

# 两段燃烧流化床锅炉的设计方法

胡国新, 李艳红, 范浩杰, 刘雅琴

(上海交通大学 动力与能源工程学院, 上海 200030)

**摘要:** 一种新型两段燃烧流化床锅炉, 能实现燃气、蒸汽联产和减少有害气体的大气的排放, 特别适合于中小企业和经济发达的乡镇燃气化和集中供热。文中介绍了两段燃烧系统的运行原理和设计的要求以及气化段的热力计算方法, 建立了预测燃气成份的气化平衡模型, 并进行了计算, 计算结果与工业测试数据进行了比较, 两者符合较好。根据计算结果和理论分析, 提出了合理组织两段燃烧的有效措施。

**关键词:** 两段燃烧方法; 煤气化; 燃气蒸汽联产; 流化床

中图分类号: TK222

文献标识码: A

## 1 前言

两段燃烧流化床锅炉是一种新型节能环保设备, 它综合了煤粉燃烧和流化床气化燃烧两种燃烧方式。普通流化床燃烧可以燃烧劣质煤, 能够降低有害气体向大气的排放, 但它存在着燃烧效率低的问题, 其主要原因是固体燃料未完全燃烧, 锅炉飞灰含量高, 而且损失较大。煤粉燃烧方式炉膛空间悬浮燃烧强度高, 燃烧效率好。但劣质煤很难稳定燃烧。由于两段燃烧技术采用有效措施实现了炉内飞灰准循环, 分级低温燃烧, 有效控制了锅炉内飞灰固体热损失, 并可以大大提高脱硫剂利用率和脱硫效率, 减少  $\text{NO}_x$  生成, 降低  $\text{SO}_x$  排放量。早在 20 世纪 80 年代末, 江西工业锅炉厂就曾设计制造过一台 6 t/h 两段燃烧流化床锅炉<sup>[1]</sup>, 该设备在调试运行中气化段能基本保证正常生产煤气, 只是由于燃烧段的循环煤焦粉不能正常回料而使整机的燃烧效率有所下降。测试结果表明<sup>[2]</sup>, 该设备的  $\text{NO}_x$  排放量大大低于普通鼓泡流化床。

两段燃烧技术能实现燃气蒸汽联合生产, 可以减少有害气体向大气的排放, 在环境保护日益重视的今天, 将不断受到人们的关注。两段燃烧锅炉的气化段是整个系统的关键设备, 其气化规律是两段燃烧锅炉设计、运行的理论基础, 笔者介绍了两段燃烧系统的基本原理、设计要求和结构特点, 提出了一

种能预测气化段燃气成份的热力计算模型, 并根据理论计算结果, 指出了合理组织两段燃烧的有效措施。本文的研究结果对于两段燃烧锅炉的设计、运行具有现实的指导意义。

## 2 基本原理和气化段热力计算方法

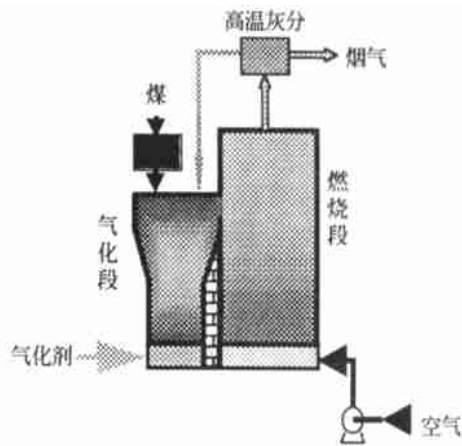


图 1 流化床两段燃烧系统示意图

图 1 是流化床两段燃烧系统图。该系统的前段为煤气化流化床, 后段为粗煤气和煤焦细粉燃烧床。在气化段和燃

烧段分别送入适量的一、二次风。煤由给料机送入气化段, 一次风经气化床布风板吹入, 使煤粒热解气化, 运行温度为  $600\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 气化剂采用空气或添加部分水蒸气, 产生的粗煤气及随气流带动的未燃尽的煤焦细粉引入到后部燃烧段, 二次风在适当的部位切向引入, 与粗煤气和煤粉进行旋风混合燃烧, 燃烧床运行温度为  $800\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 产生的含尘烟气通过高温灰分离器将煤焦热灰回送到气化段, 为气化反应提供部分热源。如将气化段产生的粗燃气引出, 并经洗涤后变成净燃气, 则可作为工业和民用燃气或送入燃气轮机燃烧发电。

文献[3]曾研究过煤气化过程热力学平衡组成的理论计算方法。在本文中针对气化段建立一种能预测燃气浓度成份的热力计算模型。控制送进气

收稿日期: 2000-09-14; 修订日期: 2000-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59806009)

作者简介: 胡国新(1963-)男, 江西进贤人, 上海交通大学副教授。

化段布风板下的 1 次空气量 ( $\alpha < 1$ ), 在流化床内实现煤的低温热解气化, 其主要的化学反应见表 1。表中  $\Phi$ 、 $\Psi$  为化学当量因子。当燃烧产物主要为  $\text{CO}_2$  时,  $\Phi$  值取 1; 当燃烧产物主要为  $\text{CO}$  时,  $\Phi$  取 2; 当同时有  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  时,  $1 < \Phi < 2$ 。根据文献资料<sup>[4]</sup>:

$$\Phi = \frac{2[A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) + 1]}{A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) + 2} \quad (1)$$

表 1 气化段反应方程式、反应生成热焓及反应焓变

反应方程式	反应标准生成热焓 / $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	标准焓变 / $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$
氧化反应(1) $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$	- 295.5	43.74
(2) $\text{C} + \frac{1}{\Phi}\text{O}_2 = (2 - \frac{2}{\Phi})\text{CO} + (\frac{2}{\Phi} - 1)\text{CO}_2$	- 393.777( $\frac{2}{\Phi} - 1$ ) - 110.804( $\frac{2}{\Phi} - 1$ )	- 173.9 $\frac{1}{\Phi} + 182.2$
还原反应(3) $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$	172.3	182.2
(4) $\text{C} + \Psi\text{H}_2\text{O} = (2 - \Psi)\text{CO} + (\Psi - 1)\text{CO}_2 + \Psi\text{H}_2$	172.5 - 41.2 $\Psi$	182.2 - 42.4 $\Psi$

煤中的硫在气化过程中有 90% ~ 95% 与氧化合生成  $\text{SO}_2$ , 反应摩尔数  $a_1$  为:

$$a_1 = 0.9 \sim 0.95 \frac{B_j S^y}{32} \quad (2)$$

物料平衡方程:  $\sum_{i=2}^4 a_i = \frac{B_j^* \cdot S^y}{32} \quad (3)$

其中  $B_j$ 、 $B_j^*$  分别为联产装置计算燃料消耗量和气化段燃料的消耗量。

化学反应平衡方程:  $\frac{[\text{CO}]_{\text{un}}^{\psi} [\text{H}_2\text{O}]_{\text{un}}^{\psi}}{[\text{H}_2]^{\psi} [\text{CO}_2]^{\psi}} = \frac{k_{p3}}{k_{p4}} \quad (4)$

其中  $k_{p3}$  和  $k_{p4}$  分别是表 1 中气化还原反应(3)、(4)的平衡常数。根据化工热力学理论<sup>[5,6]</sup>:

$$\lg k_p \approx -\frac{\Delta H_{298}^0}{19.15 T} + \frac{\Delta S_{298}^0}{19.15} \quad (5)$$

化学平衡方程式(4)中的气体量见表 2。

表 2 气化段中各种气体量

气体成份	气体产量 / $\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$
CO	$(2 - \frac{2}{\Phi})a_2 + 2a_3 + (2 - \Psi)a_4$
CO <sub>2</sub>	$(\frac{2}{\Phi} - 1)a_2 + (\Psi - 1)a_4 - a_3$
H <sub>2</sub>	$\Psi a_4$
H <sub>2</sub> O	$\frac{W + B_j w^y}{18} - \Psi a_4$
气体总量	$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + \frac{W + B_j w^y}{18}$

其中  $[\text{H}_2\text{O}]_{\text{un}}$  是未反应的水蒸气量  $\text{kg/h}$ ,  $W$  为加入气化段物料层中水蒸气的量  $\text{kg/h}$ 。

热平衡方程:  $\sum_{i=1}^4 a_i \cdot \Delta H_i + Q_{\text{rk}}^0 + Q_{\text{m}}^0 + Q_w + Q_{6h}$

对低压气化,  $A \approx 10^{2.5}$ ,  $E \approx 25 \sim 38 \text{ kJ/mol}$ ; 对高压气化,  $A \approx 10^{3.5}$ ,  $E \approx 50 \sim 80 \text{ kJ/mol}$ 。碳与水反应时, 当产物为  $\text{CO}$  和  $\text{H}_2$ ,  $\Psi$  取 1; 当产物是  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$ ,  $\Psi$  取 2; 当同时有  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  及  $\text{H}_2$ ,  $1 < \Psi < 2$ 。

气化段中的气化反应满足两个动态平衡方程, 设单位时间内表 1 中的气化反应式(2)、(3)、(4)参与反应的碳的摩尔数分别为  $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 。

$$= Q_{2\text{ft}} + Q_{6\text{mj}} + Q_{6\text{ft}}^0 + Q_{6\text{k}} + Q_{5\text{ft}} + Q_{\text{m}} \quad (6)$$

气化段送风带入的热量  $Q_{\text{rk}}^0$  ( $\text{kJ/h}$ ):

$$Q_{\text{rk}}^0 = \frac{100}{21} \left[ a_1 + \frac{a_2}{\Phi} - \frac{O^y B_j}{32} \right] I_{\text{rk}}^0 \quad (7)$$

式中  $I_{\text{rk}}^0$  是气化段理论冷空气焓 ( $\text{kJ/mol}$ );  $O^y$  是燃料应用基含氧量。

燃料煤所带入的热焓  $Q_{\text{m}}^0$  ( $\text{kJ/h}$ ):

$$Q_{\text{m}}^0 = B_j (C\theta)_{\text{m}}^0 \quad (8)$$

其中  $C_{\text{m}}$  为煤比热 ( $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ),  $\theta_{\text{m}}$  是进入气化段煤的初温 ( $^\circ\text{C}$ )。

气化段通入的水蒸气所带入的热焓  $Q_w$  ( $\text{kJ/h}$ ):

$$Q_w = W (C\theta)_w \quad (9)$$

其中  $C_w$  为水蒸气比热 ( $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ),  $\theta_w$  是进入气化段水蒸气的温度 ( $^\circ\text{C}$ )。

燃烧段循环灰带入气化段的物理热量  $Q_{6h}$  ( $\text{kJ/h}$ ):

$$Q_{6h} = B_j A^y \frac{a_h (C\theta)_h}{1 - C_h} \quad (10)$$

式中  $C_h$  是循环灰比热 ( $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ),  $\theta_h$  是循环灰温度 ( $^\circ\text{C}$ );  $a_h$  是循环灰份额, 分离效率越高, 循环灰份额越大。

气化沸腾段出口热气体带出的物理热焓  $Q_{2\text{ft}}$  ( $\text{kJ/h}$ ):

$$Q_{2\text{ft}} = \sum_{i=1}^4 a_i I_i^0 + \frac{79}{21} \left( a_1 + \frac{a_2}{\Phi} - \frac{O^y B_j}{32} \right) I_{\text{O}_2}^0 + (W + \frac{W}{18}) I_{\text{H}_2\text{O}}^0 \quad (11)$$

式中  $I_i^0$  是理论气体热焓 ( $\text{kJ/mol}$ )。

气化段出口高温煤焦所带走的物理热焓  $Q_{6mj}$  (kJ/h):

$$Q_{6mj} = (B_j - B_j^*) (C\theta)_{ft} \quad (12)$$

其中  $C_{ft}$  是煤焦比热 (kJ/(kg °C)),  $\theta_{ft}$  是气化段流化料层的温度 (°C)。

气化段出口飞灰带走的物理热焓  $Q_{6ft}^h$  (kJ/h):

$$Q_{6ft}^h = \frac{B_j^* A^v a_{fh}}{1 - C_{fh}^h} (C\theta)_{ft} \quad (13)$$

式中  $a_{fh}$  是飞灰份额,  $C_{fh}^h$  是气化段出口飞灰含碳量。

气化段冷渣带走的物理热  $Q_{6lz}$  (kJ/h):

$$Q_{6lz} = \frac{B_j^* A^v a_{lz}}{1 - C_{lz}} (C\theta)_{lz} \quad (14)$$

式中  $(C\theta)_{lz}$  是冷渣单位比热焓,  $C_{lz}$  为冷渣含碳量。

$Q_{5ft}$  是气化段炉墙散热损失;  $Q_m$  是气化段埋管受热面吸热量。

燃烧系统燃料消耗量  $B$  和 气化段燃料的消耗量  $B_j^*$  具有如下关系:

$$B_j^* = \alpha(1 - q_3 - q_4)B \quad (15)$$

其中  $q_3, q_4$  分别是系统气、固未完全燃烧损失,  $B = (1 - q_4)B_j$ ,  $\delta$  是气化段所消耗的热量比:

$$\delta = \frac{|\sum_{i=1}^4 a_i \cdot \Delta H_i| + Q_{out}}{BQ_r} \quad (16)$$

其中  $Q_{out}$  代表方程(16)右边的吸热项:

$$Q_{out} = Q_{2ft} + Q_{6mj} + Q_{6ft}^h + Q_{6lz} + Q_{5ft} + Q_m.$$

气化段稳定运行时, 床温必须大于煤热解温度  $t_2$ , 小于煤软化变形温度  $t_1$ 。联立求解质量平衡、化学平衡和热平衡方程, 即可获得气化段空气需要量、床层温度以及气化段出口煤气浓度组成及其随运行条件的变化规律。

### 3 计算结果与分析

两段燃烧系统气化段出口煤气浓度组成分布及炉内温度变化规律见图 2。由图可见, 随着气化段空气量的增大, 炉内温度增大。这是因为空气量的增大即是给入床内的氧气量增多, 因而碳与氧反应量加大, 导致放热量增大从而使温度上升。由于床层温度的增大, 气化还原反应速度加快, 这将加大氧化反应产生的  $CO_2$  的消耗量, 因而使床层二氧化碳  $CO_2$  浓度下降, 一氧化碳  $CO$  浓度上升。此外, 氢气 ( $H_2$ ) 的浓度刚开始时随空气量的增大而增大, 其后随空气量的加大而有所下降。水蒸气 ( $H_2O$ ) 随空气量的增大而下降, 这是因为温度的增大使水煤气反应速度

加快。由于煤气产量的增多, 氮气 ( $N_2$ ) 浓度有所下降。图中理论计算值与 6 t/h 两段燃烧工业锅炉气化段出口浓度成份测试数据<sup>[2]</sup> 进行了比较, 两者符合较好。

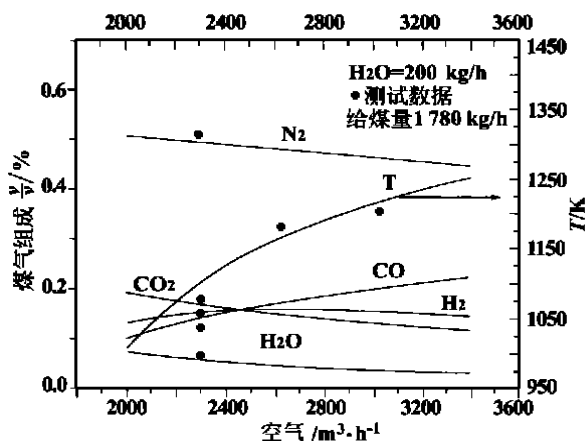


图 2 燃烧系统气化段出口煤气浓度组成分布及炉内温度变化规律

对于工业运行过程, 床温必须大于煤热解温度  $t_2$ , 小于煤软化变形温度  $t_1$ 。根据理论计算, 开大气化风量将使床温上升, 床温过大将使床层结焦。同时, 过大的风量会破坏沸腾段物料平衡, 气化段煤焦细粉飞灰损失也会大大增加。因此, 气化段的风量要保持适当。

表 3 烟煤工业分析和元素分析

工业分析	应用基 / %	元素分析	应用基 / %
固定碳 C	32.83	C	48.40
挥发份 V	17.00	H	2.10
水份	3.69	N	0.72
灰	46.48	S	0.14
低位热值 / kJ · kg <sup>-1</sup>	14 530	O	2.16

### 4 两段燃烧系统的结构特点和设计要求

由理论计算可知, 当气化段不布设埋管受热面时, 由气化段底部风板送入的气化空气量占燃烧总风量的 60% ~ 70% 左右, 要保证气化段正常的物流化状态, 布风板面积就要设计得较普通鼓泡沸腾床面要小些。对于两段燃烧锅炉我们推荐下面的关系式:  $F = (0.12 - 0.2)D^2$  (不布设埋管), 其中  $D$  为锅炉额定蒸发量, 挥发份高时  $F$  取小些, 反之取大些。

采用凹形布风板配合回字形的风室结构: 中心布风板和四周布风板分别独立送风, 利用其不等风

量、风压使流化料层的煤粒在不同的高度分层流化, 小颗粒煤被气流带出流化层大颗粒的煤可在布风板上蠕动以层燃的方式移向冷渣口, 物料的这种分层气化有利于提高气化反应转化率。

对于确定的设计煤种和气化炉结构, 增加气化空气量, 气化段料层温度上升, 气化反应速度加快, 流化料层含碳量下降。所以运行中在不致于使料层结焦的前提下, 尽量开大气化空气量; 其次空气量的下限值也受到临界工作流化风量的限制。此外, 在底部布风板下随气化空气同时送入部分水蒸气, 对产生煤气, 提高气化强度有很好的促进作用, 可参考表 4。

燃烧段的空气引入采取分级引入的原则, 一部分空气是在离气化段出口一定高度以一定速度切向喷入炉内。高强度的旋风形成的下旋流场对随气流带出的细小煤粒进行分离, 分离下来的煤粒沉降到燃烧段底部继续燃烧, 以形成炉内物料准循环, 延长煤粒在炉内的停留时间, 并使气化段出口的气固扰动强烈, 混合充分, 有力地提高燃烧悬浮段的燃烧强度和燃烧效率。

表 4 确保稳定燃烧的运行参数范围

	流化风速/ $m \cdot s^{-1}$	床温/ $^{\circ}C$	床层压降/Pa
上限	1.2	1 050	4 500
下限	0.6	600	1 500

## 5 结束语

两段燃烧炉气化料层不易结焦, 负荷调节能力大, 适用于燃烧劣质煤种, 可以不布置埋管受热面, 完全避免埋管钢材磨损。由于物料的分级低温燃烧, 这种方法可以减少  $NO_x$  生成量, 提高脱硫剂的利用率和脱硫效率, 降低  $SO_x$  排放量。

两段燃烧方法通过空气量的分级分配来调节炉内温度、气化段煤气浓度和控制飞灰份额, 以达环保要求和提高燃烧效率的目的。采用两段燃烧方法的气化沸腾层各种平衡计算可以按照本文给出的设计计算方法进行。

### 参考文献:

- [1] 胡国新. 新型两段燃烧沸腾炉设计思想[J]. 江西能源, 1992, 34(4): 12-15.
- [2] 向时义. 6 t/h 两段燃烧沸腾锅炉气化段测试报告[R]. 南昌: 江西工业锅炉厂, 1991.
- [3] 项友谦, HEDDEN K. 煤气化过程热力学平衡组成的理论计算[J]. 煤气与热力, 1986, 7(3): 4-10.
- [4] HOBBS M L, RADULOVIC P T, SMOOT L D. Modeling fixed-bed coal gasifiers[J]. *AICHE Journal*, 1992, 38(5): 681-702.
- [5] 浙江大学普通化学教研组. 普通化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981.
- [6] 寇公. 煤气化工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

( 辉 编辑 )

## 高效可靠的结冰探测传感器

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2001 年 5 月号报道, 对于在环境湿度很高并且温度低于冻结温度区域内运行的燃气轮机, 形成冰是一种经常的危险。燃机进口周围形成的冰将减少效率并可能产生冰块进入发动机的危险, 引起损坏、停机并造成经济损失。

作为对传统防冰措施的一种改进, 瑞士的 Vibro-Meter 公司的 EW140 结冰探测传感器在欧洲和美国已成功应用于航改型和大型工业燃气轮机, 用来优化燃机的性能。

EW140 使用压电晶体, 该晶体使一块膜片以其约为 70kHz 的共振频率振动。其振幅很小, 小于 1 微米。如果膜片外表面变湿或脏, 则增加了质量和阻尼, 使共振频率下降。如果开始形成冰, 加上了很小的质量, 但因为冰层是硬的, 所以共振频率增加。

探测到共振频率增加是冰开始形成的可靠信号, 这一点由测振仪测出。增加量给出了冰层厚度的很好指示。

传感器的结构便于机械安装。它隆起安装在空气速度最高的进口区域。

( 思 娟 供稿 )

基于面向对象的透平级设计优化专家系统的研究 = **A Study of the Expert System for Turbine Stage Design Optimization Based on an Object-oriented Approach** [刊, 汉] / TONG Tong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), FENG Zhen-ping (Energy and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), LUO Guo-xi (Taiyuan Fengxi Machinery Works, Taiyuan, China, Post Code: 030027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 481 ~ 483

With the help of a design method based on an object-oriented approach an expert system for turbine stage design optimization has been studied and developed. The expert system enjoys such merits as a high modularization level and favorable man-machine interface, etc. Representing a new design philosophy and approach for conducting turbine stage design the recommended system can play a significant role in promoting the further application of artificial intelligence technology in the field of turbomachinery design. **Key words:** object-oriented approach, turbine stage, optimization, expert system

两段燃烧流化床锅炉的设计方法 = **The Design method for a Fluidized Bed Boiler with Two-stage Combustion** [刊, 汉] / HU Guo-xin, LI Ya-hong, FAN Hao-jie and LIU Yan-qin (Energy and Power Engineering Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 484 ~ 487

A new type of fluidized bed boiler with two-stage combustion is designed for use in a gas and steam cogeneration plant, featuring low emissions of harmful gases. Because of this it is especially suited for gasification units and central heating plants of small and medium-sized enterprises in economically developed rural districts. The authors present the operating principles and design requirements of a two-stage combustion system as well as the thermodynamic calculation method of the relevant gasification section. A gasification equilibrium model was set up to predict the gas components with related calculations being performed. The calculation results have been found to be in fairly good agreement with industrial measurement and test data. On the basis of the calculation results and a theoretical analysis effective measures are proposed to rationally organize the two-stage combustion. **Key words:** two-stage combustion method, gasification, gas and steam cogeneration plant, fluidized bed

增压流化床燃烧用的煤水混合物流变特性研究 = **A Study on the Rheological Properties of Coal-water Paste Fired in a Pressurized Fluidized Bed Combustor** [刊, 汉] / LU Ping, ZHANG Ming-yao, XU Yue-nian (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 488 ~ 490

By way of experimental research a systematic analysis was conducted of the influence on the rheological properties of coal-water paste (CWP) of such a variety of factors as moisture content, particle distribution, addition of limestone and pipe diameter change, etc. The results of the experimental investigation indicate that the CWP will have good flowing properties at a very low moisture content ( $W_t = 22.16\%$ ) if a proper particle distribution has been selected. The addition of limestone can markedly decrease the flow resistance of CWP in pipeline and improve its transport characteristics. The data obtained from experiments show that the rheological properties of the CWP approximate those of a Bingham fluid. **Key words:** pressurized fluidized bed combustor, coal-water paste, rheological properties, experimental study

增湿活化脱硫试验研究 = **Experimental Investigation of Humidification Activated Desulfurization** [刊, 汉] / WU Shu-zhi, ZHAO Chang-sui, LIU Xian-zhuo (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 491 ~ 493

Spray water activated and steam activated desulfurization tests were conducted on a hot-state desulfurization test stand. Also investigated were the desulfurization performance under different values of Ca/S ratio, saturation approach temperature,  $SO_2$  concentration and gas speed. The results of the investigation indicate that as compared with a pure absorbent