

大型褐煤锅炉煤粉再燃技术的数值模拟

唐 浩¹, 钟北京¹, 傅维标¹, 邱朋华²

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 考虑煤焦还原 NO 的反应动力学模型, 利用 Fluent 软件对元宝山电厂 3 号锅炉超细煤粉再燃的不同配风方式进行了炉膛整体的燃烧数值模拟。模拟结果表明, 再燃燃料比例、再燃风中的风煤比、再燃区的大小等因素对燃烧效率和 NO_x 排放具有重要影响。通过优化计算得到, 当主燃区空气过量系数控制在 1.1 时, 再燃燃料占总燃料的 15%, 再燃风中的风煤比为 2, 烟气在再燃区的停留时间为 0.5 s 左右的方案是一种较好的再燃组织方式。

关 键 词: 煤粉; 再燃燃烧; 数值模拟

中图分类号: TK229.2; O241 文献标识码: A

1 前 言

NO_x 再燃技术又称为燃料分级或炉内还原 (IF-NR) 技术, 它是降低 NO_x 排放的诸多炉内方法中最有效的措施之一。NO_x 再燃技术将 80% ~ 85% 的燃料送入主燃区在空气过量系数 $\alpha > 1$ 的条件下燃烧, 其余 15% ~ 20% 的燃料作为还原剂在主燃烧器的上部某一合适位置喷入形成再燃区, 再燃区空气过量系数 $\alpha < 1$, 再燃区不仅使已经生成的 NO_x 得到还原, 同时还抑制了新的 NO_x 的生成, 可进一步降低 NO_x 的排放浓度。再燃区上方布置燃尽风以形成燃尽区, 保证再燃区出口的未完全燃烧产物燃尽。同其它低 NO_x 燃烧技术 (低过量空气系数、空气分级燃烧技术和浓淡燃烧技术) 比较, 再燃低 NO_x 燃烧技术可以大幅度降低 NO_x 排放, 一般情况下可以使 NO_x 排放浓度降低 50% 以上^[1~3]。再燃形成的再燃区还原性气氛稳定, NH₃、CH₄、CO 浓度较高, 烟气停留时间较长, 这都有利于 NO_x 的还原。文献[3] 报道, 褐煤或褐煤焦也是一种很好的再燃燃料。同时再燃技术可以保证燃料燃烧初期的良好燃烧条件, 再燃区的建立和主燃区煤种关系不大, 可

以解决其它低 NO_x 燃烧技术在燃用低挥发份煤种效果较差的问题^[4]。在排放标准严格或燃用低挥发份劣质煤种时再燃低 NO_x 燃烧技术同其它低 NO_x 燃烧技术相比有着明显的优势。

随着环保要求的不断提高, 研究适应我国国情的低成本再燃低 NO_x 燃烧技术具有良好的前景。因此对大型锅炉再燃技术的研究具有重要的工程应用价值。本文通过 Fluent 软件, 对元宝山 3 号锅炉进行了再燃过程的数值模拟, 预测了一种较好的再燃方式, 为元宝山 3 号锅炉应用再燃技术提供了参考依据。

2 计算锅炉介绍

计算采用的原型是元宝山 3 号锅炉。元宝山发电厂 3 期工程的 600 MW 机组锅炉是采用美国 CE (燃烧工程) 公司的技术设计, 由哈尔滨锅炉厂制造, 亚临界压力一次中间再热控制循环固态排渣汽包炉。锅炉设计为平衡通风, 单炉膛倒 U 型布置。整个锅炉高 81 m, 炉膛口径为 20.2 m × 20.3 m, 设计煤种为元宝山褐煤。燃用设计煤质时, 锅炉最大连续出力 (BMCR) 和额定出力分别为 2 008 t/h 和 1 815 t/h^[5]。

锅炉的燃烧系统为四角布置的摆动式燃烧器, 采用 CE 传统的大风箱结构, 由隔板将大风箱分为若干个风室, 在各风室的出口处布置数量不等的燃烧器喷嘴。每只燃烧器共有 5 种 20 个风室 34 个喷嘴, 逆时针方向组织, 切圆燃烧。一次风喷嘴可上下摆动 20°, 而此风喷嘴可做上下各 30° 的摆动。为了防止结焦和使煤粉燃烧彻底, 在每组燃烧器的顶部和底部配有防焦风和燃尽风。

元宝山锅炉的模型如图 1 所示。

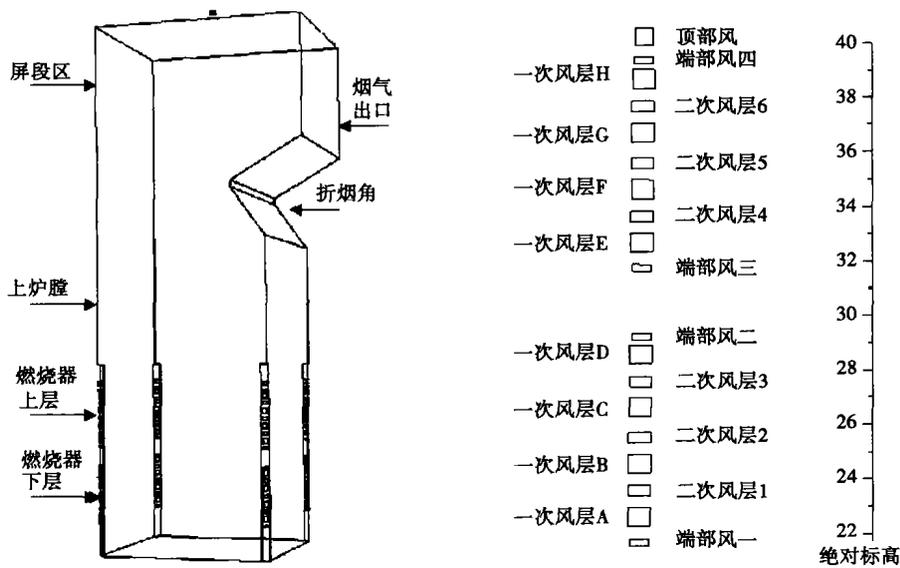


图 1 元宝山锅炉计算模型与燃烧器风口排列图(含绝对标高)

3 计算网格及数学模型

采用非一致性网格生成技术, 把整个计算区域划分为燃烧器(含上下两层), 上炉膛区, 折烟角, 换热屏区等几个计算部分。对流场较复杂的燃烧器区的网格进行了加密和优化。整个计算区域的网格数约为 40 万个, 网格的示意图见图 2。

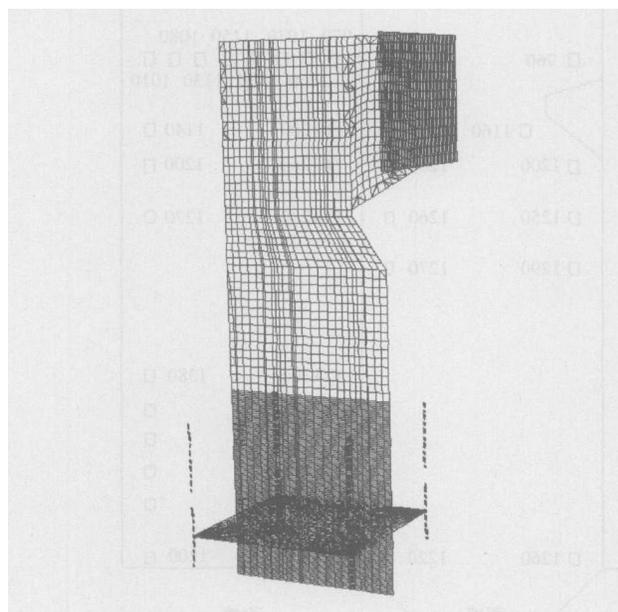


图 2 计算模型网格示意图

采用了 Fluent 的三维稳态离散模型(3d, steady, segregated solver)对元宝山锅炉进行数值模拟。计算

采用的气相紊流模型为: 标准 $k-\epsilon$ 模型。 k, ϵ 由下面的输运方程知:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned}$$

紊流粘性系数由下面的方程得到:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

模型中常数设定值如下: $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$

用双组分混合分数-概率密度函数(two-mixture-fraction/PDF)。模型模拟气相湍流燃烧, 用 P-1 辐射模型(P-1 radiation model)计算辐射传热, 对煤粉挥发份的释放采用了双匹配速率模型(the two competing rates model), 煤粉颗粒的跟踪采用了随机轨道(stochastic tracking)方法。燃烧模型为扩散动力联合模型(kenetics-diffusion limited)。

4 计算结果与分析

为了真实模拟元宝山 3 号锅炉, 在计算的所有工况中, 煤粉总量控制为 90 kg/s , 主燃区的空气过量系数 α 控制在 1.1。总空气量为 $1050 \sim$

1 150 kg/s(此时总的 α 大致为 1.1~1.2 之间)。

炉膛中的主燃区、再燃区和燃尽区设定如下:

主燃区: 由一次风 A、B、C; 二次风 1、2、3 及端部风一构成主燃风。主燃区高度约为 11.5 m。

再燃区: 由一次风 F 构成再燃风。再燃区高度约为 2.5 m;

燃尽区: 由二次风 6, 端部风四以及顶部风构成燃尽风。

在进行了以上限定之后, 通过调整再燃燃料的比例, 再燃风风煤比以及调整再燃区的大小对各种工况进行了模拟计算, 以求发现一种比较好的组织燃烧方式。各工况的基本计算结果列于表 1。

表 1 各工况数值计算结果

工况描述	工况一	工况二	工况三	工况四	原始工况
	再燃燃料占燃料总量的 20%, 主燃区 α 为 1.1, 再燃区风煤比为 2	再燃燃料占燃料总量的 20%, 主燃区 α 为 1.1, 再燃区风煤比为 3	再燃燃料占燃料总量的 15%, 主燃区 α 为 1.1, 再燃区风煤比为 2	同工况三, 再燃区扩大	各一次风口均匀给煤, 二次风均匀配风
再燃区高度 h /m	2.5	2.5	2.5	4.2	N/A
再燃区 α	0.55	0.65	0.73	0.73	N/A
烟气通过再燃区时间 t /s	0.26	0.26	0.25	0.4	N/A
炉膛最高温度 k	1929	1935	1940	1960	1983
煤粉未燃尽率 $\%$	1.33	1.37	1.25	1.11	1.50
出口烟气 CO 浓度 $\%$	0.464	0.487	0.171	0.150	0.851
出口烟气氧气浓度 $\%$	1.2	1.1	2.2	2.3	3.17
出口烟气 NO 浓度 $/mg \cdot m^{-3}$	420	423	453	365	579

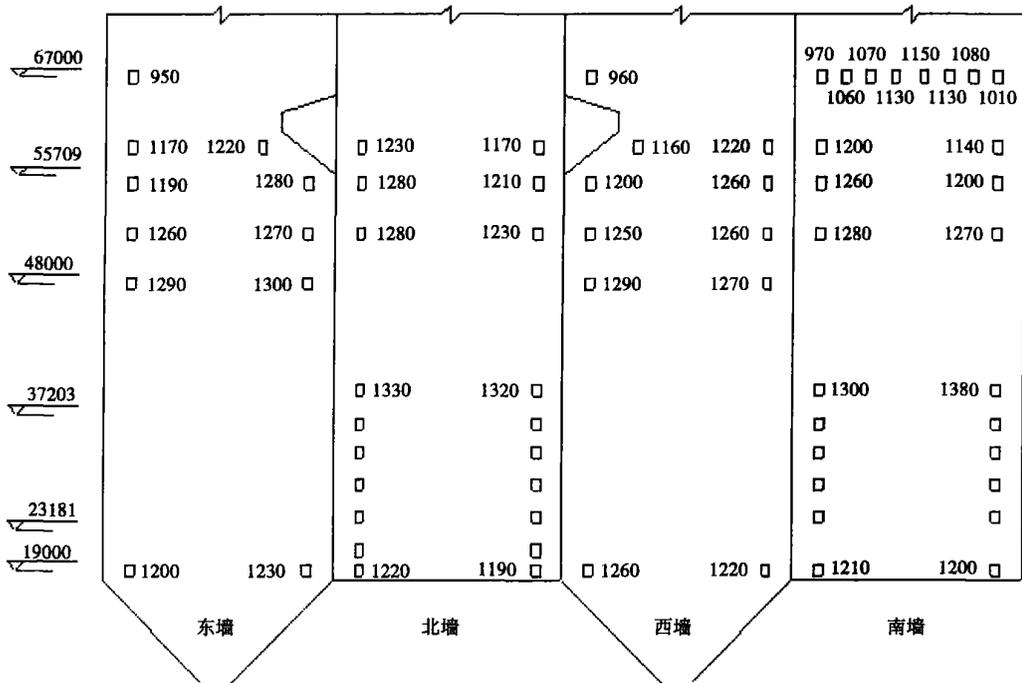


图 3 原始工况炉膛温度场测量数据

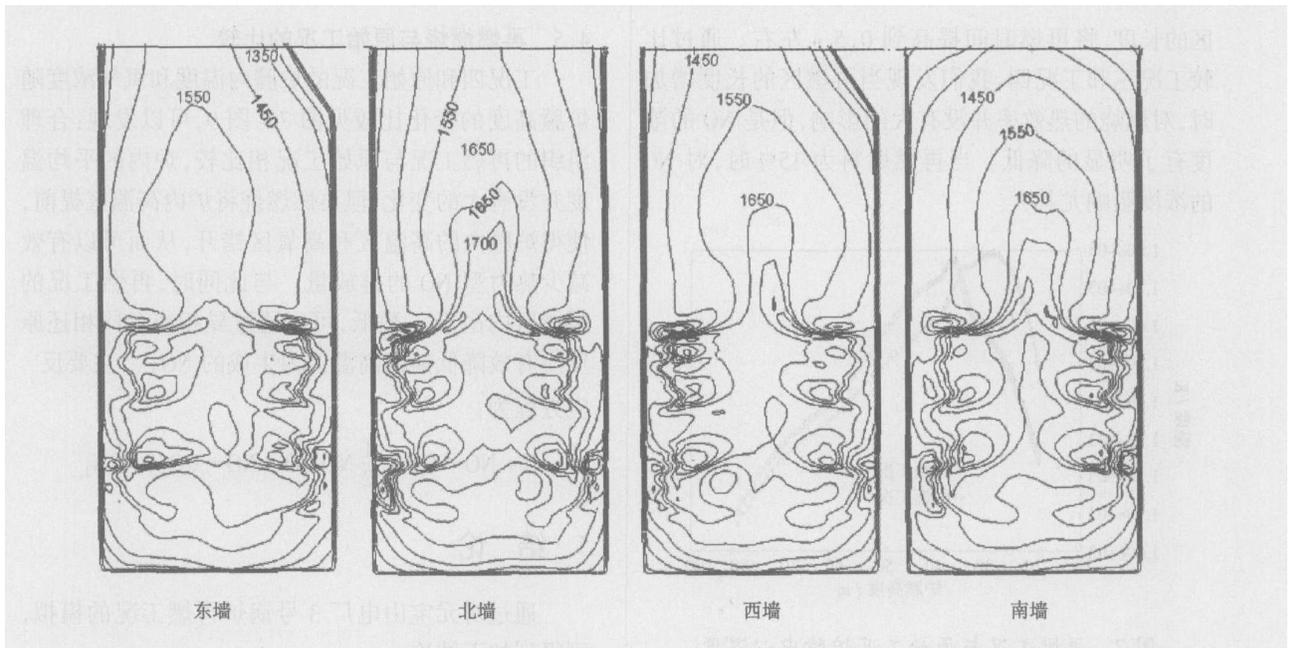


图4 原始工况计算结果

4.1 计算与实验结果的比较(原始工况)

图3和图4分别为原始工况的实际测量结果和计算结果。通过对测量数据与计算结果进行比较,我们可以发现,计算得到的结果与测量数据基本上吻合良好。计算得到的温度与测量温度相比偏低 $20 \sim 40 \text{ K}$ 。

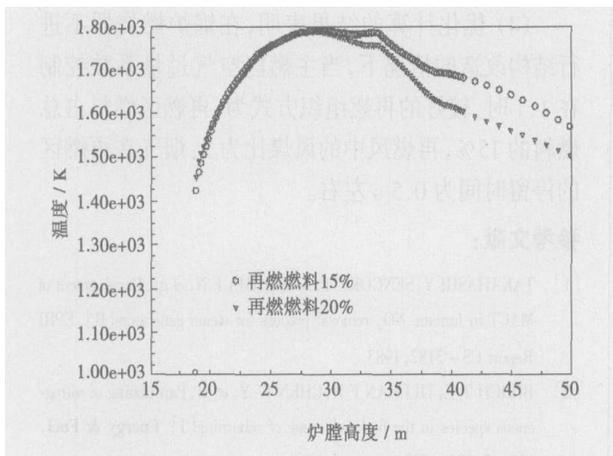


图5 不同再燃燃料炉膛中心温度沿高度分布比较

4.2 再燃燃料比例的影响

再燃燃料比例对锅炉工况的影响可见图5和图6。比较工况一与工况三,可以看出当再燃燃料的比例由15%变为20%时,出口烟气的CO的浓度明显增大,锅炉的最高温度也降低了 $10 \sim 20 \text{ K}$,显示锅炉

热效率受到一定的影响。但当再燃燃料的比例由15%变为20%时(其它工况不变),出口的NO浓度有所降低,这是因为当再燃燃料增加时,再燃区的 α 降低,从而影响了NO的还原。

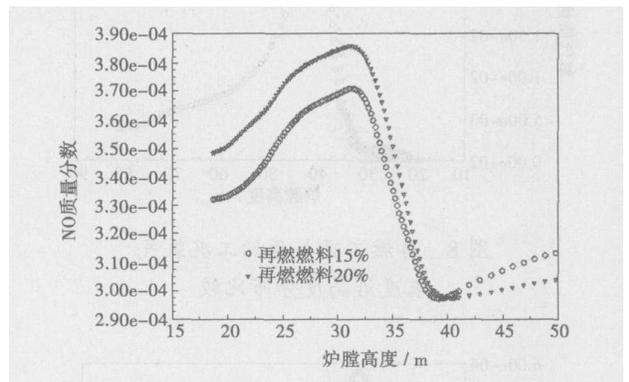


图6 不同再燃燃料炉膛中心NO浓度沿高度分布比较

4.3 再燃风风煤比的影响

通过比较工况一和工况二,我们发现改变再燃风的风煤比对燃烧状况的影响较小。当风煤比从2变成3时,炉膛内的最高温度和烟气的CO浓度基本不变,NO浓度略微增加。

4.4 扩大再燃区的影响

通过计算得到,当再燃区长度为 2.5 m 左右时,烟气通过再燃区的时间大概在 $0.2 \sim 0.3 \text{ s}$,不利于NO的还原。通过将再燃风降低高度,可以扩大再燃

区的长度,将再燃时间提高到 0.5 s 左右。通过比较工况三和工况四,我们发现当再燃区的长度增加时,对燃烧的热效率并没有大的影响,但是 NO 的浓度有了明显的降低。当再燃燃料为 15% 时,对 NO 的浓度影响尤其大。

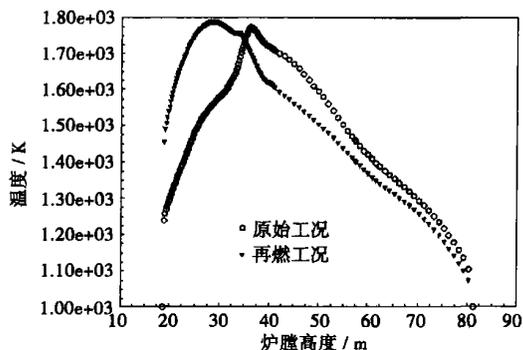


图 7 再燃工况与原始工况炉膛中心温度和氧气浓度沿高度分布比较

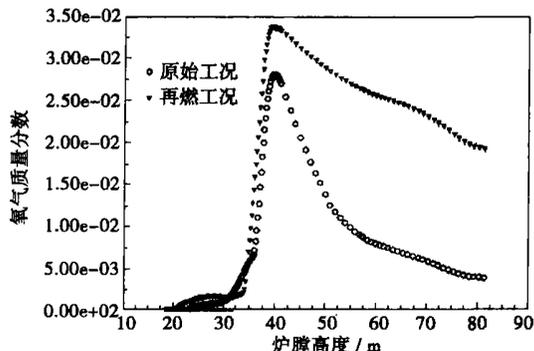


图 8 再燃工况与原始工况氧气浓度沿高度分布比较

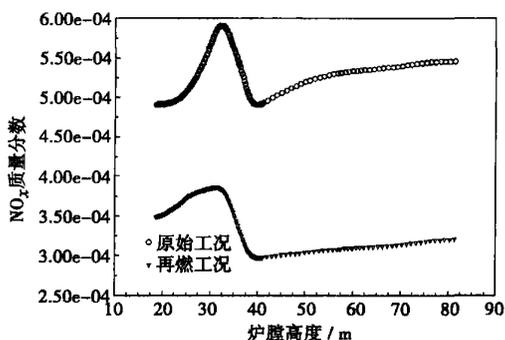
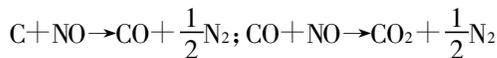


图 9 再燃工况与原始工况炉膛中心 NO 浓度沿高度分布比较

4.5 再燃燃烧与原始工况的比较

工况四和原始工况的炉膛内温度和氧气浓度随炉膛高度的变化比较见图 7~图 9,可以发现:合理组织的再燃工况与原始工况相比较,炉内的平均温度并没有大的变化,但再燃燃烧将炉内高温区提前,使得炉膛内的高温区和高氧区错开,从而可以有效减少热力型 NO 的排放量。与此同时,再燃工况的再燃区内由于 α 数低,可以通过异相或者同相还原反应有效降低前面高温区内生成的 NO_x 。主要反应方程为:



5 结 论

通过对元宝山电厂 3 号锅炉再燃工况的模拟,可得到如下结论:

(1) 再燃燃料比例对 NO 的排放量有重要影响,适当提高再燃燃料比例,对降低 NO 排放有利,但也会降低锅炉的效率。

(2) 减小再燃风中的风煤比可以降低烟气中 NO 的浓度,但降低的幅度很有限。

(3) 烟气在再燃区的停留时间对 NO_x 排放有较大影响。增大再燃区的停留时间,可明显降低 NO_x 的排放量。

(4) 优化计算的结果表明,在锅炉燃烧器不进行结构改造的情况下,当主燃区空气过量系数控制在 1.1 时,较好的再燃组织方式为:再燃区燃料占总燃料的 15%,再燃风中的风煤比为 2,烟气在再燃区的停留时间为 0.5 s 左右。

参考文献:

[1] TAKAHASHI Y, SENGOKU T, AKASHIMA F N, *et al.* Development of MACT in furnace NO_x removal process for steam generators [R] . EPRI Report CS-3182 1983.

[2] BURCH T E, TILLMAN F R, CHEN W Y, *et al.* Partitioning of nitrogenous species in the fuel rich stage of reburning [J] . *Energy & Fuel*, 1991, 5: 231-237.

[3] CHEN W Y, MA LONG. Effect of heterogeneous mechanisms during Reburning of nitrogen oxide [J] . *AIChE Journal* 1996 42 (7): 1968-1975.

[4] 钟北京. 燃烧污染与控制 [M] . 北京: 清华大学出版社, 1993.

[5] 苏 东. 元宝山发电厂 3 号汽轮发电机组锅炉性能考核试验报告 [R] . 沈阳 辽宁电力科学研究所, 2000.

(辉 编辑)

Based on the distribution function of pore lengths and in combination with such parameters as specific surface area and porosity etc. A pore diameter distribution model was established for the first time for CaO product generated in the process of limestone calcination. In conjunction with experimental results, a simulation study was conducted of CaO pore distribution characteristics and their continuously evolving process when being subjected to the influence of sintering. In the course of the study, a section-by-section analysis has been made with emphasis on the pores with a diameter in the range of 0 ~ 50 Å, 50 ~ 200 Å and over 200 Å. The calculation results indicate that the contribution from the pores in three ranges of pore diameters (0 ~ 50 Å, 50 ~ 200 Å and over 200 Å) to specific surface areas in different calcination stages undergoes a continuous change. On this basis, a concept of optimum calcination rate is proposed, which will take place later with an increase in calcination temperature. **Key words:** limestone, CaO, calcination, pore diameter distribution, optimum calcination rate

添加 CaO 对煤粉燃烧后一次颗粒物特性影响的研究 = A Study of the Effect of CaO Addition on Primary Particle Characteristics after Pulverized Coal Combustion [刊, 汉] / LU Jian-yi, LI Ding-kai (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Sciences and Power Engineering under Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 373 ~ 377

A study is made of the effect of CaO addition (3wt%) to pulverized coal on primary particle characteristics after combustion. With a sedimentation furnace serving as a combustion device under an oxidizing atmosphere and combustion temperature of 1100 °C, sample particles after combustion were separated and collected by use of a 8-stage Anderson particle impactor. As seen from the distribution of particle diameters, the addition of CaO to the pulverized coal can reduce the relative amount of fine particles among the primary particles. When Rosin-Rammler distribution function is used to conduct fitting with a particle diameter distribution curve, a very good fitting character has been obtained. As viewed from the emission characteristics, the addition of CaO has reduced the emissions of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁. The SEM image also shows that the particles produced after an addition of CaO contain particle aggregates as a result of merging and clustering. The results of ICP-AES analysis indicate that the content of such heavy metals as Cr, Cu, Ni, Pb and Zn has increased with a decrease in particle diameters. Moreover, when pulverized coal is burned after an addition of CaO, the content of heavy metal elements in the particles has been somewhat reduced. **Key words:** pulverized coal combustion, particle, emission characteristics, heavy metal, additive

大型褐煤锅炉煤粉再燃技术的数值模拟 = Numerical Simulation of Pulverized-coal Reburning Technology for a Large-sized Lignite-fired Boiler [刊, 汉] / TANG Hao, ZHONG Bei-jing, FU Wei-biao (Aeronautics and Astronautics College under Tsing University, Beijing, China, Post Code: 100084), QIU Peng-hua (Energy Source Science and Engineering College under Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 378 ~ 382

A numerical simulation was conducted of the different combustion air-supply modes for reburning super-fine pulverized coal in an integral furnace of Yuanbaoshan Power Plant No. 3 Boiler on the basis of a dynamic model featuring coal tar NO reduction reaction and by using software Fluent. The numerical simulation results show that a variety of factors, such as the proportion of fuels being reburned, air-coal ratio in the combustion air for reburning and the size of the reburning zone etc. can exercise a major influence on combustion efficiency and NO_x emissions. An optimization calculation has revealed that when the excess air factor in the main combustion zone is controlled at 1.1, a scheme with the following characteristics, namely, the fuel being reburned accounting for 15% of the total fuel amount, coal-air ratio in the combustion air for reburning being set at 2 and the residence time of the flue gas in the reburning zone being about 0.5 s, may be considered as a comparatively well organized mode for reburning. **Key words:** pulverized coal, reburning, numerical simulation

多孔介质内往复流动超绝热燃烧的简化解 = A Simplified Solution for the Super-adiabatic Combustion of Reciprocal Flows in Porous Media [刊, 汉] / SHI Jun-rui, XIE Mao-zhao (Energy Source and Power Engineering College under Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 383 ~ 386

A simplified theoretical solution has been obtained through an analogy with stable-state reversed-flow burners followed by a comparison with experimental results. Such a solution is applicable to super-adiabatic combustion in adiabatic inertial po-