

300 MW 循环流化床锅炉大比例掺烧煤泥试验研究

张平¹, 陈陆剑², 江华¹, 张缦², 徐巍¹, 刘实¹, 杨海瑞², 吕俊复²

(1. 国投盘江发电有限公司, 贵州 盘州 553000; 2. 清华大学 能源与动力工程系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 循环流化床锅炉大比例掺烧煤泥是一种处理煤泥等低品质煤的有效手段。利用一维小室模型对掺混不同比例煤泥的 CFB 锅炉运行工况进行模拟, 研究了掺混煤泥比例对 CFB 锅炉炉膛内物料平均粒径、颗粒停留时间以及炉膛上部物料浓度的影响, 确定了大比例掺烧煤泥条件下的流态优化条件。模拟结果表明, 增加煤泥比例可以提高物料循环流率和中间粒径档位 (0.1~0.3 mm) 颗粒在炉内的停留时间, 改善燃料的燃尽率, 提高煤泥比例还可以增加炉膛上部的颗粒浓度, 有利于提高炉膛上部的传热, 降低炉膛温度, 便于污染物的控制。根据盘北电厂 300 MW 循环流化床锅炉机组大比例掺烧煤泥的运行数据, 分析了掺烧煤泥比例对床温、排烟温度、底渣与飞灰含碳量的影响。当锅炉负荷为 300 MW 时, 掺烧煤泥后床温明显降低, 飞灰含碳量和排烟温度随着掺烧煤泥比例的增加而增大, 底渣含碳量则随着掺烧煤泥比例的增加而降低。为了实现大比例掺烧, 建议控制矸石的入炉煤粒径, 且需要强化尾部吹灰或适当调整尾部受热面。

关键词: CFB; 大比例; 煤泥; 掺烧; 物料平衡

中图分类号: TK229.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)01-0065-06

Research on large proportion of coal slime co-combustion in a 300 MW CFB boiler

ZHANG Ping¹, CHEN Lujian², JIANG Hua¹, ZHANG Man², XU Wei¹, LIU Shi¹, YANG Hairui², LYU Junfu²

(1. Guotou Panjiang Power Generation Co., Ltd., Panzhou 553000, China; 2. State Key Laboratory of Power Systems, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Large proportion of coal slime co-combustion in CFB boilers is an effective means to treat low quality coal such as coal slime. A one-dimensional chamber model was used to simulate the operating conditions of a CFB boiler with different proportions of coal slime co-combustion. The effects of blended coal slime ratio on the average particle size in CFB boiler furnace, the residence time of particle in furnace and the material concentration of upper furnace were studied, and the optimal operation condition on flow regime under the condition of large proportion of coal slime was determined. The simulation results show that increasing the proportion of coal slime can increase the material circulation flow rate and the residence time of particles in the intermediate size range (0.1-0.3 mm) in the furnace, and improve the burnout rate of fuel. Increasing the proportion of coal slime can increase the particle concentration of upper furnace, which is beneficial to improve the heat transfer in the upper part of the furnace, reduce the temperature of the furnace, and control pollutants. Based on the operation data of large proportion of coal slime co-combustion in a 300 MW circulating fluidized bed boiler unit in Panbei Power Plant, the effects of proportion of coal slime co-combustion on bed temperature, exhaust gas temperature, carbon content of bottom slag and fly ash were analyzed. When the boiler load is at 300 MW, the bed temperature obviously decreases after the blended coal slime being burned, the carbon content of the fly ash and the smoke exhaust temperature increase with the proportion of blended coal slime increased, and the carbon content of the bottom slag decreases with the proportion of blended coal slime increased. In order to achieve the goal of large proportion of coal slime co-combustion, it is recommended to control the coal particle size of gangue, and it is necessary to

收稿日期: 2019-10-31; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.19103101

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0600203)

作者简介: 张平 (1973—), 男, 云南昆明人, 高级工程师, 从事大型循环流化床运行技术。E-mail: qjdczp@vip.163.com。

通讯作者: 杨海瑞 (1972—), 男, 北京人, 教授, 主要从事循环流化床燃煤技术研究。E-mail: yhr@tsinghua.edu.cn

引用格式: 张平, 陈陆剑, 江华, 等. 300 MW 循环流化床锅炉大比例掺烧煤泥试验研究 [J]. 洁净煤技术, 2020, 26(1): 65-70.

ZHANG Ping, CHEN Lujian, JIANG Hua, et al. Research on large proportion of coal slime co-combustion in a 300 MW CFB boiler [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 65-70.



移动阅读

strengthen the tail soot blowing or adjust the tail heating surface appropriately.

Key words: CFB; large proportion; coal slime; co-combustion; material balance

0 引言

我国是煤炭消耗大国,2017年我国的一次能源消耗量中煤炭占比超过60%^[1]。煤炭资源作为一种不可再生的化石能源,储量有限,不仅要加强高品质煤的利用,对低品质煤(煤泥、矸石等)的利用也不容忽视。煤泥是煤炭分选过程中的主要副产品,产量巨大,煤泥具有颗粒细、水分大、灰分高、黏度大、持水性强、内聚力大、难以运输等特点,在堆积状态下形态不稳定,极易造成环境污染^[2]。目前处理煤泥大多采用掺烧方式,循环流化床(CFB)锅炉具有燃烧温度低、负荷调节范围广、燃烧效率高、污染物控制效果好等优点,广泛应用于低品质燃料利用领域,比较适合燃用煤泥,因此具有较大的发展空间。循环流化床是一种能够形成流态化的装置,主要由带布风板的提升管、分离器以及回送分离物料的回料装置组成。提升管内的固体物料流化状态与物料性质和流化风速有关,可以是鼓泡床、湍动床、快速床以及气力输送^[3]。

邵伟等^[4]在一台440 t/h的CFB锅炉中进行试验,发现掺烧煤泥比例增加可使床温降低,提高脱硫效率,CFB锅炉仍可正常运行,当煤泥掺烧比例为50%~60%时,锅炉效率达到峰值。刘彦鹏等^[5]在一台300 MW亚临界参数CFB锅炉中进行掺烧试验,当煤泥掺烧量达到40 m³/h(约30%给煤量)时,床温下降约30℃,飞灰含碳量变化不明显,底渣含碳量升高,锅炉效率下降。刘吉堂等^[6]研究发现,在大比例掺烧煤泥的情况下,煤泥在炉内的凝聚结团特性是影响CFB锅炉稳定、高效燃烧的关键,在设计与改造现有锅炉时,应考虑炉内受热面吸热份额的变化以及烟气量和烟气温度的变化。前人研究大多是小锅炉掺烧,掺烧比例也较低,实际运行中不是仅燃用矸石与煤泥的混煤,对于300 MW的CFB锅炉大比例掺烧煤泥的情况研究很少。

贵州盘北电厂是贵州省首个30万千瓦CFB机组资源综合利用发电项目,以盘江矿区煤泥及煤矸石为主要燃料,综合热值小于9.63 MJ/kg。投产以来,盘北电厂与清华大学合作开展了煤泥、煤矸石大比例掺烧及机组适应性创新研究,实现了将煤泥、煤矸石等低热值燃料变废为宝。自2013年7月投产以来累计利用煤泥、煤矸石1 000多万吨,其中,2018年累计利用煤泥200多万吨、煤矸石50多万吨。近几年来,盘北电厂的煤泥掺烧比例稳步提高,目前可达84%,中低负荷下掺烧比例最多可达100%,在全国同类型机组中属领先水平。

本文主要针对不同煤泥矸石掺烧比例下的CFB系统物料平衡进行模型计算,研究不同掺烧比例对炉内物料平均粒径、物料浓度分布、颗粒停留时间的影响,从而确定大比例掺烧煤泥条件下的流态优化条件,通过流态重构提高煤泥在炉内停留时间和燃尽率。根据盘北电厂实际运行情况,分析了燃用的煤泥比例对锅炉床温、底渣与飞灰含碳量、排烟温度等参数的影响,并根据得到的结果给电厂的优化运行提供建议。

1 电厂概况

盘北电厂运行的循环流化床锅炉由上海锅炉厂有限公司设计制造(型号SG-1036/17.5-M4507),锅炉的设计参数见表1。该锅炉为亚临界参数、带中间再热、单汽包自然循环、岛式布置、全钢架支吊结合的循环流化床锅炉。锅炉炉膛高40.1 m、宽29.4 m、深8.9 m,锥段高10.0 m。锅炉采用水冷式旋风分离器进行气固分离,运转层标高为12.6 m。目前CFB锅炉掺烧煤泥的方式大多采用顶部给料和中部给料^[6],经对比分析,考虑到大比例掺混煤泥的实际需要,采用顶部给料方式。为了实现大比例掺烧煤泥,最高掺烧比例100%的目标,盘北电厂对煤泥输运设备和管道进行改造。

表1 锅炉设计参数

Table 1 Boiler design parameters

设计参数	主蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	主蒸汽出口温度/℃	主蒸汽出口压力/MPa	再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	再热蒸汽出口温度/℃	再热蒸汽出口压力/MPa	再热蒸汽进口温度/℃	再热蒸汽进口压力/MPa	给水温度/℃
数值	976.6	541	17.4	809.1	541	3.41	320.3	3.59	278.5

2 掺混煤泥比例对锅炉物料平衡的影响

本文的研究对象是国投盘北电厂 300 MW CFB 锅炉机组,锅炉结构较为复杂,因此对锅炉结构进行简化,只保留炉膛、分离器、回料阀等主要部分。利用清华大学开发的一维物料平衡模型^[7],对满负荷条件下燃用矽石和煤泥混煤系统的物料平衡进行预测,探究不同矽石和煤泥掺混比例下 CFB 锅炉物料浓度、颗粒停留时间、循环流率等参数的变化,采用

表 2 2 种燃料的工业分析及元素分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of two fuels

燃料	元素分析/%					工业分析/%				$Q_{\text{net,d}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
	C_d	H_d	O_d	N_d	S_d	A_{ar}	M_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	
矽石	16.93	1.40	3.70	0.22	1.33	71.00	5.41	14.01	9.57	3 472
煤泥	45.49	1.50	5.79	0.75	0.54	22.66	23.28	17.04	37.03	23 017

表 3 2 种掺混煤样的原始粒度分布

Table 3 Original particle size distributions of two blended coal samples

样品	粒度分布/%					
	0~ 0.3 mm	0.3~ 1.0 mm	1~ 2 mm	2.0~ 3.2 mm	3.2~ 6.0 mm	6~ 10 mm
混煤 1	56.76	11.11	6.77	7.16	11.99	6.21
混煤 2	39.72	14.30	9.67	10.29	17.01	9.01

2.1 矽石和煤泥的成灰特性

循环流化床锅炉作为一进二出的平衡系统,床内床料主要来自给煤中的灰和脱硫剂。物料的循环流率、床料的粒径分布等对于流化床的运行极其重要,可影响燃烧室内的热负荷分布、燃烧效率和脱硫效率。在特定流化风速下,物料循环流率由床料质量(即床料粒径分布和床存量等)决定,而床

表 4 不同粒径矽石的成灰特性

Table 4 Ash-forming characteristics of different size gangue

灰粒径/ μm	粒度分布/%					
	0~300 μm	300~1 000 μm	1 000~2 000 μm	2 000~3 200 μm	3 200~6 000 μm	6 000~10 000 μm
6 000~10 000	0	0	0	0	0	31.90
3 200~6 000	0	0	0	0	60.80	35.90
2 000~3 200	0	0	0	24.23	13.75	2.10
1 000~2 000	0	0	64.91	49.42	5.02	3.75
400~1 000	0	46.25	11.11	3.91	2.01	2.91
200~400	24.48	37.25	6.00	4.72	3.20	4.89
125~200	26.04	4.17	2.36	2.31	1.82	2.55
90~125	18.06	2.98	3.69	2.52	1.91	2.46
60~90	9.72	3.82	3.59	4.44	4.35	4.55
30~60	2.92	2.68	5.53	6.35	4.33	4.13
0~30	18.43	2.84	2.82	2.10	2.80	4.86

流态重构理论确定了流态优化的条件。一维模型的详细介绍可参照文献^[8]。

对于机组燃用的矽石与煤泥 2 种低热值燃料,其工业分析、元素分析及热值见表 2。矽石与煤泥的掺混比例为 45 : 55 和 65 : 35,分别记作混煤 1 和混煤 2,2 种混煤粒径分布见表 3。由于煤泥的颗粒粒径较小,超过 95% 均在 0.3 mm 以下,因此煤泥占比大的混煤 1 中,小粒径的煤样比例较大,而中间粒径的煤样比例较低。

料质量与系统物料平衡密切相关^[9]。作为一进的给煤是 CFB 锅炉炉内循环灰的主要来源,为了合理设计锅炉本体和附属设备,需要了解燃煤的成灰特性。

成灰特性为煤样经燃烧后成灰的粒度分布特性。前人对成灰特性的研究结果表明,煤颗粒的碎裂过程对颗粒前期磨耗没有影响^[10-11],即在流化床燃烧条件下,磨耗和碎裂对最后灰粒径分布的影响是相互独立的,为此,清华大学提出采用静态燃烧和冷态振筛磨耗进行煤种成灰试验研究^[12]。

矽石的灰分大,但其热值和挥发分低,因此燃烧不剧烈,基本不存在热应力及挥发分析出导致的爆裂现象。表 4 为不同粒径矽石的成灰特性,可见,成灰粒度分布基本反映了给煤粒度的分布,即矽石的成灰性能很差。

图1为煤泥的原始粒度及成灰粒度分布,可以看出,煤泥粒度分布主要在0~1 000 μm ,其中100 μm 以下占比超过60%。由于煤的粒度较小,在燃烧过程中爆裂现象不明显,基本不存在由于爆裂导致的粒度变化,除了在最细的30 μm 粒度级,煤泥成灰粒度占比约50%,明显高于煤泥在该粒度级占比40%,因此可考虑用煤泥的粒度分布直接代替成灰粒度分布。其中构成循环灰主体的灰粒度^[13](100~300 μm)占40%左右。因此通过在矽石中掺入煤泥可有效改善外循环流率和飞灰的流率。

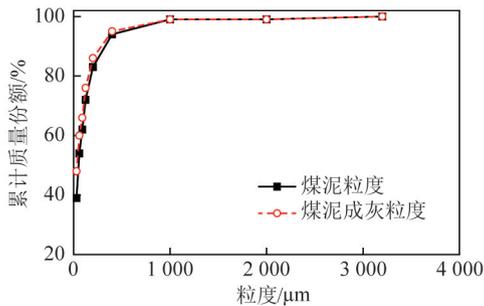


图1 煤泥的原始粒度及成灰粒度分布

Fig.1 Original particle size and ash size distributions of coal slime

2.2 不同混煤比例对炉内物料平均粒度的影响

矽石/煤泥为45:55、床压降为5 kPa时,经计算飞灰占比约为39%,循环流率为 $7.52 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,此时混煤的成灰特性可满足CFB锅炉的物料平衡要求^[14]。炉膛内平均颗粒粒度为218 μm ,排渣粒度为261 μm ,飞灰平均粒度为28.1 μm ,如图2(a)所示。当矽石/煤泥为65:35、床压降为5 kPa时,经计算飞灰占比约为26%,循环流率为 $5.56 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,此时混煤的成灰特性较差,CFB锅炉内的物料平衡一般,需要改善。炉膛内平均颗粒粒度为208 μm ,排渣粒度为304 μm ,飞灰平均粒度为27.2 μm ,如图2(b)所示。对比2种混煤比例的模拟结果发现,增加煤泥的比例可提高循环流率,有利于CFB系统内的物料循环,但同时也会增加飞灰份额,对尾部烟道和受热面产生不利影响。

2.3 不同混煤比例对颗粒停留时间的影响

图3为不同混煤比例对颗粒停留时间的影响。颗粒粒径在0.1 mm及以下时,混煤比例对颗粒的停留时间影响较小;粒径大于0.1 mm时,提高煤泥比例有利于增加颗粒在炉内的停留时间,有利于0.1~0.3 mm煤泥燃尽。矽石煤泥比例为65:35时,模型计算得到较大颗粒的停留时间约为1 100 s,这主要是由于排渣比例增大,导致大颗粒的停留时间降低,而矽石属于较难燃尽的煤种,为保证较大颗粒有足够的停留时间,建议控制矽石的入炉煤粒径。

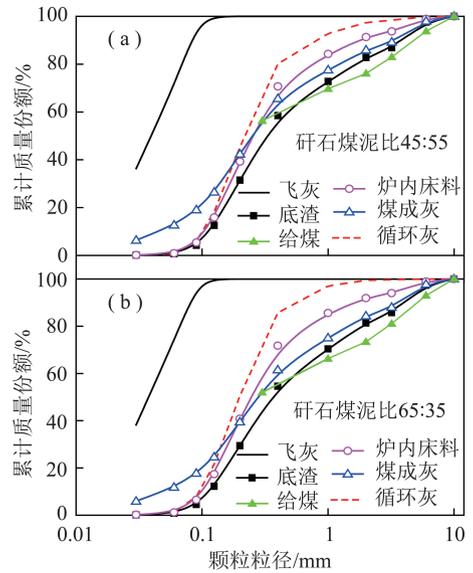


图2 飞灰、循环灰、底渣和床料的粒度分布

Fig.2 Particle size distributions of fly ash, circulating ash, bottom slag and bed stock

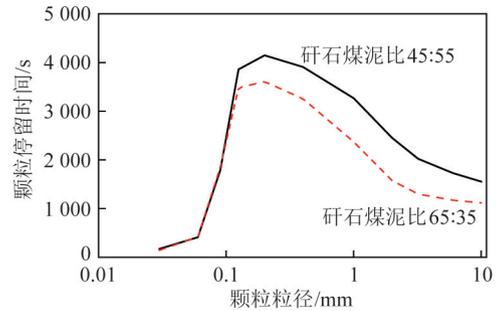


图3 不同混煤比例时颗粒的停留时间

Fig.3 Residence time of particles in different coal blending ratio

2.4 不同混煤比例对物料浓度的影响

图4为沿炉膛高度固体物料浓度的分布。2种不同混煤比例下的固体物料浓度分布基本相似,锅炉下部密相区物料浓度大,上部稀相区的物料浓度较小。根据计算结果,矽石煤泥比例为45:55时,炉膛上部颗粒浓度可达 $2.67 \text{ kg}/\text{m}^3$;矽石煤泥比例为65:35时,炉膛上部颗粒浓度只有 $2.34 \text{ kg}/\text{m}^3$,说明提高混煤中煤泥比例,炉膛上部的颗粒浓度增加,有利于提高炉膛上部的传热,降低炉膛温度,且有利于颗粒团的形成^[15],从而强化炉膛物料的内循环,有利于进一步提高煤泥的停留时间,增加燃尽度。

3 掺混煤泥比例对锅炉性能的影响

3.1 负荷和煤泥比例对床温的影响

由于掺烧的煤泥含水量较高、平均粒径较细,在大比例掺烧煤泥过程中使床温降低,严重时可导致锅炉熄火^[16]。图5为掺烧煤泥比例对锅炉运行床温(密相

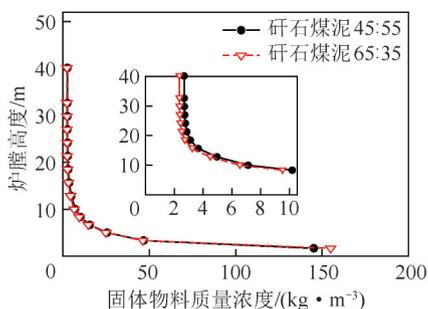


图 4 沿炉膛高度固体物料浓度的分布

Fig.4 Concentration distributions of solid material along furnace height

区平均温度)的影响。可以看出,在锅炉负荷为 300 MW 时,煤泥出力从 0 增加到 100%过程中,床温从 970 °C 下降到 935 °C;当掺混煤泥达到 100%时,锅炉床温仍保持 935 °C,处于正常运行床温范围内。掺烧煤泥解决了高床温时环保指标达标困难的问题,降低床温对控制 SO₂和氮氧化物排放具有一定的积极作用,同时降低了炉内脱硫石灰石的耗量。

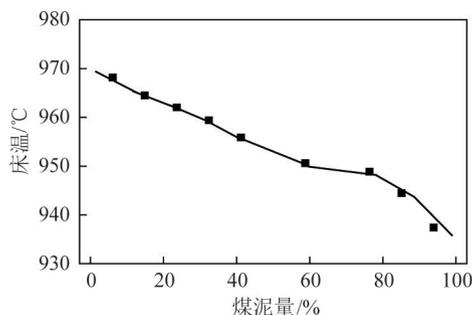


图 5 300 MW 负荷下煤泥量对床温的影响

Fig.5 Effect of coal slime on bed temperature under 300 MW load

图 6 为不同负荷下投煤泥对床温的影响。可以看出,随着锅炉负荷的增加,床温持续升高。锅炉负荷在 179~300 MW 时,投煤泥工况下的床温均低于不投煤泥时的床温。

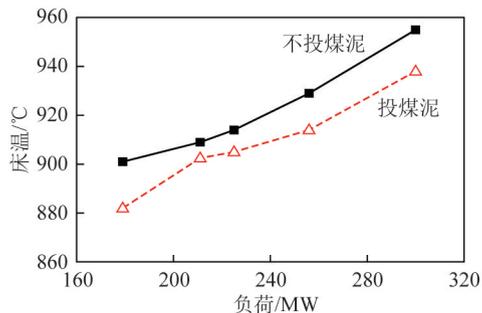


图 6 不同负荷下投煤泥对床温的影响

Fig.6 Effect of coal slime on bed temperature under different loads

3.2 煤泥比例对飞灰和底渣含碳量的影响

在锅炉负荷为 300 MW 时,煤泥含量对底渣和飞灰含碳量的影响如图 7 所示。可以看出,随着掺

烧煤泥比例的增加,飞灰含碳量呈升高趋势,主要是由于飞灰占比增加,掺烧的煤泥含水量较高,在炉内燃烧后会增加烟气流量,导致超细颗粒逃逸增加,同时炉膛温度降低,这也是飞灰燃尽率降低原因之一。煤泥在入炉后水分蒸发过程中会出现结团现象,影响燃烧效率,增加锅炉的飞灰含碳热损失^[6]。底渣含碳量的影响规律则呈相反趋势,即随着掺烧煤泥比例的增加,底渣含碳量呈下降趋势。这主要是由于掺烧煤泥后,飞灰占比增加,导致排渣量减少,从而延长了大颗粒的停留时间,提高了矸石的燃尽度,因此掺烧煤泥后底渣含碳量降低。

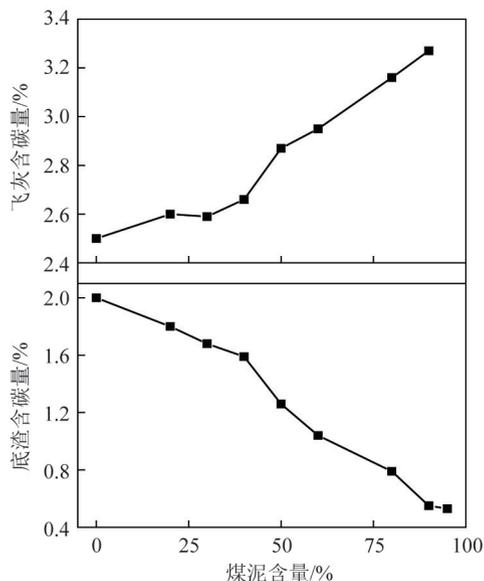


图 7 煤泥含量对底渣和飞灰含碳量的影响

Fig.7 Effect of coal slime content on carbon content of bottom slag and fly ash

3.3 掺烧煤泥对排烟温度的影响

图 8 为 300 MW 负荷下煤泥含量对排烟温度的影响。可以看出,锅炉负荷为 300 MW 时,随着掺烧煤泥量增加,锅炉的排烟温度持续升高。这是因为煤泥含水量较高,大量掺烧煤泥后会增加烟气流量,这些水分在炉内加热、蒸发、过热的过程中会带走更多热量^[6]。

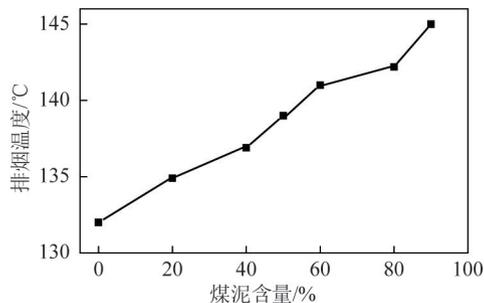


图 8 300 MW 负荷下煤泥含量对排烟温度的影响

Fig.8 Effect of coal slime on flue gas temperature under 300 MW load

不同负荷下投煤泥对排烟温度的影响如图9所示。在相同负荷下,运行中投煤泥后的排烟温度要高于不投煤泥时,且随负荷的升高,2种情况下的排烟温度差值增大,即在锅炉高负荷时,投煤泥对排烟温度的影响更大。为了减少排烟损失,建议适当降低煤泥水分,同时加强尾部烟道吹灰和除尘器入口烟温监测,减少烟道漏风。

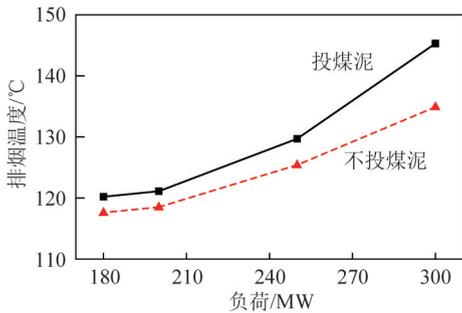


图9 不同负荷下投煤泥对排烟温度的影响

Fig.9 Effect of slime on flue gas temperature under different loads

4 结 论

1) 增大煤泥的掺烧比例,可提高CFB锅炉的循环流率,增加炉膛上部颗粒浓度,延长0.1 mm以上颗粒物料的炉内停留时间,利于降低飞灰含碳量。

2) 锅炉负荷为300 MW时,随着燃用煤泥的比例增加,床温呈下降趋势,最高可降低约35℃。

3) 锅炉负荷为300 MW时,飞灰含碳量随着掺烧煤泥比例的增加而增加,而底渣含碳量出现降低。

4) CFB锅炉中投用煤泥后,锅炉的排烟温度升高,在300 MW负荷时,排烟温度随掺烧煤泥比例的增加而升高。为了实现大比例掺烧,需要强化尾部吹灰或适当调整尾部受热面。

参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2018.
Statistics Bureau of the People's Republic of China. China statistical yearbook [M]. Beijing:China Statistics Press,2018.

[2] 裴婷. 煤泥燃烧过程的试验研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2016:1-2.
PEI Ting. Experimental study on combustion process of coal slime [D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2016:1-2.

[3] 冯俊凯,岳光溪,吕俊复. 循环流化床燃烧锅炉[M]. 北京:中国电力出版社,2003:24-38.
FENG Junkai, YUE Guangxi, LYU Junfu. Circulating fluidized bed combustion boiler [M]. Beijing:China Electric Power Press, 2003:24-38.

[4] 邵伟,袁隆基,郭晓勇,等. 440 t/h 循环流化床锅炉大比例掺烧煤泥试验研究[J]. 热力发电,2013,42(4):89-93.

SHAO Wei, YUAN Longji, GUO Xiaoying, et al. Experimental study on large proportion coal slurry co-firing in a 440t/h CFB boiler [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(4): 89-93.

[5] 刘彦鹏,李建民,余永生,等. 300MW 循环流化床锅炉掺烧煤泥试验研究[J]. 热力发电,2010,39(10):60-64.
LIU Yanpeng, LI Jianmin, YU Yongsheng, et al. Test study on mixedly burning coal slime in 300MW CFB boiler[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(10): 60-64.

[6] 刘吉堂,王冬梅,蒋文斌,等. 大型CFB锅炉大比例掺烧煤泥的分析[J]. 电力技术,2010,19(10):52-57.
LIU Jitang, WANG Dongmei, JIANG Wenbin, et al. Analysis on the large circulating fluidized bed boiler firing peat as main fuel [J]. Electric Power Technology, 2010, 19(10): 52-57.

[7] 杨海瑞. 循环流化床锅炉物料平衡研究[D]. 北京:清华大学,2003:17-21.
YANG Hairui. Research on mass balance in circulating fluidized bed boiler [D]. Beijing:Tsinghua University, 2003: 17-21.

[8] 杨海瑞,肖显斌,岳光溪. 循环流化床锅炉内的灰平衡模型研究[J]. 煤炭转化,2002,25(3):59-64.
YANG Hairui, XIAO Xianbin, YUE Guangxi. Modeling of ash balance in CFB boiler [J]. Coal Conversion, 2002, 25(3): 59-64.

[9] YANG H, YUE G, XIAO X, et al. 1D modeling on the material balance in CFB boiler [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(20): 5603-5611.

[10] YUE G, WANG L, LI Y, et al. Ash size formation characteristics in CFB coal combustion [C]//Proc. of 4th Int. Conference on Circulating Fluidized Beds. Somerset: [s.n.], 1993: 110-115.

[11] 唐治. 流化床燃烧条件下煤的成灰特性实验研究[D]. 北京:清华大学,2001:4-12.
TANG Zhi. Experimental study on the ash formation behavior of coal under the condition of fluidized bed combustion [D]. Beijing: Tsinghua University, 2001: 4-12.

[12] 杨海瑞,肖显斌,吕俊复,等. CFB锅炉内成灰特性的实验研究方法[J]. 化工学报,2003,54(8):1183-1187.
YANG Hairui, XIAO Xianbin, LYU Junfu, et al. Experimental technique on coal ash formation in CFB combustion [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(8): 1183-1187.

[13] ZHANG Yi, ZHANG Man, ZHU Shahong, et al. Mechanism analysis of gas solid flow non-uniformity problem of 330 MW CFB boiler [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 145: 258-267.

[14] YUE G X, LU J F, ZHANG H, et al. Design theory of circulating fluidized bed boilers [C]//Proceedings of 18th international conference on fluidized bed combustion. Toronto: [s.n.], 2005.

[15] CAI Runxia, ZHANG Hai, ZHANG Man, et al. Development and application of the design principle of fluidization state specification in CFB coal combustion [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 174: 41-52.

[16] 杨婷婷,邸小慧,洪烽,等. 掺烧煤泥循环流化床锅炉床温动态建模[J]. 热力发电,2018,47(2):43-48.
YANG Tingting, DI Xiaohui, HONG Feng, et al. Dynamic modeling for bed temperature of circulating fluidized bed boiler co-firing coal slime [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 43-48.