

# 直吹式制粉系统风粉偏差对机组灵活性的影响

刘定坡<sup>1</sup>, 杨培军<sup>1</sup>, 冯扩磊<sup>2</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 员盼锋<sup>1</sup>

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**近年来,风能发电和太阳能发电装机容量迅速增长,为提高新能源的消纳能力,燃煤机组灵活性运行是大势所趋。目前,大容量电站锅炉普遍配置直吹式制粉系统,磨煤机出口一次风管风粉分配偏差大的问题普遍存在,风粉分配偏差大直接限制机组灵活性运行。从制粉系统设备角度分析了磨煤机出口并联一次风管风粉分配偏差大的原因。对由于风粉分配偏差大导致锅炉运行过程中产生的各种问题如火焰偏斜、结焦、高温腐蚀、NO<sub>x</sub> 排放量高、飞灰可燃物高、锅炉效率低等进行阐述。该问题在机组灵活性改造过程中表现尤为突出,锅炉低负荷运行时,一次风管风粉分配偏差大会造成锅炉着火距离增大,燃烧不稳定甚至灭火的可能。炉内热负荷不均会导致锅炉汽水侧偏差加剧,恶化传热,受热面超温,直接影响机组运行安全。为改善一次风管风粉分配偏差,对比分析各种煤粉分配器的性能和优缺点,并阐述煤粉分配器在电站锅炉的应用情况和效果。随着灵活性运行工作的深入,需要对灵活性运行机组制粉系统进行改造,加装相匹配的煤粉分配器,改善风粉分配特性,提高机组运行稳定性和安全性。

**关键词:**直吹式制粉系统;风粉偏差;煤粉分配器;灵活性

**中图分类号:**TK39 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2019)02-0139-05

## Influence of air-powder distribution deviation of direct-blowing pulverizing system on unit operation flexibility

LIU Dingpo<sup>1</sup>, YANG Peijun<sup>1</sup>, FENG Kuolei<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, YUN Panfeng<sup>1</sup>

(1. China Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In recent years, the installed capacity of wind power generation and solar power generation is growing rapidly. In order to improve the absorption capacity of new energy, the flexible operation of coal-fired units is the general trend. At present, large-capacity power station boilers are generally equipped with direct-blowing pulverizing system, and the large deviation of pulverized coal and air distribution in the outlet air pipe of coal mill is a common problem. With the development of flexible operation of the unit, large deviation of pulverized coal and air distribution directly limits the flexible operation of the unit. In this paper, the reasons for the large deviation of pulverized coal and air distribution of the coal mill outlet parallel primary air duct were analyzed from the point of view of the pulverizing system equipment. Various problems in the boiler operation process caused by the large deviation of pulverized coal and air distribution, such as flame deflection, coking, high temperature corrosion, high NO<sub>x</sub> emission, high fly ash fuel and low boiler efficiency, were described. The problem is especially serious in the process of unit flexibility transformation. During low-load operation, the deviation of pulverized coal and air distribution will increase ignition distance of the boiler, resulting in unstable combustion and even extinguishing the fire. Uneven heat load in the furnace will aggravate the deviation of the steam in the boiler, worsen heat transfer, and overheat the heating surface, which will directly affect the operation safety of the unit. In order to improve the deviation of pulverized coal and air distribution, the performance advantages and disadvantages of pulverized coal distributors were analyzed, and the application and effect of pulverized coal distributor in power station boiler in recent years were introduced. Therefore, with the development of flexible operation, it is necessary to reform the pulverizing system

收稿日期:2018-12-01;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18120111

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51376148)

作者简介:刘定坡(1979—),男,新疆库车人,高级工程师,主要研究方向为电站锅炉制粉及燃烧技术。E-mail:ldpo@163.com

引用格式:刘定坡,杨培军,冯扩磊,等.直吹式制粉系统风粉偏差对机组灵活性的影响[J].洁净煤技术,2019,25(2):139-143.

LIU Dingpo, YANG Peijun, FENG Kuolei, et al. Influence of air-powder distribution deviation of direct-blowing pulverizing system on unit operation flexibility[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(2): 139-143.



移动阅读

of flexible operation units, install the matching coal powder distributor, improve the pulverized coal and air distribution characteristics, and improve the operation stability and safety of units.

**Key words:** direct-blowing pulverizing system; deviation of pulverized coal and air; pulverized coal distributor; flexibility

## 0 引言

近年来,我国风能发电和太阳能发电装机容量迅速增长,2017年,新增风电装机容量19.52 GW,新增太阳能发电装机容量53.38 GW<sup>[1]</sup>。虽然风能和太阳能提供了大量的清洁能源,但利用风能和太阳能等清洁能源发电存在一定的时间或季节限制,其发电负荷具有间歇性和不确定性等特点,接入电网后将对电网电能质量造成不利影响<sup>[2]</sup>。煤炭作为我国主要的一次能源,煤电机组在未来相当长一段时期内仍将是我国的主要电源,近年来装机容量也在不断增长。随着新能源和火电装机容量的持续增长即电源建设过快,同时,电负荷消纳能力不足,导致我国,尤其是“三北”地区弃风、弃光现象严重,弃风、弃光比例不断上升,新能源的布局结构很难得到充分发挥<sup>[3]</sup>。为提高新能源的消纳能力,燃煤发电机组必然要做出一定让步,因此,提升煤电调峰的能力,燃煤机组灵活性改造和运行是大势所趋。

## 1 直吹式制粉系统风粉分配偏差及危害

### 1.1 制粉风粉分配偏差定义

一次风粉的均匀性包括两方面:①同层各一次风管的风量(风速)均匀;②同层各燃烧器的风粉成比例,即各一次风管粉量均匀<sup>[4]</sup>。

制粉系统风量分配偏差 $\Delta Q$ 可表示为

$$\Delta Q = \frac{Q_i - \bar{Q}}{\bar{Q}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $Q_i$ 为磨煤机出口并列各支管风量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\bar{Q}$ 为磨煤机出口并列各支管平均风量, $\text{m}^3/\text{s}$ 。

制粉系统煤粉量分配偏差可表示为

$$\Delta\beta = \frac{\beta_i - \bar{\beta}}{\bar{\beta}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\Delta\beta$ 为煤粉量分配偏差,%; $\beta_i$ 为磨煤机出口各并列支管出力(粉量), $\text{kg}/\text{s}$ ;  $\bar{\beta}$ 为磨煤机出口并列各支管平均出力(粉量), $\text{kg}/\text{s}$ 。

一次风管的风、粉分配特性取决于2个因素:分叉管所处的位置不同造成的各管道阻力差异和磨煤机出口煤粉分配特性<sup>[5]</sup>。直吹式制粉系统一台磨煤机出口并列几根一次风管同时向一层燃烧器供给煤粉,切圆锅炉为4根或8根,对冲锅炉为4~8根。

因磨煤机布置位置和炉膛较大,使同台磨出口各一次风管长度和一次风管阻力差异大;运行过程中短的一次风管阻力小,风速高,而相对应长的一次风管阻力大,风速低,甚至低于一次风管满足输粉条件的临界风速,易造成一次风管积粉甚至发生堵管或烧损燃烧器等事故。因此,制粉系统风量分配偏差 $\Delta Q$ 是由并列各管道间的阻力差异造成的。

李芬和等<sup>[6]</sup>研究了磨煤机出口并列一次风管阻力不均衡对风粉分配的影响,各一次风管粉量分配不均衡,存在偏差,是磨煤机出口风粉气流的固有特性,与管道阻力不均即风量分配不均衡关系不大。

### 1.2 制粉系统的风粉分配偏差现状

目前,大容量锅炉普遍采用直吹式制粉系统,与配备中间储仓式制粉系统的锅炉不同,其在燃烧设备与制粉系统之间没有明显的界限,制粉系统已与锅炉本体形成了密切相关的整体。因此,制粉系统运行的好坏直接影响锅炉的安全稳定运行。电力行业标准<sup>[7]</sup>规定:对中速磨直吹式制粉系统,同层燃烧器各一次风管之间的煤粉和空气应均匀分配,其风量偏差分配不大于 $\pm 5\%$ ,煤粉分配偏差不大于 $\pm 10\%$ <sup>[8]</sup>。但机组实际运行过程中,同层燃烧器各一次风管风粉分配偏差达 $\pm(30\% \sim 40\%)$ 的现象普遍存在<sup>[9]</sup>,严重影响机组制粉系统和锅炉运行安全。

### 1.3 制粉系统运行

一次风管风粉分配偏差直接影响制粉系统的安全运行。如风速最低的一次风管易造成煤粉沉降,水平管段存在积粉,在磨煤机启动或停运时,由于系统扰动较大,可能发生煤粉自燃或爆炸等影响机组运行的安全事故。另外,风速较低的一次风管还易出现煤粉堵管进而发生着火或燃烧器烧损的事故。由于电厂日益重视直吹式制粉系统风量偏差对制粉系统的影响,且可调节一次风管阻力的节流元件-可调缩孔,在电厂设计建设时即作为标准部件应用至制粉系统的每根一次风管上。通过调节可调缩孔的开度,易满足制粉系统冷、热态时各磨出口并列一次风管风量偏差不大于 $\pm 5\%$ 的要求。然而,磨煤机出口至各并列输粉管入口的风粉分配不均属于制粉设备本身的固有特性<sup>[10]</sup>,虽明确规定:为保证并列输粉管道风粉分配均匀,在大容量锅炉直吹式制粉系统中必须装备新型的煤粉分配器,但目前电厂对

煤粉粉量分配偏差的重视程度不够,导致电厂中煤粉粉量分配偏差大的现象普遍存在。粉量分配偏差大对锅炉的安全经济运行影响较大。

#### 1.4 锅炉运行

燃煤锅炉的一次风管是担负燃料输送和供应的重要管路,管内风粉分配状况直接影响锅炉炉内的燃烧状况、空气动力场状态和热负荷分布,影响锅炉运行的安全性、经济性和环保性。各燃烧器间的风粉分配不均导致个别一次风管煤粉浓度高/煤粉浓度低,煤粉浓度在合适的情况下,燃烧器出口煤粉气流的着火和稳燃最稳定,如偏离该值会出现着火提前或延迟,着火提前导致燃烧器烧变形甚至烧损,着火延迟导致燃烧器脱火,火检无法检测到火焰信号。同时,各燃烧器风粉偏差较大,在风煤比低的燃烧器内,使飞灰含碳量升高,并产生还原性气氛,降低锅炉效率,增加发生高温腐蚀和水冷壁结渣的可能性;在风煤比高的燃烧器所对应的炉内,局部区域氧浓度过高,生成大量 $\text{NO}_x$ 等氮氧化物<sup>[11]</sup>。风粉分配不均会导致火焰偏斜、冲刷炉墙、炉膛热负荷和蒸汽温度偏差,炉内的热负荷状况由各燃烧器的出力决定。切圆锅炉因气流在炉内存在强烈旋转和扰动,对制粉系统风粉分配偏差敏感性略差;但因对冲锅炉和“W”火焰锅炉的各燃烧器较为独立,烟气在沿炉宽方向扰动较小,因此,对燃烧器风粉分配偏差非常敏感<sup>[12]</sup>。由于风粉分配不均导致炉内热负荷偏差的问题客观存在,引起局部还原气氛强而产生受热面局部高温腐蚀或结焦、受热面超温、爆管等问题,严重影响机组运行的安全性和经济性。由制粉系统一次风粉分配不均导致锅炉不能正常运行事故较多,在机组承担调峰任务甚至灵活性运行,且环保要求越来越严格的情况下,制粉系统一次风粉分配均匀性对锅炉稳定安全运行尤为重要。

## 2 风粉分配偏差对机组灵活性运行的影响

根据国家要求,提升机组灵活性运行的预期是将热电机组增加20%额定容量的调峰能力,最小技术出力达40%~50%额定容量;纯凝机组增加15%~20%额定容量的调峰能力,最小技术出力达30%~35%额定容量。我国部分具备改造条件的电厂已预期达到国际先进水平,机组不投油稳燃时,纯凝工况最小技术出力为20%~25%。随着锅炉出力降低,锅炉仅1~2台磨煤机运行,直吹式制粉系统各燃烧器一次风粉分配均匀程度直接决定锅炉运行的安全性、稳定性。

如果机组在20%负荷运行,可选择1~2台磨

运行,但1台磨运行机组运行风险过大,一般选择2台磨运行以减小运行压力,而2台磨运行时,煤量均较小,单台磨的风煤比已偏离正常风煤比,即煤粉浓度较低。如果一次风管风粉分配偏差较大,则个别一次风管煤粉浓度低,可大幅增加锅炉灭火的可能性,因此,风粉分配偏差直接决定机组灵活性运行时的安全性,是机组灵活性运行的保障。

低负荷运行时,由于风粉分配偏差大造成锅炉受热面管壁壁温偏差大甚至超温,影响在超(超)临界参数锅炉实现灵活性运行。机组灵活性运行时,若炉内火焰偏斜,热负荷偏差大,会使水冷壁管的沸腾点不同步推迟,此时尽管水冷壁的总流量保持不变,但各管内工质流量分配不均或流量不稳定,从而产生水动力不稳定和脉动现象。负荷越低,压力越低,水动力不稳定性越明显<sup>[13]</sup>。由工质侧水动力不稳定性 and 烟气侧的热负荷偏差共同作用下,工质流量低且处于炉内热负荷高状态下的水冷壁管极易出现传热恶化,水冷壁壁温超温且难以控制。另外,灵活性运行对机组调峰能力和负荷升降速率都有要求,同样,快速升降负荷时也会受到受热面管壁温度超温问题的限制而无法实现。

低负荷时,主蒸汽和再热蒸汽汽温均偏低,脱硝入口烟温下降甚至无法满足最低烟温要求。电厂为保证相关参数,采取启动较靠上层的磨煤机、停运靠下层磨煤机缓解。此时炉膛火焰整体充满度较差,锅炉抗干扰能力较差,如果制粉系统风粉分配不均,极易出现燃烧不稳或灭火事故。

## 3 煤粉分配偏差特性改善措施

为了改善灵活性运行下锅炉直吹式制粉系统的风粉分配偏差,加装煤粉分配器是有效可行的手段。

### 3.1 煤粉分配器的发展

煤粉分配器是将煤粉气流均匀分配至若干支管的装置,大部分电厂未按行业规程安装性能优良的煤粉分配器,仅在磨煤机出口并联一次风管上安装可调节阻力的节流元件——可调缩孔,可调整风量分配,无法调整煤粉分配。

国外煤粉分配器在电厂应用始于20世纪50年代;我国最早的应用是在20世纪70年代,淮南电厂引进的120 MW锅炉配采用扩散式分配器的E70型磨煤机;80年代,陡河电厂引进的250 MW锅炉,配采用扩散式煤粉分配器的8.5E型磨煤机;姚孟电厂引进的300 MW锅炉,配采用格栅式煤粉分配器的RP型磨煤机;朝阳电厂200 MW锅炉改造工程引进了BABCOCK的MPS型磨煤机及煤粉分配器;

90年代,由西安热工研究院等开发研制的格栅型煤粉分配器应用于河南首阳山电厂、山东龙口电厂和江西丰城电厂等200~300 MW锅炉制粉系统。

目前,国内外常见的煤粉分配器如下:

1)扩散型煤粉分配器。直接安装于磨煤机出口,利用磨出口一次风粉混合物经分配器各截面的收缩和扩散过程中减速、加速及流场惯性,加强扰动、混合,使一次风粉混合物在分配器出口圆周方向分布均匀化。这种分配器固有分配偏差为 $\pm(15\% \sim 20\%)$ ,实际应用中,由于管道阻力特性不同导致附加偏差,总分配偏差达 $\pm(30\% \sim 40\%)$ ,常用于中速磨出口一次风粉气流的分配。

2)径向型煤粉分配器。主要应用在前苏联,是一种断面为圆形的格栅型分配器,径向布置格栅,布置36个格栅时,测试一次风粉分配偏差为 $\pm(10\% \sim 15\%)$ ,仅应用于2根煤粉管道的制粉系统,存在由煤粉管道阻力特性引起的附加偏差问题。

3)格栅型煤粉分配器。主要应用在德国和前苏联,利用格栅原理将一次风粉混合物切割为多股气流,切割后的气流采用间隔混合的方式进入下游2个支管。这种分配器分配偏差为 $\pm(20\% \sim 25\%)$ 。这种分配器性能略好,但实际应用中安装空间大,仍不能满足大容量机组安全经济运行的需要。

4)双可调煤粉分配器。该分配器的工作原理为,首先利用一次风粉混合物通过煤粉浓淡分离装置将气流分割为2路:一路为煤粉浓度较高但流量较低的气流,另一路为流量较高但煤粉浓度较低的气流,即浓相空间和稀相空间。在2路气流中布置不同的调节机构,分别对这2股气流进行调整并重新分配,分配后将浓相和淡相气流在分配器各出口

相互混合,每个出口对应一根煤粉管道,从而实现对各根进入燃烧器煤粉管道中的煤粉量及空气流量分别调整和分配。在设计过程中对煤粉管道阻力特性引起的附加偏差进行均衡,通过调整双可调煤粉分配器上浓相和稀相调节机构,可实现磨煤机出口各并列支管一次风粉混合物分配均匀,达到相关行业标准。该技术已成功应用于数十台1 000 MW及以下机组的锅炉直吹式制粉系统,均取得了良好效果。该分配器在运行中可调,只需将分配器上的浓相和稀相调节机构调整到恰当位置即可达到均匀分配的效果。该分配器可将煤粉和空气的分配偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内,最佳工况下煤粉与空气的分配偏差可控制在 $\pm 5\%$ 以内,且阻力较小,一般在0.5 kPa以下,气流分支数不受限制,可根据需要设计<sup>[14]</sup>。

5)紧凑型煤粉分配器。虽然双可调煤粉分配器有效解决了大容量机组直吹式制粉系统出口并列一次风管风粉分配偏差大的问题,但在实际应用中,因其结构复杂,占用空间大,对原有磨煤机出口空间受限的制粉系统加装煤粉分配器存在很大的难度。紧凑型煤粉分配器克服双可调煤粉分配器的缺点,结构紧凑,占用空间小。该分配器为环形煤粉分配箱,其又分为若干个仓体,各仓体的底部入口设有调节煤粉分配的调节装置,各仓体顶部出口与各一次风管相连通,并设有风量调节装置。因一次风管仍按改造前的布置方式——周向布置,仅将一次风管和磨煤机的接口向上提高1.5~2.0 m。煤粉从磨煤机扩散段出来后进入环形空间中的各仓体,经煤粉调节装置,使进入并列一次风管中粉量偏差控制在 $\pm 10\%$ 以内,再经风量调节装置,使各管道阻力特性一致,达到风量分配偏差在 $\pm 5\%$ 以内<sup>[15]</sup>。

几种分配器比较见表1。

表1 分配器比较

Table 1 Comparison of the distributors

分配器	煤粉分配偏差/%	适用机组容量/MW	阻力	是否可调	空间要求
扩散型	$\pm(30 \sim 40)$	1 000 以下	较小	无法调节	集成在磨煤机体内
径向型	$\pm(10 \sim 15)$	50 以下	较大	无法调节,仅应用于一分二场合	空间要求不高
格栅型	$\pm(20 \sim 25)$	300 以下	很大	无法调节,应用于一次风管根数为偶数场合	空间要求很高,一次风管根数越多,空间要求越大
双可调	$\leq \pm 10$	1 000 以下	小,<500 Pa	可调节,应用于一次风管为2~8根场合	空间要求高,特别是一次风管超过3根时
紧凑型	$\leq \pm 10$	1 000 以下	小,<500 Pa	可调节,应用于一次风管为2~8根场合	空间要求低,弥补双可调对空间要求高的缺点

### 3.2 煤粉分配器的应用效果

近年来,大容量机组增多,因直吹式制粉系统风

粉分配差而影响锅炉安全运行的问题日益突出。某电厂2台1 000 MW机组锅炉采用东方锅炉厂设计

制造的超超临界燃煤锅炉,对冲燃烧方式,每层8只燃烧器,由一台磨煤机供煤粉。在实际运行过程中,由于制粉系统风粉分配偏差达 $\pm 40\%$ ,使炉内热负荷偏差大,在运行中出现两侧烟温偏差大、水冷壁管壁温度偏差大且易超温、高温过热器和高温再热器存在局部超温现象,限制了过热蒸汽和再热蒸汽温度甚至无法带满负荷、 $\text{NO}_x$ 排放量偏高、飞灰含碳量偏高等。加装煤粉分配器后,风粉分配偏差达到要求,各受热面壁温偏差大和超温现象得到有效解决,蒸汽品质达到额定参数,机组带负荷能力上升。

某电厂2台330 MW机组锅炉采用北京B&W公司生产的超临界参数燃煤锅炉,采用对冲燃烧方式,每层4只燃烧器,由一台磨煤机供粉。在实际运行过程中,由于风粉分配偏差达 $\pm 30\%$ ,导致运行过程中水冷壁壁温偏差达 $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,水冷壁壁温超温严重,经燃烧调整后并无好转。加装煤粉分配器后,风粉分配偏差达到要求,水冷壁超温现象解决,水冷壁壁温偏差下降至 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 以内。

## 4 结 论

1) 目前运行的大容量直吹式制粉系统风粉分配偏差大,最大可达 $\pm 40\%$ ,造成机组灵活性运行工况下的炉内热负荷偏差大,受热面管壁温度偏差大且易发生传热恶化和超温,极限深度调峰工况下,磨煤机仅1~2台运行,一次风粉分配偏差大可能直接造成燃烧恶化导致灭火事故。

2) 现有煤粉分配器技术已可解决大容量直吹式制粉系统风粉偏差大的问题,并成功运行。随着灵活性运行工作的深入,调峰程度的加大,需对灵活性运行机组制粉系统组进行改造,加装相匹配的煤粉分配器,达到合理分布炉内热负荷,减少火焰偏斜,减轻受热面超温,提高机组运行稳定性和安全性。

## 参考文献 (References):

- [1] 中国电力联合会. 2017—2018年度全国电力供需形势分析预测报告[EB/OL]. (2018-02-06)[2018-06-30]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/gongzuodongtai/2018-02-01/177584.html>.
- [2] 吕志盛,闫立伟,罗艾青,等. 新能源发电并网对电网电能质量的影响研究[J]. 华东电力,2012(2):251-256.  
LYU Zhisheng, YAN Liwei, LUO Aiqing, et al. Impact of new energy power grid-integration on grid power quality[J]. East China Electric Power, 2012(2):251-256.
- [3] 裴哲义,郭国梁,胡超凡. 富余可再生能源跨区电力现货交易的探索与实践[J]. 中国电力,2018,51(1):16-21.  
PEI Zheyi, GUO Guoliang, HU Chaofan. Exploration and practice of transregional electricity spot trading of surplus renewable energy[J]. Electric Power, 2018, 51(1):16-21.
- [4] 侯致福,杨玉环,高建强. 一次风管风粉均匀性影响因素研究[J]. 东北电力技术,2011,32(8):1-3.  
HOU Zhifu, YANG Yuhuan, GAO Jianqiang. Research on uniformity of wind-powder with influencing factor for primary air pipeline[J]. Northeast Electric Power Technology, 2011, 32(8):1-3.
- [5] 王俊贤,郭建军. 直吹式制粉系统风、粉分配特性试验研究[J]. 山西电力,2000(1):21-25.  
WANG Junxian, GUO Jianjun. Test research on the air-coal distribution characteristics of direct-fired system[J]. Shanxi Electric Power, 2000(1):21-25.
- [6] 李芬和,苏佩琴,陈炳荣. 煤粉分配器试验研究[J]. 热力发电,1985(6):1-15.  
LI Fenhe, SU Peiqin, CHEN Bingrong. Testing research of pulverized coal distributor[J]. Thermal Power Generation, 1985(6):1-15.
- [7] 赵仲璇,张安国. 火力发电厂煤粉制备系统设计和计算方法[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [8] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 中华人民共和国电力行业标准 DL/T 5145—2002:火力发电厂制粉系统设计计算技术规定[S]. 北京:中国电力出版社.
- [9] 杨菁,冯国勇. 离心式可调煤粉分配器的研制和应用[J]. 上海电力,2005(6):614-617.  
YANG Jing, FENG Guoyong. Development and application of centrifugal pulverized coal distributor[J]. Shanghai Electric Power, 2005(6):614-617.
- [10] 周明,焦世超. 一次风粉均匀性方案的研究[J]. 中国科技纵横,2014(24):114-115.  
ZHOU Ming, JIAO Shichao. Research on uniformity of primary air and powder[J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2014(24):114-115.
- [11] 靳菲,阎维平,苏宏亮,等. W型火焰锅炉一次风粉参数测量及调平试验研究[J]. 热力发电,2013,42(11):54-59.  
JIN Fei, YAN Weiping, SU Hongliang, et al. Parameter measurement and balancing experiment of primary air and powder in a W-flame boiler[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11):54-59.
- [12] 武岳. W形火焰锅炉粉量均匀性优化特性研究[J]. 华电技术,2018,40(1):5-9.  
WU Yue. Study on characteristics of uniformity optimization on pulverized coal flow in a w-flame boiler[J]. Northeast Electric Power Technology, 2018, 40(1):5-9.
- [13] 樊泉桂. 超超临界锅炉设计及运行[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [14] 王月明. 立式双可调煤粉分配器:200320103036X[P]. 2004-11-24.
- [15] 贾波,晋中华,杨培军,等. 一种紧凑型煤粉分配器:CN107191960A[P]. 2017-06-06.