

韩佩兴,冯浩,钟旭东,等.耦合太阳能储热的CFB机组长周期近零出力运行特性研究[J].煤炭转化,2025,48(5):3-12. DOI:10.19726/j.cnki.ebcc.202505001.

HAN Peixing, FENG Hao, ZHONG Xudong, et al. Investigation on long-period near-zero load operation characteristics of CFB power plants coupled with thermal energy storage[J]. Coal Conversion, 2025, 48(5): 3-12. DOI: 10.19726/j.cnki.ebcc.202505001.

# 耦合太阳能储热的CFB机组长周期近零出力运行特性研究\*

韩佩兴<sup>1</sup> 冯浩<sup>1,2</sup> 钟旭东<sup>1</sup> 郭俊菲<sup>1</sup>

王兴<sup>1,3</sup> 黄中<sup>1,4,5</sup> 柯希玮<sup>1,5</sup>

(1. 怀柔实验室山西研究院, 030032 太原; 2. 晋能控股电力集团有限公司, 030006 太原;  
3. 国家能源集团科学技术研究院有限公司, 210023 南京; 4. 清华大学能源与动力工程系, 100084 北京; 5. 北京怀柔实验室, 101499 北京)

**摘要** CFB机组压火热备技术是一种极深度调峰技术,可实现对外近零功率输出。然而,在压火期间受蒸汽参数限制,目前压火时长仅有1h~2h。为解决压火时长短的问题,构建了一种CFB机组耦合太阳能储热的长周期压火热备技术方案。在压火运行期间,通过光热生成高参数辅助蒸汽,使锅炉原生蒸汽与辅助蒸汽协同维持汽轮机运行,从而突破传统CFB机组压火时长限制。为探究耦合储热的CFB机组的压火运行特性,使用EBSILON建立了该机组的热力系统模型,获得了机组主蒸汽流量在20 t/h~40 t/h范围内的主要运行参数。建立了烟分析模型,揭示了极端低负荷下CFB机组烟损分布特性,量化了关键部件的烟性能指标。结果表明:压火工况下,机组最小输出功率仅3.3 MW,扣除厂用电后,对外可实现近零输出。烟分析表明,随着主蒸汽流量增加,机组关键部件的烟损失和烟效率都呈上升趋势。其中,给水加热器的烟效率最高,均在93%以上,而高压缸的烟效率仅有50%左右。机组的烟损率从高到低依次为:凝汽器、汽轮机、熔盐换热器、给水加热器。

**关键词** 循环流化床, 灵活调峰, 近零出力, 烟分析, 模拟

## 创新点

- 构建了CFB机组原生蒸汽-辅助汽源协同的蒸汽参数补偿技术方案,突破传统压火时间限制。
- 获得了耦合储热的CFB机组压火工况的运行特性。
- 揭示了极端低负荷下CFB机组烟损分布特性。
- 量化了CFB机组关键部件烟性能指标。

**中图分类号** TK16

**DOI:**10.19726/j.cnki.ebcc.202505001

## 0 引言

循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)凭

借燃料适应性广、燃烧效率高、负荷调节范围宽等优势成为支撑高比例可再生能源消纳的主力军<sup>[1-2]</sup>。另外,CFB锅炉在运行时炉内存在大量床料和大量耐火耐磨材料,蓄热能力极强,在深度调峰方面具

\* 中国科协青年人才托举工程项目(2024-2026QNRC001)。

第一作者:韩佩兴,实习研究员,E-mail:hanpeixing@sxri.hrl.ac.cn;通信作者:柯希玮,博士、副研究员,E-mail:kexiwei@sxri.hrl.ac.cn  
收稿日期:2025-05-15;修回日期:2025-09-01

有先天优势<sup>[3-4]</sup>。CFB机组特有的压火热备技术可实现机组近零负荷(0~2%)运行<sup>[5]</sup>,压火期间,锅炉停煤停风,利用床料蓄热持续产生少量蒸汽驱动汽轮机;当电网需提升负荷时,机组无需冷态启动即可快速响应,负荷变化速率可达10.4% Pe/min<sup>[6]</sup>。结合压火热备技术,循环流化床机组可实现全负荷调峰,为构建新型电力系统提供了重要支撑,但现有技术下压火持续时间普遍低于2 h<sup>[7]</sup>,严重制约了其经济性与电网适应性。

近年来,熔盐储热系统因其高能量密度(约700 MJ/m<sup>3</sup>)和宽温区适应性(200℃~565℃)<sup>[8]</sup>,已成功应用于光热电站与燃煤机组协同运行。CAO et al<sup>[9]</sup>研究了600 MW煤电机组耦合熔盐储热热力系统的运行特性,结果表明,耦合熔盐储热系统后,机组于释热工况可提升6.23%的调峰容量。巩志强等<sup>[10]</sup>以煤电机组为对象,通过数值模拟构建了9种熔盐储热方案,考察了各种技术方案的经济性,但其研究集中于常规调峰过程,未涉及压火工况下的运行特性。由此可见,CFB机组耦合储热实现长周期压火运行仍存在热力系统重构、烟流匹配优化等亟待突破的关键科学问题。

在压火热备机理研究方面,国内外学者已取得阶段性成果。申欣等<sup>[11]</sup>以350 MW超临界CFB锅炉为研究对象,对CFB锅炉周期性压火启动过程进行数值模拟,对周期性压火启动过程的气固流动和活性存量进行分析。杨凤玲等<sup>[12]</sup>建立了一套CFB锅炉压火状态下蓄释热量的计算方法,并将此方法应用于山西省某300 MW亚临界CFB机组的近零深度调峰运行实践,为预测CFB锅炉压火时长提供指导。然而,少有研究考虑耦合储热系统对CFB机组压火时长的延长作用,且解决储/释热过程与锅炉运行特性的耦合控制是一项技术难题。

烟分析方法作为热力系统性能评价的有效工

具,在CFB机组优化设计中得到广泛应用。刘强等<sup>[13]</sup>以某超临界600 MW机组为研究对象,建立了热力系统烟分析数学模型,分析了热力系统主要部件的烟损失和烟效率。结果表明,凝汽器的烟损系数最大,高压加热器的烟效率高于低压加热器。XU et al<sup>[14]</sup>用EBSILON建立了火电机组耦合熔盐储热、电加热及两者联合的热力系统模型,并对其进行包含烟分析在内的热经济分析,计算结果为火电机组参与深度调峰提供理论指导。然而,现有研究多聚焦于常规调峰工况,对压火热备等极深度调峰工况下的烟流演变规律缺乏系统性探讨。特别在储热系统介入后,熔盐换热器的烟损特性、汽轮机极低出力状况下导致的附加烟损等问题尚未明晰。

本研究针对CFB机组压火运行时间受限、蒸汽参数衰减快的技术瓶颈,以某300 MW亚临界CFB机组为研究对象,构建了耦合太阳能储热的CFB机组长周期压火技术方案。通过EBSILON平台建立了该机组的热力系统全工况模型,获得了压火工况下的机组运行特性,并量化了关键部件的烟性能指标。研究成果可为CFB机组压火热备运行提供理论指导。

## 1 研究方法

### 1.1 计算对象

研究对象为国内某300 MW亚临界CFB机组,CFB锅炉型号为DG1085.3/17.5-III,为单汽包、自然循环、循环流化床燃烧方式。汽轮机机组为亚临界、一次中间再热、双缸双排汽、单轴、直接空冷、供热凝汽式汽轮机组,产品型号为CZK312/N300-16.7/538/538。机组回热系统采用3级高压加热器、3级低压加热器和除氧器组合的形式,额定工况的主要参数如表1所示。

表1 某300 MW机组额定工况设计参数

Table 1 Design parameters of a 300 MW unit under rated conditions

Main steam temperature/℃	Main steam pressure/MPa	Reheat steam temperature/℃	Reheat steam pressure/MPa	Main steam flow/(t·h <sup>-1</sup> )	Heat consumption rate/(kJ·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Feedwater temperature/℃
538	16.7	538	3.074	914.39	8 117.2	268.4

### 1.2 系统建模与验证

本研究采用EBSILON建模软件对该机组热力系统进行建模<sup>[15]</sup>,选定该机组的100% THA工况为

设计工况,仿真模型如图1所示。建模完成后,根据热平衡图及电厂运行数据对模型进行校核以进一步提升模型精度。仿真计算结果与参考值对比如表2所示,计算值与参考值的最大相对偏差为1.37%,两者吻合良好,可进行进一步分析计算。

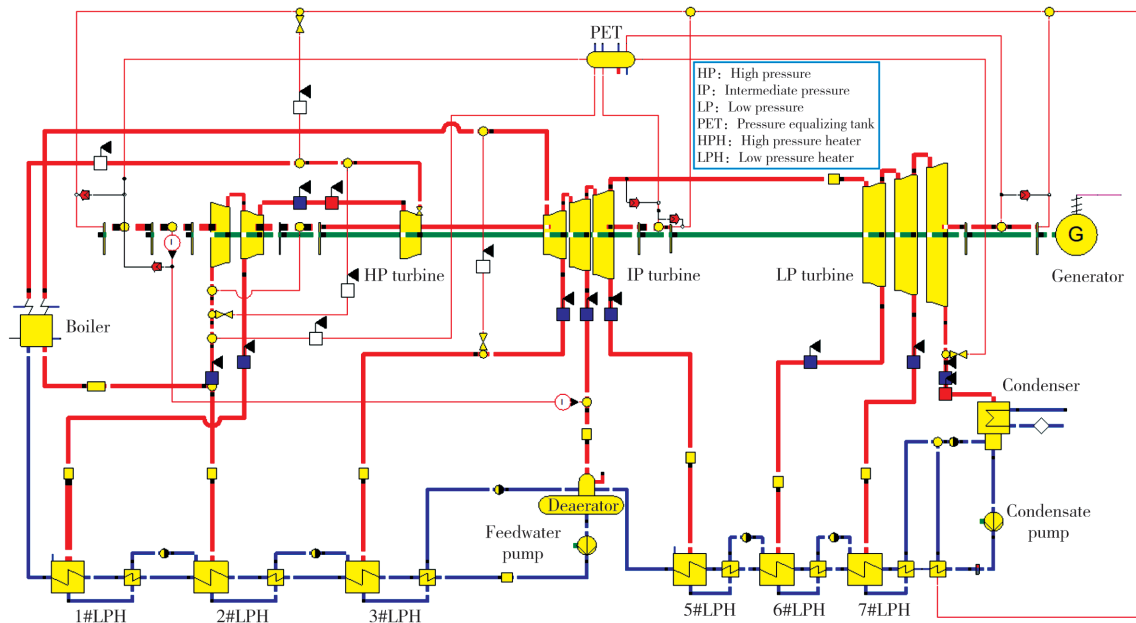


图 1 基于 EBSILON 软件的某亚临界 300 MW 机组热力系统模型

Fig. 1 Thermodynamics system model of a subcritical 300 MW unit based on EBSILON software

表 2 变工况下 300 MW 机组热力系统模型验证

Table 2 Verification of thermodynamic system model of 300 MW unit in off-design conditions

Items	Load	Design data/experimental data	Simulation results	Relative errors /%
Output power/MW	100%THA	300	299.87	-0.04
	50%THA	150	149.74	-0.17
	20%THA	60.90	60.76	-0.23
	Banked-fire	3.22	3.26	1.24
Main steam pressure/MPa	100%THA	16.70	16.70	0.00
	50%THA	8.96	8.97	0.11
	20%THA	13.39	13.39	0.00
	Banked-fire	8.00	7.92	-1.00
Main steam temperature/°C	100%THA	538.00	538.00	0.00
	50%THA	538.00	538.00	0.00
	20%THA	517.43	517.43	0.00
	Banked-fire	430.00	430.00	0.00
Reheat steam pressure/MPa	100%THA	3.07	3.07	0.00
	50%THA	1.60	1.59	-0.50
	20%THA	0.69	0.69	-0.72
	Banked-fire	0.07	0.07	-1.37
Reheat steam temperature/°C	100%THA	538.00	538.00	0.00
	50%THA	538.00	538.00	0.00
	20%THA	519.39	519.39	0.00
	Banked-fire	430.00	430.00	0.00

### 1.3 计算工况

为解决目前 CFB 机组压火时长短的问题,本研究提出了一种耦合太阳能储热的 CFB 机组压火技术,其运行模式如图 2 所示。模型计算选用配比为 (60%NaNO<sub>3</sub>+40%KNO<sub>3</sub>) 的熔盐作为储热介质,工作温度区间设置为 250 °C~550 °C,熔盐换热器 (molten salt heater, MSH) 出口的辅助蒸汽温度为

538 °C。

储热过程中,低温熔盐于熔盐-光热换热器吸收光热加热为高温熔盐。当 CFB 机组在压火热备运行时,随着炉内蓄热量衰减,主/再热蒸汽温度及压力参数下滑,为延长压火时长,分流 80% 给水及冷再热蒸汽分别于 1#熔盐换热器及 2#熔盐换热器吸热生成高温辅助蒸汽与锅炉生成的低温原生蒸汽汇合进入汽轮机做功。原生蒸汽-辅助蒸汽协同的

蒸汽参数补偿机制,可实现CFB机组的长周期压火热备运行。根据试验证明,该CFB机组在压火热备工况下可在主蒸汽流量为20 t/h~40 t/h范围内安

全稳定运行。因此,本研究探究了此工况下耦合光热的CFB机组的运行特性,并量化了关键部件的焓性能指标。

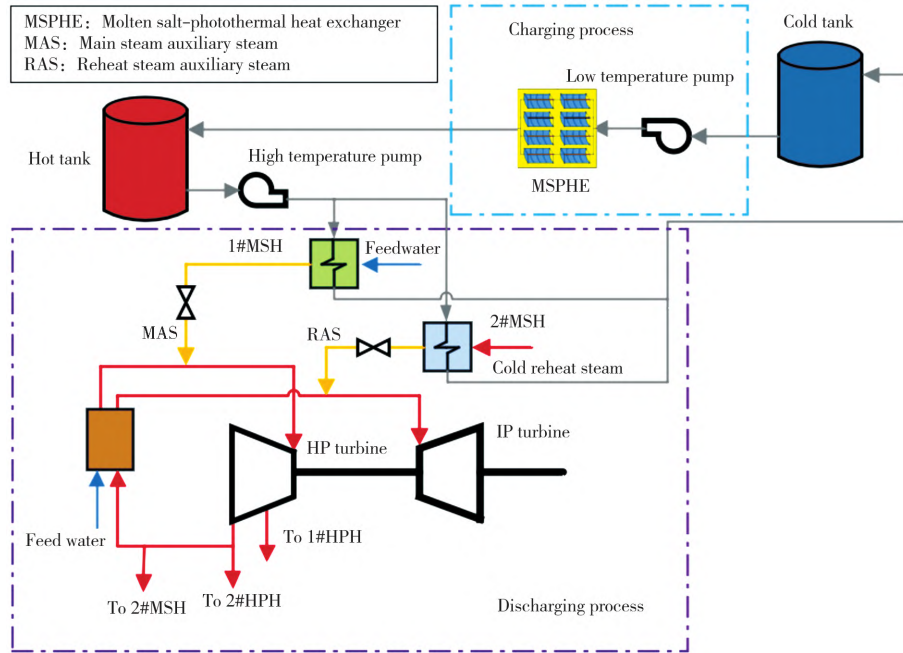


图2 耦合太阳能储热的CFB机组压火工况运行模式

Fig. 2 The operation mode of CFB unit coupled with solar energy storage in banked fire condition

## 1.4 性能评估指标

### 1.4.1 热耗率

热耗率是衡量火电机组热经济性的核心指标,定义为机组每产生单位电能所消耗的热量,其数值直接反映燃料利用效率。根据热力学第一定律,热耗率可通过输入燃料总热量与输出电能之比计算:

$$q = \frac{G_s(h_s - h_{fw}) + G_r(h_r - h_{cr})}{W} \times 3600 \quad (1)$$

式中: $q$ 为热耗率,kJ/kW·h; $G_s$ 和 $G_r$ 分别为主蒸汽和再热蒸汽的质量流量,kg/s; $h_s$ 和 $h_{fw}$ 分别为主蒸汽和锅炉给水的焓值,kJ/kg; $h_r$ 和 $h_{cr}$ 分别为再热蒸汽和冷再热蒸汽的焓值,kJ/kg; $W$ 为机组的输出功率,MW。

### 1.4.2 热效率

热效率 $\eta$ 表征燃料化学能转化为电能的比例,定义为输出功率与输入热能的比值:

$$\eta = \frac{W}{Q_{in}} \quad (2)$$

式中: $Q_{in}$ 为输入燃料的化学能,MW。

### 1.4.3 汽轮机缸效率

汽轮机缸效率 $\eta_i$ 反映各级缸内能量转换的完善程度,定义为实际焓降与等熵焓降之比:

$$\eta_i = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{out,s}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $h_{in}$ , $h_{out}$ 和 $h_{out,s}$ 分别为各缸进口蒸汽焓、各缸排汽焓和各缸等熵排汽焓,kJ/kg。

### 1.4.4 熔盐使用量

流经熔盐换热器的熔盐流量可表示为:

$$G_{ms,1} = \frac{G_{fw}(h_{s,out} - h_{fw})}{h_{ms,in} - h_{ms,out}} \quad (4)$$

$$G_{ms,2} = \frac{G_{rs}(h_{rs} - h_{cr})}{h_{ms,in} - h_{ms,out}} \quad (5)$$

式中: $G_{ms,1}$ , $G_{ms,2}$ , $G_{fw}$ , $G_{rs}$ 分别为进入1#及2#熔盐换热器的熔盐流量、给水及冷再热蒸汽流量 kg/s; $h_{ms,in}$ , $h_{ms,out}$ 分别为熔盐换热器的熔盐进口与出口焓值,kJ/kg; $h_{s,out}$ , $h_{rs}$ 分别为1#及2#熔盐换热器出口辅助蒸汽焓值,kJ/kg;

暂时不考虑实际熔盐换热的热损失等,机组在压火工况下熔盐的使用量 $C_{ms}$ 可表示为:

$$C_{ms} = (G_{ms,1} + G_{ms,2})t \quad (6)$$

式中: $t$ 为CFB机组压火时长,s。

### 1.4.5 焓分析经济指标

焓在热力学中是一种衡量能源品质的指标,表示在特定条件下,能源释放、转换或利用过程中能

够对外做功的能力<sup>[16]</sup>。焓分析是研究能量转换与利用,并分析其影响因素的一种重要方法,利用焓分析可以揭示热力系统产生焓损失的部位、分布与大小,找出能量利用薄弱环节,从而进一步研究提高能量利用率的手段<sup>[17]</sup>。焓损失的大小可以表明实际过程中的不可逆程度,可以衡量热力过程的完善程度,它代表了系统与环境之间能量交换的不可逆性<sup>[18]</sup>。但是焓损失是一绝对量,无法比较不同工况下焓的利用程度,因此常用焓效率来评价各种热力过程或热力设备的热力学完善程度<sup>[19]</sup>。除此之外,也常用焓损系数、焓损率和热力学完善程度等相关指标进行热力系统的焓分析<sup>[20-21]</sup>。

(1) 焓损失  $I_{ex}$

焓损失  $I_{ex}$  表示为:

$$I_{ex} = E_{in} - E_{out} - W \quad (7)$$

式中:  $E_{in}$  和  $E_{out}$  分别为输入和输出系统的焓,  $W$  为系统输出的有用功。

(2) 焓效率  $\eta_{ex}$

焓效率通常定义为作为收益的焓与作为代价的焓的比值,焓效率  $\eta_{ex}$  的通用表达式为:

$$\eta_{ex} = \frac{W}{E_{in} - E_{out}} \quad (8)$$

(3) 焓损系数  $\Omega_{ex}$

焓损系数  $\Omega_{ex}$  可用于比较不同热力设备或系统的焓利用程度或焓损失大小,其定义为以输入(代价)焓为基准时局部焓损失所占的比例:

$$\Omega_{ex} = \frac{I_{ex}}{E_{sup}} \quad (9)$$

式中:  $E_{sup}$  为提供给系统的总的焓量。

(4) 焓损率  $\eta_{ei}$

焓损率  $\eta_{ei}$  定义为热力设备的局部焓损失与整个热力系统的总焓损失的比值:

$$\eta_{ei} = \frac{I_{ex}}{I_T} \quad (10)$$

式中:  $I_T$  为系统的总焓损失。

(5) 热力学完善度  $\delta$

热力学完善度  $\delta$  定义为热力系统的输出焓的量与输入焓的量的比值:

$$\delta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (11)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 机组运行特性

耦合太阳能储热的 CFB 机组压火时长、主蒸汽

流量及熔盐使用量的关系如图 3 所示,由图可知,压火时长为 6 h,主蒸汽流量为 20 t/h 的条件下,机组所需的熔盐总量仅为 924 t,远小于动辄数万吨的光热电站需求,这一数据表明,在 CFB 电站的灵活性改造中,长时间压火调峰所带来的综合收益使该方案在技术上和经济上均展现出较高的工程实施可行性。

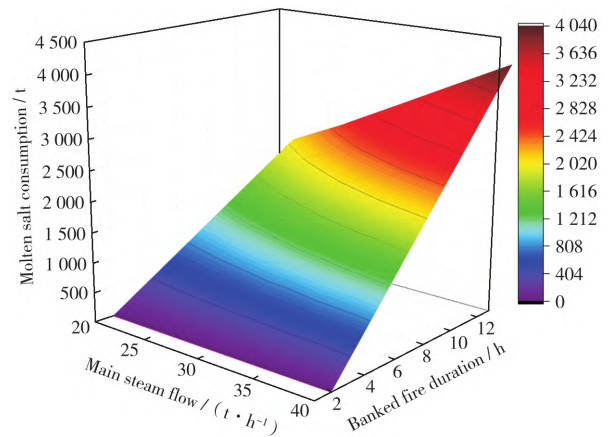


图 3 主蒸汽流量、压火时长及熔盐使用量的关系

Fig. 3 Relationship between main steam flow, banked fire duration and molten salt consumption

机组输出功率、热效率及热耗率随主蒸汽流量的变化关系如图 4 所示,当主蒸汽流量为 20 t/h 时,

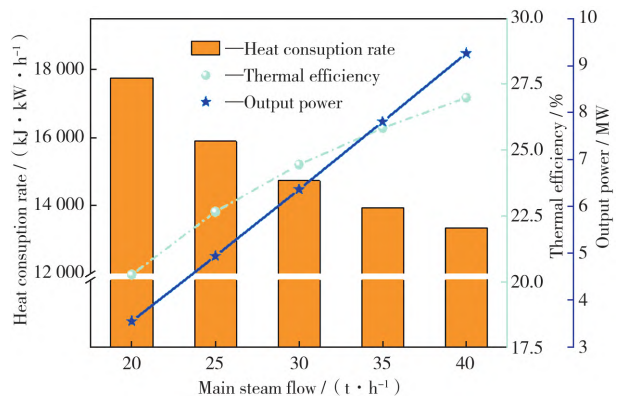


图 4 机组热耗率和热效率及输出功率随主蒸汽流量的关系

Fig. 4 Relationship between heat consumption rate, thermal efficiency and output power of the unit with the main steam flow rate

机组仅有 3.3 MW 的输出功率,扣除厂用电后,基本可实现近零输出。随着主蒸汽流量线性增加,机组输出功率也线性上升,主蒸汽流量为 40 t/h 时,输出功率为 9.2 MW。机组在压火工况下,主蒸汽流量在 20 t/h~40 t/h 范围变化对应机组热效率在 20%~27%,随着主蒸汽流量增加,机组热效率呈上

升趋势,热耗逐渐下降。图5给出了汽轮机的缸效率随主蒸汽流量的变化关系,由图可知,在压火工况下,中压缸和低压缸的缸效率均在90%以上,且随主蒸汽流量的变化不明显,但高压缸的缸效率只有40%左右,随着主蒸汽流量增加,缸效率略有上升。

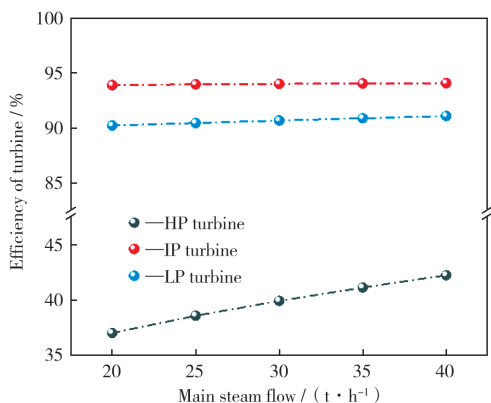


图5 汽轮机缸效率随主蒸汽流量的关系

Fig. 5 Relationship between turbine efficiencies and main steam flow of steam turbine

## 2.2 焓分析

### 2.2.1 汽轮机

在压火工况下随着主蒸汽流量增大,汽轮机各汽缸的焓损失呈增长趋势,且高压缸的焓损失远高于中、低压缸(见图6)。结合焓效率曲线(见图7),在压火工况下,中、低压缸的焓效率仍能保持在95%附近,且随主蒸汽流量增加,焓效率变化不明显。高压缸焓效率随着主蒸汽流量增加略有提升,但是只有50%左右的焓效率。由压火工况下汽轮机的焓经济指标(见表3)可知,高压缸的焓损失系数

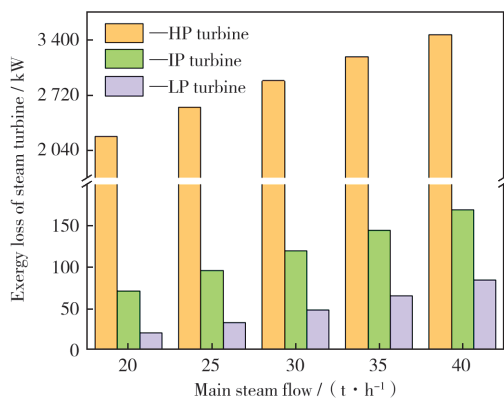


图6 汽轮机焓损失随主蒸汽流量的关系

Fig. 6 Relationship between exergy loss and main steam flow of steam turbine

远高于中、低压缸,且其焓损率占了机组的33%以上。

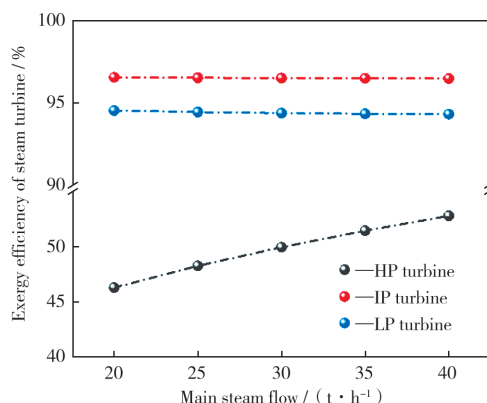


图7 汽轮机焓效率随主蒸汽流量的关系

Fig. 7 Relationship between exergy efficiency and main steam flow of steam turbine

表3 压火工况下汽轮机的焓经济指标

Table 3 Economic index of steam turbine under banked-fire condition

Main steam flow/(t·h <sup>-1</sup> )	HP turbine		IP turbine		LP turbine	
	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$
20	16.091	35.979	0.520	1.163	0.151	0.337
25	14.838	34.942	0.552	1.300	0.193	0.456
30	13.830	34.031	0.573	1.41	0.233	0.572
35	12.989	33.875	0.587	1.531	0.268	0.699
40	12.269	33.453	0.597	1.627	0.300	0.817

### 2.2.2 凝汽器

压火工况下凝汽器的焓损失和焓效率如图8所示,随着主蒸汽流量增大,焓损失和焓效率都呈增大趋势,当主蒸汽流量由20 t/h增加至30 t/h时,焓损失由2 671 kJ/kg增加为3 640 kJ/kg,相对增加了36.3%,主蒸汽流量由30 t/h增加至40 t/h时,焓损

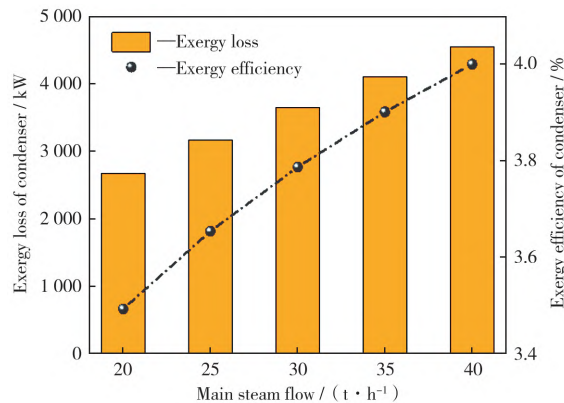


图8 凝汽器焓损失和焓效率随主蒸汽流量的关系

Fig. 8 Relationship between exergy loss, exergy efficiency and main steam flow of condenser

失增加为 4 545 kJ/kg, 相对增加了 24.9%, 增长趋势放缓。压火工况下, 凝汽器的焓效率低于 4%, 结合表 6 可知, 凝汽器的焓损率在 42% 以上, 探索有效的废热回收手段可有效提升机组热经济性。

2.2.3 回热系统

压火工况下的给水加热器 (feedwater heaters, FWH) 的焓损失随主蒸汽流量呈成正线性相关 (如图 9 所示), 其中, 高压加热器的焓损失均高于低压加热器, 且 3# 高压加热器的焓损失最高。图 10 给出

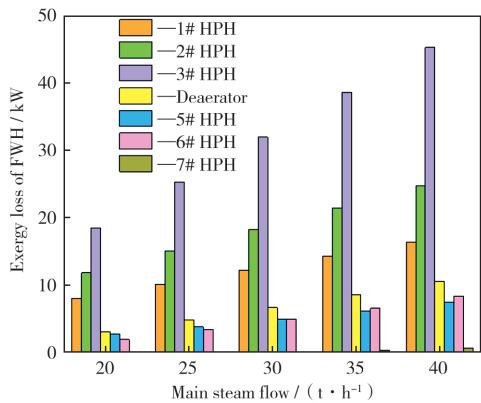


图 9 给水加热器焓损失随主蒸汽流量的关系

Fig. 9 Relationship between exergy loss and main steam flow of FWH

了各级给水加热器的焓效率随主蒸汽流量的变化曲线, 给水加热器的焓效率均在 93% 以上, 高压加热器的焓效率均随主蒸汽流量增加略微上升, 低压加热器呈相反趋势。压火工况下高压加热器、低压加热器、除氧器、凝汽器和熔盐换热器的焓经济指标见表 4~表 6。由表 4~表 6 可知, 各级给水加热器的热力学完善度都高于 0.93, 且焓损失系数及焓损率都较低。

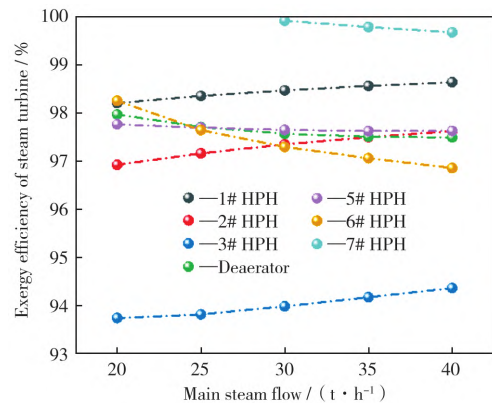


图 10 给水加热器焓效率随主蒸汽流量的关系

Fig. 10 Relationship between exergy efficiency and main steam flow of FWH

表 4 压火工况下高压加热器的焓经济指标

Table 4 Economic index of high pressure heaters under banked-fire condition

Main steam flow/(t·h <sup>-1</sup> )	1#HPH			2#HPH			3#HPH		
	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\delta$	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\delta$	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\delta$
20	0.05	0.13	0.982	0.086	0.192	0.966	0.134	0.300	0.938
25	0.058	0.137	0.984	0.087	0.204	0.972	0.145	0.342	0.938
30	0.058	0.143	0.985	0.087	0.214	0.973	0.152	0.374	0.94
35	0.028	0.151	0.986	0.087	0.227	0.975	0.157	0.409	0.942
40	0.058	0.158	0.986	0.087	0.238	0.976	0.160	0.435	0.944

表 5 压火工况下低压加热器的焓经济指标

Table 5 Economic index of low pressure heaters under banked-fire condition

Main steam flow/(t·h <sup>-1</sup> )	5#LPH			6#LPH			7#LPH		
	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\delta$	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\delta$	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\delta$
20	0.020	0.045	0.978	0.014	0.031	0.965	0	0	—
25	0.022	0.052	0.977	0.020	0.046	0.954	0	0	—
30	0.024	0.058	0.976	0.023	0.058	0.945	0.001	0.002	0.999
35	0.025	0.065	0.976	0.027	0.069	0.938	0.002	0.004	0.998
40	0.026	0.072	0.976	0.030	0.081	0.933	0.002	0.006	0.997

表 6 压火工况下除氧器和凝汽器及熔盐换热器的焓经济指标

Table 6 Economic index of deaerator, condenser and molten salt heater under banked-fire condition

Main steam flow/(t·h <sup>-1</sup> )	Deaerator			Condenser			Molten salt heater		
	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\delta$	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\delta$	$\Omega_{ex}/\%$	$\eta_{ei}/\%$	$\delta$
20	0.023	0.051	0.980	19.404	43.387	0.035	8.222	18.385	0.905
25	0.032	0.078	0.976	17.343	42.676	0.308	8.284	20.384	0.906
30	0.032	0.078	0.976	17.343	42.676	0.038	8.284	20.384	0.906
35	0.035	0.091	0.975	16.638	43.392	0.039	7.472	19.487	0.911
40	0.037	0.102	0.975	16.061	43.793	0.040	7.049	19.219	0.914

### 2.2.4 熔盐换热器

为简化描述,将1#及2#熔盐换热器统一以熔盐换热器的形式进行结果分析。图11给出了熔盐换热器的焓损失及焓效率随主蒸汽流量的变化关系,熔盐换热器的焓损失随主蒸汽流量增加呈上升趋势,主蒸汽流量由20 t/h增加至30 t/h时,焓损失由1 132 kJ/kg增加为1 738 kJ/kg,相对增加了53.5%,主蒸汽流量由30 t/h增加至40 t/h时,焓损失增加为2 137 kJ/kg,相对增加了30%,增长趋势放缓。熔盐换热器的焓效率均在90%以上,主蒸汽流量由20 t/h增加至30 t/h时,焓效率相对增加了0.12%,主蒸汽流量由30 t/h增加至40 t/h时,焓效率相对增加0.98%,与焓损失的变化趋势相对应。由表6可知,熔盐换热器的焓损率约占机组的20%左右。

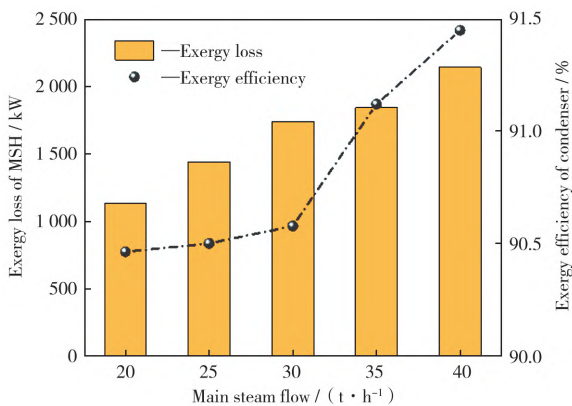


图11 熔盐换热器的焓损失及焓效率随主蒸汽流量的关系  
Fig. 11 Relationship between exergy loss, exergy efficiency and main steam flow of molten salt heater

### 2.2.5 整体焓分析

图12给出了机组在主蒸汽流量为30 t/h时的焓损失占比,由图12可知,在压火工况下,机组主要部件的焓损率占比由大到小依次为:凝汽器42.68%,汽轮机36.01%,熔盐换热器20.38%,给水加热器0.93%。凝汽器循环水的低品位热源浪费导致其存在巨大的不可逆损失,探索有效的废热回收技术可有效提升机组整体的热经济性。

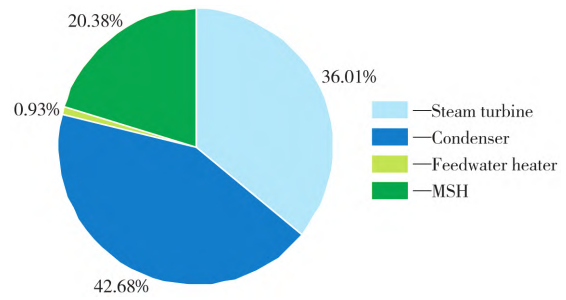


图12 耦合光热的CFB机组压火工况下关键部件焓损失占比

Fig. 12 Exergy loss distribution of key components of CFB unit coupled with solar energy storage in the banked-fire condition

## 3 结论

1) 机组的最小输出功率仅有3.3 MW,可实现对外近零输出。压火工况下,机组热效率仅有20%~27%,随着主蒸汽流量增加,机组热效率呈上升趋势。中、低压缸效率均高于90%,高压缸效率约40%。

2) 随着主蒸汽流量增大,汽轮机的焓损失呈增长趋势,其中,高压缸焓损率高于33%,且焓效率仅为50%,比中、低压缸低了接近45%;随着主蒸汽流量增大,凝汽器的焓损失和焓效率都呈增大趋势,且焓损率在42%以上。给水加热器的焓损失随主蒸汽流量呈成正线性相关,其中,高压加热器的焓损失均高于低压加热器,且3#高压加热器的焓损失最高。熔盐换热器的焓损失随主蒸汽流量增加呈上升趋势,其焓效率在90%以上。

3) 在压火工况下,机组主要部件的焓损失占比由高到低依次为:凝汽器42.68%,汽轮机36.01%,熔盐换热器20.38%,给水加热器0.93%。

4) 压火时长为6 h,主蒸汽流量为20 t/h的条件下,机组所需的熔盐总量仅为924 t,长时间的压火调峰收益使该改造方案在技术上和经济上均展现出较高的工程实施可行性。

## 参考文献

- [1] 武振国,杨楚轲,张守玉,等. 变负荷下循环流化床锅炉内燃烧行为研究进展[J/OL]. 煤炭转化,2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1163.TQ.20241127.1716.004.html>. [2025-02-18].  
WU Zhenguo, YANG Chuke, ZHANG Shouyu, et al. Research progress on combustion behavior in circulating fluidized bed boilers under variable loads[J/OL]. Coal Conversion, 2024. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/14.1163.TQ.20241127.1716.004.html>. [2025-02-18].

- [2] JOHANSSON J E. Formation and reduction of nitrogen oxides in fluidized-bed combustion[J]. *Fuel*, 1994, 73(9):1398-1415.
- [3] 于浩洋,高明明,张 曼,等. 循环流化床机组深度调峰性能分析与评价[J]. *热力发电*, 2020, 49(5):65-72.  
YU Haoyang, GAO Mingming, ZHANG Man, et al. Performance analysis and evaluation of deep peak-regulating for circulating fluidized bed units[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(5):65-72.
- [4] 张思海,李超然,万广亮,等. 330 MW 循环流化床锅炉深度调峰技术[J]. *发电技术*, 2024, 45(2):199-206.  
ZHANG Sihai, LI Chaoran, WAN Guangliang, et al. Deep peak shaving technology for 330 MW circulating fluidized bed boiler [J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(2):199-206.
- [5] 徐顺智,王孝全,杨凤玲,等. 某300 MW 循环流化床煤电机组灵活性运行技术探讨[J]. *电力学报*, 2023, 38(1):1-13.  
XU Shunzhi, WANG Xiaquan, YANG Fengling, et al. Discussion on flexible operation technology of a 300 MW circulating fluidized bed coal power units[J]. *Journal of Electric Power*, 2023, 38(1):1-13.
- [6] 乔磊磊,王孝全,聂 浩,等. 循环流化床锅炉全负荷调峰特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(1):184-194.  
QIAO Leilei, WANG Xiaquan, NIE Hao, et al. Research on full-load peak shaving characteristics of circulating fluidized bed boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(1):184-194.
- [7] 刘众元,武晓俊. 循环流化床锅炉压火启动调峰技术综述[J]. *热能动力工程*, 2024, 39(3):1-8.  
LIU Zhongyuan, WU Xiaojun. Review of banked-fire and start-up peak regulation technology of circulating fluidized bed boiler [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy Power*, 2024, 39(3):1-8.
- [8] KURAVI S, TRAHAN J, GOSWAMI D Y, et al. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, 39(3):285-319.
- [9] CAO Ruifeng, LU Yue, YU Daren, et al. A novel approach to improving load flexibility of coal-fired power plant by integrating high temperature thermal energy storage through additional thermodynamic cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 173: Article 115225.
- [10] 巩志强,韩 悦,徐明新,等. 煤电耦合熔盐储热调峰的技术经济性研究[J/OL]. *洁净煤技术*, 2025(4):1-12[2025-04-27].  
GONG Zhiqiang, HAN Yue, XU Mingxin, et al. Techno-economic study on peak shaving of coal power coupled with molten salt heat storage[J/OL]. *Clean Coal Technology*, 2025(4):1-12.
- [11] 申 欣,贾 里,赵 强,等. 超临界CFB锅炉压火特性现场试验与数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7):2797-2807.  
SHEN Xin, JIA Li, ZHAO Qiang, et al. Study on dynamic characteristics of active stock in supercritical CFB boiler during periodic bank fire and start-up[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7):2797-2807.
- [12] 杨凤玲,张普森,张圆圆,等. 亚临界循环流化床机组近零深度调峰蓄释热计算及实践[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(1):77-84.  
YANG Fengling, ZHANG Puxian, ZHANG Yuanyuan, et al. Calculation and practice of near-zero depth peak regulation, heat storage and release in subcritical circulating fluidized bed unit[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(1):77-84.
- [13] 刘 强,段远源. 超临界600 MW 火电机组热力系统的焓分析[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(32):8-12.  
LIU Qiang, DUAN Yuanyuan. Exergy analysis for thermal power system of a 600 MW supercritical power unit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(32):8-12.
- [14] XU Jing, LIU Wenhao, WANG Zhenpu, et al. Comparative investigation on the thermodynamic performance of coal-fired power plant integrating with the molten salt thermal storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 89: Article 115225.
- [15] KOSMAN W, RUSIN A, REICHEL P. Application of an energy storage system with molten salt to a steam turbine cycle to decrease the minimal acceptable load[J]. *Energy*, 2023, 266: Article 126480.
- [16] 朱明善. 能量系统的焓分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1988:180-342.  
ZHU Mingshan. Exergy analysis of energy system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988:180-342.
- [17] 项新耀. 工程焓分析方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1990:32-323.  
XIANG Xinyao. Engineering exergy analysis method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990:32-323.
- [18] 王加璇,张树芳. 焓方法及其在火电厂中的应用[M]. 北京:水利电力出版社, 1993:26-184.  
WANG Jiakuan, ZHANG Shufang. Exergy method and application in power plant[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1993:26-184.
- [19] 杨勇平,王加璇. 汽轮机性能评价的新准则——焓效率[J]. *汽轮机技术*, 1995, 37(1):21-26.  
YANG Yongping, WANG Jiakuan. The new criterion, exergy efficiency, for evaluation of turbine performance[J]. *Turbine Technology*, 1995, 37(1):21-26.
- [20] KANOGLU M, DINCER I, ROSEN M A. Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(7):3967-3978.
- [21] 唐 璇,覃 川. 核电厂回热机组热力系统(焓)分析[J]. *核电子学与探测技术*, 2024, 44(1):117-123.  
TANG Xuan, QIN Chuan. Exergy analysis of regenerative thermal systems in nuclear power plants[J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2024, 44(1):117-123.

## Investigation on long-period near-zero load operation characteristics of CFB power plants coupled with thermal energy storage

HAN Peixing<sup>1</sup> FENG Hao<sup>1,2</sup> ZHONG Xudong<sup>1</sup> GUO Junfei<sup>1</sup>

WANG Xing<sup>1,3</sup> HUANG Zhong<sup>1,4,5</sup> KE Xiwei<sup>1,5</sup>

(1. Shanxi Research Institute of Huairou Laboratory, 030032 Taiyuan, China; 2. Jinneng Holding Power Group, 030006 Taiyuan, China; 3. China Energy Science and Technology Research Institute Company Limited, 210023 Nanjing, China; 4. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, 100084 Beijing, China; 5. Beijing Huairou Laboratory, 101499 Beijing, China)

**ABSTRACT** CFB banked-fire hot-standby technology is an extremely deep peaking technology that can achieve near-zero power output. However, due to the limitation of steam parameters during banked-fire operation, the safe operation time of steam turbine can be maintained only about 1 h–2 h. To address the above issues, a long-period banked-fire technology scheme for CFB power plants coupled with thermal storage has been proposed. During banked fire operation, high-parameter regenerative steam generated through solar-thermal integration synergistically maintains turbine operation with boiler primary steam, thereby breaking through the duration limitations of conventional CFB units in banked fire conditions. To explore operation characteristics of the above unit, a thermodynamic system model of the unit was established using the EBSILON, obtaining key operational parameters under main steam flow rates ranging from 20 t/h to 40 t/h. An exergy analysis model was established to reveal exergy destruction distribution patterns in CFB units under ultra-low load conditions, with quantitative evaluation of exergy performance indicators for critical components. Results demonstrate that the unit achieves a minimum output of 3.3 MW during banked fire operation, realizing near-zero external power output after deducting auxiliary power consumption. Exergy analysis reveals that both exergy destruction and exergy efficiency of key components exhibit increasing trends with rising main steam flow rates. The feedwater heater demonstrates superior exergy efficiency exceeding 93%, while the high-pressure (HP) turbine shows relatively low efficiency of approximately 50%. Component exergy destruction rates follow this descending order from high to low: condenser, steam turbine, molten salt-water heat exchanger, feedwater heater.

**KEYWORDS** circulating fluidized bed, deep peak regulation, near-zero output, exergy analysis, simulation

### HIGHLIGHTS

1. Proposed CFB steam compensation technology, breaking traditional banked fire time limits.
2. Obtained operating characteristics of CFB unit coupled with heat storage under banked fire condition.
3. Clarified the characteristics of CFB unit's energy loss distribution under extreme low load.
4. Quantified the exergy performance indexes of key components of CFB unit.