

飞灰循环流化床悬浮段颗粒的燃烧模型

陈晓平 孙恩召 庞丽君 陈崇枢 秦裕琨

(哈尔滨工业大学)

〔摘要〕 在流化床锅炉中,悬浮段不仅可以作为传热区段,而且也有燃烧作用。以往的资料中,对于其燃烧的计算比较粗糙,本文考虑到悬浮段具体情况建立了数学模型,进行了数值计算。实验证明,理论计算与实验结果吻合较好。

关键词 悬浮段 颗粒燃烧 数学模型 流化床

由于扬析和夹带的原因,床层中的部分细颗粒被携带出床层进入悬浮段。其中,终端速度大于气流速度的颗粒在上升到一定高度后开始下降,最后返回床内,而终端速度小于气流速度的颗粒则将被气流携带出悬浮段。在悬浮段,由于气体和固体颗粒接触较好,所以很有利于 SO_2 和 NO_x 的吸收反应。同时,在床层未燃尽的挥发份和 CO 也将在这区域得到较充分的燃烧。另外,悬浮段对扬析和夹带颗粒的充分燃烧也有一定作用。特别是采用飞灰再燃技术后,悬浮段的颗粒浓度和温度水平都有一定的提高,增加了悬浮段的固体燃烧份额。

对悬浮段颗粒的燃烧,一般学者都侧重于颗粒运动规律的研究,对颗粒的温度的处理则较为粗糙;或假设颗粒的温度为一定值,或直接采用实测值,或采用分段方法。本文在建立悬浮段颗粒的运动方程和能量方程的基础上较为详细地计算了颗粒在悬浮段的燃烧。

1 悬浮段颗粒运动方程的建立

本文在建立颗粒的运动方程时,考虑了重力、流体阻力、浮力和“反动力”这四个因素。对作用于颗粒的其它一些力,如Basset加速度力、视质量力、Magnus横向力等,由于当气固间密度差较大时,这些力很小,所以本文不予考虑。

1.1 颗粒受到的重力 F_g

$$F_g = 1/6\pi d_p^3 \rho_p g \quad (1)$$

式中, d_p —颗粒直径, ρ_p —颗粒密度。

1.2 颗粒受到的流动阻力 F_d

$$F_d = 1/8 C_D \pi d_p^2 (u_p - u_g) |u_p - u_g| \rho_g \quad (2)$$

式中, u_p —颗粒速度, u_g —气流速度, ρ_g —气体密度,

C_D —阻力系数, $C_D = C_{DS} \times \beta$

其中, β —颗粒形状系数,对细灰粒,通过实验,取 $\beta = 3.08$, C_{DS} 取决于不同粒径的雷诺数 $Re \cdot p$

收稿日期 1992-06-01 修改定稿 1992-10-28

本文联系人 孙恩召 男 56 副教授 150006 哈尔滨工业大学动力系

当 $Re \cdot p < 0.4$ 时, $C_{DS} = 24/Re \cdot p$

当 $0.4 < Re \cdot p < 500$ 时, $C_{DS} = \frac{10}{Re \cdot p^{0.5}}$

当 $Re \cdot p > 500$ 时, $C_{DS} = 0.43$

1.3 颗粒受到的浮力 F_b

$$F_b = \pi/6 d_p^3 \cdot \rho_g \cdot g \quad (3)$$

1.4 颗粒受到的“反应力” F_r

由于颗粒与气流间存在相对运动,颗粒迎风面的氧浓度将高于背风面的氧浓度。由于氧浓度的不同,颗粒迎风面和背风面的反应速度将有所差别,燃烧反应生成的气体的逸出速度也将不同,于是产生“反应力”。

$$F_r = (2X - 1)u - u_p |u_p - u_g| / |u_p - u_g| dm/dt \quad (4)$$

式中, X —参数 $X = 0.5(1 - \cos\theta)$; θ —火焰分离角, $\theta = 83 + 0.49\sqrt{Re p}$;

dm/dt —颗粒的质量变化速度,也即燃烧速度;

u —燃烧反应生成气体的逸出速度, $u = \frac{1.866 dm/dt}{\pi d_p^2}$

根据牛顿第二运动定律

$$\pi/6 d_p^3 \rho_p \frac{du_p}{dt} = F_g + F_d + F_b + F_r$$

由于 $u_p = \frac{dh}{dt}$, h —高度,则 $dt = \frac{dh}{u_p}$

代入前式,经整理,得出颗粒的运动方程:

$$\frac{du_p}{dh} = \frac{\rho_g - \rho_p}{\rho_p u_p} g - 3/4 \frac{C_D \rho_g (u_p - u_g) |u_p - u_g|}{d_p u_p \rho_g} + 6 \frac{dm/dt |2X - 1| u - u_p |u_g - u_p|}{\pi d_p^3 \rho_p u_p |u_p - u_g|} \quad (5)$$

2 颗粒的能量方程

2.1 颗粒的燃烧放热量 Q_c

$$Q_c = 32866 \times 10^3 dm/dt \quad (6)$$

式中, 32866×10^3 为 1kg 碳完全燃烧后的放热量。

2.2 颗粒与气流间的对流传热 Q_d

$$Q_d = \pi d_p^2 a_d (T_g - T_p) \quad (7)$$

式中, T_g —气体温度, T_p —颗粒温度

a_d —对流传热系数, $a_d = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_p}$

Nu —气体的努谢尔特准则

λ —气体的导热系数

2.3 颗粒本身辐射出的能量 Q_{out}

$$Q_{out} = \pi d_p^2 a \sigma \epsilon_p T_p^4 \quad (8)$$

式中, σ — 波尔兹曼常数,

ϵ_p — 颗粒表面的黑度, 取 $\epsilon_p = 0.82$

2.4 周围气体、壁面和床层表面对颗粒的辐射传热 Q_{hy}

$$Q_{hy} = \pi d_p^2 \frac{\sigma a_h T_g^4 + (1 - a_h) \sigma \rho T_b^4 + (1 - \rho)(1 - a_h) \sigma a_w X T_w^4}{1 - (1 - \rho)(1 - a_h)(1 - X a_w)} \epsilon_p \quad (9)$$

式中, a_h, a_w — 含灰烟气、壁面的黑度,

T_b, T_w — 床层和壁面的温度,

ρ — 床层表面积与壁面面积之比,

X — 壁面水冷度

2.5 颗粒本身能量的改变 Q_m

$$Q_m = 1/6 \pi d_p^3 \rho_p C_p \frac{dT_p}{dt}$$

式中, C_p 为颗粒的比热, 取 $C_p = 1.3 \text{ kJ/kg} \cdot \text{k}$

据能量守恒原理有:

$$Q_m = Q_r - Q_d - Q_{out} + Q_{hy}$$

整理后得颗粒的能量方程为:

$$\frac{dT_p}{dt} = 6 \frac{32866 \times 10^3 (dm/dt) / (\pi d_p^2) + a_g (T_g - T_p) - \sigma \epsilon_p T_p^4 + Q_{hy}}{d_p \rho_p C_p u_p} \quad (10)$$

3 悬浮段颗粒的燃烧

本文采用“颗粒初始粒径不变的缩核模型”来处理悬浮段颗粒的燃烧。该模型假设在颗粒的燃烧过程中, 颗粒的初始粒径保持不变, 灰壳层厚度不断增加, 而未反应核则不断减小。模型同时考虑了气体的扩散阻力、反应阻力和灰壳层阻力这三个影响因素。碳燃烧速度方程:

$$dm/dt = 0.375 K C_{O_2} \cdot \pi d_p^2 \quad (11)$$

式中, C_{O_2} — 悬浮段的平均氧浓度,

K — 综合考虑气体扩散、化学反应、灰壳阻力的燃烧反应速度常数,

气体扩散的质量交换系数 α 与传质的舍伍德 (sherwood) 数有关

$$\alpha = sh \frac{D_1}{d_p}$$

其中, D_1 — 氧的分子扩散系数

Sh — 传质的舍伍德数

悬浮段的传质 Sherwood 数采用 La Nauzu 和 Jung 的公式

$$Sh = 2e + 0.69 (Re/\epsilon)^{0.5} Sc^{0.33} \quad (12)$$

式中, ϵ 为悬浮段的空隙率,

Re 为雷诺数,

Sc 为史各特数

$$Re = \frac{|u_p - u_g| d_p}{\nu_g}$$

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g d_p}$$

其中, μ_g, ν_g — 气体的动力粘度和运动粘度

联立颗粒运动方程、颗粒能量方程和燃烧速度方程就可以求出颗粒沿悬浮段高度的运动速度、温度和含碳量的变化。在解这个方程组时, 本文采用了经典的四阶龙格—库塔法。

颗粒的初始温度取床温和未反应核表面温度的平均值。对于颗粒飞出床层的初速度

有不少争议,有的学者取颗粒的初速为气泡速度 u_b , B. A. Andersson 等则认为扬折夹带颗粒飞出床层表面的初速为其最大速度的 0.26 倍,即:

$$u_{p0} = 0.26u_{p,max}$$

$$u_{p,max} = 3.75 \times 10^{-2}d_p^{-3.55}u_b$$

而 George. S. E 和 J. R. Grace 等认为,对扬折颗粒,其离开床层的平均速度为气泡速度的 2.1 倍;在一些更简化的处理中,则取颗粒的初速为 $(u_g - u_r)$ 。本文取颗粒的初速为流化速度 u_0 ,这个值在 u_b 和 $2.1u_b$ 之间。

利用计算机进行计算,取步长 ΔH_i 。在每一步长 ΔH_i ,颗粒停留的时间近似计算为 T_i

$$T_i = \frac{2\Delta H_i}{u_{p,i-1} + u_{p,i}} \quad (13)$$

式中 $u_{p,i}, u_{p,i-1}$ —颗粒在该步长上、下两点颗粒的速度,

在每一步长 ΔH_i ,颗粒的碳耗量近似计算为:

$$\Delta m_i = m_{i-1} \cdot T_i \quad (14)$$

其中, $\Delta m_i, m_{i-1}$ —该步长碳消耗量、碳平均燃烧速率。

4 计算结果及分析

4.1 悬浮段出口处颗粒的含碳量

图 1 所示为悬浮段出口处颗粒含碳量的计算值和实测值的比较。计算和实测结果反应的含碳量随粒径的变化规律完全一致,但两者在数值上有一定偏差,所以造成这种偏差很可能是由于扬折模型的不尽合理造成的。即小颗粒的实际扬折量要比计算的值小些,而其在床内的停留时间要比计算值大,这

就导致最后悬浮段出口处颗粒含碳量的计算值大于实测值,而大颗粒的情况则正好与小颗粒的情况相反。

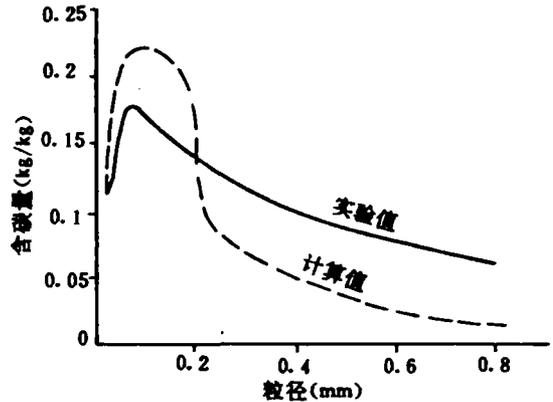


图 1 悬浮段出口处颗粒含碳量

4.2 扬折颗粒的含碳量沿悬浮段高度的变化

图 2 为计算得到的扬折颗粒的含碳量随悬浮段高度的变化规律。可以看出,粒径越小的颗粒其含碳量在悬浮段的变化越大。这是由于小颗粒的灰壳层较薄,灰壳层阻力相对较小,反应速度较快的缘故,从图中还可发现,沿悬浮段高度,颗粒含碳量的变化趋势趋于缓和,这是由于随着高度的增加,颗粒温度下降,反应速度逐步减慢而造成的。

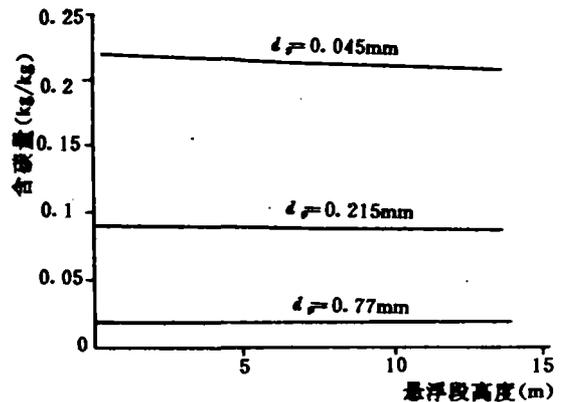


图 2 颗粒含碳量变化

4.3 悬浮段颗粒的温度

图 3 图 4 分别为计算得到的悬浮段出口处颗粒的温度分布和颗粒温度沿悬浮段高度的变化规律。

从图 3 可见,随着粒径的增加,悬浮段出口处的颗粒温度有下降的趋势。其原因在于小颗粒的燃烧放热量相对较大。从图 4 可见,在悬浮段下部,大颗粒的温度变化趋势要比小颗粒的温度变化趋势缓慢,这是由于大颗粒的热容量较大而引起的。在计算时假定悬浮段的烟气温度从 1173 K 均匀变化到 1043 K,可以看出,在悬浮段,颗粒和烟气的温度相差很小。

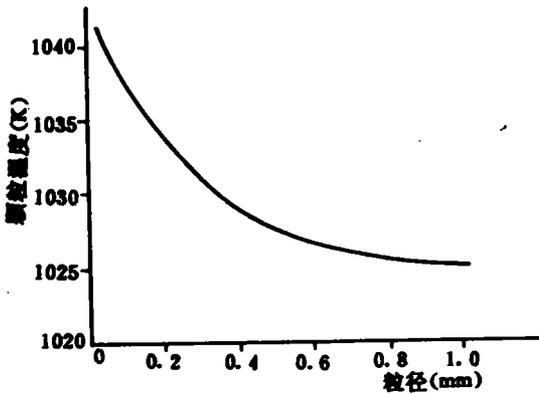


图 3 悬浮段出口处颗粒的温度

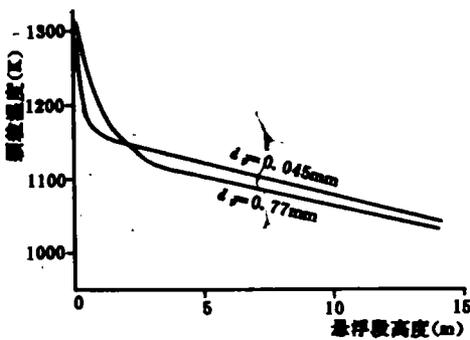


图 4 颗粒温度变化

4.4 悬浮段颗粒的速度

图 5 和图 6 为计算得到的悬浮段出口处的颗粒的速度分布和颗粒速度沿悬浮段高度的

的变化规律。从图 5 可见,粒径越大的颗粒,其在悬浮段出口处的速度越小;从图 6 可见,粒径越大的颗粒,其前期的速度变化越快,这与理论分析的规律完全一致。

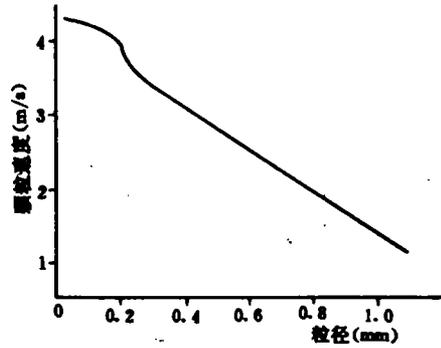


图 5 悬浮段出口处颗粒速度

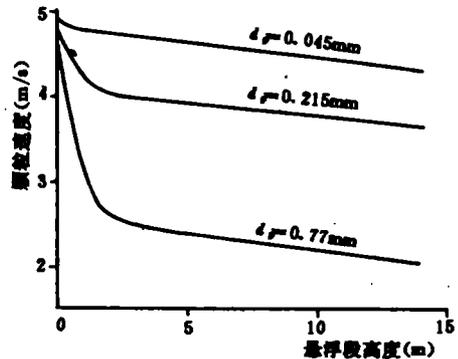


图 6 颗粒速度变化

参 考 文 献

- 1 国井大藏, O·列文斯比尔. 流态化工程. 石油工业出版社, 1977.
- 2 金保升 等. 燃煤飞灰循环流化床燃烧数学模型. 工程热物理学报. 1990, 11(2)
- 3 Renga. R. Rajan, C. Y. Wen. A comprehensive model for fluidized bed coal combustors. AICHE J. 1980, 26 (4).
- 4 W. Blasia et al. Modeling of motion of reaction particles in two-phase system. Comput Chem. Eng. , 1988, 12(2/3).

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1993 Vol. 8 No. 4

- (169) **An Experimental Study of Mixed Coal Combustion Characteristics and Determination of Combustion Characteristic Indexes** Qiu Jianrong, et al (*State key Laboratory of coal combustion Huazhong University of Science and Technology*)

By the use of a thermobalance, sedimentation furnace and a one-dimensional combustion boiler the combustion characteristics of mixed coal were determined. Based on the test results of a thermogravimetric analysis, the authors have tentatively proposed two comprehensive discrimination indexes, i. e. mixed coal volatile matter release characteristic index p and burn-up index C_b . The discrimination result obtained through the use of the above-cited two indexes has been found to be in basic agreement with that of an actual combustion process. **Key words:** *mixed coal, mixing ratio, thermogravimetric analysis, ignition characteristics, Burn-up characteristics*

- (174) **Combustion Model for Suspension Section Particles of Fluidized Bed With Fly Ash Circulation**..... Chen Xiaoping, et al (*Harbin Institute of Technology*)

In fluidized bed combustion boilers a suspension section not only serves as a heat transfer section but also plays its role as a combustion one. Relatively rough calculations of such type of combustion are available in past literature. Taking into consideration the specific condition of the above-cited suspension section the authors have set up a mathematical model to conduct numerical calculations. The authors' tests gave shown that the calculation results are in relatively good agreement with experimental ones. **Key words:** *suspension section, combustion of particles, mathematical model, fluidized bed*

- (179) **Experimental Research of a Pulverized-Coal Near-Wall-Jet Burner**..... Ma Xichen, et al (*Harbin Boiler Works*)

A new type of pulverized-coal firing device, the near-wall-jet burner is based on the theory of combustion aerodynamics and the use of combination property of jet flow and the non-contact guide-flow characteristics of a jet flow along a wall, resulting in a special velocity profile. The burner is capable of maintaining a stable flame and relatively free from slagging. The results of an experimental study have shown that it can burn anthracite with low volatile content ($V^r = 10\%$) under cold air conditions and without the use of supporting oil. Efforts are being made to popularize such burners. **Key words:** *pulverized coal burner, experimental research*