

# PFBC 中试电站煤添加和灰排放技术

熊源泉, 沈湘林, 章名耀, 褚永华

(东南大学 洁净煤发电和燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 由于增压流化床燃烧(PFBC)技术的自身特点, 使得气力输送技术成为增压流化床燃烧技术连续稳定供料和排料的有效手段。作者考察了锅炉压力为 0.6 MPa 下, 气力输煤系统喷射器(无扩散管)气体喷嘴的位置和固气比对输送稳定性的影响, 以及在锅炉压力为 0.6 MPa 下连续气力输灰特性。试验研究发现: 输煤系统中, 物料质量流率与喷射器的几何参数关系非常密切。输灰系统在较高的固气比( $\mu \geq 3$ )下能连续稳定运行。

**关 键 词:** 增压流化床燃烧; 气力输送; 固气比

中图分类号: TM621.2 文献标识码: A

## 符号说明

$P_x$ —输送风气源绝对压力/MPa;	$T_x$ —输送风气源绝对温度/ $^{\circ}\text{C}$ ;
$X$ —流量计读数/%;	$V_g$ —气体体积流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;
$\mu$ —固气质量比;	$\mu_{\max}$ —最大固气质量比;
$M_g$ —气体质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;	$M_s$ —固体质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;
$S$ —气体喷嘴至喷射器收缩段的距离/cm;	$\alpha$ —喷射器的收缩段的角度/ $^{\circ}$ ;
	$\Delta P$ —输送管道压差/Pa。

## 1 引言

气力输送技术已广泛地应用于石油、化工、粮食、运输及电站等部门, 其设计涉及到诸多方面, 如气体速度、固体颗粒特性(包括大小、分布、密度和形状)、固气比、输送管径、结构、固体给料设备和输送方向(垂直、水平及倾斜)。自从 J. Gasterstadt<sup>[1]</sup>, G. Segler 和 K. Wagner 开始对气力输送技术研究以来, 世界各国许多学者相继对其进行了深入的研究<sup>[2-5]</sup>, 但至今气力输送系统设计依然是靠经验数据来进行。以往许多学者对气力输送技术的研究重要侧重于输送管道压力降的研究, 而对喷射器这个关键设备研究较少, 早期的文献仅有 M. Bohnet 和 U. Wagenknecht 对喷射器(带扩散管)的试验研究<sup>[6-7]</sup>和后来 S. Chellappan 和 G. Ramaiyan 对喷射器的试验研究<sup>[8]</sup>。

由于增压流化床燃烧(PFBC)技术的大力研究

和开发, 气力输送技术也成为增压流化床燃烧技术连续稳定供料和排料的有力手段, 因而, 气力输送技术在该领域中也显得尤为重要。东南大学热能工程研究所自 20 世纪 80 年代开始着手增压流化床燃烧技术的开发和研究工作以来, 相应的气力输送技术研究工作也同时积极展开, 并在气力输送试验研究方面取得了大量的可靠试验数据, 并对三种不同的喷射器进行了研究<sup>[9]</sup>。但由于试验室条件的限制, 较高背压条件下的试验数据依然缺乏。为此, 我们在 PFBC 中试电站现场(江苏省贾汪发电厂)进行了实际工况的模拟试验研究, 旨在研究较高背压条件下连续稳定的气力输送特性, 为 PFBC 中试电站连续稳定输煤、输灰提供可靠的技术保障。

## 2 实验系统

### 2.1 输煤系统

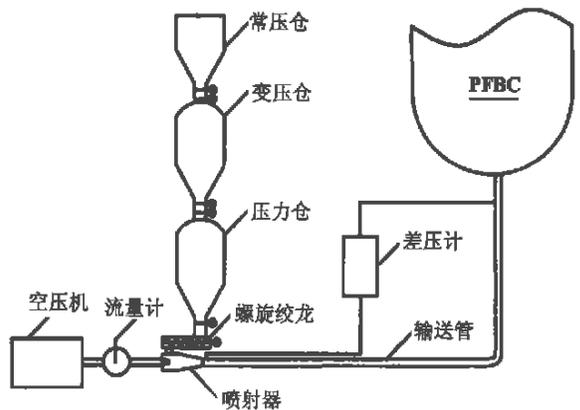


图 1 PFBC 中试电站输煤系统示意图

试验系统如图 1 所示, 主要由常压仓、变压仓、压力仓、螺旋给料机、压气机、喷射器、输送管道、差压计以及 PFBC 锅炉等组成。容积式喷射器锥形的落料斗尺寸为  $\Phi 133/\Phi 108 \times 154$  mm; 喷射器气体喷嘴尺寸为  $\Phi 8.7$  mm, 内径气体喷嘴位置可调节; 喷

收稿日期: 2001-01-19

基金项目: 国家“九五”重点攻关基金资助项目(97-226); 国家重点基础研究基金资助项目(G199902210535)

作者简介: 熊源泉(1966-)男, 江西泰和人, 东南大学讲师, 硕士。 Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

射器收缩段角度  $\alpha$  为  $30^\circ$ , 如图 2 所示(无混合管和扩散管, 这一点与其他研究者所研究的情况不同); 输送管径为  $\Phi 42 \times 5$  mm, 总输送管长 21 m。

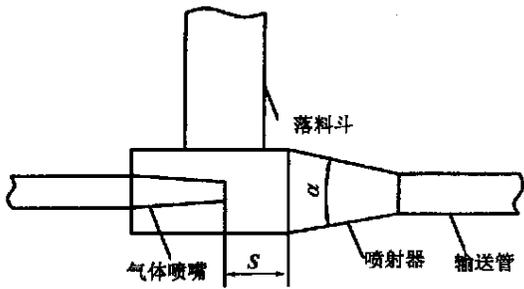


图 2 试验喷射器结构简图

试验时, 受料斗压力为表压 0.6 MPa(锅炉炉膛压力), 物料为韩桥烟煤, 煤粒粒径为 0~10 mm, 平均粒径为 1.2 mm, 真比重为  $1\ 200\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。螺旋给料机的转速为 100~500 r/min; 气源压力为 1.6 MPa(表压), 输送风温度为  $30\ ^\circ\text{C}$ 。输送风质量流量计算式用:

$$M_g = \sqrt{\frac{P_x}{1.1}} \times \frac{400}{3600} \times X\% \times 1.293\ \text{kg/s} \quad (1)$$

### 2.2 排灰系统

输灰系统简图见图 3, 主要由分离器、储灰斗、降压器、储气罐、喷射器、输送管道、差压计以及灰库等组成。喷射器的落料斗尺寸为  $\Phi 108 \times 350$  mm; 喷射器气体喷嘴尺寸为  $\Phi 30$  mm, 气体喷嘴位置可调节。输送管径为  $\Phi 108 \times 4$  mm, 总输送管长 100 m 左右, 其中有 4 个曲线弯头。

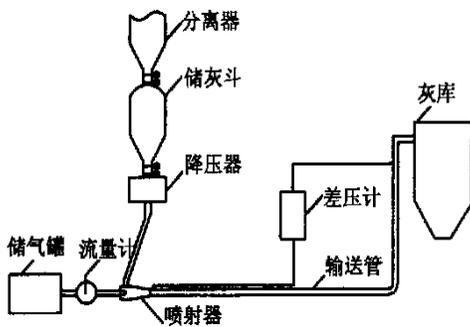


图 3 PFBC 中试电站一旋输灰系统简图

试验时, 储灰斗表压力为 0.6 MPa, 灰库为常压。灰粒平均粒径为 0.108 mm, 堆积比重为  $712\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。输送风温度为  $150\ ^\circ\text{C}$ 。输送风质量流量计算式用:

$$M_g = 1.319 \times X\% \times \sqrt{\frac{P_x}{T_x}}\ \text{kg/s} \quad (2)$$

## 3 试验结果与分析

### 3.1 气体喷嘴位置的影响

图 4 是固体质量流率  $M_s$  与气体喷嘴位置  $S$  的关系(气体体积流量  $V_g$  为  $0.099\ 56\ \text{m}^3/\text{s}$ , 背压为 0.6 MPa)。从图 4 中可看出, 固体的质量流率  $M_s$  随  $S$  的增大而增大, 但增加的趋势逐渐变小。在本喷射器试验中, 当  $S = 124$  mm, 固体质量流率达到最大值。随后, 固体质量流率随  $S$  增大而下降。这一结果与 M. Bohnet 和 S. Chellappan 所研究的文丘里喷射器的结论不尽相同<sup>[6,8]</sup>, 在质量流率的变化速率和最大质量流率位置点上都比 M. Bohnet 和 S. Chellappan 的试验结果大的多。其主要原因是喷射器的结构不同所致, 我们试验中的喷射器与文丘里喷射器结构有所不同(如图 2、图 5 所示), 喷射器无混合管和扩散管段(这是由于 PFBC 锅炉工艺要求所致)。由于从气体收缩喷嘴喷出的高速气体是狭窄的, 沿喷射器轴向方向喷射气体的扩张角较小<sup>[12]</sup>。在此过程中, 固体物料被高速气体卷吸携带, 同时动能也转换为压力能, 但其是以高能量损失为代价的, 只有少部分的动能转换成静压<sup>[10~11]</sup>。当  $S$  较小时, 高速气流与固体的混合与能量交换主要完成在收缩管段和输送水平管入口段内, 其能量损失就非常大; 而随  $S$  增大时, 高速气流与固体的混合与能量交换的位置向后移, 其能量损失相对降低, 携带固体量也就随之增大。但当  $S$  增大到一定值时, 高速气流对固体物料所产生的卷吸能力下降, 携带固体量也就随之减小。

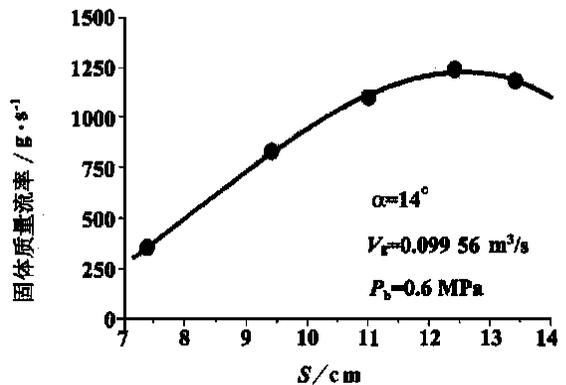


图 4 固体质量流率与气体喷嘴位置  $S$  的关系

### 3.2 固气比对压力降的影响

图 6 是输送管道压力降  $\Delta P$  与输送固气比  $\mu$  的关系。从图 6 中可看出, 在  $\alpha = 14^\circ$ ,  $S = 12.4$  cm,  $V_g = 0.100\ 18\ \text{m}^3/\text{s}$ , 背压为 0.6 MPa 时, 输送管道压力

降随输送固气比  $\mu$  的增加而增大, 但增大的趋势变小。当固气比  $\mu = 9.7$  时, 输送固体质量流率达到最大值, 稳态输送管道压力降也达到最大值; 固气比  $\mu$  再增大, 输送将进入非稳态状态, 进而导致输送管道发生噎塞现象。究其原因如下: 由于本试验乃属稀相气固输送, 依据能量理论, 输送管道的压力降主要由气体和物料对管壁摩擦和冲击以及颗粒间的相互碰撞造成的。由于物料形状的不规则以及物料粒径分布较宽, 气流在颗粒上的作用力以及颗粒间的摩擦和碰撞也各不相同。在保持输送风流量不变的情况下, 当输送物料质量固气比增大时, 致使颗粒间的相互作用以及颗粒与管壁的相互作用加剧, 输送管道压力降也随之增加。然而, 随着输送物料质量固气比增大, 喷射器内能耗相对增大, 致使固体颗粒加速后的最终速度相对降低, 颗粒间的相互作用以及颗粒与管壁的相互作用加剧程度逐渐减小, 因而输送管道压力降增大的趋势变小。当输送固体质量流率超过最大值时, 受输送风动能地限制, 且喷射器内的能量内耗增加, 使得固体颗粒被加速后的速度进一步减小, 颗粒的运动出现聚集现象, 输送产生不稳定状态。

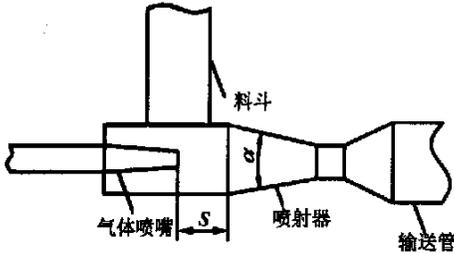


图 5 M. Bohnet 和 S. Chellappan 试验中喷射器结构简图

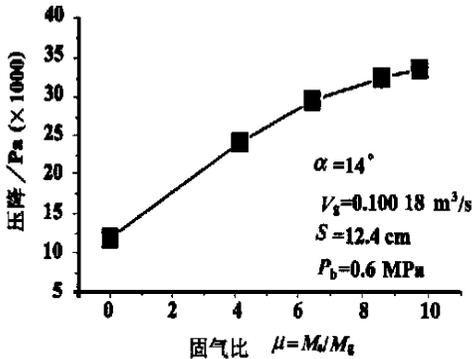


图 6 管道压力降  $\Delta P$  与固气比  $\mu$  的关系

### 3.3 输灰量对输送管道压降的影响

从图 7 可看出, 输灰管道压降随输灰量的增加近乎线性提高, 这说明连续灰输送系统已进入稳定

输送阶段。并且, 在试验条件下输灰质量固气比超过了 3, 这一结果相对于国外同类技术(输灰质量固气比小于 2)有较大地提高。一般, 该系统输灰质量固气比不高的主要原因是因为受高温、高压以及旋风除尘器性能和 PFBC 整体效率的制约。然而为获得最大输灰固气比和输送特性, 还必须获得更多的试验数据。经长时间试验发现, PFBC 一旋输灰系统能在较高的固气比下 ( $\mu \geq 3$ ), 将高温 (760 °C)、高压 (0.6 MPa) 的灰直接稳定连续运行, 并保证输灰终端温度小于 200 °C。这说明该系统完全可以应用到商业 PFBC 电站中去。

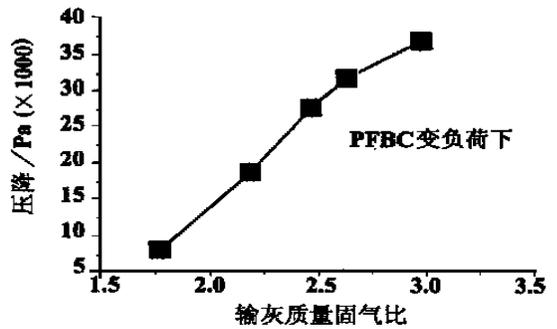


图 7 输灰管道压力降与固气比  $\mu$  的关系

## 4 结论

(1) 从本试验喷射器的研究发现, 输送物料的质量流率与喷射器的气体喷嘴的位置  $S$  的关系非常密切。

(2) 输送物料的质量流率随  $S$  的增大而增大; 当  $S = 12.4$  cm 时, 输送物料的质量流率达到最大值 ( $\mu = 9.7$ ); 而后, 输送物料的质量流率随  $S$  的增大而减小。

(3) 输送管道压差随输送固气比  $\mu$  的增加而增大, 但增大的趋势逐渐变小。当输送固气比  $\mu$  超过一定值时, 输送将进入非稳定状态, 从而导致输送管道发生噎塞现象。

(4) PFBC 一旋输灰系统能在较高的固气比下 ( $\mu \geq 3$ ), 将高温、高压的灰直接稳定连续运行, 并保证输灰终端温度不大于 200 °C。这说明该系统可以应用到商业 PFBC 电站中。

注: 文中  $m^3/s$  为标准立方米每秒。

## 参考文献:

[1] GASTERSTADT J. Die experimentelle untersuchung des pneumatischen ferdervorganges [R]. V. D. I. Forsch-Heft, 1924.

(下转第 597 页)

[5] 在研究声空化场的影响时也报道了类似的现象。它的出现可能是由下述因素综合作用的结果。一方面液体过冷度降低会使温度过头值增加<sup>[5,7~8]</sup>, 滞后现象明显; 另一方面, 纳米颗粒的添加及其浓度增加和声空化场的存在及其强度增加又会抑制沸腾滞后的出现, 且两者作用机理相同, 同时, 声空化场对传热的影响随工作液体温度增加而增强<sup>[10]</sup>。两方面因素作用的结果决定了沸腾滞后现象的出现与否。如果液体过冷度的影响占主导地位, 滞后就会发生, 相反, 传热表面就会逐渐地从单相受迫对流传热过渡到充分发展的核态沸腾传热。

尽管水平圆管的沸腾换热能力随纳米颗粒浓度的增加而略有增加, 如图 1 所示, 但是, 它总会低于相同条件下无纳米颗粒时的沸腾换热强度。这是因为纳米颗粒的添加改变了传热表面的粗糙度, 并且使之朝不利于核态沸腾发生的方向发展。另外, 由于光照射对纳米溶液的物理化学特性没有改变, 因此, 它对沸腾传热曲线没有影响。

#### 4 结论

(1) 与未添加纳米颗粒时的沸腾曲线相比, 纳米颗粒的添加会使沸腾换热能力降低。但是, 随着纳米材料浓度的增加, 沸腾换热能力略有增加;

(2) 工作介质中添加纳米材料不会改变水平圆管沸腾传热曲线随声空化场方向、强度和液体过冷

度等变化的趋势;

(3) 添加有纳米颗粒的丙酮溶液沸腾曲线随液体过冷度的降低而出现滞后现象, 而光照射对沸腾传热没有影响;

(4) 纳米材料对核沸腾传热的影响是通过降低传热表面的粗糙度进而影响其上汽泡胚胎的生成、长大及脱离来完成的。

#### 参考文献:

- [1] 马大猷, 沈壕. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] NOLTINGK B E, NEPPIRAS E A. Cavitation produced by ultrasonics [J]. *Proc Phys Soc*, 1950, 63B(9): 674—685.
- [3] 陶笃纯. 螺旋桨空化噪声谱[J]. *声学学报*, 1982, 7(6): 344—351.
- [4] 管鄂. 超声波淬火原理及其应用[A]. 1988年全国声学学术会议论文集摘要集[C]. 上海: 中国声学学会 1988, 136.
- [5] 周定伟, 刘登瀛, 马重芳, 等. 声空化场下水平圆管沸腾换热的实验研究[A]. 工程热物理学会 2001 年年会[C]. 青岛: 2001, 399—403.
- [6] 张立德. 纳米材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [7] 周定伟, 马重芳. 强润湿性液体圆形浸没射流冲击核沸腾传热的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2001, 23(增刊): 109—112.
- [8] 周定伟, 马重芳, 刘登瀛. 强润湿性液体池沸腾传热的实验研究和机理分析[J]. *热能动力工程*, 待发表.
- [9] 周定伟, 马重芳, 刘登瀛. 强润湿性液体起沸状态的实验及理论研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2001, 9(1): 1—6.
- [10] 周定伟, 刘登瀛. 声空化场强化单相对流传热的实验研究[J]. *自然科学进展*, 待发表.

(渠源 编辑)

(上接第 593 页)

- [2] BARTH W. Stromungsvorgange beim transport von festteilchen and flussigkeitsteilchen in gasen mit besonderer berucksichtigung der vorgange bei pneumatischer forderung [J]. *Chemie-Ing-Techn*, 1958, 30(3): 171—180.
- [3] DUKLER A E, WILKES M, CLEVELAND R G. Frictional pressure drop in two phase flow [J]. *AIChE J*, 1964, 10(1): 38—45.
- [4] MORIMOTO T. On the behavior of air-solids mixture in a pipe-line for pneumatic conveyance with a single or double t-branches [J]. *Bulletin of JSME* 1977, 20(143): 600—606.
- [5] SOO S L. Design of pneumatic conveying system [J]. *Journal of Powder & Bulk Techn*, 1980 4(2): 33—43.
- [6] BOHNET M, WAGENKNECHT U. Investigations on flow conditions in gas/solid-injector [J]. *Ger Chem Eng*, 1978, 1(5): 298—304.
- [7] WAGENKNECHT U. Untersuchung det stromungsverhaltnisse und des druckverlaufes in gas/ feststoff-injektoren [D]. Germany: Universität Braunschweig, 1981.

- [8] CHELLAPPAN S, RAMAIYAN G. Experimental study of design parameters of a gas-solid injector feeder [J]. *Powder Tech*, 1986, 48(2): 141—144.
- [9] YUAN YOUSHENG, JIANG LIANWU, LI FUAN. Large solid-gas ratio steady pneumatic conveyance [A]. *Proceedings of The International Symposium on Multiphase Flows* [C]. China: Hanzhou, 1987, 457—462.
- [10] KMEIC A. An analytical study of flow in gas/solids-injectors [A]. *Saint Helier, Jersey, Pneumatech 3: Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Pneumatic Conveying Technology* [C]. London: Powder Advisory Centre, 1987, 169—181.
- [11] KMIEC A, LESCHONSKI K. Analysis of two-phase flows in gas-solids injectors [J]. *Chem Eng J* 1991, 45(3): 137—147.
- [12] KMIEC A, LESCHONSKI K. Numerical calculation methods for solids injectors [J]. *Powder Tech*, 1998, 95(1): 75—78.

(渠源 编辑)

PFBC 中试电站煤添加和灰排放技术 = **Coal Feeding and Ash Discharge Technology in a PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion) Pilot Power Plant** [刊, 汉] / XIONG Yuan-quan, SHEN Xiang-lin, ZHANG Ming-yao, ZHENG Shou-zhong, et al (Education Ministry Key Lab of Clean Coal-based Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)— 591 ~ 593, 597

The specific feature of pressurized fluidized bed combustion (PFBC) technology itself has led to the pneumatic transport technology becoming an effective means of continuous and stable feeding and discharge of solids for the above-cited technology. The authors have under a boiler pressure of 0.6 MPa investigated the effect of the location of gas nozzle in a pneumatic coal transport system injector (without a diffuser tube) and solid/gas ratio on the pneumatic transport stability. Also investigated were the characteristics of continuous pneumatic transport of ash under a boiler pressure of 0.6 MPa. Through the experimental investigation it has been found that in the coal transport system the mass flow rate of materials is closely related to the geometric parameters of the injector and the ash transport system can ensure a continuous and stable operation under a relatively high solid/gas ratio ( $\mu \geq 3$ ). **Key words:** pressurized fluidized bed combustion, pneumatic transport, solid/gas ratio

声空化场下纳米颗粒对沸腾传热影响的实验研究 = **Experimental Study of the Effect of Nanometer Granule on Boiling Heat Transfer in an Acoustic Cavitation Field** [刊, 汉] / ZHOU Ding-wei, LIU Deng-ying (Institute of Engineering thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100022), MA Chong-fang (College of Environmental and Energy Engineering under the Beijing Polytechnic University, Beijing, China, Post Code: 100022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)— 594 ~ 597

With nanometer granule-added acetone serving as a working fluid an experimental study was performed for the first time to investigate the effect on the boiling heat transfer in a horizontal circular tube of a variety of factors. The factors include orientation and intensity of acoustic cavitation field, fluid subcooling degree, concentration of nanometer material and light irradiation, etc. In addition, the relevant mechanism is also analyzed. **Key words:** acoustic cavitation, nanometer granule, boiling heat transfer, hysteresis

神木煤钙基矿物高温自身脱硫特性的研究 = **A Study of High-temperature Self-desulfurization of Calcium-based Mineral in Shenmu Coal** [刊, 汉] / SONG Yu-bao, ZHANG Ming-chuan, FAN Wei-Dong, et al (Energy Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)— 598 ~ 600, 608

The generation and decomposition experiment of high-temperature desulfurization product  $\text{CaSO}_4$  on a tubular furnace indicates that at an oxidizing atmospheric condition with a temperature lower than  $1250^\circ\text{C}$  a decomposition of  $\text{CaSO}_4$  will basically not occur. A reducing gas CO can lower the decomposition temperature of  $\text{CaSO}_4$  to about  $1060^\circ\text{C}$ . The Shenmu coal combustion experiment performed on a drop tube furnace shows that the calcium-based mineral in the coal can partially remove  $\text{SO}_2$  in the flue gases. **Key words:** self-desulfurization, calcium-based mineral, drop tube furnace, reaction temperature, reducing atmosphere

燃煤固体产物中元素分布特征 = **Distribution Characteristics of Elements in Burned Coal Solid Products** [刊, 汉] / SUN Jun-ming, SUN Zhi-kuan, YAO Qiang, et al (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(6)— 601 ~ 603

Through the use of element analysis methods, such as neutron activation analysis and atomic emission spectrometry, etc an investigation is conducted of the elements distribution in typical low-calcium and high-calcium burned coal solid products. The results of the investigation indicate that sulfur-affinity element and organically bonded-state elements (As, Se,