

# 生物质颗粒对气相温度脉动的瞬时响应

庞杰, 张健

(清华大学工程力学系, 北京100084)

摘要：在生物质颗粒的湍流多相燃烧中，气相速度的湍流脉动对颗粒运动起着不容忽视的作用，而气相温度的湍流脉动是否会对生物质颗粒的瞬时温度产生影响则是有待探讨的问题。该文对置于有温度脉动的热气流中的生物质颗粒的瞬时温度变化过程进行了理论分析与计算，表明颗粒温度也会随气相发生脉动。颗粒温度脉动的幅度受到气相温度脉动强度的影响，气相温度脉动强度的增大会导致颗粒温度脉动的增强。颗粒Reynolds数的增大加强了颗粒与气体之间的对流换热，减小了颗粒的温度弛豫时间，从而加快了颗粒对气相温度的响应，增大了颗粒温度脉动的幅度。

目前，世界能源消费中化石能源即煤、石油和天然气仍然占主导地位。化石能源为一次性不可再生能源，贮量有限。同时，化石能源的燃烧排放出大量的SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>及粉尘等，造成严重的环境污染和全球气候问题。为此，生物质等可再生能源受到人们越来越多的重视。生物质能具有贮量丰富，可再生，全生命周期零CO<sub>2</sub>排放，低N、S含量以及来源广泛等特点。生物质的热化学转化如燃烧是利用生物质能的重要方式之一。

在生物质燃烧技术的发展中，数值模拟正发挥着日益重要的作用。对生物质颗粒湍流多相燃烧的数值模拟，需要合理地描述生物质颗粒的运动与燃烧特性。生物质颗粒在燃烧室内的运动与燃烧非常复杂，受到许多因素的共同作用，如气体对颗粒的阻力和对流传热、两相辐射传热、气相湍流和湍流燃烧，以及颗粒自身的热解与焦炭异相反应等。同时，生物质颗粒也有着与其他固体燃料颗粒不同的一些特点，如尺寸较大、形状较不规则、密度较低、反应活性较高等。

对于在实际燃烧室湍流燃烧流场中运动与燃烧的生物质颗粒，气相速度的湍流脉动对颗粒的瞬时运动有不容忽视的影响。对生物质湍流多相燃烧的数值模拟已考虑到了湍流—颗粒运动的相互作用。然而，对于粒径范围在100 μm以上的生物质燃料颗粒，湍流是否会对颗粒的瞬时温度和瞬时反应产生影响则是有待进一步探讨的问题。为此，本文对生物质颗粒在有温度脉动的热气流中的瞬时温度响应过程进行了理论分析与计算，研究了气相温度脉动对颗粒瞬时温度变化的影响。

## 1 生物质颗粒能量方程

为便于分析，假定生物质颗粒为球形。由于颗粒Biot数接近于0.1，其内部温度可视为均匀分布。对置于燃烧室热气流中的单个生物质颗粒，若考虑颗粒与气体之间的对流传热和颗粒与燃烧室壁面之间的辐射传热，而暂不考虑颗粒的相变与反应，则生物质颗粒的瞬时能量方程可表示为

$$m_k C_{pk} \frac{dT_k}{dt} =$$

$$\pi d_k \lambda Nu_k (T - T_k) + \pi d_k^2 \epsilon_k \sigma (T_w^4 - T_k^4). \quad (1)$$

其中:  $m_k$ 、 $C_{pk}$ 、 $T_k$ 、 $d_k$  和  $Nu_k$  分别为颗粒质量、比热、温度、直径及颗粒与气体对流换热 Nusselt 数,  $\lambda$  和  $T$  分别为气体热导率和温度,  $\epsilon_k$ 、 $\sigma$  和  $T_w$  分别为颗粒表面发射率、Stefan-Boltzmann 常数和燃烧室壁面温度。

引入颗粒温度弛豫时间  $\tau_{Tk}$ , 式(1)变为

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{1}{\tau_{Tk}} (T - T_k) + \frac{6\epsilon_k \sigma}{\rho_{pk} d_k C_{pk}} (T_w^4 - T_k^4). \quad (2)$$

其中:  $\rho_{pk}$  为颗粒的材料密度,  $\tau_{Tk}$  的表达式为

$$\tau_{Tk} = \frac{\rho_{pk} C_{pk} d_k^2}{6 Nu_k \lambda}. \quad (3)$$

从生物质颗粒的瞬时动量方程中可得到颗粒速度弛豫时间为

$$\tau_{vk} = \frac{\rho_{pk} d_k^2}{18\mu} \frac{24}{Re_k} C_{Dk}^{-1}. \quad (4)$$

其中:  $\mu$  为气体粘性系数;  $C_{Dk}$  为气体对颗粒的阻力系数;  $Re_k$  为颗粒 Reynolds 数,  $Re_k = |\mathbf{v} - \mathbf{v}_k| d_k / \mu$ , 这里的  $\mathbf{v}$  和  $\mathbf{v}_k$  分别为气体和颗粒的瞬时速度。由式(3)和(4)可得颗粒速度弛豫时间与温度弛豫时间的比值为

$$\frac{\tau_{vk}}{\tau_{Tk}} = \frac{Nu_k \lambda}{3\mu C_{pk}} \frac{24}{Re_k} C_{Dk}^{-1}. \quad (5)$$

对于球形颗粒,  $Nu_k$  和  $C_{Dk}$  的表达式<sup>[8]</sup> 分别为:

$$Nu_k = 2 + 0.6 Re_k^{0.5} Pr^{1/3}, \quad Re_k \leq 10^4, \quad Pr \geq 0.7;$$

$$C_{Dk} = \frac{24}{Re_k} (1 + 0.15 Re_k^{0.687}), \quad Re_k \leq 1000. \quad (6)$$

将式(6)代入(5)式中得到

$$\frac{\tau_{vk}}{\tau_{Tk}} = \frac{1}{3} \frac{C_p}{Pr C_{pk}} \frac{2 + 0.6 Re_k^{0.5} Pr^{1/3}}{1 + 0.15 Re_k^{0.687}}. \quad (7)$$

对于生物质与空气的燃烧反应系统, 气体 Prandtl 数  $Pr \sim 1$ , 气体与颗粒的比热比  $C_p / C_{pk} \sim 1$ , 在  $Re_k \leq 1000$  的范围内均有  $(2 + 0.6 Re_k^{0.5} Pr^{1/3}) / (1 + 0.15 Re_k^{0.687}) \sim 1$ , 于是有  $\tau_{vk} / \tau_{Tk} \sim 1$ 。因此, 颗粒的温度弛豫时间和速度弛豫时间具有相同的数

量级。

利用式(4)和(6)可得到颗粒速度弛豫时间的关系式，

$$\tau_{vk} = \frac{\rho_{pk} d_k^2}{18\mu} (1 + 0.15 Re_k^{0.687})^{-1} \leq \frac{\rho_{pk} d_k^2}{18\mu} = \tau_{sk}. \quad (8)$$

其中， $\tau_{sk}$  为颗粒速度的 Stokes 弛豫时间。对于典型的生物质颗粒，如秸秆和木屑颗粒等，取材料密度  $\rho_{pk} = 350 \text{ kg/m}^3$  [9]。当颗粒的粒径为  $100 \sim 200 \mu\text{m}$  时，对应的颗粒速度 Stokes 弛豫时间为  $10.8 \sim 43.2 \text{ ms}$ ，这与湍流时间尺度 ( $10 \text{ ms}$ ) [10] 具有相同的数量级，因而气相湍流脉动会对生物质颗粒的瞬时运动产生作用。与此同时，气相湍流脉动也会对生物质颗粒的瞬时温度变化产生影响。

## 2 计算工况参数

为研究气相温度脉动对生物质颗粒瞬时温度变化的影响，设颗粒处在的热气流具有空间分布均匀但随时间脉动变化的温度。气体瞬时温度随时间的变化为

$$T = \bar{T}[1 + A_t \sin(2\pi ft)]. \quad (9)$$

其中： $\bar{T}$  为气相平均温度， $A_t$  为气相温度脉动强度， $f$  为气相温度脉动频率。

对生物质颗粒能量方程即方程(2)采用数值求解方法，该方程的离散化采用了一阶显式的有限差分格式。计算中取生物质颗粒的比热  $C_{pk} = 1600 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})^{[9]}$ ，辐射发射率  $\epsilon_k = 0.8$ 。气体导热系数采用经验公式<sup>[11]</sup>进行计算。在不同的工况参数条件下，得到了在有温度脉动的热气流中，生物质颗粒瞬时温度随时间的变化。计算中取生物质颗粒的直径分别为 100、150 和 200  $\mu\text{m}$ ，气相平均温度分别为 600、800 和 1100 K，颗粒 Reynolds 数分别为 0、10 和 20，气相温度脉动强度分别为 0、0.1 和 0.2。气相温度脉动频率按典型的湍流时间尺度取为 100 Hz。在各组工况的计算中，生物质颗粒的初始温度均取为 300 K，燃烧室壁面温度也均取为 300 K，计算时间步长均取为  $10^{-5} \text{ s}$ 。

### 3 计算结果与分析

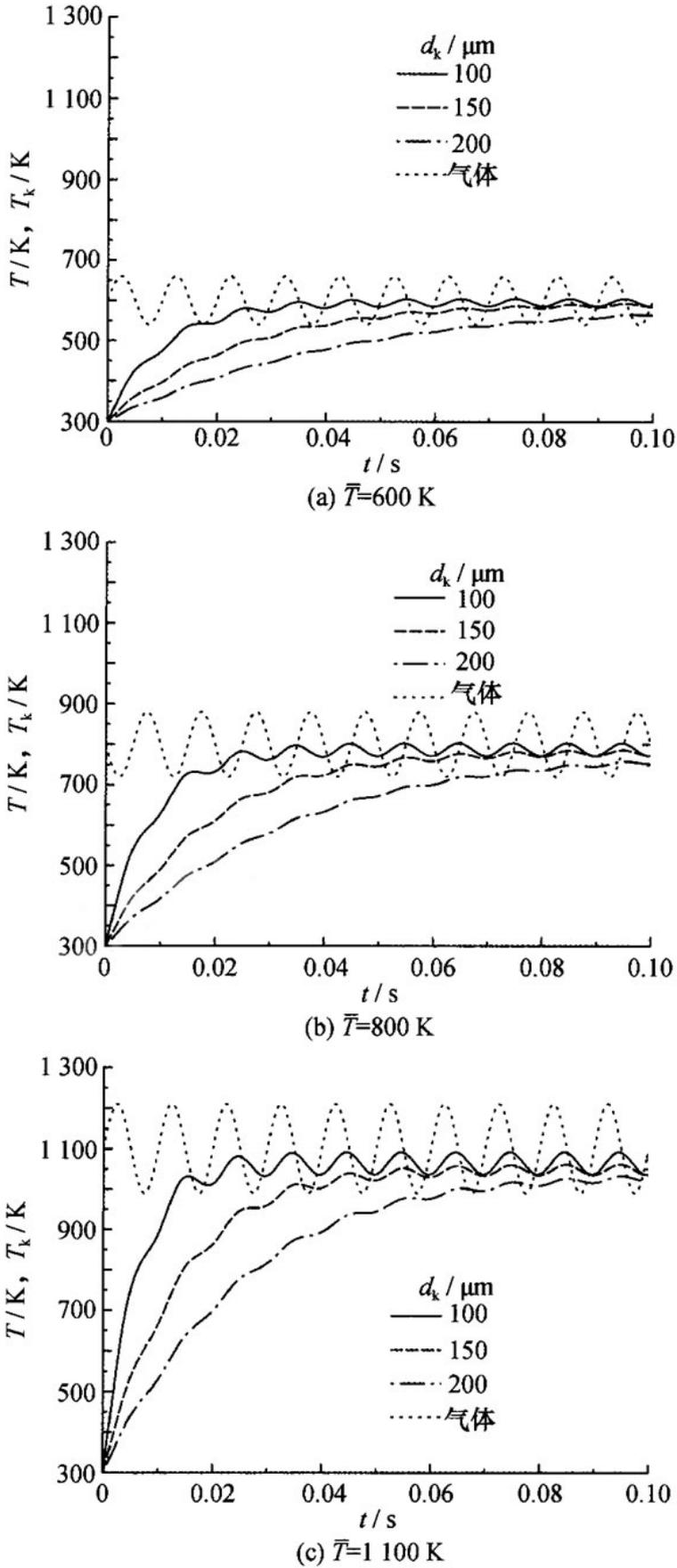


图1 不同气相平均温度下的颗粒与气相瞬时温度

图1a—1c分别给出了在气相平均温度为600、800和1100K时生物质颗粒与气相瞬时温度随时间的变化。计算中颗粒直径分别取为100、150和200 μm，气相温度脉动强度取为0.1，颗粒Reyn-olds数取为0。可以看到，在不同的气相平均温度下，受气相温度脉动的作用，100 μm颗粒的瞬时温度呈现出脉动的变化，但脉动幅度要比气相温度的脉动幅度小。150 μm颗粒的瞬时温度也有一定的脉动，但脉动幅度要更小一些。200 μm颗粒的瞬时温度则脉动更弱。

将气相瞬时温度的表达式(9)代入生物质颗粒能量方程(2)中，忽略辐射传热项，并取颗粒温度弛豫时间为常数，可得到能量方程的分析解为

$$T_k = \bar{T} + \left( T_{ki} - \bar{T} + \frac{2\pi f \tau_{Tk} A_i \bar{T}}{(2\pi f)^2 \tau_{Tk}^2 + 1} \right) e^{-t/\tau_{Tk}} + \frac{A_i \bar{T}}{\sqrt{(2\pi f \tau_{Tk})^2 + 1}} \sin(2\pi f t - \phi). \quad (10)$$

其中： $T_{ki}$ 为颗粒初始温度， $\phi = \tan^{-1}(2\pi f \tau_{Tk})$ 。

从式(10)可以看到，当气相瞬时温度存在脉动时，颗粒瞬时温度也会出现脉动，随颗粒直径及颗粒温度弛豫时间的增大，颗粒温度的脉动幅度减小。从式(10)还可以看到，随颗粒直径或颗粒温度弛豫时间的减小，式(10)右端的指数项随时间的衰减变快，即粒径相对较小的颗粒对气相瞬时温度的变化响应较快，而粒径较大的颗粒对气相瞬时温度的变化则响应较慢，这与图1的结果是一致的。在相同的条件下，由计算得到的颗粒瞬时温度随时间的变化与式(10)给出的分析解是较为接近的，说明了本文计算的合理性。

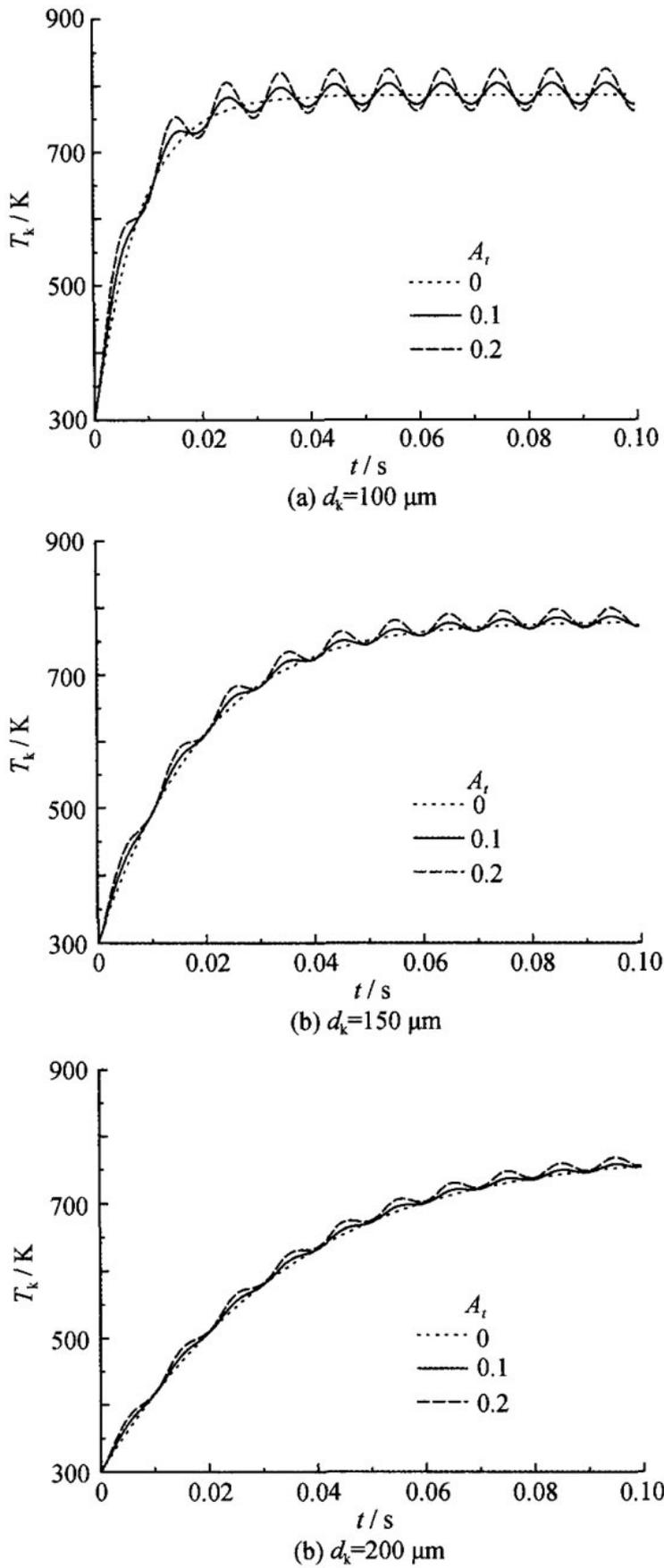
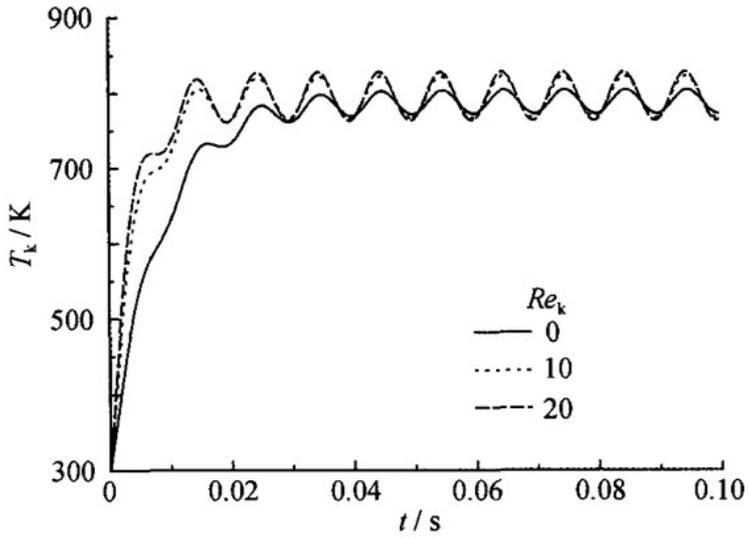
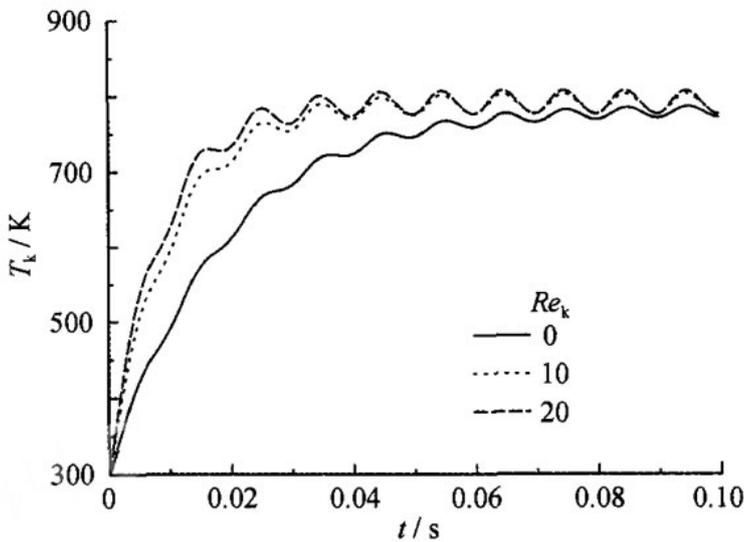


图 2 气相温度脉动强度对颗粒瞬时温度的影响

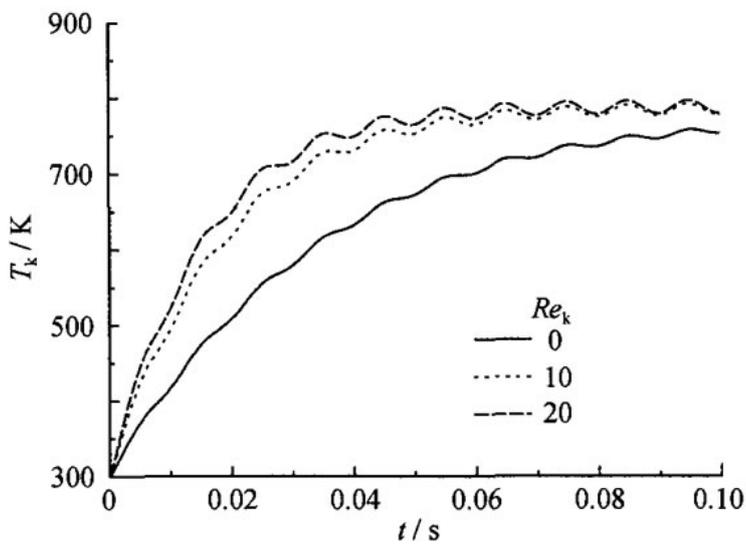
图2a—2c给出了气相温度脉动强度对颗粒瞬时温度的影响。气相平均温度取为800K，颗粒Reynolds数取为0。从图2a可以看到，气相温度脉动强度对100  $\mu\text{m}$ 颗粒的瞬时温度有较明显的影响。增大气相温度脉动强度导致颗粒瞬时温度的峰值增大，谷值降低，但峰值增大的程度要大于谷值降低的程度。从图2b可以看到，气相温度脉动强度对150  $\mu\text{m}$ 颗粒的瞬时温度有一定的影响，导致颗粒瞬时温度的峰值增大。从图2c可以看到，气相温度脉动强度对200  $\mu\text{m}$ 颗粒的瞬时温度影响相对较弱，增大气相温度脉动强度也导致颗粒瞬时温度的峰值有所增大。从图2还可以看到，当颗粒直径相对较小时，考虑气相温度脉动的颗粒瞬时温度是在围绕不考虑气相温度脉动的颗粒瞬时温度上下脉动。当颗粒直径逐渐增大时，考虑气相温度脉动的颗粒瞬时温度的谷值逐渐接近于不考虑气相温度脉动的颗粒瞬时温度。这意味着随颗粒直径的增大，相对于不考虑气相温度脉动的颗粒瞬时温度，气相温度脉动使颗粒瞬时温度升高的趋势逐渐增强。这是由于在颗粒直径较大时，颗粒瞬时温度升高引起的气相热导率变化会使颗粒温度弛豫时间减少及颗粒对气相温度响应变快的趋势有所增强。



(a)  $d_k = 100 \mu m$



(b)  $d_k = 150 \mu m$



(c)  $d_k = 200 \mu m$

图3 颗粒 Reynolds 数对颗粒瞬时温度的影响

图3a—3c给出了颗粒Reynolds数对颗粒瞬时温度的影响。气相平均温度取为800K，气相温度脉动强度取为0.1。可以看到，颗粒Reynolds数对不同粒径即100、150和200  $\mu\text{m}$ 颗粒的瞬时温度均有较明显的影响，增强了颗粒瞬时温度的脉动。由于颗粒Reynolds数越大，气体与颗粒对流传热的Nuk就越大，这导致颗粒温度弛豫时间减小。因此，在颗粒Reynolds数增大时，颗粒能够更快地跟随气相产生温度的脉动，且脉动幅度增大。从图3可以看到，颗粒Reynolds数为10和20的颗粒瞬时温度较为接近，与颗粒Reynolds数为0时的颗粒瞬时温度差别相对较大。这是由于颗粒Reynolds数从0增加到10比从0增加到20时，颗粒与气体间Nuk的增加量要小。

上述分析与计算尽管未考虑颗粒的相变与反应，但在有颗粒相变与反应的条件下，例如在生物质颗粒的燃烧或气化中，颗粒的材料密度或粒径会下降，导致颗粒的温度弛豫时间会降低，预计气相温度脉动仍然会对颗粒的瞬时温度产生影响。因此，在对燃烧室内生物质颗粒燃烧或气化的模拟中，应考虑到气相温度的湍流脉动对颗粒温度变化的作用。

。

#### 4结论

本文对置于有温度脉动的热气流中粒径为100 ~ 200  $\mu\text{m}$ 的生物质颗粒温度的瞬时响应过程进行了理论分析和计算，得到如下结论：

- 1)在不同的气相平均温度下，气相温度脉动对100  $\mu\text{m}$ 颗粒的瞬时温度有较明显的影响，对150  $\mu\text{m}$ 颗粒瞬时温度也有一定的作用，导致颗粒瞬时温度呈现出脉动式变化。
- 2)增大气相温度脉动强度会导致不同粒径即100、150和200  $\mu\text{m}$ 颗粒瞬时温度的峰值增大。与不考虑气相温度脉动的颗粒瞬时温度相比，气相温度脉动使颗粒瞬时温度升高的趋势随颗粒直径的增加而逐渐增强。
- 3)颗粒Reynolds数对100 ~ 200  $\mu\text{m}$ 颗粒的瞬时温度均有较明显的影响。增大颗粒Reynolds数会加快颗粒对气相温度的瞬时响应，使颗粒瞬时温度脉动的幅度增大。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/131416.html>