

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406122

# 闭式中储制粉系统 W 型火焰锅炉 掺烧烟煤技术研究

张勇<sup>1</sup>, 汪华剑<sup>2</sup>, 王洋<sup>2</sup>, 李超<sup>3</sup>, 唐荣富<sup>3</sup>, 解磊<sup>2</sup>,  
兰小洪<sup>3</sup>, 兰永胜<sup>4</sup>, 左天祥<sup>3</sup>

(1.皖能马鞍山发电有限公司, 安徽 马鞍山 243021; 2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;  
3.华能重庆珞璜发电有限责任公司, 重庆 402283; 4.华能辛店发电有限公司, 山东 淄博 255414)

**[摘要]** 闭式中储式制粉系统 W 型火焰锅炉设计燃用低挥发分贫煤和无烟煤, 大比例掺烧烟煤可以提升锅炉煤种适应范围和灵活性调峰运行能力, 但需要解决制粉系统防爆、送粉系统烧损和炉内防结焦等技术难题。提出采用低温炉烟调温的全炉烟惰性防爆制粉技术, 可以有效解决制粉系统防爆燃难题; 结合送粉介质降温和燃烧器适应性改造技术, 可以有效防止一次风管和燃烧器烧损; 再辅以卫燃带优化和燃烧优化调整技术, 可以有效控制炉内结焦的同时改善炉内燃烧的性能指标。综合以上技术措施, 实现了闭式钢球磨煤机中储式制粉系统 W 型火焰锅炉安全经济掺烧 70% 烟煤的目标。

**[关键词]** W 型火焰锅炉; 闭式钢球磨煤机; 中储式制粉系统; 大比例掺烧烟煤; 制粉系统防爆; 煤粉锅炉

**[引用本文格式]** 张勇, 汪华剑, 王洋, 等. 闭式中储制粉系统 W 型火焰锅炉掺烧烟煤技术研究[J]. 热力发电, 2025, 54(3): 99-107. ZHANG Yong, WANG Huajian, WANG Yang, et al. Co-firing bituminous coal in a W-shaped flame boiler with closed intermediate storage pulverization system[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(3): 99-107.

## Co-firing bituminous coal in a W-shaped flame boiler with closed intermediate storage pulverization system

ZHANG Yong<sup>1</sup>, WANG Huajian<sup>2</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, LI Chao<sup>3</sup>, TANG Rongfu<sup>3</sup>, XIE Lei<sup>2</sup>,  
LAN Xiaohong<sup>3</sup>, LAN Yongsheng<sup>4</sup>, ZUO Tianxiang<sup>3</sup>

(1.Anhui Ma'anshan Power Generation Co., Ltd., Ma'anshan 243021, China; 2.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;  
3.Huaneng Luohuang Generation Co., Ltd., Chongqing 402283, China; 4.Huaneng Xindian Power Generation Co., Ltd., Zibo 255414, China)

**Abstract:** The W-shaped flame boiler with closed middle storage pulverizing system is designed to burn low volatile lean coal and anthracite. Blending coal with high proportion of bituminous coal is able to improve the adaptability of fuel and the flexibility of the boiler. It is necessary to solve the technical problems such as explosion prevention of the pulverizing system, anti-burning of pulverized coal pipes and prevention of serious slagging in the furnace. Therefore, an inert explosion-proof pulverizing technology, in which low temperature flue gas is used for temperature adjustment, is proposed. This method solves the problem of explosion prevention of coal pulverizing system effectively. By increasing the capacity of cooling air from primary fan to reduce the temperature of hot primary air conveying pulverized coal and the adaptability of the burners to blended bituminous, the safety of the primary air pipes and the burners will be guaranteed. With the optimization of

收稿日期: 2024-06-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFC1910000); 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ22-HF48)

Supported by: National Key Research and Development Program (2020YFC1910000); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-HF48)

第一作者简介: 张勇 (1975), 男, 助理工程师, 主要研究火电厂集控运行精细化调整及深度调峰下锅炉安全稳定运行, 11390344@qq.com。

通信作者简介: 王洋 (1988), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电站锅炉清洁燃烧技术, wangyang@tpri.com.cn。

refractory belt arrangement and combustion adjustment, this method not only controls the slagging, but also improves the performance of combustion in the furnace effectively. By these integrated technologies presented above, the goal of co-firing 70% bituminous coal safely and economically in the W-shaped flame boiler with closed ball mill medium storage pulverizing system is achieved.

**Key words:** W-shaped flame boiler; closed ball mill; intermediate storage pulverization system; co-firing blended bituminous coal with high proportion; explosion prevention of pulverization system; pulverized coal boiler

W 型火焰锅炉作为我国燃用低挥发分煤的主力炉型,在我国云南、贵州、四川、河北、广东、湖南和湖北等地广泛分布,解决了大量低挥发分煤的消纳和利用问题,为我国电力行业的发展和经济建设作出了重大贡献<sup>[1-5]</sup>。由于我国动力用煤结构的转变和该炉型自身的结构特点,原设计消纳低挥发分贫煤、无烟煤的 W 型火焰锅炉普遍面临以下困难<sup>[2-3,6-8]</sup>: 1) 煤源结构变化,燃料成本高。由于建设之初的当地低挥发分煤矿的关停,贫煤、无烟煤采购困难且价格高,企业经营压力大; 2) 灵活性调峰运行能力受限。国家政策对燃煤电站锅炉调峰运行能力提出更高要求,锅炉燃用贫煤、无烟煤等低挥发分煤种,调峰能力有限,通常只能达到 40%~50% 额定负荷,距离行业先进水平 20%~30% 额定负荷的调峰能力仍有较大差距; 3) 劣质贫煤、无烟煤等低挥发分煤混烧的特性也决定了其燃尽性能相对较差,造成飞灰含碳量相对较高,燃烧经济性较差; 4) 当前锅炉还存在燃用无烟煤、贫煤等低挥发分煤种,NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> 等污染生成浓度较高,实现超低排放运行成本高,这也是企业经营效益提升一个重要限制性因素。

目前 W 型火焰锅炉掺烧烟煤技术是行业亟需解决的重要课题,国内诸多高校、科研院所、动力装备制造企业等通过 CFD 数值模拟、设备改造和现场试验等多种技术手段开展了 W 型火焰锅炉高效、清洁燃烧和灵活性技术的研究和探索,取得了较多研究成果,在 W 型火焰锅炉掺烧烟煤技术方面,主要研究进展包括<sup>[1-2,7,9-21]</sup>: 1) 低负荷掺烧是实现 W 型火焰锅炉深度调峰目标的重要技术路径; 2) 将低温炉烟引入双进双出钢球磨煤机(钢球磨)制粉系统,降低制粉系统 O<sub>2</sub> 体积分数,提升制粉系统磨制烟煤的防爆能力,从而提升锅炉掺烧烟煤的比例; 3) 将双进双出钢球磨制粉系统改造成为中速磨直吹式制粉系统,并对燃烧系统、汽水系统等进行整体改造,实现 W 型火焰锅炉改烧神华烟煤等。

以上研究结果显示,当前此类研究主要针对直

吹式制粉系统 W 型火焰锅炉掺烧烟煤技术展开,缺乏针对中储式制粉系统特别是闭式中储制粉系统 W 型火焰锅炉掺烧烟煤技术的研究工作。由于钢球磨闭式中储式制粉系统设计和运行特点,其对烟煤的适应能力比直吹式制粉系统和传统钢球磨开式中储式制粉系统更差,制粉系统防爆燃、送粉管道和燃烧器防烧损、炉内防结焦等技术难题更为突出。本文针对该类型制粉系统 W 型火焰锅炉大比例掺烧烟煤技术研究的相关结果,可为同类型锅炉掺烧烟煤提供有益的参考和借鉴。

## 1 设备概况

### 1.1 锅炉设备

本文研究对象为某 360 MW 机组 W 型火焰锅炉,其为法国 STEIN INDUSTRIE 生产的亚临界、单炉膛、一次中间再热、强制循环、固态排渣、燃煤汽包炉,平衡通风、Π 型露天布置、全钢构架悬吊结构。每台炉配备 2 套中储式制粉系统、2 台钢球磨煤机、18 台给粉机供 18 组煤粉燃烧器。锅炉系统总体结构如图 1 所示。

锅炉原设计燃用低挥发分无烟煤,近年来由于煤源结构变化,需大比例掺烧烟煤至 70%,锅炉原设计煤质和拟掺烧煤种煤质特性见表 1。

### 1.2 制粉系统

W 型火焰锅炉制粉系统配有 2 套钢球磨煤机,设计采用中间储仓闭式制粉系统,其干燥介质为炉膛下部的高温热烟气,调温风为二次风和冷风。排粉机出口的乏气一部分进入磨煤机出口进行再循环,另一部分经乏气风机从乏气喷嘴送入炉膛燃烧。制粉系统流程示意如图 2 所示。

### 1.3 燃烧系统

锅炉配置有 18 台给粉机,通过风粉混合器为 18 组燃烧器提供煤粉。原燃烧器为缝隙式直流燃烧器,后通过改造将原 18 组 36 只狭缝式燃烧器更换为 18 只圆形低 NO<sub>x</sub> 燃烧器,燃烧器结构如图 3 所示。

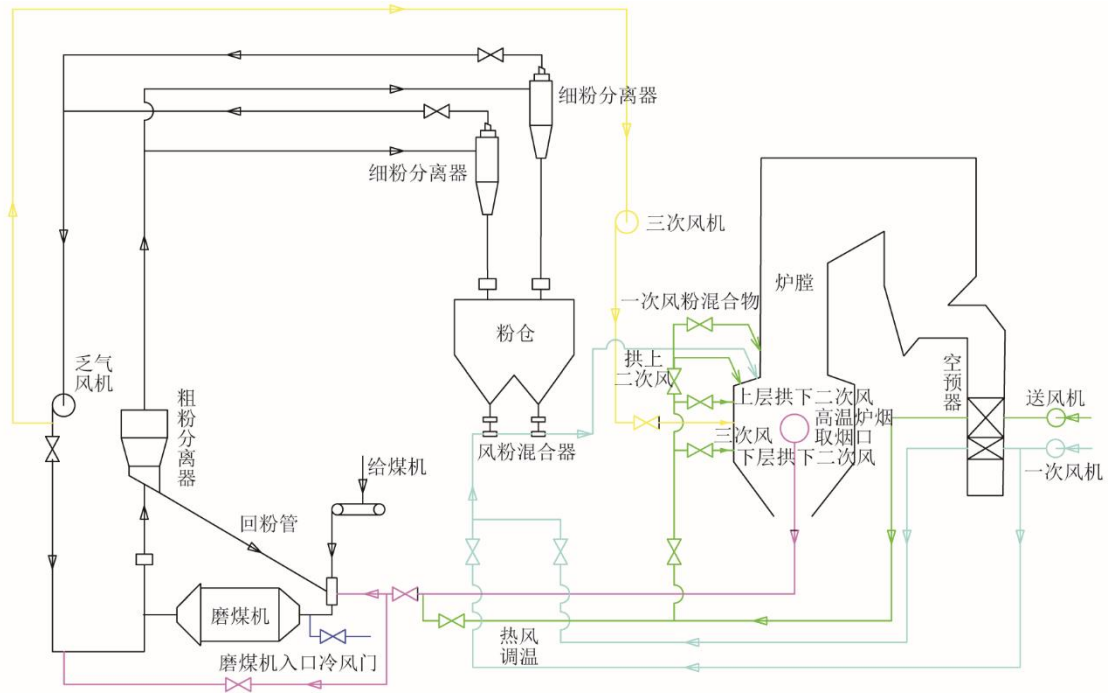


图 1 锅炉系统流程示意

Fig.1 Process diagram of the boiler system

表 1 煤质特性参数  
Tab.1 Coal quality parameters

项目	原设计值	改造煤质特性		
		贫煤	烟煤	30%贫煤+70%烟煤
工业分析				
$V_{ar}/\%$	5.40~10.21	9.02	24.73	20.02
$V_{daf}/\%$	7.50~18.10	16.00	32.53	28.55
$M_t/\%$	2.50~8.00	8.61	12.41	11.27
$A_{ar}/\%$	25.53~35.53	35.01	11.57	18.60
$Q_{ar.net}/(MJ \cdot kg^{-1})$	9.924~23.279	18.66	25.12	23.180
元素分析				
$w_{ar}(C)/\%$	54.89~61.95	46.62	63.51	58.44
$w_{ar}(H)/\%$	2.14~2.71	2.00	3.49	3.04
$w_{ar}(O)/\%$	0.68~3.24	1.41	7.88	5.94
$w_{ar}(N)/\%$	0.88~1.15	1.05	0.72	0.82
$w_{ar}(S)/\%$	3.50~5.00	4.00	0.41	1.49
灰熔点				
DT/ $^{\circ}C$	1 160~1 320	1 300	1 100	1 189
ST/ $^{\circ}C$	1 280~1 420	1 400	1 120	1 268
FT/ $^{\circ}C$	1 320~1 440	1 440	1 260	1 356

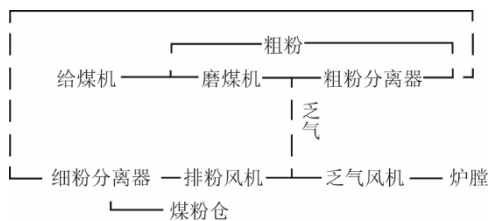


图 2 制粉系统流程

Fig.2 Flowchart of the pulverizing system

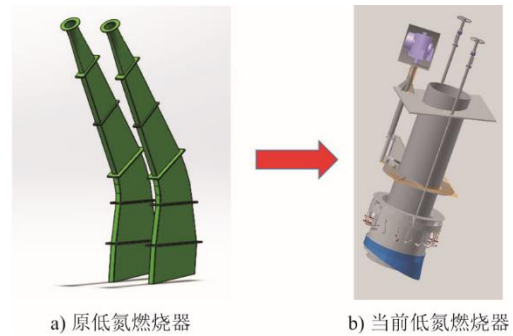


图 3 燃烧器结构示意图

Fig.3 Structural diagram of the burners

在锅炉上炉膛共设 18 只燃尽风喷口，与改造后的新型燃烧器一一对应。送风机提供的二次风分三级送入炉膛，分别为前后墙二次风、拱上二次风和上炉膛燃尽风，其中前后墙二次风喷口分为上下 2 层，分别位于乏气喷口的上部和下部。锅炉燃烧系统各级配风布置示意如图 4 所示，各层配风主要参数见表 2。锅炉原卫燃带布置示意如图 5 所示，其中卫燃带面积约 457 m<sup>2</sup>。

## 2 技术难点与解决方案

### 2.1 制粉系统干燥介质惰性不足

由于锅炉采用中间储仓闭式制粉系统，其干燥介质为炉膛下部的 800~1 000 °C 高温热烟气，其调温风为 300 °C 左右的二次风和常温冷风。通常磨煤

机入口干燥介质由炉烟和热风的混合物组成，入磨煤机介质温度为 600~700 °C，磨煤机这部分净通风量与再循环乏气在磨煤机出口混合并携带磨煤机出口的煤粉，经过粗粉分离器、细粉分离器分离煤粉和乏气。乏气通过排粉机加压，一部分进入磨煤机出口形成再循环乏气，另一部分经乏气风机从乏气喷嘴送入炉膛燃烧。

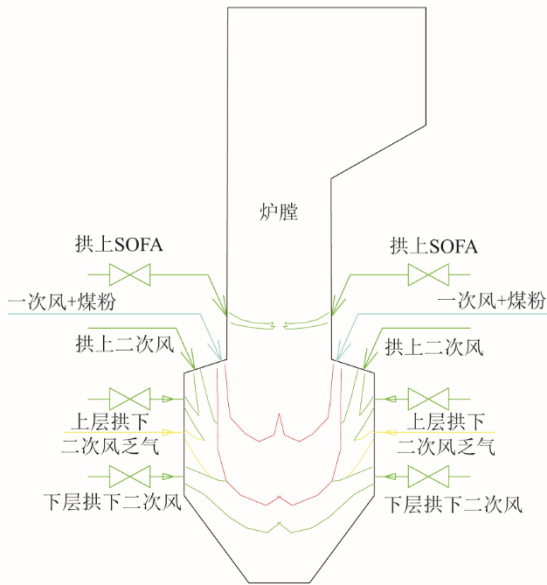


图 4 燃烧配风系统示意

Fig.4 Schematic diagram of the air distribution system during combustion

表 2 燃烧系统主要设计参数

Tab.2 Main design parameters of the combustion system

项目	数值
炉膛出口过量空气系数	1.23
煤粉细度 $R_{75}$ ( $R_{90}$ ) /%	约 21 (约 16)
一次风风率/%	约 10.8
拱上二次风率/%	40
三次风率/%	约 20
燃尽风率/%	20
制粉乏气风率/%	约 5
一次风风速/(m·s <sup>-1</sup> )	约 16
拱上二次风速/(m·s <sup>-1</sup> )	45
三次风速/(m·s <sup>-1</sup> )	25
燃尽风速/(m·s <sup>-1</sup> )	45
制粉乏气风速/(m·s <sup>-1</sup> )	40

由于入磨煤机介质温度高达 600~700 °C，且制粉系统管系及设备是针对低挥发分无烟煤设计建造，存在管系长、部分管路布置倾角小，燃用烟煤易产生积粉自燃、爆燃风险。

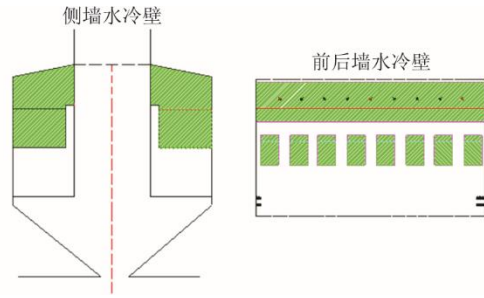


图 5 原卫燃带布置示意

Fig.5 Schematic diagram of the original refractory belt arrangement

为了解原空气调温炉烟制粉系统惰性边界条件，对锅炉原有 A、B 侧抽烟口的 O<sub>2</sub> 体积分数及温度进行了测试，O<sub>2</sub> 体积分数测点从下部向上部依次间隔约 50 cm，测点示意如图 6 所示，测试结果见表 3。

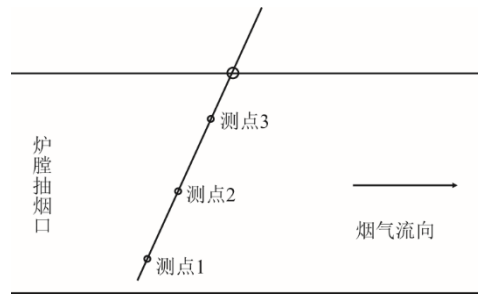


图 6 炉烟管路测点示意

Fig.6 Schematic diagram of the measuring points in flue gas pipe

表 3 改造前制粉系统惰性介质测试主要结果

Tab.3 Major test results of inert medium of pulverizing system before modification

项目	300 MW 负荷测试结果	
	A 侧	B 侧
抽烟口 O <sub>2</sub> 体积分数 (不同深度) /%	8.5/11.0/17.5	8.3/10.0/12.5/17.2
抽烟口 O <sub>2</sub> 体积分数均值/%	12.3	12.0
磨煤机入口炉烟温度/°C	691	659
粗粉分离器入口 O <sub>2</sub> 体积分数/%	18.8	18.9

现场试验结果显示取烟气点抽取的烟气 O<sub>2</sub> 体积分数约为 8%~12%，但由于二次风热风及制粉系统设备及管路老化磨损漏风导致实际制粉系统 O<sub>2</sub> 体积分数大幅升高，对制粉系统 O<sub>2</sub> 体积分数影响较大，粗粉分离器入口 O<sub>2</sub> 体积分数高达约 18%~19%，仅略低于大气，较国家能源局《防止电力生产事故的二十五项重点要求（2023 版）》制粉系统防爆规程要求的 O<sub>2</sub> 体积分数 14% 水平差距明显，燃用烟煤条件下制粉系统爆燃风险高。

因此,制粉系统需提升制粉的惰性环境以适应70%烟煤制粉的防爆需要。依据锅炉系统特点,提出引入引风机出口的低温炉烟替代调温热风,形成

“高温炉烟干燥+低温炉烟调温”全炉烟制粉系统,流程示意如图7所示。

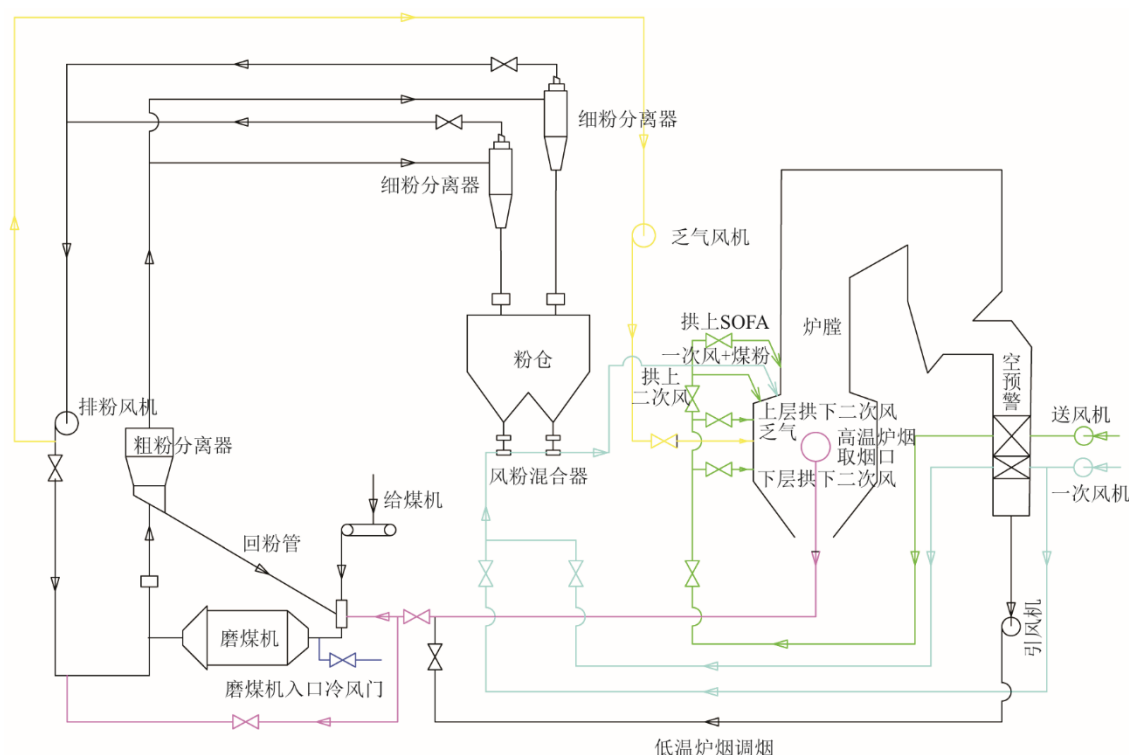


图7 低温炉烟调温全炉烟制粉系统示意

Fig.7 Schematic diagram of the pure flue gas pulverizing system with cool flue gas regulating temperature

## 2.2 送粉管路防烧损

由于掺烧烟煤改造后入炉煤质的干燥无灰基挥发分  $V_{daf}$  约为 28.55%, 属于烟煤范畴, 为防止粉管烧损, 根据《火力发电厂煤和制粉系统防爆设计技术规程》(DL/T 5203—2022), 要求在采用热风送粉条件下, 需将风粉混合物温度降低至 160 °C 以下。

当前可采用的技术有乏气热风复合送粉技术、一次风降温技术或一次风箱掺冷风技术。综合考虑机组服役年限和投资改造成本, 本项目采用将一次风冷风扩容后, 提升一次风冷风调温能力, 将一次风箱温度降低至 200 °C 以下, 满足风粉混合物低于 160 °C 的烟煤安全输送需要。

## 2.3 喷口防烧损

由表 2 可知, 当前燃烧器设计一次风速度约 16 m/s, 且改造前对着火距离进行的测试结果表明在约 40% 烟煤掺烧比例条件下, 一次风出口着火距离约为 300~600 mm。进一步提升烟煤比例后, 喷口因着火距离过近引起烧损的风险较大。为提升喷口防烧损能力, 将一次风喷口通流面积缩小 20%、提升一次风喷口速度至 21~22 m/s。结合锅炉各层

配风在一定范围内可调, 一次风速提升后可通过拱上、拱下各层配风的优化调整, 适应大比例掺烧烟煤的运行需要。

## 2.4 飞灰含碳量升高

高挥发分烟煤和低挥发分煤种的混烧引发飞灰含碳量升高。这需要通过制粉和燃烧系统的优化调整, 优化煤粉细度、配风方式等措施, 优化炉内燃烧过程, 从而降低飞灰含碳量, 提升锅炉燃烧效率。

## 2.5 炉内防结焦

由于 W 型火焰锅炉炉膛宽大, 炉内呈现平行射流的动力场特性, 煤粉火焰之间缺乏相互热量支持, 故该炉型低负荷稳燃能力相对较低, 需要在炉内敷设一定面积的卫燃带以维持炉内燃烧稳定。鉴于掺烧烟煤灰熔点较设计煤种低, 故应在兼顾低负荷灵活性调峰时炉内燃烧稳定的目标下, 适当减少卫燃带面积, 以兼顾预防低灰熔点烟煤在炉内大面积结焦和灵活性调峰运行的需要。参考同类型机组掺烧烟煤的经验, 提出保留两拱卫燃带布置, 对两侧墙和前后墙卫燃带进行分块, 并适当减少卫燃带面积, 具体方案如图 8 所示, 卫燃带优化后总面积

约为改造前的 65%。

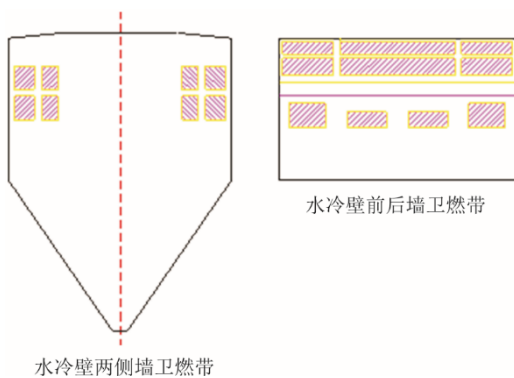


图 8 优化后卫燃带布置示意

Fig.8 Schematic diagram of the optimized refractory belt arrangement

### 3 现场试验验证

通过采用本文提出的技术方案对现场相关设备及系统进行了改造，改造后通过现场试验对相关系统大比例掺烧烟煤的性能进行了验证。

#### 3.1 制粉系统惰化防爆燃

采用图 7 所示的低温炉烟调温的全炉烟制粉系统改造后，可以采用引风机后 100~130 °C 的低温炉烟将抽取的 800~1 000 °C 高温热烟气进行调温，调温范围约为 200~700 °C，磨煤机出口温度可根据煤质变化和运行需要在 65~85 °C 调节。为验证制粉系统内的惰性环境，通过 Testo350 烟气分析仪对磨煤机入口、排粉机出口和粗粉分离器入口的 O<sub>2</sub> 体积分数进行测试，测试结果见表 4。

表 4 全炉烟制粉系统惰性条件参数  
Tab.4 Inert medium parameters of the pure flue gas pulverizing system

项目	烟煤掺烧比例		
	50%	60%	70%
磨煤机入口温度/°C	600~680	600~680	600~680
磨煤机出口温度/°C	80~85	75~80	70~75
高低温炉烟混合处 O <sub>2</sub> 体积分数/%	3~7	3~7	3~7
磨煤机入口 O <sub>2</sub> 体积分数/%	6~8	6~8	6~8
磨煤机入口 CO 体积分数/(μL·L <sup>-1</sup> )	50~100	100~150	150~300
排粉机出口 O <sub>2</sub> 体积分数/%	13~15	13~15	13~15
排粉机出口 CO 体积分数/(μL·L <sup>-1</sup> )	0~50	20~100	30~150
粗粉分离器入口 O <sub>2</sub> 体积分数/%	10~12	10~12	10~12
粗粉分离器入口 CO 体积分数/(μL·L <sup>-1</sup> )	20~80	30~150	30~200

注：1.本表格数据为 40%~100% 负荷多次测量的平均数据，代表了实际运行中关键惰性参数的运行状态。

2.磨煤机入口氧量测点为落煤管上临时安装测点，用于测量磨煤机入口烟气成分。

冷热炉烟混合后的 O<sub>2</sub> 体积分数，主要与锅炉的运行 O<sub>2</sub> 体积分数状态有关，一般为 3%~7%，其中，中高负荷炉烟混合后 O<sub>2</sub> 体积分数相对较低，主要原因是中高负荷锅炉运行 O<sub>2</sub> 体积分数相对较低，且炉内取烟口区域相对缺氧，高温炉烟与调温的低温炉烟 O<sub>2</sub> 体积分数均相对较低。磨煤机入口 O<sub>2</sub> 体积分数较炉烟混合处高约 2 个百分点，主要是由于炉烟混合位置距离磨煤机入口较远、管路漏风所致。而磨煤机出口即粗粉分离器入口到排粉风机出口管路长达百米，且管路上系统设备已接近使用寿命，漏风问题较突出，故粗粉分离器入口至排粉机出口 O<sub>2</sub> 体积分数升高 2~3 个百分点。

在对制粉系统内不同工况下的 CO 体积分数的测试结果显示，制粉系统内的 CO 体积分数随烟煤比例上升呈现升高趋势，表明烟煤比例升高，制粉系统的防爆燃压力提升。在 70% 烟煤比例条件下，本制粉系统内部 CO 体积分数小于 200 μL/L，处于较低水平，制粉系统整体处于较安全平稳水平。

总体而言，由于制粉系统漏风及闭式系统进入磨煤机的炉烟通常仅约占总通风量的 30%，使得制粉系统漏风及再循环乏气（含漏风）显著提升磨煤机出口管路内的 O<sub>2</sub> 体积分数，即系统漏风对制粉系统惰性环境的影响较常见开式制粉系统高。

#### 3.2 送粉管路防烧损

随着烟煤掺烧比例提升，逐渐开启一次风箱冷风旁路调温风门，降低一次风箱温度至约 200 °C，各一次风支管上的风粉混合物温度降至 160 °C 以下。70% 烟煤掺烧比例下，经过长周期运行，各一次风支管温度未见异常，表明本技术方案可靠。

#### 3.3 喷口防烧损

随着烟煤掺烧比例提升，燃烧器出口的着火距离逐渐缩短，有喷口结焦和烧损的风险。为比较烟煤掺烧比例对煤粉气流着火距离的影响，选择后墙偏中间的燃烧器作为代表性燃烧器，测量燃烧器出口的火焰温度分布进行比较分析。试验分别选择 360 MW（满负荷）和 180 MW 2 个负荷测量着火距离，具体结果如图 9 和图 10 所示。

由于烟煤掺烧比例 50%~70% 混煤的干燥无灰基挥发分都高于 20%，属于烟煤水平，可近似认为煤粉火焰的着火温度约为 800 °C。以此为基准比较不同负荷、不同烟煤比例的着火距离变化。着火距离测试结果显示，随着烟煤比例提升，一次风火焰的着火距离逐渐缩短，且负荷越高，着火距离越短，

这主要是因为烟煤比例高的煤粉气流更容易着火，且高负荷炉内热负荷水平高，高温烟气对煤粉气流的着火具有明显促进作用。测试结果也显示，70% 大比例掺烧烟煤条件下改造后的燃烧器喷口一次风速度合理，高负荷时煤粉火焰着火距离约 400~600 mm，低负荷时约 500~900 mm，可以有效防止喷口回火或着火距离过近引起喷口烧损。

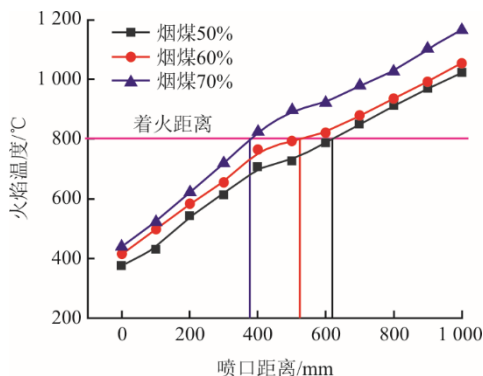


图 9 360 MW 负荷燃烧器出口着火距离测试结果  
Fig.9 Testing results of ignition distance at burner outlet at 360 MW

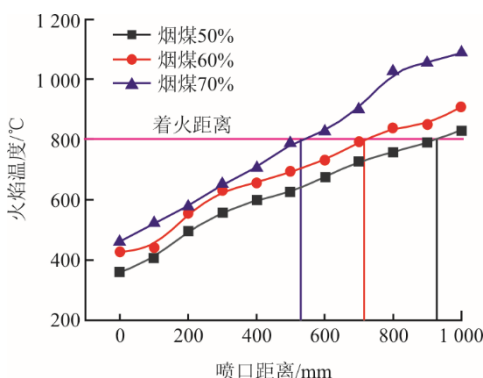


图 10 180 MW 负荷燃烧器出口着火距离测试结果  
Fig.10 Testing results of ignition distance at burner outlet at 180 MW

### 3.4 飞灰含碳量控制

烟煤混烧低挥发分煤种条件下，存在的“抢风”现象是引起飞灰含碳量升高的重要原因。煤粉细度是锅炉飞灰含量影响的关键因素之一，故可通过优化煤粉细度进行飞灰含碳量的优化调整。

本锅炉为钢球磨煤机闭式热风送粉制粉系统，该系统调节煤粉细度主要有 2 种方法：其一是通过调整粗粉分离器折向挡板间距来控制粗粉分离器阻力和对煤粉的惯性分离作用，达到调节粗粉分离器的回粉量和煤粉细度的目的；另一种是通过调节乏气再循环风门开度来调节磨煤机出口至排粉机出口的带粉乏气速度，从而间接调节回粉量和煤粉细度。通过锅炉满负荷条件下的试验，获取的煤粉

细度随折向挡板间距以及再循环门开度的关系曲线如图 11 和图 12 所示。

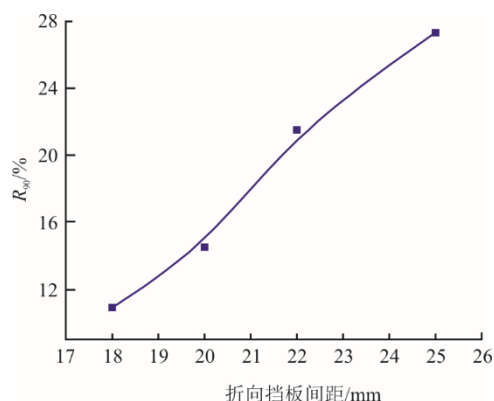


图 11 煤粉细度随粗粉分离器折向挡板间距变化曲线  
Fig.11 Variation curve of pulverized coal fineness with the baffle spacing of coarse powder separator

图 11 显示了乏气再循环门开度 70% 条件下的煤粉细度的变化。图 11 的结果表明，粗粉分离器折向挡板间距对煤粉细度的影响较大，折向挡板开度在 18~24 mm 之间调节可以将煤粉细度  $R_{90}$  控制在 12%~26%，其中折向挡板置于 20~21 mm 左右，可以将  $R_{90}$  控制在 16%~18%。

图 12 显示了在折向挡板间距约 22 mm 条件下乏气再循环门开度对煤粉细度的影响。

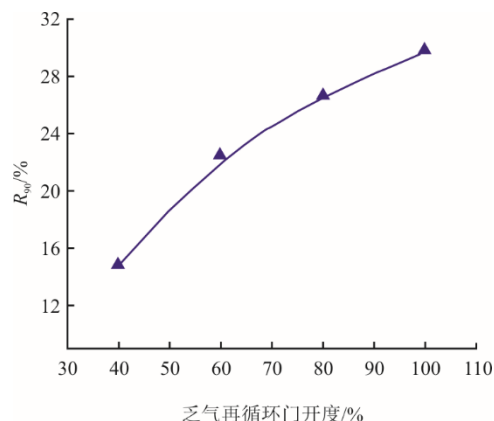


图 12 煤粉细度随乏气再循环门开度变化曲线  
Fig.12 Variation curve of pulverized coal fineness with the opening of exhaust gas recirculation valve

图 12 的测试结果表明，乏气再循环门的开度对煤粉细度的影响相对较小，需要较大幅度调整再循环风门开度才能实现对煤粉细度的调整。因为再循环风门调整主要是通过调整再循环管路的阻力，调整磨煤机组出口至细粉分离器的乏气流量和风速，间接调整回粉量和煤粉细度，而乏气再循环风门调节特性决定其开度在 70% 以上，对风门开度变化与乏气流量变化敏感度较低，故对煤粉细度的调

整变化幅度较小,但再循环门开度偏小会影响制粉系统通风量,从而对制粉系统出力造成较大影响。测试结果显示,将乏气再循环风门开度控制在40%~50%,可以将煤粉细度  $R_{90}$  控制在16%~18%。

综上所述,本试验中对煤粉细度的调整优先调整折向挡板间距,再根据运行需要适度调整再循环风门开度控制煤粉细度和制粉系统出力,整体而言能获得较佳的煤粉细度调整效果。

试验对比了烟煤掺烧比例70%的混煤的3个煤粉细度即  $R_{90}$  分别为28%、22%和18%条件下,100%、75%和50%负荷下锅炉飞灰含碳量的变化,主要结果如图13所示。

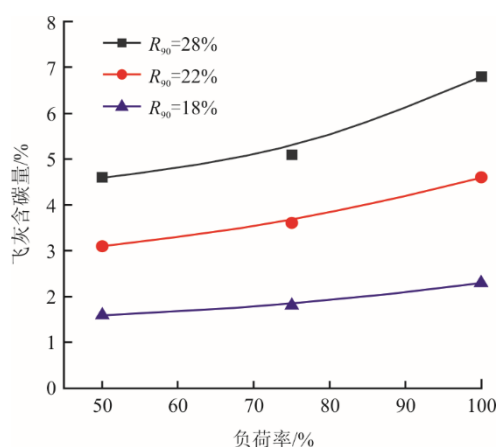


图13 飞灰含碳量与煤粉细度的关系曲线

Fig.13 The relationship between unburned carbon in fly ash and fineness of pulverized coal

图13的结果显示,煤粉细度对飞灰含碳量的影响很大,总体呈现煤粉细度  $R_{90}$  降低,飞灰含碳量逐渐降低的趋势。主要原因是较细的煤粉在炉内的燃尽特性更好,更容易着火和燃尽。高负荷时飞灰含碳相对较高,主要是因为高负荷条件下炉内  $O_2$  体积分数相对较低且煤粉在炉内的停留时间相对较短。试验结果显示,试验掺烧烟煤比例70%条件下,煤粉细度  $R_{90}$  控制在18%左右,可以将不同负荷的飞灰含碳量控制在2%左右,锅炉未燃尽损失较小,有利于提高锅炉燃烧效率。

### 3.5 防结渣控制

结合锅炉燃烧系统特点,改造后通过冷热态试验对炉内运行进行优化调整。其中对一次风粉的均匀性进行了冷热态调平,将风粉偏差控制在 $\pm 10\%$ 。对拱上、拱下及SOFA等各层二次风配风结合掺烧煤种的燃烧特性和运行需要进行针对性调整,使得炉膛火焰中心位于合理位置,炉膛出口  $O_2$  体积分数分布均匀(SCR入口烟炉膛宽度方向  $O_2$  体积分

数偏差 $\pm 10\%$ ),防止局部缺氧和燃烧集中。炉内各区域未见明显结焦,且各项燃烧指标正常平稳。

通过长周期的运行观察,炉内各负荷条件下燃烧稳定性和可靠性良好,未见大焦、大渣脱落引起燃烧剧烈波动情况,汽水系统等相关参数也在正常范围。汽水系统参数改造前后变化不大是因为烟煤火焰形成更短,易造成下炉膛火焰温度升高,火焰中心相对下移,本研究中通过减少卫燃带、燃烧器改造及燃烧优化等技术措施,增加下炉膛吸热,优化炉内燃烧过程,较好地平衡烟煤比例升高引起的炉内燃烧状况变化对汽水系统的影响。

锅炉试验和长期运行结果表明燃烧器、卫燃带优化改造结合运行优化调整的方案实施后,锅炉能够满足当前大比例掺烧烟煤长周期运行的需要,技术方案取得良好成效。

## 4 结 论

本文通过对某闭式中储式制粉系统大比例掺烧烟煤技术难点的分析,提出针对烟煤特性的制粉系统防爆燃、送粉管路防烧损,并对燃烧器、卫燃带进行优化和改造后运行优化调整的整体技术方案,实现安全经济烟煤掺烧比例70%的目标,具体总结如下。

1) 采用“高温炉烟干燥+低温炉烟调温”的全炉烟制粉技术,结合制粉系统漏风治理,可以将闭式中储式制粉系统的  $O_2$  体积分数控制在14%水平,有效惰化炉内制粉环境,大幅提升制粉系统的防爆能力,可以满足烟煤掺烧比例70%条件下制粉系统防爆燃的需要。

2) 通过一次风冷风增容的技术措施,降低一次风送粉温度至160℃以下,可以有效防止大比例掺烧烟煤条件下粉管的烧损。

3) 随着烟煤的掺烧比例提升,煤粉气流着火距离缩短,应根据烟煤燃烧特性和燃烧系统特点,适当提升燃烧器出口风速防止喷口烧损。

4) 大比例掺烧灰熔点较低的烟煤,应结合燃烧系统特点和调峰运行需要,优化卫燃带布置并进行燃烧系统运行优化调整,防止炉内严重结焦并提升炉内燃烧性能指标。

### [参 考 文 献]

- [1] 冀帅宇,段立强,王远慧,等.典型燃煤机组灵活调峰策略及性能研究[J].热力发电,2023,52(9):94-103.  
JI Shuaiyu, DUAN Liqiang, WANG Yuanhui, et al. Research on flexible peak load regulation strategy and

- performance of typical coal-fired units[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(9): 94-103.
- [2] 柳宏刚, 余园元. W型火焰锅炉无烟煤掺烧烟煤试验研究[J]. *热力发电*, 2013, 42(1): 36-40.  
LIU Honggang, SHE Yuanyuan. Experimental study on co-firing of anthracite and bituminous coal in a W-flame boiler[J]. *Thermal Power Generation*, 2013, 42(1): 36-40.
- [3] 罗志, 王晓冰, 潘栋, 等. W火焰锅炉SCR脱硝超低排放技术及应用[J]. *热力发电*, 2024, 53(3): 99-109.  
LUO Zhi, WANG Xiaobing, PAN Dong, et al. Ultra low emission technology of SCR flue gas denitration in W-flame boiler and the application[J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(3): 99-109.
- [4] 冉大召, 邹加文, 杨长军. 邯峰电厂660 MW机组W型火焰锅炉精细化配煤掺烧的可行性研究[J]. *锅炉技术*, 2021, 52(1): 51-55.  
RAN Dazhao, ZOU Jiawen, YANG Changjun. Feasibility study on fine coal blending and blending for W-Type flame boiler of 660 MW unit in Hanfeng Power Plant[J]. *Boiler Technology*, 2021, 52(1): 51-55.
- [5] 张晖, 刘成成, 于鹏峰, 等. 超临界W火焰锅炉燃用劣质燃料燃烧优化研究[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(10): 104-111.  
ZHANG Hui, LIU Chengcheng, YU Pengfeng, et al. Study on combustion optimization of supercritical W flame boilers burning poor quality fuel[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(10): 104-111.
- [6] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. *热力发电*, 2018, 47(5): 8-13.  
HOU Yuting, LI Xiaobo, LIU Chang, et al. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(5): 8-13.
- [7] 李秋白, 李朝兵, 谭锐, 等. 油风和周界风对W火焰锅炉燃烧影响数值模拟研究[J]. *锅炉技术*, 2023, 54(5): 48-53.  
LI Qiubai, LI Chaobing, TAN Rui, et al. Numerical simulation study on influence of oil air and circumferential air on combustion of W-flame boiler[J]. *Boiler Technology*, 2023, 54(5): 48-53.
- [8] 李争起, 张鑫, 陈智超, 等. W火焰锅炉多次引射分级燃烧机理及技术研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50(7): 849-862.  
LI Zhengqi, ZHANG Xin, CHEN Zhichao, et al. Multi-injection multi-staging combustion mechanistic studies and down-fired boiler technology[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2020, 50(7): 849-862.
- [9] CHENG S T, KUANG M, LIU S, et al. Lowering further NO<sub>x</sub> emissions and improving the hopper's overheating environment in a low-NO<sub>x</sub> down-fired furnace by a staged arch-firing framework with a primary-burner flue gas recirculation[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 51: 103546.
- [10] KUANG M, LI Z Q, LING Z Q, et al. Improving flow and combustion performance of a large-scale down-fired furnace by shortening secondary-air port area[J]. *Fuel*, 2014, 121: 232-239.
- [11] LI X G, ZENG L Y, ZHANG N, et al. Effects of the air-staging degree on performances of a supercritical down-fired boiler at low loads: air/particle flow, combustion, water wall temperature, energy conversion and NO<sub>x</sub> emissions[J]. *Fuel*, 2022, 308: 121896.
- [12] LI X G, ZENG L Y, ZHANG X, et al. Effects of the fuel-lean coal/air flow damper opening on combustion, energy conversion and emissions in a supercritical down-fired boiler[J]. *Fuel*, 2021, 292: 120319.
- [13] LIU X Z, ZHU G Y, ASIM T, et al. Application of momentum flux method for the design of an  $\alpha$ -shaped flame incinerator fueled with two-component solid waste[J]. *Energy*, 2022, 248: 123647.
- [14] 申加旭, 赛俊聪, 李恒阳, 等. W型火焰锅炉炉内气流组织优化及模拟研究[J]. *锅炉技术*, 2024, 55(2): 27-31.  
SHEN Jiayu, SAI Juncong, LI Hengyang, et al. Optimization and simulation study on air flow in W-Shaped flame boiler furnace[J]. *Boiler Technology*, 2024, 55(2): 27-31.
- [15] SHEN Y R, YANG D, SHEN Z, et al. Modeling and analysis of flow instability of the water wall in a 600 MW supercritical W-shaped boiler[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 99: 325-333.
- [16] WANG J L, KUANG M, ZHAO X J, et al. Trends of the low-NO<sub>x</sub> and high-burnout combustion characteristics in a cascade-arch, W-shaped flame furnace regarding with the staged-air angle[J]. *Energy*, 2020, 212: 118768.
- [17] WANG Z, PENG X Y, CAO S X, et al. NO<sub>x</sub> emission prediction using a lightweight convolutional neural network for cleaner production in a down-fired boiler[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 389: 136060.
- [18] WU H Q, KUANG M, WANG J L, et al. Lower-arch location effect on the flow field, coal combustion, and NO<sub>x</sub> formation characteristics in a cascade-arch, down-fired furnace[J]. *Applied Energy*, 2020, 268: 115032.
- [19] ZHANG X, CHEN Z C, ZHANG M D, et al. Combustion stability, burnout and NO<sub>x</sub> emissions of the 300 MW down-fired boiler with bituminous coal: load variation and low-load comparison with anthracite[J]. *Fuel*, 2021, 295: 120641.
- [20] 陈辉, 韩林涛, 李朝兵, 等. 350 MW“W”型火焰锅炉全烧神华烟煤改造技术研究[J]. *电站系统工程*, 2024, 40(1): 16-22.  
CHEN Hui, HAN Lintao, LI Chaobing, et al. Study on transformation technology of 350MW “W” flame boiler all burns bituminous coal[J]. *Power System Engineering*, 2024, 40(1): 16-22.
- [21] 张苗, 杨凯, 黄继忠, 等. W型火焰锅炉改烧烟煤对汽温参数影响试验研究[J]. *东方电气评论*, 2024, 38(3): 52-57.  
ZHANG Miao, YANG Kai, HUANG Jizhong, et al. Experimental study on the influence of bituminous coal combustion on steam temperature parameters in a W-type flame boiler[J]. *Dongfang Electric Review*, 2024, 38(3): 52-57.

(责任编辑 邓玲惠)