

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406199

# 1 000 MW 燃煤机组耦合熔盐 储热系统构型分析

陈 珣<sup>1,2,3</sup>, 陈正器<sup>4</sup>, 周 科<sup>5</sup>, 盛 锴<sup>1</sup>, 朱光明<sup>2</sup>, 刘 明<sup>3</sup>

(1.湖南省湘电试验研究院有限公司, 湖南 长沙 410208;

2.国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410208;

3.西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;

4.华北电力大学动力工程系, 河北 保定 071003;

5.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘 要] 随着可再生能源发电装机容量的增长, 燃煤机组需要承担更多调峰任务。为提升燃煤机组运行灵活性, 以某 1 000 MW 机组为研究对象, 基于 Ebsilon 软件, 提出了熔盐耦合的 6 种储热构型和 4 种释热构型, 对不同储热、释热耦合构型的热经济性指标进行对比分析。结果表明: 储热阶段系统调峰能力与换热蒸汽压力损失正相关, 释热阶段加热除氧器出口给水的经济性最佳; 电加热熔盐储热的热效率和烟效率最高, 构型 D-a 调峰能力最强, 调峰深度可达 23.61%, 但其煤耗率和烟损也最大; 构型 F-d 具有最佳热经济性, 调峰深度、热效率、烟效率和煤耗率分别为 23.42%、39.61%、38.40% 和 310.2 g/(kW·h)。

[关 键 词] 燃煤机组; 熔盐储热; 热经济性; 调峰能力

[引用本文格式] 陈珣, 陈正器, 周科, 等. 1 000 MW 燃煤机组耦合熔盐储热系统构型分析[J]. 热力发电, 2025, 54(4): 33-41.  
CHEN Xun, CHEN Zhengqi, ZHOU Ke, et al. Configuration analysis of coupled molten salt heat storage system for 1 000 MW coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(4): 33-41.

## Configuration analysis of coupled molten salt heat storage system for 1 000 MW coal-fired unit

CHEN Xun<sup>1,2,3</sup>, CHEN Zhengqi<sup>4</sup>, ZHOU Ke<sup>5</sup>, SHENG Kai<sup>1</sup>, ZHU Guangming<sup>2</sup>, LIU Ming<sup>3</sup>

(1.Hunan Xiangdian Test & Research Institute Co., Ltd., Changsha 410208, China;

2.State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Changsha 410208, China;

3.School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

4.Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

5.Xi'an Thermal Power Research Institute Co.,Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** With the growth of installed capacity of renewable energy power generation, coal-fired units need to undertake more peaking tasks. In order to improve the operational flexibility of coal-fired units, a 1 000 MW unit is taken as the research object, and six heat storage configurations and four heat release configurations of molten salt coupling are proposed based on the Ebsilon software, and the thermo-economic indexes of different heat storage and heat release coupling configurations are analyzed comparatively. The results show that, the peak shifting capacity of the system in the heat storage stage is positively correlated with the pressure loss of the heat transfer steam, and the thermal economy of heating the deaerator outlet feedwater in the heat release stage is the best. The heat storage of the electrically heated molten salt has the highest thermal and exergy efficiency, and configuration D-a has the strongest peak shifting capacity, with a peak shifting depth of up to 23.61%, but it has the largest coal consumption rate and exergy loss. Configuration F-d has the best thermal economy, with peak

收稿日期: 2024-06-30 网络首发日期: 2025-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52276016); 湖南省湘电试验研究院有限公司科技项目(XDKY-2022-03)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52276016); Research Fund of Hunan Xiangdian Test & Research Institute Co., Ltd. (XDKY-2022-03)

第一作者简介: 陈珣(1983), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为燃煤机组能效分析与优化, chenxun\_heptri@163.com。

shifting depth, thermal efficiency, fuel efficiency and coal consumption rate of 23.42%, 39.61%, 38.40% and 310.2 g/(kW·h), respectively.

**Key words:** coal-fired units; molten salt heat storage; thermal economy; peak shaving capability

在节能减排和“双碳”目标大背景下,着力推进电力供应由传统化石能源向可再生能源转变成建设重点。截至 2023 年,可再生能源发电装机容量突破 14 亿 kW,占比接近 50%<sup>[1-3]</sup>。传统燃煤机组存在调峰性能差、负荷响应迟滞等问题<sup>[4]</sup>,要充分发挥煤电的“压舱石”作用,必须提升燃煤机组运行灵活性。熔盐储热耦合燃煤机组能有效提升运行灵活性,保障电网安全稳定运行<sup>[3-4]</sup>,减轻可再生能源发电因自身缺陷<sup>[5-6]</sup>和局限性<sup>[7]</sup>导致的不能稳定持续输出电能<sup>[8]</sup>和弃光、弃风现象<sup>[9]</sup>。

熔盐储热技术已在光热发电领域得到广泛应用,在燃煤发电领域尚处于技术开发和示范应用阶段。张显荣等<sup>[10]</sup>设计了 600 MW 机组与熔盐储热、混凝土储热和亚临界水储热的耦合系统方案,对比分析各耦合系统热力性能和调峰性能。Li 等人<sup>[11]</sup>将燃煤机组与级联式相变储热装置耦合,抽取再热蒸汽储热,加热除氧器出口给水产生的蒸汽进入低压缸释热增加机组出力。

在不同储热-释热构型探索方面,邹小刚等<sup>[12]</sup>针对火电机组耦合熔盐储热深度调峰系统研究了多种耦合方案,表明电加热熔盐储热具有较高热效率和调峰能力。刘金恺等<sup>[13]</sup>提出了 8 种熔盐储热辅助调峰系统设计方案,其中,释热方案采用加热旁路给水可获得最大调峰容量和最高系统效率及经济性。冀帅宇等<sup>[14]</sup>提出一种抽取再热蒸汽和主蒸汽联合加热二次热风的灵活调峰运行方式,抽主蒸汽和抽再热蒸汽相结合,可以拓宽机组的调峰空间,提高消纳可再生能源的能力。魏海姣等<sup>[15-17]</sup>提出抽取主蒸汽和再热蒸汽储热实现机组灵活性运行,分析了系统中部件的焓损失,指出抽汽储热后系统的循环焓效率有所降低。

在燃煤机组耦合熔盐储热运行控制策略方面,白晨曦<sup>[18]</sup>针对燃煤发电机组配置熔盐储热的运行策略展开研究,多角度考虑并选择不同的运行策略提升系统经济性。李浩宇<sup>[19]</sup>对基于蓄能系统燃煤机组灵活性的提升方法,提出了一种新型协调控制系统。Wang 等人<sup>[20-21]</sup>通过机组供热来实现快速变负荷和持续供热稳定运行,同时优化二次再热锅炉再热蒸汽温度控制,解决了稳定蒸汽温度的难题。

上述研究针对传统燃煤机组在负荷响应和调

峰能力的不足,提出了多种耦合熔盐储热方案。当前研究主要针对 600 MW 及以下机组,1 000 MW 级机组鲜有报道。1 000 MW 级机组调峰潜力巨大,但其部分排汽温度较低,抽汽位置有限,调峰容量与抽汽量的匹配要求更高。

本文以某超超临界 1 000 MW 燃煤机组为研究对象,采用 EBSILON 软件搭建热力系统模型,构建抽取主蒸汽、再热蒸汽并与电加热耦合的储热系统,探究储热过程加热熔盐方式、换热后工质流向、释热过程加热介质抽取和释热节点对机组运行灵活性和热经济性的影响,获得燃煤机组与熔盐储热最优耦合方式,以指导工程应用。

## 1 热力系统模型建立

### 1.1 研究对象

某超超临界 1 000 MW 机组汽轮机型号为 N1050-28.0/600/620,采用一次中间再热、单轴、四缸四排汽、纯凝汽式,设置 4 级高压加热器(高加)、除氧器、5 级低压加热器(低加)。机组主要设计参数见表 1。

表 1 某 1 000 MW 机组额定工况设计参数  
Tab.1 Design parameters for a 1 000 MW unit at rated operating conditions

项目	数值
额定功率/MW	1 046
主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	2 829.97
主蒸汽温度/℃	600.0
主蒸汽压力/MPa	26.727
再热蒸汽温度/℃	620.0
再热蒸汽压力/MPa	5.303
机组背压/kPa	4.8
最终给水温度/℃	302.0
预节流压力损失/%	3
机组热耗率/(kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	7 200.2
机组汽耗率/(kg·(kW·h) <sup>-1</sup> )	2.705

### 1.2 模型准确性验证

采用 Ebsilon 软件搭建系统模型,比较 100%、75%、50%THA 工况下模拟得到的参数值与设计值,误差结果见表 2。由表 2 可见,不同工况下,机组设计值与模拟值的最大误差不超过 2%,表明模型搭建和仿真结果可靠。

为简化系统模型，进行以下假设：

1) 系统始终为热力学稳态；

2) 储热过程机组维持 50%THA 工况<sup>[22]</sup>；

3) 释热过程给水流量维持在 75%THA 工况。

表 2 典型工况下机组设计值与模拟值对比

Tab.2 Comparison of unit design value and simulated value under typical working conditions

项目	100%THA			75%THA			50%THA		
	设计值	模拟值	误差/%	设计值	模拟值	误差/%	设计值	模拟值	误差/%
主蒸汽温度/℃	600	600	0	600	600	0	600	600	0
主蒸汽压力/MPa	27.504	27.504	0	20.63	20.75	0.58	13.63	13.69	0.46
主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	2 913.82	2 910.00	-0.03	2 144.72	2 138.4	-0.30	1 385.73	1 380.70	-0.36
再热蒸汽温度/℃	620	620	0	620	620	0	620	620	0
再热蒸汽压力/MPa	5.246	5.246	0	3.904	3.931	0.70	2.635	2.62	-0.57
再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	2 264.60	2 271.90	0.32	1 686.08	1 701.40	0.90	1 133.75	1 137.80	0.36
热耗率/(kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	7 184.60	7 162.80	-0.30	7 337.70	7 311.25	-0.36	7 594.30	7 562.80	-0.41
0 号高加抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	116.52	116.70	0.15	113.20	113.33	0.11	57.66	57.23	-0.75
1 号高加抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	184.85	185.10	-0.13	117.16	118.10	0.80	63.10	62.70	-0.63
2 号高加抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	299.17	299.65	0.16	191.51	191.63	0.06	107.38	106.59	-0.74
3 号高加抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	125.87	125.71	-0.13	97.19	96.50	-0.71	60.82	60.90	0.13
5 号低加抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	75.52	76.13	0.80	52.15	52.24	0.17	31.72	31.66	-0.19
6 号低加抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	70.87	71.10	0.32	49.00	49.43	0.88	30.42	30.30	-0.40
7 号低加抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	70.76	70.29	-0.60	52.79	52.52	-0.51	33.72	33.85	0.39
8 号低加抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	102.59	101.80	-0.77	72.46	72.20	-0.36	45.12	45.43	0.69
9 号低加抽汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	74.76	74.20	-0.75	43.44	43.11	-0.76	18.55	18.50	-0.27
给水温度/℃	314.90	314.90	0	302.30	302.30	0	275.90	275.90	0
发电功率/MW	1 046.00	1 045.50	-0.05	784.50	784.15	-0.05	523.00	524.30	0.25

## 2 储热系统方案

### 2.1 熔盐介质选择

熔盐作为一种较为理想的储热介质，其理化性质稳定，工作温度区间一般在 200~600 ℃，可利用谷电或难以消纳的风电、光电加热，使用寿命长、成本低<sup>[21]</sup>。目前，针对熔盐的研究主要以硝酸盐、碳酸盐为主，其稳定极限温度均在 550、650 ℃以上<sup>[23-24]</sup>。

由于机组主蒸汽和再热蒸汽温度分别为 600、620 ℃，除氧器出口凝结水温度约为 160 ℃，太阳盐（40%KNO<sub>3</sub>-60%NaNO<sub>3</sub>）工作温度为 223~565 ℃，碳酸盐（35%K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-32%Li<sub>2</sub>CO<sub>2</sub>-33%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>）工作温度为 400~800 ℃；既有足够的换热温差，也不会因为换热温差过大造成过多的能量损失。本文以太阳盐和碳酸盐<sup>[25]</sup>作为储热介质，其热物性参数见表 3。

表 3 熔盐热物性参数

Tab.3 Thermophysical parameters of molten salts

项目	太阳盐	碳酸盐
熔点/℃	223	397
工作温度/℃	240~565	400~800
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.8	2.3
导热系数/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	0.5	1.2
比热容/(kJ·(kg·K) <sup>-1</sup> )	1.5	1.9

### 2.2 储热-释热耦合系统构型

燃煤机组耦合熔盐储热技术，在低电价时利用

机组过剩电力或抽取高温蒸汽加热熔盐进入高温熔盐罐储存备用，换热后的蒸汽一部分进入汽轮机级内继续膨胀做功，另一部分排入凝汽器或供给热用户。峰电价时，高温熔盐放热加热给水，或将给水加热为高温蒸汽后进入汽轮机内做功，提升机组出力并节煤，换热后的熔盐进入低温罐储存备用。

以 50%额定负荷储热，75%额定负荷释热，构建了 6 种储热构型和 4 种释热构型，储热-释热耦合系统构型见表 4。系统储热流程构型示意如图 1 所示，释热流程构型示意如图 2 所示。释热过程各构型高、低温熔盐罐的运行温度参数见表 5。

表 4 储热-释热耦合系统构型

Tab.4 The coupled system configuration for heat storage and heat release

项目	内容
储热构型	A:电加热熔盐
	B:抽取部分主蒸汽后耦合电锅炉，换热后进入锅炉冷再
	C:抽取部分再热蒸汽后耦合电锅炉，换热后进入凝汽器
	D:同时抽取部分主蒸汽和再热蒸汽，换热后进入凝汽器/供给热用户
	E:同时抽取部分主蒸汽和再热蒸汽后耦合电锅炉，换热后进入除氧器
	F:抽取部分主蒸汽后耦合电锅炉、抽取部分再热蒸汽，换热后进入凝汽器
释热构型	a:抽取部分除氧器给水，换热后进入 1 号高加出口
	b:抽取部分除氧器给水，换热后进入锅炉给水
	c:抽取部分 3 号高加出口给水，换热后进入锅炉给水
	d:抽取部分除氧器给水，一级换热成为蒸汽，二级换热后汇入主蒸汽到高压缸做功

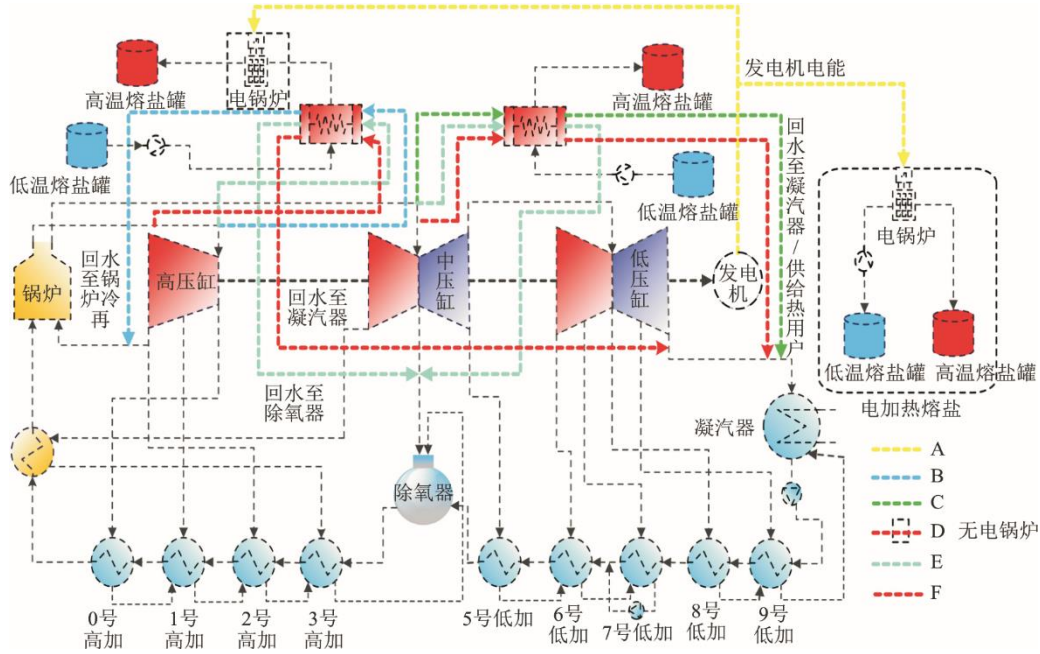


图 1 储热流程构型

Fig.1 Heat storage process configuration

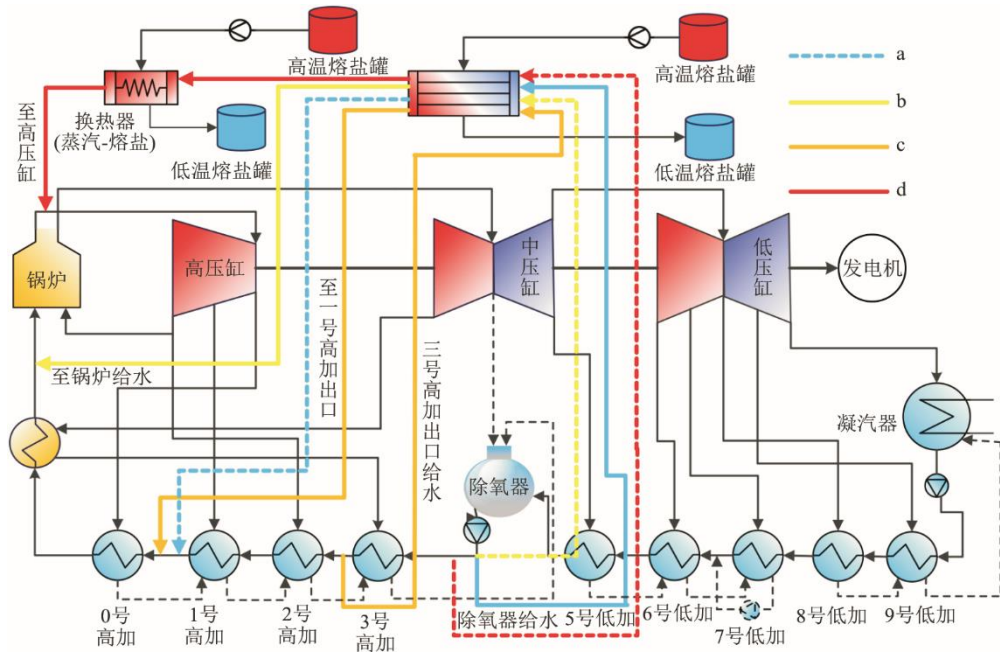


图 2 释热流程构型

Fig.2 Configuration of the heat release process

表 5 释热过程熔盐罐运行温度

Tab.5 The operating temperatures of the molten salt tank during exothermic process

释热构型	热罐温度/°C	冷罐温度/°C	熔盐类型
a	530	250	太阳盐
b	530	250	太阳盐
c	530	250	太阳盐
d 一级换热	500	250	太阳盐
d 二级换热	660	450	碳酸盐

### 2.3 性能评价指标

以调峰容量、调峰深度、热效率、焓效率、煤耗率、熔盐流量作为燃煤机组耦合熔盐储热系统的性能评价指标。

#### 2.3.1 调峰容量和调峰深度

储热过程、释热过程和储热-释热全过程中，系统调峰容量和调峰深度定义如下：

$$\Delta P_{c,t} = P_c - P_{c,t} \quad (1)$$

$$\xi_{c,t} = \frac{\Delta P_{c,t}}{P_e} \times 100 \quad (2)$$

$$\Delta P_{s,t} = P_{s,t} - P_s \quad (3)$$

$$\xi_{s,t} = \frac{\Delta P_{s,t}}{P_e} \times 100 \quad (4)$$

$$\Delta P_{cs,t} = \Delta P_{c,t} + \Delta P_{s,t} \quad (5)$$

$$\xi_{cs,t} = \xi_{c,t} + \xi_{s,t} \quad (6)$$

式中： $\Delta P_{c,t}$ 、 $\Delta P_{s,t}$ 、 $\Delta P_{cs,t}$ 分别为  $t$  时刻储热过程、释热过程和储热-释热全过程的调峰容量，MW； $P_c$ 、 $P_s$ 、 $P_e$ 分别为 50%、75%和 100%额定工况机组电负荷，MW； $P_{c,t}$ 、 $P_{s,t}$ 分别为  $t$  时刻储热过程和释热过程的发电功率，MW； $\xi_{c,t}$ 、 $\xi_{s,t}$ 、 $\xi_{cs,t}$ 分别为  $t$  时刻储热过程、释热过程和储热-释热全过程的调峰深度，%。

### 2.3.2 热效率

储热过程、释热过程和储热-释热全过程中，系统热效率定义如下：

$$\eta_{Rc,t} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (P_{c,t} + q_{c,t}) dt}{\int_{t_1}^{t_2} \frac{Q_{bc,t}}{\eta_{b,t}} dt} \times 100 \quad (7)$$

$$\eta_{Rs,t} = \frac{\int_{t_3}^{t_4} P_{s,t} dt}{\int_{t_3}^{t_4} (\frac{Q_{bs,t}}{\eta_{b,t}} + q_{s,t}) dt} \times 100 \quad (8)$$

$$\eta_R = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{c,t} dt + \int_{t_3}^{t_4} P_{s,t} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \frac{Q_{bc,t}}{\eta_{b,t}} dt + \int_{t_3}^{t_4} \frac{Q_{bs,t}}{\eta_{b,t}} dt} \times 100 \quad (9)$$

式中： $\eta_{Rc,t}$ 、 $\eta_{Rs,t}$ 、 $\eta_R$ 分别为  $t$  时刻储热过程、释热过程和储热-释热全过程的系统热效率，%； $t_1$ 、 $t_2$ 分别为储热起、止时刻； $t_3$ 、 $t_4$ 分别为释热起、止时刻，s； $q_{c,t}$ 、 $q_{s,t}$ 分别为  $t$  时刻的储热负荷和释热负荷，MW； $Q_{bc,t}$ 、 $Q_{bs,t}$ 分别为  $t$  时刻的储热过程和释热过程的锅炉热负荷，MW； $\eta_{b,t}$ 为  $t$  时刻的锅炉效率，%。

### 2.3.3 煤耗率

储热-释热全过程中煤耗率的计算式为：

$$B = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \left( Q_{bc,t} \cdot \frac{Q_{net}}{\eta_{b,t}} \right) dt + \int_{t_3}^{t_4} \left( Q_{bs,t} \cdot \frac{Q_{net}}{\eta_{b,t}} \right) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{c,t} dt + \int_{t_3}^{t_4} P_{s,t} dt} \times \quad (10)$$

$$3.6 \times 10^5$$

式中： $B$ 为储热-释热全过程的煤耗率，g/(kW·h)； $Q_{net}$ 为燃料低位发热量，kJ/kg。

本文设计与计算煤种为该机组设计煤，其部分参数见表 6。

表 6 某 1 000 MW 机组设计煤质参数  
Tab.6 Design coal quality parameters of a 1 000 MW unit

$Q_{net}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w_{ar}(\text{C})/\%$	$w_{ar}(\text{H})/\%$	$w_{ar}(\text{O})/\%$	$w_{ar}(\text{N})/\%$
22.56	59.48	3.72	8.76	0.65

### 2.3.4 焓效率

燃料焓<sup>[26]</sup>及燃料比焓<sup>[27]</sup>的计算公式为：

$$E = B \times e_f \quad (11)$$

$$e_f = Q_{net} \cdot \left( \begin{array}{l} 1.0064 + 0.1519 \frac{w(\text{H})}{w(\text{C})} + \\ 0.0616 \frac{w(\text{O})}{w(\text{C})} + 0.0429 \frac{w(\text{N})}{w(\text{C})} \end{array} \right) \quad (12)$$

式中： $e_f$ 为燃料比焓，kJ/kg； $w(\text{H})$ 、 $w(\text{O})$ 、 $w(\text{N})$ 、 $w(\text{C})$ 分别为燃料中氢、氧、氮、碳元素的质量分数，%。

储热-释热全过程中系统焓效率计算式为：

$$\eta_{ex} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{c,t} dt + \int_{t_3}^{t_4} P_{s,t} dt}{\int_{t_1}^{t_2} E_{c,t} dt + \int_{t_3}^{t_4} E_{s,t} dt} \times 10^3 \times 100 \quad (13)$$

式中： $\eta_{ex}$ 为储热-释热全过程的焓效率，%； $E_{c,t}$ 、 $E_{s,t}$ 分别为  $t$  时刻储热过程和释热过程的燃料焓，MW。

### 2.3.5 熔盐流量

根据储热量以及熔盐比热容可以确定所需熔盐流量，计算公式为：

$$\dot{m}_{cq} = \frac{Q_1 - Q_2}{c_p (T_h - T_1)} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{eb} = \frac{Q_3}{c_p (T_h - T_1)} \quad (15)$$

式中： $\dot{m}_{cq}$ 、 $\dot{m}_{eb}$ 分别为使用抽汽、电锅炉加热熔盐所需熔盐质量流量，kg/s； $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 分别为抽汽热流量、排汽热流量和电锅炉功率，kW； $c_p$ 为熔盐定压比热容，kJ/(kg·K)； $T_h$ 、 $T_1$ 分别为高温熔盐温度和低温熔盐温度，℃。

## 3 燃煤机组耦合储热性能分析

### 3.1 储热过程分析

不同储热构型和储热负荷下调峰能力、熔盐

流量如图 3、图 4 所示。为避免再热器超温，抽汽流量占主蒸汽流量份额不高于 20%，考虑汽轮机轴向推力与末级叶片应力改变，抽汽流量占再热蒸汽流量份额不超过 30%<sup>[28]</sup>。储热负荷 25 MW 时，各构型主蒸汽与再热蒸汽抽汽流量见表 7。

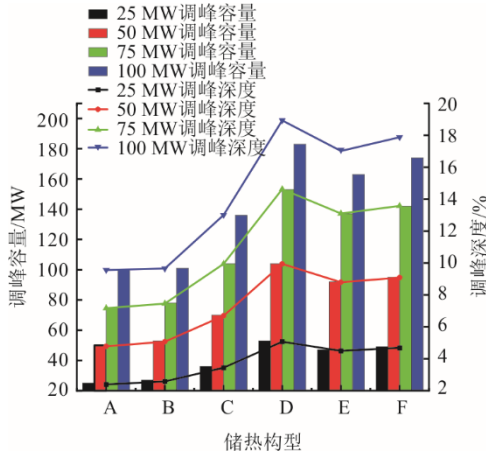


图 3 系统储热过程调峰能力

Fig.3 Peaking capacity of the system's thermal storage process

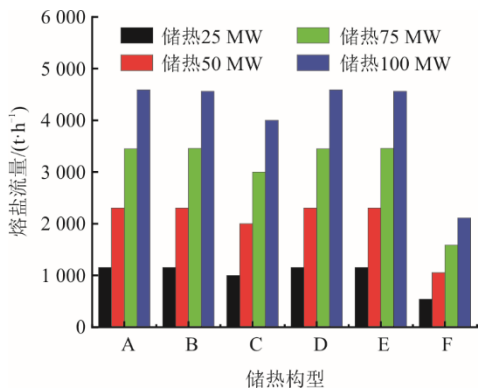


图 4 系统储热过程的熔盐流量

Fig.4 Molten salt flow for system heat storage processes

表 7 储热负荷 25 MW 时 B—F 构型抽汽流量  
Tab.7 Extracted steam flow rate of B—F configuration at 25 MW heat storage load

储热构型	主蒸汽抽汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	再热蒸汽抽汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	主蒸汽-储热负荷/MW	再热蒸汽-储热负荷/MW
B	86	0	25.0	0
C	0	80	0	25.0
D	48	51	12.5	12.5
E	37	40	9.0	9.0
F	37	24	9.0	6.0

注：构型 E、F 中电锅炉储热负荷分别为 7、10 MW。

构型 A 为电加热熔盐，可通过控制取电量灵活调节调峰容量，储热负荷 100 MW 时调峰深度为 9.56%；构型 B 储热过程抽取蒸汽的焓降较小，调

峰能力偏弱；构型 C 抽取再热蒸汽耦合电锅炉，调峰能力有所提高。

构型 D 同时抽取主蒸汽、再热蒸汽，释热后进入凝汽器，调峰深度最大（18.93%）；构型 E 在构型 D 的基础上耦合电锅炉，调峰能力略降低，但煤耗率有较大改善，构型 E-a 相比构型 D-a 的煤耗率降低约 7.6 g/(kW·h)，调峰深度仅减少 1.90%，且构型 E-a 的系统热效率、焓效率均高于构型 D-a；构型 F 对应不同温区将熔盐分为两路，调峰能力介于构型 D 和构型 E 之间。由图 4 可知，构型 F 熔盐流量最低，储热负荷为 100 MW 时，碳酸盐流量 1 000 t/h，太阳盐流量 1 112 t/h，约为其他构型的 1/2。

储热负荷 25 MW 时，储热构型 B、储热构型 C 蒸汽-熔盐换热器压降与系统调峰容量关系如图 5 所示。由图 5 可知，储热过程系统获得的调峰容量与换热蒸汽压降呈正相关。构型 B 主蒸汽压降每增加 2.5 MPa，调峰容量增加约 2 MW；构型 C 再热蒸汽压降每增加 0.5 MPa，调峰容量增加约 0.8 MW。

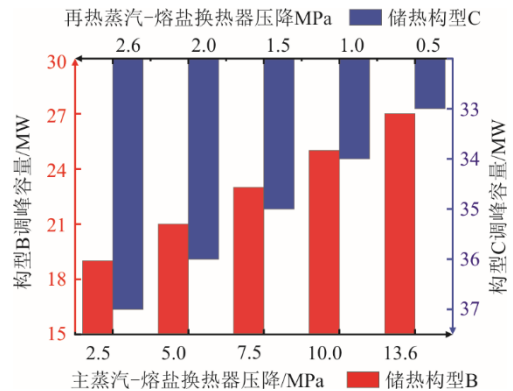


图 5 换热器压降与系统调峰容量

Fig.5 Heat exchanger pressure drop and peak shaving capacity of the system

### 3.2 释热过程分析

不同释热构型和释热负荷下的调峰能力、熔盐流量如图 6、图 7 所示。由图 6、图 7 可见：构型 d 调峰深度最高为 5.65%，主要由于 2 组高温熔盐分级加热给水后汇入主蒸汽进入高压缸膨胀做功，直接提升了主蒸汽温度；构型 a、b、c 的调峰能力依次递减，这是由于蒸汽的做功能力随级膨胀逐渐减弱，且靠近锅炉侧的凝结水温度更高，抽取低参数凝结水能减少汽轮机高压缸抽汽，对机组出力提升作用更大；受释热抽水节点限制，构型 c 并未使中压缸回热抽汽降低，熔盐释热使锅炉负荷由 1 600 MW 降至 1 507 MW，而机组出力增副较小。

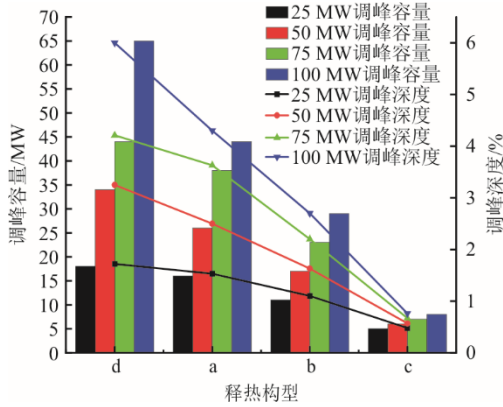


图 6 系统释热过程调峰能力

Fig.6 Peaking capacity of the system heat release process

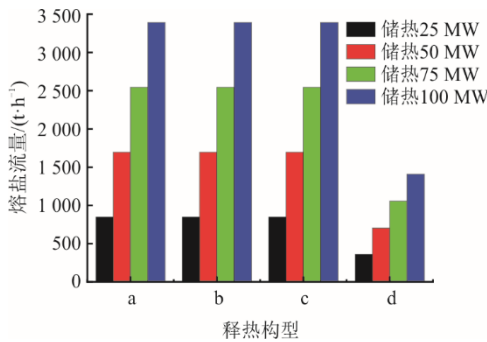


图 7 系统释热过程熔盐流量

Fig.7 Molten salt flow rate of the system during heat release

由图 7 可知：构型 a、b、c 的熔盐流量相近，释热负荷 100 MW 时约为 3 300 t/h；构型 d 熔盐流量仅为 1 400 t/h。这是由于构型 d 中二级换热熔盐温度更高，传热系数和比热容更大，相同的熔盐流量下能储存的热量更多，更容易达到所需释热负荷；且释热负荷 100 MW 时构型 d 煤耗率为 245 g/(kW·h)，构型 a 煤耗率为 250 g/(kW·h)，构型 d 为最优释热构型。

### 3.3 储热-释热全过程分析

本节选取综合性能较优的释热构型 a、释热构型 d，与储热构型进行组合，分析储热-释热全过程性能。设定储热时长 6 h，释热时长 4 h。不同储热-释热构型和储热-释热设计负荷下，系统调峰能力比较如图 8 所示。由图 8 可见：相同构型下，系统调峰能力随储热-释热负荷增加而增大；不同构型间，构型 D-a 和 F-d 调峰能力最强（100 MW 调峰容量下，分别为 23.61%和 23.42%）；构型 A-c 调峰能力最低（10.33%）。储热过程和释热过程系统构型对全过程调峰能力影响显著。

图 9、图 10 为不同构型储热-释热全过程的热效率和焓效率。

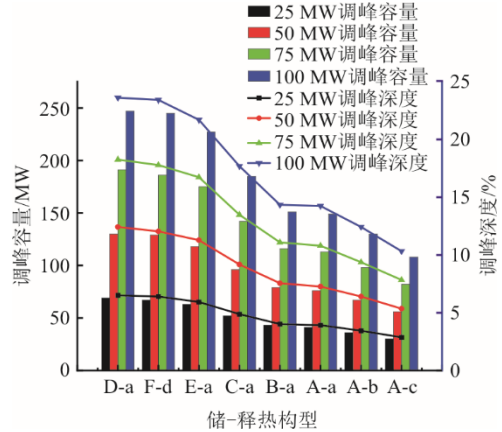


图 8 不同构型储热-释热全过程调峰能力比较

Fig.8 Peaking capacity of the whole process of heat storage and release of the system with different configurations

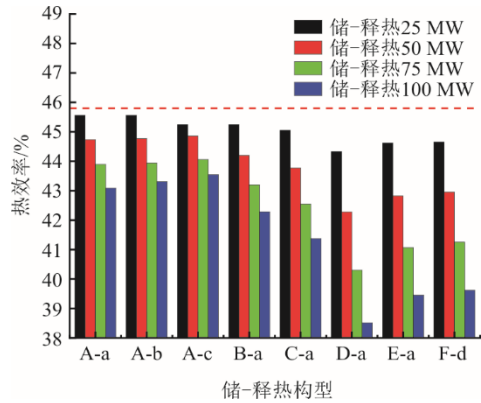


图 9 不同构型储热-释热全过程的热效率比较

Fig.9 Thermal efficiencies of the whole process of heat storage and release in the system with different configurations

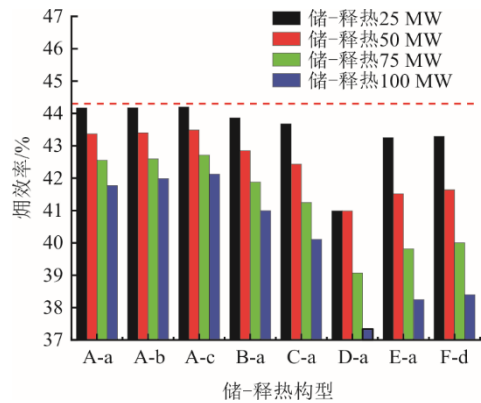


图 10 不同构型储热-释热全过程的焓效率比较

Fig.10 The exergy efficiencies of the whole process of heat storage and release in the system with different configurations

由图 9、图 10 可见：A 类构型为电加热熔盐，热效率和焓效率较高，调峰能力略低；构型 D-a 调峰能力强，但储热-释热过程焓损高，热效率和焓效率偏低（38.51%和 37.34%）；构型 B-a、C-a、E-a、

F-d 耦合电锅炉, 抽汽量减少, 热效率和焓效率相较于构型 D-a 有一定提升, 其中, 构型 F-d 热效率和焓效率分别为 39.61% 和 38.40%, 对比构型 D-a 提升超过 1 个百分点。

图 11 为储热-释热全过程的煤耗率比较。由图 11 可见: 储热过程抽取蒸汽及电能加热熔盐, 所有构型的煤耗率均高于未配置储热装置的水平; 释热过程熔盐放热降低的煤耗率, 不足以抵消煤耗率的增加, 8 种构型的全过程煤耗率均大于未配置储热装置的水平。构型 D-a 负荷调节能力最强, 煤耗率最高 319.1 g/(kW·h); 构型 E-a 煤耗率仅次于构型 D-a; A 类构型调峰能力弱, 但相应煤耗率也最低, 构型 A-c 煤耗率仅 282.76 g/(kW·h); 构型 B-a、C-a 在 A 类构型上耦合抽汽后, 调峰能力和煤耗率略高于 A 类构型; 构型 F-d 煤耗率为 310.2 g/(kW·h), 相较于构型 D-a 降低了约 9 g/(kW·h), 而调峰深度仅降低 0.19 百分点。

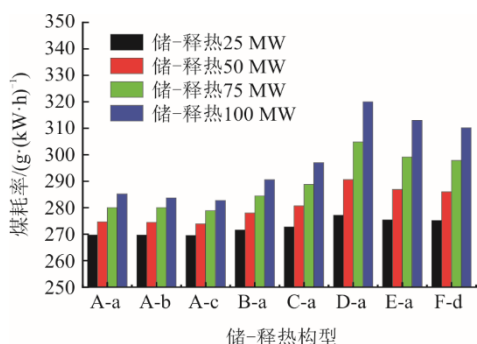


图 11 系统储热-释热全过程的煤耗率

Fig.11 Coal consumption rates of the whole process of heat storage and heat release of the system

图 12 为系统储热-释热 10 h 的熔盐消耗总量。调峰能力为 100 MW 时, 构型 F-d 熔盐消耗量最低为 18 304 t, 构型 C-a 熔盐消耗量约为 37 000 t, 其余构型的熔盐流量相差不大, 约为 41 000 t。

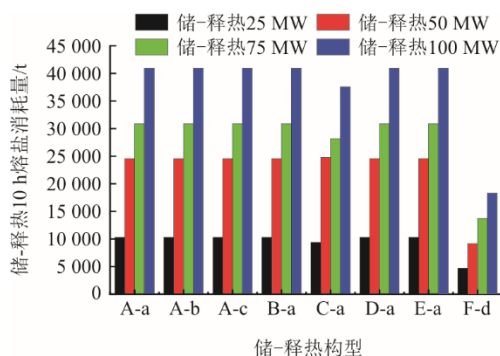


图 12 系统储热-释热全过程的熔盐消耗量

Fig.12 The molten salt consumptions of the whole process of heat storage and heat release of the system

## 4 结 论

本文针对 1 000 MW 级燃煤机组耦合熔盐储热, 比较了 6 种储热构型和 4 种释热构型的耦合方式。通过模拟计算, 分析得到各构型的热力性能参数, 主要结论如下。

1) 燃煤机组耦合熔盐储热可有效提升机组运行灵活性, 拓宽机组运行区间, 对于大型燃煤发电机组采用抽汽加热与电锅炉加热耦合的构型, 可大幅提高调峰能力和出力。

2) 储热阶段采用电锅炉加热熔盐, 系统热效率和焓效率高, 调峰性能优异, 可以灵活调整取电量, 工艺简单。释热阶段抽取除氧器给水加热至新汽温度后汇入主蒸汽构型最优, 系统煤耗率最低, 出力增加最多。

3) 构型 F-d 调峰深度为 23.42%, 热效率、焓效率、煤耗率分别为 39.61%、38.40%、310.2 g/(kW·h)。综合考虑储热阶段调峰能力、释热阶段出力增加和机组能效降低、储-释热全过程熔盐消耗量后, 推荐 F-d 耦合构型方式。

### [参 考 文 献]

- [1] 戴宝华, 王德亮, 曹勇, 等. 2023 年中国能源行业回顾及 2024 年展望[J]. 当代石油石化, 2024, 32(1): 1-7. DAI Baohua, WANG Deliang, CAO Yong, et al. Review of China energy industry 2023 and outlook 2024[J]. Contemporary Petroleum and Petrochemical, 2024, 32(1): 1-7.
- [2] 谭景洋, 蒋晓艳, 焦乾致, 等. 储能技术平抑光伏出力波动研究综述[J]. 电力学报, 2023, 38(5): 389-396. TAN Jingyang, JIANG Xiaoyan, JIAO Qianzhi, et al. Summary of research on the stabilization of photovoltaic output fluctuation by energy storage technology[J]. Journal of Electric Power, 2023, 38(5): 389-396.
- [3] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8, 30. Consulting Group for the “Prospects of New Grid Technologies” project by State Grid Corporation of China. Analysis on the application prospects of large-scale energy storage technologies in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8, 30.
- [4] 宋晓辉, 韩伟, 王兴, 等. 基于高温熔盐储热系统的火电机组深度调峰方案对比及分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(11): 63-74. SONG Xiaohui, HAN Wei, WANG Xing, et al. Comparison and analysis of deep peak regulation scheme of thermal power unit based on high temperature molten salt heat storage system[J]. Thermal Energy and Power Engineering, 2023, 38(11): 63-74.
- [5] WANG C Y, LIU M, LI B X, et al. Thermodynamic analysis on transient cycling of coal-fired power plants: simulation study of a 660 MW supercritical unit[J]. Energy, 2017, 122: 505-527.

- [6] ZHANG L, CUI J, ZHANG Y P, et al. Performance analysis of a compressed air energy storage system integrated into a coal-fired power plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 225: 1-16.
- [7] XU X F, WEI Z F, JI Q, et al. Global renewable energy development: influencing factors, trend predictions and countermeasures[J]. *Resources Policy*, 2019, 63: 101470.
- [8] HASAN N S, HASSAN M Y, MAJID M S, et al. Review of storage schemes for wind energy systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 21: 237-247.
- [9] 崔杨, 张家瑞, 王铮, 等. 计及价格型需求响应的风光-光热联合发电系统日前调度策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(10): 3103-3113.  
CUI Yang, ZHANG Jiarui, WANG Zheng, et al. Day ahead scheduling strategy of wind-PV-CSP hybrid power generation system by considering PDR[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3103-3113.
- [10] 张显荣, 徐玉杰, 杨立军, 等. 多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1565-1578.  
ZHANG Xianrong, XU Yujie, YANG Lijun, et al. Performance analysis and comparison of multi-type thermal power-heat storage coupling system [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5): 1565-1578.
- [11] LI D C, WANG J H. Study of supercritical power plant integration with high temperature thermal energy storage for flexible operation[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 20: 140-152.
- [12] 邹小刚, 刘明, 肖海丰, 等. 火电机组耦合熔盐储热深度调峰系统设计及性能分析[J]. *热力发电*, 2023, 52(2):146-153.  
ZOU Xiaogang, LIU Ming, XIAO Haifeng, et al. Design and performance analysis of deep peak regulation system of coupled molten salt heat storage for thermal power unit[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(2): 146-153.
- [13] 刘金恺, 鹿院卫, 魏海蛟, 等. 熔盐储热辅助燃煤机组调峰系统设计及性能对比[J]. *热力发电*, 2023, 52(2): 111-118.  
LIU Jinkai, LU Yuanwei, WEI Haijiao, et al. Design and performance comparison of peak regulation system of molten salt heat storage auxiliary coal-fired unit[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(2): 111-118.
- [14] 冀帅宇, 段立强, 王远慧, 等. 典型燃煤机组灵活调峰及性能研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(9): 94-103.  
JI Shuaiyu, DUAN Liqiang, WANG Yuanhui, et al. Research on flexible peak regulation strategy and performance of typical coal-fired units[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(9): 94-103.
- [15] WEI H J, LU Y W, YANG Y C, et al. Research on influence of steam extraction parameters and operation load on operational flexibility of coal-fired power plant[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 195: 1-10.
- [16] WEI H J, LU Y W, YANG Y C, et al. Flexible operation mode of coal-fired power unit coupling with heat storage of extracted reheated steam[J]. *Journal of Thermal Science*, 2022, 31(2): 436-447.
- [17] 魏海蛟, 鹿院卫, 吴玉庭, 等. 燃煤机组灵活性运行系统焓分析[J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48(12): 1-10.  
WEI Haijiao, LU Yuanwei, WU Yuting, et al. Exergy analysis of flexible operation of coal-fired power unit[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2022, 48(12): 1-10.
- [18] 白晨曦. 燃煤发电机组配置熔盐储热的运行策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023: 1.  
BAI Chenxi. Research on the operation strategy of coal-fired generating units with molten salt heat storage[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2023: 1.
- [19] 李浩宇. 基于蓄能系统的燃煤机组灵活性提升方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021: 1.  
LI Haoyu. Research on the flexibility improvement method of coal-fired units based on energy storage system[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2021: 1.
- [20] WANG C Y, QIAO Y Q, LIU M, et al. Enhancing peak shaving capability by optimizing reheat-steam temperature control of a double-reheat boiler[J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114341.
- [21] CRESPI E, GUANDALINI G, GÖSSLING S, et al. Modelling and optimization of a flexible hydrogen-fueled pressurized PEMFC power plant for grid balancing purposes[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(24): 13190-13205.
- [22] 魏乐, 樊冰芬, 张怡, 等. 耦合熔盐储热的火电机组灵活调峰控制策略研究[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-13[2024-12-11]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.241471.  
WEI Le, FAN Bingfen, ZHANG Yi, et al. Research on flexible peak shaving control strategy of thermal power unit coupled with molten salt heat storage system[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 1-13[2024-12-11]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.241471.
- [23] 何雅玲, 严俊杰, 杨卫卫, 等. 分布式能源系统中能量的高效存储[J]. *中国科学基金*, 2020, 34(3): 272-280.  
HE Yaling, YAN Junjie, YANG Weiwei, et al. Efficient storage of energy in distributed energy systems[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2020, 34(3): 272-280.
- [24] SANAYE S, NASAB M A. Modeling and optimizing a CHP system for natural gas pressure reduction plant[J]. *Energy*, 2012, 40(1): 358-369.
- [25] AN Z, MAO S, DU X, et al. Theoretical prediction and experiment study on the thermo-physical properties of ternary carbonate for energy storage[J]. *Thermochimica Acta*, 2024, 732: 179663.
- [26] 吴殿法, 王宁玲, 时斌, 等. 燃料比火用计算基准对燃煤机组单耗分析结果的影响[J]. *热力发电*, 2017, 46(3): 25-32.  
WU Dianfa, WANG Ningling, SHI Bin, et al. Effect of fuel ratio calculation benchmark on unit consumption analysis results of coal-fired units[J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(3): 25-32.
- [27] 吴智泉, 周少祥, 安连锁. 能源结构调整的理论基础研究[J]. *动力工程学报*, 2011, 31(3): 233-238.  
WU Zhiquan, ZHOU Shaoxiang, AN Liansuo. Research on the theoretical basis of energy structure adjustment[J]. *Journal of Power Engineering*, 2011, 31(3): 233-238.
- [28] 王坚, 王辉. 火电厂抽汽储能深度调峰技术研究[J]. *电力勘测设计*, 2022(6): 30-34.  
WANG Jian, WANG Hui. Research on deep peak regulation technology of thermal power plant pumping energy storage[J]. *Power Survey and Design*, 2022(6): 30-34.

(责任编辑 杨嘉蕾)