超/亚临界机组深度调峰工况经济指标对比研究

乔　梁,徐　振,柏　源
(国电环境保护研究院有限公司,江苏 南京 210031)

摘要:【目的】为进一步提高煤电机组调峰能力,以满足电力系统调峰需求,实现经济指标优化。**【方法】**本文选取超临界湿冷、超临界空冷、亚临界湿冷、亚临界空冷的600 MW级和300 MW级共8种类型机组为研究对象,分析了负荷率对热耗率、综合厂用电率的影响,探讨了负荷率、供电负荷、不同类型机组降负荷过程等不同条件下机组供电煤耗的变化特征。**【结果】**研究表明,机组热耗率和综合厂用电率随负荷率降低而升高。除超临界空冷机组和亚临界湿冷机组负荷率100%外,其他负荷率条件下4种类型机组均显示600 MW级机组供电煤耗小于300 MW级机组,超临界湿冷机组平均差值为7.55 g/(kW·h)。当机组从满负荷降至50%负荷时,供电煤耗随供电负荷减小呈缓和上升趋势,超临界湿冷机组供电煤耗增长率约7.00%;当机组负荷从50%降至30%时,供电煤耗呈剧烈上升趋势,如超临界湿冷机组供电煤耗增长率约19.76%。超临界湿冷机组在深度调峰过程节能效益较佳;若机组长时间低于300 MW运行,300 MW级机组节能优势优于600 MW级机组;若机组需频繁从满负荷向下调节负荷运行,600 MW级机组调节能优势优于300 MW级机组,均为满负荷降至200 MW时,600 MW级机组供电煤耗增长率平均为3.11%,远低于300 MW级机组的19.45%。**【结论】**本研究可为煤电机组制定更为合理的调度策略提供指导,降低机组在调峰过程中的能耗和排放,实现节能降耗。

关键词:深度调峰;热耗率;综合厂用电率;供电煤耗
中图分类号:TK223.3　　**文章编号:**1674－8069(2026)04－0554－08
文献标志码:A　　**DOI编号:**10.19944/j.eptep.1674－8069.2026.04.004
[**引用本文格式**]乔梁,徐振,柏源.超/亚临界机组深度调峰工况经济指标对比研究[J].电力科技与环保,2026,42(4):554-561.
QIAO Liang, XU Zhen, BAI Yuan. Comparative study on economic indicators of deep peaking operation for super/subcritical units[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2026, 42(4):554-561.

Comparative study on economic indicators of deep peaking operation for super/subcritical units

QIAO Liang, XU Zhen, BAI Yuan
(Guodian Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210031,Jiangsu China)

Abstract: [Objective] In order to further enhance the peak-shaving capability of coal-fired power units, so as to meet the peak-regulation demands of the power system and achieve optimization of economic indicators. [**Methods]** This paper selects eight types of units, namely 600 MW and 300 MW, with supercritical wet cooling, supercritical air cooling, subcritical wet cooling, and subcritical air cooling as research objects. The influence of load rate on heat consumption rate and comprehensive plant electricity consumption rate areanalyzed, and the variation characteristics of coal consumption for power supply under different conditions such as load rate, power supply load, and load reduction process of different types of units are discussed. **[Results]**The research results indicate that the heat consumption rate and the comprehensive plant power consumption rate increase with the decrease of load rate. Except for supercritical air-cooled units and subcritical wet cooled units, which have a slightly higher coal consumption for 600 MW units than 300 MW units at a load rate of 100%, all four types of units show a lower coal consumption for 600 MW units than 300 MW units under other load rate conditions (e.g., the average difference for supercritical wet cooling units is 7.55 g/(kW·h)). When the unit decreases from full load to a load rate of 50%, the coal consumption for power supply shows a

收稿日期:2025-11-30　　**录用日期:**2026-01-30
Received: 2025-11-30　　**Accepted:** 2026-01-30
基金项目:国电环境保护研究院有限公司自立项目(HBHZ2025Y01)

relatively gentle upward trend (e.g., the growth rate for supercritical wet cooling units is about 7.00%). When the unit decreases from a load rate of 50% to a load rate of 30%, the coal consumption for power supply shows a more severe upward trend (e.g., the growth rate for supercritical wet cooling units is about 19.76%). Supercritical wet cooling units have better energy-saving benefits during deep peak shaving processes. For supercritical wet cooling units, if the unit operates for less than 300 MW for a long time, the energy-saving advantage of 300 MW units is better than that of 600 MW units; if the unit needs to frequently reduce load operation from full load state, the regulating energy advantage of a 600 MW unit is better than that of a 300 MW unit (e.g., when reducing 200 MW from full load, the average coal consumption growth rate for 600 MW units is 3.11%, significantly lower than the 19.45% for 300 MW units). **[Conclusion]**This study can provide guidance for the development of more reasonable scheduling strategies for coal-fired power units, reduce energy consumption and emissions during peak shaving, and achieve energy conservation and consumption reduction in unit operation.

Key words: depth peaking;heat consumption rate;comprehensive plant electricity consumption rate;coal consumption of power supply

0 引言

2020年9月22日,习近平主席在第75届联合国大会一般性辩论上宣布:中国CO_2排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和[1]。2021年我国化石能源石油、天然气、煤炭对外依存度分别为72%、45%和7%,国家能源安全存在威胁。近年来,国际地区形势动荡,能源合作国家政治化,能源市场供需平衡被打乱,中国的能源危机风险增加[2]。在政策支持和能源危机的推动下,推动绿色新能源革命,是中国今后半个世纪能源科技领域的战略任务[3]。

由于新能源发电日常运行波动、随机、间歇的特性,大规模并网发电后对电力系统可靠稳定运行构成了冲击[4]。煤电机组具有“一次能源可储”的特性,可被视为最适宜的调峰电源[5],来保障电力系统的稳定运行。随着“三改联动”[6-10]和“容量电价”[11-16]等政策的发布,煤电机组主力电源将向基础保障性和系统调节性电源并重转型,并随着电力系统价值的多元化,进行灵活性深度调峰的机组可获得电量价值、容量价值、调节价值和绿色价值[17-19]。

火电机组是否可进行深度调峰,及其调峰过程能耗指标、设备性能参数波动,将与机组所在单位的经济效益密切相关[20-25]。当前火电机组深度调峰研究主要立足于现有装置对深度调峰运行的技术适应性,缺乏供电煤耗、厂用电率、效率及辅助服务收益等机组综合经济性评估研究,深度调峰经济性变化趋势和程度与机组类型(超临界/亚临界)和负荷深度紧密相关。本文对超临界湿冷机组、超临界空冷机组、亚临界湿冷机组、亚临界空冷机组四种类型600 MW级和300 MW级机组纯凝工况下全负荷段热耗率、综合厂用电率、供电煤耗数据进行了分析,通过对以上经济指标数据的对比,可指导对已建机组调峰过程经济指标优化,对新建煤电项目设备选型、规划区域煤电机组与新能源之间的协调开发具有重要意义。

1 研究方法

按照机组容量、蒸汽参数、冷端冷却方式进行分类,对600 MW级、300 MW级的超临界湿冷机组、超临界空冷机组、亚临界湿冷机组、亚临界空冷机组共8种类型机组的热耗率、综合厂用电率、供电煤耗进行了对比分析。以上8种类型机组的经济指标数据覆盖对应机组的全负荷段(100%、75%、50%、40%和30%)。为了降低分析过程中的数据误差,每种类型机组统计样本涵盖了上海汽轮机厂、东方汽轮机厂和哈尔滨汽轮机厂的参数,每一类型统计样本不少于10台,取统计样本平均值进行比较,所有样本热耗采用试验热耗,同一类型机组背压修正至同一背压进行对比分析。

2 结果与讨论

2.1 负荷率对热耗率的影响

不同类型机组热耗率随负荷率的变化如图1,机组热耗率均随着负荷率的降低而升高。

1)对于600 MW级机组,相同负荷率条件下不

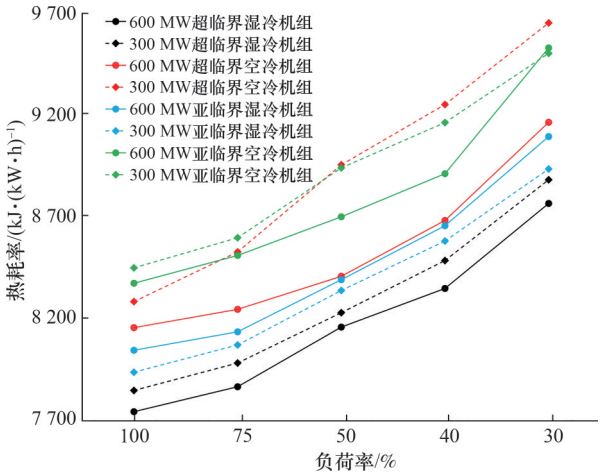

图1　不同类型机组负荷率对热耗率的影响

Figure 1　The influence of different types of unit load rates on heat consumption rate

同类型机组热耗率从小到大依次为超临界湿冷机组、亚临界湿冷机组、超临界空冷机组、亚临界空冷机组；亚临界湿冷机组和超临界空冷机组热耗率随着负荷率的降低而逐渐趋近；超临界湿冷机组和亚临界空冷机组热耗率差值较大，且在30%负荷率条件下达到最大值，为759.37 kJ/(kW·h)。

2)对于300 MW级机组，超临界湿冷机组热耗率略小于亚临界湿冷机组，且在任何负荷率条件下两者差值均匀，本文研究的5种负荷率对应的差值平均数为86.73 kJ/(kW·h)。

3)负荷率为100%时超临界空冷机组热耗率小于亚临界空冷机组，随着负荷率的降低，两者差值逐渐减小，直到负荷率为50%时，超临界空冷机组热耗率开始大于亚临界空冷机组，随着负荷率的降低，两者差值逐渐增大；且超临界空冷机组和亚临界空冷机组远大于同负荷率条件下的超临界湿冷机组和亚临界湿冷机组。

4)对亚临界湿冷机组，300 MW级机组热耗率恒小于对应负荷率条件下的600 MW级机组，在负荷率为50%时两者差值达到最小值，为52.73 kJ/(kW·h)。不同于亚临界湿冷机组，其余3类型机组在相同负荷率条件下，600 MW级机组热耗率小于对应负荷率条件下的300 MW级机组。

5)对于超临界湿冷机组，600 MW级机组热耗率恒小于对应负荷率条件下的300 MW级机组，在负荷率为50%时两者差值达到最小值，为70.24 kJ/(kW·h)。对于超临界空冷机组，600 MW级机组热耗率远小于对应负荷率条件下的300 MW级机组，在负荷率为50%时两者差值达到最大值，为544.19 kJ/(kW·h)。对于亚临界空冷机组，除了负荷率为30%时，300 MW级机组热耗率略小于600 MW级机组26.44 kJ/(kW·h)；其他负荷率段，600 MW级机组热耗率均小于300 MW级机组，在负荷率为50%时两者差值达到最大值，为238.75 kJ/(kW·h)。

因此，对于300 MW级机组，超临界空冷机组和亚临界空冷机组远大于同负荷率条件下的超临界湿冷机组和亚临界湿冷机组；除亚临界湿冷机组除外，其他类型600 MW级机组热耗率小于同负荷率条件下的300 MW级机组。

2.2　负荷率对综合厂用电率的影响

不同类型机组综合厂用电率随负荷率的变化如图2所示，机组综合厂用电率均随着负荷率的降低而升高。

1)对于600 MW级机组，相同负荷率条件下不同类型机组综合厂用电率从小到大依次为超临界湿冷机组、亚临界湿冷机组、超临界空冷机组、亚临界空冷机组；超临界湿冷机组与亚临界湿冷机组综合厂用电率在各负荷率下的差值较为稳定，平均相差1.09%。

2)超临界空冷机组与亚临界空冷机组综合厂用电率差值在不同负荷率下偏差较大，当负荷率为40%时，偏差为1.38%；当负荷率为30%时，偏差为0.06%。亚临界空冷机组、超临界空冷机组综合厂用电率远大于同负荷率条件下的亚临界湿冷机组、超临界湿冷机组，全负荷段亚临界空冷机组综合厂用电率平均大于超临界湿冷机组综合厂用电率约3.78%。

3)与600 MW级机组类似，300 MW级机组在相同负荷率条件下仍然是超临界湿冷机组综合厂用电率最小、亚临界空冷机组综合厂用电率最大；不同于600 MW级机组，300 MW级机组亚临界湿冷机组除在100%负荷率条件下综合厂用电率小于超临界空冷机组，其他负荷率条件下亚临界湿冷机组综合厂用电率均大于超临界空冷机组；亚临界空冷机组综合厂用电率远大于同负荷率条件下的其他三类型机组，且随着负荷率的增大，该差值进一步增大，负荷率为30%时，亚临界空冷机组综合厂用电率比超临界湿冷机组综合厂用电率高5.73%。

4)对于超临界空冷机组，600 MW级机组综合

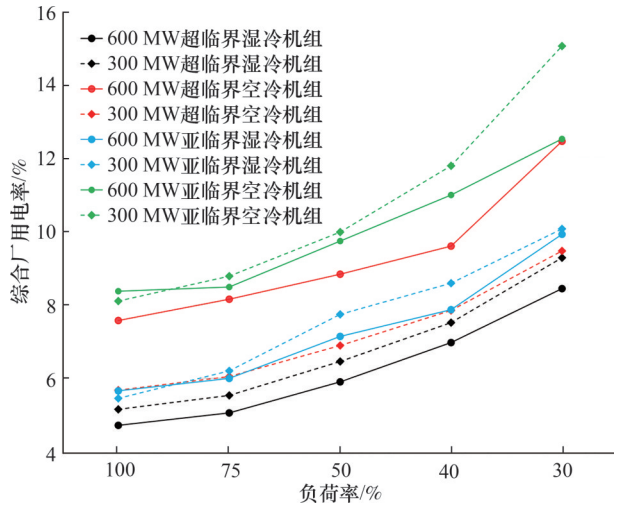

图2　不同类型机组负荷率对综合厂用电率的影响

Figure 2　The impact of different types of unit load rates on the comprehensive plant power consumption rate

厂用电率恒大于同负荷率条件下的300 MW级机组,两者差值在各负荷率趋于稳定,平均值为2.12%。

5)不同于超临界空冷机组,其他3种类型600 MW级机组综合厂用电率在大部分负荷率条件下小于300 MW级机组综合厂用电率。

6)对于超临界湿冷机组,600 MW级机组综合厂用电率恒小于同等负荷率条件下300 MW级机组,且各负荷率条件两者差值较为稳定,平均相差0.57%。

7)对于亚临界湿冷机组和亚临界空冷机组,当负荷率为100%时,600 MW级机组综合厂用电率大于300 MW级机组;当负荷率小于等于75%时,600 MW级机组综合厂用电率小于同负荷率条件下300 MW级机组综合厂用电率。

在本次统计负荷率讨论范围内,亚临界湿冷机组在负荷率为30%时,600 MW级机组综合厂用电率与300 MW级机组综合厂用电率相差值最小为0.15%;与亚临界湿冷机组相反,在本次统计负荷率讨论范围内,亚临界空冷机组在负荷率为30%时,600 MW级机组综合厂用电率与300 MW级机组综合厂用电率相差值最大为2.51%。

因此,对于300 MW级机组,亚临界空冷机组综合厂用电率远大于同负荷率条件下的其他三类型机组,且随负荷率增大而差值扩大,30%负荷率时亚临界空冷机组综合厂用电率比超临界湿冷机组综合厂用电率多5.73%;除超临界空冷机组外,其他类型600 MW级机组综合厂用电率小于同负荷率条件下的300 MW级机组。

2.3　不同讨论条件下机组供电煤耗的变化特征

2.3.1　负荷率对供电煤耗的影响

不同类型机组供电煤耗随负荷率的变化如图3所示,机组供电煤耗均随着负荷率的降低而升高。600 MW级机组和300 MW级机组相同负荷率条件下不同类型机组供电煤耗从小到大均依次为超临界湿冷机组、亚临界湿冷机组、超临界空冷机组、亚临界空冷机组。

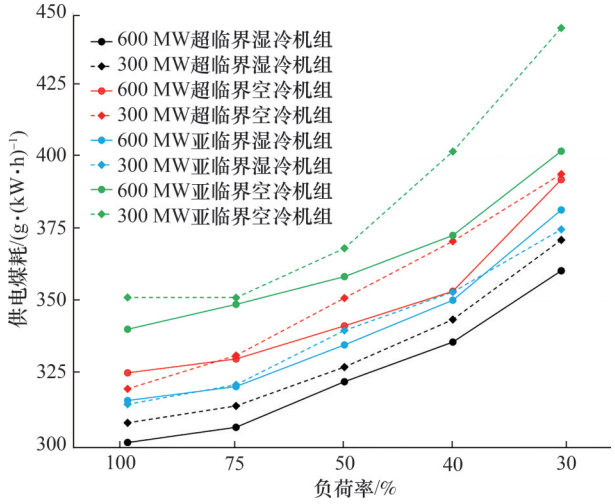

图3　不同类型机组负荷率对供电煤耗的影响

Figure 3　The impact of load rates of different types of units on coal consumption for power supply

对于600 MW级机组,超临界湿冷机组与亚临界空冷机组的供电煤耗在各负荷率条件下的差值稳定,两者差值平均值为39.33 g/(kW·h)。亚临界湿冷机组供电煤耗和超临界空冷机组供电煤耗差值在负荷率从100%到40%阶段随着负荷率的增大而减小,在负荷率为40%时差值达到最小,为3.10 g/(kW·h);当负荷率从40%降至30%时两者差值再次增大。

对于300 MW级机组,亚临界空冷机组供电煤耗远大于相同负荷率条件下的其他三类型机组,以本次统计负荷率讨论范围内亚临界空冷机组与超临界湿冷机组相同负荷率条件下的供电煤耗差值为例,在负荷率为75%时两者差值最小,为37.58 g/(kW·h),在负荷率为30%时两者差值最大,为

73.46 g/(kW·h)。

对于超临界湿冷机组，600 MW级机组供电煤耗恒小于同负荷率条件下的300 MW级机组供电煤耗，且两者差值较为稳定，平均相差7.55 g/(kW·h)。

对于亚临界空冷机组，600 MW级机组供电煤耗同样恒小于相同负荷率条件下的300 MW级机组供电煤耗，但随负荷率变化两者数值相差较大，当负荷率为75%时两者差值最小；为7.55 g/(kW·h)，但随着负荷率的降低两者差值逐渐增大，当负荷率为30%时，两者差值达最大值，为42.69 g/(kW·h)。

对于超临界空冷机组，负荷率为100%时，600 MW级机组供电煤耗大于300 MW级机组供电煤耗；其他负荷率情况下，600 MW级机组供电煤耗小于300 MW级机组供电煤耗，负荷率为40%时两者差值达到最大，为17.31 g/(kW·h)。

对于亚临界湿冷机组，本次讨论的5个负荷率工况下600 MW级机组供电煤耗与300 MW级机组供电煤耗的差值相对较小，差值绝对值平均数为3.30 g/(kW·h)。

2.3.2　供电负荷对供电煤耗的影响

不同类型机组供电煤耗随供电负荷的变化如图4所示，横坐标为供电负荷呈线性减小，展现出不同类型机组供电煤耗随供电负荷变化差异及单一类型机组供电煤耗随供电负荷变化的趋势。

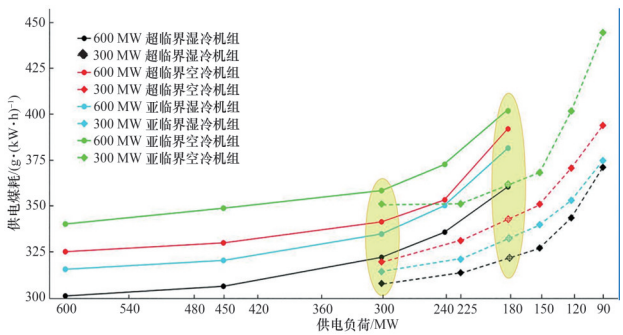

图4　不同类型机组供电负荷对供电煤耗的影响

Figure 4　The impact of different types of unit power supply loads on coal consumption for power supply

对于图4中所示4种类型机组，600 MW级机组当其供电负荷降低至300 MW以下运行时，其供电煤耗大于同类型300 MW级机组在相同供电负荷运行时的供电煤耗，且随着供电负荷的降低，600 MW级机组供电煤耗与相同供电负荷下300 MW级机组供电煤耗的差值逐渐增大，600 MW级和300 MW级机组在供电负荷为300 MW和180 MW时的供电煤耗如表1所示。由此可见，当机组供电负荷低于300 MW运行时，300 MW级机组供电煤耗优于600 MW级，且随着运行负荷的降低，该优势更为明显。

表1　600 MW级和300 MW级机组在供电负荷为300 MW和180 MW时的供电煤耗

Table 1　Coal consumption for power supply of 600 MW and 300 MW units with loads of 300 MW and 180 MW

单位：g/(kW·h)

供电负荷	300 MW			180 MW		
机组负荷等级	600 MW级	300 MW级	差值	600 MW级	300 MW级	差值
超临界湿冷机组	322.21	307.90	14.26	360.64	321.88	38.76
超临界空冷机组	341.55	319.73	21.82	392.23	343.23	48.99
亚临界湿冷机组	334.95	314.38	20.57	381.71	332.44	49.27
亚临界空冷机组	358.61	351.29	7.32	402.07	361.61	40.47

注：300 MW级机组在180 MW负荷下的供电煤耗通过插值法得到。

对于本文讨论的8种类型机组的供电煤耗随供电负荷的减小呈现相同的变化趋势，当机组从满负荷降低至负荷率为50%时，供电煤耗随供电负荷的减小呈较为缓和的上升趋势；当机组负荷率从50%降低至30%时，供电煤耗随供电负荷的减小呈较为剧烈的上升趋势。8种类型机组在50%负荷率和30%负荷率运行时的供电煤耗，较该类型机组100%负荷率运行时的供电煤耗增长率如表2所示，机组30%负荷率的供电煤耗增长率超出50%负荷率的供电煤耗增长率十个百分点。由此可见，本文讨论的8种类型机组在50%负荷率以下运行时，随着负荷率的降低锅炉能效急剧减小。

2.3.3　不同类型机组降负荷过程供电煤耗的变化

不同类型机组从满负荷状态运行分别下降100 MW和200 MW负荷对应的供电煤耗变化如图5所示，红色方柱代表满负荷条件下该机组的供电煤耗，黄色方柱代表该机组从满负荷状态下调100 MW负荷对应的供电煤耗，蓝色方柱代表该机

表2　不同类型机组供电煤耗增长率

Table 2　Growth rate of coal consumption for power supply of different types of units

机组类型	100%负荷率供电煤耗/(g·(kW·h)$^{-1}$)	50%负荷率供电煤耗/(g·(kW·h)$^{-1}$)	较100%负荷率增长率/%	30%负荷率供电煤耗/(g·(kW·h)$^{-1}$)	较100%负荷率增长率/%
600 MW级超临界湿冷机组	301.13	322.21	7.00	360.64	19.76
300 MW级超临界湿冷机组	307.95	327.27	6.27	371.31	20.57
600 MW级超临界空冷机组	330.08	341.55	3.47	392.23	18.83
300 MW级超临界空冷机组	331.28	351.20	6.01	394.15	18.98
600 MW级亚临界湿冷机组	320.52	334.95	4.50	381.71	19.09
300 MW级亚临界湿冷机组	321.14	339.97	5.87	374.97	16.76
600 MW级亚临界空冷机组	349.00	358.61	2.75	402.07	15.21
300 MW级亚临界空冷机组	351.38	368.43	4.85	444.77	26.58

组从满负荷状态下调200 MW负荷对应的供电煤耗。从图5可以看出,随着负荷的下调,相较满负荷运行时的供电煤耗均有不同程度地上升;相较于600 MW级机组,300 MW级各类型机组下调200 MW负荷时,供电煤耗发生了明显的变化。

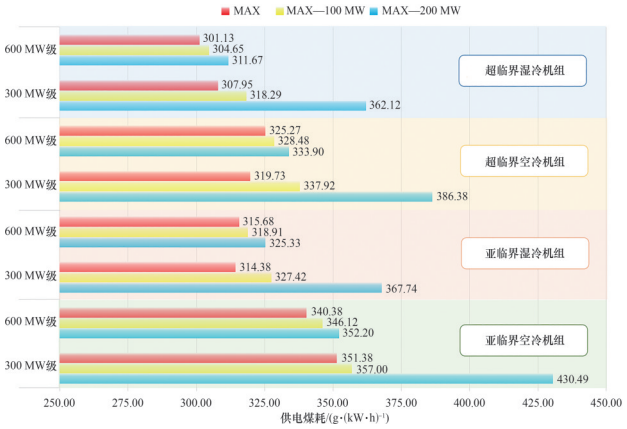

图5　不同类型机组降负荷过程供电煤耗变化曲线

Figure 5　The variation curve of coal consumption during the load reduction process of different types of units

表3和表4分别为8种类型机组从满负荷运行至降低100 MW、200 MW负荷运行时供电煤耗的变化及其增长率。可以看出,对于各类型机组,当机组从满负荷降低100 MW负荷运行时,600 MW级机组和300 MW级机组供电煤耗相较满负荷运行的供电煤耗平均增长率分别为1.22%和3.70%,在该条件下600 MW级机组在调峰过程较300 MW级机组有微弱的节能优势。然而,当机组从满负荷降低200 MW负荷运行时,600 MW级各类型机组供电煤耗相较满负荷运行的供电煤耗增长率平均值为3.11%,大幅小于同等条件下300 MW级机组供电煤耗增长率平均值(19.45%)。由此可知,600 MW级机组的调峰节能优势优于300 MW级机组,且下调负荷越大,该优势越明显。

表3　机组从满负荷运行至降低100 MW负荷运行供电煤耗对比

Table 3　Comparison of coal consumption for power supply from full load operation to reduced 100 MW load operation of the unit

单位:g/(kW·h)

机组类型	600 MW级机组			300 MW级机组		
	满负荷	降低100 MW	增长率/%	满负荷	降低100 MW	增长率/%
超临界湿冷机组	301.13	304.65	1.17	307.95	318.29	3.36
超临界空冷机组	325.27	328.48	0.99	319.73	337.92	5.69
亚临界湿冷机组	315.68	318.91	1.02	314.38	327.42	4.15
亚临界空冷机组	340.38	346.12	1.69	351.38	357.00	1.60

3　结论

1)除了超临界空冷机组和亚临界湿冷机组在负荷率为100%时600 MW级机组供电煤耗略大于300 MW级机组外,其他负荷率条件下,4种类型机组均表现出600 MW级机组供电煤耗小于300 MW级机组;以真实供电负荷为研究对象,当600 MW级机组供电负荷降低至300 MW以下负荷运行时,其供电煤耗大于300 MW级机组同负荷状态运行时的

表4 机组从满负荷运行至降低200 MW负荷运行供电煤耗对比

Table 4 Comparison of coal consumption for power supply from full load operation to 200 MW load reduction operation of the unit

单位:g/(kW·h)

机组类型	600 MW级机组			300 MW级机组		
	满负荷	降低200 MW	增长率/%	满负荷	降低200 MW	增长率/%
超临界湿冷机组	301.13	311.67	3.50	307.95	362.12	17.59
超临界空冷机组	325.27	333.09	2.40	319.73	386.38	20.85
亚临界湿冷机组	315.68	325.33	3.06	314.38	367.74	16.97
亚临界空冷机组	340.38	352.20	3.47	351.38	430.09	22.40

供电煤耗,且随着供电负荷的降低,600 MW级机组供电煤耗与相同供电负荷状态运行300 MW级机组供电煤耗差值逐渐增大,这主要是因为600 MW机组负荷率(实际功率与额定功率的比值)降低后,偏离了设计的最佳运行工况,导致锅炉效率下降和辅助动力的相对能耗增加,从而造成热耗率升高和综合厂用电率升高。

2)当机组从满负荷降低至50%负荷时,供电煤耗随供电负荷的减小呈较为缓和的上升趋势,当机组负荷率从50%降至30%时,供电煤耗呈现剧烈上升趋势,主要为低负荷下为维持锅炉系统稳定运行而增加的能耗;当机组负荷降低200 MW运行时,各类型600 MW级机组供电煤耗较满负荷状态下增长率平均值为3.11%,大幅小于同等条件下300 MW级机组供电煤耗增长率的平均值19.45%。

3)火电机组选型需考虑多方面影响因素,如容量是否满足需求、所在区域气候条件和水资源情况、建设和运营成本、未来可能发生的负荷变化和市场需求变化等。若上述条件均可满足时,在本文研究的4种类型机组中,超临界湿冷机组在深度调峰过程中展现出较好的节能效益;且对于超临界湿冷机组,若机组长时间低于300 MW运行,则300 MW级机组在该负荷段内运行的节能优势优于600 MW级机组;若机组需频繁从满负荷状态下调负荷运行,则600 MW级机组调峰过程中的节能优势优于300 MW级机组。因此,对于深度调峰机组的选择建议应当结合整体区域机组类型及调度需求进行经济性评估选择,而非局限于单个机组。

参考文献:

[1] 新华网.习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(全文)[EB/OL]. (2020-09-22).http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm.

[2] 刘云.我国能源电力发展及火电机组灵活性改造综述[J]. 洁净煤技术,2023,29(增刊2):319-327.
LIU Yun. Overview of energy and power system development and the flexibility retrofit of thermal power units in China[J]. Clean Coal Technology,2023,29(S2): 319-327.

[3] 欧阳子区,王宏帅,吕清刚,等.煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报,2023,43(22): 8772-8790.
OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LYU Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(22): 8772-8790.

[4] 孙哲."双碳"背景下火电厂"三改联动"现状及实施建议[J]. 能源与节能,2023(7): 71-74.
SUN Zhe. Current situation and implementation suggestions of "linkage of three reforms" in thermal power plants under background of "double carbon"[J]. Energy and Energy Conservation,2023(7): 71-74.

[5] 齐俊虎. 1 000 MW超超临界机组20%深度调峰控制系统灵活性改造[C]//2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集. 南宁,2023: 841-851.
QI Junhu. Flexibility transformation of 20% deep peak shaving control system for 1 000 MW ultra supercritical unit[C]//Proceedings of the 2023 Electric Power Industry Technical Supervision Work Exchange Conference and Professional Technical Forum. Nanning, 2023: 841-851.

[6] 国家发展改革委. 国家发展改革委 国家能源局关于开展全国煤电机组改造升级的通知[EB/OL]. (2021-10-29). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/03/content_5648562.htm.

[7] 张杰. 燃煤发电机组"三改联动"与异常工况检测研究[J]. 电气技术与经济,2024(10):196-199.
ZHANG Jie. Research on 'three reforms linkage' and abnormal working condition detection of coal-fired generating units[J]. Electrical Equipment and Economy, 2024(10): 196-199.

[8] 刘云. 煤电"三改联动"技术综述及讨论[J]. 洁净煤技术,2024,30(增刊1): 82-90.
LIU Yun. Overview and discussion of coal power[J]. Clean Coal Technology,2024,30(S1): 82-90.

[9] 郑琰炜,陈献,朱磊,等. 南方火电厂"三改联动"技术分析研究[J]. 电气时代,2023(增刊2): 75-76.
ZHENG Yanwei, CHEN Xian, ZHU Lei, et al. Technical analysis and research on "three reform linkages" in southern thermal power

plant[J]. Electric Age,2023(S2): 75–76.

[10] 刘志强,叶春,张源,等. 煤电“三改联动”实施分析与措施建议[J]. 热力发电,2023,52(5): 154–159.
LIU Zhiqiang, YE Chun, ZHANG Yuan, et al. Analysis and suggestions on the implementation of “three–renovation” of coal–fired power[J]. Thermal Power Generation,2023,52(5): 154–159.

[11] 国家发展改革委. 国家发展改革委 国家发展改革委 国家能源局关于建立煤电容量电价机制的通知[EB/OL]https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202311/content_6914744.htm. [2023–11–08].

[12] 苑曙光,张俊杰,杨城,等. 容量电价机制下区域电煤交易价格合理区间测算研究[J]. 煤炭经济研究,2025,45(3): 17–24.
YUAN Shuguang, ZHANG Junjie, YANG Cheng, et al. Research on reasonable range calculation of regional power coal transaction price under capacity price mechanism[J]. Coal Economic Research,2025,45(3): 17–24.

[13] 王帅,陈济,郑宽. 容量电价助力煤电企业利润修复[J]. 中国电力企业管理,2025(1): 24–27.
WANG Shuai, CHEN Ji, ZHENG Kuan. Capacity electricity price helps coal–fired power enterprises to repair profits[J]. China Power Enterprise Management,2025(1): 24–27.

[14] 吴梓凤,马睿智,江艺康,等. 煤电容量电价机制下分省煤电经济性分析[J]. 煤炭经济研究,2024,44(9): 27–36.
WU Zifeng, MA Ruizhi, JIANG Yikang, et al. Economic analysis of coal power by province under the coal capacity tariff mechanism [J]. Coal Economic Research,2024,44(9): 27–36.

[15] 柯潘明. 煤电机组在容量电价机制下经济运行模式分析[J]. 内蒙古煤炭经济,2024(17): 178–180.
KE Panming. Analysis on economic operation mode of coal–fired power units under capacity electricity price mechanism[J]. Inner Mongolia Coal Economy,2024(17): 178–180.

[16] 赵紫原. 煤电容量电价如何重塑我国电价体系[J]. 大众用电,2024,39(1): 5–7.
ZHAO Ziyuan. How to reshape China’s electricity price system by coal power capacity price[J]. Popular Utilization of Electricity, 2024, 39(1): 5–7.

[17] 卢奇秀. 煤电容量电价机制将走向何方?[N]. 中国能源报,2024–02–05(9).
LU Quxiu. Where will the coal–fired power capacity pricing mechanism go?[N]. Chian Energy News,2024–02–05(9).

[18] 杨娟. 建立煤电容量电价机制推动能源绿色低碳转型[J]. 价格理论与实践,2023(11): 28–30.
YANG Juan. Establishing the coal power capacity pricing mechanism to promote green and low–carbon energy transition[J]. Price Theory & Practice, 2023(11): 28–30.

[19] 李嘉龙,陈雨果,刘思捷,等. 考虑深度调峰的电力日前市场机制设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(4): 9–15+78.
LI Jialong, CHEN Yuguo, LIU Sijie, et al. Mechanism design of day–ahead market considering deep peak regulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(4): 9–15+78.

[20] 张宝. 煤电容量电价机制对煤电机组运行的现实影响[J]. 中国电力企业管理,2023(34): 53–56.
ZHANG Bao. Realistic influence of coal capacity and electricity price mechanism on the operation of coal–fired power units[J]. China Power Enterprise Management, 2023(34): 53–56.

[21] 张松岩,苗世洪,尹斌鑫,等. 考虑火电深度调峰的多类型储能经济性分析[J]. 电力建设,2022,43(1): 132–142.
ZHANG Songyan, MIAO Shihong, YIN Binxin, et al. Economic analysis of multi–type energy storages considering the deep peak–regulation of thermal power units[J]. Electric Power Construction, 2022,43(1): 132–142.

[22] 王树东,吕为智. 深度调峰形势下燃煤机组的价值量化评估[J]. 动力工程学报,2020,40(9): 701–706.
WANG Shudong, LYU Weizhi. Quantitative valuation of coal–fired units under deep peak regulation conditions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2020,40(9): 701–706.

[23] 谭增强,王一坤,牛拥军,等. 双碳目标下煤电深度调峰及调频技术研究进展[J]. 热能动力工程,2022,37(8): 1–8.
TAN Zengqiang, WANG Yikun, NIU Yongjun, et al. Research progress of deep peak regulation and frequency modulation technology for coal–fired power plant under double–carbon targets [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 1–8.

[24] 高明非. 燃煤深度调峰机组运行经济性分析[D]. 唐山:华北理工大学,2018.
GAO Mingfei. Economic analysis of coal–fired unit in deep shaving operation[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology,2018.

[25] 钱谷峰. 燃煤机组深度调峰技术的运用探讨[J]. 中国设备工程,2020,(18):177–178.
QIAN Gufeng. Discussion on the application of deep peak shaving technology for coal–fired power unit[J]. China Plant Engineering, 2020,(18):177–178.

第一作者简介:乔　梁(1985—),男,工程师,主要从事燃煤机组设备和经济性等方面的研究,12112074@ceic.com;

徐　振(1981—),男,正高级工程师,主要从事森林生态和生态水文、电力环境保护等方面的研究,alex_xuzhen@163.com;

柏　源(1982—),男,正高级工程师,主要从事大气污染控制等方面的研究,baiyuan6049@163.com。

(**编辑**　沈凡卉)