

# 高浓度煤粉燃烧过程中氮氧化物生成的研究\*

齐 宏 姚 洪 范耀国 袁建伟

(华中理工大学)

〔摘要〕 在滴管炉和一维炉中对煤粉燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的排放进行了测量,并对  $\text{NO}_x$  的生成与分解过程进行了化学动力学模拟。结果表明,高浓度煤粉燃烧过程中  $\text{NO}_x$  的排放量明显减少,其主要原因 一是偏离化学当量比的燃烧,二是由于均相着火模式下产生的大量  $\text{CO}$  对  $\text{NO}_x$  有分解作用。

关键词 高浓度 煤粉 煤燃烧  $\text{NO}_x$   $\text{CO}$

分类号 TQ 530.2

## 0 引言

在排向大气的燃烧污染物中,氮的氧化物  $\text{NO}_x$  是一种有害于人体健康的物质,而且对环境的污染很大。我国电站锅炉的  $\text{NO}_x$  排放水平为 350~800 ppm,  $\text{NO}_x$  的排放普遍超标<sup>[1]</sup>,控制  $\text{NO}_x$  的生成量和研究低  $\text{NO}_x$  煤粉燃烧的理论与技术,已成为煤燃烧的重要课题,其研究工作也逐渐深入。高浓度煤粉燃烧技术被普遍认为具有降低  $\text{NO}_x$  排放量的作用,其原因在于高浓度煤粉燃烧过程中偏离化学当量比的反应和热力  $\text{NO}_x$  生成量的减少。最新研究表明<sup>[2]</sup>,随着煤粉浓度的提高,煤粉气流的着火模式会由多相着火模式逐渐转变到均相着火模式。由于着火模式的改变强烈地影响到煤粉的着火和以后的燃

烧特性,而  $\text{NO}_x$  主要在着火过程生成<sup>[3]</sup>,那么,着火模式的改变导致着火特性的改变不可避免地对  $\text{NO}_x$  生成产生强烈而显著的影响。本文的目的是通过实验测量和化学动力学模拟探讨高浓度煤粉燃烧过程中  $\text{NO}_x$  生成量降低的机理。

## 1 试验研究

在滴管炉和一维炉中对煤粉燃烧生成的  $\text{NO}_x$  进行了测量。在滴管炉中测量用了梅河褐煤、峰峰烟煤、四望璋无烟煤;在一维炉上测量用煤是青山烟煤。滴管炉实验装置详见文献 [4],一维炉实验装置详见文献 [5]。

### 1.1 煤种

试验用煤的分析数据如表 1 所列。

表 1 试验煤种的分析数据 (空干基 ad,%)

煤 种	M	V	A	FC	C	H	N	S	O
梅 河	3.53	36.81	10.08	49.56	63.61	4.76	1.286	0.945	29.399
峰 峰	0.59	17.48	10.46	71.47	79.90	4.19	0.971	0.320	14.619
四望璋	2.45	5.41	34.06	58.07	58.22	0.90	0.440	0.661	39.739
青 山	1.98	18.48	34.32	45.22	52.51	2.67	1.34		

收稿日期 1996-02-27 修改定稿 1997-01-21

\* 本文受国家攀登计划项目、高等学校霍英东教育基金资助

1.2 试验工况与测量

滴管炉的试验主要是在改变煤种和煤粉浓度的各工况(表 2)下测量烟气中 NO<sub>x</sub> 的浓度和其它烟气成分的浓度。煤粉浓度的改变是通过改变二次风的大小来实现的。煤粉气流进入炉膛前的温度等于室温(约 20℃),主炉以 10℃/min 的速度升温,至主炉温度达到预定值(梅河褐煤为 750℃,峰峰烟煤为 850℃,四望璋无烟煤为 950℃)主炉温度预定值选

择的理由是,在实际燃烧过程中煤粉着火时,其周围气体的温度就在所选定预定值附近,这样用炉温来模拟实际过程的气体是合适的<sup>[6]</sup>。通过取样管对炉膛不同位置取样进行测量,取样点位于距炉膛入口 0.35-0.65 m 之间,在这一范围内,煤粉气流正处于着火和燃烧的初始阶段,因而用于了解煤粉着火过程中氮氧化物的生成是可行的。

表 2 滴管炉上试验工况

煤 种	工况编号	给粉量 (g/min)	一次风量 (l/h)	二次风量 (m <sup>3</sup> /h)	煤粉浓度 (kg 煤 / kg 空气)	炉壁温度(℃)
梅 河	1	2.2	150	0.2	0.310	750
	2			0.4	0.197	
	3			0.6	0.144	
	4			0.8	0.114	
峰 峰	1	3.5	200	0.2	0.431	850
	2			0.4	0.287	
	3			0.6	0.216	
	4			0.8	0.172	
四望璋	1	3.5	200	0.2	0.431	950
	2			0.4	0.287	
	3			0.6	0.216	
	4			0.8	0.172	

在一维炉中,采用连续给粉技术,让一、二次风充分预混后进入炉膛,通过调节一、二次风量及给粉量控制煤粉浓度。试验时用电炉和煤气伴烧加热,当炉温达到一定值时,撤出煤气,投入煤粉燃烧并进行测量。燃烧中生成的烟气沿反应段的各取样孔取出,送分析仪测量。

2 实验结果分析

2.1 滴管炉试验

我们测量了三种煤在各种不同煤粉浓度下燃烧生成的 CO 和 NO<sub>x</sub> 的值。(见图 1 和图 2)

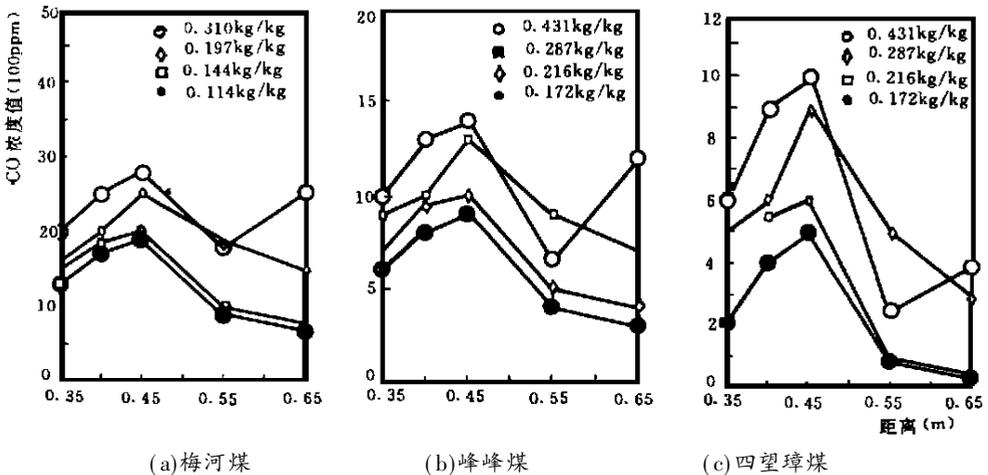


图 1 炉内各种煤粉浓度下的 CO 浓度值

从图 1 中可以发现,随煤粉浓度升高,CO 值逐渐增大。各种煤在各自浓度最大工况时 CO 值是最大的,并且 CO 值出现波动。这是由于煤粉浓度增大后,挥发分析出大量增加,氧量供应不足,从而导致不完全燃烧生成的 CO 量增大。

从图 2 中可以看出,各种煤的第 2 3 4 工况均反映出 NO<sub>x</sub> 主要在着火初期生成,在随后的燃烧区,略有减少;在其它条件不变的情况下,随煤粉浓

度的增加,生成的 NO<sub>x</sub> 量是单调减少的。当煤粉浓度较高时,即各种煤的第 1 工况,可以看出,此时生成的 NO<sub>x</sub> 量减少得很多,并且 NO<sub>x</sub> 的生成量在随后的燃烧区域内有波动,三种煤在较高浓度煤粉燃烧工况下 NO<sub>x</sub> 的生成都有比较一致的规律。值得注意的是,NO<sub>x</sub> 的生成量随煤粉浓度增加而降低的同时,CO 的浓度是增加的。

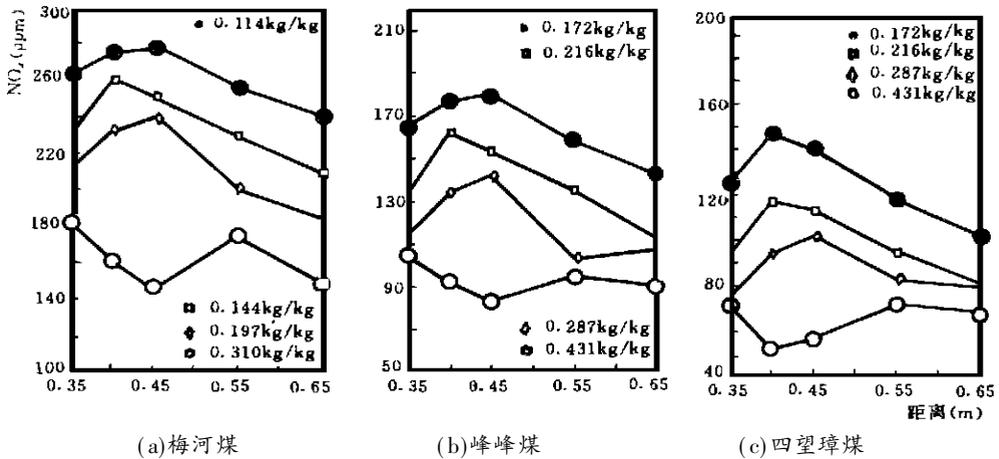


图 2 各种煤在炉内 NO<sub>x</sub> 的浓度值

2.2 一维炉试验

一维炉中,同样测量了 CO 和 NO<sub>x</sub> 的值,可以发现一维炉试验结果与滴管炉试验结果类似,在煤

0.48kgc/kg 后,NO<sub>x</sub> 的量是减少的,与此同时,CO 量是增大的,CO 与 NO<sub>x</sub> 有较强的对应关系。

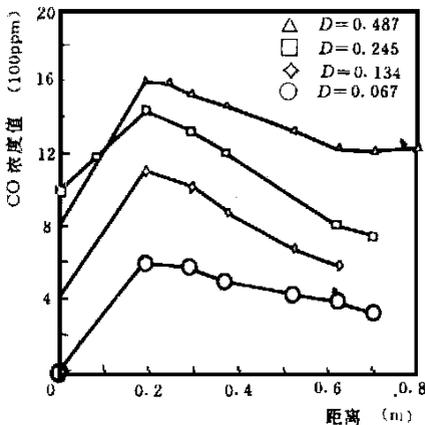


图 3 一维炉内各煤粉浓度下 CO 的浓度分布

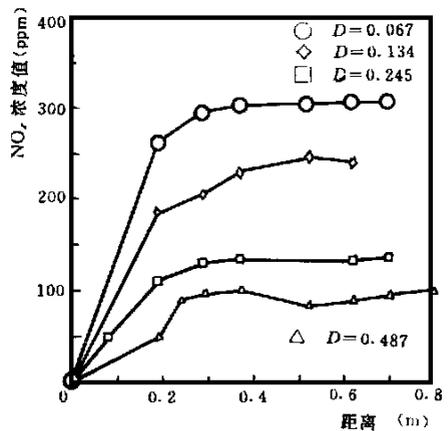


图 4 一维炉内各煤粉浓度下 NO<sub>x</sub> 浓度分布

粉浓度增高的情况下,即由 0.067kgc/kg 增大到

浓度提高后,CO 是增大的,而 NO<sub>x</sub> 的生成量是减少

的。在以前的研究中我们已经指出,CO的增大是煤粉的着火模式由多相向均相转变以及缺氧的结果。NO<sub>x</sub>的减少除了普遍认为是偏离化学当量比的结果外,较高浓度的CO是否对NO<sub>x</sub>的分解有影响呢?事实上,Johannes在文献[7]指出,CO的存在将使NO-NH<sub>3</sub>-O<sub>2</sub>系统中的NO减少。为此,我们对均相化学反应体系中CO对NO<sub>x</sub>的影响进行了化学动力学模拟。

### 3 均相反应体系中NO<sub>x</sub>生成与分解的化学动力学模拟

避开煤粉气流燃烧过程中NO<sub>x</sub>生成与分解模

拟的复杂性,本文以煤粉热解析出的挥发分与空气预混合形成的一维稳定火焰为研究对象。挥发分的成分参考快速热解反应确定。由于挥发分中的碳氢化合物确定为C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>,因此对于这样的均相反应体系,采用Miller等人<sup>[8]</sup>提出的化学反应体系加以描述,这个反应体系包括了50种化学组分的235个基元化学反应,其中与NO<sub>x</sub>生成与分解有直接关系的29个反应列于表3中。

本文采用Senkin软件包对由挥发分和空气组成的一维稳态预混火焰进行了化学动力学模拟,模拟中分别考虑了空燃比及CO浓度对NO<sub>x</sub>生成量的影响,计算工况如表4所列。

表3 Chemikin软件包中有关NO的基元反应方程式及速率常数

反应方程式	A	n	E
157. C+ NO= CN+ O	6.60E+13	0.0	0.0
158. CH+ NO= HCN+ O	1.10E+14	1.0	0.0
159. CH <sub>2</sub> + NO= HCN+ H	1.39E+12	0.0	-1100.0
160. CH <sub>3</sub> + NO= HCN+ H <sub>2</sub> O	1.00E+11	0.0	15000.0
161. CH <sub>3</sub> + NO= H <sub>2</sub> CN+ OH	1.00E+11	0.0	15000.0
162. HCCO+ NO= HCN+ CO	2.00E+13	0.0	0.0
163. CH <sub>2</sub> + NO= HCN+ OH	2.00E+13	0.0	0.0
167. CO <sub>2</sub> + N= NO+ CO	1.90E+11	0.0	3400.0
185. CN+ NO <sub>2</sub> = NCO+ NO	3.00E+13	0.0	0.0
186. CN+ NO= NCO+ N <sub>2</sub>	1.00E+13	0.0	0.0
189. HO <sub>2</sub> + NO= NO <sub>2</sub> + OH	2.11E+12	0.0	-479.0
190. NO <sub>2</sub> + H= NO+ OH	3.50E+14	0.0	1500.0
191. NO <sub>2</sub> + O= NO+ O <sub>2</sub>	1.00E+13	0.0	600.0
192. NO <sub>2</sub> + M= NO+ O+ M	1.10E+16	0.0	66000.0
194. NCO+ O= NO+ CO	2.00E+13	0.0	0.0
196. NCO+ OH= NO+ CO+ H	1.00E+13	0.0	0.0
198. NCO+ NO= N <sub>2</sub> O+ CO	1.00E+13	0.0	-390.0
202. NH+ O <sub>2</sub> = NO+ OH	7.60E+10	0.0	1530.0
203. NH+ NO= N <sub>2</sub> O+ H	2.40E+15	-0.8	0.0
217. NH <sub>2</sub> + NO= NNH+ OH	6.40E+15	-1.3	10171.0
218. NH <sub>2</sub> + NO= N <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O	6.20E+15	-1.3	9000.0
223. NNH+ NO= N <sub>2</sub> + HNO	5.00E+13	0.0	0.0
229. HNO+ M= H+ NO+ M	1.50E+16	0.0	48680.0
230. HNO+ OH= NO+ H <sub>2</sub> O	3.60E+13	0.0	0.0
231. HNO+ H= H <sub>2</sub> + NO	5.00E+12	0.0	0.0
232. HNO+ NH= NH+ NO	2.00E+13	0.0	1000.0
233. N+ NO= N <sub>2</sub> + O	3.27E+12	0.3	0.0
234. N+ O <sub>2</sub> = NO+ O	6.40E+09	1.0	6280.0
235. N+ OH= NO+ H	3.80E+13	0.0	0.0

## 3.1 计算工况如表 4 所列

表 4 各种计算工况

燃料气成分摩尔份额						初始空气量修正		空燃比	计算
CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	HCN	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H	工况
6.1	24.6	18.85	50.3	0.03	0.12	0	0	1.0	IN11
6.1	24.6	18.85	50.3	0.03	0.12	0	0	0.75	IN12
6.1	24.6	18.85	50.3	0.03	0.12	0	0	0.50	IN13
6.1	30.0	18.85	50.3	0.03	0.12	0	-5.4	1.0	IN21
6.1	40.0	18.85	50.3	0.03	0.12	0	-15.4	1.0	IN22
6.1	50.0	18.85	50.3	0.03	0.12	0	-25.4	1.0	IN23
6.1	20.0	18.85	50.3	0.03	0.12	0	4.6	1.0	IN24
6.1	10.0	18.85	50.3	0.03	0.12	0	14.6	1.0	IN25
6.1	2.0	18.85	50.3	0.03	0.12	0	22.6	1.0	IN26

## 3.2 计算结果分析

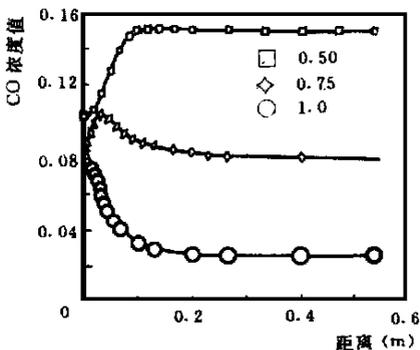
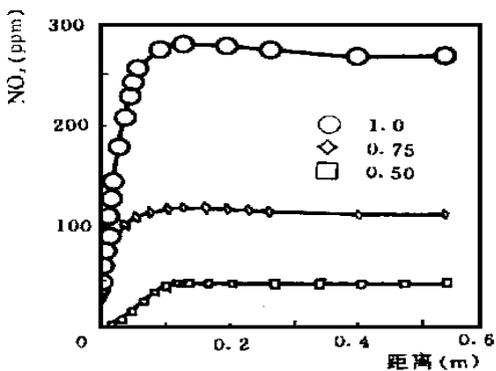
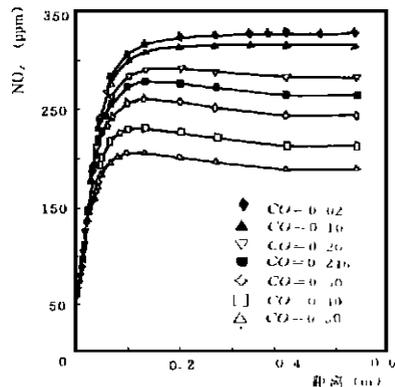


图 5 在不同空燃比下的 CO 计算值

图 6 在不同空燃比下的 NO<sub>x</sub> 计算值

当空燃比变小时,实际上是模拟煤粉燃烧时由于煤粉浓度增大,煤粉颗粒在氧量不足下燃烧的工

图 7 各种 CO 浓度下计算出的 NO<sub>x</sub> 生成量

况。计算结果表明,当空燃比减少时,CO 值增大,NO<sub>x</sub> 减小,这和实验中测得的结果是一致的。

当维持空燃比 1.0 不变时,单独增大 CO 的量,同时修正初始的 N<sub>2</sub> 值,这样就是为了维持 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、HCN 值占整个参与燃烧的气体份额基本不变,计算结果如图 7 所示。

从图 7 上可以看出,当 CO 值从占燃料气 2% 份额(占整个反应气体 0.49%)变动到占燃料气 50% 份额(占整个反应气体 9.64%)时,NO<sub>x</sub> 生成量是减少的,从 330 ppm 减少到 190 ppm。这说明,CO 浓度的增加会导致 NO<sub>x</sub> 生成量的减少。从反应体系中看,当 CO 浓度增加时,第 167 和 194 号反应的逆反应速率增加,导致了 CO 对 NO 的分解作用。由此看到,高浓度煤粉燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 生成量的减少不仅仅是偏离化学动量比的结果,同时还是 CO 对 NO<sub>x</sub> 的分解的结果。

## 4 结论

(1)随着煤粉浓度的提高,  $\text{NO}_x$  的排放量逐渐减少。

(2)高浓度煤粉燃烧生成的  $\text{NO}_x$  减少的原因不仅仅在于偏离化学当量比的反应,同时还在于大量产生的 CO 对  $\text{NO}_x$  的分解作用。

### 参 考 文 献

- 1 毕玉森. 热力发电. 1987(6): 20
- 2 Sheng Changdong, et al. The ignition and early stage combustion in bituminous pulverized coal clouds, Proceeding of the 3rd International Conference on Coal Combustion, Beijing, China, Sept. 1995
- 3 何秀光. 煤粉火焰中氮氧化物生成与控制的研究. 华

中理工大学, 博士论文, 1989

- 4 盛昌栋. 煤粉气流着火的研究及煤粉浓度连续可调的实现. 华中理工大学, 博士论文, 1995
- 5 陈建原. 煤粉着火过程及其数学模型的研究. 华中理工大学, 博士论文, 1990
- 6 岑可法, 樊建人合编. 燃烧流体力学. 北京: 水利电力出版社, 1991. 9
- 7 Johannes Suchlman, et al, Experimental characterization of th influence of CO on the high- temperature reduction of NO by  $\text{NH}_3$ . Fuel, Vol. 72 175- 179
- 8 Miller J A, et al. Senkin: A fortran program for predicting homogenous gas phase chemical kinetics with sensitivity analysis. Sandia Report, SAND87- 8248. UC- 401, 1992

作者简介: 齐宏, 1967年生, 1996年华中理工大学煤燃烧国家重点实验室硕士研究生毕业, 现在首都钢铁公司工作。

## · 能源开发 ·

# 非煤和生物质燃料的开发

据“Gas Turbine World”1996年5-6月号报道,新的生物能气化技术正以商业规模的装置进行原型验证,它将洁净并高效地燃烧木材废料、生物质、炼油厂残渣物和其它“废物”燃料。

气化过程产生中等热值的可燃气体,气化系统使用二个独立的反应器:把生物质转换成燃料气体和剩碳的气化反应器和燃烧剩碳以便提供气化用热量的燃烧反应器。砂在这二个反应器之间循环,以便提供传热。气化系统连接到燃气轮机。

为了以生产的可燃气体运行,需要对燃气轮机进行的唯一修改是增设一个单独的燃料控制阀,以适应生产的可燃气体增加的容积流量。燃气轮机的燃烧室是标准的天然气燃烧室,无需作修改。

在验证系统中已达到良好的效果。完成了对基于装有 GE MS6001B(压比—11.8:1,简单循环 LHV 热效率—31.4%)的联合循环电站设计进行的商业规模系统经济性的估算。数据表明,该系统的投资费用为 1245美元/kW,其中用于气化系统的为 267美元/kW,用于燃气轮机、蒸气轮机和电站其它设备的为 978美元/kW。展望美国 2010年前生物质燃料生产率可达 26000—50000MW。

(思娟 供稿)

thermobalance and under a temperature rise of  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , resulting in the identification of a variation law of coal combustion characteristics points. **Key words** thermobalance, combustion characteristic points

内循环流化床颗粒功力特性的研究 = **A Study of the Dynamic Characteristics of Inner-circulating Fluidized Bed Particles** [刊, 中] / Lu Chumei, Xu Yansheng (Shandong University of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, - 1997, 12(5). - 335- 338

This paper presents the results of an experimental study on the dynamic characteristics of particles in a V type inner-circulating fluidized bed, including the kinematic trajectory of the particle inner circulation, the distribution feature of the bed layer inner pressure and fluidization speed, etc. **Key words** inner circulation fluidized bed, dynamic characteristics, fluidization speed

高浓度煤粉燃烧过程中氮氧化物生成的研究 = **An Investigation of NO<sub>x</sub> formation Resulting from the Burning of High-concentration Pulverized Coal** [刊, 中] / Qi Hong, Fan Yaoguo, Yuan Jianwei (Huazhong University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 339- 344

NO<sub>x</sub> emissions were measured during the process of pulverized coal burning with the formation and disassociation of NO<sub>x</sub> undergoing a chemico-dynamics simulation. The simulation results show that the major cause of the significant decrease in NO<sub>x</sub> emissions during the combustion of high-concentration pulverized coal consists in a combustion deviating from the stoichiometric ratio. The disassociation action on NO<sub>x</sub> of a huge amount of CO produced under a uniform phase ignition mode can be explained as the second cause. **Key words** high-concentration pulverized coal, coal combustion, NO<sub>x</sub>, CO

立式上锅筒实际液位计算方法的探讨 = **An Exploratory Investigation of the Method for Evaluating Actual Water Levels in Vertical Steam Drums** [刊, 中] / Zou Xiang, Wang Liangyan (Guangzhou Energy Resources Research Institute under the Chinese Academy of Sciences) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 345- 347

An analysis and discussion is given of the bubbling process in the case of underwater admission of steam-water mixture. Two kinds of methods for evaluating average section volumetric quality are compared with a calculation formula given, which facilitates the computation of actual water levels. The difference between an actual water level and a weight water level is dependent on the steam drum steam output and operating pressure. In the case of a medium and low-pressure range and a constant steam output a moderate increase in operating pressure can lead to an increase in actual gravity separation height, thereby enhancing the effectiveness of natural separation. Under certain circumstances the difference between the maximum water level and an average water level should not be taken lightly or disregarded. **Key words** vertical steam drum, water level, volumetric quality, evaluation

贾汪 PFBL-CC中试电站异形煤仓设计和试验 = **Design and Test of an Irregular-shaped Coal Bin for Jiawang PFBC-CC intermediary Test Power Station** [刊, 中] / Yang Yaping (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 348- 350

With the help of Jike's design method of mass flow hopper bins some special issues in the design of hopper bins are analysed with a simplified treatment being proposed. A Study is conducted of the shape selection which can produce a mass flow in an irregular-shaped coal particle hopper bin. In addition, a model test has been conducted to verify the accuracy of the results. **Key words** coal bin, hopper bin, mass flow, slope, inner-flow valley