

煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型的研究

(哈尔滨工业大学) 董 芃 洪 梅 秦裕琨
(大庆龙凤热电厂) 史志龙 王凤江

摘要: 本文建立的大型煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型可以对各种运行工况条件下的炉膛介质温度、水冷壁吸收热流密度、燃烧释热率等热力参数的一维分布值进行分析计算。通过对三个不同型号锅炉的计算分析并与原设计计算结果进行比较, 证明此数学模型是合理的。

关键词: 炉内过程; 炉内传热; 数学模型; 煤粉燃烧

中图分类号: TK224.1, TK124

1 前言

煤粉燃烧是发电锅炉的主要燃烧方式, 因此, 煤粉燃烧过程一直是燃烧领域的重要研究课题。然而, 由于煤粉燃烧过程的复杂性, 从燃烧装置出现到近代的相当长的历史时期内, 燃烧装置的设计和改造主要依靠试验, 包括近代发展起来的冷态模型试验、热态模型试验和全尺寸装置试验等。

随着电子计算机技术的不断发展, 燃烧过程的数值模拟已经成为燃烧理论研究和燃烧装置设计的重要手段, 它把燃烧理论试验和燃烧装置设计有机地结合起来, 开辟了用燃烧理论直接指导试验和设计工作的途径。应用燃烧过程数值模拟方法进行燃烧装置设计和运行性能预测, 可以很大程度地提高燃烧装置的设计合理性^[1]。为此, 本文通过理论分析研究, 建立了煤粉锅炉炉膛燃烧与传热相耦合的一维数学模型。

2 炉膛煤粉燃烧数学模型

煤粉燃烧数学模型的基本假设为:

- (1) 煤粉喷入炉膛后被迅速加热, 挥发份在燃烧器区全部逸出并瞬时燃尽, 同时焦炭颗粒开始燃烧;
- (2) 挥发份中包括煤所含全部的氢、氧、氮、硫和少量的碳;
- (3) 挥发份逸出后, 焦炭颗粒的尺寸不变, 且呈

密度均匀、无孔的球形, 不存在灰壳;

(4) 在燃烧进程中, 焦炭颗粒的密度不变, 直径逐渐变小;

(5) 焦炭颗粒的燃烧速度与氧浓度及温度有关, 依焦炭颗粒直径和温度的不同, 燃烧速度可能受控于氧气扩散率, 也可能受控于表面反应率(Arrhenius's Law);

(6) 煤粉的粒度分布服从于 Rosin-Rammler 分布模型, 在数值计算中, 可划分为 N 个等粒径组分, 并认为在挥发分析出后, 焦炭颗粒群各组分与份额保持不变;

(7) 在焦炭颗粒燃烧过程中, 每步都按最终生成物反应, 不考虑中间产物, 主要是碳和氧的反应;

(8) 煤粉气流为单流体柱塞流模型, 并且采用一维计算分区进行数值计算。

根据上述物理假设和煤粉气流燃烧理论^[2], 经推导得出任一组份 j 的焦炭颗粒未燃尽率 u_j 对时间的变化率为:

$$\frac{du_j}{d\tau} = - \frac{6u_j^{2\alpha} P_o}{\rho_{jo} d_{jo} \left[\frac{d_{jo} u_j^\beta}{1.26} \times 10^9 \left(\frac{T_m}{1600} \right)^{-0.75} + \frac{1}{K_s} \right]} \quad (1)$$

式中 P_o —烟气中氧气分压力, Pa;

T_m —焦炭颗粒表面气膜温度, K;

K_s —表面反应率常数;

d_{jo} —组份的焦炭初始直径, m;

ρ_{jo} —组份焦炭初始视在密度, kg/m^3 ;

α, β —控制焦炭颗粒在燃烧进程中形态的指数, 本燃烧模型采用缩核模型, 即 $\alpha = 1/3$ 时, $\beta = 0$ 。

3 炉膛传热计算模型

由于锅炉炉膛温度很高, 因此辐射传热是炉膛传热的基本形式。炉膛传热计算模型是建立在计算辐射传热的假想面方法基础之上的。

假想面方法的理论基础是辐射能传递方程, 并基于如下前提条件:

(1) 根据计算精度的要求, 将计算结构划分为若干个计算单元, 每一个计算单元由一个气体区和若干个实壁面区及假想面区组成;

(2) 相邻计算单元之间的分界面定义为假想面, 各计算单元之间的传热过程用假想面的有效辐射相耦合;

(3) 计算单元的气体介质区内充满了均质、等温的灰介质;

(4) 计算单元的各实壁面分别为具有均匀辐射特性的等温灰表面;

(5) 假想面对介质在区域之间的流动不发生作用。

在此基础上进行理论推导, 则得出实壁面区 j 的能量平衡方程, 即

$$\epsilon_j \left(\sum_{i=1}^N J_j \overline{S_i S_j} + \sigma_0 T_{gl}^4 \overline{G_i S_j} \right) - \epsilon_j \sigma_0 T_j^4 F_j - q_j F_j = 0 \quad (2)$$

同理, 可推导出气体介质区 l 的能量平衡方程

$$\sum_{i=1}^N J_j \overline{S_i G_l} - \sigma_0 T_{gl}^4 (4K_a V_l - \overline{G_l G_l}) + I'_l - I''_l + Q_r = 0 \quad (3)$$

式中 I'_l — 流入和流出气体介质区 l 的焓值, kJ;
 I''_l — 流出气体介质区 l 的焓值, kJ;
 Q_r — 为在气体介质区 l 的燃烧放热量, kJ;
 $\overline{S_i S_j}$ — 面区 i 对面区 j 的直接交换面积, m^2 ;
 $\overline{G_l S_j}$ — 介质区 l 对面区 j 的直接交换面积, m^2 。

至此, 对于计算区域的全部实壁面区和气体介质区都分别得到能量平衡方程, 并可转化为如下形式

$$A_i T_i^4 + B_i T_i + C_i = 0 \quad (4)$$

式中 T_i — 方程所代表的壁面或介质的温度, K;
 A_i, B_i, C_i — 由与 T_i 无关的参数组成的系数。
 由于在求系数的式子中包含有 J_j 等项, 因此可采用 Newton-Raphson 方法迭代求解上述联立方程组, 得出所求计算结构的温度和热流密度分布。

4 炉膛介质辐射特性参数计算模型

在煤粉火焰及烟气中, 具有吸收和辐射能力的成份主要有三种, 即三原子气体 RO_2 和 H_2O 、灰粒以及焦炭颗粒。其吸收和辐射特性随燃料种类、燃烧方式、燃烧及温度工况的不同而变化。然而, 由于炉内过程的复杂性迄今为止尚无完善的炉膛介质辐射特性参数的计算方法, 因此, 本文仍采用多年来所沿用文献[3] 推荐的计算模型, 及对于炉膛内任一计算分区 i , 其介质的吸收系数可按下式计算:

$$K_i = K_{qi} r_{qi} + K_{hi} \mu_h + K_i x_1 x_2 \quad (5)$$

式中 r_{qi} — 介质中三原子气体容积份额;

$$r_{qi} = r_{RO_2} + r_{H_2O} \quad (6)$$

r_{RO_2} — RO_2 介质中的容积份额;

r_{H_2O} — H_2O 介质中的容积份额;

K_{qi} — 计算分区内介质中三原子气体的吸收系数;

$$K_{qi} = 10 \left(\frac{0.78 + 1.6 r_{H_2O}}{\sqrt{10 P_q S_i}} - 0.1 \right) (1 - 0.37 \frac{T_i}{1000}) \quad (7)$$

P_q — 介质中三原子气体的分压力, MPa;

$$P_q = P_{rq} \quad (8)$$

P — 炉膛压力, 对一般锅炉 $P = 0.1$ MPa;

S_i — 计算分区的有效辐射层厚度, m;

$$S_i = 3.6 \frac{V_i}{F_i} \quad (9)$$

V_i — 计算分区的容积, m^3 ;

F_i — 计算分区的包覆面积, m^2 ;

K_{hi} — 计算分区内介质中悬浮灰粒的辐射减弱系数, m^{-1} ;

$$K_{hi} = \frac{55 \cdot 900}{\sqrt[3]{T_i^2 d_h^2}} \quad (10)$$

d_h — 介质中灰粒的平均粒径, μm ;

μ_h — 介质中飞灰的无因次浓度, kg/kg;

K_1 — 介质中焦炭颗粒的辐射减弱系数, 取 $K_1 = 10, m^{-1}$;

x_1 — 考虑煤种对焦炭浓度的影响系数, 对于无烟煤、贫煤, $x_1 = 1$; 对其它挥发份含量高的煤, $x_1 = 0.5$;

x_2 — 考虑燃烧方式对焦炭浓度的影响系数, 对于燃烧器区域的计算分区, $x_2 = 0.1$; 对于屏区的计算分区, $x_2 = 0$; 对于两者之间的计算分区, 也即燃尽段的计算分区, x_2 的值按线性插值计算得出。

5 炉膛一维计算分区划分与介质流型简化

本文所建立的煤粉锅炉炉膛燃烧、传热数学模型是一维的。因此, 采用沿高度划分一维计算区和简化的屏区介质流型, 其基本原则是:

(1) 冷灰斗按其等效受热面积划分为 2 ~ 3 计算分区;

(2) 根据一次风喷口的数量, 将燃烧器区域划分为若干个计算分区, 并认为处于同一计算分区内的二次风与一次风混合均匀, 每个计算分区的入炉燃料量和风量按实际燃烧器的分配份额确定;

(3) 炉膛燃尽段按计算要求分为若干个计算分区;

(4) 屏区按计算要求分为若干个计算分区;

(5) 在保证屏式过热器受热面积不变的条件下, 将各屏的横向间距处理成相等的。

(6) 对于屏区以下炉膛烟气介质为单流体柱塞流动;

(7) 对于屏区内烟气介质则为单流体分层流动。

6 煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型的应用

本文应用煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型分别对 DG670/140-9 型、SG1025/168-M312 型、HG2008/186-M 型锅炉炉膛燃烧、传热过程进行了分析计算。

燃烧过程所选用的燃料化学反应动力学参数如下:

对于 DG670/140-9 型锅炉所燃用的煤种, $A_k = 5.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, $E = 15000 \text{ kJ}/\text{kmol}$;

对于 SG1025/168-M312 型锅炉所燃用的煤种, $A_k = 5.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, $E = 15000 \text{ kJ}/\text{kmol}$;

对于 HG2008/186-M 型锅炉所燃用的煤种, $A_k = 5.0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, $E = 17500 \text{ kJ}/\text{kmol}$;

炉膛传热过程计算所选用水冷壁灰污层热阻及其辐射特性如下:

水冷壁灰污层热阻 $R = 0.004 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$;
水冷壁表面黑度 $\epsilon = 0.75$ 。

7 计算结果分析

表1 给出了应用煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型计算所得的 DG670/140-9 型、SG1025/168-M312 型锅炉炉膛出口烟温与热力计算书中设计值比较。

表1 炉膛出口烟温计算值与设计值比较

项 目	DG670/140-9 型	SG1025/168-M312 型
计算值(°C)	1050.21	1131.79
设计值(°C)	1082	1124.63
差 值(°C)	-31.79	7.16
相对差值(°C)	2.94	0.64

表2 给出了应用煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型计算所得的,在不同负荷下HG2008/186-M 型锅炉下炉膛出口烟温与热力计算书中设计值比较。

表2 HG2008/186-M 型锅炉下炉膛出口烟温与设计值比较

锅 炉 负 荷	600	540	420	300	180
计算值(°C)	1371.0	1336.5	1260.0	1168.5	1036.6
设计值(°C)	1348.3	1338.3	1279.1	1186.7	1045.0
差 值(°C)	22.7	-1.8	-19.1	-18.2	-8.4
相对差值(%)	1.68	0.13	1.49	1.53	0.80

由表1、表2可知,应用煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型计算所得的 DG670/140-9 型、SG1025/168-M312 型炉膛出口烟温值、HG2008/186-M 型锅炉在不同锅炉负荷下的炉膛出口烟温值与热力计算书中设计值基本接近。

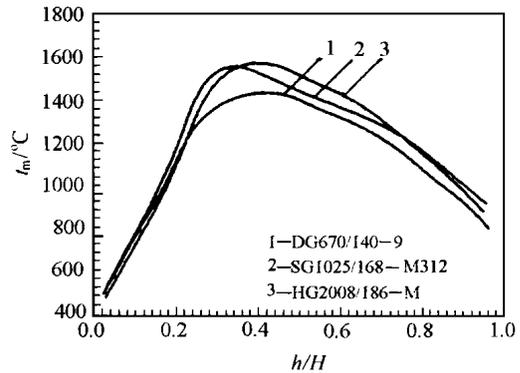


图1 炉膛介质温度一维分布

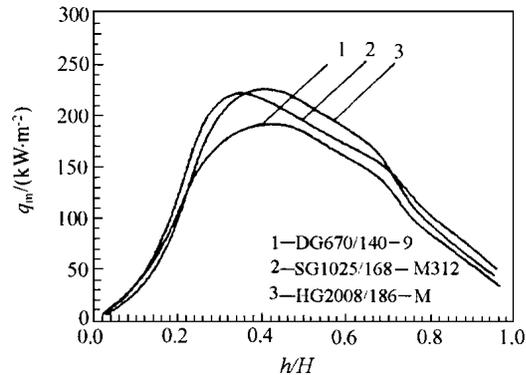


图2 炉膛水冷壁吸收热流密度一维分布

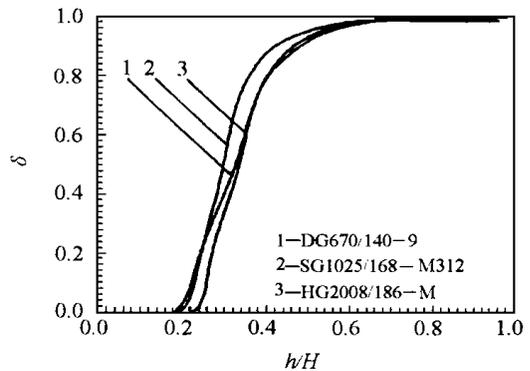


图3 炉膛燃料总释热率一维分布

从图中可知,煤粉锅炉炉膛燃烧传热一维数学模型对 DG670/140-9 型、SG1025/168-M312 型和 HG2008/186-M 型锅炉炉膛内各热力参数的计算结果无论在物理性上,还是在数值上都是合理的。

图4、图5以 SG1025/168-M312 型锅炉为算例,

图1、图2 分别给出了计算所得的上述三种型号锅炉炉膛介质温度和水冷壁吸收热流密度一维分布值。图中H为锅炉的炉膛高度,即以炉膛底部到炉膛顶部;h则为由炉膛底部到计算位置的高度。

图3给出了计算所得上述三种型号锅炉炉膛内燃料总释热率一维分布值。从

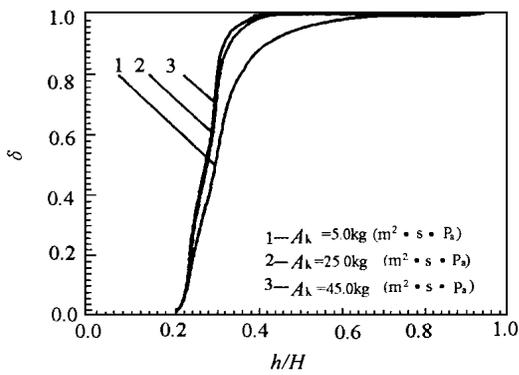


图 4 频率因子对炉膛燃料总释热率一维分布影响 ($E = 15\ 000\ \text{kJ}/\text{kmol}$)

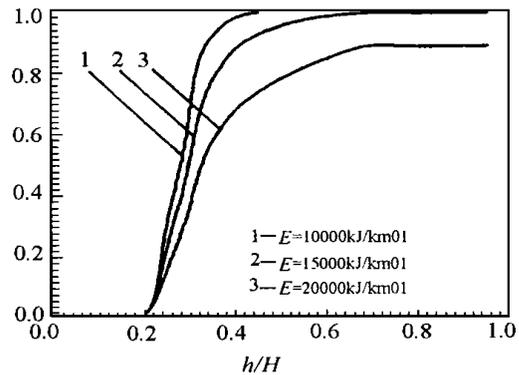


图 5 活化能对炉膛燃料总释热率一维分布影响 ($A_k = 5.0$)

从 $5.0\ \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 增至 $45.0\ \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$), 炉膛内燃料燃烧过程提前, 而随着活化能 E 的增加 (从 $10\ 000\ \text{kJ}/\text{kmol}$ 增至 $20\ 000\ \text{kJ}/\text{kmol}$), 炉膛内燃料燃烧过程则延迟。

图 6、图 7 以 SG1025/168-M312 型锅炉为算例, 计算分析了水冷壁灰污层热阻及其辐射特性对炉膛传热的影响。从图中可见, 当其它计算参数不变的条件下, 随着水冷壁灰污层热阻的增大 (从 $0.0035\ \text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$ 增至 $0.0045\ \text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$), 炉膛介质温度逐渐升高, 而随着水冷壁表面黑度的增大 (从 0.65 增至 0.85), 炉膛介质温度则不断下降, 但炉膛内介质温度的分布特性并未改变。

由上述煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型的基本原理可知, 此数学模型可以综合考虑各种锅炉结构系数、各种运行负荷、各种燃料特性参数及风粉配比对炉膛内介质温度和水冷壁吸收热流密度等热力参数一维分布的影响。

8 结论

计算分析了燃料化学反应动力学参数对炉膛内燃料释热率分布的影响。从图中可见当其它计算参数不变的条件下, 随着频率因子 A_k 的增大 (从 $5.0\ \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 增至 $45.0\ \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$), 炉膛内燃料燃烧过程提前, 而随着活化能 E 的增加 (从 $10\ 000\ \text{kJ}/\text{kmol}$ 增至 $20\ 000\ \text{kJ}/\text{kmol}$), 炉膛内燃料燃烧过程则延迟。

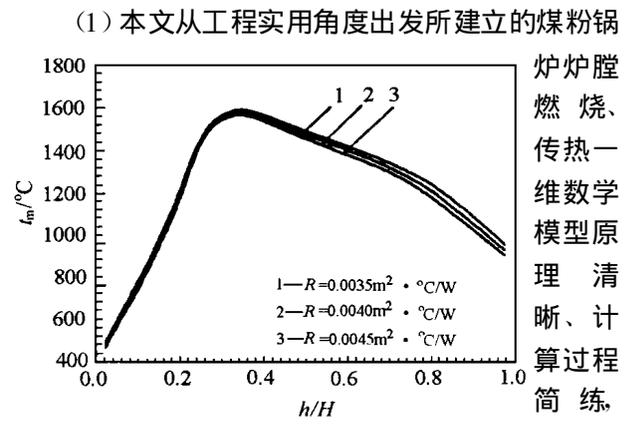


图 6 水冷壁灰污层热阻对炉膛介质温度一维分布影响 ($\epsilon = 0.75$)

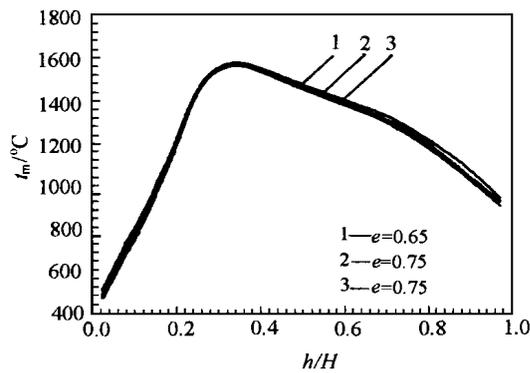


图 7 水冷壁黑度对炉膛介质温度一维分布影响 ($R = 0.004\ \text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$)

水冷壁吸收热流密度等热力参数一维分布值进行分析计算。

(2) 通过分别对 DG670/140-9 型 SG1025/168-M312 型和 HG2008/186-M 型锅炉炉内一维过程的计算分析表明, 应用煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型计算所得的炉膛内各种热力参数及其一维分布规律无论在物理性状上, 还是在数值上都是合理的。

参考文献

- [1] 董 芃. 大型煤粉锅炉炉膛传热工程化数值模拟方法的研究. [工学博士论文], 西安: 西安交通大学, 1993.
- [2] Field M A et al. Combustion of pulverized coal. INSTITUTE OF ENERGY, 1983.
- [3] 锅炉机组热力计算标准方法. 北京锅炉厂译, (前苏联 1973 年版). 北京: 机械工业出版社, 1976 年.

(渠 源 编 辑)

ICR 进展及关键技术 = **New Developments in ICR Engines and Related Key Techniques** [刊, 中] / Liu Yongbao, Zhang Renxing (Naval Engineering Academy) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 415 ~ 418

In addition to a series of advantages specific to a simple cycle gas turbine ICR engines feature an excellent off-design performance with Model WR-21 engine being ranked as the most advanced. This paper gives a brief description of some new developments in WR-21 gas turbines. The key techniques relating to such major components as intercoolers, regenerators, engine enclosures and digital control systems are also analyzed. **Key words:** ICR gas turbine, intercooler, regenerator, enclosure, control system

气体燃料再燃对 NO_x 还原的影响 = **Effects of Gaseous Fuel Reburning on NO_x Reduction** [刊, 中] / Zhong Beijing, Fu Weibiao (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 419 ~ 423

Gaseous fuel reburning pertains to one of the most effective methods being extensively studied for the reduction of NO_x content in flue gases. With the gases in a typical primary combustion zone serving as simulation gases the authors have studied the influence of different gaseous fuels (CH₄, C₂H₂ and C₂H₄) and the reburning zone combustion conditions (excess air coefficient and reburning temperature) on NO_x reburning process and its reduction. Through calculations it is found that different compositions of gaseous fuels, the excess air coefficient and firing temperature in the reburning zone exercise a significant influence on the NO_x reburning process and NO_x reduction rate. **Key words:** fuel reburning, gaseous fuel, NO_x reduction

煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型的研究 = **A Study of the Combustion and Heat Transfer One-dimensional Mathematical Model for a Pulverized Coal-fired Boiler Furnace** [刊, 中] / Dong Peng, Hong Mei, Qin Yukun et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 424 ~ 427

A combustion and heat transfer one-dimensional mathematical model has been set up for the analytical computation of one-dimensional distribution magnitudes of such thermodynamic parameters as furnace gas temperatures, water wall absorption heat flux density, heat release rate, etc. under various operating conditions. The calculation and analysis of three different models of boilers and a comparison of the calculated results with original design data have validated the rationality of the adopted mathematical model. **Key words:** furnace internal process, in-furnace heat transfer, mathematical model, pulverized coal combustion

折焰角结构对上部炉膛流场影响的数值研究 = **Numerical Simulation of the Effect of Arch Nose Structure on Furnace Upper Section Flow Field** [刊, 中] / Li Yanpeng, Xu Jinyuan (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 428 ~ 430

Based on a porosity conception conducted is a numerical simulation of the flow field in a boiler furnace under various arch nose structures. The effects of such structures on the residual swirl at the furnace outlet and the velocity distribution at the inlet of horizontal gas-pass were studied. The study results have been verified by way of a cold-state simulation test. They can serve as useful reference data during the design and retrofitting of utility boilers. **Key words:** arch nose, residual swirl, thermal excursion, numerical simulation

椭圆锥急燃器对煤粉火焰的稳燃作用 = **The Combustion Stabilizing Role Played by an Ellipsoidal Cone Combustion Stabilizer** [刊, 中] / Jing Youyin, Wang Baosheng (North China Electrical Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 431 ~ 433

By introducing the characteristics parameters of a gas-solid two-phase flow and proceeding from the structure of a pulverized-coal flow an analysis is performed of the combustion stabilizing action of an ellipsoidal cone combustion stabilizer on a pulverized-coal flame. **Key words:** ellipsoidal cone combustion stabilizer, characteristics parameter, pulverized-coal flame, ignition and steady combustion

600MW 锅炉机组膜式水冷壁壁温的试验研究及理论分析 = **Experimental Investigation and Theoretical Analysis of Membrane Water Wall Temperature in a 600 MW Boiler Unit** [刊, 中] / Yu Yanzhi, Tang Biguang, Liu Yong, et al (Wuhan University of Water Resources and Electrical Power) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 434 ~ 436