

# 燃煤电厂锅炉最低稳燃负荷估算方法

霍沛强<sup>✉</sup>, 樊晓茹

(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] 项目实施前需要预评价燃煤电厂灵活性运行的性能, 其中包括锅炉最低稳燃负荷技术指标的预测。原有的经验和算法不能满足电厂灵活性评价需求, 需结合目前设备能达到的性能指标, 拟定新的锅炉最低稳燃负荷的半经验计算曲线。[方法] 结合文献资料与工程经验, 选取与稳燃指标关联性强的参数, 采用统计和回归的方法, 拟合出半经验计算曲线。[结果] 以煤的挥发分  $V_{daf}$ 、燃烧器总出力裕量系数  $\varphi$  作为自变量, 并结合最小点火能量的统计分析值, 可得到锅炉最低稳燃负荷的理论指标。[结论] 新的计算曲线以工程资料可获得的已知参数作为输入, 可相对精确地测算出不同条件下锅炉最低稳燃负荷的理论值, 与实际运行试验数据吻合, 可作为工程设计的工具。

**关键词:** 电厂灵活性运行; 锅炉最低稳燃负荷; 煤的挥发分; 燃烧器; 计算曲线

中图分类号: TM611; TM621.2 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0086-06

开放科学(资源服务)二维码:



## Estimation Method of Boiler Minimum Combustion Stable Load Rate of Coal-Fired Power Plant

HUO Peiqiang<sup>✉</sup>, FAN Xiaoru

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

**Abstract:** [Introduction] Before the project implementation, it is required to pre-evaluate the degree of flexible operation of coal-fired power plants, including the prediction of the technical index of boiler minimum combustion stable load rate. Since the existing experience and algorithms cannot meet the flexibility evaluation requirements of power plants, it is necessary to draw up a new semi-empirical calculation curve of the boiler minimum combustion stable load rate in combination with the performance index that the current equipment can achieve. [Method] Based on the literature data and engineering experience, the parameters with strong correlation with stable combustion index were selected, and statistical and regression methods were used to fit the semi-empirical calculation curve. [Result] With  $V_{daf}$  (volatile matter of coal) and  $\varphi$  (total output margin coefficient of the burner) as independent variables, combined with the statistical analysis value of minimum ignition energy, the theoretical index of boiler minimum combustion stable load rate can be obtained. [Conclusion] The new calculation curve takes the known parameters available from the engineering data and can accurately calculate the theoretical value of boiler minimum combustion stable load rate under different conditions, which is consistent with the actual operation test data and can be used as tool for engineering design.

**Key words:** flexible operation of power plants; boiler minimum combustion stable load rate; volatile matter of coal; burner; calculation curve

2095-8676 © 2023 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

为应对全球气候变化, 习近平总书记在 2020 年 9 月庄重宣布: “二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”。按减碳

规划路线, 燃煤电厂的占比以及利用率将逐步降低<sup>[1]</sup>, 风电、光伏发电等可再生能源装机容量将不断增加, 但是可再生能源发电量存在不确定性<sup>[2-4]</sup>。随社会发展电力需求增长幅度变大, 即使加大新能源的开发

收稿日期: 2022-07-22 修回日期: 2022-08-22

基金项目: 中国能建广东院科技项目“大容量高效超超临界发电关键技术研究及应用”(EV01041W)

力度,也难以在短时间实现全部煤电替代。充分挖掘煤电性能潜力,由电量供应角色转换为电力保障和调峰资源,在役煤电应具备灵活性能力已是目前共识。

燃煤电厂灵活性包含调峰和调频(负荷响应)等多个方面,其中调峰能力与多个因素相关,系统配置和设备性能是其中的关键<sup>[5-7]</sup>。锅炉最低稳燃负荷(BMLR)决定了燃煤电厂相对经济地深度调峰的幅度。

项目实施前需要各方约定主要性能指标作为设计与考核标准,以往项目 BMLR 由采购方与设备厂协商,约定一个经验指标,未作深入分析和计算,主观性较强。随着燃煤电厂灵活性运行要求的推广,以往的经验值不能支撑新形势下的要求,为了避免盲目制定技术指标,有必要对影响 BMLR 的因素进行深入分析,重新拟定指标的评估与测算方法,以指导设备选型和运行调整。

## 1 锅炉最低稳燃负荷指标现状

技术规范《大型煤粉锅炉炉膛及燃烧器性能设计规范》(JB/T 10440—2004)和《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》(DL/T 831—2002)推荐切圆与墙式燃烧方式的煤粉锅炉的 BMLR 值如表 1 和表 2 所示<sup>[8-9]</sup>,主要影响因素只考虑煤的干燥无灰基挥发分( $V_{daf}$ ),并且 BMLR 最低值为 30% BMCR。

表 1 JB/T 10440 煤粉锅炉 BMLR 推荐值

Tab. 1 Recommended value of BMLR of JB/T 10440 pulverized coal boiler

$V_{daf}/\%$	8—12	12—20	20—25	25—30	30—40
BMLR/%	65—55	56—45	46—40	42—35	35—30

表 2 DL/T 831 煤粉锅炉 BMLR 推荐值

Tab. 2 Recommended value of BMLR of DL/T 831 pulverized coal boiler

$V_{daf}/\%$	10—15	15—20	20—25	25—30	>30
BMLR/%	60—50	55—45	48—40	40—35	35—30

在未要求灵活性运行前,一些机组的实测数据<sup>[10-11]</sup>与技术规范给出的趋势一致,但存在一定偏差,也未提出低于 30% 的 BMLR 约定值。提出深度调峰要求后,实际有不少机组运行中能做到比技术规范更低的稳燃负荷<sup>[12-14]</sup>,BMLR 已经达到 18%~25%BMCR,

明显超出表 1 和表 2 中推荐的范围,也超出了 DL/T 831—2002 附录中图 G.1<sup>[9]</sup>的计算范围。

## 2 影响锅炉稳燃的主要因素分析

理论和实践经验表明,影响 BMLR 有多种因素,包括入炉煤质、燃烧方式与燃烧器结构、炉膛特征参数、制粉系统型式、配风参数等。但入炉煤的煤质是最大的影响因素<sup>[13-15]</sup>,甚至有项目通过混煤掺烧高  $V_{daf}$  煤种,使 BMLR 得到改善,优于锅炉单一煤种 BMLR 的设计值与运行值<sup>[16-17]</sup>。

DL/T 831—2002 附录中图 G.1 在多台运行机组的调查分析基础上,给出了 BMLR 的计算图<sup>[9]</sup>,图中根据燃烧方式给出 2 条曲线,均以入炉煤的  $V_{daf}$  作为自变量。已有的经验从侧面证明,煤的  $V_{daf}$  是煤质因素中影响 BMLR 最主要的一项。

无论是均相着火理论还是非均相着火理论,均认为煤的热解是初期燃烧的关键因素<sup>[18]</sup>。假定煤粉着火可调整的条件均满足最低要求,则可认为最小点火能量是与 BMLR 关联的主要因素。当析出的挥发分燃烧产生的热量高于煤热解析出的吸热量,令煤粉持续燃烧释放热量,就可以达到稳定燃烧的要求<sup>[18]</sup>。 $V_{daf}$  为煤中挥发分析出量的表征参数,与最小点火能量密切相关,因此在实践中体现出 BMLR 与  $V_{daf}$  关联性最大,理论与工程经验的结论是一致的。

但工程实践中,多燃烧器锅炉在相近条件下所能达到的最低稳燃负荷存在差异。分析其原因,受制粉系统配置影响,锅炉燃烧器备用层数不同,导致含备用层时燃烧器总出力大于锅炉出力,即单只燃烧器出力存在裕量系数。当燃烧器存在裕量系数时,BMLR 以锅炉最大出力负荷作为比较基准时,就存在燃烧器裕量系数引起的偏差。

## 3 主要关联因素与 BMLR 计算曲线拟定

### 3.1 关联参数选取

从工程应用角度考虑,输入参数越容易获取,计算越简单,越有利于推广使用。部分文献<sup>[8-9,16]</sup>以煤的分析数据  $V_{daf}$  作为输入参数,证明是可行的。 $V_{daf}$  作为煤的常规分析参数,通常也很容易获取。

各类的煤都是析出的挥发分首先着火或者挥发分与固定碳同时着火<sup>[18]</sup>,当挥发分着火释放的热量达到整体着火的最小能量后,便可持续稳燃。不同

的煤稳燃负荷不同,宏观趋势是挥发分越高的煤的稳燃负荷越小。这是因为挥发分由煤热裂解出来的易燃小分子物质组成,输入同样质量流量的煤,高挥发分煤种能析出更多的易着火物质,因此较小的燃煤输入量就能提供足够的易着火物质以满足稳燃。

煤的  $V_{daf}$  与最小点火能量之间关联,需要寻找一个函数来表达,先对两者之间关系进行分析以实现简化计算。可知  $V_{daf}$  的数值越大,析出的易燃物质越多,在同样最小点火能量需求下,  $V_{daf}$  越大煤粉越容易点火和稳燃,即  $V_{daf}$  数值与燃煤中热解析出的发热值成正比。寻找  $V_{daf}$  与最小点火能量的关联函数,就可以使最小点火能量的影响也归结为  $V_{daf}$  的影响。可以用已有项目的资料作为统计数据,通过逆向运算拟合,统计最小点火能量的代表值,再分析  $V_{daf}$  与最小点火能量的关系,使反映锅炉稳燃的参数归结为容易测量的  $V_{daf}$ 。

单一的  $V_{daf}$  参数不能体现设备结构的影响,无法全面反映煤粉着火与稳燃因素。从近 20 年的锅炉设备投标文件和行业技术规范<sup>[8-9]</sup> 中分析,配置直吹式制粉系统的锅炉通常认为燃烧器的层数配置是影响指标的重要参数。如果设置了燃烧器备用层,备用引起的出力裕量系数会影响计算结果,因此考虑把燃烧器出力裕量作为另一个关联参数。

简单分析可知,燃烧器总配置层数和锅炉 100% 负荷投入的层数(扣除备用层)两者之间的比值,其实质是单层燃烧器具备的出力裕量。而燃烧器的最低负荷决定锅炉的最低稳燃负荷的绝对值,当燃烧器具备出力裕量时,还需要换算为锅炉额定出力下的相对负荷率。例如直吹式系统对应  $N$  层燃烧器,备用层为  $m$  层,即  $N-m$  层就可以带满锅炉 100% 负荷;则对应锅炉 100%BMCR 的最低负荷率为:

$$BMLR = BR_{\min} \frac{N}{N-m} \quad (1)$$

式中:

BMLR —— 锅炉最低稳燃负荷(%);

$BR_{\min}$  —— 燃烧器最低负荷(%);

$N$  —— 锅炉燃烧器总层数;

$M$  —— 锅炉备用燃烧器层数。

可以定义  $\varphi$  为燃烧器出力裕量系数:

$$\varphi = \frac{N}{N-m} \quad (2)$$

通过分析,选取煤的分析指标  $V_{daf}$ 、燃烧器出力裕量系数  $\varphi$  作为主要参数,对 BMLR 进行测算和拟合。

### 3.2 BMLR 计算曲线拟合结果

参考多个项目设备投标文件的设计数据与一些文献资料,结合假定条件进行数据处理。由于涉及到多个变量,因此拟合结果以曲线图方式表达。

国内主流的燃煤机组容量为 300 ~ 1 000 MW,其中 300 ~ 350 MW 机组通常配置 5 台中速磨,其中 1 台磨备用; 600 ~ 1 000 MW 机组通常配置 6 台中速磨,其中 1 台磨备用;如果配置双进双出钢球磨时,也可以不设备用磨。磨煤机数量通常与燃烧器层数对应,因此主流机组的  $\varphi$  值为 1.0 ~ 1.25。依次按无备用磨,即  $\varphi=1.0$ ; 6 台磨其中 1 台备用磨,即  $\varphi=1.2$ , 5 台磨其中 1 台备用磨,即  $\varphi=1.25$  进行拟合,分别得到 BMLR 的关联曲线,如图 1 所示。

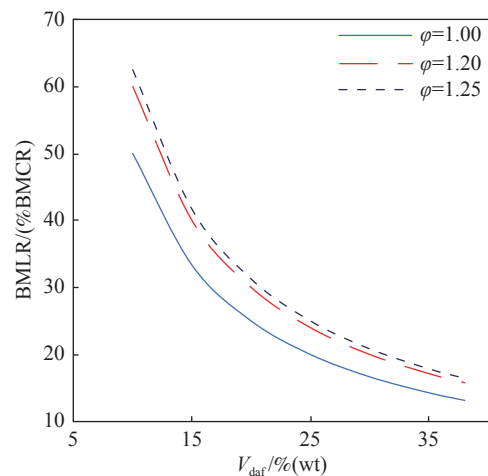


图 1 BMLR 理论计算曲线

Fig. 1 Theoretical calculation curve of BMLR

曲线中选取的输入参数包括  $V_{daf}$ 、 $\varphi$ , 均可在项目资料中获取,需输入的参数较少,因此工程上应用也比较方便。

图 1 不仅反映了  $V_{daf}$  与 BMLR 的关系,还提出了燃烧器出力裕量系数  $\varphi$  对这种关系的影响。拟合得到的结果与技术规范<sup>[9]</sup> 给出的直线关系不同,在多种因素影响下, BMLR 与  $V_{daf}$  的关系为曲线。

### 3.3 计算结果验证

按照图 1 的曲线得到的 BMLR, 计算结果的区域比技术规范 JB/T 10440—2004 和 DL/T 831—2002 更宽,在同样的  $V_{daf}$  区间,规范给出的 BMLR 结果结

果为30%~60%,图1的BMLR的计算结果为15%~62.5%,拓宽了评估应用范围,尤其计算结果的下限值更符合燃煤机组灵活性运行和深度调峰的发展趋势,而且与工程实践经验范围相符<sup>[19]</sup>。

应注意,本文计算的BMLR结果是最低稳燃负荷与锅炉最大连续蒸发量(BMCR)的比值,而有些文献给出的最低负荷是机组最低发电负荷与汽轮发电机组铭牌功率( $P_e$ )的比值,两者之间换算系数约为1.15~1.2。例如最小发电(发电机侧)负荷30% $P_e$ ,换算到BMLR为25%~26% BMCR。

采用新的数据对曲线的计算结果进行精度验证,对比一些高挥发分煤种的试验和运行数据,按图1计算得到的结果略低于实际数据,这是因为一些项目受SCR脱硝的限制<sup>[10-11,16]</sup>,即使存在继续降低锅炉负荷的可能,但烟气温度不能满足脱硝运行条件要求,而无法再尝试降低锅炉负荷。

在验证中低挥发分煤种时,锅炉的理论BMLR值较高,就不会受到SCR脱硝运行条件的限制,可以相对准确地测试锅炉最低稳燃负荷。对比烧贫煤的350 MW燃煤机组,入炉煤 $V_{daf}=17.9%$ ,稳燃试验结果为35% BMCR<sup>[20]</sup>。该电厂制粉系统配置5台中速磨,按图1中 $\varphi=1.25$ 曲线进行计算,结果为34.9% BMCR,理论曲线推测与试验结果几乎一致。

为了避免锅炉最低稳燃负荷试验受SCR脱硝运行条件限制,再选取文献中高挥发分煤种的数值模拟结果进行对比,在理想的边界条件下,对30.23%~38.54%挥发分的烟煤,锅炉最低稳燃负荷模拟值为12%~19.04%<sup>[21]</sup>,而曲线的计算值为15.6%~19.8%,两者计算结果比较接近。

近年若干项目签订设备技术合同时,也参考了曲线的计算值,提出了锅炉稳燃性能保证指标要求,新建项目仍用高挥发分烟煤的机组,根据不同的 $V_{daf}$ 数值分别提出锅炉稳燃负荷为20%~25%,这些技术要求已得到设备制造厂的认可。

#### 4 应用中需考虑的问题

拟合的BMLR计算曲线主要用于项目前期评估,也可以作为运行调试的参照指标。但是计算曲线除输入参数外没有考虑其他影响因素,因此实际运行效果可能会与理论计算值有一定差异。

近年若干项目实践表明,锅炉低负荷工况下一

次风率偏高是影响曲线计算精度的主要原因。由于降负荷过程中,磨煤机煤粉输出负荷的降低幅度大于输送风的降低幅度,并且磨煤机风量达到最小通风量限制时,输送风量就不再随煤粉输送量降低而降低。制粉系统磨煤机这种特性,导致低负荷工况下,燃烧器要提供更多热量满足一次风加热,使BMLR实际运行值提高。

选取若干项目的输入条件进行试算,分析一次风率对BMLR的具体影响。在锅炉低负荷工况,一次风率偏高所增加点火热量假定由煤的挥发分燃烧热量提供,对几种煤的试算表明,会对BMLR计算结果造成1%~12%的绝对偏差,折合相对偏差率为3%~20%。挥发分越低的煤,影响幅度越大。

为了使实际运行效果接近理论计算的指标,在设计和运行调整中就需要采取一定措施,需要对锅炉燃烧器和制粉系统进行局部改造<sup>[9]</sup>,以减小一次风率对锅炉低负荷稳燃造成的不利影响。实际运行情况和数值模拟表明,在低负荷工况采取措施限制一次风率提高,会有利于燃烧稳定<sup>[20-21]</sup>。

为降低一次风率偏高的影响,近期新建或改造的项目,通常会对锅炉其中的两层燃烧器进行改造,设置煤粉浓淡分离装置,使浓相煤粉的一次风率不大于稳燃需要的初期配风量。通过局部改造,可以使实际的BMLR更接近图1曲线的计算结果。

炉膛整体温度随负荷降低而降低,这个因素在设计中往往受制于煤的结焦问题而不会刻意调整,在运行中也没有办法调节。炉膛温度过低会影响稳燃,即使有些煤种理论计算得到的BMLR较低,但为了运行稳定,建议不要刻意追求低于20% BMCR的技术指标。

#### 5 结论

通过分析和验证得知:

1) 采用煤的挥发分分析数据 $V_{daf}$ 、以最小点火能量作为边界条件,结合工程的统计数据,得到的 $V_{daf}$ -BMLR关联曲线不是直线关系,并且最低BMLR的数值可以达到5% BMCR。

2) 制粉系统磨煤机配置情况不同,燃烧器的出力裕量也相应不同,BMLR计算要考虑燃烧器裕量系数的影响。

3) 如果排除SCR脱硝低负荷运行条件的约束,

拟合的曲线的计算结果与试验值或数值模拟结果基本吻合。

4) 锅炉低负荷工况, 如果一次风率偏高, 会导致实际运行值与理论值存在 3%~20% 的相对偏差。

5) 锅炉可选择 2 层燃烧器配置浓淡分离装置, 降低这 2 层燃烧器浓相煤粉的一次风率, 可使锅炉实现更低的 BMLR 指标。

#### 参考文献:

- [1] 袁家海, 张凯. “碳中和”目标下, 新型电力系统中常规煤电退出路径研究 [J]. *中国能源*, 2021, 43(6): 19-26+66. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.06.003.  
YUAN J H, ZHANG K. Coal power phase-out pathway in the new power system under carbon neutral target [J]. *Energy of China*, 2021, 43(6): 19-26+66. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.06.003.
- [2] 李星梅, 钟志鸣, 阎洁. 大规模风电接入下的火电机组灵活性改造规划 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 51-57. DOI: 10.7500/AEPS20180213007.  
LI X M, ZHONG Z M, YAN J. Flexibility reformation planning of thermal power units with large-scale integration of wind power [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 51-57. DOI: 10.7500/AEPS20180213007.
- [3] 段士伟, 杨修宇, 柴仁勇, 等. 大规模风电接入的灵活性资源优化配置方法 [J]. *东北电力大学学报*, 2020, 40(6): 45-51. DOI: 10.19718/j.issn.1005-2992.2020-06-0045-07.  
DUAN S W, YANG X Y, CHAI R Y, et al. Optimal configuration method of flexibility resources of high-penetration renewable energy [J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2020, 40(6): 45-51. DOI: 10.19718/j.issn.1005-2992.2020-06-0045-07.
- [4] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用 [J]. *热力发电*, 2018, 47(5): 8-13. DOI: 10.19666/j.rlfid.201803043.  
HOU Y T, LI X B, LIU C, et al. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units [J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(5): 8-13. DOI: 10.19666/j.rlfid.201803043.
- [5] 陈永辉, 李志强, 蒋志庆, 等. 基于电锅炉的火电机组灵活性改造技术研究 [J]. *热能动力工程*, 2020, 35(1): 261-266. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.01.039.  
CHEN Y H, LI Z Q, JIANG Z Q, et al. Research on flexible transformation technology of thermal power unit based on electric boiler [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35(1): 261-266. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2020.01.039.
- [6] 苏鹏, 王文君, 杨光, 等. 提升火电机组灵活性改造技术方案研究 [J]. *中国电力*, 2018, 51(5): 87-94. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201701049.  
SU P, WANG W J, YANG G, et al. Research on the technology to improve the flexibility of thermal power plants [J]. *Electric Power*, 2018, 51(5): 87-94. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.201701049.
- [7] 张广才, 周科, 鲁芬, 等. 燃煤机组深度调峰技术探讨 [J]. *热力发电*, 2017, 46(9): 17-23. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2017.09.017.  
ZHANG G C, ZHOU K, LU F, et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants [J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(9): 17-23. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2017.09.017.
- [8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 大型煤粉锅炉炉膛及燃烧器性能设计规范: JB/T 10440—2004 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
National Development and Reform Commission. Performance design standard for furnaces and burners of large-capacity pulverized-coal-fired boilers: JB/T 10440-2004 [S]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [9] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则: DL/T 831—2002 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
Economic and Trade Commission. Guide on selection of furnace characteristic parameters for large pulverized coal fired power boilers: DL/T 831-2002 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [10] 张绪辉, 杨兴森, 辛刚, 等. 燃煤火电机组深度调峰运行试验 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(4): 144-150. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21081904.  
ZHANG X H, YANG X S, XIN G, et al. Experimental study on deep peak regulation operation of coal-fired thermal power unit [J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(4): 144-150. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21081904.
- [11] 张鹏威, 何建乐. 300 MW 亚临界燃煤机组非助燃最低稳燃负荷试验研究 [J]. *环境与发展*, 2020, 32(3): 123-125. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2020.03.070.  
ZHANG P W, HE J L. Experimental research on the non fuel oil auxiliary minimum stable combustion load of 300 MW subcritical coal-fired power plant [J]. *Environment and Development*, 2020, 32(3): 123-125. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2020.03.070.
- [12] 孙海彦, 高炜, 刘润华, 等. 1 000 MW 超超临界机组深度调峰研究与实践 [J]. *上海电力学院学报*, 2017, 33(6): 559-562. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2017.06.009.  
SUN H Y, GAO W, LIU R H, et al. Exploration and practice of deep peaking of 1 000 MW ultra supercritical unit [J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2017, 33(6): 559-562. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4729.2017.06.009.
- [13] 雷霖, 焦庆丰, 张栋梁. 煤质对超临界 600 MW 机组调峰特性影响的试验研究 [J]. *热力发电*, 2013, 42(8): 55-58. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2013.08.055.  
LEI L, JIAO Q F, ZHANG D L. Experimental study on effects of

- coal property on peak load regulation characteristics of a supercritical 600 MW unit [J]. *Thermal Power Generation*, 2013, 42(8): 55-58. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3364.2013.08.055](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3364.2013.08.055).
- [14] 周俊波, 刘茜, 张华, 等. 典型燃煤锅炉低负荷及变负荷运行控制特性分析 [J]. *热力发电*, 2018, 47(9): 34-40. DOI: [10.19666/j.rlfid.201803071](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.201803071).  
ZHOU J B, LIU X, ZHANG H, et al. Control characteristic analysis of typical coal-fired boilers during low load or variable load running [J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(9): 34-40. DOI: [10.19666/j.rlfid.201803071](https://doi.org/10.19666/j.rlfid.201803071).
- [15] 李军, 周怀春, 柳朝晖, 等. 电站燃煤锅炉最低无油稳燃负荷预测 [J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(2): 73-77. DOI: [10.3321/j.issn:0258-8013.2000.02.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-8013.2000.02.017).  
LI J, ZHOU H C, LIU Z H, et al. Prediction of the minimum load of operation for utility pulverized coal-fired boilers [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(2): 73-77. DOI: [10.3321/j.issn:0258-8013.2000.02.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:0258-8013.2000.02.017).
- [16] 刘综绪, 张营帅, 石峰, 等. 600 MW四角切圆燃烧锅炉深度调峰试验调整及优化 [J]. *锅炉技术*, 2022, 53(3): 67-74. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4763.2022.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4763.2022.03.012).  
LIU Z X, ZHANG Y S, SHI F, et al. Adjustment and optimization of deep peak regulation test in 600 MW tangential combustion boilers [J]. *Boiler Technology*, 2022, 53(3): 67-74. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4763.2022.03.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4763.2022.03.012).
- [17] 焦庆丰, 雷霖, 李明, 等. 国产600 MW超临界机组宽度调峰试验研究 [J]. *中国电力*, 2013, 46(10): 1-4+34. DOI: [10.3969/j.issn.1004-9649.2013.10.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9649.2013.10.001).  
JIAO Q F, LEI L, LI M, et al. Testing on domestically-made 600 MW supercritical units in broad peak-regulation of power grids [J]. *Electric Power*, 2013, 46(10): 1-4+34. DOI: [10.3969/j.issn.1004-9649.2013.10.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9649.2013.10.001).
- [18] 徐通模, 惠世恩. 燃烧学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. XU T M, HUI S E. *Combustion science* [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [19] 马达夫, 张守玉, 何翔, 等. 煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题
- 和应对措施 [J]. *动力工程学报*, 2019, 39(10): 784-791+803. MA D F, ZHANG S Y, HE X, et al. Technical problems occurring in ultra-low load operation of pulverized coal-fired boilers and the solutions [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2019, 39(10): 784-791+803.
- [20] 刘建浩, 李战国, 马乐乐, 等. 贫煤锅炉灵活性调峰优化调整研究 [J]. *热能动力工程*, 2022, 37(1): 124-131. DOI: [10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.01.017](https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.01.017).  
LIU J H, LI Z G, MA L L, et al. Study on optimization and adjustment of flexible peak regulation of lean coal boiler [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(1): 124-131. DOI: [10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.01.017](https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.01.017).
- [21] 穆延非, 史绍平, 段正, 等. 利用火焰推举距离判定燃煤锅炉低负荷稳燃性能的研究 [J]. *热能动力工程*, 2019, 34(12): 54-61. DOI: [10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.12.008](https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.12.008).  
MU Y F, SHI S P, DUAN Z, et al. Determination of stabilization performance of coal-fired boilers by using flame push distance [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2019, 34(12): 54-61. DOI: [10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.12.008](https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2019.12.008).

## 作者简介:



霍沛强

霍沛强 (第一作者, 通信作者)

1975-, 男, 广东广州人, 高级工程师, 东北电力学院热能工程学士, 主要从事电厂热机系统与环保工艺设计工作(e-mail)huopeiqiang@gedi.com.cn。

## 樊晓茹

1973-, 女, 河南郑州人, 正高级工程师, 武汉水利电力大学热能动力工程学士, 主要从事电厂热机系统与环保工艺设计工作(e-mail)fanxiaoru@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)