

# 循环流化床锅炉的燃烧效率

魏 政 (湘潭锅炉厂)

〔摘要〕 在循环流化床锅炉设计过程中,为提高燃烧效率,主要要从采用合理的炉膛高度和循环倍率两个方面去考虑。推导出了循环流化床锅炉炉膛最小高度公式和燃烧效率与循环倍率的关系式。

关键词 循环流化床 燃烧效率 循环倍率

分类号 TK229.66 TK224.11

## 1 前言

进行循环流化床锅炉设计,燃烧效率是人们感兴趣的参数。颗粒在炉内的停留时间必须不小于该颗粒在炉内的燃尽时间,这样才有机会被燃尽。因此,为提高燃烧效率,就要增大颗粒在炉内的停留时间。设计时,主要从两个方面考虑。一是增加炉膛高度,延长颗粒一次经过炉膛在炉内的停留时间,二是采用合理的循环倍率,使颗粒在炉内的总停留时间增长。

## 2 循环流化床炉膛高度对燃烧效率的影响

含炭颗粒的燃尽程度在一定程度上取决于它在炉内的停留时间,只有在炉内的停留时间大于其燃尽时间的颗粒才有机会燃尽。在流化速度及颗粒粒径等条件一定时,颗粒经过一次炉膛在炉内的停留时间取决于炉膛高度。

### 2.1 炭颗粒在炉内的停留时间

炭颗粒经过一次炉膛在炉内的停留时间一般可用下式计算:

$$\tau_h = H\rho_b/G_s$$

其中: $\tau_h$  为颗粒经过一次炉膛在炉内的停留时间,s。

$\rho_b$  为床内粒子浓度,kg/m<sup>3</sup>。

$G_s$  为炉内物料的循环流率,kg/(m<sup>2</sup>s)。

$H$  为炉膛高度,m。即返料机构中循环物料进入炉膛的入口到炉膛出口中心线间的距离。

在一定的质量流量下,床内粒子浓度 $\rho_b$ 随炉膛高度的增加而逐渐降低。对于粒子质量流量小于200 kg/(m<sup>2</sup>·s)的循环流化床锅炉, $\rho_b$ 与炉膛高度 $H$ 成近似于线性变化,在计算过程中,床内粒子浓度 $\rho_b$ 一般选取沿高度方向的平均值。

$$\rho_b = \frac{A_h^0 + G_y + C}{V_y(1 + \frac{\theta_{ch}}{273})}$$

收稿日期 1993 03 15 收第三稿 1993 07 01

本文联系人 魏潭政 男 28 工程师 411100 湖南湘潭锅炉厂设计科

其中:  $V_v$  为炉内烟气体积。

$G_v$  为炉内烟气重量。

$\theta_{ch}$  为炉内物料的平均温度,一般在 750 ~ 900℃ 范围内。

$C$  为炉内没有燃尽的炭量,  $C$  可按下式计算:

$$C = C^y \frac{1 - \varphi}{1 - \eta(1 - \varphi)}$$

其中:  $\varphi$  为物料经过一次炉膛的燃烧份额。

$\eta$  为高温分离器的分离效率。

$A_{fh}$  为炉内上升段的飞灰量,  $A_{fh}$  可用下式计算:

$$A_{fh} = A^y a_{fh} / (1 - \eta)$$

其中:  $a_{fh} = A_{fh} / A^y$ , 一般在 0.5 ~ 0.6 范围内。

物料的循环流率  $G_s$  与锅炉炉膛截面面积以及炉内上升段物料量有关,  $G_s$  可用下式计算:

$$G_s = (A_{fh} + C) \cdot B_1 / F$$

其中:  $F$  为炉膛截面面积,  $m^2$ 。

## 2.2 炭颗粒的燃尽时间

循环流化床床内颗粒的燃烧速度受化学反应速度与扩散速度的控制,颗粒的燃尽时间是扩散时间与反应时间的总和。床内颗粒的燃尽时间理论上可用下列公式计算:

$$\tau_r = \frac{\rho_s d_i}{2\varphi K_b C_o}$$

其中  $\rho_s$  为炭颗粒的密度,  $d_i$  为颗粒的初始粒径,  $\varphi$  为化学当量因子,  $C_o$  为床内的氧浓度,  $K_b$  为化学反应常数,服从阿累尼乌斯定律。

在设计计算时,利用上述公式来确定颗粒的燃尽时间,有些参数较难确定,应用起来不太方便。颗粒在炉内的燃尽时间可利用下列经验式计算:

$$\tau_r = 6.067 \times 10^8 \exp(-0.01276T_{ch}) d_i^{1.16}$$

其中  $d_i$  为颗粒的初始粒径,  $mm$ ,  $T_{ch}$  为炉内平均温度,  $K$ 。

不同床温,不同粒径颗粒的燃尽时间  $\tau_r$ , 利用经验公式可以计算出来。计算数据列表如下:

表1 不同床温,不同粒径颗粒的燃尽时间  $\tau_r$  数值表

$d_i (\mu m)$ $\tau_r (s)$ $Q_{ch} (^\circ C)$	25	50	75	100	125	150	200	300	350	400	500	1000	1500
750	18.01	40.25	64.42	89.94	116.51	143.95	200.97	321.67	384.65	449.09	581.77	1300.01	2080.71
800	9.52	21.27	34.04	47.52	61.56	76.06	106.18	169.95	203.23	237.28	307.38	686.86	1099.34
850	5.03	11.24	17.98	25.11	32.52	40.18	56.10	89.79	107.38	125.36	162.40	362.90	580.83
900	2.66	5.94	9.50	13.26	17.18	21.23	29.64	47.44	56.73	66.24	85.80	191.74	306.88
950	1.40	3.14	5.02	7.01	9.08	11.22	15.66	25.07	29.97	35.00	45.33	101.30	162.14

## 2.3 循环流化床锅炉炉膛高度

粒子在炉内的停留时间  $\tau_h$  应不小于其燃尽时间  $\tau_r$ , 这样粒子就有机会燃尽。炉膛高度应满足不能被高温分离器分离下来进行循环燃烧的粒子通过一次炉膛能完全燃烧。

根据  $\tau_h \geq \tau_r$ , 可以得到循环流化床的炉膛最小高度  $H_{min}$ 。

$$H_{min} = 6.067 \times 10^8 \exp(-0.01276T_{ch}) d_i^{1.16} G_s / \rho_b$$

不同粒径颗粒的燃尽时间  $\tau_r$  及其在床内的停留时间  $\tau_h$  关系曲线见图 1。

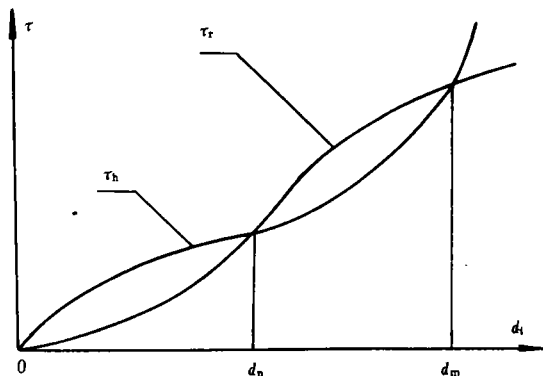


图 1 不同粒径  $\tau_r$  与  $\tau_h$  关系曲线示意图

从曲线可以看出,只有  $d_n < d_i < d_m$  的粒子,在循环流化床床内才可能没有燃尽就被气流带出了炉膛,即  $\tau_h < \tau_r$ 。

多年运行经验也说明:流化床飞灰颗粒中,造成  $q_4$  损失,主要是含炭量大,重量份额又多的那部分中间大小的颗粒,如燃用褐煤的循环流化床锅炉粒径为  $150 \sim 350 \mu\text{m}$  的颗粒含炭损失大于总飞灰含炭损失的 50% 以上,而小于  $100 \mu\text{m}$  的飞灰含炭量很低。所以只须把中间大小粒径的飞灰捕集参加循环便可有效地提高锅炉的燃烧效率,

一般要求循环流化床锅炉炉膛高度应能保证  $100 \mu\text{m}$  以下的粒子经过一次炉膛能完全燃烧,这样利用公式就可以确定炉膛的最小高度  $H_{\min}$ 。

#### 2.4 确定循环流化床锅炉炉膛高度的实例

湘潭锅炉厂 15 t/h 循环流化床锅炉是 1993 年开发的新产品。锅炉设计燃料为 II 类无烟煤,  $C^v = 74.15\%$ ,  $A^v = 13.98\%$ 。根据锅炉热力计算,炉内烟气体积  $V_y = 7.197 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ ,炉内烟气重量  $G_y = 11.663 \text{ kg}/\text{kg}$ ,计算燃料消耗量  $B_1 = 0.57 \text{ kg}/\text{s}$ 。炉内稀相区平

均温度  $\theta_{\text{ch}} = 830^\circ\text{C}$ ,即  $T_{\text{ch}} = 1103 \text{ K}$ 。炉膛稀相区截面面积  $F = 2.8 \times 2.86 \text{ m}^2$ 。

根据所要求的燃烧效率及锅炉结构,燃料特性,选取物料经过一次炉膛的燃烧份额为  $\varphi = 0.7$ ,高温分离器的分离效率为  $\eta = 0.8$ ,即循环倍率  $R_c = 5$ 。

利用公式,炉内没有燃尽的炭量  $C$  可计算得到:

$$\begin{aligned} C &= C^v \frac{1 - \varphi}{1 - \eta(1 - \varphi)} \\ &= 0.7415 \frac{1 - 0.7}{1 - 0.8(1 - 0.7)} \\ &= 0.2927 \text{ kg}/\text{kg} \end{aligned}$$

选取最终进入尾部受热面的飞灰份额  $a_{\text{th}} = 0.55$ 。利用公式,可以计算出炉内上升段的飞灰量  $A_{\text{th}}^v$ :

$$\begin{aligned} A_{\text{th}}^v &= A^v a_{\text{th}} / (1 - \eta) \\ &= 0.1398 \times 0.55 / (1 - 0.8) \\ &= 0.3845 \text{ kg}/\text{kg} \end{aligned}$$

从而,可以得到床内粒子浓度  $\rho_b$ :

$$\begin{aligned} \rho_b &= \frac{A_{\text{th}}^v + G_y + C}{(1 + \theta_{\text{ch}}/273)V_y} \\ &= \frac{0.3845 + 11.663 + 0.2927}{(1 + 830/273) \times 7.197} \\ &= 0.4244 \text{ kg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

循环流化床床内稀相区物料的循环流率  $G_s$  可用公式计算:

$$\begin{aligned} G_s &= (A_{\text{th}}^v + C) \cdot B_1 / F \\ &= (0.3845 + 0.2927) \times 0.57 / (2.8 \times 2.86) \\ &= 0.0482 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

利用公式,计算出炉膛的最小高度,在计算时选取  $d_i = 100 \mu\text{m}$ ,即  $d_i = 0.1 \text{ mm}$ 。

$$\begin{aligned} H_{\min} &= 6.067 \times 10^8 \exp(-0.01276T_{\text{ch}}) \\ &\quad \times d_i^{1.16} G_s / \rho_b = 6.067 \times 10^8 \exp \\ &\quad \times (-0.01276 \times 1103) \times 0.1^{1.16} \\ &\quad \times 0.0482 / 0.4244 = 3.68 \text{ m} \end{aligned}$$

15 t/h 循环流化床锅炉炉膛高度为 4.0 米。颗粒在炉内的停留时间经估算约 44 秒。

### 3 循环流化床循环倍率燃烧效率的影响

确定了炉膛高度,即确定了颗粒经过一次炉膛能够完全燃烧的最大粒径。为了提高燃烧效率,高温分离器应该保证经过一次炉膛不能完全燃烧的颗粒尽可能被分离下来,进行循环燃烧。

#### 3.1 分离器的分离特性

高温分离器的设计效率  $\eta$  不同,能够被分离器全部分离下来的颗粒的最小粒径也不同,分离中径也不同。高温分离器的分离特性曲线见图2。在进行循环流化床锅炉设计时,依靠采用合理的高温分离器分离效率来保证锅炉的燃烧效率。

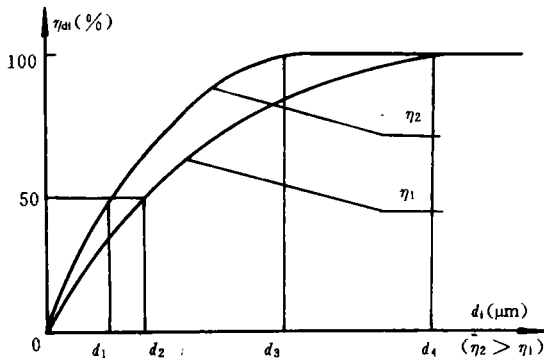


图2 分离器的分离特性曲线示意图

#### 3.2 高温分离器分离效率与燃烧效率的关系

高温分离器的分离效率大,分离下来进行循环燃烧的物料就多,燃烧效率也就高。燃烧效率  $\varphi$  与高温分离器的分离效率  $\eta$  的关系,可以从锅炉炭的平衡分析中得出来。

##### 3.2.1 循环流化床锅炉的炭平衡

新投入燃料经过一次炉膛的燃烧份额  $\varphi_1$  与循环物料经过一次炉膛的燃烧份额  $\varphi_2$  有一定差异,其差异程度主要与燃料特性,物料在床内的流化工况等有关。锅炉燃料成分相当复杂,筛分范围也广,物料在床内的流化工况及燃烧工况都相当复杂,床内颗粒有自身的运动,也有相互之间的碰撞, $\varphi_1$  与  $\varphi_2$  之间的差异一般并不显著。在进行循环流化床锅炉设计过程中, $\varphi_1$  近似等于  $\varphi_2$ 。即不管是新投入的燃料,还是经过多次循环后的颗粒,经过一次炉膛燃烧,燃烧份额都可为  $\varphi$ 。

设高温分离器的分离效率为  $\eta$ ,新投入1单位燃料有  $C^v(1-\varphi)$  的炭量流经高温分离器,经分离器的分离,有  $C^v(1-\varphi)\eta$  的炭被分离下来,送回床内进行循环燃烧,进入尾部受热面的炭量为  $C^v(1-\varphi)(1-\eta)$ 。

送回床内进行循环燃烧的炭量  $C^v(1-\varphi)\eta$ ,经一次循环燃烧后,流经高温分离器的炭量为  $C^v(1-\varphi)\eta(1-\varphi)$ ,即  $C^v(1-\varphi)^2\eta$ ,被分离器分离下来送回床内进行循环燃烧的炭量为  $C^v(1-\varphi)^2\eta^2$ ,进入尾部受热面的炭量为  $C^v(1-\varphi)^2\eta(1-\eta)$ 。

送回床内进行循环燃烧的炭量为  $C^v(1-\varphi)^2\eta^2$ ,经过一次炉膛循环燃烧后,流经高温分离器的炭量为  $C^v(1-\varphi)^3\eta^2$ ,再被分离器分离下来送回床内进行循环燃烧的炭量为  $C^v(1-\varphi)^3\eta^3$ ,进入尾部受热面的炭量为  $C^v(1-\varphi)^3\eta^2(1-\eta)$ 。

如此反复下去……

送入炉内1单位燃料的炭,经过炉膛  $n-1$  次循环燃烧后,被高温分离器分离下来重新送入床内进行循环燃烧的炭量为  $C^v(1-\varphi)^{n-1}\eta^{n-1}$ 。再经一次循环燃烧后,流经高温分离器的炭量为  $C^v(1-\varphi)^n\eta^{n-1}$ ,被分离下来送入床内进行循环燃烧的炭量为  $C^v(1-\varphi)^n\eta^n$ ,进入尾部受热面的炭量为  $C^v(1-\varphi)^n\eta^{n-1}(1-\eta)$ 。

根据以上分析,进入尾部受热面的总炭

量  $C_1$  有下列关系:

$$C_1 = C^y(1-\varphi)(1-\eta) + C^y(1-\varphi)^2(1-\eta)\eta + C^y(1-\varphi)^3(1-\eta)\eta^2 + \dots + C^y(1-\varphi)^n\eta^{n-1}(1-\eta)$$

$$= C^y(1-\varphi)(1-\eta)[1 + \eta(1-\varphi) + \eta^2(1-\varphi)^2 + \dots + \eta^{n-1}(1-\varphi)^{n-1}]$$

由于  $\eta(1-\varphi) < 1$ , 上式可简化为:

$$C_1 = C^y(1-\varphi)(1-\eta)/[1-\eta(1-\varphi)]$$

锅炉的燃烧效率为  $\varphi_r$ , 投入炉膛 1 单位燃料的炭损失  $C_2$  可按式计算:

$$C_2 = C^y(1-\varphi_r)$$

### 3.2.2 高温分离器分离效率与燃烧效率

由于炉内放出的冷渣可燃物含量很少, 一般可忽略不计, 而循环流化床锅炉正常运行过程中, 物料回送系统放出的灰量很少, 可近似为零。因此, 进入尾部受热面的总炭量  $C_1$  就是投入锅炉燃料总损失的炭量  $C_2$ , 即  $C_1 = C_2$ 。从而可得到:

$$C^y(1-\varphi_r) = C^y(1-\varphi)(1-\eta)/[1-\eta(1-\varphi)]$$

上式可转化为:

$$\eta = \frac{\varphi_r - \varphi}{\varphi_r(1-\varphi)} \quad (1)$$

可以看出燃烧效率  $\varphi_r$  与  $\varphi$  和  $\eta$  有关, 一旦  $\varphi$  确定, 即炉膛结构、燃料特性、流化工况等确定,  $\varphi_r$  与  $\eta$  存在着一个确定的关系。

### 3.3 循环倍率与燃烧效率

循环倍率  $R_c$  与高温分离器的分离效率  $\eta$  存在着如下关系:

$$R_c = \frac{1}{1-\eta}$$

将式(1)中的分离效率  $\eta$  代入上式可得:

$$R_c = \frac{\varphi_r(1-\varphi)}{\varphi(1-\varphi_r)}$$

上式的意义在于要使循环流化床锅炉的燃烧效率达到  $\varphi_r$ , 则必须满足循环倍率不小于  $R_c$ 。

物料经过一次炉膛燃烧的燃烧份额  $\varphi$  与

锅炉结构, 燃烧特性, 流化工况等有关。对于不同煤种,  $\varphi$  可按下表选取。

表 2 不同煤种  $\varphi$  的范围推荐表

煤种	烟煤	无烟煤	褐煤	贫煤	煤矸石
一次燃烧份额 $\varphi$	0.85 ~ 0.9	0.7 ~ 0.8	0.87 ~ 0.92	0.75 ~ 0.85	0.75 ~ 0.8

### 3.4 循环流化床循环特性参数的确定实例

湘潭锅炉厂 15 t/h 循环流化床锅炉设计燃料为 II 类无烟煤, 设计燃烧效率  $\varphi_r = 0.92$ 。根据炉膛结构特点, 选取经过一次炉膛的燃烧份额  $\varphi$  为 0.7。

利用公式, 可以得到要求的最小循环倍率  $R_{min}$

$$R_{min} = \frac{\varphi_r(1-\varphi)}{\varphi(1-\varphi_r)} = \frac{0.92(1-0.7)}{0.7(1-0.92)} = 4.93$$

15 t/h 循环流化床锅炉实际选取的循环倍率为  $R_c = 5.0$ 。高温分离器的分离效率为 0.8。

## 4 结 语

炉膛高度, 炉膛截面面积, 锅炉的循环倍率等对循环流化床锅炉的燃烧效率有着重要的影响。炉膛结构是影响物料经过一次炉膛的燃烧份额  $\varphi$  的主要因素。在一定的锅炉炉膛结构条件下, 采用合理的循环倍率, 对提高循环流化床锅炉燃烧效率具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 魏 政. 循环流化床内物料的平均含炭量. 全国工业锅炉循环流化床技术论文集, 1992
- 2 赵力人 译. 循环流化床锅炉的设计考虑. 热能动力工程, 1988, 3(6)
- 3 刘焕彩. 流化床锅炉原理与设计. 华中理工大学出版社, 1990

(梁源沥 编辑)

# JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1994 Vol. 9 No. 4

---

## CONTENTS

- (193) **Boiler Furnace slagging and Preventive Measures**.....He Peiao (*Harbin Electric Power Plant Equipment Design Institute*), Ai Jing (*Harbin Institute of Technology*)

Proceeding from established theories and practical personal experience the authors briefly describe various types of boiler furnace slagging and slagging-causing factors. Specific measures for the prevention of slagging are proposed in detail and various kinds of applicable reference data given. Presented in this paper are some examples of newly designed boilers firing slagging-prone fuels and existing boilers modified for operating on slagging-prone fuels. A variety of design principles and effective measures for slagging prevention are also laid down. **Key words:** *boiler furnace slagging, affecting factors, preventive measures, classification*

- (206) **Dynamics study of Vortex Fluidized Bed Cyclone Combustion**..... Duan yufeng, Zhao Chang-sui, Xu Yiqian (*Southeast University*)

With the help of a physical model featuring the injection of secondary air into a vortex fluidized bed suspension space to form a strong swirling-flow field and gas/solid suspension flow, an experimental study has been performed of the motion behavior of the groups of particles entrained from the bed surface into the suspension space and the matching of gas/solid dual phase concentration fields. It is observed that under the action of gas phase strong vortex turbulent flows there emerged at the near-wall region a stable suspension layer of high-concentration particles. The average retention time of the particles in the boiler is lengthened and gas/solid sliding speed increased, resulting in a strong dual phase mixing and sufficient contact, The proper aerodynamic structure exercises a very favorable effect on the enhancement of burning-down degree of carbon particles in the suspension space, bringing about a reduction of segregated combustible loss. The cold model experimental study results presented in this paper can prove very helpful in lowering the flyash combustible loss occurring in conventional bubbling fluidized bed and travelling-grate boilers equipped with coal spreaders and in enhancing the gas flow transverse mixing speed in the suspension space. **Key words:** *vortex fluidized bed, transverse mixing, cyclone combustion, classification*

- (210) **The Combustion Efficiency of Circulating Fluidized Bed boilers**..... We Zheng (*Xiang Tan boiler works*)

During the design of circulating fluidized bed boilers two factors, i. e. rational furnace height and circulation ratio, are in the main taken into consideration in order to enhance combustion efficiency. Derived in the paper is a formula for calculating furnace minimum height of a circulating fluidized bed boiler and also a relation between combustion efficiency and circulation

ratio. **Key words:** *circulating fluidized bed, combustion efficiency, circulation ratio*

- (215) **Selection and Application of S-type Fan Pulverizing Mills**..... Cheng Qinggang (*Harbin Electric Power plant Equipment Design Institute*)

It is well-known that the main factors influencing the performance parameters of fan pulverizing mills include coal quality characteristics, fan mill construction features and operating mode. In selecting traditional fan mills correction factors, such as coal grindability, coal fineness and raw coal moisture content, are taken into account to determine the performance parameters of the fan mills. Practice has shown that such a selection method is not proper and lacks versatility. Trial grinding of coal types constitutes a relatively reliable method for the selection of fan mills and the design of coal pulverizing systems. The present paper deals with a  $s_{0.2.300}$  fan mill testing system set up on the basis of flow and geometry-similar theory, Through. the experimental verification of Zhalenor and Houlinghe mine lignites the relevant parameters of trial grinding have been implanted into a heavy-duty fan mill selection design, thus providing design institutes with a reliable basis for the rational selection of fan mills and related pulverization systems. **Key words:** *fan pulverizing mill, trial grinding, type selection, application*

- (221) **A study on Louvered pulverized Coal Concentrator Resistance Characteristics**.....Xing Chunli, Sun Shaozeng, Wu shaohua, Sun Enzhao, Qin Yukun (*Harbin Institute of Technology*)

With the use of a horizontal concentration pulverized coal burner it is possible to effect a simultaneous realization of highly efficient burning of pulverized coal, prevention of slagging, stable combustion and low  $NO_x$  emissions. A novel type of inertia-based concentrator of pulverized coal, the louvered concentrator plays a key role in attaining the combustion of horizontal concentrated pulverized coal. Its successful application necessitates the study of the following four issues: resistance characteristics, the distribution of air flow and pressure, concentration characteristics and wear-resisting properties. This paper focuses on the investigation of the effect of structural parameters on concentrator resistance loss. The test results show that with the increase on the number of louvered concentration grid units and their clearance and the increase in concentration grid inclination the resistance loss of the louvered concentrator tends to decrease. **Key words:** *pulverized coal combustion, louvered concentrator, classification*

- (226) **The Mechanism and Solution Methods of Boiler Tube Failure**..... Xu Lijun (*Hua Dong Institute of Technology*), Qu Guobin (*Harbin boiler works*), Liu Daoping (*China Mineral University*)

This paper has analyzed the leading mechanism of boiler tube failures and proposed prevention methods and solution methods of boiler tube failures. **Key words:** *utility boiler, boiler tube failure*

- (230) **Numerical Calculation of Three-dimensional Flow Fields in Turbomachine Blade Rows**..... Du Zhaohui, Weng Peifen, Zhong Fangyuan (*Shanghai Jiaotong University*)

With the help of a time dependent finite volume method the authors have worked out a computer program of the calculation of three-dimensional non-viscous flow field in turbomachine blade rows. The actual calculation results demonstrate the stability of the numerical calculation of the said method, high convergent speed and relatively good agreement with experimental data,