

成型压力和炉膛温度对单颗粒型煤燃烧失重特性的影响

董 蒋雪辉, 赵广播

(哈尔滨工业大学 能源学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 利用热重分析方法对单颗粒型煤的燃烧失重特性进行了研究, 得到了成型压力和炉膛温度对单颗粒型煤燃烧失重特性影响的规律, 并结合理论分析得出反映此影响规律的数学模型。

关键词: 型煤; 燃烧; 热重分析

中图分类号: TQ543.2 文献标识码: A

1 引言

型煤是适合我国国情值得推广的一项洁净煤技术, 但由于对其燃烧特性与原煤燃烧特性的差异缺乏认识, 在使用型煤过程中, 往往出现接火困难、火焰短和黑渣等现象, 导致锅炉出力不足, 限制了型煤的推广使用。基于上述情况, 采用热重法, 分别对不同成型压力、不同炉膛温度下的单颗粒型煤燃烧失重特性进行实验研究, 并结合理论分析得出反映成型压力、炉膛温度对单颗粒型煤燃烧失重特性的影响规律。为工业型煤的推广应用提供理论和实验依据。

2 实验装置及方法

在燃料的燃烧特性研究上通常采用热天平进行热重实验, 但是普通商用热天平的最大称重量为 1 g, 而单颗粒工业用型煤一般都在 8 g 左右, 远远超出商用热天平的称重范围, 为此采用专门设计的实验台进行实验研究。

实验装置如图 1 所示。

用来产生高温以模拟炉膛的设备是圆柱型电炉, 其内径 250 mm, 高 500 mm, 外部包覆保温层, 额定功率 9 kW, 最高工作温度 1 100 °C, 温度由温控仪来控制, 保证上下温差不超过 10 °C, 并可以对炉温实施程序控制, 如: 实施阶段性加热、保温和线性加热等。

型煤的失重由电子天平来称量。电子天平放置在电炉外部, 其最大称重量是 600 g, 精度 0.01 g。

支撑件用不锈钢制成, 为减轻重量, 采用中空结构, 为防止实验中出现扰动, 支撑件采用了一个较重的底座, 整个支撑件重

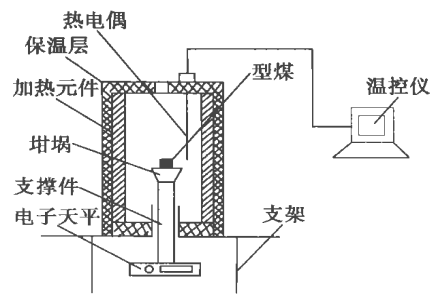


图 1 试验台简图

263 g, 实验用坩埚重 20~30 g, 实验用单颗粒型煤重 7.5 g 左右, 总重量在电子天平的称重范围内。

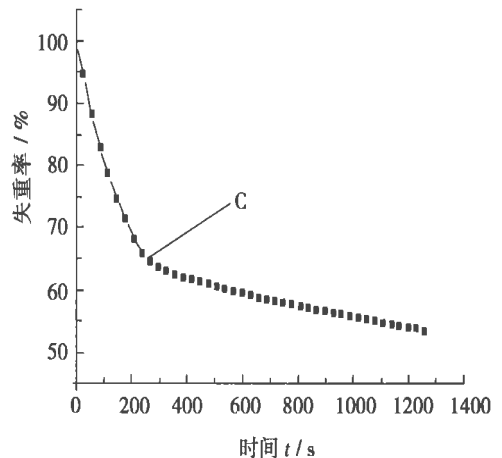


图 2 燃烧失重曲线

为减少由于强制通风吹走型煤燃烧时产生的飞灰, 影响失重数据测量, 实验采用自然通风的方式。为减少水分对单颗粒型煤热解的影响, 实验前, 将单颗粒型煤试样在 150 °C 下烘烤 45 min, 除去水分。实验时, 先将电炉加热到预定温度, 保温, 然后将单颗粒型煤迅速放入电炉中, 测定其失重情况, 记录失重曲线, 如图 2 所示。

实验所用的单颗粒型煤是采用小型实验用型煤

成型机分别以 50MPa、100MPa、150 MPa 的成型压力将煤粉压制成直径 20 mm、重量 7.5 g 的圆柱形型煤,其工业分析值见表 1。

表 1 两种型煤的工业分析值(空气干燥基)(%)

	内在水分	挥发分	灰分	固定碳
煤种一	3.78	35.29	24.17	36.76
煤种二	2.39	26.54	25.66	45.41

3 实验结果及分析

图 3 是在不同成型压力下成型的单颗粒型煤在不同炉膛温度条件下的燃烧失重曲线;图 4 是在相同成型压力下成型的单颗粒型煤在不同的炉膛温度下的燃烧失重曲线。由图可见,单颗粒型煤失重实验曲线有一个明显的拐点,可将其作为单颗粒型煤失重曲线的分界点,通过实验观察,在分界点之前,主要是挥发分燃烧造成的失重,这时,亮黄色的火焰包围在型煤颗粒周围,型煤颗粒呈暗黑色,型煤外形无明显的变化。分界点后,主要是焦炭燃烧造成的失重,这时,整个型煤颗粒呈红色,在型煤周围形成一层白色的灰,由于型煤制造过程中成型压力形成的预紧力,灰并不散落,而是包裹在型煤的外面,形成一个灰壳,相对于挥发分的燃烧过程,这一过程进行的十分缓慢。

由图 3 和图 4 还可看出,在不同的条件下,单颗粒型煤的燃烧失重情况是不同的。成型压力越大,失重越慢,这是由于成型压力越大,对于相同重量、相同颗粒度的煤粉来说,外表面积越小,同时煤粉颗粒间的空隙也越小,相互间接触的面积越大,从而使单颗粒型煤的内表面积减少,导致氧气和焦炭之间的接触面积减少,化学反应速度变慢;炉膛温度越高,失重越快,根据阿累乌斯反应动力学理论,温度对反应速率的影响很大,化学反应速率与温度呈指数关系,因此,温度的变化对化学反应的影响是极为强烈的。

此外,由图 3 和图 4 可以看出,成型压力和炉膛温度对单颗粒型煤燃烧失重的影响是不同的,相对于成型压力,炉膛温度对单颗粒型煤燃烧失重的影响较大,这一点在分界点附近特别明显。成型压力为 50 MPa 的型煤,炉膛温度为 1000 K 和 900 K 时相比,失重率最大相差 9.18%;在 1100 K 时,和炉膛温度为 900 K 时相比,失重率最大相差 15.96%。炉膛温度为 1000 K、成型压力为 100 MPa 的型煤,和成型压力为 150 MPa 的型煤相比,失重率最大相差

1.61%;成型压力为 50 MPa 的型煤,和成型压力为 150 MPa 的型煤相比,失重率最大相差 3.37%。

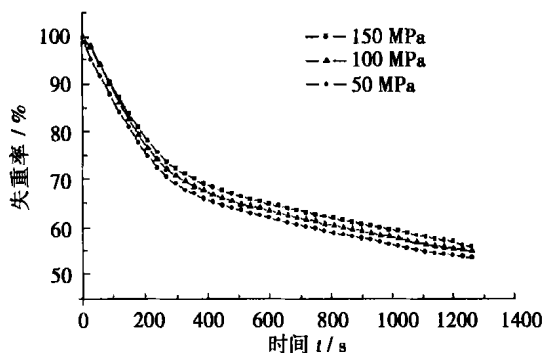


图 3 型煤燃烧失重曲线(炉膛温度 1000 K)

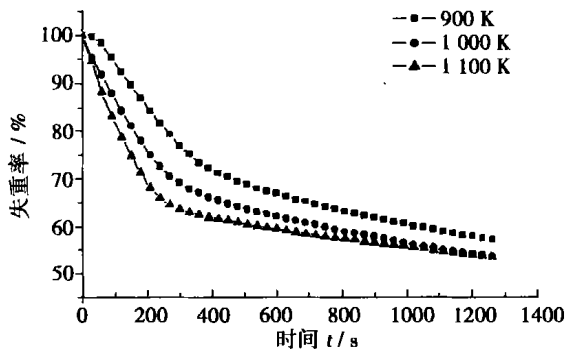


图 4 型煤燃烧失重曲线(成型压力 50MPa)

4 单颗粒型煤燃烧失重的简化数学模型

单颗粒型煤的燃烧失重过程可以用下面的过程来描述:

- (1) 单颗粒型煤受热;
- (2) 挥发分析出;
- (3) 单颗粒型煤形成多孔结构的焦炭;
- (4) 挥发分在单颗粒型煤的内部和外表面与氧气发生反应,放出热量;
- (5) 单颗粒型煤内表面和外表面温度升高;
- (6) 温度达到焦炭的着火点,焦炭开始燃烧;
- (7) 燃烧生成的灰渣在焦炭周围形成灰壳,直到单颗粒型煤燃尽。

许多学者提出过煤粒的燃烧模型^[1~2],但是都比较复杂,需要测量大量的参数,而且煤粒的质量都比较小。本文采用一个比较简单的燃烧模型来描述单颗粒型煤的燃烧失重过程。

首先假定单颗粒型煤为一非均相表面反应,根

据文献 [3], 反应速率为:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{A_p V_s C_{Og} M_p}{\frac{1}{k_r} + \frac{1}{k_m}} \quad (1)$$

m — 单颗粒型煤的质量, g;

t — 某一时刻, s;

k_r — 非均相反应速率常数, m/s;

A_p — 单颗粒型煤的外表面积, m²;

V_s — 每一摩尔氧化剂生成产物气摩尔数的化学当量系数;

C_{Og} — 远处气相中氧化剂的摩尔浓度, mol/m³;

M_p — 单颗粒型煤中反应物的分子量, g/mol;

k_m — 氧化剂扩散系数, m/s.

将方程两边同除以单颗粒型煤的初始质量 m_0 ,

并令:

$$D = \frac{V_s C_{Og} M_p}{\frac{1}{k_r \beta_p} + \frac{1}{k_m}} \quad (2)$$

有:

$$\frac{da}{dt} = \frac{A_p D}{m_0} \quad (3)$$

式中: a — 单颗粒型煤的失重率.

将式(3)积分, 就可得到单颗粒型煤的失重率.

可将单颗粒型煤的失重过程分为两个阶段: 第一阶段, 也就是图 2 中分界点 C 前面的阶段. 这一阶段, 主要是挥发分析出并燃烧占主要部分的阶段, 根据试验观察, 单颗粒型煤的外表面积基本不变, 于是式(3)中只剩下 D 是和时间有关的量, 为积分方便, 可取一平均值 D_m 来代替这一阶段的 D_0 于是单颗粒型煤的失重率为:

$$\alpha = \frac{A_p D_m (t - t_0)}{m_0} \quad (4)$$

式中: t_0 — 单颗粒型煤开始失重时刻(s).

在单颗粒型煤失重分界点之后, 型煤的外表面积发生变化, 可作进一步的简化, 令:

$$U = \frac{A_p D_m}{m_0} \quad (5)$$

采用同样的方法, 取一平均系数 U_m 来代替这一阶段的 U , 单颗粒型煤的失重率可表示为:

$$\alpha = U_m (t - t_c) \quad (6)$$

式中: t_c — 单颗粒型煤失重分界点时刻(s)

而失重分界点时刻:

$$t_c = \frac{\alpha_c m_0}{A_p D_m} \quad (7)$$

式中: α_c — 分界点处单颗粒型煤的失重率.

于是就有:

$$\alpha = U_m \left(t - \frac{\alpha_c m_0}{A_p D_m} \right) \quad (8)$$

通过以上的简化, 就可得到一简单的单颗粒型煤的燃烧失重模型, 只有测出 5 个参数就可以得到单颗粒型煤的失重率, 即单颗粒型煤的初始外表面积 A_p 、初始质量 m_0 、 D_m 、 U_m 、 α_c , 其中单颗粒型煤的初始外表面积 A_p 、初始质量 m_0 可由测量得到, α_c 是和单颗粒型煤的挥发分有关的量, 挥发分的析出量是和加热温度值有关的量^[4], 对于不同的炉膛温度可用挥发分的工业分析值(空气干燥基)乘以一个系数来确定 α_c 的值. 通过实验数据, 建议 900 K 时取挥发分工业分析值的 70%, 1 000 K 取 85%, 1 100 K 取 93%, D_m 和 U_m 值由实验测得.

5 实验结果与计算结果的比较

首先对煤种一用本模型计算, 求出了炉膛温度分别为 1 000 K 和 1 100 K, 以及成型压力分别为 50 MPa、100 MPa、150 MPa 下的 D_m 和 U_m 值, 具体数值见表 2. 利用表 2 中的值, 对煤种二进行了计算. 计算结果和实验结果的比较见图 5 ~ 图 10.

表 2 D_m 和 U_m 的取值

温度 / K	成型压力 / MPa	$D_m / g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	$U_m / 1 \cdot s^{-1}$
1 000	50	3.82	1.45×10^{-4}
	100	3.71	1.43×10^{-4}
	150	3.66	1.42×10^{-4}
1 100	50	5.14	0.98×10^{-4}
	100	5.03	0.97×10^{-4}
	150	4.96	0.97×10^{-4}

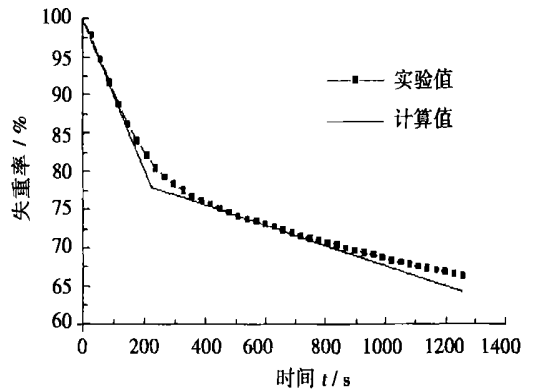


图 5 煤种二 50 MPa 型煤 1 000 K 燃烧失重曲线

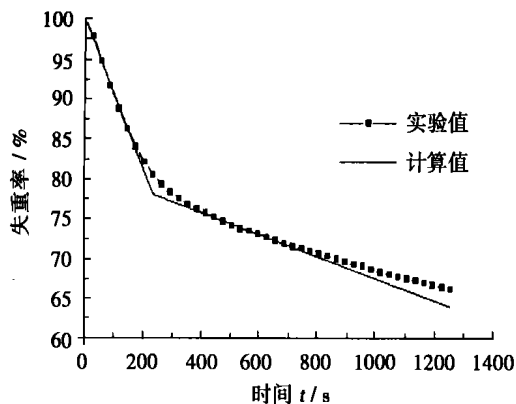


图6 煤种二 100 MPa 型煤 1000 K 燃烧失重曲线

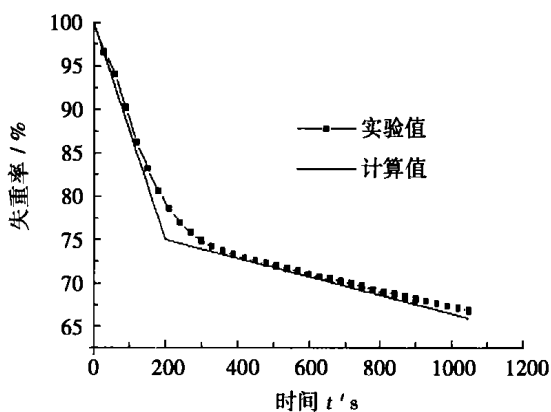


图9 煤种二 100 MPa 型煤 1000 K 燃烧失重曲线

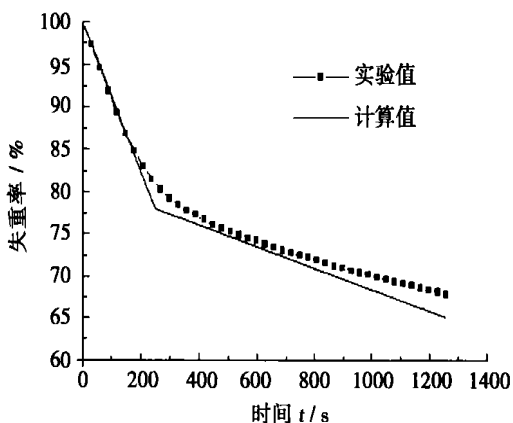


图7 煤种二 150 MPa 型煤 1000 K 燃烧失重曲线

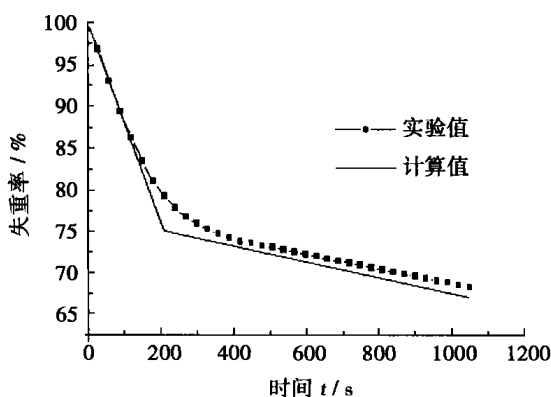


图10 煤种二 150 MPa 型煤 1100 K 燃烧失重曲线

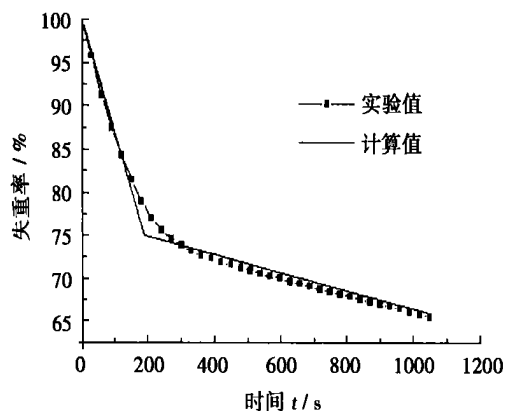


图8 煤种二 50 MPa 型煤 1100 K 燃烧失重曲线

6 结论

成型压力和炉膛温度对单颗粒型煤的燃烧都有影响。成型压力越小、炉膛温度越高、单颗粒型煤的

燃烧失重速度越快。与成型压力相比，炉膛温度对单颗粒型煤燃烧失重的影响更加显著。本文提出了单颗粒型煤燃烧失重数学模型，采用本数学模型计算出的数值结果与实验结果相当接近，这表明可以采用本数学模型分析成型压力和炉膛温度对单颗粒型煤燃烧失重特性的影响进行理论分析。

参考文献:

- [1] 周力行. 淮南烟煤粒燃烧的初步研究[J]. 工程热物理学报, 1984, 5(5): 396—401.
- [2] ZAJDILIK R. Experiment and modeling investigation of single coal particle combustion[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56: 1355—1361.
- [3] 斯穆特 L D, 史密斯 P J. 煤的燃烧与气化[M]. 北京: 科学出版社 1992.
- [4] 傅维镡. 燃烧物理学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.

(何静芳 编辑)

surface the equivalent orientation emission rate in the zenith angle direction will increase. **Key words:** radiation heat transfer, Monte Carlo method, tube, equivalent orientation emission

分级燃烧对固体吸附剂吸附痕量金属的影响= **The Impact of Graded Combustion on the Adsorption of Trace Metals by Solid Adsorbents** [刊, 汉] / HAN Jun, XU Ming-hou, ZENG Han-cai, 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. — 2004, 19(1). — 52 ~ 55, 58

An experimental investigation was carried out in an one-dimensional pulverized-coal furnace to study the impact of graded combustion on the control by adsorbents of the emission of heavy metals. Through the investigation it was found that the graded combustion would increase the concentration of heavy metals in sub-micron particles, which is unfavorable for the control of trace heavy metals. This influence is especially significant in the case of highly volatile elements, such as copper and nickel. Solid adsorbents play an adsorption role with respect to the emission of heavy metals present in coal. Moreover, the adsorbents have a selective tendency in the adsorption of different heavy metals. In conclusion, the authors have expounded the mechanism of adsorption of heavy metal elements by the adsorbents. Such a mechanism is realized through both a physical and chemical adsorption, which coexist during a adsorption process. **Key words:** trace heavy metal, graded combustion, adsorbent, coal combustion

催化重整反应对柴油掺水燃烧中着火的影响= **The Influence of a Catalytic Reforming Reaction on the Ignition of Diesel Oil Mixed with Water** [刊, 汉] / WANG Chao, GONG Jing-song, FU Wei-biao (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 56 ~ 58

The impact of a catalytic reforming reaction on the ignition temperature was investigated during the firing of diesel oil mixed with water. The focus of the investigation is on the change of ignition temperature when the catalytic reforming reaction takes place or not. From the results of experiments it can be seen that the catalytic reforming reaction has a significant influence on the ignition of emulsified diesel oil and can markedly reduce the ignition temperature. A detailed description is given of the experimental devices, test process and results along with circumstantial explanations and analyses. It is concluded that the catalytic reforming reaction can lower the ignition temperature of the emulsified diesel oil. Furthermore, two conditions essential for the implementation of catalytic reforming are also put forward. **Key words:** emulsified diesel oil, catalysis, reforming reaction, ignition

成型压力和炉膛温度对单颗粒型煤燃烧失重特性的影响= **The Impact of Forming Pressure and Furnace Temperature on the Weight-loss Characteristics of Single-particle Briquette Combustion** [刊, 汉] / DONG Peng, JIANG Xue-hui, ZHAO Guang-bo (College of Energy under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 59 ~ 62

By making use of a thermogravimetric analysis method the weight-loss characteristics of single-particle briquette combustion were investigated. As a result, the laws governing the impact of forming pressure and furnace temperature on the weight-loss characteristics of single-particle briquette combustion have been deduced. In combination with a theoretical analysis a mathematical model was set up, which can reflect the mechanism of this influence. **Key words:** briquette, combustion, thermogravimetric analysis

蜂窝陶瓷蓄热体格孔壁面应力变化特性的数值研究= **Numerical Study of the Stress Variation Characteristics at the Cellular-hole Wall-surface of a Honeycomb Ceramic Regenerator** [刊, 汉] / OU Jian-ping, JIANG Shao-jian, XIAO Ze-qiang (Institute of Energy & Power Engineering under the Zhongnan University, Changsha, China, Post Code: 410083), WU Chuang-zhi (Guangzhou Energy Source Research Institute under the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China, Post Code: 510070) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(1). — 63