

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305082

大型循环流化床锅炉变负荷运行时 给煤延迟特性研究

张戎迪¹, 卢啸风¹, 王学深², 甘政², 宗琛³, 杨中智¹,
董中豪¹, 李建波¹, 王泉海¹, 亢银虎¹

(1.重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

2.四川白马循环流化床示范电站有限责任公司, 四川 内江 641005;

3.重庆市特种设备检测研究院, 重庆 401120)

[摘要] 目前国内设计有侧墙、后墙给煤系统的大型循环流化床 (CFB) 锅炉在实际运行过程中普遍存在着给煤延迟与给煤不均匀的突出问题。通过对大型 CFB 锅炉机组给煤延迟问题和现存给煤系统运行特点的分析, 提出了大型 CFB 锅炉给煤线路给煤延迟问题量化计算方法, 并针对某超临界 600 MW CFB 锅炉给煤线路案例进行计算, 获得了宽负荷快速调峰工况下给煤线路的给煤延迟特性。计算结果表明: 给煤延迟问题在大型 CFB 锅炉机组的变负荷运行过程中普遍存在, 均会导致一定程度的给煤不均情况; 机组变负荷幅度、变负荷速率以及单给煤线路上给煤口数量均与给煤延迟问题的严重程度成正相关关系。计算方法与分析结果可为大型 CFB 锅炉给煤线路适应宽负荷快速调峰运行提供设计依据和技术参考。

[关键词] CFB 锅炉; 给煤均匀性; 给煤系统; 变负荷

[引用本文格式] 张戎迪, 卢啸风, 王学深, 等. 大型循环流化床锅炉变负荷运行时给煤延迟特性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 39-47. ZHANG Rongdi, LU Xiaofeng, WANG Xueshen, et al. Study on feed delay characteristics of large circulating fluidized bed boiler under variable load operation[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 39-47.

Study on feed delay characteristics of large circulating fluidized bed boiler under variable load operation

ZHANG Rongdi¹, LU Xiaofeng¹, WANG Xueshen², GAN Zheng², ZONG Chen³, YANG Zhongzhi¹,
DONG Zhonghao¹, LI Jianbo¹, WANG Quanhai¹, KANG Yinhu¹

(1.Key laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies & Systems, Ministry of Education, Chongqing 400044, China;

2.Sichuan Baima CFB Demonstration Power Plant Co., Ltd., Neijiang 641005, China;

3.Special Equipment Testing and Research Institute of Chongqing, Chongqing 401120, China)

Abstract: In the domestic large circulating fluidized bed boilers designed with side wall and back wall coal feeding system, there are generally prominent problems of coal feeding delay and uneven coal feeding in the actual operation process. By analyzing the coal feeding delay problem of large CFB boiler units and the operation characteristics of the existing coal feeding system, the quantitative calculation method of coal feeding delay problem of large CFB boiler coal feeding line is put forward. Based on the case of a supercritical 600 MW CFB boiler coal feed line, the coal feed delay characteristics of the coal feed line under the condition of wide load and rapid peak regulation are obtained. The calculation results show that the coal feed delay problem is common in the variable load operation process of large CFB boiler units, which will lead to a certain degree of uneven coal feed. The variable load range, variable load rate and the number of coal feed ports on the single feed line are positively correlated with the severity

收稿日期: 2023-05-28 网络首发日期: 2023-07-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB4100301)

Supported by: National Key Research and Development Program (2022YFB4100301)

第一作者简介: 张戎迪 (2000), 男, 博士研究生, 主要研究方向为清洁高效煤燃烧技术, 641154702@qq.com。

通信作者简介: 卢啸风 (1962), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为洁净煤燃烧技术及工程应用研究和烟气脱硫、脱硝技术及工程应用, xfluke@cqu.edu.cn。

of the delay problem. The calculation method and analysis results can provide design basis and technical reference for large CFB boiler coal feed line to adapt to wide load and fast peaking operation.

Key words: CFB boiler; coal feeding uniformity; coal feeding system; load changing condition

循环流化床 (CFB) 燃烧技术因其具有燃料适应性广^[1]、调峰运行幅度大^[2]、污染物控制成本低等优势^[3], 近年来得到了蓬勃发展^[4-5]。碳减排、碳达峰以及碳中和政策的提出, 对我国的能源生产过程产生了重大影响。新政策要求火电行业能够更大幅度地快速调峰运行^[6-7], 以保证日益增多的新能源接入电网后电网的平衡和稳定^[8]。

CFB 锅炉快速调峰过程中, 通过总风量或一二次风比变化快速调节炉膛上部的灰浓度及烟气温度, 实现负荷的快速变化^[9]。在调节过程中, 还应保证风煤均匀, 以维持较低的污染物生成量^[10-11], 并使炉内的污染物控制机制正常运行。锅炉负荷快速变化期间, 需要根据风量变化而及时调整给煤量, 但实际运行中的给煤系统却存在较大的延迟, 往往造成锅炉负荷变化时频繁出现污染物排放超标现象^[12-14]。设计有后墙给煤和侧墙给煤的大型电站 CFB 锅炉给煤延迟问题尤为严重, 更易出现炉内燃烧不均匀现象^[15]。由于某些大型 CFB 锅炉的给煤线路长达 40 m, 从称重带式给煤机改变给煤量, 到炉膛接收改变后的给煤量, 耗时长达数分钟^[16], 时常由于炉内局部风煤不均匀产生结焦或排放超标问题, 严重影响调峰质量^[17-18]。从给煤量控制的角度, 给煤延迟问题体现为: 升负荷时, 送至给煤口的煤量会出现瞬时不足现象; 降负荷时, 送至给煤口的煤量会出现瞬时过多的现象。此外, 当同一条给煤线向多个炉膛进煤口供煤时, 还存在各给煤口煤量分配不均匀的问题。

本文针对这些问题, 在参考国内外大型 CFB 锅炉给煤线设计及运行基础上^[19-20], 量化分析大型 CFB 锅炉在宽负荷快速调峰过程中的给煤延迟问题, 为给煤线路适应宽负荷快速调峰运行提供设计依据和技术参考。

1 炉前给煤系统简介

炉前给煤系统, 是指从 CFB 锅炉成品煤仓出口到 CFB 锅炉炉膛进煤口的输煤范围, 通常包括称重给煤机、落煤管道或链式输送机^[21]。本文主要讨论由于称重式皮带给煤机与进煤口距离较远而采用链式输送机的 CFB 锅炉给煤系统。这类系统主要有以下 3 种情况。

1) 称重给煤机与给煤口一一对应

典型的布置方案如白马电站引进的 300 MW CFB 锅炉 (图 1a), 采用炉膛四角返料阀给煤方案, 每台称重给煤机, 对应 1 个炉膛给煤口, 称重给煤机与炉膛给煤口之间采用链式输煤机连接。

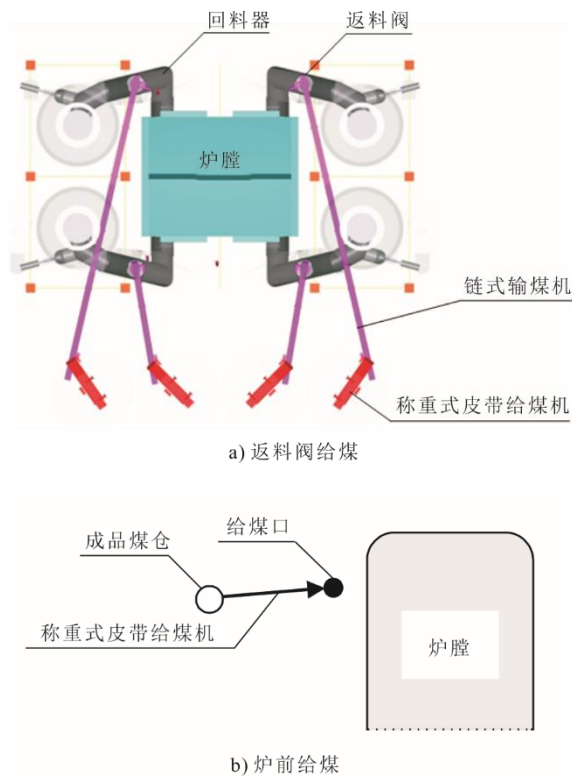


图 1 称重给煤机与给煤口一一对应案例

Fig.1 Cases of a single weighing coal feeder corresponding to a single coal feed port

这种类型的布置方案, 在锅炉负荷变化时, 通过调节称重式给煤机出力, 以及微调链式输煤机转速, 基本保证在负荷变化时风煤一致, 但在负荷变化较快时, 需要把链式输煤机转速变化以及变化时间纳入给煤控制系统, 并且变负荷过程中, 也存在瞬时进煤量与称重皮带机给煤量不一致的问题。

2) 1 台称重给煤机向多个给煤口供煤

典型布置如: 白马电站超临界 600 MW CFB 锅炉^[22], 采用侧墙给煤方案 (图 2a); 俄罗斯 Novocherkasskaya TPP 的超临界 330 MW CFB 锅炉^[23]; 国内某锅炉厂的超临界 350 MW CFB 锅炉^[21], 采用前后墙联合给煤方案 (图 2b))。这种类型的布置方案, 考虑了大型 CFB 锅炉的多点给煤的需要, 但当

锅炉负荷快速变化时，由于存在较为严重的给煤延迟，部分给煤口入炉煤量变化速度滞后于风量的变化速度。

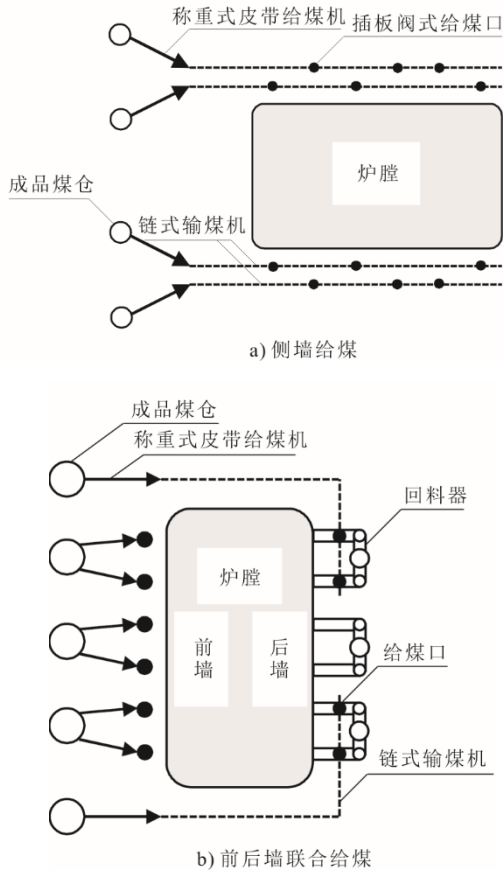


图 2 1 台称重给煤机向多个给煤口供煤案例

Fig.2 Cases of a single weighing coal feeder supplying coal to multiple coal feed ports

3) 不设称重给煤机，由炉前螺旋给煤机控制给煤量

典型布置如波兰超临界 460 MW CFB 锅炉^[24]以及韩国超超临界 550 MW CFB 锅炉^[19] (图 3)。成品煤仓出煤，直接落入链式输煤机，1 条链式输煤机连接 4 个给煤口。每个给煤口采用二级螺旋输送机 (螺旋配煤机+螺旋给煤机) 控制入炉煤量。当锅炉负荷变化导致出现给煤延迟问题时，采用在链式输煤机末端最后一个给煤口处设置缓冲煤仓处理多余或缺少的煤量。

这种方案可基本保证调峰过程中入炉煤量快速变化，调峰过程中风煤基本匹配，布置方案值得借鉴。但该方案由于成品煤仓下未设置称重给煤机，调峰过程中链式输煤机末端缓冲煤仓的煤量控制问题极为复杂，需要同时参考锅炉负荷、同一输煤线路上其他给煤口的煤量变化进行控制调节。实

际运行中，当负荷快速变化时，通过调节链式输煤机转速来调节总给煤量。而当负荷频繁变化时，链式输煤机工作负荷较大。此外，链式输煤机与螺旋配煤机之间的空间较小，缓冲煤仓尺寸受限，因此根据锅炉的调峰指标，设计体积大小合适的缓冲煤仓，对快速调峰过程中实现给煤量及时变化至关重要。但相关技术资料未见公开报道。

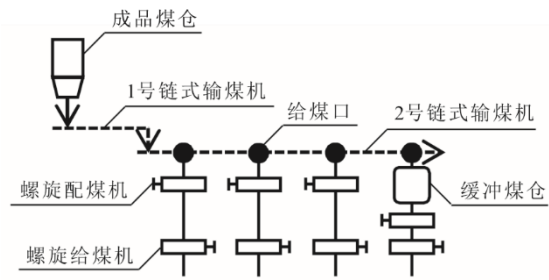


图 3 螺旋给煤机控制给煤量案例

Fig.3 A case of controlling the amount of coal fed with a spiral coal feeder

根据韩国超超临界 550 MW 锅炉的运行数据，其基本能保证在 3%Pe/min 的快速变负荷运行中的气固流动与燃烧传热的稳定和均匀^[19]，其中入炉煤量的稳定控制是关键技术之一。与国外相比，国内火电机组参与调峰的负荷范围及变化速率都有更高要求，需要对给煤量进行更加精确计量及控制，也为处理给煤延迟问题增大了工程难度。因此，本文系统研究了侧墙或后墙布置链式输送机时，给煤延迟问题的量化计算方法，并针对某实际工程案例给出了相应的计算结果及分析，为相关技术改造方案提供参考。

2 给煤延迟问题量化计算

2.1 给煤延迟问题概述

采用链式输煤机的大型 CFB 锅炉给煤线路一般较长，链式输送机中往往存在较多的煤炭。机组在变负荷时，锅炉总给煤量随之变化，各给煤口需要把链式输送机上原有的煤消耗完之后，才能接收负荷调节后的煤。这既延长了机组从接到变负荷指令到开始变负荷的时间，也限制了机组的最大变负荷速率。因此对给煤延迟问题进行量化计算时，需要充分考虑给煤线路参数的影响。

2.2 给煤延迟速率

给煤延迟速率 m (kg/s) 指在变负荷过程中的某一时刻，由给煤延迟问题导致的给煤线路缺少或多余的煤量。其计算式为：

$$m = q_{(t-t_0)} - q_{(t-t_1),1} - q_{(t-t_2),2} - \dots - q_{(t-t_{n-1}),n-1} - q_{t,n} \quad (1)$$

式中： t 为时间，s； $q_{(t-t_0)}$ 指在 $t-t_0$ 时刻的成品煤仓给煤速率，kg/s； t_0 指给煤从链式输煤机起点运送到线路末端给煤口所需时间，s； n 为单给煤线上给煤口的数量； $q_{(t-t_a),a}$ 指在 $t-t_a$ 时刻的第 a 个给煤口（最靠近成品煤仓的为第1个给煤口，线路末端为第 n 个给煤口）给煤速率，kg/s； $q_{t,n}$ 指在 t 时刻的线路末端给煤口给煤速率，kg/s。

2.3 给煤延迟煤量

给煤延迟煤量 M (kg)指在变负荷过程中的某一时刻，由给煤延迟问题导致的给煤线路缺少或多余煤量的累积值。其计算式为：

$$M = \int m dt \quad (2)$$

给煤延迟总量 ΔM (kg)是指在整个变负荷过程中，由给煤延迟问题导致的给煤线路缺少或多余的煤量的累积总量。其计算式为：

$$\Delta M = \int_0^T m dt \quad (3)$$

其中： T 指整个变负荷过程的总耗时，s。

2.4 给煤不均系数

给煤不均系数 α 用以衡量给煤延迟问题对给煤均匀性的影响程度，即延迟的煤量占末端给煤口的给煤量的百分比。其计算式为：

$$\alpha = \frac{M}{M_0} \times 100\% \quad (4)$$

其中： M_0 (kg)指单个给煤口从变负荷运行开始至某个时刻的累计总给煤量，当各给煤口负荷均匀变化时，其计算式为式(5)。

$$M_0 = f_1 Q' t - x Q' t^2 \quad (5)$$

其中： f_1 为初始负荷水平，%Pe； Q' 为给煤口额定给煤速率，kg/s； x 为机组负荷变化速率，%Pe/min，并认为给煤口的给煤量也与机组负荷以相同的变化速率变化，该参数用以对给煤系统的给煤延迟问题进行量化评价。

2.5 优化控制速率

负荷变化工况中，成品煤仓出煤量是与负荷同步变化的。实际控制过程中，可以考虑链式输煤机的余煤情况，通过调整成品煤仓出煤量变化速率，在一定程度上减少给煤延迟煤量。

当成品煤仓的出煤量变化速率为 x_a (%Pe/min)

时，给煤延迟煤量 M 会在变负荷完成时回归初始值（零值），即整个变负荷过程的给煤延迟总量 $\Delta M=0$ 。称 x_a 为复原优化控制速率。其计算式为：

$$x_a = \frac{30v(f_1 - f_2)}{30v(f_1 - f_2) - Dx} \quad (6)$$

$$D = d_1 + \frac{n-1}{n}d_2 + \frac{n-2}{n}d_3 + \dots + \frac{1}{n}d_n \quad (7)$$

其中： f_2 为目标负荷水平，%Pe； v 为链式输煤机的链板运动速率，m/s； d_1 为链式输煤机起点至第1个给煤口的输煤距离，m； d_n 为第 $n-1$ 个给煤口至第 n 个给煤口的输煤距离，m。

3 计算案例

对案例的计算方案如下：

- 1) 根据案例系统参数计算其给煤延迟煤量；
- 2) 代入工况条件计算给煤延迟总量；
- 3) 计算给煤不均系数，对给煤延迟问题的程度和缓冲煤仓的作用进行评价。

以80%Pe的调峰范围以及3%Pe/min的调峰速率作为宽负荷快速调峰的技术要求。

3.1 计算案例

本文设定了案例系统以供计算，具体如图4所示。案例为某600 MW循环流化床锅炉的两侧墙给煤的二级给煤系统^[25]，计算目标为成品煤仓C对应的输煤线路的链式输煤机，系统主要参数见表1。炉膛前墙方向为链式输煤机头部，后墙方向为链式输煤机尾部，从头部至尾部的3个给煤口依次设为给煤口1、给煤口2、给煤口3。以称重式皮带给煤机给煤出口为链式输送机的输煤起点。计算中假定给煤口1和给煤口2仅从链式输送机处获得当前负荷对应的煤量，剩余煤量全部进入给煤口3。

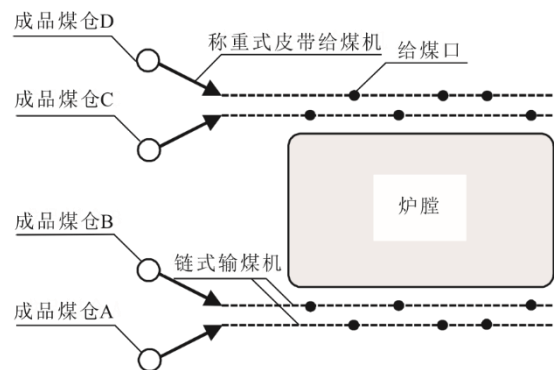


图4 案例系统示意

Fig.4 Schematic diagram of case system

表 1 案例系统主要参数
Tab.1 Main parameters of the case system

设备名称	项目	设计规范
链式输煤机	型式	链式埋刮板
	外形尺寸 (长×宽×高)/(mm×mm×mm)	39 360/43 219×1 370×840
	刮板节距/mm	200
	最快链速/(m·s ⁻¹)	0.26
	名义承载深度/mm	350
	介质密度/(kg·m ⁻³)	850
	输送距离/mm	36 668/39 619
	额定出力/(t·h ⁻¹)	240
给煤口	调节方式	变频
	输煤起点至给煤口 1/m	8
	给煤口 1 至给煤口 2/m	12
	给煤口 2 至给煤口 3/m	21
	给煤口额定出力/(t·h ⁻¹)	80

3.2 变负荷运行工况

考虑到 CFB 锅炉机组在宽负荷快速调峰运行

时可能遇到的各种工况，为便于对比，本文设置了 4 种工况（表 2）。4 种工况皆为降负荷工况。

表 2 变负荷运行工况主要参数
Tab.2 The main parameter of variable load operation condition

工况名称	负荷变化方向	主要参数	主要参数取值
负荷阶跃变化	降低	锅炉负荷阶跃变化幅度	5%Pe
			8%Pe
			10%Pe
负荷连续变化	降低	机组变负荷速率（锅炉负荷变化范围 100%Pe~20%Pe）	1%Pe/min
			3%Pe/min
			6%Pe/min
负荷折返变化	先降低后升高	锅炉负荷水平	100%Pe-85%Pe-90%Pe
			100%Pe-80%Pe-90%Pe
			100%Pe-75%Pe-90%Pe
优化控制	降低	成品煤仓出煤量变化速率	1%Pe/min x_a

表 2 中，负荷折返变化工况指机组的负荷水平以 1%Pe/min 的负荷变化速率先升后降或先降后升的情况，意在体现新能源引入后电网波动加剧的新形式，本工况选择先降后升的情形。

优化控制工况指成品煤仓出煤量以前文所述的复原优化控制速率 x_a 为变化速率，其余参数与负荷连续变化工况相同。

3.3 变给煤口工况

由于不同的锅炉设计尺寸与结构差异，单给煤线路上的给煤口数量往往也存在差异，因此在案例的基础上，设置了改变给煤口数量以及相应输煤距离的计算工况。变给煤口案例系统示意如图 5 所示，具体参数设置见表 3，其余参数均与变负荷运行工

况中的负荷连续变化工况相同。

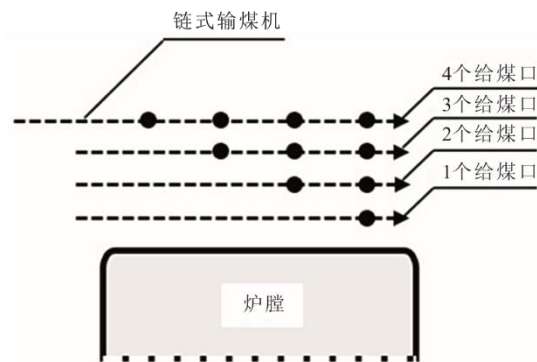


图 5 变给煤口案例系统示意
Fig.5 Schematic diagram of a case system with varying coal feed ports

表3 变给煤口工况主要参数
Tab.3 The main parameters of variable coal feed ports condition

单给煤线上 给煤口数量	给煤口额定负荷 下的给煤量/ (t·h ⁻¹)	成品煤仓至第1 给煤口距离/m	相邻两给煤口 间距/m
4	60	20	10
3	80	30	10
2	120	40	10
1	240	50	

4 计算结果与分析

4.1 变负荷运行工况计算结果

4.1.1 负荷阶跃变化工况计算结果

锅炉负荷阶跃降低工况，案例中的链式输煤机的给煤延迟总量与时间的对应关系如图6所示。由图6可见，当锅炉负荷改变后，给煤延迟煤量开始随时间累积，并且累积速率（曲线斜率）有2次加速。第1次加速在80.8s处，这是因为给煤口2造成的给煤延迟经链式输煤机传递至线路末端；第2次加速在126.9s处，这是因为给煤口1造成的给煤延迟经链式输煤机传递至线路末端。在126.9s后，给煤延迟煤量的累积速率达到最高。阶跃变化的幅度越大，给煤不均系数 α 越大，给煤延迟问题越严重。虽然阶跃变化幅度不同，但均在157.7s处及以后，实现总煤量与实际入炉煤量的平衡。

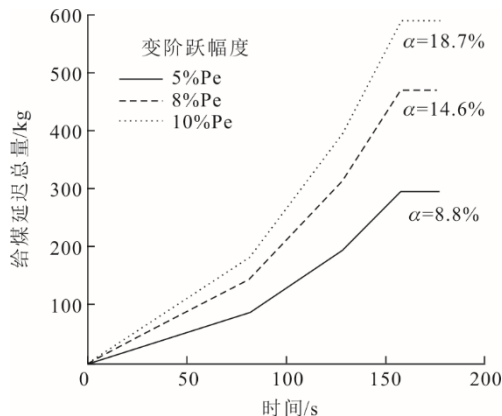


图6 负荷阶跃变化工况计算结果
Fig.6 The calculation result of load step change condition

4.1.2 负荷连续变化工况计算结果

锅炉负荷连续降低，案例中链式输煤机的给煤延迟总量与时间的对应关系如图7所示。由图7可见，当锅炉负荷改变后，给煤延迟煤量开始随时间累积，并且机组的变负荷速率越快，给煤延迟总量的累积速率越快，给煤不均系数 α 越大，给煤延迟问题越严重。当机组分别以1%、3%、6%Pe/min

的速率从100%Pe降低负荷至20%Pe时，分别在4957.7、1757.7、957.7s处及以后，即在机组变负荷完成后的157.7s（达到给煤平衡的时间与完成变负荷的时间的差值，其余同理）处及以后，实现总煤量与实际入炉煤量的平衡。

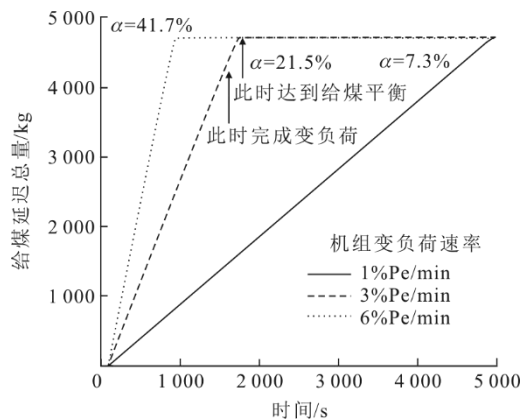


图7 负荷连续变化工况计算结果
Fig.7 The calculation result of continuous load change condition

4.1.3 负荷折返变化工况计算结果

锅炉负荷连续性先降低后升高，案例中的链式输煤机的给煤延迟总量与时间的对应关系如图8所示。由图8可见，当锅炉负荷开始降低后，给煤延迟煤量开始随时间累积，并在负荷开始升高的106.7s后达到最高值，随后开始降低。此规律在3种负荷变化情况中均有体现。在3种负荷变化情况分别先降低至相应的最低负荷水平，再升高达到90%Pe负荷水平后（变负荷完成）的157.7s处及以后，实现总煤量与实际入炉煤量的平衡。

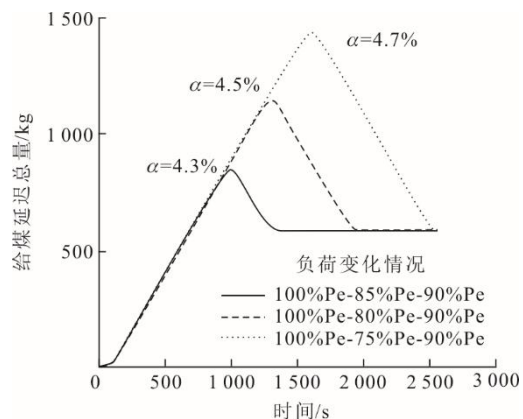


图8 负荷折返变化工况计算结果
Fig.8 The calculation results of load first decrease and then increase

4.1.4 优化控制工况计算结果

在锅炉负荷连续性降低的工况下，3个给煤口

以 1%Pe/min 的速率降低给煤量，成品煤仓则分别以 1%Pe/min 或 $x_a=1.038\ 3\%$ Pe/min 的速率降低出煤量时，案例中链式输煤机的给煤延迟总量与时间的对应关系如图 9 所示。由图 9 可见：当锅炉负荷改变后，给煤延迟煤量开始随时间累积；但是当成品煤仓以更快的速率降低出煤量时，给煤延迟煤量的累积速率在逐渐减小，且在 2 469.2 s 处达到最高累积煤量，随后累积煤量开始减少。当成品煤仓以 1%Pe/min 的速率降低煤量时，在变负荷完成后 157.7 s 处及以后，实现总煤量与实际入炉煤量的平衡；当成品煤仓以 $x_a=1.038\ 3\%$ Pe/min 的速率降低出煤量时，在变负荷完成后 126.9 s 处及以后，实现总煤量与实际入炉煤量的平衡。

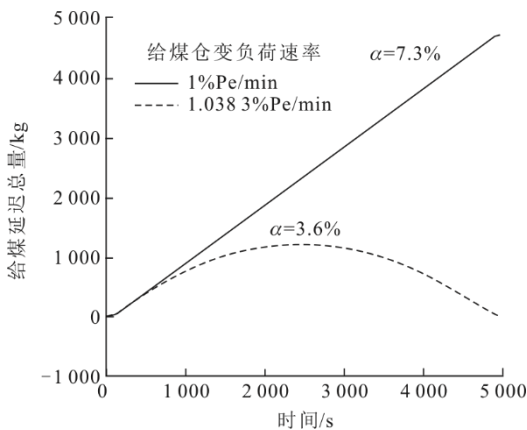


图 9 优化控制工况计算结果

Fig.9 The calculation result of optimal control condition

4.2 变给煤口工况计算结果

本计算案例在改变给煤口数量后，以不同负荷变化速率条件下，计算得到的给煤延迟总量及给煤不均系数见表 4。

表 4 案例在变给煤口工况下的计算结果

Tab.4 The calculation result of the case is under the condition of variable coal feed ports

单给煤线上 给煤口数量	机组变负荷速率/ (%Pe·min ⁻¹)	给煤延迟总量/kg	给煤不均 系数/%
4	1	7 179.5	14.8
	3	7 179.5	43.3
	6	7 179.5	83.8
3	1	8 205.1	12.7
	3	8 205.1	37.2
	6	8 205.1	71.9
2	1	9 230.8	9.5
	3	9 230.8	27.9
	6	9 230.8	54.0
1	1	10 256.4	5.3
	3	10 256.4	15.5
	6	10 256.4	30.0

由表 4 可知，随着给煤口数量的减少，给煤延迟总量在升高，而给煤不均系数在减小。而当给煤口数量一定时，负荷变化速率越快，给煤不均系数越大。

4.3 计算结果讨论

4.3.1 给煤延迟煤量特性

根据上述计算结果，给煤延迟问题在大型 CFB 锅炉机组的给煤系统中普遍存在，即各种运行工况下均存在一定的给煤不均，对燃烧的稳定性的存在负面影响。

给煤延迟总量是给煤延迟问题在时间上的累积值，并不直接反映给煤延迟对入炉煤量均匀性造成的影响（图 6）。在系统参数不变时，给煤延迟总量与负荷变化的幅度成正相关。而由表 4 可见，在工况参数不变时，给煤延迟总量与给煤线路的参数也有关。实际上，在一般的负荷连续变化工况下，其计算式可以整理为：

$$\Delta M = (f_1 - f_2) \frac{Q}{v} D \quad (8)$$

其中： Q 为成品煤仓出煤速率，kg/s。

由图 8 可见，在负荷折返变化工况中，当负荷变化方向改变后，给煤延迟煤量也随之降低，这与工程实践中降负荷给煤线路存煤量增多、升负荷时给煤线路存煤量减少的情况相同。

给煤延迟煤量一般以质量计算，但是在实际工程中也需要考虑煤的体积。案例中锅炉所燃烧的无烟煤的堆积密度一般为 1.4~1.9 g/cm³[26]，取 1.4 g/cm³ 为计算密度，则案例从 100%Pe 负荷降低至 20%Pe 负荷时，负荷变化速率为 3%Pe/min 时，其线路上多余煤的体积约为 6.6 m³，明显大于国外同类机组给煤线上所设缓冲煤仓的容积，说明国外的方案（输送高挥发分烟煤或褐煤）不能直接适用于国内的宽负荷快速调峰要求。若以 3 m³ 的缓冲煤仓容积和 10% 的给煤不均系数为限，则只能适应最大 36.3%Pe 的调峰范围以及最大 2%Pe/min 的调峰速率。

4.3.2 给煤不均系数特性

给煤不均系数能够直观反映给煤延迟问题对锅炉给煤均匀性的影响，其值越大，说明线路末端给煤口实际给煤量与负荷要求的给煤量之间的偏差越大，给煤不均匀性越严重。

由图 6 可见，给煤不均系数与变负荷幅度成正相关关系；而由图 7 可见，给煤不均系数与变负荷速率成正相关关系，这在表 4 中也可以体现。这说

明宽负荷连续快速调峰会使得给煤线路产生更严重的给煤延迟问题,炉内给煤均匀性更难以保证。

由表4可见,给煤不均系数与给煤口数量成正相关关系,说明线路上的给煤口是造成给煤延迟问题的因素之一,而大型CFB锅炉受给煤扩散能力影响,一般需要多点给煤,这也使得给煤延迟问题在大型机组中尤为突出。

4.3.3 优化控制特性

通过改进变负荷时的给煤控制系统,使成品煤仓按某一给定的速率改变出煤量,可以缓解给煤延迟问题。由图9可见,在给煤口同样是以1%Pe/min的速率降低负荷时,成品煤仓给煤出煤量采用优化控制速率时的给煤不均系数要小于正常工况,并且在变负荷完成后的给煤延迟煤量为0,即回归了变负荷前的状态,但是负荷变化过程中仍然存在给煤延迟的影响。

当案例从100%Pe负荷降低至20%Pe负荷,负荷变化速率为3%Pe/min,采用此优化控制方法时,所需缓冲煤仓容积约为1.7 m³,给煤不均系数约为9.7%,基本可以适用于国内机组。

4.3.4 给煤平衡时间

上述各种工况中,实现总煤量与实际入炉煤量平衡的时间一般是在变负荷完成后的157.7 s处及以后,这是以链式输煤机的运行速率计算得到的从输煤起点运行至线路末端所消耗的时间。随后,成品煤仓给的总给煤量、链式输煤机上输送的煤量以及各给煤口消耗的煤量再次达到平衡。

由图9可见,当成品煤仓以 $x_a=1.0383\%$ Pe/min的速率降低出煤量时,给煤平衡的时间是在变负荷完成后的126.9 s处及以后,这是因为成品煤仓先于机组达到目标负荷后不再改变出煤量。因此,以链式输煤机的运行速率,从第1给煤口处运行至线路末端所消耗的时间即是此时给煤重新达到平衡的时间。

5 结 论

本文通过对现有给煤系统的分析总结、对给煤延迟问题的研究讨论,以及对实炉案例的计算和分析,得出以下结论。

1) 针对给煤线路较长的大型CFB锅炉在宽负荷快速调峰过程中出现的给煤不均匀现象,给煤延迟问题是重要的原因之一。

2) 提出了量化计算和分析给煤延迟问题的方

法,以给煤不均系数来量化评价给煤延迟问题的严重程度,并针对某600 MW循环流化床锅炉侧墙给煤系统(每条链式输煤机带3个给煤口)进行计算验证。计算结果表明:机组变负荷幅度越大,给煤延迟问题越严重;机组变负荷速率越快,给煤延迟问题越严重;单给煤线路上给煤口数量越多,给煤延迟问题越严重;

3) 国外设置缓冲煤仓的给煤设计应用到国内机组时,只能适应最大36.3%Pe的调峰范围以及最大2%Pe/min的调峰速率,不符合新的调峰要求,但是在采用优化控制方法后基本能适用国内现行的调峰要求。

[参 考 文 献]

- [1] 程乐鸣,许霖杰,夏云飞,等. 600 MW超临界循环流化床锅炉关键问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5520-5532.
CHENG Leming, XU Linjie, XIA Yunfei, et al. Key issues and solutions in development of the 600 MW CFB boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5520-5532.
- [2] 黄中,杨娟,车得福. 大容量循环流化床锅炉技术发展应用现状[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 1-8.
HUANG Zhong, YANG Juan, CHE Defu. Application and development status of large-scale CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 1-8.
- [3] 蒋敏华,黄斌. 燃煤发电技术发展展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(29): 1-8.
JIANG Minhua, HUANG Bin. Prospects on coal-fired power generation technology development[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(29): 1-8.
- [4] 程乐鸣,周星龙,郑成航,等. 大型循环流化床锅炉的发展[J]. 动力工程, 2008, 28(6): 817-826.
CHENG Leming, ZHOU Xinglong, ZHENG Chenghang, et al. Development of large-scale circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(6): 817-826.
- [5] 宋畅,吕俊复,杨海瑞,等. 超临界及超超临界循环流化床锅炉技术研究与应[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 338-347.
SONG Chang, LYU Junfu, YANG Hairui, et al. Research and application of supercritical and ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 338-347.
- [6] LU Y D, TOMSOVIC K. Wide area hierarchical voltage control to improve security margin for systems with high wind penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6218-6228.
- [7] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8.
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8.
- [8] 刘吉臻,洪烽,高明明,等. 循环流化床机组快速变负荷运行控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4130-4137.
LIU Jizhen, HONG Feng, GAO Mingming, et al.

- Research on the control strategy for quick load change of circulating fluidized bed boiler units[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4130-4137.
- [9] 高明明, 岳光溪, 雷秀坚, 等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(35): 6319-6328.
GAO Mingming, YUE Guangxi, LEI Xiujian, et al. Research on control system of 600 MW supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(35): 6319-6328.
- [10] 张冲冲, 马素霞, 张建春, 等. 350 MW 循环流化床锅炉变负荷过程中污染物排放研究[J]. 热力发电, 2020, 49(1): 41-47.
ZHANG Chongchong, MA Suxia, ZHANG Jianchun, et al. Pollutant emission from 350 MW CFB boiler under varying load condition[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1): 41-47.
- [11] 李影平, 辛胜伟, 王凤君. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉超低 NO_x 排放研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(5): 86-92.
LI Yingping, XIN Shengwei, WANG Fengjun. Study on ultra-low NO_x emission technology of 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 86-92.
- [12] 黄鹏, 赵冰, 王家林, 等. 循环流化床大气污染物排放模型研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(3): 60-67.
HUANG Peng, ZHAO Bing, WANG Jialin, et al. Model research of air pollutant emission in circulating fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(3): 60-67.
- [13] 李影平. 大型循环流化床锅炉节能减排关键问题探讨[J]. 锅炉技术, 2019, 50(5): 42-46.
LI Yingping. Discussion on key problems of energy saving and emission reduction in large circulating fluidized bed boilers[J]. Boiler Technology, 2019, 50(5): 42-46.
- [14] 张文清. 600 MW 超临界循环流化床锅炉运行优化试验研究[J]. 锅炉技术, 2019, 50(4): 40-45.
ZHANG Wenqing. Optimized study on operating performance of a 600 MW supercritical fluidized bed boiler[J]. Boiler Technology, 2019, 50(4): 40-45.
- [15] ZHOU X L, CHENG L M, WANG Q H, et al. Non-uniform distribution of gas-solid flow through six parallel cyclones in a CFB system: an experimental study[J]. Particuology, 2012, 10(2): 170-175.
- [16] 宗琛, 王泉海, 卢啸风, 等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉二级给煤系统优化探讨[J]. 电站系统工程, 2015, 31(4): 43-44.
ZONG Chen, WANG Quanhai, LU Xiaofeng, et al. Optimizing on 600 MW supercritical CFB boiler secondary coal feeding system[J]. Power System Engineering, 2015, 31(4): 43-44.
- [17] YAN J, LU X F, WANG Q H, et al. Experimental and numerical study on air flow uniformity in the isobaric windbox of a 600 MW supercritical CFB boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 311-321.
- [18] 郭万竹, 王虎, 顾从阳. 煤泥及矸石等低热值煤循环流化床清洁高效利用关键技术研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(增刊 1): 41-45.
WU Wanzhu, WANG Hu, GU Congyang. Research on key CFB technologies for clean and efficient utilization of low calorific value coal[J]. Coal Engineering, 2017, 49(Suppl.1): 41-45.
- [19] LEE S H, JÄNTTI T, BURKE J, et al. Overview of the Samcheok Green Power 4×550 MWe supercritical circulating fluidized-bed steam generator project and its first years of operation[C]. 23rd International Conference on FBC, Seoul, Korea, 2018.
- [20] 蒋茂庆. 四川白马 300 MW CFB 锅炉基本运行特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008: 9-17.
JIANG Maoqing. Basic performance study on 300 MW CFB boiler operation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008: 9-17.
- [21] 刘建国. 350 MW 超临界循环流化床锅炉技术及应用现状[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(1): 133-135.
LIU Jianguo. Technology and application status of 350 MW supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2020, 10(1): 133-135.
- [22] YAN J, LU X F, SONG Y F, et al. A comprehensive understanding of the non-uniform characteristics and regulation mechanism of six external loops in a 600 MW supercritical CFB boiler[J]. Energy, 2021, 222: 120032.1-120032.15.
- [23] RYABOV G, KUCHMISTROV D, ANTONENKO E, et al. The first year experience of once through CFB boiler operation of 330 MWe unit[C]. 23rd International Conference on FBC, Seoul, Korea, 2018.
- [24] 毛健雄. 超(超)临界循环流化床直流锅炉技术的发展[J]. 电力建设, 2010, 31(1): 1-6.
MAO Jianxiong. Development of supercritical/ ultra-supercritical CFB boiler technology[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1): 1-6.
- [25] 宗琛. 600 MW 超临界循环流化床锅炉给煤均匀性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016: 25-29.
ZONG Chen. Study on coal feeding uniformity of 600 MW super-critical circulating fluidized bed boiler[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016: 25-29.
- [26] 张力. 锅炉原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 21.
ZHANG Li. Principles of boiler[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 21.

(责任编辑 刘永强)