

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.004

燃煤机组低负荷工况下安全稳定运行研究

裴顺, 杨桂

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]近年来, 我国的可再生能源发电机组装机容量大幅增加。为消纳可再生能源, 燃煤机组承担电网调峰任务已成为未来的发展趋势。燃煤机组承担调峰任务后将长时间运行在低负荷工况, 将面临各种潜在的不安全风险威胁机组的安全稳定运行。[方法]详细分析了燃煤机组低负荷工况下面临的锅炉燃烧稳定性、锅炉水动力安全性以及炉膛和制粉系统爆炸等重大潜在风险。[结果]从工艺系统设计、运行方式和控制系统设计等方面, 对燃煤机组低负荷工况下安全稳定运行的主要改造技术进行了汇总和探讨, 提出了燃煤机组在低负荷工况下安全稳定的系统性方案。[结论]研究成果可为各燃煤机组实施宽负荷技术改造提供思路和帮助。

关键词: 低负荷工况; 燃烧稳定性; 水动力安全性

中图分类号: TM611; TK227

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0019-06

Research on Safe and Stable Operation Under Lower Load Condition for Coal-fired Power Plant

PEI Shun, YANG Gui

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] Recently, renewable energy generator capacity greatly increase in power market of China. To absorb renewable energy, coal-fired power plants responsible for power grid peak shaving have become a development trend in the future. Coal-fired power plants, which undertake the task load, will run at low load condition for long time and meet a variety of potentially risk to the safe and stable operation. [Method] Major potential risks were detailed analyzed in this paper, such as safety of combustion, furnace and coal pulverizing system explosion and stability of hydro-power. [Result] Then, main reform technology for safe and stable operation under lower load condition were summarized and discussed from the process system design, operation mode and control system design. This paper proposed systematic solutions of safe and stable operation under lower load condition for coal-fired power plant. [Conclusion] This paper can provide suggestion and reference for implementation of wide-load technical transformation for coal-fired power plants.

Key words: lower load condition; safety of combustion; stability of hydro-power

大力发展可再生能源是我国电力行业“十三五”期间的重点任务之一^[1]。截至 2016 年底, 全国并网风电机组总装机容量 150 GW、并网太阳能发电机组总装机容量 77.42 GW, 约占全部发电容量 14%^[2]。但风能和太阳能的随机性、间歇性和不可预测性, 电网大规模接入新能源将给电网的安全带

来了不利影响。另一方面, 我国传统调峰机组装机容量占少, 仅依靠传统调峰机组无法满足全部消纳风电和太阳能发电的调峰需求。因此, 为消纳风电和太阳能发电等可再生能源, 承担着全国 60% 以上发电量的燃煤机组承担电网调峰任务已成为必然趋势。

目前, 由于设备可靠性、煤质复杂多变和电网负荷变化大等因素的影响, 我国现有纯凝燃煤机组调峰能力一般为 40% 额定容量左右, 供热燃煤机组调峰能力一般为 30% 额定容量左右; 与欧美先进水

收稿日期: 2018-01-05 修回日期: 2018-02-07

基金项目: 中国能建广东院科技项目“大容量机组高效宽负荷率控制技术研究” (EV03141W)

平差距较大。另外,我国电网传统调峰机组严重不足,造成弃风和弃光情况严重。根据国家能源局统计数据^[3],2016年我国弃风总电量为49.7 TWh,造成直接经济损失200多亿元人民币。因此,开展存量燃煤发电机组的灵活性改造成为我国电力行业“十三五”期间的重点任务之一。

机组低负荷工况下安全稳定运行能力是提高燃煤机组深度调峰能力的重要前提。机组低负荷工况下安全稳定运行的潜在风险主要包括锅炉燃烧的稳定性、锅炉水动力的安全性、炉膛和制粉系统爆炸、尾部烟道的潜在风险、蒸汽系统的潜在风险以及汽机和辅机适应性。

1 锅炉燃烧的稳定性

锅炉燃烧的稳定性是限制机组最低负荷的关键因素之一。低负荷工况时,锅炉炉膛温度较低,煤粉不易着火,火焰稳定性差;如处理不当,就会引发炉膛爆炸事故。锅炉燃烧的稳定性决定于炉膛形式、燃烧器类型、煤质、制粉系统等因素有关。目前,国内新投产300 MW以上燃煤机组的最低不投油稳燃负荷设计值通常为30%~50%额定容量。但是,由于国内大多数燃煤机组煤质不稳定、灰分多和热值低等问题,相当一部分机组为保证机组安全稳定运行,运行人员将最低不投油稳燃负荷设为50%~65%额定容量。可见,大部分现役燃煤机组具有很大的低负荷稳燃潜力可挖掘。

1.1 低负荷稳燃技术

李凤瑞^[4]等研究人员曾对大型燃煤锅炉的低负荷稳燃展开详细研究,分析了低负荷稳燃的主要影响因素,认为提供锅炉燃烧稳定性应从降低着火热和加强着火供热两方面入手。本文将分别介绍工艺系统改造和精细化运行控制方式两类方式。

1.1.1 工艺系统改造方案

工艺系统改造方案主要包括燃烧器改造,助燃改造技术、制粉系统改造和混煤掺烧技术四种方案。

1.1.1.1 燃烧器改造

对于四角切圆燃烧系统,可以采用钝体燃烧器、火焰稳定船式直流燃烧器、煤粉浓淡燃烧器、反吹系统煤粉燃烧器、大速差燃烧器和双通道燃烧器等。对于旋流燃烧系统,可以采用双调燃烧器、浓缩型煤粉旋流燃烧器、PAX燃烧器等。

各种新型燃烧器已大规模应用且取得不错的效果。但是,仅通过燃烧器改造很难将锅炉不投油稳燃负荷降至20%额定负荷,尤其是对燃用低挥发性煤种的锅炉。

1.1.1.2 助燃改造技术

助燃改造技术可以提高锅炉低负荷运行时的燃烧稳定性,主要改造路线包括等离子点火系统、微油点火系统和富氧燃烧装置。

离子点火系统具有经济、环保的特点,但存在电极寿命短和煤种适应性差的缺点;一般用于燃用高挥发分煤种的锅炉。微油稳燃技术的煤质适应性较强;但对电除尘系统和脱硫系统有不利影响。富氧稳燃技术通过增大空气供给,加快煤粉燃烧速度和提高燃烧温度,也可达到提高低负荷稳燃的目的。

1.1.1.3 制粉系统改造

制粉系统通过磨煤机动态分离器改造可以降低煤粉细度并提高其均匀性指数,可有效提高锅炉低负荷稳燃能力。磨煤机动态分离器改造也有利于提高机组经济性,因此,广泛应用在燃煤机组。

1.1.1.4 混煤掺烧技术

混煤掺烧技术主要针对燃用低挥发分煤质的锅炉,通过掺烧高挥发分煤质,提高锅炉低负荷稳燃能力。常用的混煤掺烧技术有两种:一种为分组掺烧,即不同的煤斗存不同的煤种,再送入相应磨煤机进行磨制;另一种为预混掺烧,在煤场将高挥发分煤种和常用低挥发分煤种按比例提前掺混后送入煤斗。但是,无论是采用分组掺烧还是预混掺烧,锅炉正常负荷时要消耗大量高挥发分煤种,会提高机组运行成本。

1.1.2 精细化运行控制方式改造方案

通过精细化运行可以在已有工艺系统和燃煤条件下进一步挖掘锅炉的低负荷稳燃潜力。

1.1.2.1 制粉系统和燃烧器的监测仪表

风粉浓度、细度和速度是影响锅炉稳定燃烧的重要因素;炉膛、喷口温度和图像监测能直观地反映炉内的燃烧状况。因此,风粉细度/浓度在线监测装置、可调型煤粉分配器、炉膛温度/图像监测装置、燃烧器喷口温度/图像监测装置等可为机组低负荷稳定燃烧提供可参考的判据,对提高锅炉低负荷稳燃有一定的辅助作用。

1.1.2.2 煤粉细度调整

煤粉细度的降低有利于降低煤粉的着火热。在机组低负荷运行期间, 使用风粉在线监测装置监测磨煤机出口风粉细度, 并配合磨煤机分离器调整, 可降低煤粉细度提高低负荷稳燃性。

1.1.2.3 煤粉浓度和速度调整

煤粉质量浓度的提升(在合理范围)和一次风速度的降低均有利于降低煤粉的着火热。在机组低负荷运行期间, 可使用风粉浓度/细度在线监测装置监测磨煤机出口风粉浓度和速度, 配合可调型煤粉分配器, 可将各煤粉管风粉调平; 并且可在确保安全的前提下, 降低一次风速, 增加粉管内煤粉浓度。

1.1.2.4 煤粉温度控制

提升煤粉温度有利于降低煤粉的着火热, 使着火点位置提前。但是, 煤粉温度的提升, 有增加磨煤机及煤粉管道爆燃的潜在风险。因此, 建议在磨煤机出口增加 CO 监测设备和温度梯度变化监测设备, 在确保磨煤机安全的前提下, 提升磨煤机出口风粉浓度。

1.1.2.5 制粉投运方式调整

制粉投运方式对锅炉低负荷稳燃能力有很大影响。集中燃烧器情况下燃烧稳定性更强, 因此低负荷工况时, 建议投运相邻的燃烧器。

另外, 减少磨煤机的运行数量有利于提高粉管煤粉浓度和集中热负荷以及增强锅炉低负荷稳燃能力。但考虑到, 单台磨煤机存在磨煤机跳闸引起锅炉 MFT 的风险; 因此, 建议机组低负荷时, 至少投入两台磨煤机。

1.1.2.6 燃烧器相关调整

不同燃烧器也有着不同的运行方式和控制要求, 各机组可根据采用的燃烧器类型采用不同的精细化运行控制方式。例如:

1) 四角切圆燃烧系统应适当关小周界风, 降低煤粉着火热, 同时将辅助风开度控制合适开度。

2) 前后墙对冲燃烧系统应适当关小二次风风量。

目前已完成灵活性改造的燃煤项目在原有设备和煤质条件下, 通过一系列的精细化运行措施, 可将机组最低不投油稳燃负荷降低 5% ~ 10%。

2 水动力的安全性

锅炉水动力的安全性是限制机组最低负荷的另

一个关键因素, 在考虑机组最低负荷时, 还应验算低负荷情况下锅炉水动力的安全性。

2.1 锅炉水动力安全性分析

随着锅炉负荷降低, 受热面管道中工质的循环流量随之降低。当锅炉负荷低于临界值时, 循环流速低于循环流量临界值, 工质无法对受热面管道进行充分冷却, 造成受热面管道超温甚至爆管, 对锅炉的安全运行造成了极大的威胁。张莉等研究人员^[5]曾对亚临界锅炉在不同负荷工况下的锅炉水动力展开的模拟实验, 得出结论: (1) 在 50% 以上额定负荷条件时, 循环流速正常, 水循环良好; (2) 在 40% 额定负荷运行时, 循环流速有波动; 如炉膛燃烧工况稳定且不发生偏少, 循环流速正常, 可满足要求; (3) 在低负荷工况, 锅炉的水循环的可靠性较高负荷要差。在 30% 额定负荷下不宜长期运行; 在 20% 额定负荷下不宜运行。张帅博等研究人员^[6]曾对直流锅炉在不同负荷工况下的锅炉水动力展开的数值计算, 通过计算分析发现: 对于直流锅炉, 当机组处于低负荷状态时, 水冷壁入口给水压力低于临界压力且欠焓较大时, 极易造成受热面管道发生水动力不稳定问题。

另一方面, 锅炉低负荷工况时, 炉膛内部火焰分布不均匀, 致使每根受热面管道的热负荷不均。热负荷较小的管道循环流速较小, 可能出现不稳定的停滞和倒流现象, 从而引起锅炉受热面爆管。机组实际运行中, 受热面结渣将进一步加剧受热面管道热负荷的不均匀性, 进一步危害锅炉水动力安全性。

2.2 提高锅炉水动力安全性的措施

1) 机组投产、改造、大修后, 应对锅炉水循环进行核算和试验, 确认锅炉水动力安全的最低负荷。

2) 通过炉膛温度场测量系统、受热面温度测量系统和受热面管道壁温测点间接反映炉膛内部燃烧情况和各受热面受热情况, 以调整锅炉燃烧保证炉膛内部火焰均匀分布。

3) 通过调整燃烧器配风、燃烧器摆角和投入中上层燃烧器抬高炉膛火焰高度, 减少水冷壁受热的不均匀性。

4) 尽量保证锅炉负荷稳定, 减少负荷的剧烈波动。

5) 严格执行吹灰制度, 减少受热面结渣。条件

允许时,可采用智能吹灰系统提高锅炉吹灰效率。

6)对于直流机组,可实施零号高压系统改造以提高锅炉给水欠焓。

3 炉膛和制粉系统爆炸

3.1 炉膛爆炸分析及应对措施

对于低负荷运行的机组,当燃用挥发性较大的煤种时,炉膛和制粉系统爆炸的危险性就大大提高。炉膛爆炸的主要原因有:

1)进入炉膛的煤粉未能立即燃烧,造成煤粉在炉膛内积存,在氧浓度合适情况下,遇到一定点火能量就可能发生炉膛爆炸。

2)某些燃烧器火焰丧失而改燃烧器的燃料未被及时切断。

防止炉膛爆炸的措施有:

1)新机组投产、改造、大修后或使用燃料有较大变化时,应首先进行校核计算和冷态动力场试验、热态调整试验和燃烧调整试验,以确定不投油最低稳燃负荷。

2)加强点火油系统的维护管理,定期对燃油跳闸阀、燃油回油阀、油角阀、雾化阀和油枪等进行试验检查,防止燃油漏入炉膛发生爆燃并保证在低负荷燃烧或燃烧不稳时能够及时投油助燃。

3)加强火焰监视系统的维护管理并定期进行试验,防止火焰监视设备误动。

4)完善 FSSS 系统:(1)热工仪表、控制电源、保护系统应安全可靠,防止因仪控系统故障造成锅炉 MFT 动作;(2)灭火保护系统应纳入炉膛保护;(3)炉膛负压测点位置及正负压报警保护定值合理;(4)当炉膛已经灭火或濒临灭火时,应立即切断所有燃料;(5)锅炉 MFT 后和点火前必须进行充分吹扫,以除去炉膛和烟道内的可燃物。

3.2 制粉系统爆炸分析及应对措施

低负荷工况时,制粉系统爆炸的主要原因有:

1)新机组投产、改造、大修后或使用燃料有较大变化时,应首先确认磨煤机出口风粉的最高允许温度。

2)磨煤机运行中,要严格调整磨出口温度,严禁超过最高允许温度。

3)加强对磨煤机出口 CO 的监测或温度梯度的监测,防止风粉自燃。

4)磨煤机正常运行中,保证足够的密封风压

力,防止煤粉溢出引起积粉自燃、着火和爆炸。

5)磨煤机断煤运行时,应准确控制磨出口风温和风量逐步减少通风量;断煤时,应主动停运制粉系统。

6)磨煤机正常停运时,需要先降低出口风粉温度并将全部煤粉吹扫干净。

7)对停运磨煤机要进行惰化。

4 尾部烟道的潜在风险

4.1 尾部烟道积灰问题的分析及应对措施

机组低负荷运行时,水平烟道烟气流速较高负荷有很大幅度下降,尾部烟道可能大量积灰。因此,灵活性改造时需要开展烟道结构强度校核,必要时增加清灰装置。目前,防止尾部烟道积灰的常用措施主要有压缩空气风帽、蒸汽吹灰器和落灰斗等。

4.2 尾部烟道再燃烧问题的分析及应对措施

锅炉低负荷运行时,炉膛温度低、燃料燃烧不完全,飞灰中含有大量可燃物;同时烟气中过剩氧浓度高,大幅增加烟道再燃烧的可能性。防止尾部烟道再燃烧的措施有:监视排烟温度、飞灰含碳量和 CO、严格控制过量空气系数及烟道漏风。

4.3 尾部受热面、烟道和设备的腐蚀问题的分析及应对措施

机组低负荷运行时,尾部受热面壁温和排烟温度较低;而且,过量空气系数较大,会生成更多的 SO_3 ,提高了烟气的露点温度,导致尾部受热面、烟道和设备(比如空预器、除尘器等)腐蚀进一步加剧。当前,防止低负荷时尾部受热面、烟道和设备腐蚀主要改造方案有提高排烟温度方案、烟道/设备采用耐腐蚀材料或涂料和使用添加剂三大类改造措施。其中提高排烟温度的改造方案有:加装暖风器提升空预器入口风温、加装 0 号高加提高给水温度、加装空预器烟气旁路等方案。

5 蒸汽系统潜在风险

5.1 过热器/再热器蒸汽温度过低问题

随着锅炉负荷降低,过热器/再热器蒸汽温度随之下降。当过热蒸汽/再热蒸汽温度严重偏低威胁到汽机运行时,可采取以下措施:

1)增大过量空气系数提高热蒸汽/再热蒸汽温度。

2)通过调整燃烧器配风、燃气摆角和投入中上层磨煤机抬高炉膛火焰高度。

3)针对调整效果不佳的机组,可实施烟气再循环改造或增加受热面改造。

5.2 过热器/再热器蒸汽温度偏差

由于低负荷工况,炉膛火焰不均匀易引起过热器/再热器蒸汽温度偏差大;一方面,炉膛出口烟气偏差也可导致过热器/再热器蒸汽温度偏差。一般通过运行调整来解决以上问题,主要措施:

- 1)采用同心反切圆系统。
- 2)受热面布置采用分级、级间混合方式。
- 3)沿烟道宽度将过热器管子节距布置相等,避免出现“烟气走廊”。
- 4)通过减温水调节热偏差。

6 汽机及辅机适应性

汽机及辅机在低负荷工况下可能存在适应性差的问题影响机组在低负荷状态的安全性,因此需提高汽机及辅机的适应性。

6.1 汽机的适应性问题

低负荷工况时,汽机鼓风效应明显,低压缸蒸汽量小导致排汽温度可能大幅升高;排汽温度升高会导致低压缸的变形和轴承位置变化,引发机组振动异常增大。汽机长时间低负荷运行时,不能忽视这种可能性。针对这一风险,可采取低压缸水幕喷水装置向排汽中喷入减温水来降低排汽温度。

低负荷工况下,低压加热器可能受相邻两级抽汽压差小的影响造成疏水不畅。可通过低加疏水管道改造,减少加热器疏水管道的阻力。

6.2 其它辅机的适应性问题

磨煤机振动:磨煤机在低负荷工况下易出现振动现象。可通过减少磨煤机投运台数(至少两台)来提高其运行稳定性。

风机喘振:风机在低负荷下易出现“抢风”、“喘振”等现象。可采用单列风机运行方式来提高风机的稳定性;变频风机改造可以提高机组效率且可彻底解决这一问题。

空预器堵塞:SCR系统的过量喷氨与烟气中的 SO_3 反应生成硫酸氢铵,在低负荷工况下极易造成空预器堵塞。解决方案有:喷氨优化控制以降低氨逃逸率;投运暖风器、低温省煤器、热风再循环等方式提高空预器入口风温。

给水系统:低负荷工况下,除氧器压力降低,导致给水泵前置泵的汽蚀余量降低,有可能造成前置泵汽蚀。另一方面,当给水流量小于给水泵最小流量要求时,会开启给水泵再循环阀;长期处于这种工况会对给水泵再循环阀阀芯造成严重冲刷,使阀门关闭不严。另外,低负荷运行时,给水泵的控制难度增加,存在给水泵抢水和给水量大幅波动的风险。

7 结论

燃煤电厂灵活性改造的技术路线较为多样,各机组应从自身设备和煤质出发,在确保机组安全稳定运行的前提下寻求最适合机组自身特点的改造的技术路线。建议各机组应完成以下工作:

首先,建议开展低负荷下锅炉燃烧调整试验和锅炉水动力试验,并针对自身机组情况发现潜在风险点和限制机组深度调峰的瓶颈,为后续改造提供基础信息。

其次,根据试验和分析结果,结合自身灵活性改造需求,从工艺系统和控制系统等方面,从安全性、经济性和可行性多角度,进行多种技术方案比选并确定最终改造方案。

最后,实施机组灵活性改造、调试和验收,最终实现机组灵活性运行。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016—2020年)[EB/OL]. (2016-11-08)[2017-06-10]. <http://www.chinapower.com.cn/focus/20161108/64097.html>. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The electric power development planning in the "13th Five-Year" (from 2016 to 2020) [EB/OL]. (2016-11-08)[2017-06-10]. <http://www.chinapower.com.cn/focus/20161108/64097.html>.
- [2] 中国电力企业联合会. 2016—2017年度全国电力供需形势分析预测报告[R/OL]. (2017-01-25)[2017-06-10]. <http://www.cec.org.cn/yaowenkuaidi/2017-01-25/164285.html>. China Electricity Council. Prediction report of electricity supply and demand situation in China from 2016 to 2017 [R/OL]. (2017-01-25)[2017-06-10]. <http://www.cec.org.cn/yaowenkuaidi/2017-01-25/164285.html>.
- [3] 国家能源局. 2016年风电并网运行情况[R/OL]. (2017-01-06)[2017-06-10]. <http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c>

_ 136014615. htm.

National Energy Administration. The contribution of wind power generation to grid in 2016 [R/OL]. (2017-01-06) [2017-06-10]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c_136014615.htm.

- [4] 李凤瑞, 郭为. 大型燃煤锅炉的低负荷稳燃综述 [J]. 吉林电力, 2001, 153(2): 30-32.
LI F R, GUO W. Stablization combustion under low load of large capacity boiler [J]. Jilin Electric Power, 2001, 153(2): 30-32.
- [5] 张莉, 刘亚琴, 吕立霞, 等. 蒸汽锅炉低负荷运行对水动力可靠性的影响 [J]. 大连大学学报, 2005, 26(2): 20-23.
ZHANG L, LIU Y Q, LU L X, et al. Research of reliability and safety for the steam boiler running under the condition of low load [J]. Journal of Dalian University, 2005, 26(2): 20-23.
- [6] 张帅博, 冯伟忠. 直流锅炉水动力不稳定问题的分析与防治 [J]. 电力与能源, 2016, 37(1): 117-122.
ZHANG S B, FENG W Z. Analysis and prevention of hydrodynamic instability of once-through boiler [J]. Electrical Power and Resource, 2016, 37(1): 117-122.

作者简介:



PEI S

裴顺(通信作者)

1982-, 男, 安徽宣城人, 高级工程师, 中国科学技术大学硕士, 主要从事火电工程设计工作(e-mail)peishun@mail.com。

杨桂

1970-, 男, 广东茂名, 中国能源建设集团广东省电力设

计研究院有限公司专业级资深专家/高级工程师, 武汉水利电力大学生产过程自动化专业学士, 主要从事发电厂仪表与控制技术研究及设计(e-mail)yanggui@gedi.com.cn。

项目简介:

项目名称 大容量机组高效宽负荷率控制技术研究和应用”(EV03141W)

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

项目概述 2011年起, 每年约有10GW西部水电源源不断输送至广东电网; 且核电机组这几年不断投产, 广东电网内发电机组日益增多, 电网容量越来越富裕。考虑到水电、核电等清洁能源受政策性保护等因素, 火电机组利用小时数会逐年降低, 广东省内火电机组低负荷运行时间大幅增加。同时全国范围内百万级大型火电机组不断投产, 电网负荷高峰低谷情况越来越严重, 电网迫切需要大型火电机组参与电网调峰。在此背景下, 国内多家发电集团、主机厂、调试单位和设计院开始对大容量机组高效宽负荷率的优化技术进行研究。本项目的主要研究内容包括: 先进锅炉技术研究、先进汽轮机技术研究、先进控制技术研究和先进系统集成技术研究。本项目包括主辅机设备全负荷下性能优化、汽机深度滑压调节+凝结水快速响应负荷变化、机组低负荷安全和稳定运行、机组全程控制、燃烧控制优化、脱硝优化控制、数字化燃料管理系统等7个自专题。

项目成果 本项目依托海门、平海电厂进行了汽机深度滑压调节+凝结水快速响应负荷变化、低负荷安全稳定运行应用研究、机组全程控制技术、燃烧控制优化、脱硝系统催化剂管理等项目。采用了先进的运行及监控技术后, 效率得到提高, 每千瓦煤耗可降3克标准煤。

(责任编辑 李辉)