

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212237

超超临界 650 °C 机组 BEST 方案 热力性能研究

王文焕¹, 许朋江², 薛朝因², 居文平², 周波³, 戴晓业¹, 史琳¹

(1.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3.华能(浙江)能源开发有限公司玉环分公司, 浙江 玉环 318000)

[摘要] 针对超超临界燃煤机组背压抽汽汽轮机 (backpressure extraction steam turbine, BEST) 方案的研究现状, 建立了含 BEST 的超超临界燃煤机组的变工况计算模型和焓分析模型, 深入探究了主蒸汽流量、温度、压力, 汽轮机背压以及 BEST 回热抽汽级数对机组热力性能的影响规律。结果表明: 机组的焓效率随主蒸汽流量先升高后降低, 在主蒸汽流量为 750 kg/s 时达到最大值 (52.42%); 机组焓效率随主蒸汽温度和压力的增大而提高, 随汽轮机背压的增大而降低, 在低负荷时机组热力性能受背压的影响更大; 此外, BEST 回热抽汽级数对机组热力性能的影响十分显著, 级数为 4 级时与系统设计方案匹配度最好, 热力性能最优。所述计算方法和 BEST 回热抽汽级数选择方案, 可为超超临界机组方案设计与运行优化提供参考。

[关键词] 超超临界燃煤机组; BEST 技术; 焓分析; 变工况

[引用本文格式] 王文焕, 许朋江, 薛朝因, 等. 超超临界 650 °C 机组 BEST 方案热力性能研究[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 129-136. WANG Wenhuan, XU Pengjiang, XUE Zhaonan, et al. Thermal performance of 650 °C ultra supercritical unit with BEST[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 129-136.

Thermal performance of 650 °C ultra supercritical unit with BEST

WANG Wenhuan¹, XU Pengjiang², XUE Zhaonan², JU Wenping², ZHOU Bo³, DAI Xiaoye¹, SHI Lin¹

(1. Department of energy and power engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. Yuhuan Branch of Huaneng (Zhejiang) Energy Development Co., Ltd., Yuhuan 318000, China)

Abstract: In view of the research situation of backpressure extraction steam turbine technology for ultra-supercritical power generation units, the off-design condition calculation model and exergy analysis model of the unit was established, and the influences of steam mass flow, temperature, pressure, steam turbine back pressure and the BEST heat extraction stage on the thermal performance of the unit were analyzed. The exergy efficiency of unit increased first and then decreased with main steam flow rate, reaching the maximum value (52.42%) when main steam flow rate was 750 kg/s. Exergy efficiency of unit increased with the increase of main steam temperature and pressure but decreased with the increase of turbine back pressure. The thermal performance of unit was more affected by back pressure at low load. In addition, the BEST series has a significant effect on the thermal performance of the unit, and the BEST match degree with the system design scheme is achieved when the series is 4, and the thermal performance is optimal. The calculation method and BEST series selection scheme can provide reference for the scheme design and operation optimization of ultra-supercritical units.

Key words: advanced ultra-supercritical coal-fired units; BEST technology; exergy analysis; off-design

修回日期: 2022-12-12

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ20-H73)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H73)

第一作者简介: 王文焕 (1999), 男, 博士研究生, 主要研究方向为综合能源系统, wangwh22@mails.tsinghua.edu.cn.

通信作者简介: 戴晓业 (1989), 男, 博士, 助理研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为能源系统品位分析与优化等, daixy@mail.tsinghua.edu.cn.

“双碳”背景下,发展高效燃煤发电技术是实现煤电行业绿色低碳转型的优选之路。近年来燃煤发电机组已逐渐向超临界和超超临界过渡,我国600℃二次再热超超临界燃煤发电技术已相对成熟,并有多台机组投入运行^[1-2]。进一步提高机组参数是实现燃煤机组增效的重要手段,但650℃乃至700℃的超超临界热力循环对锅炉、蒸汽管道以及汽轮机部件的设计和制造提出了更高的要求,因此需要从热力系统设计的角度对机组进行研究,探究适应超高参数系统的机组优化设计方法^[3-7]。

背压抽汽汽轮机(backpressure extraction steam turbine, BEST)技术受到国内外学者的广泛关注^[8-10]。周云龙等^[11]提出采用BEST替代超超临界机组2—7级回热抽汽来降低汽轮机中的蒸汽过热度。姚丽萍^[12]在进行系统设计时也采用类似的方法。邓攀等^[13]分析了BEST技术用于超超临界二次再热机组的可行性,阐述了该技术在设计、制造、运行和控制中的难点。裴东升等^[14]对采用BEST技术的超超临界1000MW机组开展经济性分析,结果表明采用BEST方案后机组再热循环的经济性增益降低,但汽轮机各缸效率有所提升。王婧等^[15-17]采用单耗分析法研究了采用不同BEST回热抽汽方

案的超超临界机组的热力性能,提出通过调节BEST回热抽汽位置匹配最低煤耗的优化设计方法。

目前,国内外对BEST技术用于超超临界燃煤机组的研究多集中在可行性分析以及方案对比研究^[18-20],少有学者结合机组变工况运行特性,开展关键参数对机组热力性能影响规律的研究。本文基于某650℃超超临界燃煤机组BEST设计方案,建立了机组的全工况计算模型,采用焓分析方法探究了机组关键参数及BEST回热抽汽级数对机组热力性能的影响,为650℃高参数超超临界机组的设计和运行提供理论指导。

1 计算方法和模型

本文的研究对象为超超临界1100MW燃煤发电机组,采用一次再热、双轴高低位布置,回热系统参考相关热平衡图采用“五高、五低、一除氧”方案。此外,采用BEST取代了高、中压缸的中间级回热抽汽,同时BEST汽轮机的发电还可用于驱动给水泵或用于提供其他厂用电^[10],预设方案中BEST回热抽汽分别进入第3—7级回热器,排汽进入第8级低压加热器与给水换热,汽轮机的主要技术参数见表1。

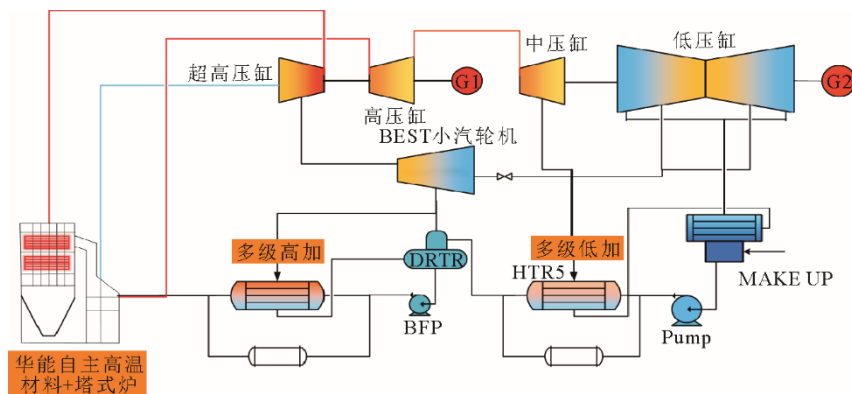


图1 超超临界1100MW机组热力系统示意

Fig.1 Schematic diagram of thermal system of an ultra-supercritical 1100 MW unit

表1 机组主要技术参数

Tab.1 Main technical performance of unit

项目	数值
额定功率/MW	1100.00
最大连续功率/MW	1119.69
主蒸汽压力(额定)/MPa	34.32
主蒸汽温度(额定)/℃	650.00
再热蒸汽温度(额定)/℃	650.00
额定进汽量/(kg·s ⁻¹)	869.44
最大进汽量/(kg·s ⁻¹)	915.38
背压/kPa	4.50
回热系统	11级

在额定工况(THA工况)下,锅炉给水流量为

869.44 kg/s,该工况下的主要参数见表2。

表2 THA工况下机组主要性能参数

Tab.2 Main thermal parameters of unit in case THA

项目	数值	项目	数值
热再热蒸汽压/MPa	7.136	给水温度/℃	328.9
冷再热蒸汽压/MPa	3.095	给水焓/(kJ·kg ⁻¹)	1476.6
冷再热蒸汽温度/℃	388.3	给水泵压力/MPa	36.250
再热压损/%	4	BEST抽汽量/(kg·s ⁻¹)	191.78

1.1 机组全工况计算模型

运用文献[21-22]中提到的方法计算汽轮机组

变工况的热力参数，汽轮机组第 1 级、中间级和末级抽汽参数分别采用不同方法计算。

一般情况下机组的第 1 级和中间级蒸汽均处于亚临界流动状态。亚临界流动时，级组前后参数与流量间满足弗留格尔公式：

$$\frac{G_1}{G} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{z1}^2}{p_0^2 - p_z^2}} \sqrt{\frac{T_0}{T_{01}}} \quad (1)$$

式中： G_1 和 G 分别为变工况和额定工况下通过级组的流量，kg/s； p_0 和 p_z 分别为额定工况下级组的进、出口压力，MPa； p_{01} 和 p_{z1} 分别为变工况下级组的进、出口压力，MPa； T_0 、 T_{01} 分别为额定工况和变工况下的级组前总温，K。由于第一级蒸汽处于高温高压状态，无法应用理想气体假设，因此采用改进后的弗留格尔公式：

$$\frac{G_1}{G} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{11}^2}{p_0^2 - p_1^2}} \sqrt{\frac{p_0 v_0}{p_{01} v_{01}}} \quad (2)$$

式中： p_{01} 和 p_{11} 分别为变工况下第一级的进、出口压力，MPa； p_0 和 p_1 分别为额定工况下第一级的进、出口压力，MPa； v_0 和 v_{01} 分别为额定工况和变工况下第一级的进口蒸汽比容，m³/kg。

当机组工况偏离较大时，由于部分级组的压比过小，可能导致弗留格尔公式根号中出现负值，导致计算无法进行。因此本文参考 ASME PTC6—2004 推荐的方法计算变工况下中间级各抽汽口处的蒸汽压力：

$$C_i = \frac{G_i}{\sqrt{p_i/v_i}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-M}} \quad (3)$$

式中： C_i 为抽汽位置 i 处的蒸汽流量系数； M 为蒸汽湿度。

当抽汽位置不发生改变时， C_i 为常数，可根据 THA 工况下各抽汽口处和汽缸入口处流量系数 C 计算变工况条件下相应位置的蒸汽压力。此外，对于汽轮机中间各级组，当工况发生变化后级组的相对内效率变化较小，因此取典型工况的平均值作为变工况计算的依据。

末级组效率随压比变化显著，可根据热平衡图上典型工况下的数据，拟合出末级组效率随压比变化的曲线，具体如图 2 所示。

由于回热抽汽压力和抽汽系数（抽汽流量与主蒸汽流量的比值）是相互影响的，可通过迭代方法确定各级抽汽压力和抽汽系数，进而确定机组其他参数，迭代流程如图 3 所示。

1.2 焓分析模型

本文使用焓效率和焓损衡量机组的热力性能和部件的优化潜力。对于该燃煤发电机组，可以将

工质循环流动看作稳定流动^[22]，工质的物流焓 e 可以表示为：

$$e = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) \quad (4)$$

式中： h 、 h_0 分别为工质当前状态和环境参考态下工质的比焓，kJ/kg； s 、 s_0 分别为当前状态和环境参考态下工质的比熵，kJ/(K·kg)。

方程	$Y=B_1*x^3+B_2*x^2+B_3*x+C$
C	$0.220\ 36 \pm 0.118\ 94$
B_1	$4.883\ 26 \pm 1.152\ 26$
B_2	$-11.862\ 04 \pm 3.414\ 07$
B_3	$7.293\ 3 \pm 3.141\ 75$
残差平方和	$2.062\ 11 \times 10^{-4}$
R^2 (COD)	0.996 26
调整后 R^2	0.990 65

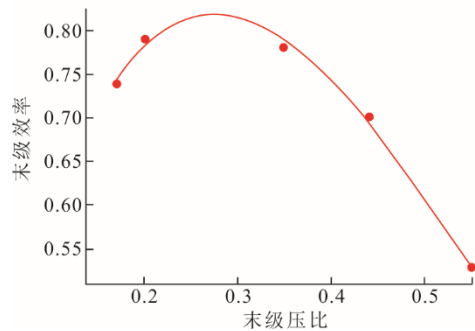


图 2 汽轮机末级效率-压比曲线
Fig.2 Turbine final stage efficiency-pressure ratio curve

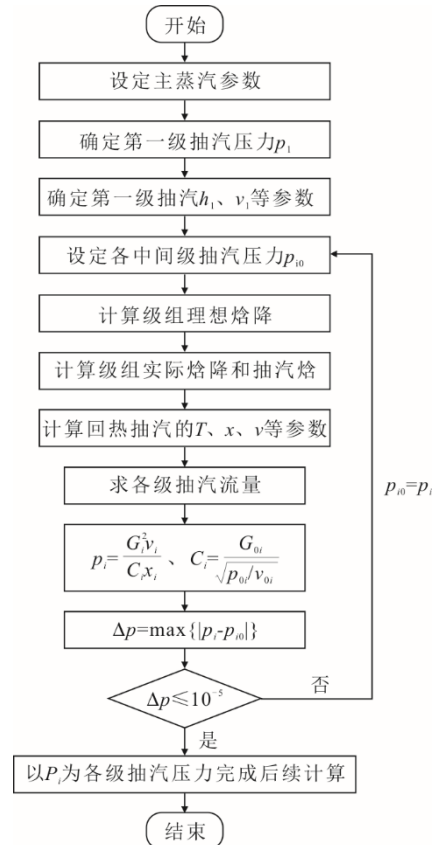


图 3 迭代计算流程
Fig.3 Iterative calculation process

对于本文涉及的超超临界 1 100 MW 机组，将整个热力系统分解为汽轮机级组、回热加热器、凝汽器以及 BEST 小汽轮机部件，各子系统的焓损失使用表 3 中的公式计算。

表 3 中： E_D 为机组或部件的焓损； \dot{m} 为质量流量； P_e 为机组发电功率；下标 tot、best、tur、reh 和

con 分别为汽轮机组、BEST 背压式汽轮机、主汽轮机、回热加热器和凝汽器；下标 i, j 分别为汽轮机的级组编号和回热加热器的级数；下标 f、s、w、dw、ma 和 c 分别为燃料、蒸汽、给水、疏水、化学补充水和凝结水；下标 in、out 分别为部件的进、出口位置。

表 3 系统部件焓损计算模型
Tab.3 Exergy loss calculation model for system components

部件	焓损计算模型
汽轮机组	$\dot{E}_{D,tot} = \dot{m}_f e_f + \dot{m}_{ma} e_{ma} - (P_c + P_{best})$
汽轮机级组	$\dot{E}_{D,tur} = \dot{m}_{tur,j} (e_{i,in} - e_{i,out}) - P_{c,i}$
回热加热器	$\dot{E}_{D,reh} = \dot{m}_{s,j} e_{s,j} + \dot{m}_{w,j} (e_{w,j,in} - e_{w,j,out}) + \dot{m}_{dw,j,in} e_{dw,j,in} - \dot{m}_{dw,j,out} e_{dw,j,out}$
凝汽器	$\dot{E}_{D,con} = \dot{m}_{tur,out} e_{tur,out} + \dot{m}_{tur,out} e_{tur,out} + \dot{m}_{dw} e_{dw} + \dot{m}_{ma} e_{ma} - \dot{m}_{c,out} e_{c,out}$
BEST 小机	$\dot{E}_{D,best} = \dot{m}_{best} e_2 - \sum_{i=3}^8 \dot{m}_i e_i - P_{best}$

系统的焓效率为：

$$\eta_e = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100\% \quad (5)$$

2 关键参数对机组热力性能的影响

2.1 主蒸汽流量对机组热力性能的影响

机组热力性能随主蒸汽流量的变化规律如图 4、图 5 所示。由图 4 的计算结果可以看出，机组功率和 BEST 并网功率随主蒸汽流量增大而增大，其中 BEST 发电功率随主蒸汽流量增大是因为当主蒸汽流量增加时给水流量同时增大，由热平衡关系，各级回热抽汽量也增大，包括 BEST 的第 3—8 级抽汽量，因此进入 BEST 的蒸汽量和并网功率也增大。

由图 5 可知，热效率及焓效率的变化趋势基本一致，其随主蒸汽流量的增加，均先增大后减小，其中主蒸汽流量为 750 kg/s 时焓效率达到峰值（52.42%），高于额定工况约 0.20%。这主要是由于主汽轮机末级效率随压比的变化并非单调的，存在极值（图 2），且主蒸汽流量达到 750 kg/s 时末级效率恰好达到最大值，因此焓效率比额定功率条件下更高。

2.2 主蒸汽压力和温度对机组热力性能的影响

机组热力性能随主蒸汽压力及温度的变化规律如图 6—图 9 所示。由图 6—图 9 可以看出：机组功率和焓效率随主蒸汽压力和温度增大而增大，近似线性变化；与压力相比，温度对机组热力性能的影响更加显著：主蒸汽温度从 610 °C 提高至

660 °C 时机组功率提高约 70 MW，焓效率提高约 1.2 百分点。

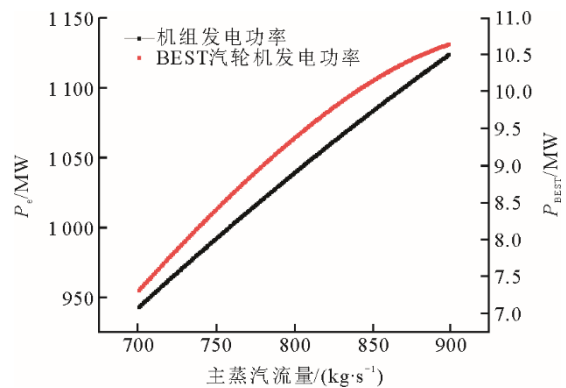


图 4 发电功率随主蒸汽流量的变化规律
Fig.4 The net power changes with the increase of main steam flow

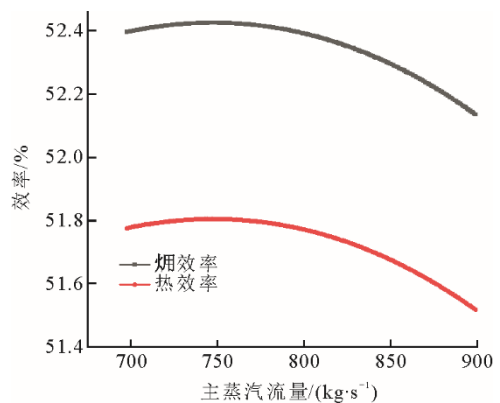


图 5 热效率和焓效率随主蒸汽流量的变化规律
Fig.5 The thermal efficiency and exergy efficiency changes with the increase of main steam flow

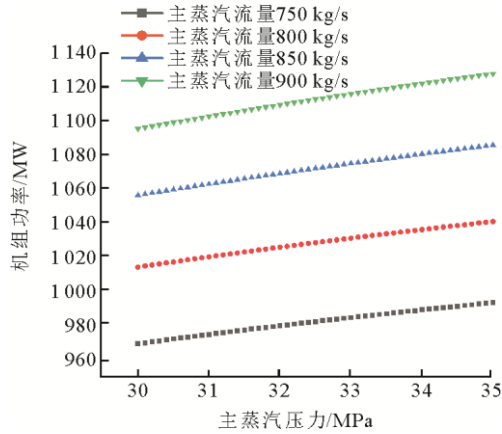


图 6 发电功率随主蒸汽压力的变化规律
Fig.6 The net power changes with the increase of main steam pressure

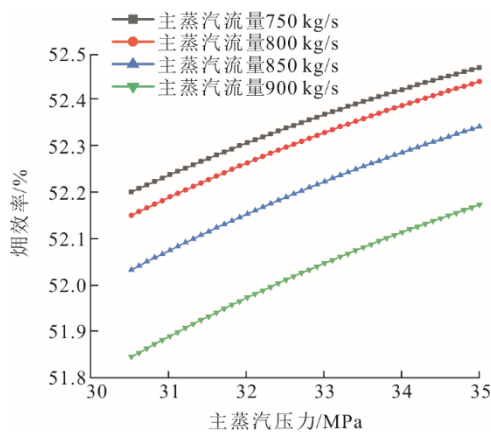


图 7 焓效率随主蒸汽压力的变化规律
Fig.7 The exergy efficiency changes with the increase of main steam pressure

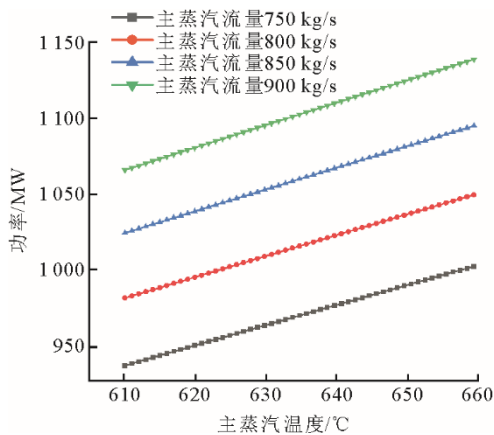


图 8 发电功率随主蒸汽温度的变化规律
Fig.8 The net power changes with the increase of main steam temperature

2.3 汽轮机背压对机组热力性能的影响

汽轮机背压能够显著改变汽轮机级组的压比，影响级组的功率，对系统的热力性能影响显著，机组的发电功率和焓效率随汽轮机背压的变化规律如图 10、图 11 所示。

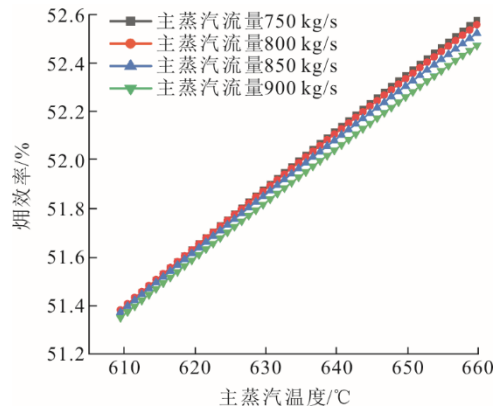


图 9 焓效率随主蒸汽温度的变化规律
Fig.9 The exergy efficiency changes with the increase of main steam temperature

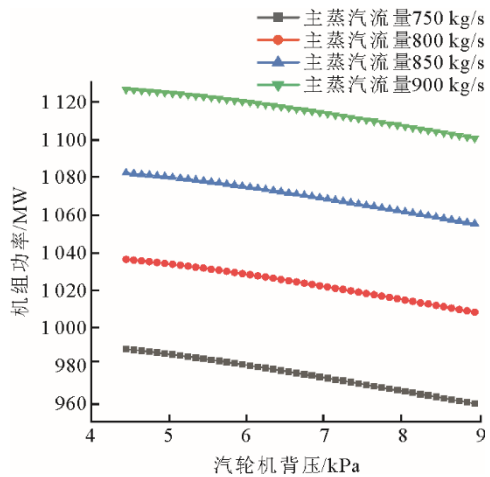


图 10 发电功率随汽轮机背压的变化规律
Fig.10 The net power changes with the increase of backpressure

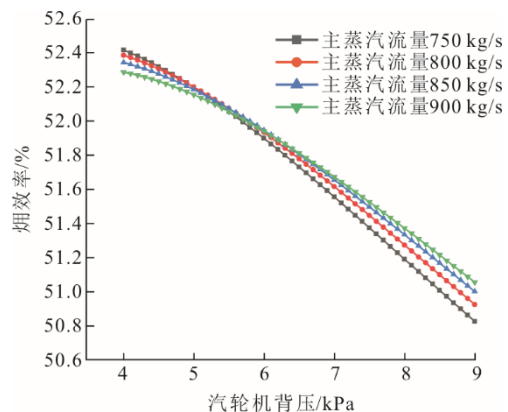


图 11 焓效率随汽轮机背压的变化规律
Fig.11 The exergy efficiency changes with the increase of backpressure

由图 10 和图 11 可以看出：机组功率和焓效率随汽轮机背压的增大而减小；不同主蒸汽流量下机组焓效率-背压关系曲线出现了交叉；背压为 4 kPa 时小流量（700 kg/s）条件下机组的焓效率最高，而

背压为 9 kPa 时小流量条件下机组的焓效率最低。这说明流量和背压的共同作用改变了机组做功时汽轮机内部的分布特性,尤其是背压的增加导致末级压比降低,这造成了小流量条件下汽轮机末级效率的降低,从而导致焓效率的降低更为显著。总的来说,背压对机组热力性能的影响较为显著,尤其是在部分工况条件下,背压过高容易导致机组热力性能显著降低。

3 BEST 对机组热力性能的影响

3.1 系统循环分析

在超超临界燃煤机组中使用 BEST 技术能大幅减少再热蒸汽量,这对于锅炉再热器的设计与布置有一定的好处;此外使用 BEST 抽汽回热替代高、中压缸抽汽有助于主汽轮机部件设计,提升主汽轮机的效率^[23-25]。但从热力学的角度出发,再热蒸汽量的减少会导致平均吸热温度显著下降 10~15 °C,大幅降低了再热循环对于整个蒸汽动力循环的增益。因此如何合理平衡 BEST 技术的优势和劣势需要进一步研究。

本文选择 BEST 回热抽汽级数作为可调变量对系统的热力性能进行深入探究。综合考虑机组设计复杂性和 BEST 的实用性,BEST 可调级数选取 3—6 级。假设当 BEST 回热抽汽级数发生变化时,BEST 汽轮机仍从主汽轮机第 2 级抽汽口取汽,BEST 背压式汽轮机的各级回热抽汽分别进入第 3—n 级回热器换热,因 BEST 回热抽汽级数变少导致无法与回热器匹配时从中压缸开口抽取回热蒸汽。

3.2 BEST 回热抽汽级数对机组热力性能的影响

机组发电功率和焓效率随 BEST 回热抽汽级数的变化规律如图 12、图 13 所示。由图 12、图 13 可以看出:级数为 3 级和 4 级时机组功率最高,其中级数为 4 级时机组的焓效率更高;当级数增大至 5 级或 6 级时,机组功率和焓效率显著降低。机组的焓效率主要与蒸汽的循环吸热量、循环比内功以及 BEST 小汽轮机的并网发电量有关。为进一步探究造成这一结果的原因,计算了不同 BEST 回热抽汽级数下机组的循环吸热量、新蒸汽循环比内功以及 BEST 的并网发电量等参数的变化规律,具体如图 14 所示。由图 14 的计算结果可以看出:新蒸汽比内功在 BEST 回热抽汽级数为 3 级和 4 级时远高于级数为 5 级和 6 级时,而循环吸热量的变化相对较小;机组的循环吸热量与给水温度以及再热吸热

量有关,锅炉给水温度几乎不变的情况下,循环吸热量只与再热吸热量有关,当 BEST 回热抽汽级数较低时再热蒸汽量较大,再热吸热量较高,因此级数为 4 级时循环吸热量最大。而机组的新蒸汽比内功主要取决于机组的循环吸热量和抽汽做功不足,BEST 回热抽汽级数为 3 级和 4 级时机组的抽汽做功不足较少,而级数增加至 5 级和 6 级时抽汽做功不足显著增加,从而导致新蒸汽比内功显著降低。

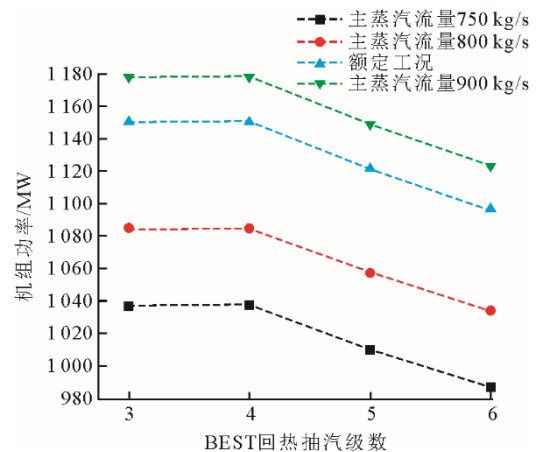


图 12 发电功率随 BEST 回热抽汽级数的变化规律
Fig.12 The net power changes with the BEST stage

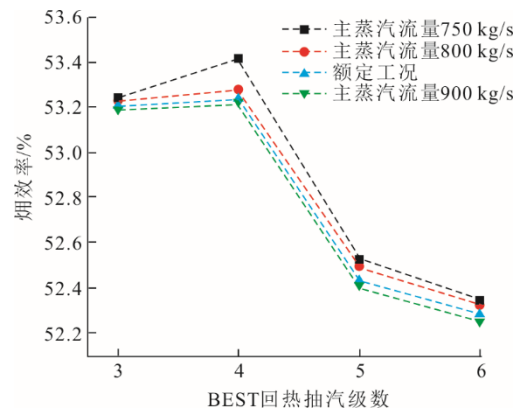
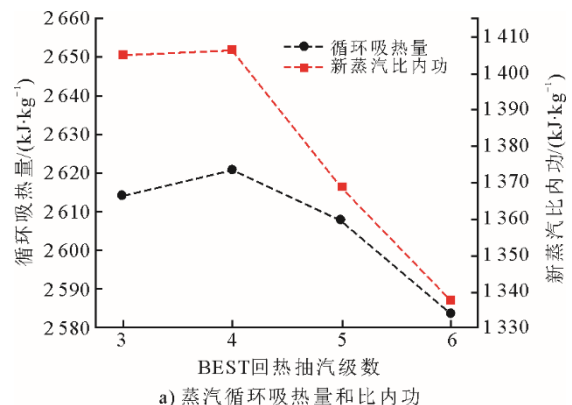


图 13 焓效率随 BEST 回热抽汽级数的变化规律
Fig.13 The exergy efficiency changes with the BEST stage



a) 蒸汽循环吸热量和比内功

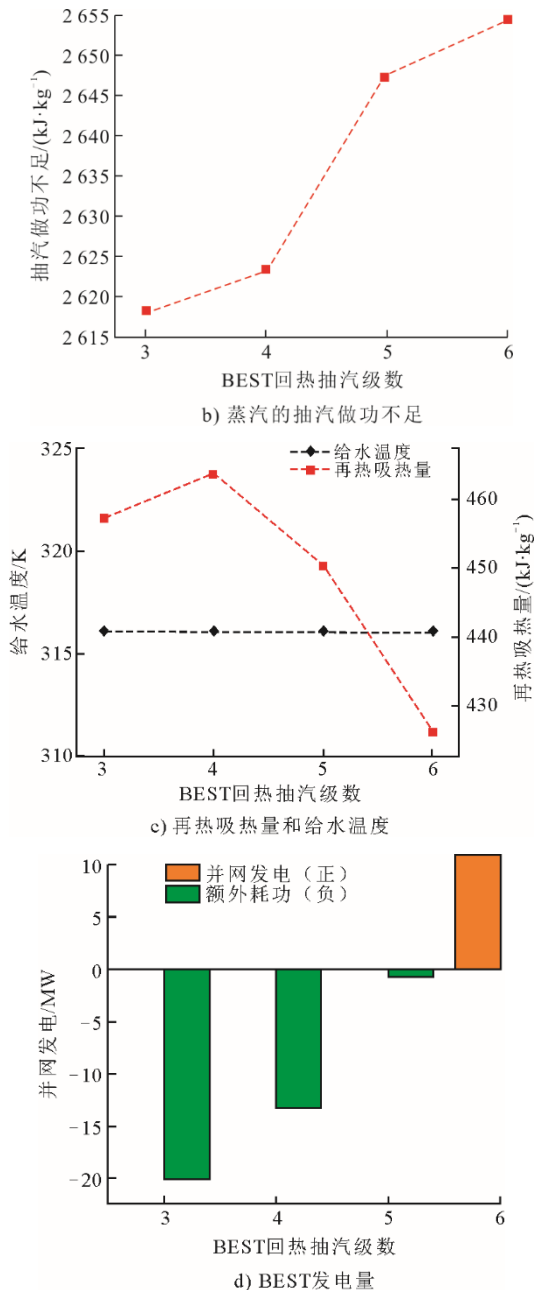


图 14 蒸汽循环吸热量、比内功、抽汽做功不足、再热吸热量和 BEST 发电量随 BEST 回热抽汽级数的变化规律
Fig.14 Cycle heat absorption, specific internal work, work loss of extraction reheat absorption and BEST power generation changes with BEST stage

机组的热力性能除了受循环吸热量，新蒸汽比内功影响外，与 BEST 的并网发电量也有关系，BEST 回热抽汽级数为 3 级时机组的循环吸热量减去新蒸汽比内功的值最高，但由于需要额外从电网购电驱动给水泵，因此焓效率反而低于 BEST 回热抽汽级数为 4 级时。

总之，BEST 小汽轮机为 4 级时机组的热力性能最优，但需要额外耗电来满足给水泵用电，可能造成不便，实际进行系统设计时需要综合考虑。

4 结 论

本文建立了超超临界燃煤机组变工况迭代计算模型和焓分析模型，探究了关键参数以及 BEST 方案对机组热力性能的影响规律，主要结论如下。

1) 机组的发电功率随主蒸汽流量的增加而增大，但焓效率先增大后减小，主蒸汽流量为 750 kg/s 时机组热力性能最好。

2) 机组热力性能随主蒸汽压力和温度的增大而提升，且近似呈线性变化；温度对机组热力性能的影响比压力更加显著。

3) 机组功率和焓效率随汽轮机背压的增大而减小，流量和背压的共同作用改变了机组做功在汽轮机内部的分布特性，高背压条件下汽轮机末级余速损失增大，焓损失显著增大。

4) BEST 的设计导致热力循环的平均吸热温度降低，从而导致机组的热力性能（功率，焓效率等）下降，但有助于锅炉受热面布置和主汽轮机的设计。BEST 回热抽汽级数为 4 级时与系统设计方案匹配度最好，热力性能最优。

[参 考 文 献]

- [1] 周一工. 中国燃煤发电节能技术的发展及前景[J]. 中外能源, 2011, 16(7): 91-95.
ZHOU Yigong. The development and prospect of coal-fired power generation energy-saving technologies in China[J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(7): 91-95.
- [2] 郑明辉, 宋民航, 王金星. “双碳”目标下燃煤机组转型目标与技术分析[J]. 广东电力, 2022, 35(7): 14-22.
ZHENG Minghui, SONG Minhang, WANG Jinxing. Objective and technical analysis of coal-fired unit transformation under dual carbon goals[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(7): 14-22.
- [3] 曹应飞, 乔朋博, 邓凌宇. 1 000 MW 超超临界汽轮机节能提效改造技术及应用[J]. 节能与环保, 2022(7): 89-91.
CAO Yingfei, QIAO Pengbo, DENG Lingyu. Energy saving and efficiency improvement retrofit technology and application of ultra-supercritical 1 000 MW steam turbine[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2022(7): 89-91.
- [4] 王姗, 吴博, 钟主海, 等. 超超临界 1 000 MW 二次再热低压通流优化[J]. 东方汽轮机, 2021(4): 19-22.
WANG Shan, WU Bo, ZHONG Zhuhai, et al. Flow optimization of ultra-supercritical 1 000 MW secondary reheat low pressure cylinder[J]. Dongfang Turbine, 2021(4): 19-22.
- [5] 张国喆. 1 000 MW 超超临界燃煤发电机组低负荷运行安全分析及节能措施[J]. 青海电力, 2021, (3): 24-27.
ZHANG Guozhe. Safety analysis and energy-saving measures for low-load operation of 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired generating units[J]. Qinghai Electric Power, 2021, 40(3): 24-27.
- [6] 杨名, 段立强, 刘庆新, 等. 超超临界二次再热燃煤发电系统优化设计[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(9): 2119-2128.

- YANG Ming, DUAN Liqiang, LIU Qingxin, et al. Optimization design of a new ultra-supercritical double reheat coal-fired power generation system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020,41(9): 2119-2128.
- [7] 黄畅, 张攀, 王卫良, 等. 燃煤发电产业升级支撑我国节能减排与碳中和国家战略[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 1-6.
- HUANG Chang, ZHANG Pan, WANG Weiliang, et al. The upgradation of coal-fired power generation industry supports China's energy conservation, emission reduction and carbon neutrality[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 1-6.
- [8] 程辉. 超超临界二次再热 1 000 MW 机组回热系统优化[J]. 能源科技, 2020, 18(2): 47-50.
- CHEN Hui. Optimization of regenerative system of 1 000 MW ultra supercritical double reheat unit[J]. Energy Science and Technology, 2020, 18(2): 47-50.
- [9] 王渡, 陈豪, 魏佳倩, 等. 1 000 MW 机组不同 BEST 级数下变工况回热特性研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(1): 34-40.
- WANG Du, CHEN Hao, WEI Jiaqian, et al. Research on regenerative characteristics of 1 000 MW units at different BEST stages under variable operating conditions[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 34-40.
- [10] 李冰天. 1 000 MW 超超临界 EC-BEST 二次再热机组经济性分析[J]. 热能动力工程, 2018, 33(11): 36-41.
- LI Bingtian. Economic analysis of 1 000 MW ultra-supercritical EC-BEST secondary reheat unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(11): 36-41.
- [11] 周云龙, 杨美, 王迪. 1 000 MW 高超超临界二次再热系统优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 137-141.
- ZHOU Yunlong, YANG Mei, WANG Di. Optimization of 1 000 MW high ultra-supercritical double-reheat system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 137-141.
- [12] 姚丽萍. 超超临界二次再热机组热力系统优化与控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2021: 1.
- YAO Liping. Optimization and control strategy of thermal system of ultra-supercritical secondary unit[D]. Nanjing: Southeast University, 2021: 1.
- [13] 邓攀, 王亚军. BEST 技术用于超超临界二次再热机组的可行性分析[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 84-89.
- DENG Pan, WANG Yajun. Feasibility analysis on BEST technology for ultra-supercritical units with double-reheat cycle[J]. Electric Power, 2018, 51(7): 84-89.
- [14] 裴东升, 包伟伟, 刘石磊. 超超临界 1 000 MW 机组 EC-BEST 技术经济性分析[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 44-48.
- PEI Dongsheng, BAO Weiwei, LIU Shilei. Economy analysis for an ultra-supercritical 1 000 MW unit with EC-BEST thermal dynamic system[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 44-48.
- [15] 王婧, 段立强, 杨金福, 等. 700 °C 一次再热超超临界机组回热系统节能优化[C]//中国工程热物理学会会议, 上海, 2020.
- WANG Jing, DUAN Liqiang, YANG Jinfu, et al. Energy saving optimization study on regenerative system of 700 °C coal-fired power generation system with single reheat system[C]//China Engineering Thermophysics Conference, Shanghai, 2020.
- [16] 王婧, 段立强, 杨名. 650 °C 一次再热超超临界燃煤发电机组设计优化[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 416-425.
- WANG Jing, DUAN Liqiang, YANG Ming. Design optimization of 650 °C ultra-supercritical coal-fired power generation system with single reheat system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 416-425.
- [17] 王婧, 杨金福, 段立强, 等. 高参数超超临界燃煤机组汽轮机热力系统优化设计[J]. 发电技术, 2021, 42(4): 480-488.
- WANG Jing, DUAN Liqiang, Yang ming, et al. Optimal design of steam turbine system for advanced ultra-supercritical double reheat coal-fired units[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(4): 480-488.
- [18] 杨金福, 张忠孝, 韩东江, 等. 新型超临界参数燃煤发电系统结构设计技术[J]. 发电技术, 2019, 40(6): 555-563.
- YANG Jinfu, ZHANG Zhongxiao, HAN Dongjiang, et al. New supercritical parameter coal-fired power generation system structure design technology[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(6): 555-563.
- [19] 杨宇, 范世望, 蒋俊, 等. 采用 EC 系统的 1 000 MW 超超临界机组能级利用分析[J]. 热力透平, 2015, 44(3): 151-155.
- YANG Yu, FAN Shiwang, JIANG Jun, et al. Energy utilization analysis of 1 000 MW USC unit using EC thermal system[J]. Thermal Turbine, 2015, 44(3): 151-155.
- [20] 阳虹, 余炎, 范世望, 等. 梯次循环(EC)在超超临界 1 000 MW 机组工程应用与分析[J]. 热力发电, 2019, 48(12): 129-133.
- YANG Hong, YU Yan, FAN Shiwang, et al. Application and analysis of echelon cycle in ultra-supercritical 1 000 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(12): 129-133.
- [21] 余兴刚, 李旭, 蒋北华, 等. 汽轮机变工况模型的简便建立方法及应用[J]. 热力发电, 2019, 48(2): 96-100.
- YU Xinggang, LI Xu, JIANG Beihua, et al. A simple method to construct variable condition model for steam turbine and its application[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(2): 96-100.
- [22] 王文焕, 李志炜, 李秋白, 等. 基于焓分析法的供热机组变工况特性研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 115-122.
- WANG Wenhuan, LI Zhiwei, LI Qiubai, et al. Study on off-design characteristics of heating units based on exergy analysis method[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 115-122.
- [23] 杨宇, 夏晓华, 蒋俊. 超超临界 1 000 MW 机组梯次循环热力系统能损分析及优化[J]. 热力发电, 2015, 44(8): 74-78.
- YANG Yu, XIA Xiaohua, JIANG Jun. Energy loss analysis and optimization on an ultra supercritical 1 000 MW unit thermal system using echelon cycle[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(8): 74-78.
- [24] 张振, 林睿, 汤翔, 等. 超超临界二次再热机组耦合发电系统建模与性能分析[J]. 电工技术, 2022(11): 182-187.
- ZHANG Zhen, LIN Rui, TANG Xiang, et al. Modeling and performance analysis of coupled power generation system of ultra-supercritical double reheat unit[J]. Electric Engineering, 2022(11): 182-187.
- [25] 陈海文. 超超临界二次再热机组回热系统结构集成及参数优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 1.
- CHEN Haiwen. Structure and parameter optimization of reheat system of ultra-supercritical double reheat unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 1.

(责任编辑 邓玲惠)