

引用格式: 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. LUO Xianyong, LI Bin, LIN Yan, 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.

## 热核聚变发电岛三回路参数优化研究

罗贤勇<sup>✉</sup>, 李斌, 林燕, 向魁, 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] 为了适应 CFETR 聚变反应堆周期性的输出特性, 聚变发电厂采用氦气-熔盐储能-水(汽)动力循环三回路系统。其中三回路蒸汽循环的参数及热力方案对发电岛投资和发电收益有重大影响。高参数和复杂的热力方案可提高循环效率, 但增加了初投资; 低参数和简单的热力方案循环效率不高, 但初投资显著降低。三回路蒸汽参数及热力方案的选择应综合考虑发电效率和初投资, 按综合经济性较优的原则选取。[方法] 文章基于仿真软件 Epsilon 进行建模仿真, 考察不同回热方案、不同主汽和再热参数下的热力循环的性能。通过对不同的热力方案和参数组合进行计算, 获得了各工况下的总效率和输出功率, 并分析了三回路主要设备投资及其随参数的变化。[结果] 综合考虑储能岛和常规岛的总投资与收益, 推荐采用 9 级回热, 主蒸汽参数 12.4 MPa、540 °C 的热力方案。[结论] 文章提出的三回路蒸汽参数和热力方案对后续聚变发电技术研究以及工程设计具有参考价值。

**关键词:** 聚变发电厂; 三回路系统; 熔盐储能; 参数选择; 热力方案; 热经济性; 等效焓降

中图分类号: TL4; TK08

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0126-11

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.14

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Research on Optimization of Three-Circuit Parameters for Thermonuclear Fusion Power Generation Island

LUO Xianyong<sup>✉</sup>, LI Bin, LIN Yan, XIANG Kui, ZHU Guangtao

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

**Abstract:** [Introduction] In order to adapt to the periodic output characteristics of CFETR fusion reactors, the fusion power plant adopts a helium-molten salt energy storage-water (steam) power cycle three-circuit system. The parameters and thermal scheme of the three-circuit steam cycle have a significant impact on the investment and power generation benefit of the power generation island. High parameters and complex thermal schemes can improve cycle efficiency but increase initial investment; low parameters and simple thermal schemes have lower cycle efficiency but significantly reduce initial investment. Therefore, the selection of steam parameters and thermal schemes for the three-circuit system should comprehensively consider power generation efficiency and initial investment and should be selected based on the principle of optimal comprehensive economy. [Method] Based on the simulation software Epsilon, modeling and simulation were carried out in this study to examine the performance of the thermal cycle under different regeneration schemes and different main steam and reheat parameters. By calculating different thermal schemes and parameter combinations, the total efficiency and output power under each operating condition were obtained, and the investment in the main equipment of the three-circuit system and its variation with parameters were analyzed. [Result] Taking into account the total investment and returns of the energy storage island and the conventional island, it is recommended to adopt a thermal scheme with 9-stage regeneration, and main steam parameters of 12.4 MPa, and 540 °C. [Conclusion] The three-circuit steam parameters and thermal scheme proposed in the study have reference value for subsequent research on fusion power generation technology and engineering design.

收稿日期: 2023-12-24 修回日期: 2024-03-07

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重大科技项目“热核聚变发电岛概念设计研究”(CEEC2021-ZDYF-08)

**Key words:** fusion power plant; three-circuit system; molten salt energy storage; parameters selection; thermal scheme; thermal economy; equivalent enthalpy drop

2095-8676 © 2024 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/>).

## 0 引言

如今全球正处于低碳、零碳能源转型浪潮之中,我国许下了力争在 2030 年前实现碳达峰、努力争取 2060 年前实现碳中和的庄严承诺,在能源领域的主要实施路径就是“一次能源零碳化,二次能源电力化”<sup>[1]</sup>。在已发现的一次零碳能源中,核能受资源禀赋限制最少、可靠性最强,特别是核聚变能原料在地球储量丰富,可谓是取之不尽、用之不竭的“长寿能源”。在此背景下,核聚变能发电将是未来最理想的发电形式。

目前核聚变托卡马克(Tokamak)装置由于线圈磁体伏秒数的限制,只能进行周期脉冲模式运行,虽然随着技术的进步,等离子体放电脉冲长度将延长至分钟量级且脉冲间隙时间大幅缩短,但仍需配置合适的储能系统以满足商业发电的需求<sup>[2]</sup>。

中国聚变工程实验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)项目,是中国自主设计和研制、以中国为主联合国际合作的重大科学工程。CFETR 运行时的能量流程主拓扑架构如图 1 所示,该图表示了从托卡马克主机热源到发电并网的能量流程,采用氦气-熔盐储能-水(汽)三回路系统(以下简称“三回路”)。Tokamak 产生的热量通过氦气带出,之后氦气热量传递给储热熔盐,熔盐再将水加热为蒸汽实现蒸汽动力循环。发电岛包含储能岛和常规岛两部分,其中储能岛主要由储能缓冲系统、蒸汽发生器及其他附属系统组成;常规岛由汽轮机蒸汽

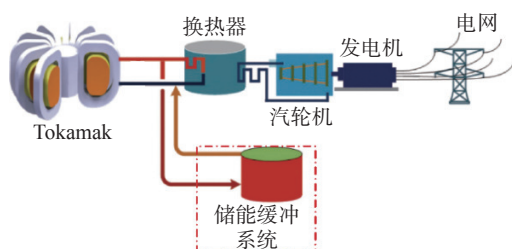


图 1 核聚变发电厂总体方案示意图<sup>[3]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of overall scheme of nuclear fusion power plant<sup>[3]</sup>

动力循环系统、同步发电机和并网变压器等组件组成。

三回路设有一台容量为 400 MW 级汽轮发电机组。三回路蒸汽参数及热力方案对发电岛投资和发电收益有重大影响。高参数固然提高循环效率,但增加了初投资;低参数循环效率不高,但成本低,未必经济性上没有优势。通过经济技术对比,确定综合经济性较优的三回路蒸汽参数以及热力方案,对于聚变堆的工程应用有重大意义。本研究依据储能岛提供的输入条件,研究三回路热力系统配置,综合考虑主汽参数、再热参数、给水参数、回热级数、回热参数等因素,从经济技术角度得出三回路热力方案,并给出推荐意见。

## 1 输入条件

三回路热力系统的输入条件如下:(1)输入热功率:1 066 MW;(2)主蒸汽温度:500~580 ℃;(3)主蒸汽压力:10.0~13.0 MPa(a);(4)高温再热蒸汽温度:≤580 ℃;(5)给水温度:≥250 ℃;(6)凝汽器背压:5.0 kPa(a);(7)年利用小时数:7 000 h;(8)上网电价:0.43 元/kWh。

另外,经汽轮机厂反馈,10.0~13.0 MPa(a),500~580 ℃参数均在厂家成熟机型范围内。

## 2 软件介绍

Ebsilon 是一款电站通用可视化组态、热力学机理建模和热平衡计算仿真软件,是一个模拟仿真的平台。可以用来对不同类型的电站进行设计、检查和优化,计算质量平衡、热平衡,研究环境的变化对系统的影响以及新上设备在循环中的运行,还可以对电站进行动态的监测监控。

如图 2 所示,Ebsilon 是由基本模块和多个拓展模块组成的。基本模块包括由火力汽轮机汽水循环模型、核电汽轮机汽水循环模型、溴化锂吸收式制冷机/热泵、ORC 发电循环、卡琳娜发电循环、超临界 CO<sub>2</sub> 发电循环。基本模块的核心功能是建模和绘图界面、计算求解核心、设计模式和变工况模式、

90% 以上的组件可用以及 100% 的物性库。而拓展模块是软件可选的扩展包,其运行必须依赖于基本模块,包含有 GT-Lib 燃机库、RE-Lib 内燃机库、EbsScript 编程模块、EbsOptimize 优化模块、Validate 校验模块、EbsHtml 网页模块、EbsSolar 光热模块、EbsBoiler 锅炉模块。每一个拓展模块包含了各自不同的功能,有的功能是拓展了一些算法,而有的则是拓展了若干组件。

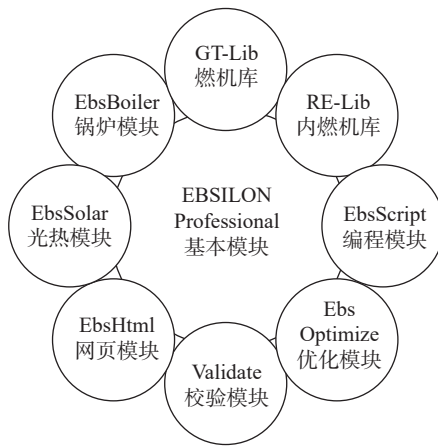


图 2 Ebsilon 基本构成

Fig. 2 Basic composition of Ebsilon

Ebsilon 元件库里有单个的设备模型,可根据电站系统的复杂程度或研究问题的精度需要建立热力系统。简单的热力循环系统包括锅炉、汽轮机、冷凝器、给水泵、发电机和监察元件。软件每次计算遵循以下原则:流动时质量守恒;热功转换时能量守恒;水或水蒸气变化状态时状态参数之间有其自身规律;设备中发生的过程有其自身的过程特点。

图 3 展示了 Ebsilon 模型搭建过程。在可视化的图形用户界面内,可以通过将模块组合成设备,再将设备组合成系统的方式来构建 Ebsilon 模型<sup>[4]</sup>。通常采用顺序搭建法依循设备的连接关系逐个搭建。首先,将单个模块组合成设备单元,设置输入数据及计算模式。然后,加入另一个运行成功的设备单元,让这两个设备单元连接,设定输入输出,校验设备模型搭建的准确性。重复上述步骤,依次完整闭环每一个设备单元并进行查漏补缺(添加小流量,轴封



图 3 Ebsilon 模型搭建过程

Fig. 3 Ebsilon model building process

等)。标定各部件初始参数,使得运行成功。根据分析结果进一步修正模型。

### 3 系统模型搭建及仿真

对多组参数的不同工况组合进行了数值仿真模拟。仿真情况如下:

1) 主汽温度在 500 ~ 580 °C 范围内进行计算,530 ~ 560 °C 之间以 3 °C 为步长,其他区间以 5 °C 为步长。

2) 主蒸汽压力在 10 ~ 13 MPa 范围内进行计算,其中 12 ~ 13 MPa 之间用 0.2 MPa 步长,其他区间用 0.5 MPa 为步长。

3) 回热级数(高低压抽汽+除氧器抽汽)取 7、8、9 级分别计算。

搭建的 7 ~ 9 级回热电厂模型可见图 4 ~ 图 6。7 级回热选取三高三低一除氧模式,8 级回热选取三高四低一除氧模式,9 级回热选取三高五低一除氧模式。

### 4 参数选取

#### 4.1 抽汽焓值选择

多级回热分配可以采用汽轮机设计时普遍使用的平均分配法,即每一级给水加热器内给水的焓升相等,这种方法简单易行<sup>[5]</sup>。

每一级加热器的给水焓升为:

$$\Delta h_{fw,op} = \frac{h_z - h_{cd}}{Z + 1} \quad (1)$$

式中:

$h_z$  ——蒸汽发生器运行压力对应的饱和水比焓(kJ/kg);

$h_{cd}$  ——冷凝器出口凝结水比焓(kJ/kg);

$Z$  ——给水回热级数。

优化给水温度可提高回热循环汽轮机绝对内效率。采用平均分配法进行回热分配时,其最佳给水比焓为:

$$h_{fw,op} = h_{cd} + Z\Delta h \quad (2)$$

按照蒸汽发生器运行压力  $p_{sg}$  和最佳给水比焓  $h_{fw,op}$  查水和水蒸汽表,可以确定最佳给水温度  $T_{fw,op}$ 。实际给水温度  $T_{fw}$  往往低于理论上的最佳给水温度  $T_{fw,op}$ ,通常可以取为:

$$T_{fw} \approx (0.65 \sim 0.75) T_{fw,op} \quad (3)$$

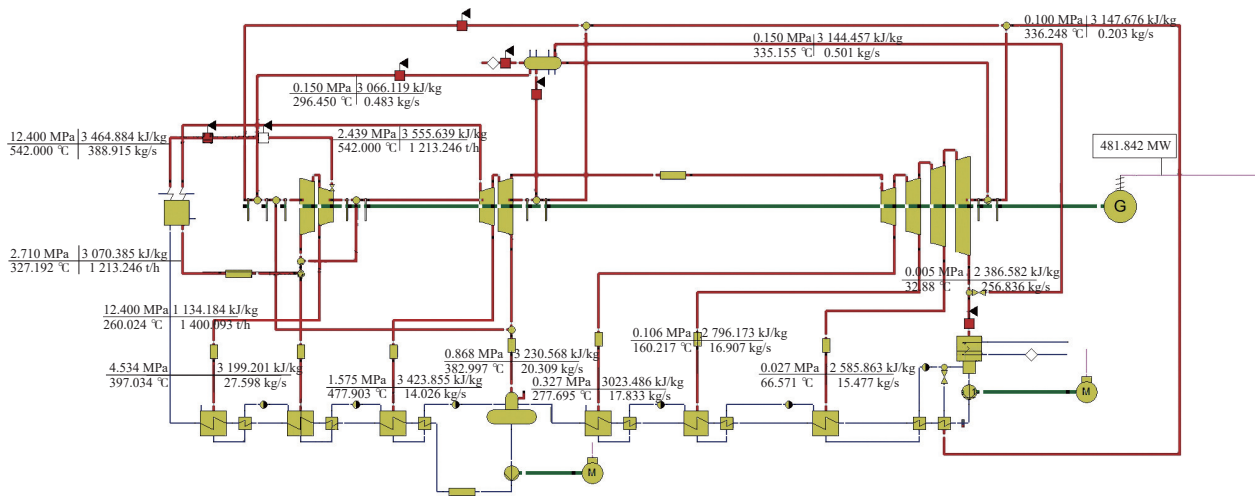


图 4 七级回热级数 Epsilon 模型

Fig. 4 Epsilon model with seven-stage regeneration

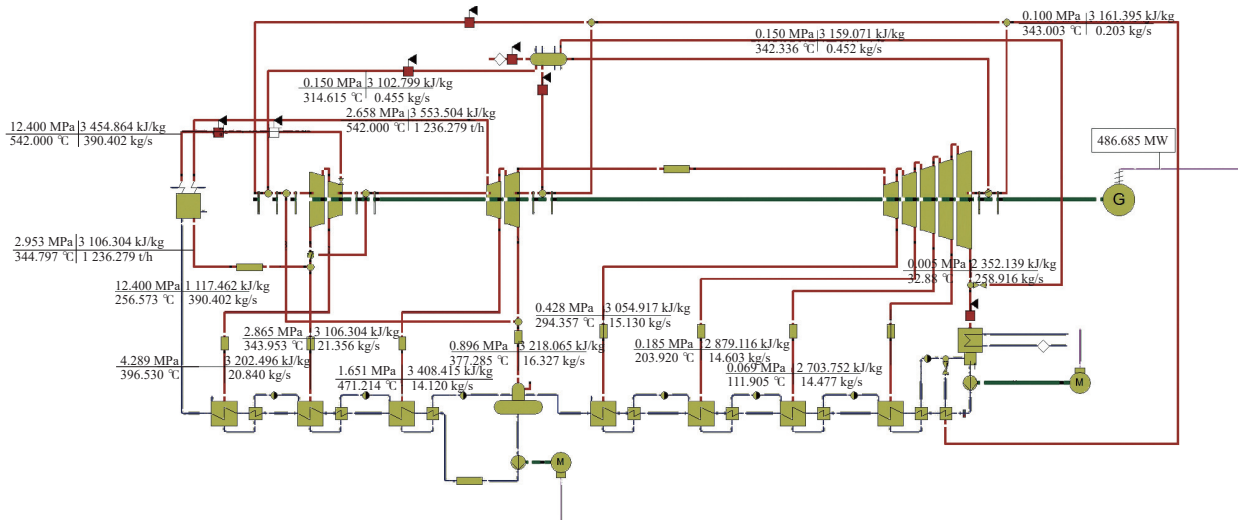


图 5 八级回热级数 Epsilon 模型

Fig. 5 Epsilon model with eight-stage regeneration

由压力和实际给水温度, 再一次通过等焓升分配的方法确定每一级加热器内的焓升。实际每一级给水焓升为:

$$\Delta h_{fw} = \frac{h_{fw} - h_{cd}}{Z} \quad (4)$$

式中:

$h_{fw}$ ——给水比焓 (kJ/kg)。

不同的焓降分配方法结果基本相似, 常用的是比较简便的等温(或焓)升分配法。有再热的情况, 由于高压缸排汽过热度低, 而下一级再热后的蒸汽过热度高, 一般使高压缸排汽这一级的加热器的给水焓升为相邻下一级的给水焓升的 1.3 ~ 1.6 倍<sup>[6-8]</sup>。

#### 4.2 各项损失确定

一次再热机组的主汽压损取主蒸汽压力的 3% ~ 5%, 再热压损不大于高压缸排汽压力的 10%, 再热器冷段管道、再热器、再热器热段管道的压损范围分别为汽轮机高压缸排汽压力的 1.5% ~ 2.0%、5% 和 3.0% ~ 3.5%。

各抽汽段的管道压损, 高压和中压缸取管道压力的 3%, 低压缸抽汽压损取 1.5%<sup>[9-10]</sup>。

高压、低压给水加热器均为表面式加热器, 加热蒸汽分别来自汽轮机高压缸、低压缸的抽汽。高压给水加热器按具有过热蒸汽冷却段设计, 上端差取为  $\geq -1.7$  °C, 低压给水加热器上端差一般取 2.8 °C<sup>[11-13]</sup>。

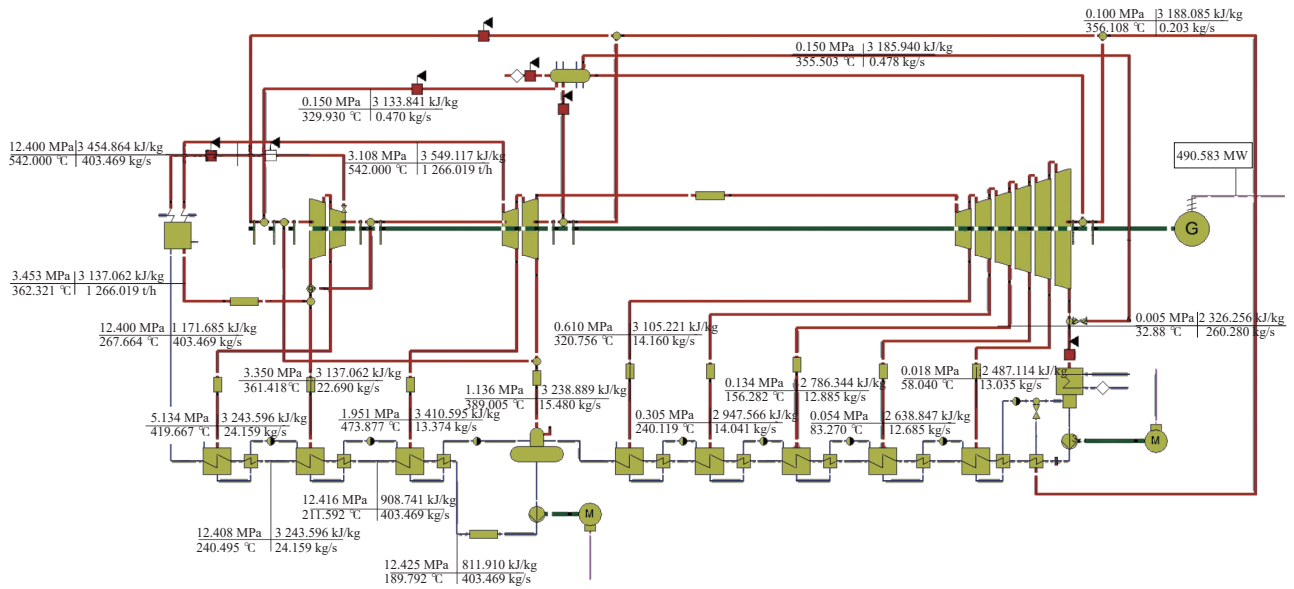


图 6 九级回热级数 Epsilon 模型

Fig. 6 Epsilon model with nine-stage regeneration

### 4.3 再热压力和温度确定

蒸汽再热器使用高压缸抽汽和蒸汽发生器新蒸汽加热,再热温度的提高对再热的经济效果总是有利的<sup>[14-15]</sup>,但同样受到高温金属材料的限制。一般取再热温度接近于新蒸汽温度。当再热温度等于蒸汽初温度时,最佳再热压力为蒸汽初压力的 18%~28%。当再热前有回热抽汽的可取 22%~28%,再热前无回热抽汽的可取 18%~22%<sup>[16-19]</sup>。

### 4.4 其他设备确定

在 Epsilon 进行电厂模拟时,凝汽器通常被模拟为一个等温过程。凝汽器进口和出口的压力也可以设置为相等。

轴封在 Epsilon 里用模块 123 (Shaft Sealing) 仿真,将漏气量作为轴封的“特性参数”,而其结构特点“齿数”作为“特性参数”漏气量的“主导因素”,在使用此模块时,只要根据电厂轴封的结构特征输入,即可仿真轴封漏气量。

给水泵在 Epsilon 里用模块 8 (Pump) 仿真,扬程和绝热效率 $\eta_s$ 是描述其特性的关键参数。

## 5 各工况输出结果及对比分析

通过 Epsilon 模拟计算,分别得出 7、8、9 级回热各参数工况的热力数据,代表性数据见附录表 S1~表 S9。

以主蒸汽进口温度 542 °C、12.4 MPa 不同工况

作代表,对比了 7、8、9 级回热级数的工况计算结果,其中,抽汽焓值、抽汽压力、抽汽温度和抽汽流量随压力范围变化的趋势如图 7~图 10 所示,变化趋势符合实际情况。

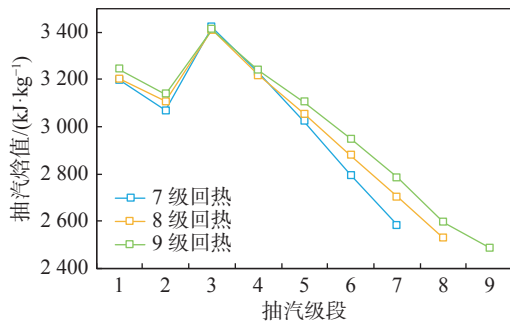


图 7 不同回热级数抽汽焓值变化图

Fig. 7 Steam extraction enthalpy for different regeneration stages

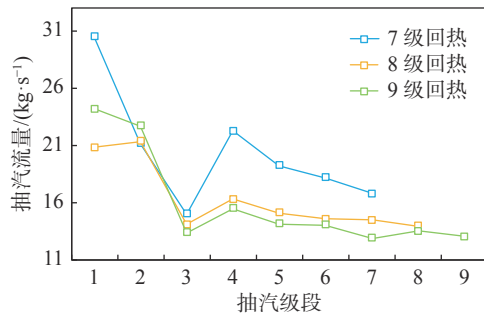


图 8 不同回热级数抽汽流量变化图

Fig. 8 Steam extraction flow rate for different regeneration stages

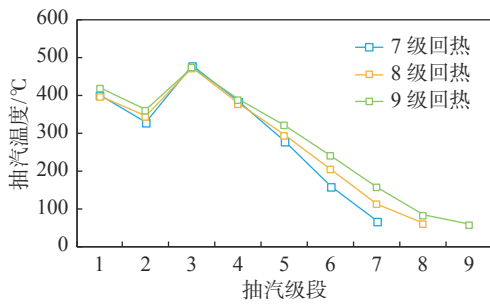


图 9 不同回热级数抽汽温度变化图

Fig. 9 Steam extraction temperature for different regeneration stages

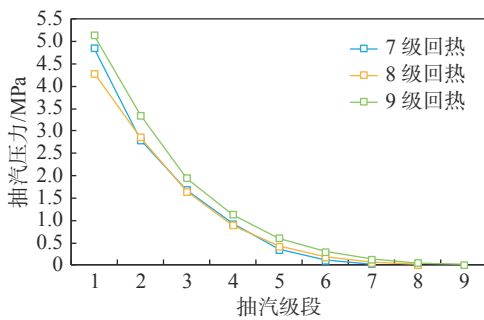


图 10 不同回热级数抽汽压力变化图

Fig. 10 Steam extraction pressure for different regeneration stages

各回热级数的抽汽参数变化曲线虽然不重叠, 但只是由于级数不同而引起, 大致的变化趋势仍然一致。

如图 11 所示, 随着回热级数的增加, 回路的输出效率也随着增加, 但增长率只有 0.2% 左右, 数值并不是特别明显。

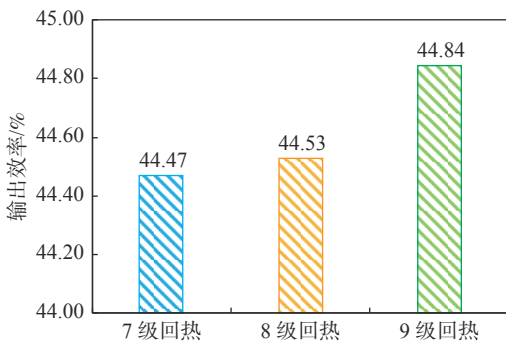


图 11 不同回热级数输出效率变化图

Fig. 11 Output efficiency for different regeneration stages

对于回热级数, 国产小机组一般采用的回热级数为 1~3 级, 大机组为 7~9 级。对于 400 MW 的机组, 一般选取 7~9 级的回热级数循环内效率提高

最多。而对于本研究的计算, 每增加一级回热级数输出效率增长并不明显。

以 9 级回热为例, 各参数下机组发电功率如图 12 所示, 从图中可以看出在本研究所选择的主汽参数范围内, 随着温度和压力提高, 机组发电功率逐渐增大, 这与理论分析结论是完全一致的。

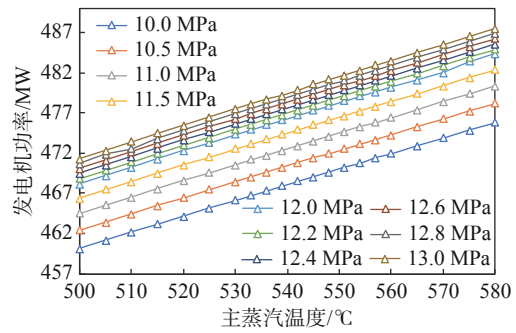


图 12 9 级回热各参数下机组发电功率

Fig. 12 Power generation of units under various parameters of 9-stage regeneration

## 6 成本分析与对比

成本分析应以整个发电岛为研究对象, 综合考虑储能岛和常规岛的总成本与收益, 才能得出较为客观准确的经济性对比方案。

在进行热力方案经济性对比分析时, 仅以因为三回路参数不同导致的设备的价格变化值为研究对象。因此需要定义基准工况作为对比基础。

### 6.1 基准工况

成本分析时, 汽轮机系统按主汽温度 500 °C、再热蒸汽温度 500 °C、主汽压力 10 MPa 为经济性分析的基准工况。

### 6.2 三回路主要设备成本及其随参数的变化

三回路参数和热力方案对汽轮机、给水泵、高压加热器、低压加热器、主汽和高温再热管道的成本有显著影响。在热力方案经济性对比分析时, 仅关注不同主汽温度、不同主汽压力下投资费用相对基准工况的变化数值。暂不考虑不同主汽温度和不同主汽压力下系统的年运行费用的变化。

本研究中上述设备的价格水平按表 1 考虑(一台机组)<sup>[20]</sup>。可以看出, 当三回路参数在 500~580 °C, 10.0~13.0 MPa(a) 范围内变化时, 常规岛初投资成本对参数不敏感。因此, 本研究选用 9 级回热方案, 这对整个发电岛的经济性是有利的, 但是主汽和再

表 1 三回路主要设备价格水平

Tab. 1 Price of main equipment of the three-circuit system

设备	总价/亿元	备注
汽轮机	2.000	在500~580℃范围内,主汽温度变化对价格影响不大
给水泵(扬程11~14 MPa)	0.450	在11~14 MPa范围内,扬程变化对价格影响不大
高压加热器(≥14 MPa)	0.139	3级共3台
高压加热器(<14 MPa)	0.132	3级共3台
低压加热器(3台)	0.070	三回路参数对每台低压加热器的价格影响不大
低压加热器(4台)	0.093	三回路参数对每台低压加热器的价格影响不大
低压加热器(5台)	0.116	三回路参数对每台低压加热器的价格影响不大
主蒸汽和高温再热蒸汽管道(SA335 P91)	0.308	—
主蒸汽和高温再热蒸汽管道(12Cr1MoVG)	0.084	—

热参数需要根据储能岛的设备成本综合考虑。

### 6.3 储能岛主要设备成本及其随参数的变化

储能岛主要由氦气-熔盐换热系统、熔盐储热系统、熔盐蒸汽发生系统及其相关管线和阀门组成。熔盐储热系统主要设备有冷、热熔盐罐各1台,熔盐泵6台;氦气-熔盐储热系统主要设备有16台氦气-熔盐换热器;熔盐蒸汽发生系统主要设备为8台预热器、8台蒸发器、8台过热器、8台再热器、4台汽包。

储能岛投资成本对参数较为敏感,详见表2和图13。在相同的主汽压力下,主汽温度越高,储能岛投资越大,500~525℃的投资变化不显著,525~565℃投资逐渐加大,565~580℃投资显著增加。在相同主蒸汽温度下,主汽压力越高,储能岛投资越大,但当压力达到12.4 MPa时,投资显著增加。

### 6.4 经济性分析结果

将储能岛和常规岛初投资和发电收益,利用年总费用法进行经济性分析,结果如图14~图15所示。

从图14可知,储能岛加发电岛的相对总投资(以9级回热,10 MPa,500℃为基础)变化趋势与储能岛投资类似(见图13),主汽温度越高,投资越大,温度在500~525℃范围内,投资变化不显著,525~565℃投资逐渐加大,565~580℃投资显著增加。主汽压力越高,投资越大,但当压力达到12.4 MPa

表 2 储能系统设备投资估算表

Tab. 2 Investment estimation for energy storage system

主汽参数	总价估算/亿元	主汽参数	总价估算/亿元
10 MPa/500℃	9.7257	10 MPa/520℃	9.9385
10 MPa/542℃	11.9678	10 MPa/565℃	16.8095
10 MPa/580℃	22.4683	11 MPa/500℃	10.7367
11 MPa/520℃	12.6494	11 MPa/542℃	15.2578
11 MPa/565℃	18.5188	11 MPa/580℃	24.7170
12 MPa/500℃	12.5180	12 MPa/520℃	13.5057
12 MPa/542℃	19.3624	12 MPa/565℃	23.4857
12 MPa/580℃	30.5741	12.4 MPa/500℃	14.3608
12.4 MPa/520℃	16.5947	12.4 MPa/542℃	21.3126
12.4 MPa/565℃	26.6121	12.4 MPa/580℃	36.6224
12.6 MPa/500℃	24.7590	12.6 MPa/520℃	25.8262
12.6 MPa/542℃	26.9492	12.6 MPa/565℃	28.7397
12.6 MPa/580℃	37.0138	12.8 MPa/500℃	28.1328
12.8 MPa/520℃	29.3781	12.8 MPa/542℃	32.0473
12.8 MPa/565℃	34.3055	12.8 MPa/580℃	43.4866
13 MPa/500℃	28.5890	13 MPa/520℃	29.8608
13 MPa/542℃	32.5796	13 MPa/565℃	34.8650
13 MPa/580℃	44.1029	—	—

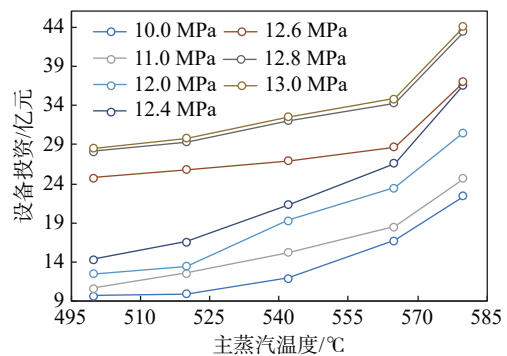


图 13 储能系统设备投资估算图

Fig. 13 Investment estimation for energy storage system

时,投资显著增加。

从图15可知,同一压力下,500~540℃区间,年总费用变化不大;各压力下年总费用最小值主要在520℃上下,540~560℃年总费用开始增加,经济性变差;560~580℃,年净费用变化加大,经济性显著变差。10~12.4 MPa之间,年总费用差异较小。

基于上述经济性分析,主蒸汽参数推荐范围为:10~12.4 MPa(a)、525~540℃。一般主蒸汽参数越高,汽轮发电机组的效率越高,机组的经济性越好;

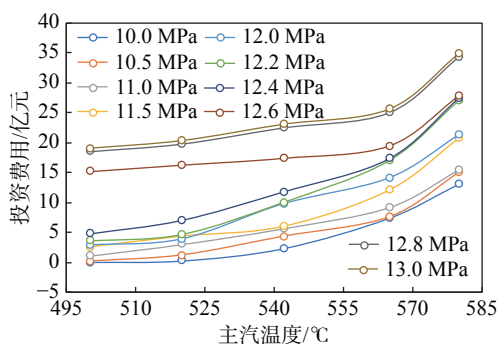


图 14 储能岛和三回路投资变化与参数的关系

Fig. 14 The relationship between investment and parameters in energy storage island and three-circuit system

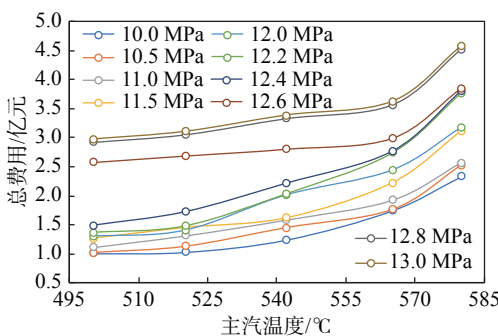


图 15 储能岛和发电岛年总费用与参数的关系

Fig. 15 The relationship between annual total cost and parameters of energy storage islands and power generation island

随着设备设计和制造水平的发展, 储能设备的造价将逐年下降; 因此, 进行常规岛主蒸汽参数计算时, 建议结合当前熔盐储热的经典蒸汽参数综合考虑, 暂可按 12.4 MPa、540 °C 进行分析设计, 此时汽轮发电机组电功率为 477.48 MW, 发电效率为 44.79%。

## 7 结论

对于采用汽轮发电机组发电的电站, 蒸汽参数和热力方案是工程设计开始之前要确定下来的技术规范。本研究依据储能岛提供的输入条件采用等效焓降法, 利用 Ebsilon 对电厂进行了建模、计算得出了各热力方案的详细热力参数, 并进行了对比。结合各热力方案储能岛和三回路初投资成本, 三回路推荐采用 9 级回热, 主蒸汽参数推荐范围为: 10 ~ 12.4 MPa(a)、525 ~ 540 °C。随着设备设计和制造水平的发展, 储能设备的造价将逐年下降; 因此, 进行三回路参数选择时, 建议结合当前熔盐储热的经典蒸汽参数综合考虑, 暂可按 12.4 MPa、540 °C 进行

设计。

本研究对 CFETR 发电岛三回路参数及热力系统做定量分析, 结论可以为后续 CFETR 聚变发电技术研究以及工程设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
- CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. Southern energy construction, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
- [2] 梁展鹏, 向魁, 李华, 等. CFETR 聚变发电厂的储能技术适用性分析 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(2): 53-62. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007.
- LIANG Z P, XIANG K, LI H, et al. Applicability analysis of energy storage techniques for CFETR fusion power plant [J]. Southern energy construction, 2022, 9(2): 53-62. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.007.
- [3] 向魁, 梁展鹏, 李华, 等. CFETR 聚变发电厂概念设计技术研究 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(2): 45-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006.
- XIANG K, LIANG Z P, LI H, et al. Conceptual design technology research of CFETR fusion power plant [J]. Southern energy construction, 2022, 9(2): 45-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006.
- [4] 柯冬冬, 谢玉荣, 赵大周, 等. 基于 Ebsilon 软件的燃气-蒸汽联合循环热力系统分析 [J]. 节能, 2018, 37(9): 10-12. DOI: 10.3969/j.issn.1004/7948.2018.09.005.
- KE D D, XIE Y R, ZHAO D Z, et al. Analysis of gas-steam combined cycle thermodynamic system based on Ebsilon software [J]. Energy conservation, 2018, 37(9): 10-12. DOI: 10.3969/j.issn.1004/7948.2018.09.005.
- [5] 严俊杰, 李运泽, 林万超. 压水堆核电站二回路定量分析方法的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(5): 19-23. DOI: 10.3321/j.issn:0253-987X.2000.05.005.
- YAN J J, LI Y Z, LIN W C. Thermo-economics analysis for the secondary-circuit of PWR nuclear power plant [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(5): 19-23. DOI: 10.3321/j.issn:0253-987X.2000.05.005.
- [6] 张小勇, 刘琦, 杨志平, 等. AP1000 核电厂二回路热力系统计算与分析 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(9): 107-113. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2018.09.016.
- ZHANG X Y, LIU Q, YANG Z P, et al. Calculation and analysis of thermodynamic system of secondary loop in AP1000 nuclear power plant [J]. Journal of engineering for thermal energy and power, 2018, 33(9): 107-113. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2018.09.016.
- [7] 陈国慧, 林万超, 刑秦安, 等. 等效焓降及其应用 [M]. 西安: 西



- 安交通大学出版社, 2000: 51.  
CHEN G H, LIN W C, XING Q A, et al. Equivalent heat drop and applications [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000: 51.
- [8] 郭民臣. 电厂热力系统分析方法的研究与发展现状 [J]. *热力发电*, 2001, 30(6): 7-9,12. DOI: 10.19666/j.rlfid.2001.06.002.  
GUO M C. Status quo of research and development in the area of analysis methods for power plants' thermodynamic sustems [J]. *Thermal power generation*, 2001, 30(6): 7-9,12. DOI: 10.19666/j.rlfid.2001.06.002.
- [9] 程伟良, 王清照, 王加璇. 300 MW 凝汽机组的热经济学成本诊断 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(8): 126-129. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2005.08.023.  
CHENG W L, WANG Q Z, WAGN J X. Thermo-economic cost diagnosis of 300 MW condensing power plant [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(8): 126-129. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2005.08.023.
- [10] 苑丽伟, 谢磊, 黄新元. 大型火电机组热力系统变工况经济性分析 [J]. *能源工程*, 2007(4): 29-32. DOI: 10.16189/j.cnki.nygc.2007.04.012.  
YUAN L W, XIE L, HUANG X Y. Economic analysis of thermal system under off-design condition in large-scale coal-fired power unit [J]. *Energy engineering*, 2007(4): 29-32. DOI: 10.16189/j.cnki.nygc.2007.04.012.
- [11] 梁岩芳, 彭姝璇, 崔永军, 等. 汽轮机轴封加热器换热性能计算 [J]. *发电技术*, 2023, 43(6): 817-823. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23028.  
LIANG Y F, PENG S X, CUI Y J, et al. Calculation of heat transfer performance of steam turbine shaft sealing heater [J]. *Power generation technology*, 2023, 43(6): 817-823. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23028.
- [12] 葛晓霞, 缪国钧. 加热器端差对机组经济性的影响 [J]. *汽轮机技术*, 2006, 48(5): 372-375. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2006.05.017.  
GE X X, MIAO G J. Heater terminal temperature difference effect on unit economic [J]. *Turbine technology*, 2006, 48(5): 372-375. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2006.05.017.
- [13] 郭民臣, 刘强. 加热器散热损失对机组热经济性的影响 [J]. *节能技术*, 2006, 24(5): 405-408. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2006.05.006.  
GUO M C, LIU Q. Influence of heater's heat loss on heat economy of unit [J]. *Energy conservation technology*, 2006, 24(5): 405-408. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2006.05.006.
- [14] 许静, 张树芳, 陈海平, 等. 汽轮机汽缸效率变化热经济性简化分析模型 [J]. *中国电力*, 2002, 35(8): 5-7. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9649.2002.08.002.  
XU J, ZHANG S F, CHEN H P, et al. Thermal economic simplified analysis models for the cylinder relative efficiency changing of steam turbine [J]. *Electric power*, 2002, 35(8): 5-7. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9649.2002.08.002.
- [15] 方永平, 胡念苏, 汪静, 等. 600 MW 超临界汽轮发电机组耗差分析 [J]. *汽轮机技术*, 2007, 49(1): 8-11. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2007.01.003.  
FANG Y P, HU N S, WANG J, et al. Energy loss analysis on 600 MW super critical steam turbine generator unit [J]. *Turbine technology*, 2007, 49(1): 8-11. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2007.01.003.
- [16] 杨晓辉, 单世超. 核电汽轮机与火电汽轮机比较分析 [J]. *汽轮机技术*, 2006, 48(6): 404-406,438. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2006.06.002.  
YANG X H, SHAN S C. Comparison of nuclear turbine to fossil turbine [J]. *Turbine technology*, 2006, 48(6): 404-406,438. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2006.06.002.
- [17] 杨豫森, 严俊杰, 刘立成, 等. 压水堆核电机组二回路热力系统计算的研究 [J]. *热能动力工程*, 2004, 19(1): 25-28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2060.2004.01.007.  
YANG Y S, YAN J J, LIU L C, et al. A study of the thermodynamic system calculations for the secondary circuit of a pressurized water reactor [J]. *Journal of engineering for thermal energy and power*, 2004, 19(1): 25-28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2060.2004.01.007.
- [18] 徐乔, 王世勇. 核电汽轮机热平衡计算与应用 [J]. *热力透平*, 2016, 45(2): 118-122. DOI: 10.13707/j.cnki.31-1922/th.2016.02.008.  
XU Q, WANG S Y. Calculation and application of heat balance in nuclear steam turbines [J]. *Thermal turbine*, 2016, 45(2): 118-122. DOI: 10.13707/j.cnki.31-1922/th.2016.02.008.
- [19] 徐大懋, 邓德兵, 王世勇, 等. 汽轮机的特征通流面积及弗留格尔公式改进 [J]. *动力工程学报*, 2010, 30(7): 473-477.  
XU D M, DENG D B, WANG S Y, et al. Application of characteristic flow area of steam turbines and improvement on flügel formula [J]. *Journal of Chinese society of power engineering*, 2010, 30(7): 473-477.
- [20] 电力规划设计总院. 火电工程限额设计参考造价指标 (2022 年水平) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.  
Electric Power Planning & Engineering Institute. Reference cost indicators for quota design of thermal power engineering (2022) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.

#### 作者简介:



罗贤勇

罗贤勇 (第一作者, 通信作者)

1982-, 男, 江西南昌人, 高级工程师, 华北电力大学热能工程硕士, 主要从事发电厂热机设计研究工作 (e-mail) luoxianyong@gedi.com。

(编辑 徐嘉铖)

## 附录

表 S1 7 级回热加热器参数

Tab. S1 Parameters of 7-stage regenerative heater

参数	高加1	高加2	高加3	除氧	低加5	低加6	低加7
抽汽比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	3 198.6	3 069.6	3 422.3	3 229.5	3 021.9	2 794.8	2 584.8
管道压损/%	3	3	3	5	5	5	5
抽汽压力/MPa	4.543	2.710	1.575	0.868	0.327	0.106	0.027
上端差/°C	-1.7	0.0	0.0	—	2.8	2.8	2.8
下端差/°C	5.6	5.6	—	5.6	5.6	5.6	5.6
进水温度/°C	228.3	200.6	173.8	133.7	98.4	63.9	34.0
进水比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	984.9	860.4	743.1	563.3	414.0	269.1	144.3
出水温度/°C	259.7	228.3	200.6	173.8	133.7	98.4	63.9
出水比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	1 132.5	984.9	860.4	736.0	563.3	414.0	269.1
疏水温度/°C	233.9	206.2	173.8	—	104.0	69.5	39.6
疏水比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	1 008.7	880.9	736.4	—	436.3	291.0	165.9

表 S2 8 级回热加热器参数

Tab. S2 Parameters of 8-stage regenerative heater

参数	高加1	高加2	高加3	除氧	低加5	低加6	低加7	低加8
抽汽比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	3 202.5	3 106.3	3 408.4	3 218.1	3 054.9	2 879.1	2 703.8	2 528.6
管道压损/%	3	3	3	5	5	5	5	5
抽汽压力/MPa	4.289	2.865	1.651	0.896	0.428	0.185	0.069	0.020
上端差/°C	-1.7	0.0	0.0	—	2.8	2.8	2.8	2.8
下端差/°C	5.6	5.6	—	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
进水温度/°C	231.3	202.9	175.2	143.3	115.0	86.8	57.3	34.0
进水比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	998.8	870.5	748.9	604.3	483.7	364.8	241.4	144.3
出水温度/°C	256.2	231.3	202.9	175.2	143.3	115.0	86.8	57.3
出水比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	1 115.7	998.8	870.5	741.9	604.3	483.7	364.8	241.4
疏水温度/°C	236.9	208.5	175.2	—	120.6	92.4	62.9	39.6
疏水比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	1 023.0	891.2	742.3	—	506.3	387.0	263.2	165.9

表 S3 9 级回热加热器参数

Tab. S3 Parameters of 9-stage regenerative heater

参数	高加1	高加2	高加3	除氧	低加5	低加6	低加7	低加8	低加9
抽汽比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	3 243.6	3 137.1	3 410.6	3 238.9	3 105.2	2 947.6	2 786.3	2 596.5	2 487.1
管道压损/%	3	3	3	5	5	5	5	5	5
抽汽压力/MPa	5.134	3.350	1.951	1.136	0.610	0.305	0.134	0.054	0.018
上端差/°C	-1.7	0.0	0.0	—	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
下端差/°C	5.6	5.6	—	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
进水温度/°C	240.1	211.1	185.5	156.7	131.3	105.2	80.4	55.0	34.0
进水比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	1 039.2	907.2	793.9	662.0	553.1	442.4	338.4	231.9	144.3
出水温度/°C	267.3	240.1	211.1	185.5	156.7	131.3	105.2	80.4	55.0
出水比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	1 169.5	1 039.2	907.2	2 799.0	662.0	553.1	442.4	338.4	231.9
疏水温度/°C	245.7	216.7	185.5	—	136.9	110.8	86.0	60.6	39.6
疏水比焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	1 064.7	928.9	787.9	—	576.0	464.9	360.4	253.7	165.9

表 S4 8 级回热蒸汽发生器主要设计参数

Tab. S4 Main design parameters of steam generator of 8-stage regeneration

参数	TMCR
主蒸汽压力/MPa	12.4
主蒸汽温度/°C	542
主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 400.930
再热压力/MPa	2.439
再热温度/°C	542
再热流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 213.246
给水进口压力/MPa	14.5
给水进口温度/°C	260.0
给水进口流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 400.930

表 S5 8 级回热加热器参数

Tab. S5 Parameters of 8-stage regenerative heater

参数	TMCR
主蒸汽压力/MPa	12.4
主蒸汽温度/°C	542
主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 405.448
再热压力/MPa	2.658
再热温度/°C	542
再热流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 236.279
给水进口压力/MPa	14.5
给水进口温度/°C	256.5
给水进口流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 405.448

表 S6 9 级回热蒸汽发生器主要设计参数

Tab. S6 Main design parameters of steam generator of 9-stage regeneration

参数	TMCR
主蒸汽压力/MPa	12.4
主蒸汽温度/°C	542
主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 452.488
再热压力/MPa	3.108
再热温度/°C	542
再热流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 261
给水进口压力/MPa	14.5
给水进口温度/°C	267.6
给水进口流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 452.488

表 S7 7 级回热回路总效率与输入输出功率

Tab. S7 Total efficiency and input and output power of 7-stage regenerative circuit

参数	TMCR
三回路输入/MW	1 066
三回路输出/MW	474.0
发电效率/%	44.46

表 S8 8 级回热回路总效率与输入输出功率

Tab. S8 Total efficiency and input and output power of 8-stage regenerative circuit

参数	TMCR
三回路输入/MW	1 066
三回路输出/MW	474.7
发电效率/%	44.52

表 S9 9 级回热回路总效率与输入输出功率

Tab. S9 Total efficiency and input and output power of 9-stage regenerative circuit

参数	TMCR
三回路输入/MW	1 066
三回路输出/MW	478.1
发电效率/%	44.80

(罗贤勇)