

# 声空化场下纳米颗粒对沸腾传热影响的实验研究

周定伟<sup>1</sup>,刘登瀛<sup>1</sup>,马重芳<sup>2</sup>

(1. 中国科学院工程热物理研究所,北京 100080; 2. 北京工业大学环能学院,北京 100022)

**摘 要:**作者以添加有纳米颗粒的丙酮溶液为工质,首次通过实验系统地研究了声空化场方向及强度、液体过冷度、纳米材料浓度和光照射等对水平圆管沸腾传热的影响,对其进行了机理分析。

**关 键 词:**声空化;纳米颗粒;沸腾换热;滞后

中图分类号:TK124 文献标识码:A

## 1 引言

声空化是指向液体中辐射声波时,在一定压强下液体中出现的微小气泡随着声压的变化作脉动、振荡,或伴随有生长、收缩以致破灭的现象<sup>[1]</sup>。国内外对声空化的研究仅限于对声空化机理的认识<sup>[2]</sup>和其工程应用<sup>[3]</sup>,而对声空化过程中所存在的传热问题却被国内外传热学者忽略了。采用声空化强化传热方法与五六十年代仅依靠超声波使液体产生振动以达到强化传热的方法有重大区别。后者未涉及空化现象,仅仅是一种宏观的强化传热技术,而前者是利用超声波激活液体中的微小泡核并使之崩溃以释放出能量从而达到强化传热的目的。迄今为止,只有少数几篇文献就声空化对沸腾传热的影响进行了报道<sup>[4~5]</sup>,且均是起到了强化传热作用。

当物质颗粒尺寸小到纳米量级(为千万分之一米至十亿分之一米)时,这种物质就被称为纳米材料。由于纳米材料在磁、光、电、敏感等方面呈现出常规材料所不具备的特性,因此,在陶瓷增韧、磁性材料、电子材料和光学材料等领域有广阔的应用前景。目前,我国对纳米技术的研究工作主要集中在纳米材料的合成和制备、扫描探针显微学、纳米电子学以及少量纳米技术的应用等方面<sup>[6]</sup>,将纳米材料应用到传热领域尚未见有文献公开报道。

针对国内外鲜有声空化场下纳米颗粒对沸腾传热影响的研究现状,本文首次以添加有纳米颗粒的丙酮溶液为工质,就声空化场强度、方向(超声换能器与实验件的相对位置)、液体过冷度和光照射等因

素对水平圆管沸腾换热的影响开展实验研究。

## 2 实验设备与方法

实验系统及实验件同文献[5]。实验件安装在一个 200 mm × 200 mm × 230 mm 的不锈钢箱形容器中。温度是采用日本 Yokogawa Electric 公司生产的 7501 型可编程扫描仪和 7563 型数字测温仪联机测量。声空化是由超声电子发生器和压电超声换能器联机产生。超声电子发生器输出频率能自动跟踪,从而使超声换能器维持较佳的共振工作状态。

实验时,先将超声换能器末端插入工作液池 20 mm,调节好声空化强度,然后慢慢增加实验件的电流和电压,待系统稳定后记录实验件和液体温度及声空化强度等参数;当温度处于沸腾起始点附近时,要缓慢增加实验件功率,以壁温升高 1 为准,以便观察温度过头的现象,直至进入充分发展的核态沸腾。

热流密度  $q = UI/S$ ,  $S$  为传热面积,  $U$  和  $I$  分别为通过实验件的电压和电流。换热系数  $h = q / (T_w - T_l)$ ,  $T_w$  为壁面温度(为八根热电偶读数修正值的算术平均值),  $T_l$  为液体温度。 $q$  和  $h$  的不确定度分别小于 5.5% 和 6%。除非特别说明,超声换能器均置于实验件正上方,无声空化场时液面距实验件轴线高度为 70 mm。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 影响沸腾换热的因素

#### 3.1.1 纳米材料浓度

纳米材料浓度对水平圆管沸腾换热曲线的影响示于图 1。右斜系指超声换能器相对实验件中点向右移动 60 mm,再水平向外横向移动 40 mm。在同一过冷度( $T_{sub} = 25$  K)下,声空化强度  $I = 0.3$  A,

收稿日期:2001-07-10

基金项目:国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G2000026305)

作者简介:周定伟(1971-),男,湖南湘潭人,中科院工程热物理研究所博士后。

声空化距离  $L = 40 \text{ mm}$ , 将纳米颗粒添加到丙酮液

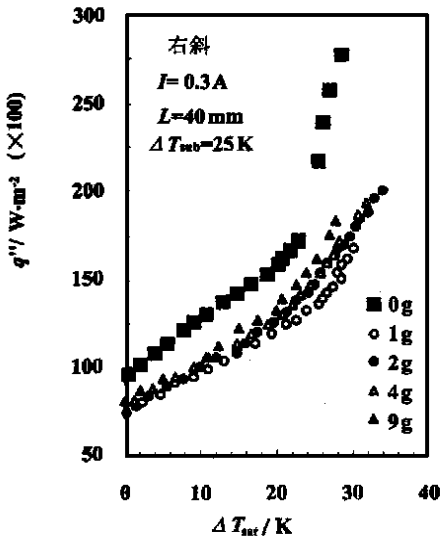


图 1 纳米浓度的影响

体中后, 不管纳米颗粒浓度如何, 相对于未添加纳米颗粒的沸腾曲线而言, 添加有纳米颗粒的水平圆管核沸腾换热曲线均向右移动, 即沸腾换热能力降低; 然而, 随着纳米材料浓度的增加, 沸腾换热能力逐渐增加, 但增值较小。由图 1 也可见到, 当纳米颗粒浓度为 1 g 时还出现了轻微的沸腾滞后现象, 其温度过头值为 1 K。

### 3.1.2 声空化方向

声空化方向是指超声换能器与实验件的相对空间位置。它对工作液添加有纳米颗粒的沸腾曲线影响示于图 2。当液体过冷度、声空化距离和声空化强度一定时, 超声换能器右斜可使沸腾曲线明显向右偏离于超声换能器正对实验件时所获得的核沸腾曲线, 即前者较之后者的换热能力大幅度降低。与文献[5]相比, 纳米颗粒的添加明显增大了声空化方向对水平圆管核沸腾换热的影响。

### 3.1.3 声空化强度

声空化强度是指超声电子发生器输出的电流强度, 用  $I$  表示。声空化强度对沸腾传热曲线的影响示于图 3。本文将池沸腾视为  $I = 0 \text{ A}$  的情形。在相同的液体过冷度、声空化距离和方向及纳米颗粒浓度下, 声空化强度的增加将使核沸腾曲线向左明显移动, 换热能力增强; 对于池沸腾而言, 出现了滞后现象, 温度过头值高达 8 K; 随着声空化强度的增加, 沸腾滞后消失。

### 3.1.4 液体过冷度

液体过冷度对沸腾换热曲线的影响是传热学界

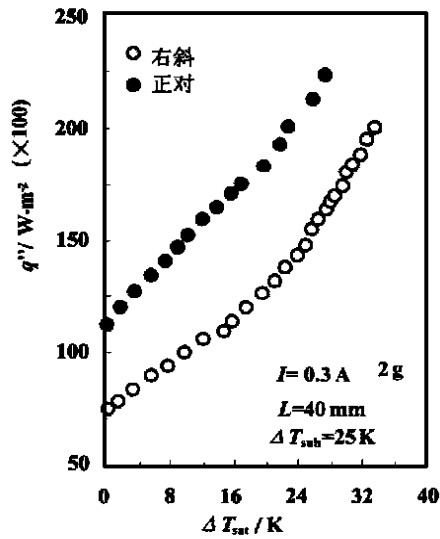


图 2 声空化方向的影响

历来就有争议的问题之一。纳米颗粒浓度为 2 g 时声空化场下水平圆管核沸腾曲线随液体过冷度的变化示于图 4(a、b)。由图 4(a) 可见, 随着液体过冷度增加, 核沸腾曲线明显向左移动, 这与液体射流冲击下液体过冷度的影响相一致<sup>[7]</sup>。当液体过冷度为 14 K 时, 添加有纳米颗粒的丙酮溶液沸腾曲线出现了滞后

现象, 温度过头值达 4 K。对于图 4(b) 以  $h \sim q$  形式给出的沸腾曲线, 随着过冷度的增加, 核沸腾曲线却会明显地向右移动。

### 3.1.5 光照射

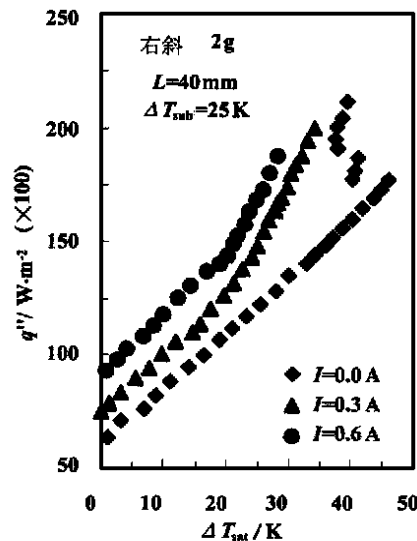


图 3 声空化强度的影响

没有人就光照射对纳米溶液沸腾曲线的影响进行过研究。本文的实验结果示于图 5。当其它实验条件一定时, 有白炽灯光照射 3 小时获得的沸腾曲线与无光照射时的沸腾曲线基本相同。这说明白炽灯光的照射对纳米

溶液的物理化学特性没有影响。

### 3.1.6 池沸腾

工作液体中有、无纳米颗粒时的池沸腾换热曲线示于图 6。当液体过冷度为 25 K 时, 2 g 纳米材料的添加使得池核沸腾曲线明显向右移动, 然而, 两者

均出现了沸腾滞后现象。随着纳米颗粒浓度的增加,沸腾起始温度、沸腾起始热流密度和温度过头值

进行了实验和机理研究。研究表明:整束空化气泡的强烈射流及单个空化气泡崩溃时产生的局部

微冲流是声空化场强化沸腾传热的主要原因,而它又是通过空化气泡的生成、合并、长大及破灭直接影响传热表面上气泡胚胎的生成、长大及脱离来完成的。

纳米颗粒的添加没有改变水平圆管沸腾曲线随声空化场方向、强度和液体过冷度等的变化趋势,但是,添加有纳米颗粒的丙酮溶液沸腾曲线却出现了一些新现象。如图 6 所示,当液体过冷度  $T_{sub} = 25\text{ K}$  时,纳米颗粒的

添加使得水平圆管表面出现两次起沸现象,且第一次起沸温度非常高。作者认为:第一次起沸是水平圆管下表面上的核化孔穴活化所为,圆管下表面沸腾时产生的气泡对上表面有冲刷作用,抑制了上表面的起沸。热流密度继续增加,壁面过热度升高到足以使传热上表面起沸(第二次起沸)后,整个传热表面才全部进入充分发展的核态沸腾传热。添加到丙酮溶液中的纳米颗粒在声空化场作用下充分乳化,其中一些纳米颗粒附着在传热表面上。由于纳米颗粒尺寸远远小于传热表面上用以起沸的核化孔穴尺寸<sup>[9]</sup>,因此,纳米颗粒的添加降低了传热表面的粗糙度,此时,热流密度只有增加到足以使比原来用以起沸的孔穴尺寸更小的孔穴活化,传热表面才开始起沸,即纳米颗粒的添加会使沸腾起始温度增加。这就是添加有纳米颗粒的丙酮溶液沸腾起始温度如此之高的缘故。

声空化场的存在及其强度增加均会抑制水平圆管沸腾滞后现象的发生,然而,如图 4(a) 所示,在同一条件下,随着液体过冷度的降低,添加有纳米颗粒的丙酮溶液沸腾曲线又重新出现了滞后现象。文献

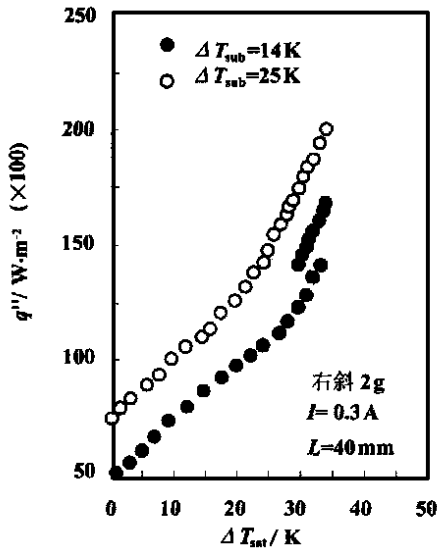


图 4(a) 液体过冷度的影响

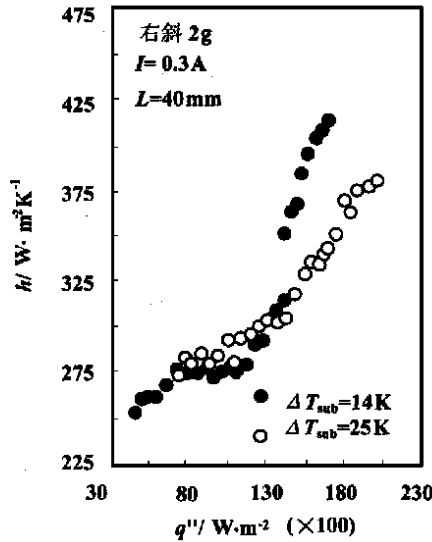


图 4(b) 液体过冷度的影响

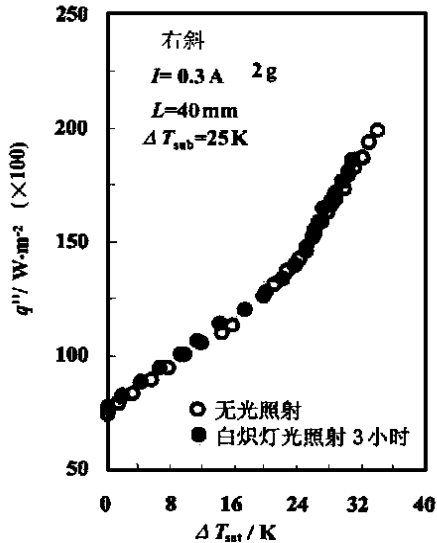


图 5 光照射对沸腾换热的影响

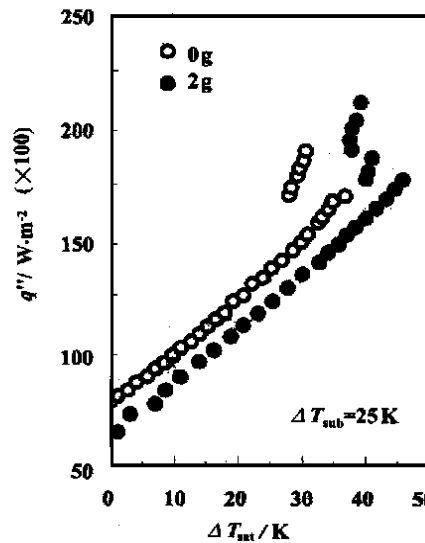


图 6 纳米颗粒对池沸腾换热的影响

均增加。对于添加有纳米颗粒的丙酮溶液沸腾曲线而言,出现了二次温度过头,即在较低热流密度下,壁面温度达到沸腾起始点后就下降,但幅值不大,仅 5.7 K;在较高热流密度下壁面温度再次下降,这次幅值为 3.6 K,之后,热流密度继续增加,直至临界热流密度。周定伟和马重芳等<sup>[8]</sup>采用强润湿性液体进行浸没冷却时报道过二次温度过头现象。

### 3.2 纳米材料影响沸腾传热的机理分析

周定伟和刘登瀛等<sup>[5]</sup>就声空化强度、方向和距离及液体过冷度等因素对水平圆管沸腾曲线的影响

进行了实验和机理研究。研究表明:整束空化气泡的强烈射流及单个空化气泡崩溃时产生的局部微冲流是声空化场强化沸腾传热的主要原因,而它又是通过空化气泡的生成、合并、长大及破灭直接影响传热表面上气泡胚胎的生成、长大及脱离来完成的。

[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气泡胚胎的生成、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] NOLTINGKB 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[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: Universitat 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, JIANGLIANWU, 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] KMEIC A, LESCHONSKI K. Analysis of two-phase flows in gas-solids injectors[J]. *Chem Eng J*, 1991, 45(3):137 - 147.
- [12] KMEIC 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 ( $\mu > 3$ ). **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 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. 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,