

钢球磨煤机钢球级配和补球优化试验研究

何翔,魏增涛,周文台,马达夫,施鸿飞,陈端雨

(上海发电设备成套设计研究院,上海 200240)

摘要:为降低钢球磨煤机制粉单耗和研究较佳的补球规律,针对某600 MW机组双进双出钢球磨进行了煤粉等速取样、钢球筛分以及补球优化的运行试验。结果表明:根据煤粉细度和均匀性指数可以推测出钢球级配的变化;补球应将钢球平均球径控制在初始平均球径附近,且补球时应先稳住大球级配,逐步适当提高小球级配;合理的级配可以使得相同工况下煤粉均匀性指数提高至0.8以上、制粉单耗平均下降近3 kWh/t;得到了钢球磨损量与合理补球的信号。

关键词:钢球磨煤机;级配;磨损;补球;制粉单耗

中图分类号:TK223.25

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2016)06-0071-05

Optimization of steel ball grading and filling of ball mill

HE Xiang, WEI Zengtao, ZHOU Wentai, MA Dafu, SHI Hongfei, CHEN Duanyu

(Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to lighten the wearing of steel balls and obtain a better way to fill steel balls, the experiments of coal fines sampling and screening, steel balls filling were conducted taking a 600 MW double-in-out ball mill as research object. The results showed that, the change of steel ball grading could be reflected by coal fineness and evenness index. When filling, the average diameter should be around the primary diameter. The best filling method was stabilizing the grading of the bigger balls, then increasing the grading of smaller balls. The proper grading could increase the evenness index to above 0.8, and decreased unit loss by 3 kWh/t.

Key words: ball mill; grading; wearing; filling balls; unit loss

0 引言

钢球磨煤机制粉系统适用于无烟煤及磨损指数 $Ke > 3.5$ 的煤种^[1]。钢球的级配、磨损、补球等特性具有“黑箱子”性质,只能通过运行数据、煤粉取样数据及倒球筛分钢球数据来判断真实的级配变化、钢球磨损等特性。

在球径方面,我国早期火力发电厂配备的球磨机及球径的确定主要是根据前苏联的经验公式附加一定的修正进行计算,比如拉苏莫夫公式、奥列夫公式和邦德公式等^[2];后来也有学者引进欧美的一些计算公式进行修正后再使用,比如欧美的Allis-Chalmers公式和Re. Xnord公司的磨煤机自带的计算公式^[3];国内较为有名的是段希祥提出的球径半

理论公式^[4];统计进入磨煤机的原煤粒度区间,依照“多碎少磨、以碎代磨”的原则,从粒度减小的统计趋势来进行钢球球径选择的优化^[1,4]。在级配方面,常见的是等腰三角形法^[5]、等差数列法^[6]、多级试配(图表)法^[7]等。此外,因为钢球磨损量与球径成反比^[8],有学者认为大球比例高碾磨性能更好^[9];也有学者认为小球比例高会使得小球撞击点增大一个数量级,能量传递面扩大了,综合经济效益更大^[1,4]。总的来看,3类级配方式:纺锤形、哑铃形、棒槌形最为流行。在补球方面,根据磨煤机电流和一些经验数据进行补球,普遍以优先甚至只添加大球径的钢球为主,容易造成磨煤机偏离最佳钢球装配系数下运行^[9]。余涛等^[9]提出了钢球直径变化的概率密度矩阵,从统计学角度得出了需要补球

收稿日期:2016-02-15;责任编辑:孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.06.014

作者简介:何翔(1982—),男,重庆人,工程师,硕士,研究方向为煤清洁燃烧及电厂全厂经济性研究。E-mail: seanjastyt@163.com

引用格式:何翔,魏增涛,周文台,等.钢球磨煤机钢球级配和补球优化试验研究[J].洁净煤技术,2016,22(6):71-75,81.

HE Xiang, WEI Zengtao, ZHOU Wentai, et al. Optimization of steel ball grading and filling of ball mill [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(6): 71-75, 81.

的外径和级配数据;任志宇等^[8]从统计学角度建立了运行工况不变时的钢球稳态磨损特性方程;綦守荣等^[10]依据矩阵理论中的泛灰数理论,建立了既能反映工况条件参数的影响又能体现运行经济性的钢球磨损一般数学模型;刘如金^[9]在综合前苏联等公式的基础上,提出了平衡补球法与补球的参考曲线。在磨损方面,一个方向是研究钢球、衬板不同材料的硬度、脆性以及寿命等。汪焰流^[11]分析了马钢热电厂的磨煤机衬板磨损原因;刘玉海^[12]认为虽然优质钢球价格高,但综合效益更好,折算下来钢球成本能节约 10 万元;赵太平等^[13]通过研究不同衬板材料,对煤粉料位监控装置进行了优化,降低了球耗。另一个方向则是建立钢球磨损的数学模型,进行大量的统计计算,从理论上求得钢球的磨损量,然后以此结论指导补球。

综上所述,球磨机的球径、级配、磨损和运行维护都有大量的研究,但实际应用中,火电机组负荷变化频繁,磨煤机的运行参数一直在变,从理论上得到的结果难以应用于实际生产中。本文立足长周期的煤粉取样试验、简化文献中复杂的数学模型,再与锅

炉后炉前的钢球筛分结合,对钢球磨的钢球级配、磨损和补球进行了优化。

1 试验参数的确定

试验 600 MW 机组,锅炉为一次中间再热、超临界压力变压运行带内置式再循环泵启动系统的直流锅炉、单炉膛、平衡通风、固态排渣、全钢架、全悬吊结构、 π 型布置、露天布置。锅炉燃用无烟煤,采用 W 火焰燃烧方式,在前、后拱上共布置有 24 组狭缝式燃烧器,6 台 BBD 062(MSG4060A) 双进双出磨煤机直吹式制粉系统。

1.1 钢球球径

钢球的平均球径分为质量加权平均、数量加权平均和相等质量加权平均 3 种。多数电厂采用的是质量加权平均,但也有学者、电厂工程师研究得出相等质量加权平均是比较准确的描述钢球平均球径的方法,其综合考虑了质量、个数^[14]。3 种平均方法得到的结果见表 1。这里以试验磨为例,检修后新钢球($\phi 30$ mm、 $\phi 40$ mm、 $\phi 50$ mm)各 33.3%,共计 86 t。

表 1 3 种平均球径计算结果
Table 1 Three mean diameters calculation results

钢球尺寸/mm	钢球初始质量/t	级配	钢球初始个数	加权质量球径/mm	加权数量球径/mm	加权相等质量球径/mm
30	28.50	0.33	257 269			
40	28.75	0.33	109 487	40.03	35.24	36.74
50	28.75	0.33	56 058			

从表 1 可以看出,这样的级配方式得到的平均球径实际上是 36.74 mm。

1.2 钢球磨损

在新运行周期内,利用停机时间把钢球全部倒出进行筛分即可知道大球、中球、小球的剩余量,也就得到了各自的磨损量以及磨损尺寸。 $\phi 50$ mm、 $\phi 40$ mm、 $\phi 30$ mm 钢球各自的剩余量计算方法如下

$$\pi\rho\{n_1[50-X]/1\,000\}^3=6(G_1-G'_1) \quad (1)$$

$$\pi\rho\{n_2[40-Y]/1\,000\}^3=6(G_2-G'_2) \quad (2)$$

$$\pi\rho\{n_3[30-Z]/1\,000\}^3=6(G_3-G'_3) \quad (3)$$

式中, ρ 为钢球的密度,kg/m³; n 为各外径钢球的个数; X 、 Y 、 Z 分别是大、中、小球磨损的尺寸,mm; G_1 、 G_2 、 G_3 是 3 种球原始加入时的质量,t; G'_1 、 G'_2 、 G'_3 是 3 种钢球剩余的质量,t。倒出钢球后,即可求得上述 X 、 Y 、 Z 值,从而得出级配的变化。

由于历次补球对整个级配的影响很大,而且不可能频繁倒球进行全筛分试验,故需要知道大致的钢球磨损尺寸。钢球平均磨损方程为

$$\pi\rho\{n_1[50-X]/1\,000\}^3+n_2[40-Y]/1\,000\}^3+n_3[30-Z]/1\,000\}^3=6(G_1+G_2+G_3-G_0) \quad (4)$$

这里假设 $\phi 50$ mm、 $\phi 40$ mm、 $\phi 30$ mm 钢球各自的磨损尺寸一样,由于小球个数多,仍然满足小球磨损量大,大球磨损量小的原理。式中, G_0 是 3 种钢球磨损的总质量,t。则通过上述方程即可求出磨损量、磨损尺寸的变化。

1.3 补球信号

调取长周期的磨煤机平均给煤量 Q (t/h), 累积运行时间 T (h), 初始加入钢球量($G_1+G_2+G_3$)、历次补球量 G_b (t) 和倒球筛分剩余量($G'_1+G'_2+G'_3$) 来计

算钢球消耗量 $\Delta G(t)$ 和累积给煤量 $Q_L(t)$; 同时求得钢球单耗 $K(g/t)$, 并得出补球信号, 即

$$\Delta G = (G_1 + G_2 + G_3) + G_b - (G'_1 + G'_2 + G'_3) \tag{5}$$

$K = \Delta G / Q_L$, 那么每消耗 1 t 钢球的有效运行时间 $T = 1 / KQ$ 。

2 运行试验工况

2.1 煤质分析

入炉煤工业分析见表 2。由表 2 可知, 每个时间段的入炉煤质较为稳定。

表 2 入炉煤工业分析

Table 2 Proximate analysis of feeding coal

日期	全水/ %	空干基 灰分/%	干燥无灰基 挥发分/%	固定 碳/%	低位发热量/ (MJ·kg ⁻¹)
2013-10-22	8.20	32.44	11.35	58.86	20.55
2013-10-23	8.47	32.96	11.49	58.34	20.56
2013-10-24	7.82	31.95	11.28	59.43	21.13
2013-10-25	7.90	31.25	11.09	60.78	21.13
2014-01-03	7.40	30.24	11.35	61.53	21.58
2014-03-09	7.90	37.03	13.00	53.73	18.73
2014-08-08	9.60	32.79	12.29	57.53	19.76
2014-08-09	10.17	34.45	12.71	55.93	18.97

2.2 试验方法

2013 年 10 月, 1 号炉启动后至 2014 年 11 月, 开展了 4 次煤粉取样、多次补球、1 次倒球和 1 次补球优化, 煤粉取样及历次补球见表 3。

表 3 煤粉取样和补球情况

Table 3 Pulverized sample and ball filling

日期	执行
2013-10-22	第 1 次煤粉等速取样
2014-01-03	第 2 次煤粉等速取样
2014-02-27	加旧钢球 3 t
2014-03-08	第 3 次煤粉等速取样
2014-04-17	加 $\phi 40$ mm 球 3 t
2014-07-10	加 $\phi 40$ mm 球 3 t
2014-07-30	加 $\phi 40$ mm 球 3 t
2014-08-07	第 4 次煤粉等速取样
2014-09-14	加 $\phi 40$ mm 球 3 t
2014-11-13	加 $\phi 50$ mm 球 1 t; 加 $\phi 30$ mm 球 2 t

3 结果分析

通过对 B 磨煤机的性能试验, 考查磨煤机出口

温度、动态分离器转速、容量风、磨煤机出力变化对煤粉特性的影响。历次煤粉取样试验都是在下述工况下进行, 固定其余几组运行参数, 变化某一项参数, 在相同的条件下进行煤粉取样与分析, 每次进行 9 个工况的取样试验。

固定给煤量在 40 t/h 和磨煤机容量风挡板开度在 55%, 改变动态分离器转速从 50%、58%、65% 到 75%, 对应的工况是 1、3、5、6。固定给煤量在 40 t/h 和磨煤机动态分离器转速在 58%, 改变磨煤机容量风挡板开度在 45%、55% 到 65%, 对应的工况是 2、3、4。固定给煤量在 40 t/h、磨煤机动态分离器转速在 65% 和容量风挡板开度在 55%, 改变磨煤机分离器出口温度在 97 ℃ 和 105 ℃, 对应的工况是 7、8。固定磨煤机分离器在 65% 和磨煤机容量风挡板开度在 55%, 磨煤机给煤量在 45 t/h, 对应的工况是 9。

3.1 煤粉特性和制粉单耗

图 1 是前后几次取样的煤粉细度 R_{75} 和 R_{90} 对比。图 2 是均匀性指数 n 的对比。煤粉经 0.18、0.125、0.09、0.075、0.061 mm 筛分。其中, 留在上面两级筛分上的煤粉量除以总过筛量就是 R_{90} 值; 留在上面三级筛子上的煤粉量除以总过筛量就是 R_{75} 值。

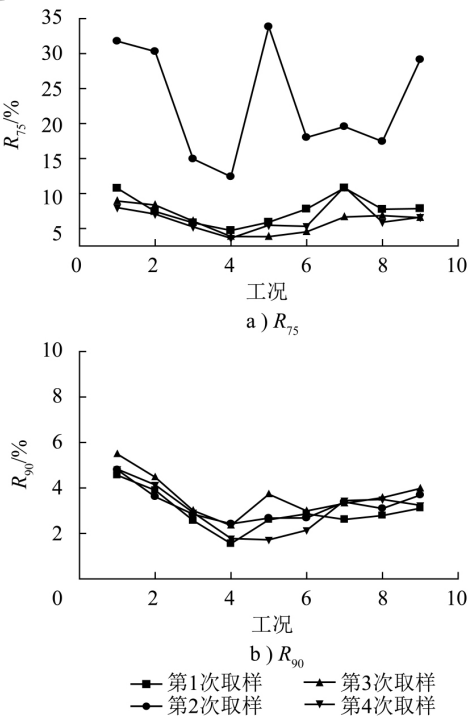
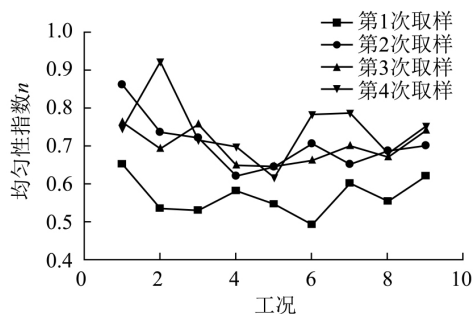


图 1 各次取样的 R_{75} 和 R_{90} 对比

Fig. 1 Comparison of R_{75} and R_{90}

图 1a 中第 2 次取样时的 R_{75} 较大, 图 1b 中 R_{90} 值总体偏小, 但是第 3 次取样 R_{90} 达到最大, 其余几

图 2 各次取样 n 的比较Fig. 2 Comparison of n

次取样显示煤粉太细。若将分离器转速降低到工况 1 或 2 对应的 50% 和 58% 时, R_{90} 值仍维持在 6% 左右, 而且可以提高磨出力, 降低磨电耗。所以可以确定分离器转速不宜过大。

图 2 表明, 第 1 次取样的各个工况下的 n 值很小, 在 0.6 左右, 这是新加钢球后炉之后的试验结果, 说明初始级配不是最合理的。图 3 是前后几次取样下的制粉单耗。通过上述特性对比, 认为第 3 次取样对应的级配是 4 次试验下最佳的。

3.2 级配

为了得到 B 磨煤机磨损及历次补球后各级钢球的比例, 于 2014 年 8—9 月检修期间将 B 磨煤机中钢球全部倒出, 采用焊制的钢球筛将 $\phi 20 \sim \phi 30$ mm、 $\phi 30 \sim \phi 40$ mm、 $\phi 40 \sim \phi 50$ mm 的钢球分别

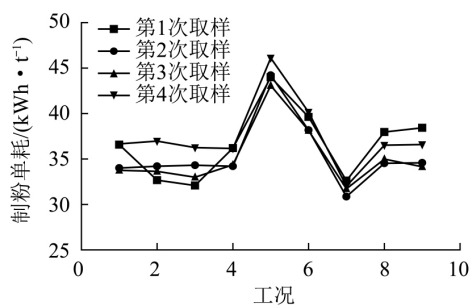


图 3 各次取样的制粉单耗

Fig. 3 Power consumption of pulverized system

过筛, 之后过秤即得到钢球级配, $\phi 40 \sim \phi 50$ mm 含量为 34.09%、 $\phi 30 \sim \phi 40$ mm 为 44.25%、 $\phi 20 \sim \phi 30$ mm 为 21.65%。中间级配钢球明显过大, 而且倒球整个过程并未发现小于 $\phi 20$ mm 的废球。

初始总钢球量 86 t, 余下钢球 67.7 t, 其中 $\phi 50$ mm 大球损失 5.67 t, $\phi 40$ mm 中球损失 10.79 t, $\phi 30$ mm 小球损失 13.84 t, 由于 $\phi 40$ mm 球一直在补给, 造成 $\phi 40$ mm 球总量较多。级配比例为 34 : 44 : 22, 级配失调。

2014 年 9 月 12 日后炉后, 14 日补加 $\phi 40$ mm 钢球 3 t, 则磨煤机中总钢球量在 70.7 t。得到上述数据后, 再反推算回级配变化, 即每次补球后的级配变化特性。表 4 是级配反推计算结果。

表 4 级配变化特性推算

Table 4 Calculation of grading change characteristic

补球日期	$\phi 40 \sim \phi 50$ mm	$\phi 30 \sim \phi 40$ mm	$\phi 20 \sim \phi 30$ mm	有效运行 时间/h	$\phi 40 \sim \phi 50$ mm	$\phi 30 \sim \phi 40$ mm	$\phi 20 \sim \phi 30$ mm
	质量/t	质量/t	质量/t		级配比例	级配比例	级配比例
2013-10-22	28.50	28.75	28.75	新启动	0.33	0.33	0.33
2014-02-27	26.93	25.34	23.03	2 191	0.36	0.34	0.31
2014-04-17	26.16	27.38	21.77	393	0.35	0.36	0.29
2014-07-10	25.39	29.42	20.51	414	0.34	0.39	0.27
2014-07-30	24.62	31.46	19.25	313	0.33	0.42	0.26
2014-11-13 补球前	20.70	30.03	10.83	1 206	0.34	0.49	0.18
2014-11-13 加 $\phi 50$ mm 球 1 t; $\phi 30$ mm 球 2 t	21.70	30.03	12.83	—	0.34	0.47	0.20

从表 3 中 2014 年 9 月 14 日加 3 t $\phi 40$ mm 球到表 4 中 2014 年 11 月 13 日补球前, 小球的级配已经减小至 0.18。

3.3 补球信号

统计机组运行的磨煤机平均给煤量和有效运行时间, 可以推算出级配的变化、钢球的钢耗以及制粉单耗。根据级配、钢球钢耗, 同时找到磨损 3 t 钢球

时的有效运行时间, 则可找出补球信号。

从 B 磨煤机 2013 年 10 月—2014 年 9 月的运行数据可得出: 钢球消耗量 ΔG 为 30.3 t, 累积运行时间 4 974 h, 累积给煤量 185 735.56 t/h, 平均给煤量 37.341 t/h, 钢球单耗 163.135 g/t, 每消耗 3 t 钢球的运行时间 492.475 t。由此可算出, 目前级配失调情况下, 消耗 3 t 钢球, 需要累积运行 492 h, 即上

一次加球后,平均给煤量 37 t/h 且连续运行近 500 h 就可以考虑补 3 t 钢球了。

3.4 补球优化

应根据煤粉细度、粒度分布特性以及磨出力来综合考虑补球方案,若煤粉过细,合格的煤粉反复在筒体内碾磨,会增加磨煤机制粉单耗。1 号炉的入炉煤煤质和燃烧要求 R_{90} 在 6% 左右,若试验得到的煤粉细度小于 6%,就可侧重补小球,适当放粗煤粉,同时提高了磨煤机的出力。

第 3 次煤粉取样的特性较好,当时的级配比例推算是 36 : 34 : 31。故补球优化应加大球 1 t,小球 2 t。稳住大球级配,逐步适当提高小球级配。

统计了 2014 年 11 月 12 日—12 月 22 日 B 磨煤机的有效运行数据,根据总煤量和制粉单耗排序(即总煤量从小到大的制粉单耗)。对比数据是 2014 年 8 月 11 日—11 月 11 日 B 磨煤机的有效运行数据。图 4 是补球优化前后制粉单耗。

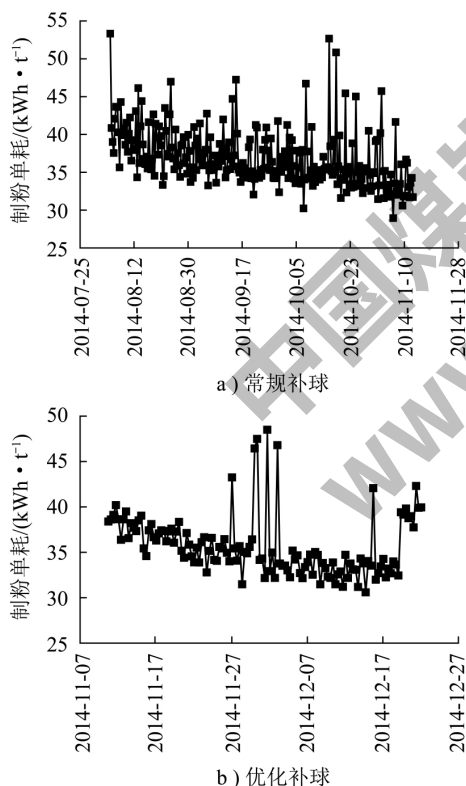


图 4 补球优化前后制粉单耗

Fig. 4 Power consumption of pulverized system before and after ball filling optimization

由上述对比可以看出,补球优化后的制粉单耗下降明显,主要在 30~35 kWh/t;而常规补中球的制粉单耗主要在 35~40 kWh/t。

图 5 是补球优化前后的煤粉的均匀性指数。由图

5 可以看出,均匀性指数 n 得到了大幅提升,说明补球优化方案是正确的。未来应进一步补足小球的份量。

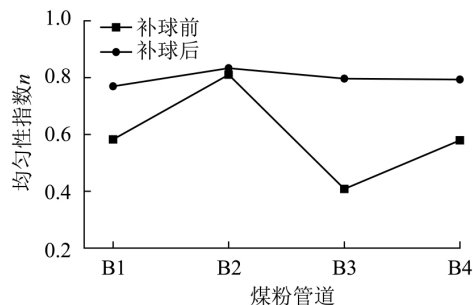


图 5 补球前后的煤粉均匀性指数

Fig. 5 Evenness index of pulverized coal before and after ball filling optimization

4 结 论

1) 煤粉细度 R_{90} 越小,均匀性越差,说明小球不足,会影响磨煤机出力,增加制粉单耗。运行试验煤质下, R_{90} 值推荐在 6%~8%。

2) 补球应将钢球平均球径控制在初始平均球径附近;本文提供了一种级配推算方法,补球时先稳住 $\phi 50$ mm 钢球级配,再适当提高 $\phi 30$ mm 小球级配。

3) 优化补球后的制粉单耗平均下降 3 kWh/t,均匀性指数提高至 0.8 以上。

参考文献 (References):

- [1] 刘英雄,毛爱珍.球磨机钢球直径的优化选择[J].中国电力,1996,29(6):8-13.
Liu Yingxiong, Mao Aizhen. Optimizing selection of ball diameters of tube coal mill [J]. Electric Power, 1996, 29(6): 8-13.
- [2] 刘如金.球磨机合理装球及补球新探[J].有色金属(选矿部分),1997(6):41-43.
- [3] 吴彩斌,李壮阔,段希祥,等.粗磨机钢球尺寸的设计计算[J].有色金属设计,2001,28(2):9-13.
Wu Caibin, Li Zhuangkuo, Duan Xixiang, et al. Design calculation of ball size of primary mill [J]. Nonferrous Metals Design, 2001, 28(2): 9-13.
- [4] 段希祥.我国粗磨球磨机钢球尺寸状况的分析[J].矿冶工程,1998,18(3):23-26.
Duan Xixiang. A review of the sizes of steel balls for China's coarse grinding mills [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1998, 18(3): 23-26.
- [5] 何正凯.等腰三角形配球法及其论证[J].水泥技术,1998(3):34-37.
He Zhengkai. Gradation of grinding media by isosceles triangle method with its proof [J]. Cement Technology, 1998(3): 34-37.

(下转第 81 页)

- 设备运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 1-3.
- [7] 孔 宇, 文 端, 张小勇. 超临界循环流化床锅炉技术特点与发展前景分析 [J]. 上海电力学院学报, 2012, 28(3): 217-220.
Kong Yu, Wen Duan, Zhang Xiaoyong. Analysis of the technical characteristics and development prospect of supercritical CFB boiler [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2012, 28(3): 217-220.
- [8] 徐 志. 超临界循环流化床锅炉数学模拟与设计方案优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 1-3.
- [9] 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.
- [10] 蒋敏华, 孙献斌. 大型循环流化床锅炉的开发研制 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(23): 1-6.
Jiang Minghua, Sun Xianbin. Research and development of large CFB boiler in China [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(23): 1-6.
- [11] 杨海瑞, 吕俊复, 张 海, 等. 超临界循环流化床锅炉的最新进展 [J]. 锅炉技术, 2005, 36(5): 1-6.
Yang Hairui, Lyu Junfu, Zhang Hai, et al. Update progress of supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Boiler Technology, 2005, 36(5): 1-6.
- [12] 张冬青, 杨 冬, 刘计武, 等. 超临界循环流化床下降水冷屏流量分配特性试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(5): 32-37.
- Zhang Dongqing, Yang Dong, Liu Jiwu, et al. Distribution characteristics of downward water-cooling panel in supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(5): 32-37.
- [13] 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 Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(29): 1-8.
- [14] 陈 刚, 方庆艳, 张 成, 等. 电站锅炉配煤掺烧及经济运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 3-4.
- [15] 王春昌, 王志刚. 锅炉掺烧或改烧高挥发分煤时制粉系统适应性研究 [J]. 热力发电, 2015, 44(5): 35-38.
Wang Chunchang, Wang Zhigang. Adaptability of coal pulverizing systems when high-volatile coal is burned or co-fired [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(5): 35-38.
- [16] 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): 5520-5530.
Cheng Leming, Xu Linjie, Xia Yunfei, et al. Key issues and solutions in development of the 600 MW CFB boiler [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(21): 5520-5530.
- [17] 樊泉桂, 阎维平, 闫顺林, 等. 锅炉原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 45-47.
- [18] 刘德昌, 陈汉平, 张世红, 等. 循环流化床锅炉运行及事故处理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 92-116.
- al mathematical model of the steel ball wear and tear in ball mill [J]. Journal of North China Electric Power University, 2008, 35(2): 74-78.
- [1] 汪焰流. 钢球磨煤机衬板磨损原因分析与对策 [J]. 冶金动力, 2002(3): 43-44.
Wang Yanliu. Analysis of abrasion causes of lining of a coal grinding mill with steel balls and the countermeasures [J]. Metallurgical Power, 2002(3): 43-44.
- [2] 刘玉海. 钢球质量对磨煤机出力和经济性效益的影响分析与探讨 [J]. 电站辅机, 2002, 23(3): 36-38.
Liu Yuhai. Analysis and discussion of the influence of ball quality on the output and economic benefit of mill [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2002, 23(3): 36-38.
- [3] 赵太平, 杜永远. 球磨机防磨降耗的措施 [J]. 电站辅机, 1997, 18(1): 22-23, 40.
Zhao Taiping, Du Yongyuan. Measures for reducing consumption of ball mill [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 1997, 18(1): 22-23, 40.
- [4] 孟瑞娥. 平均球径计算方法及其在生产过程中的变化 [J]. 建材技术与应用, 2006(3): 7-8.
Meng Ruie. The average ball diameter calculation method and its changes in the production process [J]. Research & Application of Building Materials, 2006(3): 7-8.
- (上接第 75 页)
- [9] 冯绳隋. 等差数列配球法的计算及应用 [J]. 水泥, 2000(12): 20-21.
Feng Shengsui. The calculation and application of arithmetic progression with ball gradation [J]. Cement, 2000(12): 20-21.
- [7] 金 信, 张丽娟, 金雪峰. 多级配球法对细度的影响 [J]. 水泥, 1996(5): 25-26.
Jin Xin, Zhang Lijuan, Jin Xuefeng. The effect of multi-level ball gradation on the fineness [J]. Cement, 1996(5): 25-26.
- [8] 余 涛, 张翠珍, 刘 亮. 钢球磨煤机钢球的最佳级配与补球参数 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学), 2007, 4(1): 68-71.
Yu Tao, Zhang Cuizhen, Liu Liang. Optimal proportion of the loading ball system and the adding ball system of ball mills [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2007, 4(1): 68-71.
- [9] 任志宇, 王振东, 王国强. 磨煤机钢球磨损稳态模型及其应用 [J]. 动力工程, 1995, 51(15): 51-55.
Ren Zhiyu, Wang Zhendong, Wang Guoqiang. A steady wear model for steel balls of coal mills and its application [J]. Power Engineering, 1995, 51(15): 51-55.
- [10] 慕守荣, 焦嵩明, 韩 璞, 等. 磨煤机钢球磨损的一般数学模型研究 [J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(2): 74-78.
Qi Shourong, Jiao Songming, Han Pu, et al. The research of gener-