

doi: 10.3969/j.ISSN.1672-0792.2022.03.001

## 高原电站锅炉 CO 取样系统设计优化模拟

王赵国<sup>1</sup>, 菅志清<sup>1</sup>, 杨红军<sup>2</sup>, 姜继严<sup>2</sup>, 李玉衡<sup>2</sup>, 卓建坤<sup>3</sup>

(1. 国家电投集团电站运营技术(北京)有限公司, 北京 102209; 2. 青海黄河上游水电开发有限责任公司西宁发电分公司, 青海 西宁 811605; 3. 热科学与动力工程教育部重点实验室(清华大学), 北京 100084)

**摘要:** 为获得高原电站锅炉真实的炉内燃烧状况以实现燃烧优化控制, 针对尾部烟道 CO 网格化精确测量问题, 提出了烟道内自吸式 CO 网格取样测量系统的优化设计方法。利用现有脱硝系统的进出口烟道测点, 获得烟道截面内的 CO 浓度分布, 并通过计算流体力学软件进行数值模拟, 反向迭代获得计算域入口的 CO 浓度分布边界条件。根据该边界条件, 对网格化取样点数量、取样口尺寸以及 CO 测量仪器连接位置进行了优化设计。结果表明, 当截面上平均分布的取样点数量大于等于 12 时, CO 取样平均值与理论计算平均值误差可控制在 5% 以内; 同时, 通过调整个别取样口的直径大小, 可实现网格取样系统整体流量的均匀性; 通过本设计方法可以得到较为合理的 CO 测量仪器的连接布置方案。

**关键词:** 燃烧优化; CO 网格化取样; 计算流体力学模拟; 设计优化; 燃煤锅炉

**中图分类号:** TM37 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-0792(2022)03-0001-07

### Optimum Design of CO Sampling System by Simulation Research for Power Plant Boiler on Plateau Region

WANG Zhaoguo<sup>1</sup>, JIAN Zhiqing<sup>1</sup>, YANG Hongjun<sup>2</sup>, JIANG Jiyan<sup>2</sup>,  
LI Yuheng<sup>2</sup>, ZHUO Jiankun<sup>3</sup>

(1. SPIC Power Plant Operation Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. Xi'ning Power Generation Branch of Qinghai Huanghe Hydropower Development Co., Ltd., Xining 811605, China; 3. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper proposes an optimized design method for the self-priming CO multi-grid sampling device which can reflect the CO concentration fluctuations due to the changes of combustion conditions, then realize the intelligent combustion control. The CO concentration distribution of simulation boundary conditions are calculated through computational fluid dynamics software and verified by field measurement data on inlet and outlet of the denitrification reactor. Then, key parameters such as the numbers and diameters of the grid-sampling ports, and the connected position of the analytical instrument are optimal designed using numerical simulation methods. The results show that when the number of sampling ports evenly distributed at the sampling section is greater than twelve, the error between the

average sampling CO concentration and the average calculation value is within 5%. At the same time, the method can realize the overall flow uniformity of grid sampling system, by adjusting the diameter of individual sampling ports. In addition, the connection position of CO measuring instrument can also be given reasonable suggestions through this design method.

**Key words:** combustion optimization; CO grid sampling; computational fluid dynamics simulation; optimum design; coal fired boiler

## 0 引言

随着我国“双碳”目标的实施,燃煤电厂不仅面临着碳减排任务,还需要在生产中满足高比例可再生能源入网引起的灵活性调峰需求。锅炉的燃烧控制过程中需要考虑的设备多、耦合强和煤种多变等影响因素<sup>[1]</sup>,成为制约燃煤电厂智慧化发展的主要技术难题之一,也是当前的研究热点之一。在燃煤锅炉的燃烧控制过程中,需要通过测量烟道内氧浓度来进行风煤比例调节,进而获得最佳的过量空气系数。然而,锅炉运行过程的最佳过量空气系数与燃料种类、燃烧设备特性以及负荷等参数有关<sup>[2-9]</sup>。文献[3-4]分析了由于烟道内的氧浓度分布不均匀,烟道漏风对氧浓度有着较大的影响,所以烟道内的氧浓度无法直接反映炉内局部区域燃烧的情况;高还原性气氛和炉内燃尽风混合程度,将直接影响化学不完全燃烧损失和机械不完全燃烧损失,进而影响锅炉效率。

文献[10]对某600 MW机组锅炉尾部烟道进行了CO在线监测和燃烧调整试验研究,结果表明:CO体积分数、锅炉效率与NO<sub>x</sub>浓度均存在较强的负相关性;且当CO体积分数最低时,综合成本最低。同时,CO与飞灰含碳量存在着较强的正相关性,并能够反映炉膛内的局部燃烧情况、火焰偏斜情况等燃烧特性。针对上述情况,国内外学者提出了CO/O<sub>2</sub>双参量的锅炉燃烧控制策略,并应用在对冲、四角切圆锅炉的燃烧诊断和优化控制<sup>[11-13]</sup>。例如,文献[14]通过在某630 MW燃煤锅炉上构建CO质量浓度对于风量的需求模型,合理地处理取样信号,采用模糊校正氧量曲线,结合动态风煤校正模块和风煤交叉限制的控制策略,完善了配风控制策略,成功将CO排放量控制在合理水平,保证了锅炉运行的安全性,提高了锅炉热效率。

CO在线监测测点一般布置在炉膛水冷壁区域、炉膛出口、选择性催化还原装置(SCR)入口烟道等位置。文献[15]对比了CO监测系统在锅炉各安装位置的优缺点。由于SCR入口烟道截面积大,烟气流速、组分存在不均匀性。采用多点网格化取样方法,虽然可以克服单一取样点无法反映CO实际浓度的困难,但速度和浓度的不均匀性仍将给测量带来偏差。

本文创新性地建立了CO取样装置数值模拟优化设计方法:通过对网格化取样装置和烟道进行整体建模和计算流体力学(CFD)数值模拟,对各取样口间烟气的混合管道、除尘管道、仪器测量烟气取样口以及取样装置进出口管路的位置进行优化设计,获得烟道截面CO浓度平均值,进而精确反映炉内的CO浓度变化。

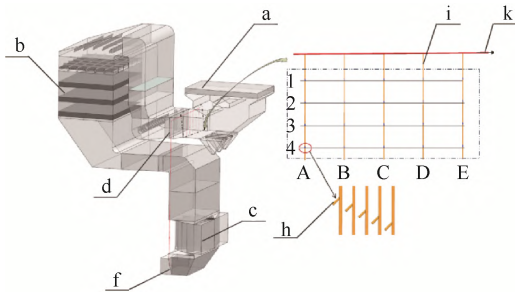
## 1 模型的建立和优化设计方法

### 1.1 锅炉本体及网格化取样装置布置

以国内高原地区某燃煤电厂1号机组的锅炉为研究对象。该锅炉为600 MW超超临界直流炉,主蒸汽压力为26.15 MPa,主蒸汽温度为605 °C,水冷壁为螺旋管圈;锅炉采用单炉膛、一次中间再热、四角切圆燃烧、平衡通风、全钢架悬吊、Π型布置、固态排渣运行方式。因地处高海拔地区,该锅炉在原有燃烧配风方式下烟道尾部飞灰含碳量和CO浓度偏高;因此,拟采用CO/O<sub>2</sub>双参数燃烧控制方法。这就需要对烟道内CO进行网格化测量,从而实现锅炉燃烧状态的实时优化调整。

自吸式CO测量装置由网格化取样口、混合管道、分析仪器和烟气回流口组成,如图1所示。烟气取样口安装位置要求:(1)应避开化学反应区域;(2)考虑到燃烧控制的实时响应,CO取样安装位置应尽量处于烟气流向的前置位置;(3)应避开烟道内部导流支撑构件、膨胀节等位置,

并且具备施工安装及检修空间。综合评估长期运行的可靠性、实时性等因素, 本文 CO 取样点位置选择在省煤器出口至 SCR 入口喷氨格栅前的水平烟道上。具体位置需要根据烟气流场、组分场以及烟道形状通过 CFD 模拟优化设计, 此即本文的主要研究内容。通常, SCR 入口至空预器出口的压差在 600~1 000 Pa 之间, 可满足取样烟气的自吸回流的要求, 取样烟气回流口设置在空预器的出口位置。



a 为省煤器出口烟道; b 为 SCR 反应器; c 为空气预热器; d 为网格化取样装置; f 为取样烟气回流口; h 为取样口; i 为取样支管; k 为取样母管

图 1 网格化 CO 取样测量装置布置图

Fig. 1 CO grid sampling and measurement device

网格化取样口在每根取样支管 (图 1 中的 A—E) 上均匀分布, 采取背对来流烟气, 斜向下 45°角布置, 如图 1 中的 A1—A4、B1—B4 等。取样口距支管中心距按长度 100 mm 规格设计, 以确保每个进气口位置处于取样截面等间距网格法布置坐标处。

## 1.2 系统建模及边界条件

建立比例 1:1 的三维集合模型, 包括了从 SCR 进口到空气预热器出口整个模型计算域。考虑到模型涉及复杂的内部结构, 计算区域采用非结构化网格。对于导流板、整流格栅、喷氨格栅等关键部位和尺寸相差悬殊构件, 采用不同尺寸局部加密的方式处理, 以获得较高的网格质量和计算精度。模型总网格数 1 550 万。

进口边界采用速度进口 (velocity inlet) 边界; 速度沿烟道截面均匀分布; 流体模型为充分发展的湍流流动。进口 CO 浓度分布根据现场测试的 CO 浓度数据, 反向迭代预测进口浓度, 并使用自定义方式给出, 详见第 2 节模型验证和边界条件迭代计算结果。由于出口压力不影响计算结果, 故

出口边界条件采用压力出口 (pressure outlet) 边界。空预器中转子与定子的相互作用微小, 故采用计算效率高的 MRF 多参考系模型进行模拟。旋转壁面设定为 Moving Wall, 旋转域设为 Frame Motion。喷氨格栅的喷口采用速度进口边界条件。为了得到喷氨格栅模块的调节规律, 单个模块各喷口速度认为相同, 以简化分析组分扩散规律。格栅按实际尺寸绘制, 并考虑大支撑梁构件的干扰。使用多孔介质模型以简化模拟催化剂层; 主要的催化反应区域设置为 3 层催化剂所在体域。

由于模拟对象为烟道内的定常流动, 属于低速不可压缩流动, 故采用压力基求解器 (pressure-based solver) 进行稳态计算。流场类型选择稳态流场 (steady), 而烟气流动属于充分发展的湍流, 故使用标准  $k$ -epsilon 模型 (standard  $k$ -epsilon model) 进行湍流流场的求解。为了获得较准确的解, 离散格式选择二阶迎风格式 (second order upwind)。

## 1.3 系统优化设计方法及指标

烟道取样孔布置截面上的 CO 浓度分布, 是优化设计的关键参数。然而, 模型计算域的入口边界截于省煤器出口烟道, 无测量条件, 导致边界 CO 浓度未知。获得准确的 CO 浓度分布方法如下: 通过给定计算模型入口边界 CO 浓度分布数据, 并与喷氨格栅下方位置处的 CO 测量数据进行对比; 根据该处的 CO 浓度, 分析烟道内流线, 对入口边界上的 CO 浓度分布进行修正; 依次多次迭代, 直至喷氨格栅下方测量面上 CO 浓度分布计算值与测量值相一致, 将所获得的入口 CO 浓度分布作为取样系统设计的入口边界条件。计算流程如图 2 所示。该迭代计算过程, 分别应用于 1 号机组 A、B 两侧烟道, 并以 A 侧数据进行取样系统的设计, 以 B 侧数据进行验证 CO 取样监测装置的适应性。

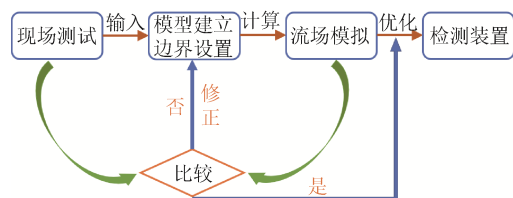


图 2 烟道 CO 取样装置数值模拟优化仿真计算流程  
Fig. 2 Calculation flow chart of numerical simulation optimization of CO flue sampling device



通过网格法取样装置可准确测出所在烟道截面内烟气 CO 浓度平均值。所设计的非能动系统将烟气均匀地从烟道内抽出并及时送达测量装置内。各取样口取样的烟气在管路中的混合均匀性、以及截面上 CO 浓度偏差的评判,采用  $C_v$ (coefficient of variation) 法计算,其定义为:

$$C_{v_x} = \frac{\sigma_X}{\bar{X}} \quad (1)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (2)$$

式中:  $\bar{X}$  为  $X$  参数的平均值;  $X_i$  为参数  $X$  的当地值。

#### 1.4 CO 边界条件的迭代计算与模型验证

现场测试是数值计算结果准确性验证的有效手段。在 1 号锅炉 A、B 侧 SCR 脱硝装置喷氨格栅入口和反应器出口烟道位置进行了 CO 浓度测试。

喷氨格栅入口测点位置位于喷氨格栅下方竖

直烟道处,这就造成计算域省煤器处进口 CO 浓度分布未知,而 CO 取样装置布置在计算域进口和现场测试点之间。为保证所设计 CO 取样装置的合理性,采用图 2 计算流程:即先假定计算域进口截面 CO 浓度初始分布规律,经过 CFD 模拟得到喷氨格栅入口测点位置截面的 CO 浓度分布规律;然后与此位置现场测试数据对比,利用点位置映射关系,修正计算域进口截面 CO 浓度值;经过多次迭代计算,得到与现场测试测点位置 CO 浓度相同的分布规律,即认可其模拟计算的准确性。使用相同方法根据 B 侧测试结果迭代给定进口 CO 浓度值,最终使模拟结果和测试数据吻合,实现并行验证。

SCR 出口测点位置位于第三层催化剂下方烟道水平截面上。由于现场测量受测枪长度的限制,只能测量此位置前墙侧深度 3 m 内位置的数据。仿真结果与测量结果比较时,也选取对应区域的数据类比,即图 3 中虚线框中数据。

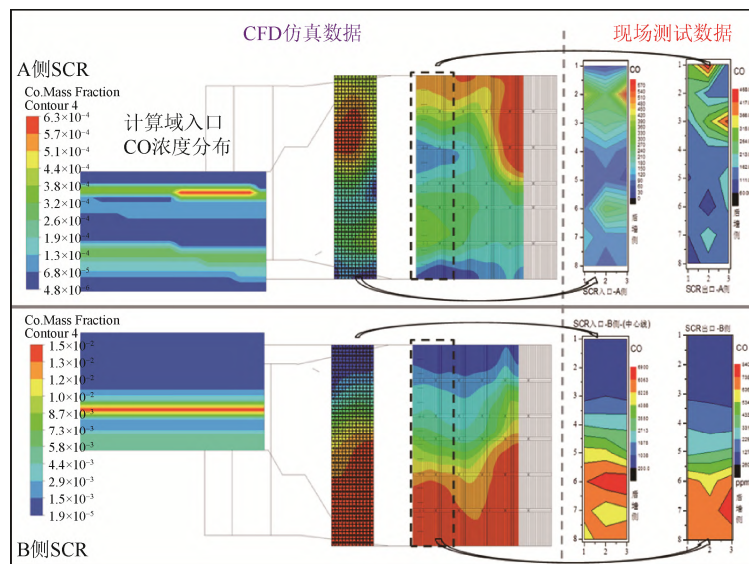


图 3 A、B 侧计算域入口 CO 浓度的迭代计算与模型验证

Fig. 3 Iterative calculation and model verification of inlet CO concentration in calculation domain on side A and B

由图 3 中结果可以看出,在 A、B 侧经过多次迭代给定的进口 CO 浓度分布边界条件下,经过 CFD 计算能够得到与测点位置现场测量数据规律一致的分布趋势:此迭代的进口边界条件可以作为后续计算 CO 取样装置的设计依据。

## 2 优化设计结果与分析

### 2.1 取样口数量优化设计

从图 3 可以看出,入口 CO 浓度的不均匀导

致了网格化取样的 CO 浓度无法反映整个截面的平均值。图 4 给出了不同数量均匀分布取样口所取样的烟气中 CO 浓度的偏差情况。其中, 纵坐标  $\xi$  定义为设定网格化取样的 CO 平均浓度与测量截面的积分浓度平均值之比, 面积分平均值代表在给定进口边界条件下测量截面上的理论平均值。 $\xi$  值越接近于 1, 代表网格化取样烟气 CO 浓度越接近截面中 CO 浓度的平均值。

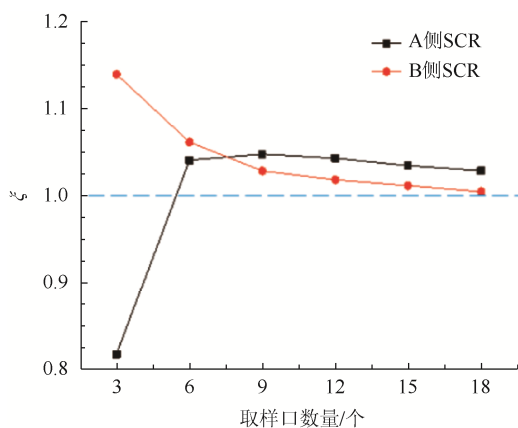


图 4 CO 浓度偏差随取样口数量的变化关系

Fig. 4 Relationship between deviation of CO concentration and the number of sampling ports

从图 4 的 A 侧 SCR 反应器入口截面取样结果可以看出: 取样平均值随取样口数量的增加而增大, 并趋向于 1; 当设计取样口超过 9 个以上时, 该值受取样口数量影响较小, 并缓慢趋向 1。当取样点数量  $\geq 12$  时, CO 取样平均值与理论计算平均值误差在 5% 以内, 满足工程使用需求。同样, B 侧在不同的入口 CO 浓度下, 有着相同的规律。因此, 该方法的验证能够满足不同工况下的 CO 取样需求。

## 2.2 取样口直径优化设计

取样口数量的增加提高了烟气成分的代表性, 因此, 本文后续的分析选取了 20 个取样点, 即 5 根取样支管, 每个支管上均匀分布 4 个取样口 (图 1 所示)。

除了网格精度外, 取样数据的合理性取决于汇聚到母管的每根支管的流量是否能够保持相同, 以及每根支管上 4 个取样口吸入的烟气流量是否相等。满足条件, 则最终得到的截面上 CO 浓度平均值才能有效地代表实际情况。

对于自吸式 CO 取样系统, 取样口内外压差的差异将导致各取样口抽取烟气流量的不同。图 5 给出了取样支管上的不同取样口的流量偏差, 其中纵坐标  $\xi$  为每个取样口的流量与平均流量之比。由图 5 发现取样口 2 的流量偏小, 只有平均值的 0.65~0.8。为此, 增加每根取样支管上 2 号取样口的直径, 所获得的流量偏差结果如图 6 所示。由图 6 可以看出, 取样流量得到有效提高, 取样口流量偏差由 0.35 降低至 0.25 左右。

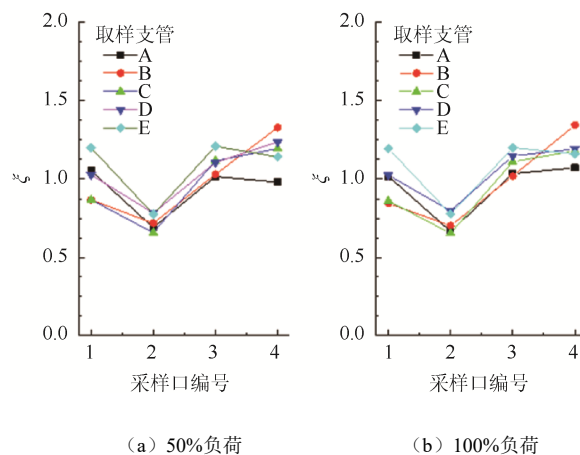


图 5 各取样口流量偏差对比

Fig. 5 Comparison of flow deviation for each sampling port

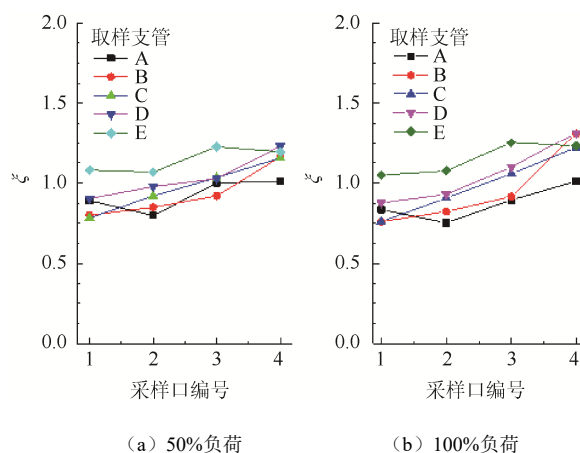


图 6 取样口 2 直径优化后各取样口流量偏差对比

Fig. 6 Comparison of flow deviation for each sampling port after diameter optimization of sampling port 2

## 2.3 CO 测量仪器开口取样位置优化设计

若取样母管中 (图 1 中 k) 未安装混合装置, 则 CO 取样装置的设计除了需考虑取样口的数量

和直径规格外, 还需考虑各取样口抽取烟气在母管中的均匀混合, 并在母管上确定 CO 测量仪器的开口取样位置。仪器开口取样位置应位于 5 个采集支管内烟气组分混合均匀的区域。

根据现场条件可知, 符合母管上开口位置的地方位于图 7 中  $Y$  坐标 8.97~9.932 之间。通过全流程 CFD 模拟, 可以获得母管中各支管烟气之间的混合情况, 如图 8 所示。图 8 中: 横坐标  $L$  代表  $Y$  轴方向上的坐标位置, 纵坐标  $\psi$  代表母管烟气中 CO 的体积分数,  $C_v$  值代表截取截面上 CO 浓度均匀性相对标准偏差值, 计算方法见公式(1)和(2)。

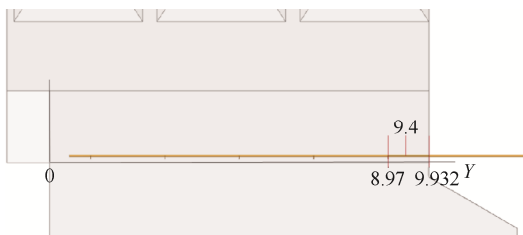


图 7 母管上 CO 测量仪器取样位置示意图  
Fig. 7 Sampling position of CO measuring instrument on main pipe

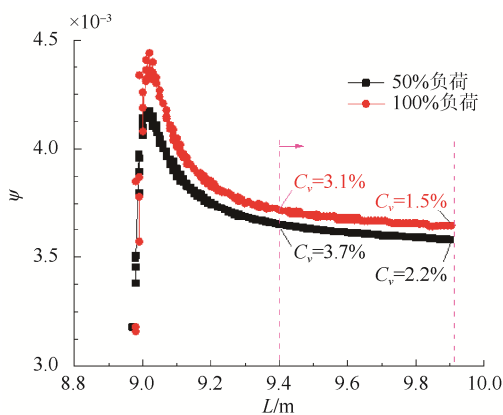


图 8 取样母管中 CO 浓度的变化  
Fig. 8 Change of CO concentration in sampling main pipe

由图 8 可以看出: 在 100%和 50%负荷这 2 种工况下, 随着与取样支管 E (坐标 8.97 m) 位置距离的增加, 取样口抽取的烟气中 CO 体积分数逐渐趋于面平均值。根据结果, 建议连接 CO 分析仪器的出口位置安装在  $Y=9.4$  m 位置, 即距离 E 口 0.43 m 之后。

## 2.4 取样系统实际安装及使用效果

根据优化设计结果, 在电厂 1 号机组锅炉省煤器出口水平烟道上安装 CO 取样系统及 CO 在线测量仪器: 取样系统安装位置选取在 SCR 进口水平烟道变径前, 取样母管吸气口布置在空预器出口烟道方便开口处; 取样支管数量为 5 根 (支管 A—E), 每根取样支管从上到下等距布置 4 个取样口, 共 20 个取样口; 在 E 采样支管后方 0.43 m (坐标  $Y=9.4$  m) 距离处的母管上, 设置 CO 测量仪器的取样开口。

CO 取样系统及在线测量仪器安装完成后, 系统运行较为稳定。现场 A、B 烟道上 CO 浓度测量值基本维持在 150~500 mL/m<sup>3</sup>, 并能跟随电厂燃煤、负荷及燃烧工况的变化而变化。

## 3 结论

本文提出了烟道内自吸式 CO 多网格取样测量装置的优化设计方法。

(1) 取样点在取样截面内均匀分布时, 即当取样点数量  $\geq 12$  时, CO 取样平均值与理论计算平均值误差在 5%以内, 可以满足工程使用需求。该规律同样适用于不同入口 CO 浓度情况。

(2) 自吸式取样系统各取样口的压差差异导致了取样流量不同, 从而引起 CO 浓度的偏差; 因此, 在 CFD 模拟优化设计中, 可以调整个别取样口直径大小, 实现取样流量均匀。

(3) 在 E 取样支管后方 0.43 m (坐标  $Y=9.4$  m) 位置, CO 浓度混合均匀。建议 CO 测量仪器取样口安装在此位置处。

## 参考文献:

- [1] 张效源, 沈迎, 孙凯, 等. 基于 CO 在线监测的锅炉燃烧状态诊断与调整[J]. 新型工业化, 2020, 10(7): 155-158.
- [2] 梁聚齐, 王传生, 章家岩, 等. CO 在线监测装置在锅炉烟气参数检测中的应用[J]. 江汉大学学报, 2018, 46(1): 49-54.
- LIANG JUQI, WANG CHUANSHENG, ZHANG JIAYAN, et al. Application of CO online monitoring device on parameter detection in boiler flue gas[J]. Journal of Jiangnan university (Natural Science Edition), 2018, 46(1): 49-54(in Chinese).
- [3] XIAOTAO G, LEI H, ENXIAN Z. NO<sub>x</sub> emission and

- influence factors of 600 MW boilers with burners arranged in front and back walls[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(9): 806-812.
- [4] 余侨荣, 彭权华. 600 MW 对冲型锅炉基于 CO 在线监测的燃烧调整[J]. 广东科技, 2019, 28(4): 55-59.
- [5] 周平, 张广才, 严晓勇, 等. 600 MW 机组对冲燃煤锅炉尾部 CO 浓度偏高的调整试验[J]. 热力发电, 2014, 43(12): 82-88.  
ZHOU PING, ZHANG GUANGCAI, YAN XIAOYONG, et al. Operation optimization on high CO emissions of a 660 MW unit swirl-opposed firing boiler after low-NO<sub>x</sub> burner retrofitting[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(12): 82-88(in Chinese).
- [6] 陈敏生, 廖晓春. 改造燃烧系统降低对冲锅炉侧墙还原性气氛[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 91-95.  
CHEN MINSHENG, LIAO XIAOCHUN. Modification on combustion system of opposed firing boiler to reduce de-oxidation atmosphere at sidewalls[J]. Electric Power, 2014, 47(1): 91-95(in Chinese).
- [7] 李怀强, 袁宏伟, 马仑, 等. 某 600 MW 超超临界对冲锅炉二次风配风方式对燃烧及排放特性影响的数值模拟[J]. 湖北电力, 2020, 44(5): 83-87.  
LI HUIQIANG, YUAN HONGWEI, MA LUN, et al. Numerical simulation on influence of secondary air distribution on coal combustion characteristic and NO<sub>x</sub> emission in 1000 MW ULTRA-supercritical opposed firing boiler[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(5): 83-87(in Chinese).
- [8] 洪荣坤, 沈跃良, 赵振峰. 600 MW 超临界对冲燃烧锅炉 CO 和 NO<sub>x</sub> 排放特性的研究[J]. 动力工程学报, 2012, 32(12): 922-927.  
HONG RONGKUN, SHEN YUELIANG, ZHAO ZHENFENG. Emission characteristics of CO in a 600 MW and NO<sub>x</sub> from opposed firing boiler supercritical unit[J]. Power Engineering, 2012, 32(12): 922-927(in Chinese).
- [9] 姚卫刚, 韦红旗, 何长征. 660 MW 四角切圆锅炉 CO 排放特性的试验研究[J]. 电站系统工程, 2015, 31(5): 13-16.  
YAO WEIGANG, WEI HONGQI, HE CHANGZHENG. Experimental study of CO emission characteristics in a 600 MW tangentially fired boiler[J]. Power System Engineering, 2015, 31(5): 13-16(in Chinese).
- [10] 李德波, 沈跃良. 前后对冲旋流燃煤锅炉 CO 和 NO<sub>x</sub> 分布规律的试验研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(7): 502-506.  
LI DEBO, SHEN YUELIANG. Experimental study on CO and NO<sub>x</sub> emission of a swirl-opposed coal-fired boiler[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2013, 33(7): 502-506(in Chinese).
- [11] 张晨浩, 苏胜, 常寿兵, 等. 基于尾部烟道 CO 在线监测的锅炉燃烧优化[J]. 燃烧科学与技术, 2019, 25(4): 347-352.  
ZHANG CHENHAO, SU SHENG, CHANG SHOUBING, et al. Boiler combustion optimization based on online monitoring of CO in flue gas[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2019, 25(4): 347-352(in Chinese).
- [12] 黄伟珍. 超超临界百万机组基于 CO 控制的锅炉燃烧优化调整[J]. 江西电力, 2017, 41(6): 58-60.
- [13] CHAO X, JEFFRIES J B, HANSON R K. Real-time, in situ, continuous monitoring of CO in a pulverized-coal-fired power plant with a 2.3 μm laser absorption sensor[J]. Applied Physics B, 2013, 110(3): 359-365.
- [14] 孙伟鹏, 冯庭有, 庞力平, 等. 基于超超临界锅炉 O<sub>2</sub>/CO 燃烧控制技术研究[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 24-28.  
SUN WEIPENG, FENG TINGYOU, PANG LIPING. Research on O<sub>2</sub>/CO burning control technology for ultra-supercritical boilers[J]. Electric Power, 2013, 46(7): 24-28(in Chinese).
- [15] 王立, 王燕晋, 康静秋, 等. 基于监测 CO 的锅炉燃烧在线控制系统优化[J]. 发电设备, 2019, 33(1): 41-46.  
WANG LI, WANG YANJIN, KANG JINGQIU, et al. Optimization of an on-line boiler combustion control system based on CO detection[J]. Power Equipment, 2019, 33(1): 41-46(in Chinese).

收稿日期: 2022-01-05

作者简介:

王赵国(1987—), 男, 工程师, 研究方向为电站锅炉与环保技术;

菅志清(1978—), 男, 工程师, 研究方向为电站信息化;

杨红军(1982—), 男, 工程师, 研究方向为电站运行技术;

姜继严(1988—), 男, 工程师, 研究方向为电站热控技术;

李玉衡(1985—), 男, 工程师, 研究方向为电站运行技术;

卓建坤(1975—), 男, 副研究员, 研究方向为洁净煤燃烧技术。

通信作者: 卓建坤