

# 煤粒燃烧表面灰层氧气质扩散系数试验研究

朱群益, 秦裕琨, 吴少华

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 采用热分析技术, 进行了灰层空隙率对氧气扩散特性影响的试验研究, 得到了煤粒表面灰层中氧气质扩散系数的计算公式。

**关键词:** 热分析; 灰层孔隙; 氧气质扩散系数

中图分类号: O357.1 文献标识码: A

## 1 前言

我国高灰煤储量较多, 有些煤中含灰高达 50% 以上, 随着含灰量的增加, 煤粒燃烧时会在其表面形成一层灰壳。由于灰壳的存在, 煤粒内部氧浓度衰减很快, 使可燃物表面燃烧速率不断下降, 不利于煤粒的及时燃尽。一些研究者探讨了灰层孔隙结构对气体扩散特性的影响及进行了灰层中氧气质扩散系数的试验研究<sup>[1-4]</sup>, 但由于试验及分析方法的不同, 所得试验结果相差较大。本文采用热分析技术, 研究灰层中的氧气扩散特性, 以期更深入地了解高灰煤的燃尽过程。

## 2 试验装置

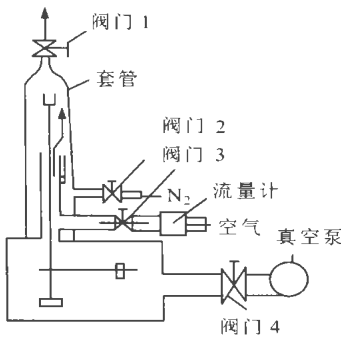


图 1 热天平简图

线)。

采用 RIKAGU 8150 型热天平, 图 1 为热天平简图, 试样支架为 TG 架, 坩埚为圆柱形, 直径为 1.0 cm, 高为 0.8 cm。试验时可同时记录试样的温度曲线 ( $T$  曲线)、重量变化曲线 ( $TG$  曲线) 及重量变化率曲线 ( $DTG$  曲线)。

## 3 理论分析

图 2 为坩埚及试样简图。可见, 试样燃烧所需的氧气经颗粒间的间隙扩散至可燃物表面。当氧气在试样层内扩散时, 显然受到两方面的影响, 一是试样堆积孔隙率大小, 二是上层试样的燃烧; 试样的燃烧给试验及数据处理带来很大的困难, 因此采用煤焦颗粒层上覆盖灰层的方法研究灰层孔隙率对下部煤焦层燃烧的影响, 以此来研究灰层中氧气扩散特性。

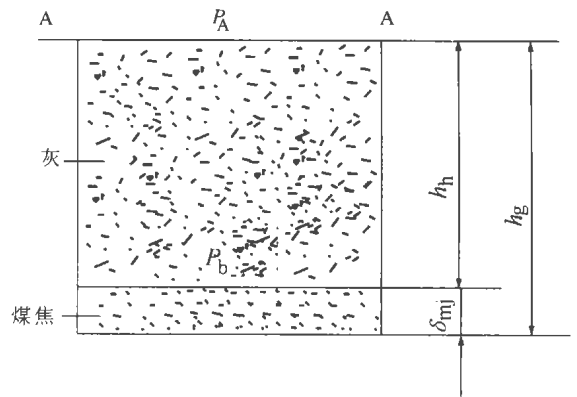


图 2 坩埚及试样简图

设氧气只能通过灰粒间的孔隙以分子扩散方式进行扩散传递, 而不能穿透灰粒进行传递, 即灰粒本身的空隙率对氧气的扩散不起作用。如图 2 所示, 灰层堆积孔隙率为:

$$\epsilon_h = 1 - \frac{G_h}{G_{h_0}} \quad (1)$$

$$G_{h_0} = \pi \cdot r^2 \cdot h_h \cdot \rho_h \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_h$ —灰层堆积空隙率;  $G_h$ —灰层重量, g;  $G_{h_0}$ —堆积空隙率为零时的灰层重量, g;  $r$ —坩埚半径, cm;  $h_h$ —灰层厚度, cm;  $\rho_h$ —灰的表现密度, g/cm<sup>3</sup>。

设高灰煤粒燃烧成灰粒后体积不变, 则:

$$\rho_h = (1 - V_{ad} - W_{ad} - FC_{ad}) \rho_{mf} \quad (3)$$

式中:  $V_{ad}$ 、 $W_{ad}$ 、 $FC_{ad}$ —工业分析的分析基挥发分、水分及固定碳份额, %;  $\rho_{mf}$ —分析基条件下煤的表观密度,  $g/cm^3$ 。

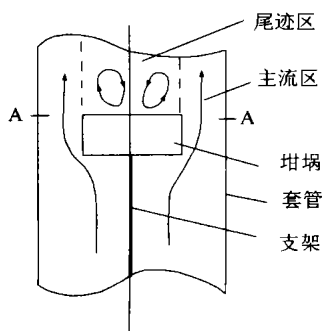


图 3 坩埚周围气体流动

如图 3 所示, 套管内的气体流动可分成两个区域, 一是坩埚出口截面附近的尾迹区, 一是坩埚周围的主流区, 尾迹区与主流区的传质既有对流传质, 又有扩散传质。当氧气传递到坩埚出口截面 A—A 时, 由于坩埚

出口存在烟气流动, 阻碍了氧气以对流传质方式进入坩埚。另外, 采用热天平研究煤的燃烧特性时, 试样一般处于堆积状态, 相当于颗粒的粒径较大, 同时燃烧过程中, 粒子周围的温度已足以使 CO 产生氧化反应, 因此, 即使煤粒表面反应产物中存在 CO, 其等效反应产物可看作为  $CO_2$ 。

由上可假设, 试样燃烧所需的氧气以扩散传质的方式经 A—A 截面传递到颗粒表面, 氧气和反应产物  $CO_2$  为等模尔逆向扩散。根据 Fick 扩散定律, 通过截面 A—A 的氧通量为:

$$m_{O_2} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{D_e \cdot M}{R \cdot T_q} \frac{dP}{dx} \quad (4)$$

式中:  $m_{O_2}$ —氧通量,  $g/s$ ;  $D_e$ —氧气在灰层中的有效质扩散系数,  $cm^2/s$ ;  $M$ —氧分子量,  $g/mol$ ;  $R$ —气体常数,  $8.31 \times 10^6 Pa \cdot cm^3 / (mol \cdot K)$ ;  $T_q$ —气体温度,  $K$ ;  $P$ —压力,  $Pa$ 。

试验时煤焦试样量较小 ( $< 6.5 mg$ ), 煤焦层厚度  $\delta_{ij} \approx 0$ 。另外, 放置灰层时灰层厚度与坩埚出口齐平, 因此灰层厚度  $h_h$  可近似取为坩埚高度  $h_g$ , 对式(3)从截面 A—A 至煤焦试样表面积分, 得:

$$m_{O_2} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{D_e \cdot M}{R \cdot T_q \cdot h_g} (P_A - P_b) \quad (5)$$

式中:  $P_A$ —截面 A—A 处氧分压,  $Pa$ ;  
 $P_b$ —煤焦试样层表面氧分压,  $Pa$ 。

设截面 A—A 以上空间中的氧气浓度分布均匀, 经推导可得:

$$P_A = P_\infty \left(1 - \frac{32}{12} \frac{q_{mj}}{M_{O_2}}\right) \quad (6)$$

式中:  $P_\infty$ —进入热天平的反应气体中的氧分压,  $Pa$ ;

$q_{mj}$ —煤焦的燃烧速率,  $g/s$ ;

$M_{O_2}$ —进入热天平的反应气体中的氧气质量流量,  $g/s$ 。

由前假设可得:

$$q_{mj} = 0.375 m_{O_2} \quad (7)$$

## 4 试验结果

### 4.1 煤焦及灰的制备

试验用煤为合山煤, 煤的分析基成分为:  $C_{ad} = 37.16\%$ ,  $H_{ad} = 1.76\%$ ,  $O_{ad} = 5.09\%$ ,  $N_{ad} = 5.07\%$ ,  $S_{ad} = 0.52\%$ ,  $W_{ad} = 1.44\%$ ,  $A_{ad} = 48.96\%$ ,  $V_{ad} = 12.58\%$ ,  $Q_{net, ad} = 14443.0 kJ/kg$ 。

制焦及制灰采用马弗炉, 操作步骤严格按测定工业分析的挥发分及灰份的方法进行。

将得到的焦样及灰样筛分, 取平均粒径,  $d_p$  为  $126 \mu m$  的煤焦及平均粒径,  $d_h$  为  $126 \mu m$  及  $63.5 \mu m$  的煤灰作为试样进行试验。

### 4.2 试验方法

试验时, 先关闭气体出口阀门 1 及气体进口阀门 2、3, 打开阀门 4, 开启真空泵, 抽去套管及天平平衡室中的空气, 此时出现增重现象, 当重量显示器读数不变时, 关闭阀门 4, 打开氮气进口阀门 2, 至平衡室中的压力恢复到大气压时, 打开阀门 1, 而后以  $100 \text{ }^\circ C/min$  的升温速度升至某一温度, 并恒温 2 min, 待重量显示器读数稳定后, 关闭阀门 2, 打开阀门 3, 将  $N_2$  切换成空气, 试样在等温条件下燃烧。

### 4.3 试验结果

在分析基条件下, 根据《煤炭化验手册》中的有关规定, 采用蜡封法测量煤样的表观密度, 经测量得合山煤的表观密度  $\rho_{mf}$  为  $1.83 g/cm^3$ 。

试验中, 每次所用的煤焦量  $G_{mj}$  相同, 而后在其上放置不同孔隙率的灰层进行燃烧试验, 灰层厚度与坩埚边缘齐平, 采用挤压灰层的方法, 改变放置的灰样重量  $G_h$ , 即可获得不同孔隙率的灰层。试验中, 进入热天平的空气流量为  $150 ml/min$ 。

试验结果如图 4 及图 5 所示, 同时进行了不放置灰样时的煤焦燃烧特性的试验, 结果如图 6 所示。

由图 4 ~ 图 6 可见, 放置灰样后煤焦燃烧时的最大失重率明显低于不放置灰煤焦燃烧时的最大失重率,

说明此时氧气在灰层中的扩散阻力占主导地位, 试样的燃烧处于灰层扩散控制, 燃烧速率取决于通过灰层中扩散的氧通量的大小, 煤焦层表面氧浓度为零, 这时能较容易地求解氧气在灰层中的质扩散系数。

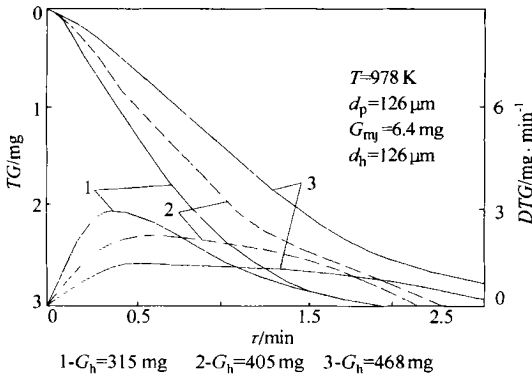


图 4 覆盖灰样时煤焦燃烧特性曲线

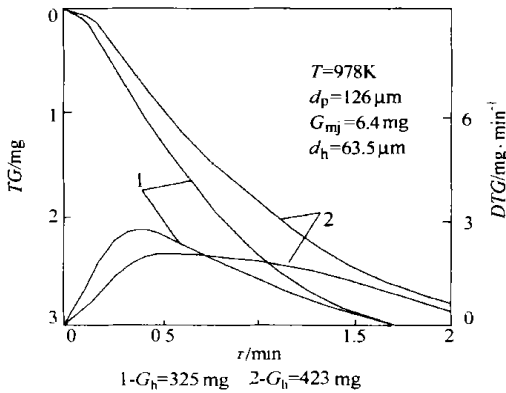


图 5 覆盖灰样时煤焦燃烧特性曲线

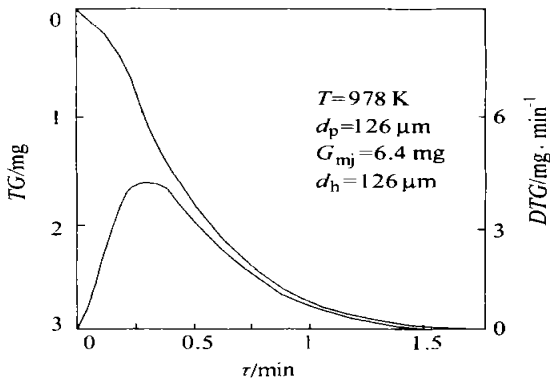


图 6 不覆盖灰样时煤焦燃烧特性曲线

联立求解式(4) ~ 式(7), 即可求得氧气在灰层中的有效质扩散系数  $D_e$ , 计算中气体温度可取为程序温度, 计算结果如图 7。

文中采用灰层曲折率来整理试验数据, 设:

$$D_e = D \frac{\epsilon_h}{\tau_w} \quad (8)$$

$$D = D_0 \left(\frac{P_0}{P}\right) \left(\frac{T_q}{T_0}\right)^{1.75} \quad (9)$$

式中:  $D$  — 氧气在气体中的质扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;  $\tau_w$  — 灰层曲折率;  $D_0$  — 温度为  $T_0$ 、压力为  $P_0$  时氧气在气体中的质扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$ 。

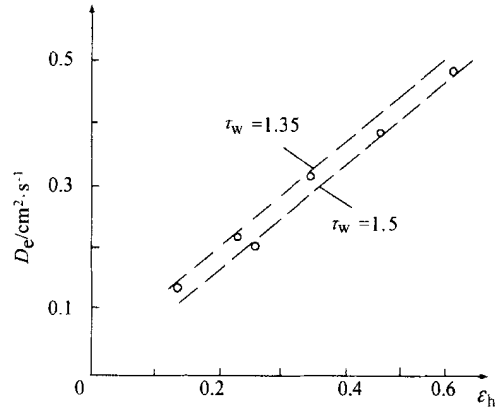


图 7  $D_e$  试验结果

由图 7 及式(1)、(2)、(3)、(8)、(9) 求得曲折率  $\tau_w$  为 1.35 ~ 1.5, 取  $\tau_w = \sqrt{2}$ ,

$$\text{最后得: } D_e = D \frac{\epsilon_h}{\sqrt{2}}$$

经计算可得,  $D_e$  只与灰层空隙率大小有关, 而与灰样粒径无关。

### 5 结语

采用热分析技术, 通过研究坩锅中试样层内的氧气扩散特性来模拟煤粒表面灰层中的氧气扩散特性是可行的, 试验得到了灰层中氧气质扩散系数的计算公式。

### 参考文献:

[1] 陈 鸿. 煤粉孔隙结构对燃烧过程的影响[J]. 化工学报, 1994, 45(3): 327-333.  
 [2] 严建华. 煤在燃烧过程中表面灰层内气体扩散传质特性的研究[R]. 北京: 中国工程热物理学会, 1993.  
 [3] 任有中. 煤粉焦炭孔洞的结构特性及其标度理论[R]. 北京: 中国工程热物理学会, 1993.  
 [4] 陈 鸿. 煤粉孔隙中有效扩散系数的研究[R]. 北京: 中国工程热物理学会, 1993

(渠 源 编辑)

生物质与煤混烧的燃烧特性研究 = **A Study of the Combustion Characteristics of Biomass and coal Mixed Firing** [刊, 汉] / LIU Hao, QIU Jian-rong, DONG Xue-wen, et al (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 451 ~ 454

With the help of an integrated thermoanalyzer of the type STA 409C the characteristics of combustion were analyzed with respect to a mixed sample consisting of one type of coal and two kinds of biomass as well as a sample of the above items mixed in different proportions. The results of this analysis show that after the adding of biomass in the coal the combustion process can be viewed as distinctly divided into two stages with an ignition being realized ahead of the designated time. Meanwhile, better burn-off characteristics were obtained. As a result of the mixing of biomass and coal there emerged an increase in heat generation rate coupled with an enhanced utilization rate of the biomass. Moreover, through an in-depth analysis of thermogravimetric and differential-scanning calorimetry curves the combustion kinetic parameters of the above-cited samples were investigated. **Key words:** biomass, coal combustion characteristics, thermal analysis

煤粒燃烧表面灰层氧气质扩散系数试验研究 = **Experimental Study of Oxygen Mass-transfer Coefficient in a Surface Ash Layer during the Burning of Pulverized Coal** [刊, 汉] / ZHU Qun-yi, QIN Yu-kun, WU Shao-hua (School of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 455 ~ 457

Through the use of a thermal analysis technique an experimental study is conducted of the effect of ash layer porosity on oxygen mass-transfer characteristics. A formula has been derived for calculating the oxygen mass-transfer coefficient in a surface ash layer during the burning of pulverized coal. **Key words:** thermal analysis, ash layer porosity, oxygen mass-transfer coefficient

煤质成分在线检测技术的最新进展 = **Recent Advances in the On-line Detection Technology of Coal Elemental Composition** [刊, 汉] / SONG Zhao-long (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), JIN Jian (Nanjing Continental Zhongdian Science & Technology Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 211100) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 458 ~ 461

The emergence of long-life and low-cost neutron tube products of electron-impulse type has played a significant role in the further advancement of a new-generation on-line analytical technology for coal elemental composition. By using the analytical technology of fast thermal neutron elements of the impulse type coupled with the application of multifarious nuclear reactions it is possible to analyze the coal elemental composition with a better accuracy. Moreover, the apparatus used also features a higher safety. After an exposition of the analytical theory of fast thermal neutron elements of the impulse type the authors describe two kinds of on-line detection system for the coal elemental composition, namely, the chute type and the belt type. **Key words:** fast neutron inelastic scattering, fast neutron capture, coal elemental composition

原煤可磨性与磨煤机最大出力探讨 = **Exploratory Investigation of Raw Coal Grindability and Coal Pulverizer Maximum Capacity** [刊, 汉] / SHEN Yue-liang (Guangdong Provincial Electric Power Testing Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510600), LIN Zhi-ning (Guangzhou Zhujiang Power Plant, Guangzhou, China, Post Code: 511458), ZHAO Xiao-feng (Guangdong Zhanjiang Power Plant, Zhanjiang, China, Post Code: 524099) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 462 ~ 464

The maximum grinding capacity test results of a model RP783 race pulverizer installed at Zhujiang Power Plant was investigated along with those of a model DTM350/700 ball mill installed at Zhanjiang Power Plant. It has been found that the grindability index of some kinds of coal does not fully reflect their actual grinding capacity. After the cause of the low