results between open cycle and closed cycle

3 结 论

本文建立了开式布雷顿循环四种构型的稳态模型, 探究了循环关键参数对循环效率、功率密度的影响规律并进行单目标优化, 并改进为闭式布雷顿循环以提高循环效率及功率密度, 主要结论如下:

1) 开式布雷顿循环存在最优压缩机总压比、再热压比、压缩机第一级压比和级间冷却空气出口温度, 降低间冷温度和增加回热度会提高循环效率, 间冷温度、回热度变化时存在最佳功率密度, 再热和级间冷却在提升循环效率的同时会降低功率密度。

2) 开式循环的 RRC 构型具有最高循环效率, 可达 25.44%; SRC 构型具有最高功率密度, 可达 $171.13 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$ 。SRC 构型紧凑度最高, 是匹配可移动微型堆的最优开式循环构型。

3) 相同环境条件下, 开式循环改进为闭式循环后, 最高循环效率提高 12.56 个百分点, 最高功率密度增加 $11.87 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-3}$, 这是由于闭式循环压缩机耗功小, 发电功率高于开式循环。

参 考 文 献

- Raffaella T, Andrea B, Stefano S. Review of Nuclear Microreactors: Status, Potentialities and Challenges [J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 138: 103822
- 钱勇, 侯明军, 倪剑, 等. 热管冷却反应堆动力转换系统方案探讨 [J]. 中国重型装备, 2022, 153(3): 7–10, 15
QIAN Yong, HOU Mingjun, NI Jian, et al. Scheme Research on Power Conversion System of Heat Pipe Cooled Reactor [J]. China Heavy Equipment, 2022, 153(3): 7–10, 15
- Forsberg C, Curtis D. Meeting the Needs of a Nuclear Renewables Electrical Grid with a Fluoride-Salt-Cooled High Temperature Reactor Coupled to a Nuclear Air-Brayton Combined-Cycle Power System [J]. Nuclear Technology, 2014, 185(3): 281–295
- GUO Yuchuan, GUO Xiaoyu, GUO Simao. Conceptual Design of Megawatt-level Mobile Nuclear Power System Based on Heat Pipe Cooled Reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2023, 413: 112558
- Heiser W H, Huxley T, Bucey J W. The Brayton Cycle Using Real Air and Polytropic Component Efficiencies [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(11): 111702
- Guillen D P, McDaniel P J. An Evaluation of Power Conversion Systems for Land-Based Nuclear Microreactors: Can Aeroderivative Engines Facilitate Near-Term Deployment? [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2022, 54(4): 1482–1494
- Zohuri B, McDaniel P I, Deoliveira C. Advanced Nuclear Open Air-Brayton Cycles for Highly Efficient Power Conversion [J]. Nuclear Technology, 2015, 192(1): 48–60
- Meas M R, Bello-Ochende T. Thermodynamic Design Optimisation of an Open Air Recuperative Twin-Shaft Solar Thermal Brayton Cycle with Combined or Exclusive Reheating and Intercooling [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 770–784
- 王俊, 陈林根, 戈延林, 等. 内可逆空间闭式简单布雷顿循环模型及其最优性能 [J]. 工程热物理学报, 2023, 44(8): 2045–2051
WANG Tan, CHEN Lingen, GE Yanlin, et al. An Endoreversible Closed Simple Brayton Cycle Model for Space Power Plant and Its Optimal Performance [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(8): 2045–2051
- 薛琪, 冯民, 吴攀, 等. 空冷和水冷超临界二氧化碳布雷顿循环冷却核能系统的构型优化研究 [J]. 核科学与工程, 2022, 42(4): 822–830
XUE Qi, FENG Min, WU Pan, et al. Study on Configuration Optimization of Supercritical CO₂ Brayton Cycle Cooling Nuclear Energy System [J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(4): 822–830
- CHEN Weixiong, QIAN Yiran, TANG Xin, et al. System-Component Combined Design and Comprehensive Evaluation of Closed-Air Brayton Cycle [J]. Energy, 2023, 278: 127775
- 刘秀婷, 黄彦平, 汪杨乐, 等. 小型氟盐冷却高温堆耦合布雷顿循环系统分析与研究 [J]. 核动力工程, 2022, 43(5): 20–26
LIU Xiuting, HUANG Yanping, WANG Yangle, et al. Analysis and Research of Coupled Brayton Cycle System for Small Fluorine Salt Cooled High Temperature Reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(5): 20–26
- 唐鑫, 钱奕然, 陈伟雄, 等. 空气布雷顿循环系统不同构型参数分析及优化 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8344–8356
TANG Xin, QIAN Yiran, CHEN Weixiong, et al. Parameter Analysis and Optimization of Air Brayton Cycle System Different Configurations [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8344–8356
- QIAN Yiran, GU Zhenen, SONG Meihui, et al. Multi-Objective Optimization and Configurations Comparison of Closed-air Brayton Cycle [J]. Progress in Nuclear Energy, 2023, 166: 104941
- Sterbentz J W, Werner J E, Mckellar M G, et al. Special Purpose Nuclear Reactor (5 MW) for Reliable Power at Remote Sites Assessment Report [R]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2017