

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.06.006

中速磨煤机直吹式制粉系统节能优化研究

Research on energy-saving optimization for medium-speed mill
pulverizing systems

张海龙¹, 杨光锐¹, 井新经², 邢乐强¹, 刘超¹, 党黎军¹
ZHANG Hailong¹, YANG Guangrui¹, JING Xinjing²,
XING Leqiang¹, LIU Chao¹, DANG Lijun¹

(1. 西安热工研究院有限公司, 西安 710054; 2. 西安西热节能技术有限公司, 西安 710054)
(1. Xi'an Thermal Power Engineering Institute Company Limited, Xi'an 710054, China;
2. Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Company Limited, Xi'an 710054, China)

摘要:随着可再生能源的大力发展,火电厂面临着严峻的节能降耗形势。为进一步降低制粉系统能耗,深入分析磨煤机出口温度和一次风压的节能降耗原理,并探讨了两者之间的耦合关系,确定了最佳优化策略。结合理论分析,按照先优化磨煤机出口温度再优化一次风压的顺序开展节能优化试验。通过试验,磨煤机出口温度可提高至80℃,在300,450,600 MW负荷下一次风压分别控制在6.5,8.0,9.0 kPa,并给出了一次风压随负荷变化曲线。优化后,机组煤耗可降低0.38 g/(kW·h),取得了较好的经济效益,为制粉系统开展节能优化工作提供参考。

关键词:中速磨煤机;制粉系统;磨煤机出口温度;一次风压;节能;可再生能源

中图分类号:TK 227.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)06-0025-06

Abstract: As the vigorous development of renewable energy, coal-fired power plants are facing severe challenge in energy saving and consumption reduction. In order to reduce the energy consumption of pulverizing systems, intensive study was made on consumption reduction by controlling the temperature at mill outlet and optimizing primary air pressure, and the coupling relationship between the two controlling strategies. The optimal optimization strategy was determined after theoretical analysis. The optimization test was carried out from controlling the temperature at mill outlet to optimizing the primary air pressure. The temperature at mill out goes up to 80℃ after the test, and the primary air pressure can be controlled at 6.5, 8.0 and 9.0 kPa respectively under the load of 300, 450 and 600 MW. The curve of primary air pressure changing with the load is given. After the optimization, the coal consumption of the unit can be reduced by 0.38 g/(kW·h). The optimization is of good economic benefits, and can provide reference for energy saving for pulverizing systems.

Keywords: medium-speed mill; pulverizing system; temperature at mill outlet; primary air pressure; energy conservation; renewable energy

0 引言

随着我国经济的不断发展,资源环境问题仍将是制约我国经济发展的主要瓶颈,节能减排任务十分艰巨^[1]。

火力发电是燃煤消费的主力军,充分挖掘燃煤电厂节能潜力,进一步降低火电厂发电煤耗,对于经济可持续发展具有重要意义^[2]。为加快燃煤发电机组升级与改造,国家发改委、环保部、国家能源局三部委联合发布的《行动计划》要求“到2020年,现役火电机

组改造后平均供电煤耗低于310 g/(kW·h),其中现役600 MW及以上机组(除空冷机组外)改造后平均供电煤耗低于300 g/(kW·h)”^[3]。

随着大容量、高参数燃煤机组的不断发展,我国现役机组供电煤耗平均水平已接近国际先进水平^[4],燃煤机组节能降耗工作进入攻坚期和深水区。近年来,由于燃煤机组装机容量过剩、煤价持续升高、发电利用小时数不断降低,导致燃煤电厂盈利减少,促使电厂深度挖掘设备节能潜力,降低发电成本,达到“降本增效”的目的。

燃煤锅炉设计效率一般在92%~94%之间,已经达到很高水平,但由于实际燃用煤质较差、深度调

收稿日期:2019-10-21;修回日期:2020-02-10

峰、运行参数不合理等因素导致锅炉实际运行效率偏低、厂用电率升高。制粉系统主要由一次风机和磨煤机组成,其耗电率约占厂用电率的 20%^[5],制粉系统运行参数直接影响锅炉燃烧,对锅炉效率有重要影响,优化制粉系统运行参数,降低制粉系统能耗对电厂节能具有重要意义。

制粉系统节能降耗可从技术改造、检修维护、运行优化 3 方面开展,运行优化具有投资少、见效快等优点,在机组正常运行工况下开展运行参数优化调整,达到节能效果。在不同煤质下,通过优化磨煤机通风量、加载力可以提高分离器效率,提高锅炉效率^[6]。沈跃良等人^[7]和丛日成等人^[8]通过试验的方法研究了提高磨煤机出口温度对锅炉安全、经济性的影响。白德龙等人^[9]采用热重方法得到了空气气氛下 CO 析出规律,并进行现场试验,磨煤机出口温度升高后,磨煤机运行安全可靠,锅炉排烟温度下降。在当前煤质下,优化一次风量和一次风压,增大热风门开度,可以提高锅炉效率、降低风机耗电率^[10-13]。赵振宁^[14]研究了一次风量与一次风母管压力、调温风用量对一次风机功耗、厂用电率、锅炉效率与 NO_x 排放的影响规律。目前的研究多集中在单个参数对锅炉的影响,很少研究各参数之间的相互影响。

针对上述研究的不足,本文深入分析磨煤机出口温度、一次风压优化的节能原理,并探讨了两者之间的耦合关系,对某台锅炉进行制粉系统节能优化试验,为制粉系统节能优化运行提供参考。

1 设备介绍

某电厂 #2 锅炉由东方锅炉(集团)股份有限公司独立设计,锅炉为超临界参数变压直流炉,单炉膛、一次中间再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全悬吊结构 II 型锅炉。锅炉采用前后墙对冲燃烧方式的旋流煤粉燃烧器,共 24 只旋流煤粉燃烧器分 3 层布置在前、后墙上,每层 4 只旋流煤粉燃烧器。

制粉系统采用中速磨煤机正压直吹式,配 6 台 HP943 磨煤机,每台磨煤机为同层的 4 只煤粉燃烧器提供风粉混合物,在锅炉最大连续蒸发量工况下燃用设计煤种时 5 台运行,1 台备用。

锅炉配备 2 台成都电力机械厂生产的离心式一次风机,采用液偶调节。一次风机出口分 3 路,一路去空气预热器被烟气加热作为热一次风;一路直接送至磨煤机入口作为冷一次风,冷、热一次风混合后进入磨煤机干燥煤粉;另外一路接至密封风机入口,经密封风机升压后作为磨煤机密封风。

2 制粉系统运行参数分析

2.1 磨煤机出口温度

磨煤机出口温度对锅炉的安全、稳定、经济运行有重大影响。提高磨煤机出口温度有利于煤粉的着火、燃烧,提高燃烧稳定性,磨煤机入口风温升高,掺入冷风量减少,通过空气预热器冷一次风量增加,排烟温度下降,锅炉效率提高。根据理论计算结合相关经验,制粉系统掺入冷风量每降低 1%,锅炉排烟温度可下降 1.2℃,发电煤耗可降低 0.19 g/(kW·h)。

磨煤机出口温度过高则容易发生爆炸,为了保证制粉系统安全运行,防止出现爆炸事故,DL/T 5145—2012《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》中规定^[15]对于中速磨煤机直吹式制粉系统,当燃煤干燥无灰基挥发分 $V_{daf} < 40\%$ 时,磨煤机出口最高允许温度 $t_{M2} = [82 - V_{daf}] \cdot 5/3 \pm 5 (^\circ\text{C})$;当燃煤干燥无灰基挥发分 $V_{daf} \geq 40\%$ 时, $t_{M2} = 60 \sim 70$ ℃。煤粉的爆炸特性与煤的挥发分、灰分、水分、煤粉细度、气粉混合物的温度和浓度、气粉混合物中的含氧量等因素有关,当燃煤干燥无灰基挥发分 $V_{daf} < 10\%$ 时,基本无爆炸风险,随挥发分增加爆炸概率变大;当煤粉颗粒在 200 μm 以下时基本没有爆炸的危险,并且颗粒越小,爆炸发生的概率也相应变小;当煤粉水分 > 25% 时发生爆炸的风险也较小^[16]。

在现行的标准中,磨煤机出口温度是燃煤挥发分的单值函数,仅考虑了挥发分的影响,不够客观全面,导致机组实际运行中,磨煤机出口温度控制偏低。由于热一次风温度较高,为控制磨煤机出口温度,需掺入大量冷风,锅炉排烟温度升高,机组经济性降低。因此,在保证制粉系统安全运行的前提下,适当提高磨煤机出口温度,可以提高机组运行经济性,而且可以提高磨煤机干燥出力,降低制粉单耗。

燃煤进入磨煤机后,外在水分首先汽化吸收大量的热量,磨煤机内部温度迅速下降,根据磨煤机热平衡计算,燃煤水分每汽化 1%,热风温度降低约 12℃,磨煤机内部煤粉温度远远小于磨煤机入口热风温度^[17]。

制粉系统爆炸与可燃气体析出有密切关系,热重试验表明,煤中挥发分析出温度为 270 ~ 280℃,CO₂ 比 CO 先析出,CO 是可燃气体中最先析出的气体,CO 析出速率是磨煤机内平衡温度的单一函数。

因此,从安全性角度出发,通过监测磨煤机出口 CO,只要磨煤机出口 CO 质量浓度在安全范围内,则可认为磨煤机的运行是安全的,并且还会有一定的安全余量。

2.2 一次风压

对于中速磨煤机正压直吹式制粉系统,一次风压克服制粉系统阻力满足送粉的要求,当达到平衡时,一次风压等于制粉系统阻力,包括燃烧器阻力、磨煤机阻力和一次风管阻力。燃烧器阻力和磨煤机阻力主要与设计参数、设备磨损情况有关,降低一次风管阻力成为降低一次风压的重要手段。

制粉系统调节过程中,磨煤机热风门主要负责调节风量,根据不同煤质的风煤比曲线调整合适的一次风量,满足送粉和燃烧的要求。当一次风压控制偏高时,为了保证风煤比,磨煤机热风门自动关小,增大一次风管局部阻力损失,一次风机耗电率增加。不同一次风压下一次风机运行工况点如图1所示。

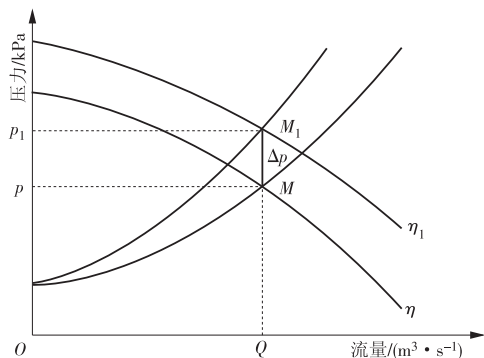


图1 风机运行工况点

Fig.1 Working conditions of the fan

一次风压控制较低时,风机运行在M点;一次风压升高,磨煤机热风门关小,节流损失增大,风机运行工况点上移至M₁点。风煤比相同的情况下,一次风量Q保持不变,一次风压由p上升到p₁,一次风压增加Δp。

风机功率计算公式为

$$P = \frac{q_v P}{\eta}, \quad (1)$$

式中:P为风机功率,kW;q_v为风机体积流量,m³/s;p为风机全压,kPa;η为风机效率。

根据式(1),一次风压升高,磨煤机热风门关小,风机运行工况点从M点上移至M₁点,一次风机功率增加为

$$\Delta P = \frac{Q p_1}{\eta_1} - \frac{Q p}{\eta}. \quad (2)$$

一次风压控制过高,磨煤机热风门开度小,节流损失大,风机耗电量增加;一次风压控制过低,热风门全开,磨煤机增加出力时响应速度受限,且存在堵塞磨煤机的风险。因此,对一次风压进行优化时,既要尽量减少磨煤机热风门节流损失,又要保证磨煤机调节灵活性。在一次风量保持不变的情况下,通

过逐步降低一次风压,磨煤机热风门逐渐开大,在满足一次风量调节需要的前提下,使热风门开度达到60%~70%,此时一次风压即为最佳一次风压力^[18-20]。

2.3 一次风压和磨煤机出口温度的耦合关系

磨煤机出口温度和一次风压存在一定的耦合关系,运行优化调整时应明确两者内部存在的相互关系,确定正确的优化顺序。提高磨煤机出口温度,则冷风门关小,热风门开大,当热风门开度过大时,需提高一次风压,保证热风门处于最佳开度。反之,降低一次风压,为保证磨煤机出口温度不变,冷、热风门需同步调整。因此,在运行优化试验时,首先在保证制粉系统安全的条件下,进行提升磨煤机出口温度试验,然后优化一次风压,最终将热风门开度调整到最佳开度。

3 节能优化试验

3.1 试验方案

某电厂运行过程中磨煤机出口温度控制在75℃,存在进一步提升的空间;一次风压控制较高,磨煤机热风门开度为40%~50%,节流损失为1.5~2.5 kPa,较大。因此,对磨煤机出口温度和一次风压进行节能优化试验,进一步降低机组能耗。试验期间入炉煤质见表1。

表1 入炉煤质

Tab.1 Quality of coal as fired

项目	单位	数值
w(M _{ar})	%	12.30
w(A _{ar})	%	16.93
w(C _{ar})	%	56.21
w(H _{ar})	%	3.48
w(O _{ar})	%	9.95
w(N _{ar})	%	0.75
w(S _{ar})	%	0.38
w(V _{daf})	%	40.75
Q _{net,ar}	MJ/kg	21.38

注:表中Q_{net,ar}为收到基低位发热量。

试验时,首先进行磨煤机出口温度优化试验,再进行一次风压优化试验,最终将磨煤机热风门开度调整至60%~70%。

3.2 磨煤机出口温度优化

3.2.1 单台磨煤机安全性试验

为保证制粉系统安全,选择1台磨煤机进行提高出口温度试验,试验选择D磨煤机,通过调整冷、热风门开度,将磨煤机出口温度从75℃升高至80℃,在不同磨煤机出力下对磨煤机出口CO进行测试,试验结果见表2。

表 2 磨煤机出口 CO 体积分数($\times 10^{-6}$)
Tab.2 CO volume fractions at mill outlet($\times 10^{-6}$)

工况		30 t/h	40 t/h	50 t/h
75 ℃	D ₁ 粉管	0	0	2
	D ₂ 粉管	1	1	1
	D ₃ 粉管	1	1	2
	D ₄ 粉管	0	1	0
80 ℃	D ₁ 粉管	0	0	3
	D ₂ 粉管	1	1	2
	D ₃ 粉管	2	2	3
	D ₄ 粉管	0	1	1

由表 2 可知,将磨煤机出口温度从 75 ℃ 升高至 80 ℃,在不同磨煤机出力 30,40,50 t/h 下,磨煤机出口 CO 体积分数均为 0 ~ 0.0003%,煤粉中基本没有 CO 析出。根据 DL/T 5145—2012《火力发电厂制粉系统设计计算技术规定》^[15] 规定,CO 体积分数达到 12% 时才会发生爆炸,磨煤机出口 CO 体积分数远低于其爆炸极限的下限。因此,从制粉系统防爆的角度认为,磨煤机出口温度达到 90 ℃ 是安全的。

3.2.2 多台磨煤机经济性试验

在 450 MW 负荷工况下,调整所有运行磨煤机冷、热风门开度,使磨煤机出口温度分别维持 75 ℃ 和 80 ℃,试验期间投运 A,B,C,D 4 台磨煤机,一次风压控制在 9.5 kPa。通过 2 个工况对比,研究提高磨煤机出口温度对锅炉经济性的影响,试验结果见表 3。

表 3 磨煤机出口温度优化试验

Tab.3 Optimization test of the temperature at coal mill outlet

项目	单位	磨煤机出口温度/℃	
		75	80
机组负荷	MW	450	450
冷风门开度(A/B/C/D)	%	44/36/31/30	37/27/24/25
热风门开度(A/B/C/D)	%	50/48/51/47	53/50/52/49
w(飞灰/炉渣可燃物)	%	0.55/0.42	0.66/0.43
排烟氧量	%	4.40	4.37
排烟温度	℃	114.00	112.30
锅炉效率	%	94.73	94.81

由表 3 可知,磨煤机出口温度从 75 ℃ 升高至 80 ℃,飞灰可燃物质量分数从 0.55% 升至 0.66%,这是由于磨出口温度提高导致一次风速提高,煤粉细度变粗,飞灰略有增加,炉渣可燃物质量分数变化不大,排烟温度降低 1.7 ℃,锅炉效率提高 0.08 百分点,机组煤耗降低约 0.25 g/(kW·h)。

3.3 一次风压优化

在磨煤机出口温度优化试验基础上进行一次风

压优化试验,优化试验分别在 300,450,600 MW 负荷下进行,磨煤机出口温度均控制在 80 ℃,通过逐步降低一次风压,研究一次风压对锅炉经济性的影响,并给出一次风压控制曲线。

3.3.1 300 MW 一次风压优化试验

在 300 MW 负荷下,一次风压逐步从 8.0 kPa 降至 6.5 kPa,试验中投运 A,B,C,D 4 台磨煤机,各台磨煤机出力约 33 t/h,试验结果见表 4。

表 4 300 MW 负荷一次风压优化试验

Tab.4 Primary air pressure optimization test under 300 MW load

项目	单位	一次风压/kPa	
		8.0	6.5
机组负荷	MW	300	300
冷风门开度(A/B/C/D)	%	36/34/29/16	41/38/32/20
热风门开度(A/B/C/D)	%	51/41/50/52	63/54/64/68
一次风机电流(A/B)	A	112.9/113.4	101.3/100.5
w(飞灰/炉渣可燃物)	%	0.28/0.66	0.26/0.71
排烟氧量	%	6.30	6.36
排烟温度	℃	107.15	106.81
锅炉效率	%	94.39	94.38

由表 4 可知,300 MW 负荷下一次风压从 8.0 kPa 降至 6.5 kPa,锅炉效率基本保持不变,一次风机电流之和下降 24.5 A,风机功率降低 216 kW。

3.3.2 450 MW 一次风压优化试验

在 450 MW 负荷下,一次风压逐步从 9.5 kPa 降至 8.0 kPa,试验中投运 A,B,C,D 4 台磨煤机,各台磨煤机出力约 45 t/h,试验结果见表 5。

表 5 450 MW 负荷一次风压优化试验

Tab.5 Primary air pressure optimization test under 450 MW load

项目	单位	一次风压/kPa	
		9.5	8.0
机组负荷	MW	450	450
冷风门开度(A/B/C/D)	%	36/28/22/26	40/30/27/28
热风门开度(A/B/C/D)	%	51/49/50/49	67/63/66/65
一次风机电流(A/B)	A	134.2/135.3	127.5/127.0
w(飞灰/炉渣可燃物)	%	0.49/0.76	0.47/0.82
排烟氧量	%	4.37	4.40
排烟温度	℃	110.30	110.60
锅炉效率	%	94.77	94.80

由表 5 可知,450 MW 负荷下一次风压从 9.5 kPa 降至 8.0 kPa,锅炉效率基本保持不变,一次风机电流之和下降 15 A,风机功率降低 132 kW。

3.3.3 600 MW 一次风压优化试验

在 600 MW 负荷下,一次风压逐步从 10.5 kPa

降至 9.0 kPa, 试验中投运 A, B, C, D, E 5 台磨煤机, 各台磨煤机出力约 49 t/h, 试验结果见表 6。

表 6 600 MW 负荷一次风压优化试验
Tab. 6 Primary air pressure optimization test
under 600 MW load

项目	单位	一次风压/kPa	
		10.5	9.0
机组负荷	MW	600	600
冷风门开度 (A/B/C/D/E)	%	40/29/22/29/23	42/32/26/32/26
热风门开度 (A/B/C/D/E)	%	54/51/54/51/52	68/65/66/64/66
一次风机电流 (A/B)	A	162.1/162.8	154.2/149.4
w(飞灰/炉渣可燃物)	%	0.79/0.53	0.83/0.69
排烟氧量	%	3.96	3.97
排烟温度	℃	116.80	116.72
锅炉效率	%	94.47	94.49

由表 6 可知, 600 MW 负荷下一次风压从 10.5 kPa 降至 9.0 kPa, 锅炉效率基本保持不变, 一次风机电流之和下降 21.3 A, 风机功率降低 188 kW。

优化后, 在 300, 450, 600 MW 负荷下一次风压分别控制在 6.5, 8.0, 9.0 kPa, 一次风压随负荷的变化曲线如图 2 所示。为防止发生堵磨, 当运行磨煤机热风门开度大于 80% 或切换到磨煤机时, 自动增大一次风压, 将热风门开度控制在 60% ~ 70% 范围内。

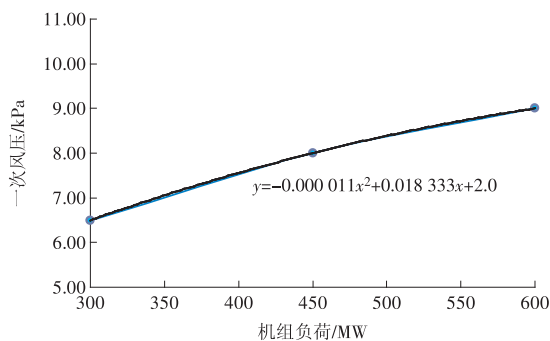


图 2 一次风压随负荷的变化曲线

Fig. 2 Curve of primary air pressure varied with load

通过一次风压优化试验, 在 300, 450, 600 MW 负荷下一次风压均可降低 1.5 kPa, 一次风机功率分别降低 216, 132, 188 kW。综合各负荷工况, 一次风机功率平均降低 178 kW, 风机耗电率可降低 0.04 百分点, 机组煤耗降低约 0.13 g/(kW·h)。

4 结束语

本文深入分析提高磨煤机出口温度和降低一次风压的节能原理, 并探讨了两者的耦合关系, 确

定了最佳优化策略。结合理论分析开展现场试验研究, 通过磨煤机出口温度和一次风压优化试验, 机组煤耗可降低 0.38 g/(kW·h), 按照年利用小时数为 5 000、标准煤单价 850 元/t 核算, 单台机组每年可产生经济效益为 97 万元, 经济效益较好, 可为制粉系统开展节能优化提供参考。

参考文献:

- [1] 国家发改委. “十三五”节能减排综合工作方案[Z]. 2016.
- [2] 韩文科. 煤电超低排放: 机遇与挑战[J]. 环境保护, 2016, 44(8): 39-41.
HAN Wenke. Coal-fired power plants ultra-low emissions-opportunities and challenges[J]. Environmental Protection, 2016, 44(8): 39-41.
- [3] 国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划 (2014—2020 年)[Z]. 2014.
- [4] 王月兰. 大型燃煤锅炉节能优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [5] 丁承刚, 郭士义, 龚燕雯, 等. 电站锅炉制粉系统模型的建立与应用[J]. 锅炉技术, 2016(1): 5-8.
DING Chenggang, GUO Shiyi, GONG Yanwen, et al. Modeling and application of coal pulverizing system for coal-fired Power Plant[J]. Boiler Technology, 2016(1): 5-8.
- [6] LI H, HE Y, SHI F, et al. Performance of the static air classifier in a vertical spindle mill[J]. Fuel, 2016(177): 8-14.
- [7] 沈跃良, 陈谋万, 刘亚明, 等. 提高 HP983 中速磨煤机出口温度对锅炉运行的影响[J]. 热力发电, 2013(4): 9-13.
SHEN Yueliang, CHEN Mouwan, LIU Yaming, et al. Effect of enhancing outlet temperature of HP983 pulverizer on boiler operation [J]. Thermal Power Generation, 2013(4): 9-13.
- [8] 丛日成, 邹天舒, 冷杰, 等. 提高中速磨煤机出口温度的试验研究[J]. 锅炉技术, 2018(4): 33-35.
CONG Richeng, ZOU Tianshu, LENG Jie, et al. Experimental study on raising outlet temperature of the medium-speed pulverizer[J]. Boiler Technology, 2018(4): 33-35.
- [9] 白德龙, 邢景伟. ZGM 型中速磨煤机出口温度提升试验研究[J]. 河北电力技术, 2018(3): 42-44.
BAI Delong, XING Jingwei. Experimental research on temperature rising of ZGM type medium speed pulverizer[J]. Hebei Electric Power, 2018(3): 42-44.
- [10] 赵振宁, 卢晓, 安连锁, 等. 电站锅炉一次风量的特性分析与优化[J]. 电站系统工程, 2009(5): 23-24.
ZHAO Zhenning, LU Xiao, AN Liansuo, et al. Properties analysis and optimization of primary air flow in power station [J]. Power System Engineering, 2009(5): 23-24.
- [11] 韩志成, 蔡广宇, 曾衍锋, 等. 600 MW 锅炉机组一次风优化运行研究[J]. 中国电力, 2011(1): 45-48.

- HAN Zhicheng, CAI Guangyu, ZENG Yanfeng, et al. Optimal operation research of primary air in a 600 MW boiler [J]. Electric Power, 2011(1): 45-48.
- [12] 赵庆东. 降低锅炉一次风压进一步降低厂用电率[J]. 锅炉制造, 2015(3): 13-15.
- ZHAO Qingdong. Reduce primary air pressure of the boiler to further reduce the electricity rate[J]. Boiler Manufacturing, 2015(3): 13-15.
- [13] 于洋, 赵熙, 赵振宇. 降低锅炉一次风系统电耗的优化调节[J]. 华北电力技术, 2009(10): 6-8.
- YU Yang, ZHAO Xi, ZHAO Zhenning. Optimization of primary air system of boiler to reduce power consumption[J]. North China Electric Power, 2009(10): 6-8.
- [14] 赵振宇. 中速磨制粉系统一次风运行参数整体优化[J]. 中国电机工程学报, 2010(S1): 124-130.
- ZHAO Zhenning. Compressive optimization of primary air parameters of medium-speed pulverizing system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010(S1): 124-130.
- [15] 火力发电厂制粉系统设计计算技术规定: DL/T 5145—2012[S].
- [16] 任衍辉, 张振国. 磨煤机制粉过程中的煤粉爆炸特性研究[J]. 吉林电力, 2018, 46(3): 44-47.
- REN Yanhui, ZHANG Zhenguo. Study on explosion characteristics in coal pulverizing process for pulverizer[J]. Jilin Electric Power, 2018, 46(3): 44-47.
- [17] 李其华, 冯伟忠. 中速磨煤机制粉系统运行优化研究[J]. 上海电力学院学报, 2018, 34(3): 259-263.
- LI Qihua, FENG Weizhong. Study on operation optimization of medium speed mill coal pulverizing system[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2018, 34(3): 259-263.
- [18] 刘川淮, 朱朝阳, 韩磊, 等. 660 MW 机组中速磨直吹式制粉系统节能优化调整试验研究[J]. 节能技术, 2018, 36(4): 372-376.
- LIU Chuanhuai, ZHU Chaoyang, HAN Lei, et al. Testing and research on the energy saving operation optimization of the medium-speed pulverizing system for a 660 MW unit[J]. Energy conservation technology, 2018, 36(4): 372-376.
- [19] 郑希峰, 吕贞贞. 碗式中速磨煤机制粉系统整体性能优化研究与应用[J]. 华电技术, 2017, 39(3): 25-27, 78.
- ZHENG Xifeng, LYU Zhenzhen. Study and application of bowl type medium speed pulverizer overall performance improvement[J]. Huadian Technology, 2017, 39(3): 25-27, 78.
- [20] 崔修强. 碗式中速磨煤机运行特性试验研究及应用[J]. 发电技术, 2019, 40(2): 187-191.
- CUI Xiuqiang. Experimental investigations and application of operational characteristics for bowl pulverizer[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(2): 187-191.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

张海龙(1989—), 男, 山东滨州人, 工程师, 工学硕士, 从事燃煤机组环保改造及电站锅炉节能优化运行方面的工作(E-mail: 748940650@qq.com)。

(E-mail: luming-wu@sac-china.com)。

薛明军(1983—), 男, 湖北荆州人, 工程师, 从事线路保护原理和技术方面的工作(E-mail: mingjun-xue@sac-china.com)。

陈琦(1985—), 男, 江苏盐城人, 工程师, 从事电力系统继电保护技术方面的工作(E-mail: carl-qi.chen@sac-china.com)。

王永旭(1991—), 男, 山东日照人, 工程师, 从事电力系统继电保护技术方面的工作(E-mail: yongxu-wang@sac-china.com)。

唐治国(1977—), 男, 陕西宝鸡人, 工程师, 从事母线保护原理和技术方面的工作(E-mail: zhiguo-tang@sac-china.com)。

陈宏岩(1992—), 男, 内蒙古呼伦贝尔人, 工程师, 从事母线保护原理和技术方面的工作(E-mail: hongyan-chen@sac-china.com)。

(上接第 15 页)

ZHANG Xiaorui, JI Ling, TAN Tingfang, et al. Intelligent substation secondary equipment online fault operation and maintenance platform architecture research[J]. Huadian Technology, 2019, 41(2): 1-5, 13.

[15] 李亮玉, 唐宝锋, 赵贤龙, 等. 智能变电站就地化保护研究现状及应用展望[J]. 华电技术, 2018, 40(5): 17-20, 24.

LI Liangyu, TANG Baofeng, ZHAO Xianlong, et al. Research on status and application prospect of locally installed protection of intelligent substation[J]. Huadian Technology, 2018, 40(5): 17-20, 24.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

吴路明(1988—), 男, 江西赣州人, 工程师, 工程硕士, 从事电力系统继电保护新技术与新型原理方面的工作