

气相温度脉动对碳黑成核与长大及氧化反应的影响

陈莹, 张健

(清华大学工程力学系, 北京市海淀区 100084)

Effects of Gas Temperature Fluctuations on the Soot Inception, Growth, and Oxidation Reactions

CHEN Ying, ZHANG Jian

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The effects of gas temperature fluctuations on the soot inception and surface growth reactions as well as soot oxidation reactions are investigated. The results indicate that the instantaneous variations of soot mass fraction are influenced by the gas temperature fluctuation in both processes of soot inception and surface growth and soot oxidation under the time-averaged gas temperature of 1 500~1 800 K. The influences are enhanced by the increase in the fluctuation amplitude of the gas temperature. The gas temperature fluctuation results in faster rates of soot nucleation and surface growth reactions in the processes of soot inception and surface growth. The time-averaged soot mass fraction increases with the fluctuation amplitude of the gas temperature. While the increase in the fluctuation amplitude of the gas temperature leads to decrease in the time-averaged soot mass fraction and increase in the time-averaged soot particle number density during the processes of soot oxidation.

KEY WORDS: gas temperature fluctuation; soot inception and surface growth; soot oxidation; soot mass fraction; soot particle number density

摘要: 研究气相温度脉动对碳黑成核与长大反应以及碳黑氧化反应的影响。计算结果表明, 在气相平均温度为 1 500~1 800 K 的条件下, 碳黑成核和表面长大过程以及碳黑氧化过程中碳黑质量分数的瞬时变化都受到气相温度脉动的影响, 这种影响随气相温度脉动强度的增加而变大。在碳黑成核和表面长大过程中, 气相温度脉动加快了碳黑成核和表面长大反应的进行, 温度脉动强度的增加使得碳黑时均质量分数增加。在碳黑氧化过程中, 气相温度脉动强度的增加导致碳黑时均质量分数减少, 而时均颗粒数密度则有所增加。

关键词: 气相温度脉动; 碳黑成核与长大; 碳黑氧化; 碳黑质量分数; 碳黑颗粒数密度

0 引言

碳黑生成主要源于碳氢燃料的高温热解和不完全燃烧。燃烧排放的碳黑作为大气中可吸入颗粒物的主要构成成分之一, 对人体健康和大气环境有极大危害^[1-2]。碳黑的形成与控制近年来引起人们越来越多的关注, 已开展许多研究^[3-8]。为提高燃烧效率, 发展抑制燃烧过程中碳黑生成技术, 需深入了解碳黑生成机制及影响因素, 合理准确预测碳黑生成与排放。

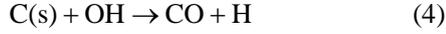
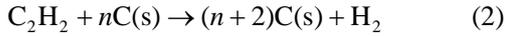
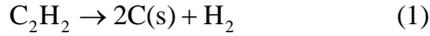
火焰中碳黑的生成经历气相前驱物的形成、碳黑成核、颗粒凝并、表面长大和氧化过程^[9-10]。无论是碳黑前驱物的生成还是碳黑颗粒的生长与氧化均涉及到复杂的化学反应机制。实际燃烧反应装置中的均相燃烧大部分为湍流燃烧。在湍流火焰中, 碳黑前驱物的生成同时受到复杂化学动力学和湍流脉动的影响, 是湍流-复杂化学反应相互作用的结果。而碳黑颗粒的粒径很小, 其瞬时温度与气相瞬时温度相同。气相湍流脉动是否会对碳黑的成核、长大与氧化反应产生影响是值得进一步探讨的问题。在描述碳黑成核、表面长大和氧化的多步反应机制^[11-12]中, 各步的瞬时反应率均为气相瞬时速度的指数函数。温度指数函数在反应速率中起主导的影响作用, 为此本文通过数值分析研究了气相温度脉动对碳黑成核、长大和氧化反应的影响。

1 碳黑成核、长大与氧化的 5 步反应机制

将乙炔作为碳氢燃料燃烧中的碳黑前驱物组分, 对碳黑成核、表面长大、氧化和凝并采用如下的 5 步反应机制^[11]来描述:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51076082); 内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLE200902)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51076082); Project Supported by State Key Laboratory of Engines (SKLE200902).



上述 5 个反应依次称为反应 1、2、3、4 和 5。

反应 1 和 2 分别表示碳黑成核和表面长大的反应,

反应 3 和 4 分别表示碳黑被分子氧(O₂)和羟基(OH)

氧化的反应^[13-16], 反应 5 表示碳黑颗粒的凝并反应。

各个反应的瞬时速率^[11,14,16]分别为:

$$R_1 = k_1(T)[\text{C}_2\text{H}_2] \quad (6)$$

$$R_2 = k_2(T)A_s^{1/2}[\text{C}_2\text{H}_2] \quad (7)$$

$$R_3 = k_3(T)A_s[\text{O}_2] \quad (8)$$

$$R_4 = \varphi_{\text{OH}}k_4(T)A_sX_{\text{OH}} \quad (9)$$

$$R_5 = 2C_\alpha d_p^{1/2} (6\sigma_B T / \rho_s)^{1/2} (\rho N_s)^2 \quad (10)$$

式中: $k_1(T)=A_1\exp(-E_1/RT)$; $k_2(T)=A_2\exp(-E_2/RT)$;

$k_3(T)=A_3T^{1/2}\exp(-E_3/RT)$; $k_4(T)=A_4T^{-1/2}$; $[\text{C}_2\text{H}_2]$ 和 $[\text{O}_2]$

分别表示 C_2H_2 和 O_2 的摩尔密度; X_{OH} 为 OH 的摩

尔分数; φ_{OH} 为 OH 与碳黑颗粒的碰撞效率; C_α 为

颗粒凝并速率常数; N_s 为碳黑颗粒数密度, 即单位

质量气体混合物中的碳黑颗粒数目; A_s 是单位体积

内的碳黑表面面积, 可表示为

$$A_s = \pi d_p^2 (\rho N_s) \quad (11)$$

式中: d_p 为碳黑颗粒直径。假设碳黑为球形颗粒,

其直径可由碳黑质量分数(Y_s)和颗粒数密度求出, 即

$$d_p = \left(\frac{6}{\pi} \frac{Y_s}{\rho_s N_s} \right)^{1/3} \quad (12)$$

2 碳黑成核与表面长大模型

为着重研究气相温度脉动对碳黑成核、颗粒长

大与氧化过程的影响程度, 分别考察碳黑成核与长

大及碳黑氧化过程。设气相温度和各组分质量分

数在空间上呈均匀分布。燃烧中碳黑的成核与表面

长大主要发生在缺氧区域, 设此区域内氧气和 OH

的浓度为 0。则按描述碳黑质量分数和颗粒数密

度演化的双方程模型^[11-12], 在碳黑成核与长大

过程中, 碳黑质量分数和颗粒数密度的瞬时控

制方程为:

$$\rho \frac{dY_s}{dt} = 2k_1(T)[\text{C}_2\text{H}_2]M_s + 2k_2(T)A_s^{1/2}[\text{C}_2\text{H}_2]M_s \quad (13)$$

$$\rho \frac{dN_s}{dt} = \frac{2}{C_{\min}} N_A k_1(T)[\text{C}_2\text{H}_2] - 2C_\alpha d_p^{1/2} (6\sigma_B T / \rho_s)^{1/2} (\rho N_s)^2 \quad (14)$$

式中: N_A 和 σ_B 分别为阿伏伽德罗常数和玻尔兹曼常数; M_s 和 ρ_s 分别为碳黑分子量与材料密度; C_{\min} 为初始碳黑颗粒中碳原子的数目。

随着碳黑成核与长大反应的进行, 前驱物组分乙炔不断被消耗, 其浓度随时间变化的瞬时速率为

$$\rho \frac{dY_{\text{C}_2\text{H}_2}}{dt} = -k_1(T)[\text{C}_2\text{H}_2]M_{\text{C}_2\text{H}_2} - k_2(T)A_s^{1/2}[\text{C}_2\text{H}_2]M_{\text{C}_2\text{H}_2} \quad (15)$$

按摩尔密度与质量分数之间的关系式 $[\text{C}_2\text{H}_2]=$

$\rho \frac{Y_{\text{C}_2\text{H}_2}}{M_{\text{C}_2\text{H}_2}}$, 可将式(13)~(15)转化为如下形式:

$$\frac{dY_s}{dt} = 2k_1(T)M_s \frac{Y_{\text{C}_2\text{H}_2}}{M_{\text{C}_2\text{H}_2}} + 2k_2(T)A_s^{1/2}M_s \frac{Y_{\text{C}_2\text{H}_2}}{M_{\text{C}_2\text{H}_2}} \quad (16)$$

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{2}{C_{\min}} N_A k_1(T) \frac{Y_{\text{C}_2\text{H}_2}}{M_{\text{C}_2\text{H}_2}} - 2C_\alpha d_p^{1/2} \left(\frac{6\sigma_B T}{\rho_s} \right)^{1/2} \rho N_s^2 \quad (17)$$

$$\frac{dY_{\text{C}_2\text{H}_2}}{dt} = -k_1(T)Y_{\text{C}_2\text{H}_2} - k_2(T)A_s^{1/2}Y_{\text{C}_2\text{H}_2} \quad (18)$$

3 碳黑氧化模型

碳黑的氧化主要发生在火焰后方具有一定氧

气浓度的区域, 可设此区域内碳黑前驱物组分乙炔

已消耗殆尽, 即其组分浓度为 0。按双方程模型,

碳黑质量分数和颗粒数密度的瞬时控制方程可表

示为:

$$\rho \frac{dY_s}{dt} = -k_3(T)A_s[\text{O}_2]M_s - \varphi_{\text{OH}}k_4(T)A_sX_{\text{OH}} \quad (19)$$

$$\rho \frac{dN_s}{dt} = -2C_\alpha d_p^{1/2} \left(\frac{6\sigma_B T}{\rho_s} \right)^{1/2} (\rho N_s)^2 \quad (20)$$

由于碳黑氧化反应, 导致气相组分 O_2 和 OH

浓度随时间变化的瞬时速率为:

$$\rho \frac{dY_{\text{O}_2}}{dt} = -\frac{1}{2}k_3(T)A_s[\text{O}_2]M_{\text{O}_2} \quad (21)$$

$$\rho \frac{dY_{\text{OH}}}{dt} = -\varphi_{\text{OH}}k_4(T)A_sX_{\text{OH}} \frac{M_{\text{OH}}}{M_s} \quad (22)$$

将组分摩尔密度和体积分数转化为组分质量

分数, 则上述方程可进一步表示为:

$$\frac{dY_s}{dt} = -k_3(T)A_sM_s \frac{Y_{\text{O}_2}}{M_{\text{O}_2}} - \varphi_{\text{OH}}k_4(T)A_s \frac{RTY_{\text{OH}}}{pM_{\text{OH}}} \quad (23)$$

$$dN_s/dt = -2C_\alpha d_p^{1/2} (6\sigma_B T / \rho_s)^{1/2} \rho N_s^2 \quad (24)$$

$$\frac{dY_{\text{O}_2}}{dt} = -\frac{1}{2}k_3(T)A_sY_{\text{O}_2} \quad (25)$$

$$\frac{dY_{\text{OH}}}{dt} = -\varphi_{\text{OH}}k_4(T)A_s \frac{RTY_{\text{OH}}}{pM_s} \quad (26)$$

无论是在碳黑成核与长大过程中还是在碳黑氧化过程中,均假设气相瞬时温度随时间以如下正弦方式脉动地变化,即

$$T = \bar{T}[1 + A_t \sin(2\pi ft)] \quad (27)$$

式中: \bar{T} 为气相时均温度; A_t 为气相温度脉动强度; f 为气相温度脉动频率,由湍流时间尺度 τ_T 决定,即有 $f=1/\tau_T$ 。

4 计算工况参数

分别对碳黑成核与表面长大过程及碳黑氧化过程的碳黑质量分数、颗粒数密度和气相各组分浓度的瞬时控制方程组进行数值求解。各控制方程的离散化采用了有限差分法和一阶显式格式^[17]。计算中选取的时间步长足够小,以确保数值求解的精度。

通过数值求解,得到了在碳黑成核与长大过程中及碳黑氧化过程中,碳黑瞬时质量分数和颗粒数密度随时间的变化。对计算结果进行统计平均,可得到碳黑时均质量分数和颗粒数密度:

$$\bar{Y}_s = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} Y_s dt \quad (28)$$

$$\bar{N}_s = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} N_s dt \quad (29)$$

式中: τ 为时均周期, τ 应远大于湍流时间尺度 τ_T , 在本文的计算中选取 $\tau=20\tau_T$ 。

碳黑成核、表面长大和氧化反应的动力学常数^[11,14,16]分别取为: $A_1=10^4 \text{ s}^{-1}$, $E_1/R=2.11 \times 10^4 \text{ K}$, $A_2=0.6 \times 10^4 (\text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{0.5})$, $E_2/R=1.21 \times 10^4 \text{ K}$, $A_3=10^4 (\text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-0.5} \cdot \text{m})$, $E_3/R=1.968 \times 10^4 \text{ K}$, $A_4=1.06 \times 10^2 (\text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{0.5})$; 其他常数取为 $\varphi_{\text{OH}}=0.13$, $C_\alpha=9.0$, $C_{\text{min}}=100$, $N_A=6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, $\sigma_B=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; 碳黑的材料密度取为 $\rho_s=2000 \text{ kg/m}^3$ 。

在不同的工况条件下,分别对碳黑成核与表面长大及碳黑氧化的瞬时过程进行了计算。燃烧室内气相温度脉动强度的典型实验测量值为 $0.1 \sim 0.2$ ^[18]。在所有工况的计算中,气相温度脉动强度均分别取为 $0, 0.1$ 和 0.2 , 气相温度脉动频率均设定为 100 Hz , 计算时间步长均取为 10^{-5} s 。当进一步将时间步长降低为 $5 \times 10^{-6} \text{ s}$ 时,得到的计算结果与时间步长为 10^{-5} s 的结果相差很小。为得到碳黑时均值不随时均周期增加而变化的结果,仅对当不考虑气相温度脉动时,碳黑瞬时质量分数在时均周期内可达到稳态值的气相平均温度工况进行了计算。在碳黑成核与表面长大过程的计算中,气相平均温度分别取为 $1500, 1600, 1700$ 和 1800 K , 气相乙炔组分的初

始质量分数取为 0.02 。在碳黑氧化过程的计算中,气相平均温度分别取为 $1600, 1700$ 和 1800 K , 将碳黑成核与长大过程中不考虑气相温度脉动时计算得到的 $t=\tau=0.2 \text{ s}$ 的相应瞬时值作为碳黑质量分数和颗粒数密度的初始值,气相 O_2 和 OH 组分的初始质量分数分别取为 0.015 和 0.001 。

5 计算结果及讨论

图 1(a)~(d)给出了在碳黑成核与表面长大过程中,在气相平均温度分别为 $1500, 1600, 1700$ 和 1800 K 时,气相温度脉动对碳黑瞬时质量分数随时间变化的影响。不考虑气相温度脉动时,碳黑瞬时质量分数随时间呈现平稳的变化。在初始阶段,随着碳黑成核与表面长大反应的进行,碳黑瞬时质量分数增加较快。其后由于前驱物组分乙炔不断被消耗,碳黑质量分数逐渐趋于稳定。利用碳黑瞬时质量分数可得到碳黑瞬时体积分数为 $f_v=\rho Y_s/\rho_s$ ^[19]。在达到稳态时,碳黑体积分数的计算值为 $1.81 \times 10^{-6} \sim 2.13 \times 10^{-6}$,这与实验测量结果^[14,20]是相近的。

从图 1(a)可以看出,在气相平均温度为 1500 K 时,气相温度脉动对碳黑质量分数的瞬时变化有着显著的影响。气相温度脉动导致碳黑质量分数随时间呈波折式的变化。与不考虑气相温度脉动时相比,碳黑瞬时质量分数明显增大。而当气相温度脉动强度从 0.1 增加到 0.2 时,碳黑瞬时质量分数增加的幅度进一步变大。

图 1(b)表明在气相平均温度为 1600 K 时,考虑和不考虑气相温度脉动得到的碳黑瞬时质量分数有较明显的不同。在 $t < 0.1 \text{ s}$ 时,随着气相温度脉动强度的增加,碳黑瞬时质量分数增大得较多。在 $t > 0.15 \text{ s}$ 后,不同气相温度脉动条件下得到的碳黑质量分数很接近,这是因为前驱物乙炔已趋于消耗完毕,碳黑质量分数不再变化。

图 1(c)和 1(d)表明在气相平均温度分别为 1700 和 1800 K 时,碳黑质量分数的瞬时变化均受到了气相温度脉动的影响。与不考虑气相温度脉动时相比,在碳黑成核与生长的初期,考虑气相温度脉动时碳黑瞬时质量分数增加,增大气相温度脉动强度则对碳黑质量分数的增加有进一步的作用。随着时间的增长,在碳黑成核与生长的后期,考虑和不考虑气相温度脉动时碳黑瞬时质量分数逐渐趋于一致。但从整个时间段上的平均来看,考虑气相温度脉动仍然导致碳黑质量分数有所增加。

图 2(a)与(b)给出在碳黑成核与表面长大过程

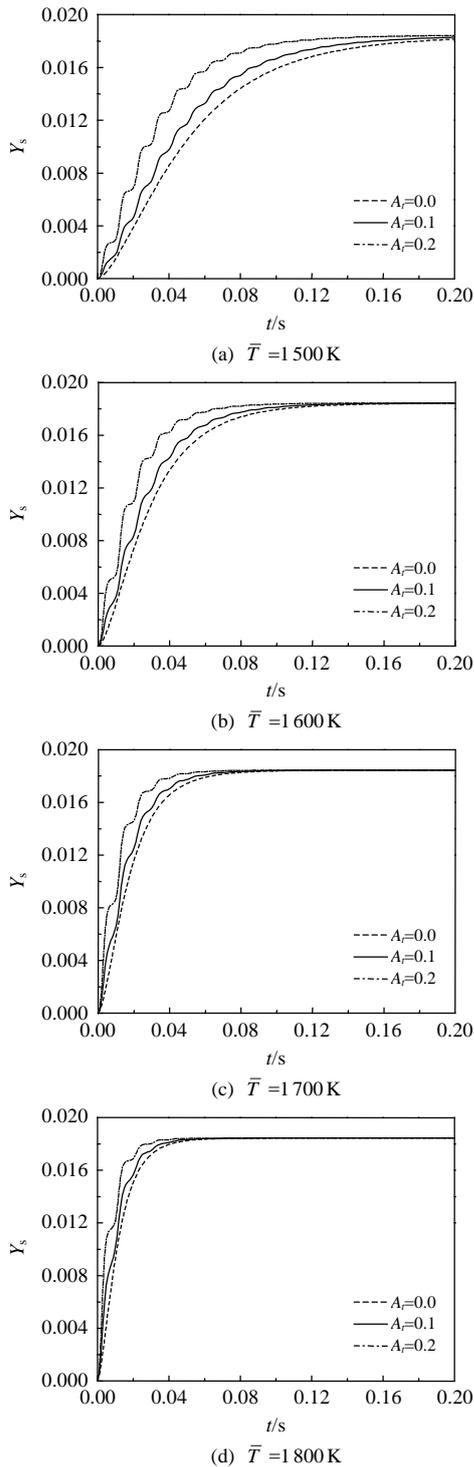


图 1 气相温度脉动对碳黑成核和表面长大过程中碳黑瞬时质量分数的影响
 Fig. 1 Effect of gas temperature fluctuation on the instantaneous variations of soot mass fraction in the processes of soot inception and surface growth

中，气相平均温度为 1 500~1 800 K 时，气相温度脉动强度对碳黑时均质量分数和颗粒数密度的影响。图中所示的碳黑时均质量分数和颗粒数密度均进行了无量纲化，是与相同气相平均温度下不考虑气相

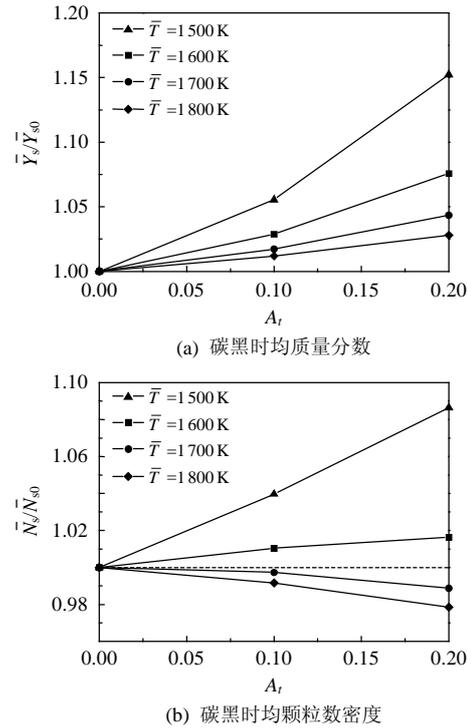


图 2 气相温度脉动对碳黑成核和表面长大过程中碳黑时均质量分数与颗粒数密度的影响
 Fig. 2 Effect of gas temperature fluctuation on the time-averaged soot mass fraction and particle number density in the processes of soot inception and surface growth

温度脉动时得到的相应时均值的比值。

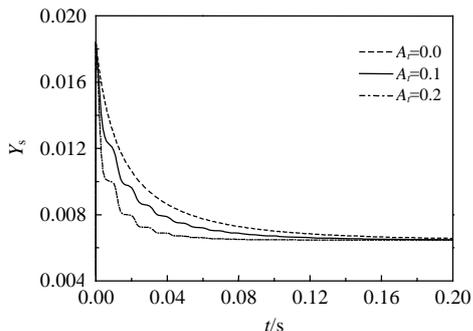
从图 2(a)可以看到，碳黑时均质量分数明显受到气相温度脉动强度的影响，气相温度脉动强度的增加使得碳黑时均质量分数较快地增加。而随着气相平均温度的升高，该影响逐渐削弱。这与当不考虑气相温度脉动时，碳黑时均质量分数随气相平均温度的升高而增大，且增大的幅度逐渐减弱的变化趋势是一致的。

从图 2(b)中可以看出，当气相平均温度为 1 500 和 1 600 K 时，随着气相温度脉动强度的增大，碳黑时均颗粒数密度逐渐增加，但增加的幅度随气相平均温度的升高而减弱。当气相平均温度为 1 700 和 1 800 K 时，碳黑时均颗粒数密度随气相温度脉动强度的增加而逐渐减少。气相平均温度升高时，该影响变得更加明显。在不考虑气相温度脉动时，当气相温度从 1 500 K 升高到 1 600 K，碳黑时均颗粒数密度增大。而当气相温度从 1 700 K 升高到 1 800 K 时，碳黑时均颗粒数密度则下降。因此，在不同气相平均温度下碳黑时均颗粒数密度随气相温度脉动强度的变化与不考虑气相温度脉动时碳黑时均颗粒数密度随气相平均温度变化的趋势相同。碳

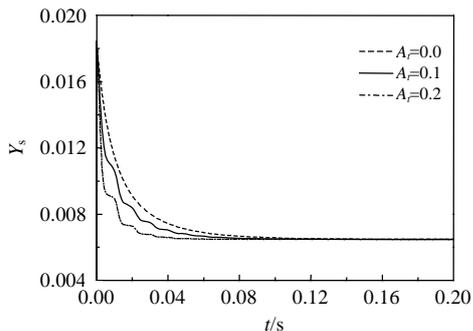
黑颗粒数密度的变化是碳黑成核与凝并反应共同作用的结果。在气相平均温度为 1500 和 1600 K 时, 随气相平均温度或温度脉动强度的增大, 碳黑成核反应增强, 而成核反应加强导致的碳黑颗粒数密度变大又使得碳黑凝并反应增强。从整个时均周期上的平均来看, 碳黑成核反应依然比凝并反应的作用要强, 因此碳黑时均颗粒数密度随气相平均温度或温度脉动强度的增加而增大。在气相平均温度为 1700 和 1800 K 时, 气相平均温度或温度脉动强度增大引起的碳黑成核反应增强使碳黑颗粒数密度有显著的增大, 这又进一步导致碳黑凝并反应增强的幅度变得更大。从时均周期的平均结果来看, 碳黑凝并反应要比成核反应的作用逐渐增强, 因而碳黑时均颗粒数密度随气相平均温度或温度脉动强度的增加逐渐下降。

图 3(a)–(c)给出了在碳黑氧化过程中, 气相平均温度分别为 1600, 1700 和 1800 K 时, 气相温度脉动对碳黑瞬时质量分数随时间变化的影响。不考虑气相温度脉动时, 碳黑瞬时质量分数随时间呈平稳减少的趋势。在碳黑氧化初期, 碳黑瞬时质量分数下降较快。而随着时间的增长和氧化反应的进行, 氧化组分 O_2 和 OH 的浓度不断降低, 碳黑质量分数的变化逐渐趋于平缓, 并达到稳定值。

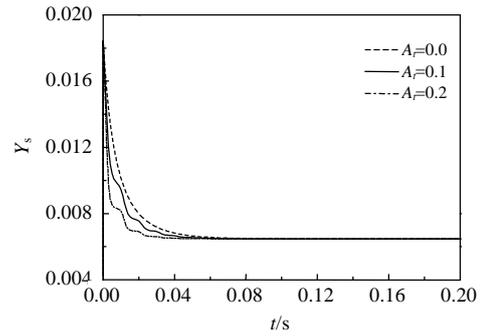
图 3(a)表明在气相平均温度为 1600 K 时, 气相温度脉动对碳黑瞬时质量分数随时间的变化有较明显的影响。在碳黑氧化初期, 与不考虑气相温度



(a) $\bar{T} = 1600\text{ K}$



(b) $\bar{T} = 1700\text{ K}$



(c) $\bar{T} = 1800\text{ K}$

图 3 气相温度脉动对碳黑氧化过程中碳黑瞬时质量分数的影响

Fig. 3 Effect of gas temperature fluctuation on the instantaneous variations of soot mass fraction in the processes of soot oxidation

脉动相比, 气相温度脉动导致碳黑瞬时质量分数的下降变快。当气相温度脉动强度从 0.1 增大到 0.2 时, 碳黑瞬时质量分数下降得更快。但随着时间的增加, 考虑与不考虑气相温度脉动得到的碳黑瞬时质量分数逐渐趋于相当。由于氧化组分逐渐消耗完毕, 碳黑质量分数不再发生变化。

从图 3(b)与(c)可以看出, 在气相平均温度为 1700 和 1800 K 时, 碳黑质量分数的瞬时变化也受到了气相温度脉动的作用。在碳黑氧化初期, 考虑气相温度脉动比不考虑气相温度脉动的碳黑瞬时质量分数低, 这一趋势在气相温度脉动强度增加时更为明显。随着时间的发展, 考虑与不考虑气相温度脉动时的碳黑瞬时质量分数逐渐趋于相同。从平均上来看, 气相温度脉动仍使得碳黑质量分数有所减少。

图 4(a)与(b)给出了在碳黑氧化过程中, 气相平均温度为 1600~1800 K 时, 气相温度脉动强度对碳黑时均质量分数和颗粒数密度的影响。与图 2 类似, 该图对碳黑时均质量分数和颗粒数密度进行了无量纲化。由图 4 可知, 随着气相温度脉动强度的增加, 碳黑时均质量分数减少, 而碳黑时均颗粒数密度则有所增加。该影响随着气相平均温度的升高而逐渐减弱。

在碳黑氧化过程中, 碳黑质量分数的变化受到 O_2 和 OH 氧化反应的作用。随着气相平均温度或温度脉动强度的增大, 氧化反应增强, 这导致碳黑瞬时质量分数随时间的下降加快。因此碳黑时均质量分数随气相温度脉动强度的增加而减少。碳黑颗粒数密度的变化则仅与凝并反应有关, 瞬时颗粒数密度随时间总是逐渐减少的。但在颗粒

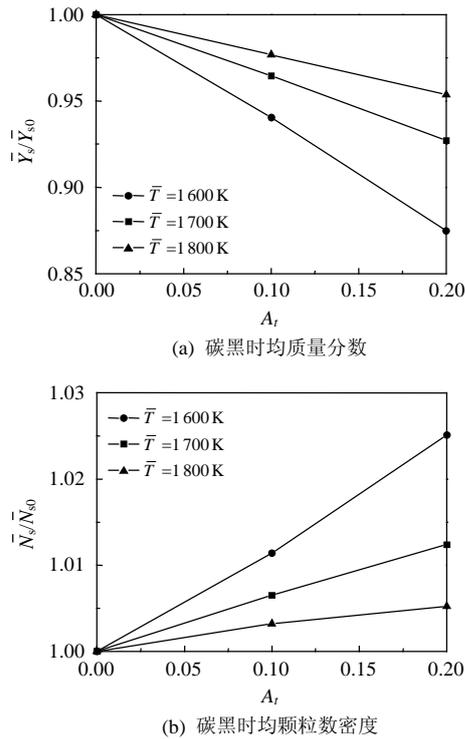


图 4 气相温度脉动对碳黑氧化过程中碳黑时均质量分数和颗粒数密度的影响

Fig. 4 Effect of gas temperature fluctuation on the time-averaged soot mass fraction and particle number density in the processes of soot oxidation

数密度不再增加的情况下，碳黑凝并反应的瞬时速率随气相平均温度或温度脉动强度的增加而减弱。因此，与不考虑气相温度脉动相比，考虑气相温度脉动会减少碳黑瞬时颗粒数密度的下降。这意味着碳黑时均颗粒数密度随气相温度脉动强度的增加而逐渐增大。

6 结论

本文对有温度脉动的平均温度为 1500~1800 K 的气流中，碳黑成核与表面长大以及碳黑氧化的瞬时过程进行了数值研究，得到如下结论：

1) 碳黑成核与长大过程及碳黑氧化过程都受到了气相温度脉动的影响。在碳黑成核和表面长大过程中，气相温度脉动导致碳黑质量分数增加。这种影响随气相温度脉动强度的增加而更为明显。

2) 气相温度脉动强度对碳黑时均质量分数和颗粒数密度均有较明显的影响。在碳黑成核和表面长大过程中，碳黑时均质量分数随气相温度脉动强度的增加而增大。在碳黑氧化过程中，随气相温度脉动强度的增大，碳黑时均质量分数减少，时均颗粒数密度则有所增加。

3) 随着气相平均温度的升高，气相温度脉动强度对碳黑时均质量分数的影响逐渐减弱。

参考文献

- [1] Koshland C P. Impacts and control of air toxics from combustion[C]// Proceedings of the 26th Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh: The Combustion Institute, 1996: 2049-2065.
- [2] 蒋红梅, 王定勇. 大气可吸入颗粒物的研究进展[J]. 环境科学动态, 2001(1): 11-15.
Jiang Hongmei, Wang Dingyong. Study progress on inhalable particle in atmosphere[J]. Environmental Science Trends, 2001(1): 11-15(in Chinese).
- [3] Sunderland P B, Faeth G M. Soot formation in hydrocarbon/air laminar jet diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 1996, 105(1-2): 132-146.
- [4] Kennedy I M, Yam C, Rapp D C, et al. Modeling and measurements of soot and species in a laminar diffusion flame[J]. Combustion and Flame, 1996, 107(4): 368-382.
- [5] Smooke M D, Long M B, Connelly B C, et al. Soot formation in laminar diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 2005, 143(4): 613-628.
- [6] 杜长明, 严建华, 李晓东, 等. 利用滑动弧放电脱除烟气中多环芳烃和碳黑颗粒[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 77-81.
Du Changming, Yan Jianhua, Li Xiaodong, et al. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbon and soot particles in flue gas by gliding arc discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 77-81(in Chinese).
- [7] 王宇, 姚强, 何旭, 等. 用激光诱导可见光法测量电场影响下火焰碳烟颗粒浓度的分布变化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(8): 34-39.
Wang Yu, Yao Qiang, He Xu, et al. Electric field control of soot distribution in flames using laser-induced incandescence [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(8): 34-39(in Chinese).
- [8] 何旭, 马骁, 王建昕. 用激光诱导炽光法定量测量火焰中的碳烟浓度[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(4): 344-348.
He Xu, Ma Xiao, Wang Jianxin. Quantitative soot concentration measurement of flame by laser induced incandescence[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2009, 15(4): 344-348(in Chinese).
- [9] Bockhorn H. A short introduction to the problem-structure of the following parts[C]//Soot Formation in Combustion: Mechanisms and Models, Berlin: Springer-Verlag, 1994: 3-7.
- [10] Kennedy I M. Models of soot formation and oxidation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(2): 95-132.
- [11] Leung K M, Lindstedt R P, Jones W P. A simplified reaction mechanism for soot formation in nonpremixed flames[J]. Combustion and Flame, 1991, 87(3-4): 289-305.
- [12] Lindstedt R P. Simplified soot nucleation and surface growth steps for non-premixed flames[C]//Soot Formation in Combustion : Mechanisms and Models, Berlin: Springer-Verlag, 1994: 417-441.
- [13] Liu F, Guo H, Smallwood G J, et al. Numerical modelling of soot formation and oxidation in laminar coflow non-smoking and smoking

- ethylene diffusion flames[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2003, 7(2): 301-315.
- [14] Guo H, Liu F, Smallwood G J. Soot and NO formation in counterflow ethylene/oxygen/nitrogen diffusion flames[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2004, 8(3): 475-489.
- [15] Puri R, Santoro R J, Smyth K C. The oxidation of soot and carbon monoxide in hydrocarbon diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 1994, 97(2): 125-144.
- [16] Neoh K G, Howard J B, Sarofim A F. Soot oxidation in flames[C]// *Particulate Carbon: Formation During Combustion*, New York: Plenum, 1981: 261-282.
- [17] Patankar S V. *Numerical heat transfer and fluid flow*[M]. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1980: 41-78.
- [18] Hedman P O, Warren D L. Turbulent velocity and temperature measurements from a gas-fueled technology combustor with a practical fuel injector[J]. *Combustion and Flame*, 1995, 100(1-2): 185-192.
- [19] Said R, Garo A, Borghi R. Soot formation modeling for turbulent flames[J]. *Combustion and Flame*, 1997, 108(1-2): 71-86.
- [20] Mauss F, Schafer T, Bockhorn H. Inception and growth of soot particles in dependence on the surrounding gas phase[J]. *Combustion and Flame*, 1994, 99(3-4): 697-705.



陈莹

收稿日期: 2010-11-01。

作者简介:

陈莹(1983), 女, 博士研究生, 主要从事湍流燃烧的研究, chying05@gmail.com;

张健(1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事湍流多相流动与燃烧的研究, jianzhang@mail.tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 张媛媛)