

反应速率对层流扩散火焰特性的影响

谢欣容¹, 刘石²

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 2. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要:为探究燃烧过程中火焰结构和烟黑特性的变化规律,对层流乙烯/空气扩散火焰进行了数值模拟,分析了不同成核过程和表面生长过程中,反应速率常数的指前因子及活化能对层流乙烯/空气扩散火焰温度和烟黑体积分数的影响。结果表明:成核反应速率常数中,指前因子增大,火焰温度降低,烟黑体积分数增大,当指前因子提高50%时,在轴向高度3 cm位置对应的火焰温度峰值减小0.70%,烟黑体积分数的峰值增大37.98%;活化能增加,火焰温度增大,烟黑体积分数减小,当活化能提高50%时,在轴向高度3 cm位置对应的火焰温度峰值增大3.41%,烟黑体积分数的峰值减小78.92%;表面生长反应速率常数中,指前因子增大,火焰温度逐渐减小,烟黑体积分数逐渐增大,当指前因子提高50%时,在轴向高度3 cm位置对应的火焰温度峰值减小2.03%,烟黑体积分数的峰值增大1.65倍;活化能增加,使火焰温度升高,烟黑体积分数减小,当活化能提高50%,在轴向高度3 cm位置对应的火焰温度峰值增大9.61%,当活化能提高12.5%,烟黑体积分数的峰值减小46.68%。

关键词:扩散火焰;数值模型;成核速率;表面生长速率;温度;烟黑体积分数;指前因子;活化能

中图分类号:Q038.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.05.006

[引用本文格式]谢欣容,刘石.反应速率对层流扩散火焰特性的影响[J].热能动力工程,2022,37(5):38-45. XIE Xin-rong, LIU Shi. Effect of reaction rate on the characteristics of laminar diffusion flame[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 38-45.

Effect of Reaction Rate on the Characteristics of Laminar Diffusion Flame

XIE Xin-rong¹, LIU Shi²

(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206;
2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206)

Abstract: To explore the variation rules of flame structure and soot characteristics during the combustion process, a laminar ethylene and air diffusion flame was numerically simulated. The effect of pre-exponential factors and activation energy of the reaction rate constants on the laminar ethylene and air diffusion flame temperature and soot volume fraction in different nucleation and surface growth processes was analyzed. The research results show that the flame temperature decreases and the soot volume fraction increases with the increase of pre-exponential factor in the nucleation reaction rate constants. When the pre-exponential factor increases by 50%, the peak of flame temperature corresponding to the axial height of 3 cm decreases by 0.70% and the peak of soot volume fraction increases by 37.98%. The flame temperature increases and the soot volume fraction decreases with the increase of activation energy. When the activation energy increases by 50%, the peak of flame temperature corresponding to the axial height of 3 cm increases by 3.41%, and the peak of soot volume fraction decreases by 78.92%. The flame temperature gradually decreases and the soot volume fraction gradually increases with the increase of pre-exponential

factor in the surface growth reaction rate constants. When the pre-exponential factor increases by 50%, the peak of flame temperature corresponding to the axial height of 3 cm decreases by 2.03%, and the peak of soot volume fraction increases by 1.65 times. The flame temperature increases and the soot volume fraction decreases with the increase of activation energy. When the activation energy increases by 50%, the peak of flame temperature corresponding to the axial height of 3 cm increases by 9.61%; and when the activation energy increases by 12.5%, the peak of soot volume fraction decreases by 46.68%.

Key words: diffusion flame, numerical model, nucleation rate, surface growth rate, temperature, soot volume fraction, pre-exponential factors, activation energy

引言

随着世界各国对能源需求的不断增加,化石燃料燃烧在消耗能源的同时产生的环境问题也日趋严重^[1-2]。烟黑(soot)是化石燃料燃烧的一种污染物^[3],其直径大约在1 nm,容易进入人体的呼吸系统加剧疾病的产生;烟黑颗粒的辐射性很强,是导致火灾向外扩张的重要原因^[4]。但是,烟黑辐射又是锅炉中重要的传热方式。

国内外学者对火焰中烟黑的形成做了很多研究工作。有3种主要的数值模型用于计算燃烧系统中的烟黑形成^[5]:(1)应用详细的化学反应模型对速率方程进行数值求解^[6],鉴于燃烧过程的复杂性,很难将烟黑模型的详细描述应用于多维流,而且该模型需要较长的计算时间;(2)纯粹的经验模型,使用实验数据之间的相关性预测碳负荷趋势,必须调整模型常数使其与测量数据一致;(3)采用半经验烟黑模型,基于真实相关的实验数据输入来求解其速率方程,这种方法试图将物理现象与化学现象结合起来,而不是在实验数据之间建立直接联系。

近年来,研究者在简化的碳烟模型上进行了大量的数值模拟。Leung等人^[7]开发了一种基于乙炔的半经验双方程烟黑模型,假设该模型基于矩量法,并且烟黑的形成取决于燃料的分解过程。Celis等人^[8]描述了7种不同甲烷/空气化学动力学机制的评估,用于烟黑形成机制的研究,结果表明,当使用半经验的简化机制时,可以节省高达57%的成本,烟黑体积分数预测值在4%~11%之间。Liu等人^[9]采用半经验双方程模型对常压下逆流乙烯扩散火焰中烟黑形成进行了数值研究,并且研究了气体和烟黑辐射对烟黑形成的影响。Yunardi等人^[10]

研究了4种不同的表面生长速率模型对湍流火焰中烟黑体积分数的影响,结果表明,使用 $k-\varepsilon$ 和雷诺应力模型的两种乙烯火焰在温度预测方面存在显著差异。另外,碳烟体积分数的预测对表面生长的建模非常敏感。

综上,如何准确地呈现火焰中烟黑的生长,以及明确相关因素如何影响火焰结构和烟黑变化尤为重要。本文采用详细的气相反应机理和简单双方程烟黑模型,模拟层流乙烯/空气扩散火焰中烟黑的形成过程,分析不同参数对燃烧火焰温度(T)、烟黑体积分数(SVF)分布产生的影响,以及对火焰结构的影响。

1 火焰特性和数值方法

本文模拟的火焰是在大气压力下的轴对称、层流、同流乙烯/空气扩散火焰,燃烧器是内径为10.74 mm的燃料管,周围有一个用于输送氧化剂的环形管,壁厚1.03 mm,内径约88 mm。燃料和氧化剂的流动速度分别为3.54和62.52 cm/s。离散控制方程采用标准控制容积法进行求解,压力耦合方程应用交错网格的经典SIMPLE数值算法处理。在乙烯/空气扩散火焰燃烧的数值模拟过程中,涉及质量、动量、能量和状态等控制方程^[11]在圆柱坐标(r, z)中的离散。采用三对角矩阵算法(TDMA)^[12-13]求解离散方程组(能量、动量以及压力修正),应用的气相反应机理和相关运输、热特性由子程序CHEMKIN和数据库GRI-Mech3.0获得。

数值模拟应用 $88(r) \times 333(z)$ 个控制体在 $6\text{ cm}(r) \times 15.35\text{ cm}(z)$ 的区域中进行非均匀网格计算,用以节省计算时间,如图1所示。在径向方向(r)上0~1.2 cm区域间使用非常细的网格。在所有的计算中,乙烯在300 K的初始温度下被输送到

燃料流中,收敛条件为相邻两次迭代结果中烟黑体积分数的最大值相对变化小于 1×10^{-5} 。

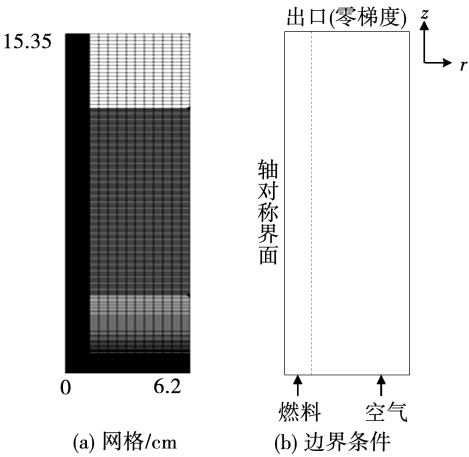


图 1 网格与边界条件
Fig. 1 Grid and boundary conditions

2 数值模拟

应用简化的双方程模型模拟烟黑的形成过程,并且假设乙炔是成核和表面生长的唯一组分^[5]。基于碳原子守恒定律,烟黑成核和表面生长可表示为 $C_2H_2 \rightarrow 2C(S) + H_2$ 和 $C_2H_2 + nC(S) \rightarrow (n+2)C(S) + H_2$,成核速率和表面生长速率分别为:

$$R_1 = c_{C_2H_2} k_1(T) \tag{1}$$

$$R_2 = c_{C_2H_2} k_2(T) S \tag{2}$$

其速率常数分别为:

$$k_1 = A_1 \cdot \exp(-E_1/RT) \tag{3}$$

$$k_2 = A_2 \cdot \exp(-E_2/RT) \tag{4}$$

式中: $c_{C_2H_2}$ —乙炔摩尔浓度, mol/L; S —碳烟单位体积的表面积, m^{-1} ; A_1, A_2 — k_1, k_2 的指前因子, 作为确定这两个步骤中火焰应用的经验常数; E_1, E_2 —相应的活化能, kJ/mol; R —摩尔气体常量, J/(mol · K); T —燃烧火焰温度, K。

在该数值模拟的辐射模型中,使用统计窄带相关 k 模型 (SNBCK)^[14] 计算每个波段燃烧产物 (H_2O, CO_2, CO) 的吸收系数。烟黑的光谱吸收系数为 $5.5f_v/\lambda$, 其中 f_v 表示烟黑的体积分数, λ 表示频带中心的波数。在二维轴对称圆柱坐标系下,采用离散坐标法 (DOM)^[15] 计算辐射传输方程。

3 结果与分析

温度是火焰燃烧特性优劣的重要标志,烟黑是火焰燃烧过程中颗粒污染物的重要成分。根据成核和表面生长反应速率中不同参数的变化,分别讨论这些参数对温度的影响以及对烟黑体积分数特性产生的影响。选取参考文献[3]中的烟黑模型为标准模型,将各参数(A_1, E_1, A_2, E_2)相应地减小 20%,减小 10%,增加 10%,增加 20%,增加 50% 作为数值模型进行分析,案例模型如表 1 所示。

表 1 变参数模型的选取
Tab. 1 Selection of variable parameter model

案例模型	A_1	$E_1/kJ \cdot mol^{-1}$	A_2	$E_2/kJ \cdot mol^{-1}$
标准	1.7	15 000	6	12 000
1	1.36(-20%)	15 000	6	12 000
2	1.53(-10%)	15 000	6	12 000
3	1.87(+10%)	15 000	6	12 000
4	2.04(+20%)	15 000	6	12 000
5	2.55(+50%)	15 000	6	12 000
6	1.7	12 000(-20%)	6	12 000
7	1.7	13 500(-10%)	6	12 000
8	1.7	16 500(+10%)	6	12 000
9	1.7	18 000(+20%)	6	12 000
10	1.7	22 500(+50%)	6	12 000
11	1.7	15 000	4.8(-20%)	12 000
12	1.7	15 000	5.4(-10%)	12 000
13	1.7	15 000	6.6(+10%)	12 000
14	1.7	15 000	7.2(+20%)	12 000
15	1.7	15 000	9(+50%)	12 000
16	1.7	15 000	6	9 600(-20%)
17	1.7	15 000	6	10 800(-10%)
18	1.7	15 000	6	13 200(+10%)
19	1.7	15 000	6	14 400(+20%)
20	1.7	15 000	6	18 000(+50%)

相对于标准模型,各参数独立增加 20% 的模型(案例 4,9,14,19)对应的火焰温度分布如图 2 所示,对应的峰值温度 T_{max} 分别为 2 036 K ($r = 0.49$ cm, $z = 1.99$ cm), 2 035 K ($r = 0.50$ cm, $z = 1.80$ cm), 2 039 K ($r = 0.49$ cm, $z = 2.03$ cm), 2 033 K ($r = 0.5$ cm, $z = 1.8$ cm) 和 2 043 K ($r = 0.46$ cm, $z =$

2.52 cm)。可以看出, $T_{\max}$ 没有出现在火焰中心线位置,而是在较低位置的环形区域,并且 $T_{\max}$ 的径向位置几乎没有发生变化,只有案例 19 对应的 $T_{\max}$ 径向位置更加靠近中心线。上述案例中 SVF 的分布情况如图 3 所示。对应的峰值烟黑体积分数 $SVF_{\max}$ 分别为 5.72‰ ($r = 0.19\text{ cm}, z = 3.69\text{ cm}$), 6.54‰

($r = 0.19\text{ cm}, z = 3.65\text{ cm}$), 2.52‰ ($r = 0.2\text{ cm}, z = 3.69\text{ cm}$), 8.50‰ ($r = 0.19\text{ cm}, z = 3.61\text{ cm}$) 和 0.68‰ ($r = 0.21\text{ cm}, z = 3.43\text{ cm}$)。可以得出, $SVF_{\max}$ 与 $T_{\max}$ 相同,仍出现在环形区域; A_1, A_2 的增加使 $T_{\max}$ 减小, $SVF_{\max}$ 增大; E_1, E_2 的增加使 $T_{\max}$ 增加, $SVF_{\max}$ 减小。

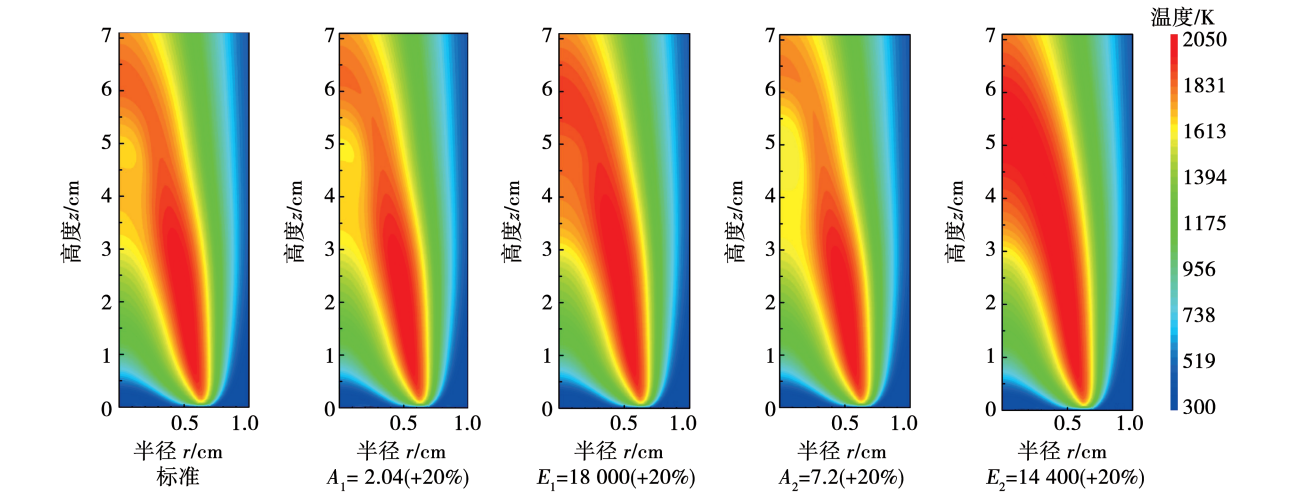


图 2 不同模拟案例的火焰温度分布

Fig. 2 Distributions of flame temperature under different cases of simulation

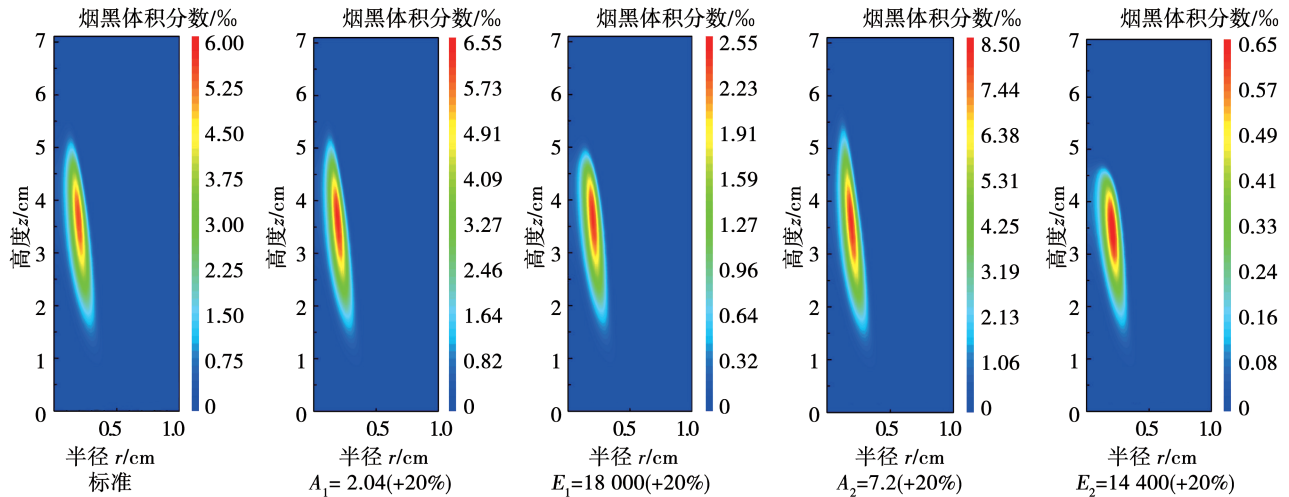


图 3 不同模拟案例的烟黑体积分数分布

Fig. 3 Distributions of soot volume fraction under different cases of simulation

3.1 指前因子 A_1 对 T 和 SVF 径向分布的影响

图 4 给出了成核反应速率中不同指前因子对应的径向温度变化,温度随着 A_1 的增加而减小。由图 4(a)可知,当 $z = 3\text{ cm}$ 时, A_1 由 1.36 增加到 2.55,对应的 $T_{\max}$ 分别为 2 012, 2 008, 2 001, 1 998 和

1 989 K; 当 A_1 提高 50% (由 1.36 增加到 2.04), 对应的 $T_{\max}$ 减小 0.70%, 径向温度变化相对较小。由图 4(b)可知,当 $z = 4.5\text{ cm}$ 时,对应的 $T_{\max}$ 分别为 1 895, 1 887, 1 872, 1 866 和 1 850 K, A_1 提高 50%, $T_{\max}$ 减小 1.53%, 即随着轴向高度的增加, A_1 的变化

对 $T_{\max}$ 的影响也逐渐增大。

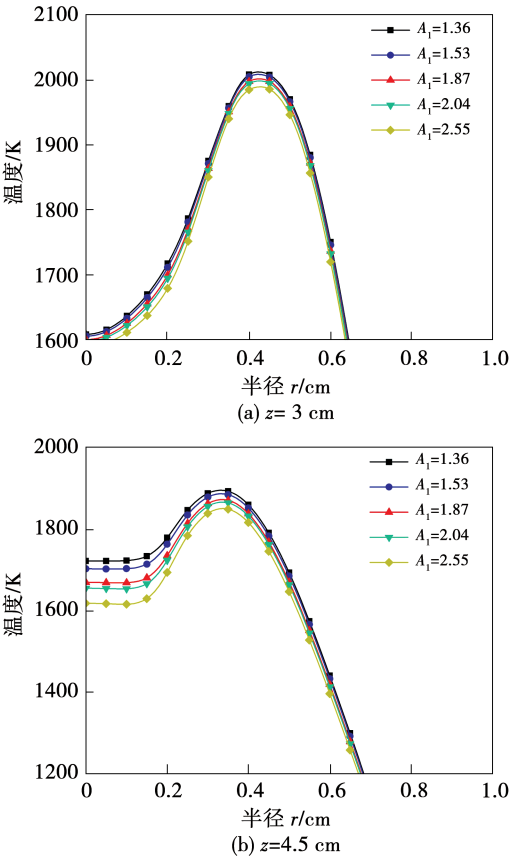


图 4 不同 A_1 对应的温度径向分布

Fig. 4 Radial distributions of temperature under different A_1

图 5 给出了在成核反应速率中不同指前因子对应的烟黑体积分数径向的变化情况。径向 SVF 随着 A_1 的增加而不断增大。由图 5(a) 可知, 当 $z = 3\text{ cm}$ 时, A_1 由 1.36 增加到 2.55, 对应的 $SVF_{\max}$ 分别为 4.16‰, 4.58‰, 5.37‰, 5.74‰ 和 6.80‰; 当 A_1 提高 50% 时, 对应的 $SVF_{\max}$ 增大 37.98%, 变化相对较大。由图 5(b) 可知, 当 $z = 4.5\text{ cm}$ 时, 对应的 $SVF_{\max}$ 分别为 3.06‰, 3.36‰, 3.93‰, 4.19‰ 和 4.92‰; 当 A_1 提高 50% 时, 对应的 $SVF_{\max}$ 增大 36.93%, 即随着 z 的增加, $SVF_{\max}$ 的增大程度没有明显变化, 其径向位置更加靠近中心线。

3.2 活化能 E_1 对 T 和 SVF 径向分布的影响

图 6 给出了在成核反应速率中不同活化能对应的径向温度变化, 温度随着 E_1 的增加而增大。

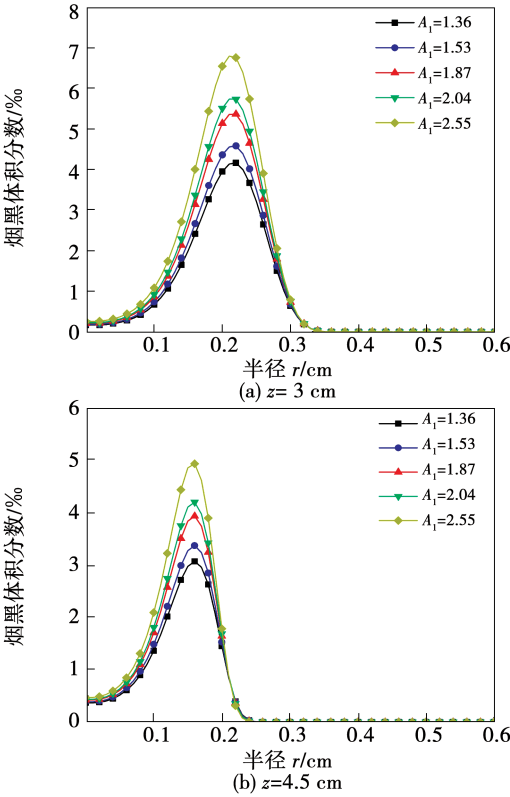


图 5 不同 A_1 对应的 SVF 径向分布

Fig. 5 Radial distributions of soot volume fraction under different A_1

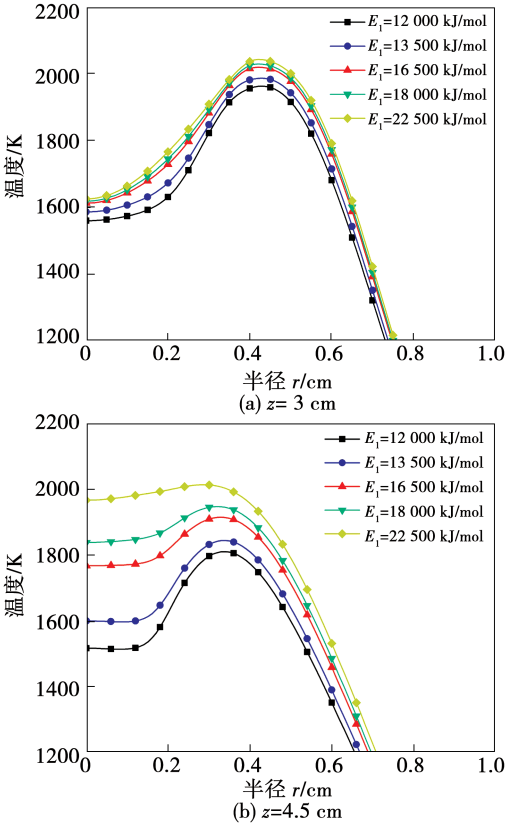


图 6 不同 E_1 对应的温度径向分布

Fig. 6 Radial distributions of temperature under different E_1

由图 6 (a) 可知,在 $z = 3\text{ cm}$ 时, E_1 由 $12\,000\text{ kJ/mol}$ 增加到 $22\,500\text{ kJ/mol}$,对应的 $T_{\max}$ 分别为 $1\,962, 1\,986, 2\,019, 2\,029$ 和 $2\,042\text{ K}$ 。当 E_1 提高 50% (由 $12\,000$ 增加到 $18\,000$) 时,对应的 $T_{\max}$ 增大 3.41% ,径向温度变化相对较小。由图 6 (b) 可知,在 $z = 4.5\text{ cm}$ 时,相应的 $T_{\max}$ 分别为 $1\,810, 1\,844, 1\,915, 1\,947$ 和 $2\,013\text{ K}$ 。当 E_1 提高 50% 时, $T_{\max}$ 增大 7.57% ,即 E_1 提高 50% 时, $T_{\max}$ 在 $z = 4.5\text{ cm}$ 时的增加比例为 $z = 3\text{ cm}$ 时的 2.2 倍。

图 7 给出了在成核反应速率中不同活化能对应的径向烟黑体积分数的变化情况,径向 SVF 随着 E_1 的增加而减小。

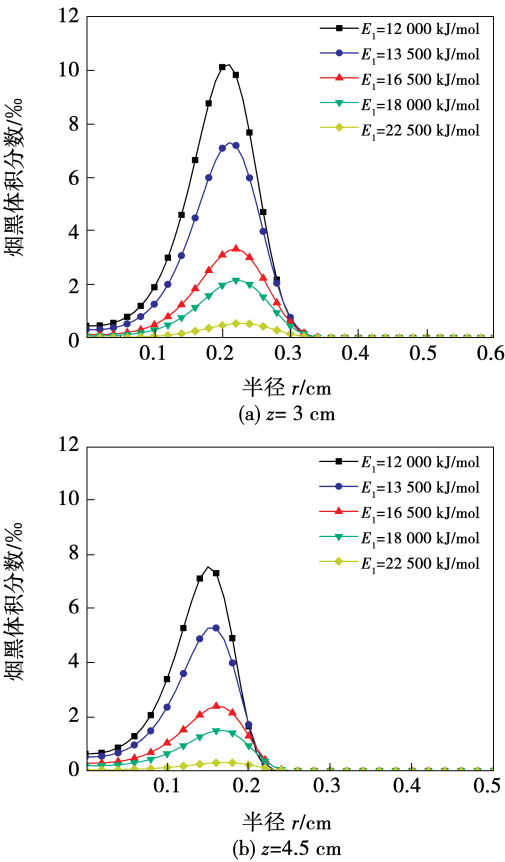


图 7 不同 E_1 对应的 SVF 径向分布

Fig. 7 Radial distributions of soot volume fraction under different E_1

由图 7 (a) 可知,在 $z = 3\text{ cm}$ 时, E_1 由 $12\,000\text{ kJ/mol}$ 增加到 $22\,500\text{ kJ/mol}$,对应的 $SVF_{\max}$ 分别为 $10.20\%, 7.28\%, 3.32\%, 2.15\%$ 和 0.54% 。当 E_1 提高 50% 时, $SVF_{\max}$ 减小 78.92% ,变化相对较大。由图 7 (b) 可知,在 $z = 4.5\text{ cm}$ 时,对应的 $SVF_{\max}$ 分别为 $7.55\%, 5.28\%, 2.40\%, 1.50\%$ 和 0.31% 。当 E_1

提高 50% 时, $SVF_{\max}$ 减小 80.13% ,相比 $z = 3\text{ cm}$ 时 $SVF_{\max}$ 的变化范围相差不大。相对于 $T_{\max}$, E_1 的变化对 $SVF_{\max}$ 的影响更明显,并且随着 z 的增加, $SVF_{\max}$ 的径向位置更加靠近中心线。

3.3 指前因子 A_2 对 T 和 SVF 径向分布的影响

图 8 给出了在表面生长反应速率中不同指前因子对应的径向温度变化,温度随着 A_2 的增加而减小。由图 8 (a) 可知,当 $z = 3\text{ cm}$ 时, A_2 由 4.8 增加到 9 ,对应的 $T_{\max}$ 分别为 $2\,023, 2\,015, 1\,994, 1\,982$ 和 $1\,946\text{ K}$ 。当 A_2 提高 50% (由 4.8 增加到 7.2) 时, $T_{\max}$ 减小 2.03% ,径向温度变化相对较小。由图 8 (b) 可知,当 $z = 4.5\text{ cm}$ 时,对应的 $T_{\max}$ 分别为 $1\,930, 1\,904, 1\,856, 1\,835$ 和 $1\,781\text{ K}$ 。当 A_2 提高 50% 时,对应的 $T_{\max}$ 减小 4.92% , $T_{\max}$ 变化范围相比于 $z = 3\text{ cm}$ 时有所增大。

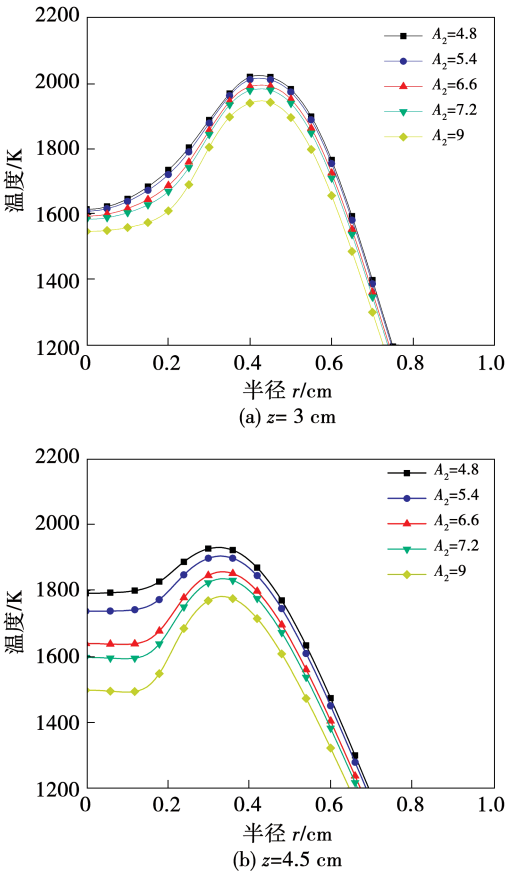


图 8 不同 A_2 对应的温度径向分布

Fig. 8 Radial distributions of temperature under different A_2

图 9 给出了在表面生长反应速率中不同指前因子对应的径向烟黑体积分数的变化情况, SVF 随着

A_2 的增加而不断增大。由图 9(a)可知,当 $z=3\text{ cm}$ 时, A_2 由 4.8 增加到 9,对应的 $SVF_{\max}$ 分别为 2.85‰, 3.85‰, 6.21‰, 7.54‰和 11.77‰。当指前因子提高 50%时, $SVF_{\max}$ 增大 1.65 倍。由图 9(b)可知,当 $z=4.5\text{ cm}$ 时,对应的 $SVF_{\max}$ 分别为 1.87‰, 2.70‰, 4.70‰, 5.83‰和 9.57‰。当 A_2 提高 50% 时, $SVF_{\max}$ 增大 2.12 倍。从图中可以看出,与 A_1 的变化规律相同, A_2 的变化对 $SVF_{\max}$ 的影响较大,并且随着 z 的增加, $SVF_{\max}$ 的径向位置更加靠近中心线。

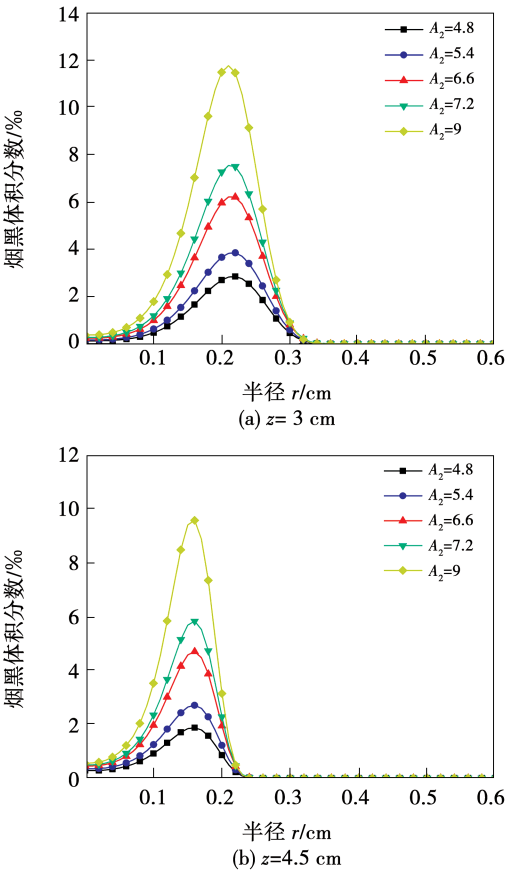


图 9 不同 A_2 对应的 SVF 径向分布
Fig. 9 Radial distributions of soot volume fraction under different A_2

3.4 活化能 E_2 对 T 和 SVF 径向分布的影响

图 10 给出了在表面生长反应速率中不同活化能对应的径向温度变化,温度随着 E_2 的增加而增大。由图 10(a)可知,在 $z=3\text{ cm}$ 时, E_2 由 9 600 kJ/mol 增加到 18 000 kJ/mol,对应的 $T_{\max}$ 分别为 1 863, 1 949, 2 032, 2 042 和 2 046 K。当 E_2 提高 50% (由 9 600 kJ/mol 增加到 14 400 kJ/mol) 时, $T_{\max}$ 增大约 9.61%。由图 10(b)可知,在 $z=4.5\text{ cm}$

时,对应的 $T_{\max}$ 分别为 1 685, 1 783, 1 963, 2 015 和 2 047 K。当 E_2 提高 50% 时, $T_{\max}$ 增大 19.58%, 即 E_2 提高 50% 时, $z=4.5\text{ cm}$ 时的 $T_{\max}$ 增加比例为 $z=3\text{ cm}$ 时的 2 倍。

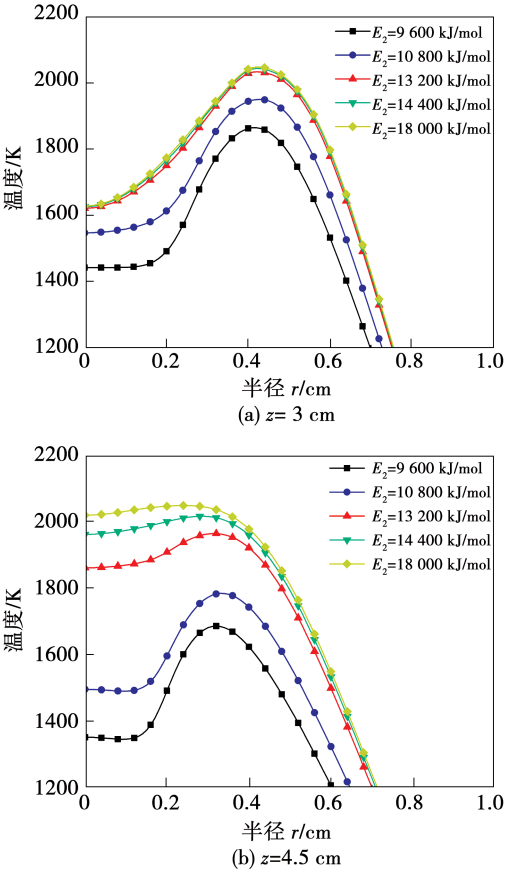


图 10 不同 E_2 对应的温度径向分布
Fig. 10 Radial distributions of temperature under different E_2

图 11 给出了在表面生长反应速率中不同活化能对应的径向烟黑体积分数的变化情况,径向 SVF 随着 E_2 的增加而减小。由图 11(a)可知,在 $z=3\text{ cm}$ 时, E_2 由 9 600 kJ/mol 增加到 18 000 kJ/mol,对应的 $SVF_{\max}$ 分别为 21.87‰, 11.66‰, 1.81‰, 0.61‰和 0.027‰。当 E_2 提高 12.5% (由 9 600 kJ/mol 增加到 10 800 kJ/mol) 时, $SVF_{\max}$ 减小 46.68%, 变化相对较大。由图 11(b)可知,在 $z=4.5\text{ cm}$ 时,对应的 $SVF_{\max}$ 分别为 20.50‰, 9.68‰, 1.00‰, 0.19‰和 0.001‰。当 E_2 提高 12.5% 时, $SVF_{\max}$ 减小 52.78%, 相比于 $T_{\max}$, E_2 的变化对 $SVF_{\max}$ 的影响更大,并

且随着 z 的增加, $SVF_{\max}$ 的径向位置更加靠近中心线。

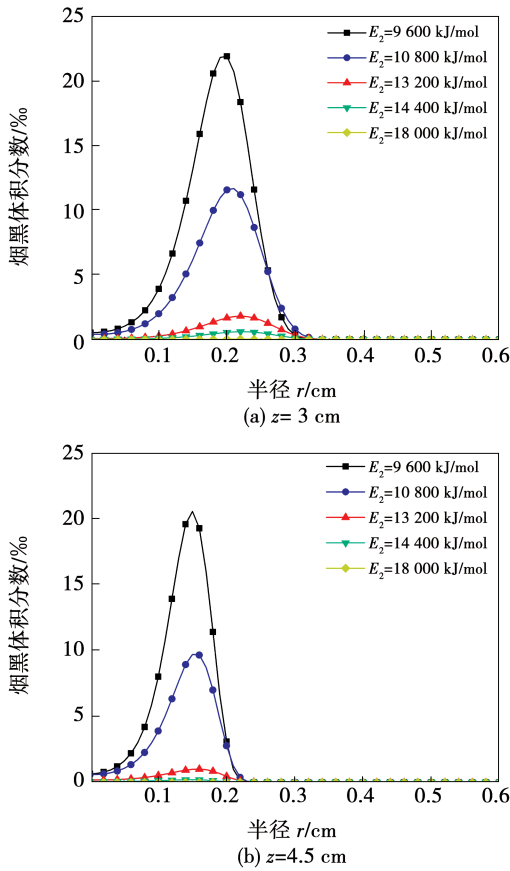


图 11 不同 E_2 对应的 SVF 径向分布

Fig. 11 Radial distributions of soot volume fraction under different E_2

4 结 论

对层流乙烯/空气火焰进行了数值模拟,分析反应速率常数中各参数变化对火焰温度和烟黑体积分数的影响,得出结论:

- (1) 随着 A_1 和 A_2 增大,火焰温度逐渐减小, SVF 逐渐增大;随着 E_1 和 E_2 增大,火焰温度逐渐增大, SVF 逐渐减小。
- (2) 在径向方向上,随着 A_1 增大, T 逐渐降低, SVF 逐渐增大;随着轴向高度增加, A_1 增大使 $T_{\max}$ 降低的趋势趋于稳定,使 $SVF_{\max}$ 减小的程度提高;随着 E_1 增大, T 逐渐升高, SVF 逐渐减小;随着轴向高度增加, E_1 增大使 $T_{\max}$ 降低的程度减小,使 $SVF_{\max}$ 减小程度大幅下降。
- (3) 在径向方向上,随着 A_2 增大, T 逐渐降低,

SVF 逐渐增大;随着轴向高度增加, A_2 增大使 T 降低的程度提高,使 SVF 减小的程度大幅提高;随着 E_2 增大, T 逐渐升高, SVF 逐渐减小;随着轴向高度增加, E_2 增大使 T 降低的程度减小,使 SVF 减小的程度提高。

参考文献:

[1] 韩一庆,陈伟鹏,张天睿,等.一种新型平焰烧嘴在空气和氧气助燃条件下燃烧特性对比研究[J].热能动力工程,2021,36(7):87-92,98.
HAN Yi-qing, CHEN Wei-peng, ZHANG Tian-rui, et al. Comparative study on combustion characteristics of a new type of flat flame burner under the combustion condition of air and oxygen[J]. Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(7): 87-92, 98.

[2] 徐雪娇,贺庆,宋言明,等.气体流速对PM2.5浓度实时测量值的影响[J].自动化仪表,2019,40(2):85-87,95.
XU Xue-jiao, HE Qing, SONG Yan-ming, et al. Influence of gas flow rate on real-time concentration measurements of comparative study on combustion characteristics of a new type of PM2.5[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(2): 85-87, 95.

[3] 艾育华.基于辐射成像的扩散火焰温度和烟黑浓度分布研究[D].武汉:华中科技大学,2006.
AI Yu-hua. Study on profiles of the temperature and soot concentration by the radiative imaging[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.

[4] KOYLU U, FACTH G. Carbon monoxide and soot emissions from liquid-fueled buoyant turbulent diffusion flame[J]. Combustion and Flame, 1991, 87(1): 61-76.

[5] KENNEDY I. Models of soot formation and oxidation[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(2): 95-132.

[6] JEREZA, CONSALVI J, FUENTES A, et al. Soot production modeling in a laminar coflow ethylene diffusion flame at different oxygen indices using a PAH-based sectional model[J]. Fuel, 2018, 231(11): 404-416.

[7] LEUNG K, LINDSTED R, JONES W. A simplified reaction mechanism for soot formation in nonpremixed flames[J]. Combustion and Flame, 1991, 87(3/4): 289-305.

[8] CELIS C, FERNANDO F. Computational assessment of methane-air reduced chemical kinetic mechanisms for soot production studies[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016, 38(8): 1-20.

[9] LIU F, GUO H, SMALLWOOD G, et al. Effects of gas and soot radiation on soot formation in counterflow ethylene diffusion flames[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 84(4): 501-511.