

# 采用热天平研究煤粉燃烧特性时氧通量的计算

朱群益 赵广播 阮根健 秦裕琨

(哈尔滨工业大学)

吕 微 (哈尔滨理工大学)

[摘要] 采用以热天平研究煤粉燃烧特性时通过坩埚出口截面氧通量的计算方法, 对织金煤焦燃烧特性曲线的分析计算, 得试样燃烧所需氧气以扩散传质方式经坩埚出口截面传递到试样层表面, 并对该计算方法进行了分析。试样层表面氧分压及氧通量可采用 Fick 扩散定律进行计算。

关键词 热天平 煤粉燃烧 氧通量

分类号 TQ038.4

## 0 前言

采用热天平研究煤粉燃烧特性得到了广泛的应用<sup>[1,2,3]</sup>。由图 1、2可知, 试验时试样一般处于堆积状态, 试样燃烧所需的氧气, 先经坩埚出口截面传递到试样层表面, 而后传递到试样层中间, 即颗粒周围气体环境中, 因此颗粒表面氧浓度与试样层表面氧浓度有关。

热天平的气体流动方式相对于坩埚来讲一般有三种, 从上往下, 从下往上及横向流经坩埚。本文对当气体为由下往上流动时, 通过坩埚出口截面的氧通量及试样层表面氧分压的计算进行了试验研究。

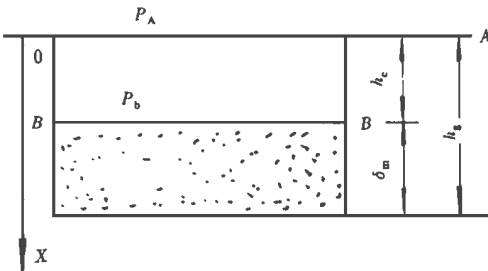


图 1 坩埚及试样简图

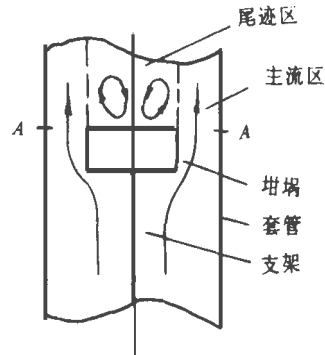


图 2 坩埚周围气体流动

## 1 试验装置及条件

本文采用 RIKAGU8150型热天平, 气体流动型式如图 3, 试样支架为 TG架, 坩埚为圆柱形, 直径为 1.0 cm, 高分别为 0.8 和 0.3 cm (以下以 H<sub>K</sub> 0.8 cm 和 H<sub>K</sub> 0.3 cm 表示)。试验时可同时记录试样的失重曲线 (TG曲线) 和失重率曲线 (DTG曲线)。

试验采用织金煤焦, 平均粒径  $d_p$  为 126 $\mu$ m。制焦采用马弗炉, 在 900 $^{\circ}$ C 下恒温 7 分钟, 原煤的成份分析为:

收稿日期 1996-08-22

本文联系人 朱群益 男 副教授 150006 哈尔滨工业大学热能工程教研室

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.>

成份	工业分析 (空气干燥基)					元素分析 (空气干燥基)				
	V <sub>ad</sub>	FC <sub>ad</sub>	W <sub>ad</sub>	A <sub>ad</sub>	Q <sub>net, ad</sub> (kJ/kg)	C <sub>ad</sub>	H <sub>ad</sub>	O <sub>ad</sub>	N <sub>ad</sub>	S <sub>ad</sub>
煤种										
织金	7.24	78.77	1.02	12.97	29214.6	77.42	2.76	2.88	1.14	1.81

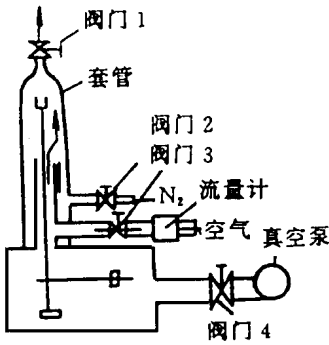


图 3 燃烧试验时气体流动型式

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;完成抽真空后,关闭阀门 4,打开氮气进口阀门 2,至天平平衡室中的压力恢复到大气压时,打开阀门 1 而后以 100°C/min 升温至 105°C,并恒温 2 分钟,以去掉试样放置过程中吸附的水份,此时焦样重量记为 G<sub>m</sub> mg;再以 300°C/min 升温至某一终温 T<sub>0</sub> K,恒温 1 分钟后,关闭阀门 2,打开阀门 3,将 N<sub>2</sub> 切换成空气,试样在等温条件下燃烧

## 2 理论分析

如图 2,套管内气体流动分成两个区域,一是坩埚出口附近的尾迹区,一是坩埚周围的主流区。试样燃烧产生的烟气向上流动,此时可将坩埚出口截面 A-A 作为一个喷口,形成环状射流;尾迹区与主流区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。

试验时,试样处于堆积状态,相当于颗粒的粒径较大,同时燃烧过程中,粒子周围的温度足以使 CO 产生氧化,因此,等效反应产物可看作为 CO<sub>2</sub>。

假设试样燃烧所需的氧气以扩散传质的方式经坩埚出口截面传递到试样层表面,氧气与反应产物

为等模尔逆向扩散。根据 Fick 扩散定律,通过截面 A-A 的氧量为<sup>[4]</sup>:

$$m_{O_2} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{D \cdot M}{R \cdot T_g} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

$$D = D_0 \left( \frac{P_0}{P} \right) \left( \frac{T_m}{T_0} \right)^{1.75} \quad (2)$$

$$T_m = (T_p + T_g) / 2 \quad (3)$$

式中 m<sub>O<sub>2</sub></sub>——氧通量, g/s;

r——坩埚半径, cm;

D——氧气质扩散系数, cm<sup>2</sup>/s;

M——氧分子量, g/mol;

R——气体常数, 8.31 J/mol·K;

T<sub>g</sub>——气体温度, K;

P——压力, MPa;

D<sub>0</sub>——温度为 T<sub>0</sub>, 压力为 P<sub>0</sub> 时氧气质扩散系数; cm<sup>2</sup>/s;

T<sub>p</sub>——颗粒温度, K;

T<sub>m</sub>——气体和颗粒温度的平均值, 计算时,

T<sub>m</sub> 可取为程序温度。

对式 (1) 从截面 A-A 至试样层表面积分, 得:

$$m_{O_2} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{D \cdot M}{R \cdot T_g} \cdot \frac{P_A - P_b}{h_c} \quad (4)$$

$$h_c = h_g \cdot W_m \quad (5)$$

式中 P<sub>A</sub>, P<sub>b</sub>——截面 A-A 及试样层表面氧分压, MPa;

h<sub>c</sub>——截面 A-A 至试样层表面高度, cm;

h<sub>g</sub>——坩埚高度, cm;

W<sub>m</sub>——试样层厚度, cm,

$$W_m = G_m / k \cdot (r^2 \cdot d_i) \quad (6)$$

$$d_i = d_{mj} (1 - X) \quad (7)$$

式中 G<sub>m</sub>——试样量, mg;

d<sub>i</sub>——试样堆积密度, kg/m<sup>3</sup>;

d<sub>mj</sub>——煤焦表观密度, kg/m<sup>3</sup>;

X——堆积空隙率。

装填试样时, 试样一般处于自然堆积状态, X 可取为 0.45

假设煤粒热解前后粒径不变, 则:

$$d_{mj} = d_m (1 - V_{ad} - W_{ad}) \quad (8)$$

式中  $\rho_m$ ——空气干燥基条件下的煤的表现密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$V_{ad}, W_{ad}$ ——空气干燥基挥发分及水份。

试验求得织金煤的  $d_m$  为  $1386 \text{ kg}/\text{m}^3$

### 3 试验结果

图 4 为坩埚尺寸  $H \times 0.8 \text{ cm}$ , 空气流量  $150 \text{ ml}/\text{min}$  时的试验结果。可见, 当试样量大于  $12.5 \text{ mg}$  时, 随着试样量及燃烧终温的增加, 失重率曲线 ( $DTG$ ) 的峰值变化较小, 这是由于通过截面 A-A 的氧量已不能满足燃烧的需要, 燃烧处于扩散控制, 氧通量大小决定了试样的燃烧速度。此时试样层表面氧分压为零。

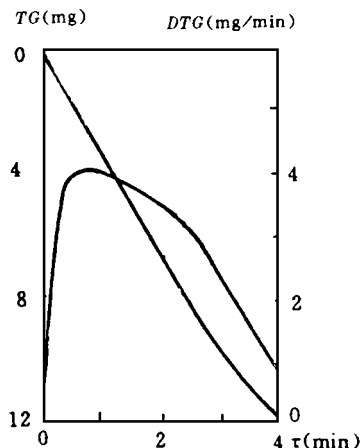


图 5 试验结果

坩埚  $H \times 0.3 \text{ cm}, d_p = 126 \mu\text{m}$

$T_{\infty} = 1183 \text{ K}, G_{mj} = 17.5 \text{ mg}$

以上空间中的氧浓度大

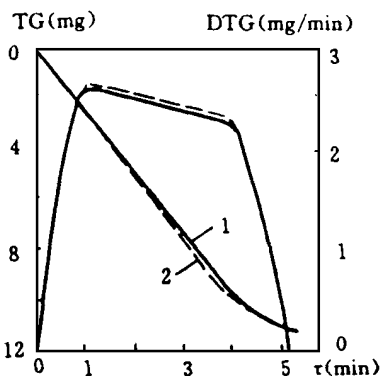


图 6 气体流量的影响

坩埚  $H \times 0.8 \text{ cm}, d_p = 126 \mu\text{m}$  1-  $T_{\infty} = 1373 \text{ K}$ ,

$G_{mj} = 17.5 \text{ mg}, 150 \text{ ml}/\text{min}$  2-  $T_{\infty} = 1373 \text{ K}$ ,

$G_{mj} = 17.5 \text{ mg}, 250 \text{ ml}/\text{min}$

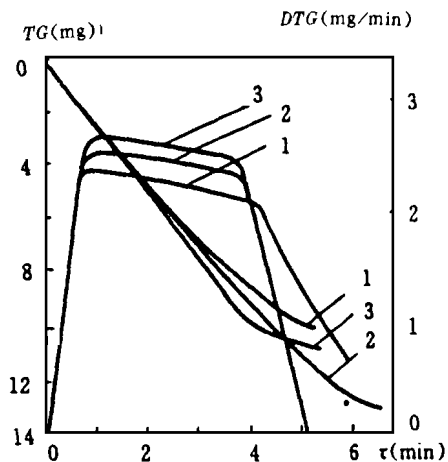


图 4 试验结果

坩埚  $H \times 0.8 \text{ cm}, d_p = 126 \mu\text{m}$  1-  $T_{\infty} = 1088 \text{ K}$ ,

$G_{mj} = 12.5 \text{ mg}$  2-  $T_{\infty} = 1188 \text{ K}, G_{mj} = 17.5 \text{ mg}$

3-  $T_{\infty} = 1373 \text{ K}, G_{mj} = 13.5 \text{ mg}$

图 5 为坩埚尺寸  $H \times 0.3 \text{ cm}$ , 空气流量  $150 \text{ ml}/\text{min}$  时的试验结果, 由图 4 图 5 可见, 在相同试验条件下,  $DTG$  曲线峰值增加, 燃尽时间有所缩短, 这是由于随着坩埚高度  $h_g$  减小, 由式 (4) 可知, 经截面 A-A 的氧通量增加, 燃烧速度增加。

图 6 为不同空气流量下的试验结果。可见, 随着气体流量的增加, 燃烧速度有所增加。这是由于气体流量大, 在试样燃烧消耗相同氧量时, 坩埚出口截面

### 4 氧通量计算

设坩埚出口截面以上空间中的各处氧分压相同。由于试样燃烧需要消耗一定的氧气, 因此坩埚出口截面以上空间中的氧分压不等于来流氧分压, 两

者可用下式关联:

$$P_A = P_{\infty} \left( 1 - \frac{32 q}{12 W_{O_2}} \right) \quad (9)$$

式中  $P_{\infty}$  —— 来流氧分压 MPa;

$W_{O_2}$  —— 来流中氧气的质量流量, g/s;

$q$  —— 试样燃烧速度, g/s.

同时:

$$q = 12^\circ H^\circ m_{O_2} / M \quad (10)$$

由前假设可知, 反应机理因子  $H$  可取为 1.0

当反应处于扩散控制时, 试样层表面氧分压可取为零, 此时通过坩埚出口截面的氧通量最大。由式 (4) (9) (10) 得最大氧通量  $m_{O_2, \max}$  及相应的最大试样燃烧速度  $q_{\max}$  为:

$$m_{O_2, \max} = \pi^\circ r^2 \frac{D^\circ M}{R^\circ T^\circ h_c} P_A \quad (11)$$

$$q_{\max} = 12^\circ m_{O_2, \max} / M \quad (12)$$

当气体流量为 150 ml/min 时,  $W_{O_2}$  为  $7.4 \times 10^4$  g/s,  $P_{\infty}$  为 0.021 MPa, 联立求解式 (9)~ 式 (12) 得:

$$T_{\infty} = 1088 \text{ K}, m_{O_2, \max} = 0.9 \times 10^{-4} \text{ g/s},$$

$$q_{\max} = 3.4 \times 10^{-5} \text{ g/s}$$

$$T_{\infty} = 1188 \text{ K}, m_{O_2, \max} = 0.96 \times 10^{-4} \text{ g/s},$$

$$q_{\max} = 3.6 \times 10^{-5} \text{ g/s}$$

$$T_{\infty} = 1373 \text{ K}, m_{O_2, \max} = 1.06 \times 10^{-4} \text{ g/s},$$

$$q_{\max} = 4.0 \times 10^{-5} \text{ g/s}$$

当气体流量为 250 ml/min 时, 计算步骤同上, 得:

$$T_{\infty} = 1373 \text{ K}, m_{O_2, \max} = 1.12 \times 10^{-4} \text{ g/s}, q_{\max} = 4.2 \times 10^{-5} \text{ g/s}$$

可见计算所得的  $q_{\max}$  值与图 4 图 6 中对应的 DTG 曲线上的峰值一致, 说明上面关于氧通量计算是可行的, 有关假设是合理的。

实际应用中, 有时需要求取试样层表面氧分压  $P_b$ , 联立求解式 (4)、式 (9)、(10), 即可求得试样燃烧过程中表面氧分压的变化。

## 参考文献

- 1 刘文珍. 煤的热重分析初探. 热力发电, 1982, (5)
- 2 陈建原. 煤的挥发分释放特性指数及燃烧特性指数的确定. 动力工程, 1987, (5)
- 3 Tognotti L et al. Measurement of ignition temperature of coal particles using a thermogravimetric technique. Combust. Sci. and Technol. Vol. 44, 1985
- 4 威尔特 JR 等. 动量、热量、质量传递原理. 国防工业出版社, 1984

(渠源 编辑)

## 能源开发

# 可重复利用能源的开发

据“Modern Power Systems”1996年10号报道, 中国正在增加使用其可重复使用的能源, 致力于向边远地区供应电力。

在80年代后期, 由外国公司安装了7个太阳能电池生产线, 形成年生产4.5 MW 电池的生产能力。这些电池主要用于偏僻和边远地区。

中国已在西藏建设了4个太阳能光伏电站, 每个发电容量在10 kW 和 20 kW 之间。另外5个太阳能光伏电站正在建设中。

在东北和东南, 中国已建成14个风力农场, 同时在内蒙古、新疆和青海正运行着150 000多个小型风力发电机。这些发电机总的装机容量为47 MW。

正在大量生产1—20 kW 容量的风力涡轮发电机, 同时正在研制50—200 kW 容量的风力涡轮发电机。

也正在开发地热能。位于西藏的中国最大的地热发电站装机容量为25 MW。该电站提供西藏自治区拉萨电力需要的50%。正运行着容量接近6 MW 的潮水力发电站, 并且一座试验性的海岸波浪发电站正在建造中。

(思娟 供稿)

power, steam turbine, real-time simulation

采用热天平研究煤粉燃烧特性时氧通量的计算 = **The Calculation of Oxygen Flux During the Study of Pulverized Coal Combustion Characteristics with the Help of a Thermobalance** [刊,中] /Zhu Qunyi, Zhao Guangbo, et al ( Harbin Institute of Technology ), Lu Wei ( Harbin University of Science & Technology ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12( 6): 438~ 441

Described in this paper is the method of calculating the oxygen flux through a crucible outlet section during the study of pulverized coal combustion characteristics with the use of a thermobalance. Through the analysis and calculation of combustion characteristic curves of Zhi Jin coke it is found that the oxygen needed for the combustion of a sample was transferred to the sample layer surface in a diffusion mass transfer manner through the crucible outlet section. The oxygen partial pressure and oxygen flux on the sample layer surface can be determined by the use of Fick's diffusion law. **Key words** thermobalance, pulverized coal combustion, oxygen flux

电厂锅炉锅筒寿命计算 = **The Calculation of the Boiler Drum Life of a Utility Boiler** [刊,中] /Wang Yunmin ( Changsha Electric Power Institute ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12( 6): 442 ~ 444

On the basis of an analysis of fatigue-caused life loss during the operation a boiler drum this paper presents a method for calculating the fatigue life of a boiler drum taking into account its wall temperature distribution, thermal stress cycle, mechanical stress and cycle stress amplitude, etc. With the boiler of Huaibeï Power Station being taken as an example calculated is the fatigue life of the boiler drum. **Key words** boiler drum, temperature field, stress, fatigue life

锅筒式蒸汽锅炉水处理工艺设计计算 = **Calculation of the Water Treatment Technological Design of a Drum Type Steam Boiler** [刊,中] /Kuang Pingjian ( Boiler & Pressure Vessel Inspection Institute Under the Harbin Municipal Labor Bureau ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12( 6): 445~ 447

With some specific examples a fairly detailed description is given of the method for calculating the water treatment technological design of a steam boiler. Through the organic integration of the boiler and the relevant calculations of the water treatment the demineralized water quantity required by the boiler is determined on the basis of the boiler parameters, operating conditions and water quality data. Finally, the various performance parameters of the water treatment equipment are identified. Such an approach makes it possible to eliminate the inconveniences of the feedwater treatment design method when only calculation formulas are given and the demineralized water quantity required by the boiler is assumed to be a known quantity. In conclusion, the method of designing regeneration equipment is also presented, thus further improving the water treatment technological design. **Key words** boiler water treatment, ion exchanger, drum type steam boiler

鳍片分离式浓淡燃烧器的开发与应用 = **The Development and Application of Fin-separation Type Dense-dilute Burners** [刊,中] /Miao Changxin, Li Kai, Li Jiansheng ( Shandong Electric Power Scientific Research & Test Institute ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12( 6): 448~ 451

It is possible to improve combustion stability by properly increasing the concentration of pulverized coal. On the basis of an experimental study a versatile, low-resistance and high-efficiency fin-separation type dense-dilute burner has been developed. By bringing the pulverized coal concentration to an optimum value to facilitate