

# 不同粒径煤粉燃烧后一次颗粒物的特性研究

吕建雄, 李定凯

(清华大学热能动力工程与热科学重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:**以沉降炉作为燃烧设备来研究不同粒径煤粉燃烧后形成的一次颗粒物的特性。在温度 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、氧化气氛下,将不同粒径的煤粉燃烧,用安德森粒子撞击器分离并收集燃烧后的颗粒物样品。结果表明:较小粒径的煤粉燃烧产生更多的细颗粒,并产生大量的亚微米颗粒,分析认为是由产生颗粒物的途径不同所造成的。对样品做电镜扫描,结果显示:两种粒径煤粉燃烧后大小相近的产物形貌不同。通过分析,揭示了两种粒径煤粉燃烧形成颗粒物的过程。利用得到的结果,提出了煤粉环保细度的概念。

**关键词:**煤粉燃烧; 采样; 颗粒物; 形成机理

中图分类号: TK16 文献标识码: A

## 1 前言

化石燃料的燃烧是空气中可吸入颗粒物的主要来源。我国是个燃煤大国,由燃煤排放出的一次颗粒物和二次颗粒物的量是巨大的。排放到空气中的颗粒物(PM)不仅降低大气的能见度,影响气候,而且危害人体的健康,致病率和死亡率上升。而其中的可吸入颗粒物尤其是 $\text{PM}_{2.5}$ ,除尘设备对其的捕集效率是很低的,但由于这部分细粒子有较大的数量和表面积,吸附和富集了大量的重金属元素,具有更大的危害性。本文研究了两种不同粒径的煤粉燃烧后产生的颗粒物的分级特性、形貌,比较并分析了其生成机理及过程。研究结果对于获知颗粒物的形成、特性以及解决颗粒物的脱除等都有一定的帮助。

## 2 实验

### 2.1 实验煤粉的特性

实验煤粉取自保定电厂细粉分离器出口处, $R_{90}$ 为 $26.79\%$ 。煤粉工业分析的结果是:水分 $1.2\%$ ,灰分 $36.12\%$ ,挥发份 $12.34\%$ ,固定碳 $50.34\%$ ;元素分析(空干基)的结果是:C为 $47.7\%$ ,H为 $2.37\%$ ,N为 $0.79\%$ ,O+S为 $11.82\%$ 。为了研究不同粒径煤粉生成的一次颗粒物的影响,将一部分煤

粉再加工磨细到 $R_{90}$ 为 $1.88\%$ ,煤粉样品的粒径分析结果由激光粒度分析仪给出。为叙述方便,将 $R_{90}$ 为 $26.79\%$ 的煤粉称为粗煤粉;将 $R_{90}$ 为 $1.88\%$ 的煤粉称为细煤粉。

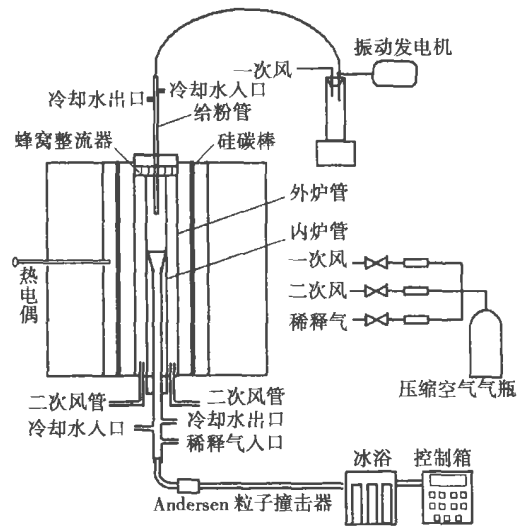


图 1 实验系统示意图

### 2.2 实验系统

实验系统如图 1 所示,包括 4 个部分:微量给粉装置、沉降炉本体、供风系统、取样系统及温控装置。套管式层流沉降炉( $D=50\text{ mm}$ , $L=1\text{ }000\text{ mm}$ )作为煤粉燃烧的设备,硅碳棒作为加热元件。煤粉在一次风作用下经微量给粉装置送入沉降炉燃烧。一、二次风供给燃烧所需的空气,炉内采用氧化性气氛,炉温 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。燃烧后的飞灰颗粒经套管式取样枪冷却,并经空气再冷却和稀释后,用 Andersen 粒子撞击器采集并分离<sup>[1]</sup>。Andersen 粒子撞击器装有预分离器,预分离后在给定实验条件下可以收集到 $13.6\text{ }\mu\text{m}$ 以下的颗粒物。

收稿日期: 2005-02-23; 修订日期: 2005-07-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2002CB211600)

作者简介: 吕建雄(1972),男,宁夏中卫人,清华大学博士研究生。

### 2.3 样品分析

煤粉燃烧后的灰颗粒样品最终被分离并收集在 9 级滤膜上。实验前, 将滤膜烘干称重。另外准备 9 个称重瓶刷洗干净, 烘干称重。采样后, 将 9 级滤膜及金属底盘上的样品分别装入不同的称重瓶中, 再烘干称重, 得到每一级上颗粒物的重量。对每一级上的样品做电镜扫描, 比较不同级之间以及不同粒径煤粉燃烧后灰样品的表现形貌。为表示方便, 根据燃烧工况和采样条件, 将分级后的颗粒物粒径表示为(a): > 9.4 μm; (b): 6.4 ~ 9.4 μm; (c): 4.3 ~ 6.4 μm; (d): 2.8 ~ 4.3 μm; (e): 1.4 ~ 2.8 μm; (f): 0.87 ~ 1.4 μm; (g): 0.59 ~ 0.87 μm; (h): 0 ~ 0.59 μm。

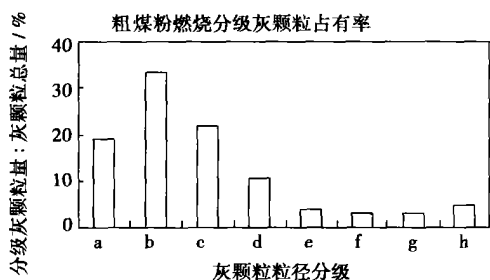


图 2 粗煤粉燃烧后灰颗粒质量一粒径分布图

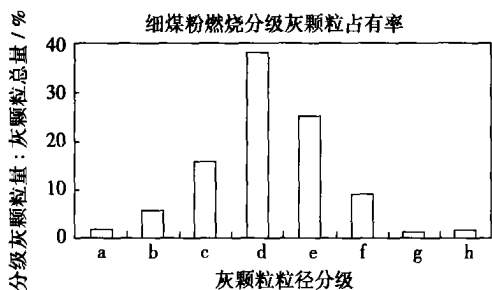


图 3 细煤粉燃烧后灰颗粒质量一粒径分布图

## 3 结果和讨论

### 3.1 粒径-质量分布分析

采样结束后, 把样品烘干称重。得到飞灰粒径与质量分布的关系, 如图 2 和图 3 所示。粗煤粉燃烧形成的一次颗粒物中, 前四级收集的灰量较后几级灰量多。3 μm 以上的颗粒物占到了总灰量的 85%, 其中 6.4 ~ 9.4 μm 的灰量最大。细煤粉燃烧后, 产生的颗粒物的分布特性与粗煤粉的不同, 形成了更多的细颗粒物, 主要的颗粒物粒径在 1.4 ~ 6.4

μm 之间。两种煤粉燃烧后的最大区别在于细煤粉形成了 0.87 ~ 1.4 μm 和 1.4 ~ 2.8 μm 两个粒径范围内大量的细颗粒, 而粗煤粉形成的此粒径范围内的细颗粒物却甚少。粒径小于 0.87 μm 的 PM, 两者的量都微乎其微。下面分析其原因。

颗粒的形成有 3 条途径<sup>[2]</sup>: 煤不完全燃烧形成的未燃尽碳; 煤粉外在矿物质和内在矿物质的转化以及煤粉中挥发性金属元素的蒸发、成核、凝结。煤粉在给定的实验条件下能够充分燃烧, 粒径对其燃烧性能影响不大。因此, 形成的 PM 中未燃尽碳的含量很少。PM 主要是由矿物质的转化和金属元素的蒸发形成。对于 1 μm 以上的超微米颗粒, 主要是由于煤粉中内部和外部矿物质的直接转化形成, 或是其在热应力和内部多孔结构中气泡的爆裂下破碎, 在破碎和聚合的共同作用下形成超微米级的颗粒。根据煤粉粒径分析的结果, 粗煤粉中 5 μm 以下的煤粉颗粒为 12.18%, 10 μm 以下的煤粉颗粒为 21.99%; 而细煤粉中 5 μm 以下的煤粉颗粒为 25.51%, 10 μm 以下的煤粉颗粒为 40.82%。说明在粗煤粉磨制为细煤粉的过程中, 更多的矿物质是以外部矿物质的形式存在, 这种外部矿物质在燃烧过程中直接转化形成 PM。同时, 也有更多的小粒径的煤粉在燃烧中破碎, 形成细的灰颗粒物。由此, 使得细煤粉燃烧后较小粒径的 PM 的相对含量较大。对于 1 μm 以下的亚微米颗粒, 是挥发性的金属元素经由蒸发、成核、凝结等机理而形成的。如果金属元素的蒸发量大, 则会形成较多的 1 μm 以下的 PM。而某金属元素的蒸发过程决定于其从煤中内在矿物质表面到焦炭粒子表面的传质过程<sup>[3]</sup>。根据蒸发速率的公式:

$$v_r = \frac{p - p_s}{1/K_l + 1/K_n + 1/K_m}$$

式中:  $p$ 、 $p_s$ —该元素的蒸汽分压和饱和压;

$K_l$ —该元素在煤粉内含物中的传质系数,  $m/s$ ;

$K_n$ —该元素在焦炭孔隙中的传质系数;

$K_m$ —该元素的外部传质系数。

$$K_l = \frac{1}{r_i} D_0 \exp\left(\frac{-E_d}{RT}\right)$$

$r_i$ —煤粉内含物的半径。

对于细煤粉来说,  $r_i$  减小, 金属元素在内含物中的传质系数增大, 蒸发速率增大, 从而产生了更多的金属元素的蒸汽。当燃烧产物冷却时, 金属元素的蒸汽在过饱和状态下成核, 形成核态粒子。核态粒子再经凝并、聚结, 形成亚微米的超细颗粒。因此,

细煤粉产物中含有相当数量的  $0.87 \sim 1.4 \mu\text{m}$  的 PM。另外, 亚微米粒子及金属元素也会通过表面反应或沉积作用而附着在超微米颗粒的表面。

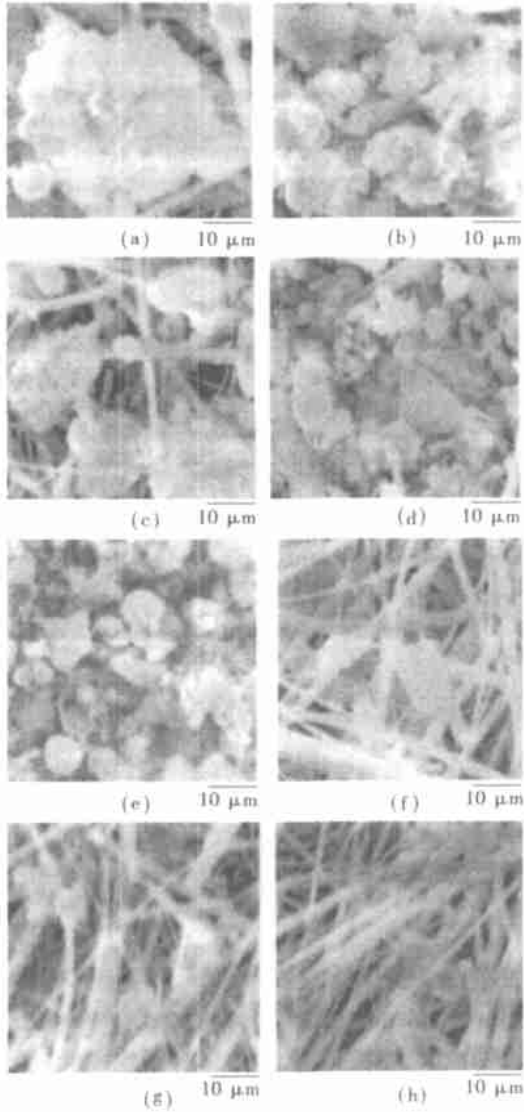


图 4 粗煤粉燃烧后灰颗粒物 SEM 图像

### 3.2 SEM 图像分析

对每一级滤膜上的样品进行电镜扫描, 得到结果如图 4 和图 5 所示。由图来看, 图 4 和图 5 中相应的(a)和(b)做比较, 图像中的颗粒个体为不规则体, 表面粗糙, 并粘附大量的细颗粒, 比较形似。两图中相应的(c)、(d)、(e)比较而言, 形貌相差较大。图 4 中的颗粒个体轮廓比较明显, 颗粒个体简单地堆积在一起, 颗粒表面较光滑, 上面沉积有细小的颗粒; 相应的图 5 中的颗粒极不规则, 在颗粒的表面粘附着大量的细颗粒物, 或由大小形状不同的细颗粒

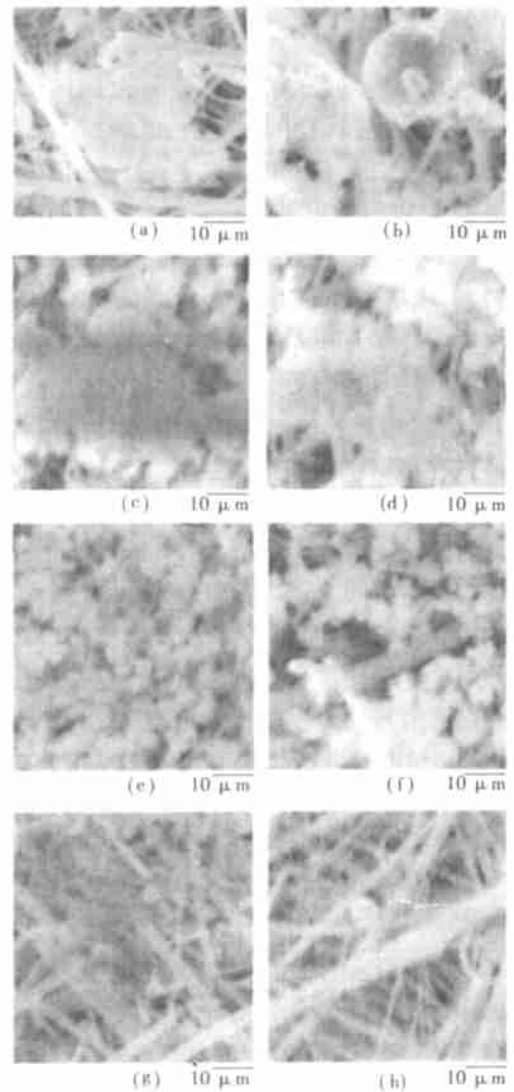


图 5 细煤粉燃烧后灰颗粒物 SEM 图像

聚结在一起形成块状的颗粒。由此进一步确定, 图 4(c)、(d)、(e)的颗粒产物的形成主要是由外部矿物质直接转化或破碎形成的; 而图 5 中相应的颗粒的生成, 一方面是金属元素的蒸汽冷凝后凝结在已有颗粒物的表面, 形成了表面凸起的颗粒物; 另一方面, 大量的小颗粒凝并聚结在一起, 形成了块状的颗粒聚团。这与前面所分析与煤粉的粒度分布有关, 细煤粉会产生更多的金属元素的蒸汽, 并且直接转化产生的细颗粒物的相对量也多, 从而形成了两种粒径煤粉燃烧后大小相近但形貌不同的产物。图 4(f)、(g)、(h)的 PM 量很少, 颗粒呈絮凝状或几个超细颗粒的结合体, 这种颗粒是由金属元素的蒸汽凝结形成的; 相应地, 图 5(f)的 PM 有凝并聚结的颗粒群, 也有表面沉积絮凝状海绵体的颗粒。由于细煤

粉提供了更多的由外在矿物质直接转化形成的细粒子,一方面互相凝并,另一方面成为蒸汽凝结的核粒子,所以产生了较多的  $0.87 \sim 1.4 \mu\text{m}$  之间的 PM。图 5 中 g、h 的 PM 与图 4 中的情况相似。

### 3.3 实验结果对工程应用的意义

$R_{90}$  是工程应用中用以衡量煤粉粗细程度的一个指标。 $R_{90}$  越小,表明煤粉越细; $R_{90}$  越大,煤粉越粗。煤粉细,燃烧速度加快,燃烧完全,机械不完全燃烧热损失比较小。但是,煤粉磨得越细,消耗的电能越多,磨煤机的出力越大,制粉系统的磨损也增大。也就是说,细煤粉的燃烧性能好,但经济性能差;相反粗煤粉经济性能好,但燃烧性能稍差。所以煤粉存在一个经济细度。

已有的研究表明,除尘设备对  $1 \mu\text{m}$  以下的细颗粒的捕集效率是很低的,而这部分粒子的来源主要是由煤燃烧中无机组分的气化和凝结形成的,而其中大部分是重金属元素。实验也证明,有毒元素易于凝结到亚微米颗粒的表面。因此,逃逸出除尘设备的颗粒物恰恰是富集有大量有毒元素的细颗粒。通过上述对实验结果的分析,我们已得出结论:细煤粉比粗煤粉产生更多的细颗粒物,并且包括有大量的  $1 \mu\text{m}$  以下的亚微米颗粒。而粗煤粉产生的亚微米颗粒量甚少。换言之,细煤粉燃烧比粗煤粉燃烧对大气环境造成的影响更恶劣。从可持续发展的角度来看,在工程应用的煤粉制备时,除了考虑煤粉的经济细度,还应当考虑煤粉的环保细度。

## 4 结 论

(上接第 508 页)

## 4 结 论

炉膛压力信号包含着丰富的燃烧状况信息,通过对压力信号的处理确实可以有效地反映气化炉内的燃烧工况。

炉膛压力在频域上的分布与火焰燃烧状况有密切的关系。点火前冷态下,没有明显的特征频率;在点火、灭火等极端不稳定燃烧工况时,压力信号在 0 Hz 处存在一个冲击现象,这个冲击现象可以用单位阶跃信号来解释,可以利用压力波的凹凸方向不同来判断是点燃还是停车;燃烧剧烈波动的特征频率介于稳定燃烧与点火(灭火)之间,约为 2 Hz;当火焰燃烧稳定时,

(1)从形成的一次颗粒物的量上来说,细煤粉燃烧比粗煤粉燃烧产生更多的细颗粒,尤其是产生了大量的亚微米颗粒。而粗煤粉燃烧形成的亚微米颗粒甚少。

(2)从形成一次颗粒物的本质上来说,细煤粉中的矿物质更多的以外部矿物质的形式存在,在燃烧过程中直接转化形成 PM。同时也有更多的小粒径的煤粉在燃烧中破碎,形成细的灰颗粒物,使得细煤粉燃烧后较小粒径的 PM 的相对含量较大。另外,煤粉粒径的减小降低了金属元素在煤粉内部的传质阻力,蒸发量增大,形成了大量的  $1 \mu\text{m}$  以下的亚微米颗粒。

(3)从形成的一次颗粒物的外观形貌来看,两者有很大的不同。主要是由二者形成的途径各异造成的。粗煤粉产生的颗粒物是由外部矿物质直接转化或破碎形成的。而细煤粉生成的颗粒,包含了蒸汽的表面凝结以及细颗粒的凝并和聚结等过程。

(4)细煤粉燃烧比粗煤粉燃烧对大气环境造成的影响更恶劣。工程应用的煤粉制备中,应考虑煤粉的环保细度。

### 参考文献:

- [1] SHEMWEIL BROOKE E, LEVENDIS YIANNIS A. Particulates generated from combustion of polymers(plastics)[J]. *Air & Waste Manage Assoc* 2000 50:94-102.
- [2] FLAGAN R G, FRIENLANDER S K. Particle formation in pulverized coal combustion a review[A]. *In Recent developments in Aerosol Science* C. D T Shaw Ed. New York: Wiley, 1978: 25-59.
- [3] SENIOR CONSTANCE L, HELBLE JOSEPH J, SAROFIM ADEL F. Emissions of mercury, trace elements, and fine particles from stationary combustion sources[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000 65/66: 262-288.

炉膛压力信号在 40 Hz 出现一个特征频率。

### 参考文献:

- [1] 于广锁,牛苗任,王亦飞,等.气流床煤气化的技术现状和发展趋势[J]. *现代化工*, 2004, 24(5): 23-26.
- [2] 高翔,骆仲决,陈亚非,等.应用微压探测诊断燃烧状况的试验研究[J]. *动力工程*, 1998, 18(4): 27-31.
- [3] 程显辰.脉动燃烧[M].北京:中国铁道出版社,1994.
- [4] 应怀樵.波形和频谱分析与随机数据处理[M].北京:中国铁路出版社,1993.
- [5] DAUBECHIES I. Ten lectures on wavelet[M]. Pennsylvania: SIAM Philadelphia, 1992.
- [6] 王一清.基于谱分析和小波交换的燃烧稳定性监测与诊断方法的研究[D].南京:东南大学,2001.

cussed. A study has revealed that the lowering of semicoke reactivity is mainly due to the semicoke crystal-lattice growth and the gradual disappearance of catalytic action of minerals during the pyrolysis process. At a temperature lower than 900 °C during the further pyrolysis of the semicoke formed by raw coal being deprived of a majority of volatile matter the crystal-lattice growth phenomenon is not very significant. However, there emerged a marked reduction of reactivity, which is mainly related to the loss of activity of minerals in coal during the pyrolysis process. **Key words:** semicoke, pyrolysis, combustion reactivity, crystal-lattice growth, catalytic action of minerals

不同粒径煤粉燃烧后一次颗粒物的特性研究 = **A Study of the Characteristics of Primary Particulate Matter after the Combustion of Pulverized Coal of Different Particulate Diameters** [刊, 汉] / LU Jian-yi, LI Ding-kai (Key Laboratory for Thermal Energy Sciences and Power Engineering under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 513 ~ 516

A sedimentation furnace was employed as a combustion device to study the characteristics of primary particulate matter formed after the burning of pulverized coal of different particulate diameters. Under an oxidizing atmosphere at 1100 °C pulverized coal of different particulate diameters was burned. With the help of an Andersen particulate striking device the particulate samples were separated and collected after combustion. It can be shown that the combustion of pulverized coal of relatively small particulate diameter can yield a greater quantity of fine particulates and produce a vast amount of sub-micron particulates. An analysis has revealed that this is caused by the different approaches whereby the particulate matter was produced. The results of the scanning of samples by an electronic microscope indicates that after the combustion of pulverized coal of two different particulate diameters the resulting products of approximately equal size may assume different appearances. Through an analysis the process of the formation of particulate matter following the burning of pulverized coal of two different particulate diameters was revealed. By utilizing the results thus obtained the authors have come up with a concept of environment-compatible pulverized coal fineness. **Key words:** pulverized coal combustion, sampling, particulate matter, formation mechanism, pulverized coal fineness

离心风机三维流场动力学特征和泄漏损失特性研究 = **A Study on the Dynamics Characteristics of the Three-dimensional Flow Field and the Leakage Loss Features of a Centrifugal Fan** [刊, 汉] / LI Chun-xi, LEI Yong, WANG Song-ling, et al (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 517 ~ 520

The study of the internal structure of a centrifugal fan to raise its operating efficiency is of major significance for achieving energy savings and cost-effectiveness enhancement at a thermal power plant. On the basis of a standard  $k-\epsilon$  turbulent model and by using software Fluent a numerical simulation and analysis was conducted of the three-dimensional flow field in a model G4-73 No. 8D centrifugal fan as well as in fans fitted respectively with vortex-prevention rings of type A and B. A study of the dynamics characteristics of the internal flow field and the clearance leakage of the fans indicate that compared with fans not being fitted with a vortex-prevention ring the flow field of fans additionally fitted with a vortex-prevention ring tends to be more uniform. With the effective crushing of large-sized vortexes the leakage loss has been drastically reduced. Moreover, in respect of large-sized vortex breakdown and the reduction of leakage losses the vortex-prevention ring of type B is markedly superior to that of type A. The research findings can serve as a theoretical basis for the energy savings-related modification of fans. **Key words:** centrifugal fan, flow field, vortex-prevention ring, leakage loss, numerical simulation

天然气炭黑燃烧特性的热天平研究 = **Thermogravimetric Study of the Combustion Characteristics of Natural-gas Soot** [刊, 汉] / XIE Guang-lu, FAN Wei-dong, XU Bin, et al (Institute of Mechanical & Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 521 ~ 526

By using a thermogravimetric analytical balance a study was conducted of the combustion performance of the soot obtained