文章编号:1001-2060(2024)04-0162-09

600 MW 燃用褐煤墙式切圆锅炉运行中存在的 问题分析及优化措施

束继伟¹,于博帅²,金宏达¹,王 欣¹

国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院,黑龙江 哈尔滨 150030;
 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:对某台采用四墙布置燃烧器切圆燃烧的 600 MW 超临界锅炉进行了优化调整试验和数值模拟,对锅炉存 在的水冷壁严重结焦、超温爆管、炉膛出口速度及烟温偏差问题的原因进行了研究。结果表明:锅炉炉膛出口左、 右侧存在速度与烟温偏差,燃尽风的投切对炉膛出口气流速度分布影响很大;提高一次风率对提高制粉系统出力 有利,但过高的一次风率(40%以上)是导致锅炉发生水冷壁结焦和局部超温爆管的主要原因;一次风率控制在设 计值36% 左右,锅炉的运行状态明显改善。

关键 词:墙式切圆;一次风率;褐煤;燃烧性能;结焦;数值模拟

中图分类号:TM621.2 文献标识码:A DOI:10.16146/j. cnki. rndlgc. 2024.04.020

[引用本文格式] 束继伟, 于博帅, 金宏达, 等. 600 MW 燃用褐煤墙式切圆锅炉运行中存在的问题分析及优化措施[J]. 热能动力工程, 2024, 39(4):162-170. SHU Ji-wei, YU Bo-shuai, JIN Hong-da, et al. Analysis of problems and optimization measures in the operation of 600 MW lignite-fired wall tangential circle boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(4):162-170.

Analysis of Problems and Optimization Measures in the Operation of 600 MW Lignite-fired Wall Tangential Circle Boiler

SHU Ji-wei¹, YU Bo-shuai², JIN Hong-da¹, WANG Xin¹

(1. State Grid Heilongjiang Electric Power Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150030;

2. School of Energy Science and Enigeering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: Optimization tests and numerical simulations were conducted on a 600 MW wall-tangential-circle supercritical boiler, to investigate the causes of severe slagging on water-cooled walls, tube rupture due to overheating, and deviations in furnace outlet velocity and flue gas temperature. The results show that velocity and temperature deviations exist on the left and right sides of the furnace outlet; the cutting off and feeding of the separated over-fire air (SOFA) significantly impacts the velocity distribution of the furnace outlet airflow; increasing the primary air ratio improves the output of the pulverizing system, but excessive primary air ratio (over 40%) is the main cause of slagging, local overheating and rupture of the water-cooled wall tubes; controlling the primary air ratio around the design value of 36% significantly improves the operation condition of the boiler.

Key words: wall tangential circle, primary air ratio, lignite, combustion performance, slagging, numerical simulation

作者简介:束继伟(1971-),男,国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院研究员级高级工程师.

引 言

锅炉切圆燃烧是目前普遍采用的一种煤粉燃烧 方式^[1]。燃烧器一、二次风喷口间隔布置,各风口 的几何中心线分别与炉膛中间的1个或几个假想切 圆相切,各角一次风射流进入炉膛后在炉内形成旋 转火球燃烧。这种燃烧方式下,煤种适应性好,风粉 混合物均匀^[2]。但也存在火焰中心容易偏斜、炉膛 出口烟温偏差大、热负荷不均等缺点,并且随着锅炉 容量的增加愈发显现^[3-7]。

近年来,部分采用墙式切圆燃烧方式的超临界、 超超临界褐煤锅炉逐渐投入商业运行。该型锅炉燃 烧器喷口距离炉膛几何中心距离短,一次风射流两 侧补气条件好,高温烟气的回流、卷吸对于高水分褐 煤的着火和稳燃有利;低温一次风射流的吸热作用 在一定程度上降低了炉膛中部的火焰温度,平滑了 炉膛热负荷分布的均匀性。文献[8-9]表明,采用 墙式切圆燃烧方式的锅炉水冷壁壁面温度均匀性提 高显著。

针对某台已投产燃用褐煤的锅炉在实际运行过 程中出现了水冷壁结焦、局部水冷壁超温爆管、炉膛 出口烟温偏差、锅炉效率低于设计值等问题^[10],本 文基于现场参数测试对制粉系统和燃烧系统的优化 调整,通过对炉内空气流场开展数值模拟研究证明, 优化调整取得了较好的效果。

1 锅炉概况

锅炉为一次中间再热、超临界、变压运行带内置 式再循环泵启动系统的直流锅炉,采用墙式切圆燃 烧方式,主燃烧器布置在水冷壁的四面墙上,分离燃 尽风(Separated Over-Fire Air,SOFA)燃烧器布置在 主燃烧器区上方水冷壁的四角。燃烧器布置如图1 所示,由低到高分别为A~G层,其中A~F层为下 6层,B~G层为上6层。锅炉设计燃用宝日希勒褐 煤,锅炉主要设计参数见表1。燃烧器设计参数见 表2。



Fig. 1 Layout of burners(mm)

表1 锅炉主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of boiler

参数	BMCR	TRL	THA
锅炉蒸发量/t·h ⁻¹	1 912.57	1 852.68	1 707.63
过热器出口压力/MPa	25.40	25.32	25.14
过热器出口温度/℃	571	571	571
再热蒸汽流量/t·h ⁻¹	1 594.37	1 539.17	1 433.53
再热器出口压力/MPa	4.38	4.22	3.94
再热器出口温度/℃	569	569	569
锅炉效率(低位)/%	91.94	92.17	92.31

表 2 燃烧器设计参数

Tab. 2 Burner design parameters

参 数	数值
单个喷嘴热功率(6台磨煤机运行)/MW	63.58
一次风率/%	35.96
一次风速/m·s ⁻¹	28
一次风温/℃	65
二次风率/%	59.04
二次风速/m·s ⁻¹	48
二次风温/℃	398
一次风喷嘴间距/mm	14 558

锅炉煤粉燃烧器采用水平浓、淡形式,一次风气 流在此形成浓、淡两股气流喷入炉膛。煤粉喷嘴内 装设波形钝体结构,一次风粉混合物射流通过钝体 时,下游会产生1个稳定的回流区,使着火点稳定。 淡相煤粉配以偏置周界风提高了水冷壁附近的烟气 含氧量,提升了该区域氧化性氛围。设计及运行煤 种燃料特性见表3。

表 3 锅炉燃料特性参数 Tab. 3 Boiler fuel characteristic parameters

	收到基碳	收到基氢	收到基氧	收到基氮	收到基硫	收到基水	收到基灰	收到基低位发热量
项目	$C_{ar}/\%$	${ m H}_{ m ar}/\%$	O_{ar} /%	$N_{ar}/\%$	$S_{ar}/\%$	$M_{\rm ar}/\%$	$A_{\rm ar}/\%$	$Q_{ m net, ar}/{ m kJ}$ · kg ⁻¹
设计	42.97	2.86	11.35	0.61	0.15	33.4	8.66	15 150
校核	39.86	2.65	10.55	0.56	0.14	36	10.24	13 930
运行	41.45	2.89	11.38	0.66	0.19	30.2	13.23	14 640

2 数值模拟

本文采用文献[11]中的计算机数值模拟软件 对炉膛空间连续的计算区域进行数值模拟。

2.1 模型建立

切圆燃烧锅炉的炉内燃烧过程是物理流动与化 学反应相互耦合的过程,整个过程非常复杂。为简 化这一过程,采用标准的 *k* − *ε* 双方程来实现炉内单 相流场的数值模拟,采用颗粒随机轨道模型跟踪煤 粉颗粒,采用扩散 – 动力模型模拟焦炭的燃烧过程, 采用 P – 1 模型考虑炉膛内气体与颗粒之间的辐射 换热。在直角坐标系下,标准 *k* − *ε* 双方程模型的基 本控制方程如下:

连续性方程: $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (1)$ x 方向上的动量方程: $\frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u w) = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2\frac{\partial}{\partial x} \cdot$ $\left(\mu_{\iota}\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu_{\iota}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu_{\iota}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] + \rho g_{x} \qquad (2)$

y方向上的动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho vw) = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2\frac{\partial}{\partial y}\cdot\left(\mu_{t}\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_{t}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu_{t}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] + \rho g_{y}$$
(3)

z方向上的动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = -\frac{\partial p}{\partial z} + 2\frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\mu_{\iota}\frac{\partial w}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu_{\iota}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu_{\iota}\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)\right] + \rho g_{z}$$
(4)

为保证相似方程比例合适,以上微分方程可以 写成以下通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \varphi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \varphi) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + S_{\varphi}$$
(7)

式中:p一流体压力, Pa; ρ 一密度, kg/m³; φ 一因变 量; Γ_{φ} 一因变量 φ 的扩散系数; S_{φ} 一因变量的守 恒方程中所对应的源项。

拉格朗日颗粒随机轨道模型中颗粒作用力在直 坐标系中表示如下:

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t} = \beta(u_{\mathrm{g}} - u_{\mathrm{s}}) + G \frac{(\rho_{\mathrm{s}} - \rho_{\mathrm{g}})}{\rho_{\mathrm{s}}} + F \qquad (8)$$

式中: *G*—重力, N; *F*—其他作用力, N; *u*—速度, m/s;下角标 g, s—流体和颗粒;β—气固相间曳力系数,定义如下:

$$\beta = \begin{cases} 150 \frac{\varepsilon_{\rm s}^2 \mu_{\rm g}}{\varepsilon_{\rm g} d_{\rm s}^2} + 1.75 \frac{\rho_{\rm g} \varepsilon_{\rm s}}{d_{\rm s}} | u_{\rm g} - u_{\rm s} | , \varepsilon_{\rm g} \leq 0.8 \\ \frac{3 C_D \varepsilon_{\rm g} \varepsilon_{\rm s} \rho_{\rm g} | u_{\rm g} - u_{\rm s} |}{4 d_{\rm s}} \varepsilon_{\rm g}^{-2.65} , \varepsilon_{\rm g} > 0.8 \end{cases}$$

$$(9)$$

式中:d_s一颗粒直径,m。

拖拽力系数为:

$$C_{D} = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), Re < 1000\\ 0.44, Re \ge 1000 \end{cases}$$
(10)

颗粒雷诺数为:

$$Re = \frac{\rho_{\rm g} d_{\rm s} \mid u_{\rm s} - u_{\rm g} \mid}{\mu_{\rm g}} \tag{11}$$

挥发份热解采用双竞争反应热解模型:

原煤^{$$k_{t1}$$}→ α_1 挥发分 I + (1 - α_1)焦炭 I (12)
原煤 ^{k_{t2}} → α_2 挥发分 II + (1 - α_2) 焦炭 II

式中: α_1 和 α_2 —化学当量系数; k_{v1} 和 k_{v2} —速率 常数。

*k*_{v1}和 *k*_{v2}表示为:

$$k_{v1} = A_{v1} \exp(-E_{v1}/RT)$$
(14)

$$k_{v2} = A_{v2} \exp(-E_{v2}/RT)$$
 (15)

式中: E_{v1} 和 E_{v2} 一热解反应的活化能, J/mol; T—温度, K; R—通用气体常数, 为 8.314 J/(mol·K); A_{v1} , A_{v2} —指前因子。

动力 - 扩散控制燃烧模型用于模拟焦炭燃烧, 用方程表示为:

$$W = M p_{0_2}^n \tag{16}$$

式中:M—反应速率常数; p_{0_2} —氧气的分压力;n— 化学反应级数,0 < n < 1。

P-1辐射模型中辐射热流计算公式为:

$$q_{\rm r} = -\frac{1}{3(\alpha + \sigma_{\rm sc}) - C_{\sigma_{\rm sc}}}H$$
(17)

式中: q_r —辐射热流;H—入射辐射, W/m^2 ; σ_{sc} —散 射系数,1/m;a—吸收系数,1/m;C—线性各向异性 相位函数系数。

设定参数ψ,表示为:

$$\mathcal{V} = \frac{1}{(3(\alpha + \sigma_{\rm sc}) - C_{\sigma_{\rm sc}})} \tag{18}$$

式(18)简化为:
$$q_r = -\psi \nabla H$$
 (19)

$$(\psi H) - \alpha H + 4\alpha \theta T^4 = S_H \tag{20}$$

式中: θ —斯蒂芬-玻尔兹曼常数; S_H —辐射源。

式(19)和式(20)组合后可得:

$$-q_{\rm r} = \alpha G - 4\alpha \theta T^4 \tag{21}$$

2.2 网格划分

(13)

锅炉炉膛结构复杂,选取从炉膛下部冷灰斗下 沿到炉膛出口区域作为计算域。为了防止计算过程 中产生回流,将炉膛出口适当延长,采用非均匀的六 面体结构对整个计算区域进行分块网格的划分。综 合考虑计算精度和时间,并经无关性测试,未将整个 计算域网格划分得很细。考虑到燃烧器区域流场变 化比较剧烈,仅对燃烧器区域的网格划分进行了加 密处理,最终确定网格总数为82万。炉膛网格划分 如图2所示。



2.3 模拟结果分析

2.3.1 特征截面速度分布

图 3 为 F 层一次风喷口水平截面的速度矢量 图和等速线图。从图中可以看出,炉内气流混合强 烈,燃烧器根部明显可见回流区。各喷口喷射出的 射流刚性较强,能够喷射到下游射流的根部。截面 可见位置居中、充满度较好的切圆,但切圆直径较 大。射流贴壁现象较为明显,贴壁速度较大,容易造 成气流刷墙。





2.3.2 特征截面温度分布

图4为额定工况下不同截面温度分布。可以 看出,煤粉气流进入炉膛后温升很快,在水冷壁附 近形成了高温区;在同层相邻燃烧器上游一次风射 流的冲击作用下,使得相邻一次风射流角度发生偏 斜,同时气流受热膨胀使得切圆变得更大,炉内的 "高温烟气环"清晰可见;由于燃尽风的喷入,使 "高温烟气环"的气流混合,燃烧更加剧烈;炉膛的 高温区在近壁处,水冷壁的结焦倾向严重,与该锅 炉实际运行过程中,水冷壁发生超温爆管区域吻 合^[12]。



图4 额定工况下不同截面温度分布

Fig. 4 Temperature distributions of different SOFA sections under rated working condition

2.3.3 炉膛出口速度分布

图 5 显示了锅炉 A~F 层制粉系统运行切除和 投入燃尽风且反切角度最大两种工况下的炉膛出口 沿宽度方向速度数值模拟结果。墙式切圆燃烧一次 风射流刚性强,两侧补气条件好,炉内气流混合强 烈,在炉膛中心可形成位置居中、完整的切圆,但切 圆直径较大,射流贴壁现象较明显,容易产生火焰刷 墙现象。锅炉折焰角下方区域火焰温度较高,易出 现结焦现象。炉膛出口左、右侧的气流速度依然存 在偏差。燃尽风的投切,对于炉膛出口气流速度分 布影响很大。从图中可以看出,燃尽风反切后,炉膛 出口左、右两侧的速度偏差显著减小,说明燃尽风反 切具有很好的消旋作用。





cutting off and feeding

3 热态调整试验

为了进一步探究该炉存在问题的原因并对数值 模拟结果合理性进行验证,停炉期间在高温再热器 区域临时加装了120只耐磨铠装热电偶,对炉膛出 口处的烟气温度分布进行测试。在锅炉热态运行期 间,进行了一次风调平、一次风率优化等调整优化措 施,改善了锅炉运行状况。

3.1 一次风调平

磨煤机出口一次风管道均为分层、并联管道。 由于管道的实际走向不同,连接至每只燃烧器的支 管阻力系数也不同,这就导致各一次风管中风粉混 合物的速度不同。而送粉系统中每层一次风速是 否均匀,将会影响各送粉管道中煤粉浓度及炉内空 气流动的分布情况。炉内气流速度分布、射流的卷 吸、回流区的大小决定煤粉气流的着火、稳定及火 焰传播,合理的炉内气流分布是高效、环保燃烧组 织的关键。而同层一次风速是否平衡,是锅炉高 效、稳定燃烧的基础。表4为摸底试验中一次风调 平前、后(不带粉)A 磨煤机参数对比,表中1~4代 表 A 层燃烧器的1~4角)。由表1可知, A 层一次 风各管风速调整前偏差很大,会影响到炉内的燃 烧,且一次风速的绝对值也较高。过高的一次风速 也抬升了一次风率,恶化了燃烧。调平一次风之 后,各层一次风速偏差都在5%以内,炉内燃烧状况 明显好转,水冷壁结焦现象明显改善。

表 4 A 磨一次风调平前后数据对比

Tab. 4 Comparison of data before and after

primary air leveling of mill A

参 数	1	2	3	4
一次风调整前粉管风速/m·s ⁻¹	63.8	46.8	56.8	78.2
一次风调整前偏差/%	3.9	-27.7	-11.8	21.4
一次风调整后粉管风速/m·s ⁻¹	55.0	54.9	60.2	60.0
一次风调整后偏差/%	-4.4	-4.8	4.4	4.0

3.2 一次风率优化

为了提高中速磨制粉系统在磨制褐煤时的干燥 出力,同时考虑到尾部烟道要布置脱硝系统的实际 情况,在设计时不能选取更高的空气预热器出口一 次风温,而是选取了较高的一次风率(36%)。在锅 炉摸底试验过程中,测得一次风率达到40%,如果 是在冬季,部分热量用来加热冷冻的入炉煤,则一次 风率会更高。过高的一次风率会导致二次风不易穿 透到"煤粉环"内部,造成炉膛中心区域缺氧,形成 一个温度较低的区域。同时,更多熔融或者半熔融 状态的颗粒抵达对侧水冷壁,增加了水冷壁结焦的 可能性。而叠加的四墙布置燃烧器特殊的补气环境 及设置偏置周界风的影响因素,使得在近水冷壁区 域形成了一个充分燃烧的、高温的"煤粉环"区域. 最终导致该锅炉水冷壁上形成大量片状、条状的半 熔融状焦块滑落。在后期的热态调整时,将一次风率 优化调整控制在35.7%~37.2%,水冷壁结焦状态明 显好转。同时,锅炉效率由 91.44% 提高到 92.81%, NO_x 排放保持在约 210 mg/m³的较低数值。热态试 验期间锅炉主要损失数据对比如表5所示,其中摸底 工况指运行人员维持一次风率 39.6%,优化工况指维 持一次风率 35.7%, A~F 层磨煤机运行。

表 5 锅炉主要损失对比

Tab. 5 Comparison of main losses of boiler

参数	摸底工况	优化工况
排烟温度/℃	145.86	137.56
干烟气热损失/%	7.02	5.72
燃料中 H ₂ 燃烧生成水造成的热损失/%	0.40	0.37
燃料水分造成的热损失/%	0.52	0.50
空气水分造成的热损失/%	0.13	0.11
散热及不可测损失/%	0.49	0.49
修正后的毛效率/%	91.44	92.81

3.3 炉膛出口烟温偏差

· 168 ·

对布置在炉膛入口处的高温再热器出、入口烟 气温度以及分隔屏下的温度进行测试发现,采用四 墙布置燃烧器的锅炉,其炉膛出口同样存在左、右侧 烟气温度偏差。图6给出在额定工况下高温再热器 入口的烟气温度曲线。锅炉额定负荷状态下高温再 热器入口左、右侧烟气温度差见表6。







表 6 额定负荷下高温再热器入口

左、右侧烟气温度差

Tab. 6 Flue gas temperatures dfference on the left and right sides of high temperature reheater inlet under rated load

位置	烟气温差/℃
下层	110.9
中层	46.4
上层	29.8

由表6和图6可知,在锅炉额定运行工况下,高 温再热器入口管屏均存在左、右侧烟气温度偏差,且 烟气温度分布规律相似,高温再热器管屏底部区域 测点的左、右侧烟温偏差普遍高于中、上层测点。这 是因为该区域距离折焰角较近,温度不均匀的高温 烟气直接流经高温再热器管屏下部,对此区域的烟 气温度分布影响较大。而高温再热器管屏的均流作 用,在一定程度上平均了这一区域中、上层的烟气 温度。

对分隔屏下方的烟气温度测点进行的测试表 明,分隔屏下左、右两侧存在烟温偏差。实测烟气温 度较高,热态数值模拟该区域的烟温也是高的,测试 期间水冷枪头部有挂焦现象,说明该位置的烟气温 度高于煤粉颗粒的流动温度,如图7所示。磨煤机 的运行方式对炉内火焰中心有影响,下6层制粉系 统运行时,整体温度水平较上6层制粉系统运行时 低约80℃。



图 7 分隔屏下测点烟气温度

Fig. 7 Flue gas temperatures at the lower measuring

point of division panel

4 结 论

(1)采用四墙布置燃烧器切向燃烧的锅炉,一次风射流可见明显高温烟气回流;可以形成直径较大的切圆,气流容易贴壁。

(2)与四角布置燃烧器切向燃烧锅炉相似,炉 膛出口依然存在"残余旋转"现象,燃尽风投/停以 及正/反切对于炉膛出口气流速度分布影响很大。

(3)磨煤机出口一次风管道为分层、并联管道。管道的实际走向不同,连接至每只燃烧器的支管阻力系数也不同,导致各一次风管中风粉混合物的速度不同。同层一次风速的均匀性,会影响炉内空气流动,是锅炉高效、环保、稳定运行的基础。

(4) 过大的一次风切圆与过高的一次风率是该 锅炉水冷壁结焦以及局部超温爆管的主要原因。优 化调整后将一次风率调整控制在设计值(35.96%) 附近,水冷壁结焦现象明显好转,水冷壁工作环境 得到改善,减少了该区域爆管事故的发生。同时, 由于一次风率的降低,使得"干烟气热损失"、"空 气中水分热损失"降低,锅炉效率由 91.44% 提高 到 92.81%,NO_x 排放保持在约 210 mg/m³的较低 数值。

参考文献:

[1] 徐通模,袁益超,陈干锦,等.超大容量超超临界锅炉的发展趋势[J].动力工程,2003,23(3):2363-2369.

XU Tong-mo, YUAN Yi-chao, CHEN Gan-jin, et al. Development trend of super-large capacity and ultra supercritical boilers [J]. Power Engineering, 2003, 23(3);2363-2369.

- [2] 陈 建,秦 明,孔 超,等. 墙式布置切圆燃烧的冷态模化试验[J]. 机械工程学报,2010,46(18):162-167.
 CHEN Jian,QIN Ming,KONG Chao, et al. Cold modeling experiment of wall tangential-firing combustion[J]. Journal of Mechanical Engineering,2010,46(18):162-167.
- [3] 廖永浩,路 昆,刘维歧.600 MW 机组墙式切圆锅炉燃烧特性分析[J]. 热力发电,2014,43(10):51-57.
 LIAO Yong-hao, LU Kun, LIU Wei-qi. Numerical simulation on

combustion characteristics of a 600 MW unit wall type tangentially fired boiler [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43 (10): 51-57.

[4] 郭岸龙,方庆艳,赵斯楠,等.660 MW 超临界墙式切圆煤粉锅
 炉烟温偏差优化控制[J].动力工程学报,2017,37(5):
 341-348.

GUO An-long, FANG Qing-yan, ZHAO Si-nan, et al. Optimal control of gas temperature deviation in a 660 MW supercritical tangentially-fired boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(5):341 – 348.

- [5] 刘敦禹,秦 明,孙巧群,等. 600 MW 超超临界墙式切圆锅炉 燃烧过程数值模拟[J].热能动力工程,2011,26(1):89-93.
 LIU Dun-yu,QIN Ming,SUN Qiao-qun, et al. Numerical simulation of the combustion process of a 600 MW ultra-supercritical wall type tangentially-fired boiler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2011,26(1):89-93.
- [6] 高继录,邹天舒,冷杰,等.1000 MW 超超临界锅炉燃烧调整的试验研究[J].动力工程学报,2012,32(10):741-746. GAO Ji-lu,ZOU Tian-shu,LENG Jie,et al. Test study on combustion adjustment for 1000 MW ultra supercritical boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2012,32(10):741-746.
- [7] 孙俊威,葛 铭,戴维葆,等. 燃烧优化对超临界锅炉热偏差影响的试验研究[J]. 热能动力工程,2020,35(7):109-113.
 SUN Jun-wei, GE Ming, DAI Wei-bao, et al. Experimental study on the effect of combustion adjustment on thermal deviation of super-critical boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Engergy and Power,2020,35(7):109-113.
- [8] 谭厚章,徐通模,余战英,等.四墙切圆燃烧方式壁面热负荷分 布试验研究[J]. 工程热物理学报,2000,21(4):525-528.
 TAN Hou-zhang, XU Tong-mo, YU Zhan-ying, et al. The experiment study of heat flux distribution in wall-tangentially flame[J].
 Journal of Engineering Thermophysics,2000,21(4):525-528.
- [9] 谭厚章,余战英,徐通模,等.四墙切圆布置燃烧器炉内实际切圆大小的试验研究[J].热能动力工程,2004,19(2):157-159,166.

TAN Hou-zhang, YU Zhan-ying, XU Tong-mo, et al. Experimental research on the actual diameter of a tangential circle in tangential-fired boiler furnace[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(2):157 – 159, 166.

[10] 陈福春,王艳丽,王 鹏.600 MW 超临界机组褐煤锅炉运行 中存在的问题分析及处理[J].内蒙古电力技术,2013, 31(6):121-124.

CHEN Fu-chun, WANG Yan-li, WANG Peng. Study and treatment on the operation problem of 600 MW super critical boiler [J]. Inner Mongolia Electric Power,2013,31(6):121-124.

[11] 周凌宇,刘 辉,周 平,等.300MW 墙式切圆锅炉水冷壁超 温的数值模拟与燃烧优化[J].热能动力工程,2022,37(3):

129 - 135.

ZHOU Ling-yu, LIU Hui, ZHOU Ping, et al. Numerical simulation and combustion optimization on the water wall overtemperature in 300 MW wall-tangentially fired boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3):129-135.

[12] 牟晓哲,周江博,韩 昕,等.350 MW 新建超临界锅炉结渣原因分析及初步调整措施[J].电站系统工程,2015,31(1):

(上接第161页)

- [13] GUO B Z, ZHAO Z L. On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems [J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2013, 51(2):1727 - 1757.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1):19-23.

HAN Jing-qing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications [J]. Control and Decision, 1998, 13(1):19-23.

- [15] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the American Control Conference, Denver, CO, USA, June 4 – 6, 2003:4989 – 4996.
- [16] ZHENG Q, DONG L, LEE D H, et al. Active disturbance rejection control for MEMS gyroscopes [C]//2008 American Control Conference, Seattle, Washington, USA, June 11 – 13, 2008: 4425 – 4430.
- [17] CHANG X, LI Y, ZHANG W, et al. Active disturbance rejection control for a flywheel energy storage system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(2):991-1001.
- [18] ZHANG Y, CHEN Z, ZHANG X, et al. A novel control scheme for quadrotor UAV based upon active disturbance rejection control [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 79:601 - 609.
- [19] HE T, WU Z, LI D, et al. A tuning method of active disturbance rejection control for a class of high-order processes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67 (4): 3191-3201.

26 - 28.

MOU Xiao-zhe,ZHOU Jiang-bo,HAN Xin, et al. Cause analysis and preliminary adjustment measures of slagging on newly-built 350 MW supercritical boiler [J]. Power System Engineering, 2015,31(1):26-28.

(刘 颖 编辑)

- [20] ZHANG Y, FAN C, ZHAO F, et al. Parameter tuning of ADRC and its application based on CCCSA [J]. Nonlinear Dynamics, 2014,76:1185-1194.
- [21] WU Z, LI D, XUE Y, et al. Gain scheduling design based on active disturbance rejection control for thermal power plant under full operating conditions[J]. Energy, 2019, 185:744 - 762.
- [22] 王 佑,吴振龙,薛亚丽,等. 高阶大惯性系统的线性自抗扰 控制器设计[J]. 控制与决策,2023,38(4):999-1007.
 WANG You, WU Zhen-long, XUE Ya-li, et al. Design of linear active disturbance rejection controller for high-order large inertia system [J]. Control and Decision,2023,38(4):999-1007.
- [23] ZHAO S, GAO Z. Modified active disturbance rejection control for time-delay systems [J]. ISA Transactions, 2014, 53 (4): 882-888.
- [24] 李 健,谭 文,张彬文. SCR 烟气脱硝系统线性自抗扰控制 研究[J]. 动力工程学报,2019,39(3):203-207.
 LI Jian, TAN Wen, ZHANG Bin-wen. Linear active disturbance rejection control of SCR flue gas denitrification systems [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2019,39(3):203-207.
- [25] WU Z, LI D, LIU Y, et al. Performance analysis of improved AD-RCs for a class of high-order processes with verification on main steam pressure control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(6):6180-6190.

(刘 颖 编辑)