

循环流化床锅炉压火启动调峰技术综述

刘众元, 武晓俊

(国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西太原 030001)

摘要: 为了促进新能源电量消纳, 循环流化床锅炉压火启动调峰研究得到广泛关注。本文针对锅炉压火启动技术, 从压火启动原理、发展历程、需要关注的核心问题及应对措施进行了概述, 总结分析了压火时长、机组安全性、污染物生成和控制及无循环泵直流 CFB 锅炉压火调峰等问题, 提出了压火时长计算、NO_x 控制及压火启动调峰对机组寿命的影响等未来重点研究方向。

关键词: 循环流化床; 压火; 调峰

中图分类号: TK227.7 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2024.03.001

[引用本文格式] 刘众元, 武晓俊. 循环流化床锅炉压火启动调峰技术综述[J]. 热能动力工程, 2024, 39(3): 1-8. LIU Zhong-yuan, WU Xiao-jun. Review of banked fire and start-up peak regulation technology of circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 1-8.

Review of Banked Fire and Start-up Peak Regulation Technology of Circulating Fluidized Bed Boiler

LIU Zhong-yuan, WU Xiao-jun

(State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan, China, Post Code: 030001)

Abstract: In order to promote the consumption of new energy electricity, the research on banked fire and start-up peak regulation technology of circulating fluidized bed (CFB) boiler has received widespread attention. The principle, development process, core issues that need to be paid attention to and countermeasures for banked fire and start-up peak regulation technology are summarized in this paper. The existing problems in the duration of banked fire, the safety of the unit, the generation and control of pollutants, and problems of once-through CFB boiler without circulating pump during banked fire and start-up peak regulation are summarized and analyzed. The key research directions in the future are proposed such as the calculation of the banked fire duration, the controlling of NO_x and the impact of banked fire and start-up peak regulation on the life of the unit, etc.

Key words: circulating fluidized bed (CFB), banked fire, peak regulation

引言

截至 2021 年底, 中国风电和太阳能发电装机容量

量分别为 3.3 亿和 3.1 亿 kW, 同比分别增长 16.6% 和 20.9%^[1]。在双碳目标提出后, 随着能源结构转型, 可再生能源在未来能源结构中的占比将越来越大。但是风电和太阳能发电的随机性和波动

性非常大,高比例接入电网后将对电网的安全性和稳定性造成巨大的威胁^[2-3]。在电网调峰能力不能满足实时调度需要时,就不得不进行弃风弃光。为了减少弃风弃光,消纳风电和太阳能发电量,保障电网安全运行,需要进一步提高电网整体调峰能力^[4]。对于三北地区,电网中发电机组以火电、风电和太阳能发电为主,适宜调峰的水电很少,并且火电机组是这些地区的调峰主力军,为此需要进一步提高火电机组的调峰能力。目前,火电机组中煤粉锅炉技术相对成熟,虽然可以通过精细化调整或富氧燃烧技术改造来提高调峰能力,但成本较高且提升空间有限^[5]。由于火电机组中循环流化床(Circulating Fluidized Bed, CFB)锅炉燃料适应性强、污染物控制成本低^[6]、燃烧稳定,并且具有大量的床料和耐火耐磨材料,热惯性非常大,因而在深度调峰方面具有先天优势^[7]。

循环流化床压火启动调峰是一种充分利用循环流化床锅炉热惯性大的特点实现机组近零出力的极深度调峰技术,目前正在探索研究阶段^[8-10]。该技术的具体流程为:在电网需要机组大幅度降负荷时,停止CFB锅炉给煤,停运锅炉风机,将锅炉停炉压火;利用CFB锅炉炉内大量高温床料和耐火耐磨材料的蓄热来加热给水和蒸汽,维持汽轮发电机组在低负荷下继续运行;在需要提高电网负荷时,将CFB锅炉从热态快速启动,迅速增加机组负荷,从而实现CFB机组的极深度调峰。通常,增加锅炉压火前的蓄热量、减少锅炉压火停炉的热量消耗并降低汽轮机运行负荷,可以延长锅炉压火时长。由于汽轮机经过低压缸零出力改造后能在极低的负荷下运行^[11],因此将锅炉压火启动调峰技术与汽轮机低压缸零出力技术结合,可以实现机组近零出力的极深度调峰,提高机组的调峰范围,基本实现0~100%负荷的全负荷调节^[9];可减少机组在低负荷、低效率区间的运行时长,减少燃料消耗量和碳排放量;实现压火热备用后不投油直接投煤热态启动,极大地减少启动耗油量,缩短启动时间^[12]。

本文对锅炉压火启动调峰相关文献进行了系统梳理,分析了循环流化床锅炉压火启动调峰时长、压火对机组安全和寿命的影响、压火启动过程污染物排放和控制等关键问题,提出了CFB机组压火启动

调峰需要进一步研究的核心问题和建议。

1 压火启动调峰的发展历程

早期,人们在链条炉和沸腾炉等锅炉上进行压火实践操作来减少燃料消耗^[13-14]。1990年吴铭一等人^[15]为了提高热电厂经济性,提出根据外界热负荷的需要灵活调度机组停机。在负荷低谷时将1台锅炉压火备用,在需求负荷上升前再热启动并网,从而减少机组在低负荷、低效率状态下运行时长。在20世纪90年代初,为了减少一次能源消耗,四川省电力局提出了锅炉在用电低谷时压火热备在高峰时热态启动的运行方式^[16]。该时期,压火的研究内容主要集中在压火启动操作方法、注意事项及压火热应力造成的管子和集箱焊缝开裂问题等方面^[17-24]。随着人们环保意识的增强,学者们开始对压火启动期间污染物排放特性进行研究。石久胜等人^[25]分析研究了间歇运行锅炉CO和粉尘的排放特征。部分学者对循环流化床锅炉压火时长进行了研究,探索了延长压火时长的方法^[26-27],还有学者探索了锅炉在压火及启动时的节能方法^[28]。

2000年之后,随着循环流化床锅炉技术的发展和机组容量的不断增加,对大中型循环流化床锅炉压火-启动的探索和研究也逐渐增多,研究主要围绕压火操作方法、结焦预防^[29]、对锅炉受热面的影响^[30]、环保特性^[31]、压火时长和热态启动条件等^[32-34]展开。早期多采用机组全停的方式开展压火^[26],随着电网对机组非停考核的严格,为了减少机组非计划停运次数,多采用压火不停机的压火方式^[35-37]。

已有研究和实践表明,循环流化床锅炉在压火一段时间内能够实现不投油热态启动。但目前对压火启动的研究主要以经验总结为主,不够系统深入,需要进一步对CFB机组压火启动调峰的压火时长、安全性、污染物生成及控制等方面进行系统深入研究。

2 压火时长影响因素

压火时长是指在锅炉压火调峰过程中,从风机停止运行到热态启动再次启动风机的时间间隔。无论是以检修为目的还是以调峰为目的,压火时长是循环流化床锅炉进行压火启动的关键问题,关系到压火期间检修工作是否能够顺利完成或者调峰时长

是否能够满足调度要求。

已有学者和技术人员对不同容量等级、燃用不

同煤种的 CFB 机组压火时长进行了研究,研究结果统计见表 1。

表 1 已有压火时长研究结果统计

Tab. 1 Statistics of existing research results of banked fire duration

机组容量/MW	文献	机组结构	压火方式	压火期间 负荷/MW	燃用煤 种特性	启动 床温/°C	压火 时长/h
15	[26]	自然循环 + 紧凑型	机组全停	0	V_{daf} 为 28.2%	600	6 ~ 7
50	[11 - 12]	自然循环 + 紧凑型	机组全停	0	大同 1 号煤	-	1 ~ 2
116	[34]	强制循环 + 紧凑型 + 热水锅炉	机组全停	0	V_{daf} 为 17.98%	-	3 ~ 4
300	[35 - 37]	自然循环 + 双布风板 + 4 个外置床	停炉不停机	3 ~ 5	褐煤	400	10
300	[38]	自然循环 + 紧凑型	停炉不停机	10	-	-	1.5
330	[39]	自然循环 + 紧凑型	停炉不停机	9.2	-	550	1.5
330	[40]	自然循环 + 紧凑型	停炉不停机	3	-	650	1.2
300	[9]	自然循环 + 紧凑型	停炉不停机	6	-	684	2

注：“-”表示原文献中无对应数据。

由表 1 可以看出,不同机组燃用不同煤种时压火时长差异很大,从 1.2 ~ 10 h。压火时长主要受锅炉蓄热量、散热量、机组电负荷需要的热量和燃用煤种性质等因素的影响,与机组结构和压火方式等密切相关。具有外置床换热器的 CFB 锅炉燃烧易着火的褐煤时,压火时长要显著大于紧凑型 CFB 锅炉。

2.1 压火方式对压火时长的影响

按照压火期间汽轮发电机组是否运行,可以将压火热态启动分为压火停机方式和压火不停机方式两类,不同压火方式具有不同的特点^[35,39]。

对于压火停机方式,压火时间较长,需要重新冲转、并网等,操作复杂、启动时间长、过程中容易出现异常。并且,当采用停机方式压火时,循环流化床锅炉过热器和再热器无蒸汽通过,容易发生干烧;由于无蒸汽冷却,压火启动时汽轮机交变应力大;发电机启停时,差动膨胀会造成绝缘材料磨损、开裂,接头开焊等故障,发电机转子、转子绕组等承受交变应力大;汽轮机组启动需要过临界转速,容易发生振动异常,并且解列和并网对电网冲击大。

对于压火不停机方式,虽然压火时长变短,但是无需停机、冲转和并网等,操作简单,启动迅速。并且,当采用压火不停机方式时,循环流化床锅炉压火后过热器和再热器有蒸汽通过,能够对受热面管子起到冷却作用,汽轮机组启停应力小,对发电机组和

变压器等设备损坏小,对电网冲击小,适合机组进行压火调峰。

2.2 锅炉结构对压火时长的影响

在循环流化床锅炉大型化的过程中,为了便于布置受热面,早期设计的 300 MW 级和现有的 600 MW 级循环流化床锅炉通常设置外置床换热器。从表 1 中压火时长数据可以看出,带外置床的 CFB 机组要比同等级不带外置床的紧凑型 CFB 机组压火时长更长。一方面是因为该类锅炉炉膛和外置床换热器床料存量,耐火耐磨材料用量多,蓄热量大;另一方面由于部分过热器和再热器受热面布置在外置床换热器内,压火期间蒸汽温度下降速度更慢。已有实践表明,该类机组压火时长通常受启动床温的限制,而不是蒸汽温度限制。不过该类型机组在压火初期可能会出现外置床受热面管子超温的问题^[35]。

2.3 燃用煤种对压火时长的影响

CFB 机组停炉不停机方式下的压火时长主要受到蒸汽参数能否满足汽轮发电机组运行要求,以及锅炉床温是否大于煤种着火温度的限制。对于停机压火方式,压火时长主要由启动床温决定,启动床温根据所用煤种着火温度确定。不同煤种着火温度不同,通常煤龄越短,挥发份越高,着火温度越低。在表 1 中,某机组燃用褐煤时,直接投煤温度仅为 400 °C,因而压火时长能够达到 10 h,远高于其他机组的压火时长。

着火温度不是煤的物性参数,不仅与煤种有关,还随着燃烧条件的变化而变化^[41-42]。在循环流化床锅炉点火启动时,通常是通过间歇给煤方式确定所燃用煤种的投煤温度。而压火启动与正常点火启动不同,直接投煤,没有油枪助燃,燃烧条件不好,燃烧稳定性差。如果直接投煤启动失败就需要投油枪助燃,转为温态启动^[26],这样会增加运行成本和启动时间。因此,得到所用煤种在流化床内的着火温度,从而确定压火后的启动温度,对压火热态启动床温控制和合理安排启动时间非常重要,需要进行试验和实践探索。

2.4 压火初始状态对压火时长的影响

机组压火时的初始运行状态影响锅炉床料和耐火耐磨材料的蓄热量,从而影响机组压火时长。压火开始时床温越高、料层差压越大,床料越多、蓄热量越大。但是压火前床温过高,可能引起床料在压火期间结焦和烧毁风帽,因此压火前床温通常控制在 850~900℃。床压过高会导致压火后热态启动时床料在布风板上堆积过厚,流化困难。对于双布风板锅炉,床压过高容易引起翻床和结焦,压火前床压控制在 10 kPa 左右比较合适^[36]。

2.5 调峰对压火时长的要求

通常情况下,对于电网调峰来说,只有机组压火调峰时长达到 2 h,压火启动调峰才有意义。可以根据压火和热态启动两个关键节点将循环流化床锅炉压火热态启动全过程分为压火停炉阶段、焖炉阶段和热态启动阶段。调峰时长由压火时降负荷过程时长、压火近零出力维持时长和热态启动升负荷过程时长 3 部分组成。其中压火过程和热态启动过程通常约 0.5 h^[12],调峰总时长约比压火近零出力持续时间长 1 h。实践表明,一些循环流化床锅炉在燃用褐煤等易着火煤种时,压火焖炉持续时间通常可以达到 1.5 h,再加上压火过程和热态启动过程,机组调峰时长可以达到 2.5 h,基本能够满足电网调度对调峰时长的要求。

已有的压火启动调峰时长研究大多是特定机组的初步实践探索,系统性不强、推广困难。因此,需要对影响机组压火时长的因素进行分析,给出各类机组在燃用煤种不同、电负荷不同时的压火时长计算方法。由于压火后床料处于静止状态,不同区域

床料温度差别很大,此时床温不能准确反映料层温度,不适合作为锅炉热态启动时刻的判断依据。通过建模仿真计算得到合理的压火时长,从而给出合适的启动时间。可以看出,准确的压火时长对机组调峰调度非常重要,是压火热态启动调峰推广的基础。

3 压火对机组安全性的影响

由于循环流化床锅炉机组进行压火启动和正常启动时机组温度水平及辅机设备运行状态不同,除了要遵循机组设备常规启停检查工作及操作注意事项外^[35],还需要重点关注启动时燃烧不稳、浇注料脱落和压火过程中汽轮机鼓风机摩擦等问题,提前做好防范工作。

3.1 压火热态启动时燃烧问题

锅炉压火后,床料中未燃尽的碳会继续在缺氧状态下分解和燃烧,产生 CH_4 、 H_2 和 CO 等,由于床料下层产生的气体向上穿过床层时阻力大,因而通过风帽逆流进入风室^[43-44]并积聚。积聚的可燃气体体积浓度达到爆炸极限后,再启动时可能引发爆炸事故。为了控制压火后可燃气体的生成量,需要在压火时先停止给煤,等待炉膛氧量回升且床温下降之后再开始压火,这时床料中的碳基本燃烧完全,压火后生成的可燃气体量会显著减少。同时,要在风室和炉膛安装 CO 在线测量装置,监视其体积浓度变化,并在压火后热态启动时,先通过引风机和二次风机对炉膛内部进行吹扫。

压火热态启动初期床温低,煤的燃烧不完全,大量未燃尽碳在密相区堆积。随着床温的升高,堆积的未燃尽碳可能会迅速燃烧,发生爆燃,使炉膛温度迅速升高,严重时可能造成炉膛结焦,引起受热面超温等^[45]。因此,压火热态启动过程中要严密监视锅炉床温并随时调整给煤量和风量等,做好燃烧控制。

3.2 热态启动对浇注料的影响

循环流化床锅炉炉膛密相区、分离器和返料器等部位敷设有大量的耐火耐磨材料,并且厚度通常在 200 mm 以上。当炉膛温度变化速率快时,耐火材料会因内外膨胀不均,出现裂纹。在锅炉运行中,裂纹部位容易磨损,严重时会造成浇注料脱落、受热面裸露爆管等。机组采用压火启动方式调峰,压火

频率就会显著增加,对浇注料造成的损坏也会增加。为了减缓这方面的影响,需要严格控制投煤后温升速率不超过 $90\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$,尽量使浇注料受热均匀^[26,37]。

3.3 压火对汽轮机的影响

为了延长压火时长,压火后机组负荷很低,汽轮机蒸汽流量很小。此时,由于鼓风摩擦等原因将引起汽轮机排汽温度升高,超限时需要喷减温水进行降温。而长期喷减温水可能对末级叶片造成汽蚀^[35],压火时要加强这方面的监视和控制。

为了降低压火后汽轮机出力,提高压火后汽轮机运行的安全性,可以将压火技术和汽轮机低压缸零出力改造相结合。基于低压缸零出力运行安全的需要,可以通过增加或改造运行监测点,充分了解低压缸通流部分的运行情况,通过喷涂金属层对低压缸末级叶片进行耐磨处理,减缓末级叶片汽蚀。通过引入中压缸排汽对低压缸进行冷却^[46],从而确保汽轮机在压火期间安全运行。

4 压火启动的环保性和经济性

4.1 压火启动的环保性

烟尘、 SO_2 和 NO_x 是目前电厂运行需要控制的三大烟气污染物。机组压火启动运行时,床料流化初期炉膛出口烟气中粉尘和 SO_2 体积浓度波动比较大,但是可以通过炉后的除尘和脱硫设施降低粉尘和 SO_2 的体积浓度,使其达标排放。

热态启动时,为保证床料流化、一次风率和炉膛过量空气系数都很大,启动时过量空气系数通常在 $1.4\sim 2.0$ 之间,因而启动阶段 NO_x 的生成量大。并且,启动过程中炉膛出口和尾部烟道整体温度低,无论是采用选择性非催化还原脱硝(SNCR)还是选择性催化还原脱硝(SCR),都低于脱硝反应窗口温度,脱硝效率基本为零, NO_x 排放难以达标,需要重点关注和研究。

4.2 压火启动的经济性

当压火热态启动调峰所获得的调峰收益大于压火热态启动的成本时,压火热态启动调峰才可能进行推广。相对于机组正常运行发电成本,压火热态调峰期间燃料成本为零。但当机组压火热态启动投煤不成功时,需要投油助燃,增加燃油成本,并且可能需要机组解列,造成机组非计划停运。压火热态

启动调峰机组频繁启停对主机和辅机设备寿命有一定的影响,可能会增加机组检修时间和费用,这些费用都应该均摊到机组压火成本中。机组压火热态启动调峰的收益主要是极深度调峰收益,应根据燃料价格和当地调峰政策等进行经济性分析。

5 无循环泵直流 CFB 锅炉压火调峰

无论是自然循环锅炉还是强制循环锅炉,在循环流化床锅炉压火期间,水冷壁内工质流量都能满足水冷壁受热面冷却需要。但是对于不带循环泵的直流锅炉,压火期间炉水不能循环,需要考虑压火期间水冷壁的安全性问题^[47-51]。为保证该类型锅炉压火初期的水动力安全,需要在压火初期炉膛温度整体较高时降缓机组负荷下降速率,来保证水冷壁有较大的水流量。在热态启动阶段,需要通过增加锅炉给水,确保水冷壁受热面的冷却。但是无论是压火初期还是热态启动阶段,直流锅炉工质侧带走的热量要比自然循环锅炉及强制循环锅炉多,所以同样条件下,直流锅炉压火时间显著变短,难以达到调度调峰时长要求。

6 结 论

循环流化床锅炉可以实现压火热态不投煤启动,随着电网对火电机组调峰需求的增加,CFB锅炉机组压火启动调峰可以作为一种新的调峰手段进行电网调峰。

在循环流化床锅炉压火启动调峰技术推广应用之前需要对以下问题进行深入研究:

(1) 循环流化床锅炉热态启动调峰时长作为调度人员和机组运行人员进行调度和压火调峰操作的基本参数,需要深入研究并给出准确的计算方法。

(2) 压火热态启动时, NO_x 的控制是压火启动调峰关键技术难题,需要进一步研究。

(3) 需要深入研究和评估频繁压火启动对机组寿命的潜在影响。

(4) 需要结合机组压火的直接成本和间接成本研究压火热态启动调峰经济性。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2021 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2022-01-26) [2022-04-29]. <http://www.>

- nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
- National Energy Administration. National energy administration releases national power industry statistics for 2021 [EB/OL]. (2022-01-26) [2022-04-29]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310441589.htm.
- [2] QI Yu-chen, HU Wei, DONG Yu, et al. Optimal configuration of concentrating solar power in multienergy power systems with an improved variational autoencoder[J]. Applied Energy, 2020, 274: 115124. 1-115124. 15.
- [3] YAO Xing, YI Bo-wen, YU Yang, et al. Economic analysis of grid integration of variable solar and wind power with conventional power system[J]. Applied Energy, 2020, 264: 114706. 1-114706. 14.
- [4] 杨天锋, 向 铎, 袁 鹏, 等. 高温储能金属氧化物研究综述及其与超临界二氧化碳循环耦合研究[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 1-11.
- YANG Tian-feng, XIANG Duo, YUAN Peng, et al. A review on studies on metal oxides for high-temperature energy storage and its coupling with supercritical carbon dioxide power cycle[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 1-11.
- [5] 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.
- ZHANG Guang-cai, ZHOU Ke, LU Fen, et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 17-23.
- [6] 于浩洋, 高明明, 张 缙, 等. 循环流化床机组深度调峰性能分析与评价[J]. 热力发电, 2020, 49(5): 65-72.
- YU Hao-yang, GAO Ming-ming, ZHANG Man, et al. Performance analysis and evaluation of deep peak-regulating for circulating fluidized bed units [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 65-72.
- [7] 岳光溪, 吕俊复, 徐 鹏, 等. 循环流化床燃烧发展现状及前景分析[J]. 中国电力, 2016, 49(1): 1-13.
- YUE Guang-xi, LYU Jun-fu, XU Peng, et al. The up-to-date development and future of circulating fluidized bed combustion technology[J]. Electric Power, 2016, 49(1): 1-13.
- [8] 申 欣, 贾 里, 赵 强, 等. 超临界CFB锅炉压火特性现场试验与数值模拟[J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2797-2807.
- SHEN Xin, JIA Li, ZHAO Qiang, et al. Field test and numerical simulation of banked fire characteristics of super-critical CFB boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(7): 2797-2807.
- [9] 孙 倩, 印 江, 牛 斌, 等. 300 MW 亚临界循环流化床发电机组的全程调峰控制研究[J]. 电力学报, 2020, 35(6): 522-527, 562.
- SUN Qian, YIN Jiang, NIU Bin, et al. Research on full-process peak regulation control of 300 MW subcritical circulating fluidized bed generator set [J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(6): 522-527, 562.
- [10] 施 斌, 程文峰, 余武高, 等. 循环流化床锅炉压火保护应用实践[J]. 能源研究与管理, 2019(4): 82-85.
- SHI Bin, CHENG Wen-feng, YU Wu-gao, et al. Application of pressure fire protection in CFB boiler [J]. Energy Research and Management, 2019(4): 82-85.
- [11] 甘益明, 王昱乾, 黄 畅, 等. “双碳”目标下供热机组深度调峰与深度节能技术发展路径[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 1-10.
- GAN Yi-ming, WANG Yu-qian, HUANG Chang, et al. Development path of deep peak-shaving and deep energy conservation technology for cogeneration units with 'dual carbon' target [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 1-10.
- [12] 段学农. 循环流化床锅炉大幅度调峰性能分析[J]. 华中电力, 2000, 13(5): 4-5, 8.
- DUAN Xue-nong. Characteristic analysis of peak-load operation of CFB boiler [J]. Central China Electric Power, 2000, 13(5): 4-5, 8.
- [13] 李维俊, 欧遵淦. 对 10 吨/时锅炉的改造[J]. 能源工程, 1984(3): 34.
- LI Wei-jun, OU Zun-gan. Modification of 10 t/h boiler [J]. Energy Engineering, 1984(3): 34.
- [14] 王 方, 韩锦珠. 在层燃锅炉上型煤燃烧的试验研究[J]. 动力工程, 1987(2): 48-54, 64.
- WANG Fang, HAN Jin-zhu. Experimental study on mold coal combustion in a laminar boiler [J]. Power Engineering, 1987(2): 48-54, 64.
- [15] 吴铭一, 李仲平. 小型热电厂排放热能的回收利用[J]. 能源研究与利用, 1990(2): 12-13.
- WU Ming-yi, LI Zhong-ping. Recovery and utilization of exhaust heat energy from small thermal power plants [J]. Energy Research and Utilization, 1990(2): 12-13.
- [16] 四川为增发水电采取的措施[J]. 吉林电力技术, 1991(5): 13.
- Sichuan takes measures to increase hydropower [J]. Jilin Electric Power Technology, 1991(5): 13.
- [17] 顾景贤, 程其耀. 降低工业锅炉污染的有效措施—引用蒸汽蓄热器[J]. 工业锅炉, 1991(4): 36-37.
- GU Jing-xian, CHENG Qi-yao. Effective measures to reduce pollution in industrial boilers—introduction of steam accumulators [J]. Industrial Boiler, 1991(4): 36-37.
- [18] 甘龙元. 锅炉房布局改造实例[J]. 北京节能, 1992(2): 39.
- GAN Long-yuan. Boiler room layout renovation example [J]. Beijing Energy Saving, 1992(2): 39.
- [19] 徐金全. 日开夜停锅炉的压火诀窍[J]. 节能, 1993(4): 34.
- XU Jin-quan. Know-how of boiler fire suppression [J]. Energy Saving, 1993(4): 34.
- [20] 徐金海, 王富岐. KZL2—13 型锅炉管板裂纹性质分析[J]. 中国锅炉压力容器安全, 1992(4): 53-54.

- XU Jin-hai, WANG Fu-qi. KZL2-13 boiler tube plate crack property analysis [J]. China Boiler and Pressure Vessel Safety, 1992(4):53-54.
- [21] 安丰宝,朱庆贵,贺艺科. 锅炉集箱开裂原因及处理方法[J]. 中国锅炉压力容器安全,1992,8(6):41-42.
AN Feng-bao, ZHU Qing-gui, HE Yi-ke. Causes and treatment methods of boiler header cracking[J]. China Boiler and Pressure Vessel Safety, 1992,8(6):41-42.
- [22] 王国俊. 操作快装锅炉怎样预防胀口渗漏[J]. 工业锅炉, 1994(4):40-41.
WANG Guo-jun. How to prevent the leakage of expansion joint by operating fast-loading boiler[J]. Industrial Boiler, 1994(4):40-41.
- [23] 丁新志,邓秀中. 浅谈锅炉冷态启动升压曲线的重要性[J]. 能源研究与利用,1996,5(5):19-20.
DING Xin-zhi, DENG Xiu-zhong. The importance of boiler cold start-up boost curve[J]. Energy Research and Utilization, 1996,5(5):19-20.
- [24] 王华良,曹庆保. 35 t/h 低倍率循环流化床锅炉运行经验[J]. 能源研究与利用,1998(2):40-41.
WANG Hua-liang, CAO Qing-bao. 35 t/h CFB boiler operation experience [J]. Energy Research and Utilization, 1998(2):40-41.
- [25] 石久胜,韦节廷,陶进. 间歇运行锅炉的污染物排放特征[J]. 通风除尘,1993,12(3):12-14.
SHI Jiu-sheng, WEI Jie-ting, TAO Jin. Pollutant emission characteristics of intermittent operation boilers[J]. Ventilation and Dust Removal, 1993,12(3):12-14.
- [26] 吕俊复,杨海瑞,郭庆杰,等. 水冷方形分离循环流化床锅炉的启动与压火[J]. 电站系统工程,2000,16(6):323-325,329.
LYU Jun-fu, YANG Hai-rui, GUO Qing-jie, et al. Start-up and hold-down performance of a CFB boiler with water cooled square cyclone[J]. Power System Engineering, 2000,16(6):323-325,329.
- [27] 董民中,任瑞利. 如何延长流化床锅炉的压火维持时间[J]. 节能与环保,2001(2):43-44.
DONG Min-zhong, REN Rui-li. How to prolong the holding time of banked fire of fluidized bed boiler[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2001(2):43-44.
- [28] 梁国仁. 锅炉在异态下的节能[J]. 化工装备技术,2001,22(3):43-44.
LIANG Guo-ren. Saving on energy for boiler[J]. Chemical Equipment Technology, 2001,22(3):43-44.
- [29] 张鲁湘,杨立莉. 循环流化床锅炉结焦原因分析与对策[J]. 河南化工,2004(6):24-25.
ZHANG Lu-xiang, YANG Li-li. Cause analysis of coking in circulation fluidized bed boiler and its countermeasure [J]. Henan Chemical Industry, 2004(6):24-25.
- [30] 李民,杨荣清,王如超,等. 丰源4#锅炉过热器爆管的分析[J]. 锅炉制造,2003(4):73-74.
LI Min, YANG Rong-qing, WANG Ru-chao, et al. Analysis of the superheater tube rupture of the 4# boiler in Fengyuan power plant [J]. Boiler Manufacturing, 2003(4):73-74.
- [31] 王会文. 间歇运行锅炉的污染物排放特征研究[J]. 山西能源与节能,2003(3):8-9.
WANG Hui-wen. Study on pollutant emission characteristics of intermittent operation boilers[J]. Shanxi Energy and Conservation, 2003(3):8-9.
- [32] 高洪培,孙献斌,吕怀安,等. 220 t/h 循环流化床锅炉运行特性分析[J]. 热力发电,2001(4):2-5.
GAO Hong-pei, SUN Xian-bin, LYU Huai-an, et al. Analysis on operational performance of a 220 t/h CFB boiler [J]. Thermal Power Generation, 2001(4):2-5.
- [33] 段钰锋,陈晓平,吴新,等. 增压流化床锅炉启动特性研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2001(6):45-51.
DUAN Yu-feng, CHEN Xiao-ping, WU Xin, et al. Study on characteristic of start-up process of a pressurized fluidized bed combustion boiler [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2001(6):45-51.
- [34] 刘青,吕俊复,杨海瑞,等. 116 MW 水冷方形分离循环流化床热水锅炉的运行经验 [C]//北京:中国动力工程学会,2004:223-229.
LIU Qing, LYU Jun-fu, YANG Hai-rui, et al. Operating experience of 116 MW water-cooled square separated circulating fluidized bed hot water boiler [C]// Beijing: China Society of Power Engineering, 2004:223-229.
- [35] 袁登友,欧志中,廖鹏,等. 300 MW 循环流化床锅炉机组压火的特性分析[J]. 中国电力,2008,41(7):43-46.
YUAN Deng-you, OU Zhi-zhong, LIAO Peng, et al. Characteristic analysis of banked fire for 300 MW CFB boilers [J]. Electric Power, 2008,41(7):43-46.
- [36] 王家万,张勇,黄伟,等. 300 MW CFB 锅炉压火技术措施[J]. 中国电力,2009,42(8):28-31.
WANG Jia-wan, ZHANG Yong, HUANG Wei, et al. Research on the technical measures of banking-up in 300 MW CFB boiler [J]. Electric Power, 2009,42(8):28-31.
- [37] 何映光. 300 MW 循环流化床锅炉压火对机组的影响分析[J]. 热力发电,2009,38(9):48-51.
HE Ying-guang. Analysis about influence of banking fire in 300 MW CFB boiler upon the unit [J]. Thermal Power Generation, 2009,38(9):48-51.
- [38] 李寿军,刘卫强. 300 MW 循环流化床锅炉压火及热态启动操作办法探讨[J]. 内蒙古电力技术,2011,29(3):102-104.

- LI Shou-jun, LIU Wei-qiang. Discussion of operation method for 300 MW CFB boiler banked fire and hot start-up[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2011, 29(3): 102 - 104.
- [39] 王 宏, 马 斌. 浅析 330 MW CFB 锅炉压火、热启动的安全性及控制措施[J]. 科技展望, 2015, 25(28): 37 - 38.
- WANG Hong, MA Bin. Analysis on safety and control measures of banked fire and heat startup of 330 MW CFB boiler[J]. Science and Technology, 2015, 25(28): 37 - 38.
- [40] 许先义. 亚临界循环流化床锅炉压火实践总结[J]. 神华科技, 2019, 17(2): 31 - 34.
- XU Xian-yi. Summary of banking fire practice of subcritical circulating fluidized bed boiler[J]. Shenhua Science and Technology, 2019, 17(2): 31 - 34.
- [41] 孙保民, 赵立正. CFB 锅炉设计煤种燃烧特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2017, 37(4): 267 - 272, 334.
- SUN Bao-min, ZHAO Li-zheng. Experimental study on combustion characteristics of the design coal for a CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(4): 267 - 272, 334.
- [42] CHAO Jun-nan, YANG Hai-rui, WU Yu-xin, et al. The investigation of the coal ignition temperature and ignition characteristics in an oxygen-enriched FBR[J]. Fuel, 2016, 183: 351 - 358.
- [43] 刘国鹏. CFB 锅炉爆燃的预防措施分析[J]. 电站系统工程, 2009, 25(2): 72.
- LIU Guo-peng. Analysis of measures to prevent CFB boiler explosion[J]. Power System Engineering, 2009, 25(2): 72.
- [44] 赵俊彬, 高 红, 冷 杰. 循环流化床锅炉压火启动风室爆燃原因分析[J]. 东北电力技术, 2008, 29(9): 33 - 35.
- ZHAO Jun-bin, GAO Hong, LENG Jie. Cause analysis on wind chamber explosion of CFB boiler at the time the restarting of combustion[J]. Northeast Electric Power Technology, 2008, 29(9): 33 - 35.
- [45] 王慧丽. 循环流化床锅炉结焦原因分析及预防措施[J]. 热力发电, 2007(2): 28 - 30.
- WANG Hui-li. Cause analysis of slagging in CFB boilers and preventive measures thereof [J]. Thermal Power Generation, 2007(2): 28 - 30.
- [46] 薛朝囡, 杨荣祖, 王 汀, 等. 汽轮机高低旁路联合供热在超临界 350 MW 机组上的应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 101 - 105.
- XUE Zhao-nan, YANG Rong-zu, WANG Ting, et al. Application of turbine HP-LP bypass system combining with heating in supercritical 350 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 101 - 105.
- [47] 范旭宸, 陈 晔, 郑 雄, 等. 600 MW 超临界循环流化床锅炉水冷壁热应力分析[J]. 动力工程学报, 2018, 38(4): 253 - 257.
- FAN Xu-chen, CHEN Ye, ZHENG Xiong, et al. Thermal stress analysis of water wall in a 600 MW supercritical CFB boiler[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(4): 253 - 257.
- [48] YAO Yu-ge, JIANG Ling, DENG Bo-yu, et al. Heat transfer analysis of stationary bed materials in a CFB boiler after a sudden power failure[J]. Fuel Processing Technology, 2021, 211: 106587. 1 - 106587. 9.
- [49] 欧阳诗洁, 李 娟, 董 乐, 等. 超超临界锅炉低负荷运行时的流动不稳定性计算分析[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 84 - 91.
- OUYANG Shi-jie, LI Juan, DONG Le, et al. Calculation and analysis on the flow instability of an ultra supercritical boiler under low load[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(7): 84 - 91.
- [50] 邓博宇, 张 缦, 李少华, 等. 失电事故下 350 MW 超临界 CFB 锅炉水冷壁安全性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4799 - 4807.
- DENG Bo-yu, ZHANG Man, LI Shao-hua, et al. Analysis on the safety of the water wall in a 350 MW supercritical CFB boiler under electricity failure condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4799 - 4807.
- [51] 王冬福, 肖 琨. 事故状态下超临界循环流化床锅炉炉内非稳态传热过程理论分析与计算[J]. 锅炉技术, 2015, 46(5): 35 - 38.
- WANG Dong-fu, XIAO Kun. Theoretical analysis and calculation of the unsteady heat transfer process of supercritical circulating fluidized bed boiler furnace under the emergency conditions[J]. Boiler Technology, 2015, 46(5): 35 - 38.

(刘 颖 编辑)