



## 气固多相反应流中的煤粉颗粒相能量方程

张 健 朱成凯 周力行

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

**摘要** 为了合理地预测燃烧装置内煤粉颗粒的燃烧行为, 从多相反应流中一般形式的颗粒相能量方程出发, 导出了煤粉颗粒相的能量方程, 给出了方程中反映相变引起的气固相间相互作用的源相的具体表达式, 与此同时还给出了气相能量方程中代表相间相互作用的颗粒源项的一种计算式。

**关键词** 多相反应流, 煤粉燃烧, 两相相互作用

煤是电站锅炉、工业锅炉和工业窑炉中使用的主要燃料。在各类燃烧反应装置中实现煤的高效低污染清洁燃烧, 是当前燃烧理论与技术研究中需要迫切解决的重要问题之一。由于煤粉颗粒在炉内的行为极大地影响着燃煤炉的燃烧与污染物排放性能, 因而从理论上对炉内煤粉颗粒的行为进行正确合理的描述和预测, 无疑将对发展煤的高效低污染燃烧技术起到有益的指导与推动作用。煤粉颗粒在炉内的行为极为复杂, 其温度的变化不仅受到周围气固多相介质对流与辐射传热的作用, 而且还受到颗粒自身的相变与反应, 如水分蒸发、热解挥发和焦炭反应等过程的影响。恰当地给定煤粉颗粒相的能量方程及其反映气固相间相互作用的源相表达式, 是合理预测煤粉颗粒在炉内的燃烧行为及气固两相温度场与浓度场分布的基本前提。

为了描述煤粉颗粒的燃烧行为, 文献中已建立了多种不同形式的颗粒相能量方程, 其中既包括在固相轨道模型中建立的颗粒能量方程<sup>[1]</sup>, 也包括在气固多连续介质模型中建立的颗粒相能量方程<sup>[2]</sup>。然而, 在这些颗粒相能量方程中, 均未给出针对煤粉燃烧过程的气固相间由于颗粒相变引起的相互作用源相的具体表达式。这给方程的应用与计算带来了不便, 同时由于相变源相表达式选取的不同也会导致计算结果的差异和不合理。本文从气固多连续介质模型中的一般形式的颗粒相能量方程出发, 在考虑煤粉颗粒的相变与反应条件下, 导出了煤粉颗粒相能量方程的具体形式及相变源相的具体表达式, 并同时给出了气相能量方程中代表相间相互作用的颗粒源项的一种计算式。

### 1 煤粉颗粒相能量方程

设气体 - 颗粒多相反应流系统中的颗粒为稀疏相, 在 Euler 坐标系中采用多连续介质模型描述气相和颗粒相的流动与燃烧。将颗粒按初始粒径的不同分组, 按 Crowe 等人的推导<sup>[3,4]</sup>, 第  $k$  组颗粒相的能量方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k e_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_k v_{kj} e_k) = n_k(Q_{ck} + Q_{rk}) + n_k \dot{m}_k (h_s + v_s^2/2) \quad (1)$$

式中,  $Q_{ck}$  和  $Q_{rk}$  分别代表气相向颗粒的对流传热速率和气固两相介质向颗粒的辐射传热速率。由于颗粒表面的 Stefan 流动能 ( $v_s^2$ ) 远小于颗粒表面气相的焓 ( $h_s$ ) 值, 且颗粒的内能 ( $e_k$ ) 与焓 ( $h_k$ ) 在数值上很接近, 因此颗粒相的能量方程又可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_k h_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_k v_{kj} h_k) = n_k(Q_{ck} + Q_{rk}) + n_k \dot{m}_k h_s \quad (2)$$

对于煤粉颗粒, 其相变与反应过程涉及到水分蒸发、热解挥发和焦炭的异相反应<sup>[2]</sup>。若仅考虑焦炭表面的下述异相反应, 即  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ , 则上述能量方程中与颗粒相变有关的源项可表示为

$$n_k \dot{m}_k h_s = n_k \dot{m}_{wk} h_{H_2O,k} + n_k \dot{m}_{vk} h_{v,k} + (1 + \beta) n_k \dot{m}_{hk} h_{CO_2,k} - \beta n_k \dot{m}_{hk} h_{O_2,k} \quad (3)$$

式中,  $\dot{m}_{wk}$ ,  $\dot{m}_{vk}$  和  $\dot{m}_{hk}$  分别代表由于水分蒸发、热解挥发和焦炭反应引起的颗粒质量变化速率, 即有  $\dot{m}_k = \dot{m}_{wk} + \dot{m}_{vk} + \dot{m}_{hk}$ ;  $\beta$  为焦炭氧化反应的化学当量比系数;  $h_{H_2O,k}$ ,  $h_{v,k}$ ,  $h_{CO_2,k}$  和  $h_{O_2,k}$  分别代表颗粒表面处气相水蒸汽、挥发分、二氧化碳和氧气的焓, 它们均按颗粒的温度进行计算。

上述以焓为变量的煤粉颗粒相能量方程亦可转化为以温度为变量的方程。设煤粉颗粒在燃烧过程中的组分由水分、原煤、焦炭和灰分构成,  $h_{wk}$ ,  $h_{ck}$ ,  $h_{hk}$  和

$h_{ak}$  分别代表煤粒中水分、原煤、焦炭和灰分的焓，则煤粒的焓与其中各组分的焓有如下的关系式

$$\begin{aligned} \rho_k h_k &= n_k m_k h_k = \\ n_k (m_{wk} h_{wk} + m_{ck} h_{ck} + m_{hk} h_{hk} + m_{ak} h_{ak}) &= \\ n_k \sum_l m_{lk} h_{lk} \end{aligned} \quad (4)$$

利用上式可将方程 (2) 左边各项改写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_k h_k) &= \\ n_k \sum_l m_{lk} \frac{\partial h_{lk}}{\partial t} + \sum_l h_{lk} \frac{\partial}{\partial t} (n_k m_{lk}) \end{aligned} \quad (5)$$

和

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_k v_{kj} h_k) &= \\ n_k v_{kj} \sum_l m_{lk} \frac{\partial h_{lk}}{\partial x_j} + \sum_l h_{lk} \frac{\partial}{\partial x_j} (n_k v_{kj} m_{lk}) \end{aligned} \quad (6)$$

煤粉颗粒中水分、原煤、焦炭和灰分各组分的连续方程可分别表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_k m_{wk}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (n_k v_{kj} m_{wk}) = n_k \dot{m}_{wk} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_k m_{ck}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (n_k v_{kj} m_{ck}) = n_k \dot{m}_{ck} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (n_k m_{hk}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (n_k v_{kj} m_{hk}) &= \\ n_k \dot{m}_{hk} - (1 - \alpha) n_k \dot{m}_{ck} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_k m_{ak}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (n_k v_{kj} m_{ak}) = 0 \quad (10)$$

上面各式中， $\dot{m}_{ck}$  代表原煤热解的质量变化速率，假定原煤热解为挥发分和焦炭的质量分数分别为  $\alpha$  和  $1 - \alpha$ ，即有  $\dot{m}_{vk} = \alpha \dot{m}_{ck}$ 。将方程 (5) 至方程 (10) 代入到方程 (2) 中，设原煤的焓与焦炭的焓相等，即  $h_{ck} = h_{hk}$ ，则煤粉颗粒相的能量方程可改写为

$$\begin{aligned} n_k \sum_l m_{lk} \frac{\partial h_{lk}}{\partial t} + n_k v_{kj} \sum_l m_{lk} \frac{\partial h_{lk}}{\partial x_j} &= \\ n_k (Q_{ck} + Q_{rk}) + n_k \dot{m}_{wk} (h_{\text{H}_2\text{O},k} - h_{wk}) + \\ n_k \dot{m}_{vk} (h_{v,k} - h_{ck}) + \\ n_k \dot{m}_{hk} [(1 + \beta) h_{\text{CO}_2,k} - \beta h_{\text{O}_x,k} - h_{hk}] \end{aligned} \quad (11)$$

由上式可得出以温度为变量的煤粉颗粒相的能量方程，即

$$\begin{aligned} \sum_l m_{lk} C_{plk} \frac{\partial T_k}{\partial t} + v_{kj} \sum_l m_{lk} C_{plk} \frac{\partial T_k}{\partial x_j} &= \\ Q_{ck} + Q_{rk} + \dot{m}_{wk} L_{wk} + \dot{m}_{vk} \Delta h_{vk} - \dot{m}_{hk} q_{hk} \end{aligned} \quad (12)$$

其中按颗粒温度计算的水分蒸发潜热  $L_{wk}$ 、热解挥发吸热  $\Delta h_{vk}$  和焦炭反应放热  $q_{hk}$  的表达式分别为

$$L_{wk} = h_{\text{H}_2\text{O},k} - h_{wk} \quad (13)$$

$$\Delta h_{vk} = h_{v,k} - h_{ck} \quad (14)$$

$$q_{hk} = h_{hk} + \beta h_{\text{O}_x,k} - (1 + \beta) h_{\text{CO}_2,k} \quad (15)$$

若定义煤粉颗粒的比热  $C_{pk}$  为

$$m_k C_{pk} = \sum_l m_{lk} C_{plk} \quad (16)$$

则方程 (12) 可进一步表示成下述形式

$$\begin{aligned} m_k C_{pk} \frac{\partial T_k}{\partial t} + v_{kj} m_k C_{pk} \frac{\partial T_k}{\partial x_j} &= \\ Q_{ck} + Q_{rk} + \dot{m}_{wk} L_{wk} + \dot{m}_{vk} \Delta h_{vk} - \dot{m}_{hk} q_{hk} \end{aligned} \quad (17)$$

## 2 气相能量方程中的颗粒源项

气体 - 颗粒多相反应流中以焓为变量的气相能量方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j h) &= \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + q_r - \sum_k n_k (Q_{ck} + \dot{m}_k h_s) \end{aligned} \quad (18)$$

利用颗粒相能量方程 (2)，上述气相能量方程中反映相间能量传递与相互作用的颗粒源项亦可按下式计算

$$\begin{aligned} - \sum_k n_k (Q_{ck} + \dot{m}_k h_s) &= \\ \sum_k \left[ n_k Q_{rk} - \frac{\partial}{\partial t} (\rho_k h_k) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_k v_{kj} h_k) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

采用上式进行计算易于保证多相混合物中总能量的守恒性。

## 3 结 论

本文从采用多连续介质模型描述的气体 - 颗粒多相反应流系统中一般形式的颗粒相能量方程出发, 分别导出了以焓或温度为变量的煤粉颗粒相能量方程的具体形式, 给出了煤粉颗粒相能量方程中相变源相和气相能量方程中反映气固相间相互作用的源相的具体计算式. 这些方程和计算表达式可应用于各类煤粉燃烧装置内燃烧过程的综合数值模拟中, 以合理地预测煤粉颗粒的燃烧行为.

### 参 考 文 献

- 1 Smith PJ, Fletcher TII, Smoot LD. Model for pulverized coal-fired reactors. 18th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, 1981. 1285~1293
- 2 Zhou LX. Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flows and Combustion. Beijing: Science Press and Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc, 1993
- 3 Crowe CT. Conservation equations for vapor-droplet flows. Proc of 1976 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. Stanford University Press, 1976. 214~228
- 4 Smoot LD, Pratt DT. Pulverized Coal Combustion

and Gasification. New York: Plenum Press, 1979

### ENERGY EQUATIONS FOR PULVERIZED COAL PARTICLES IN GAS-SOLID REACTING FLOWS

ZHANG Jian ZHU Chengkai ZHOU Lixing  
(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua  
University, Beijing 100084, China)

**Abstract** For properly predicting the behaviors of pulverized coal particles in a combustor, the energy equations for pulverized coal particle phases are derived from the general particle energy equation in reacting multiphase flow systems. The detailed expressions for the source terms, which represent the gas-particle energy transport and interactions due to phase changes, are obtained. An expression for calculating the particle source terms in the energy equation for gas phase is also proposed.

**Key words** reacting multiphase flow, pulverized coal combustion, two-phase interactions