

掺杂 H₂/CO 对 C₂H₄(O₂/CO₂) 扩散火焰中 碳烟生成的影响

高永磐,程汉翀,汪 洋,刘小芳

(安徽工业大学 能源与环境学院,安徽 马鞍山 243002)

摘要:通过消光法实验和 CoFlame 程序模拟研究 O₂/CO₂ 气氛下,掺杂 H₂/CO 对层流乙烯扩散火焰中碳烟生成的影响,获得火焰高度、温度、碳烟及重要组分含量的分布,分析主要碳烟演化过程的变化规律。结果表明:掺杂 H₂/CO 对乙烯火焰中的碳烟生成有明显抑制作用,当 H₂ 与 CO 的流量比为 0.3:0.3 时,抑制作用最强,碳烟体积分数降低 25.3%;掺杂 H₂/CO 对乙烯火焰的高度、温度影响微弱,热效应、氧化速率不是影响乙烯火焰中碳烟生成的主要因素,主要是通过抑制乙炔、苯、芘的生成抑制碳烟成核和碳烟表面增长,最终减少碳烟的生成。

关键词:掺杂 H₂/CO;消光法;O₂/CO₂ 气氛;扩散火焰;碳烟

中图分类号:TK 16 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2021.02.007

Effect of H₂/CO Doping on Soot Formation in C₂H₄(O₂/CO₂) Diffusion Flame

GAO Yongpan, CHENG Hanchong, WANG Yang, LIU Xiaofang

(School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract:The influence of H₂/CO doping on soot formation in laminar ethylene diffusion flame in O₂/CO₂ atmosphere was studied by extinction experiment and CoFlame program simulation. The distributions of flame height, temperature, content of soot and important components were obtained, and the variation of main soot evolution process was analyzed. The results show that the addition of H₂/CO has obvious inhibition effect on soot formation in ethylene flame. When the flow ratio of H₂ to CO is 0.3:0.3, the inhibition effect is the strongest, and the soot volume fraction decreases by 25.3%. The effect of H₂/CO doping on the height and temperature of ethylene flame is weak, the thermal effect and oxidation rate are not the main factors affecting soot formation in ethylene flame. It is mainly through inhibiting the formation of acetylene, benzene and pyrene, then inhibiting the soot nucleation and soot surface growth, and finally reducing the soot formation.

Key words:doping H₂/CO; light extinction method; O₂/CO₂ atmosphere; diffusion flame; soot

碳烟颗粒是碳氢燃料不完全燃烧的产物,其不仅会降低燃料的利用效率,还会造成严重的环境污染^[1-2]。因此,需发展高效清洁的燃烧技术实现碳烟减排。富氧燃烧是一项具有广阔应用前景的清洁燃烧技术,通过增大氧浓度的方式加强燃烧、提高热效率;后经发展,富氧燃烧中的氧化剂 O₂/N₂ 逐渐由 O₂/CO₂ 替代,实现了

收稿日期:2020-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51776001)

作者简介:高永磐(1995—),男,河南新密人,硕士生,主要研究方向为碳氢燃料燃烧污染物排放与控制。

通信作者:刘小芳(1976—),男,福建三明人,博士,副教授,主要研究方向为系统节能及燃烧污染物排放与控制。

引文格式:高永磐,程汉翀,汪洋,等.掺杂 H₂/CO 对 C₂H₄(O₂/CO₂) 扩散火焰中碳烟生成的影响[J].安徽工业大学学(自然科学版),2021,38(2):161-168,174.

低 NO_x 排放和 CO_2 近零排。因此,富氧燃烧受到国内外学者的关注^[3-5]。Liu等^[6]将 CO_2 加入到乙烯火焰中,发现乙炔和 NO_x 的产量减少,碳烟生成受到抑制,认为 CO_2 是通过 $\text{CO}+\text{OH} \rightleftharpoons \text{CO}_2+\text{H}$ 反应抑制碳烟生成。Guo等^[7]通过数值模拟研究了 CO_2 对乙烯/空气扩散火焰中碳烟生成的影响,得到了与Liu等^[6]相同的结论。Wang等^[8]数值模拟研究了 O_2/CO_2 气氛下 O_2 浓度对 C_2H_4 扩散火焰的影响,发现 O_2 浓度增加会导致碳烟生成增多。Zhang等^[9]研究空气和 O_2/CO_2 两种富氧气氛下 O_2 浓度对 C_2H_4 扩散火焰的影响,发现 CO_2 的热效应和化学效应能有效抑制碳烟生成。氢气作为一种清洁能源,用作添加剂时,能强化燃烧性能、减少污染物生成。Gülder等^[10]通过实验发现向燃料中掺杂 H_2 能抑制 C_2H_4 , C_3H_8 和 C_4H_{10} 火焰的碳烟生成;Guo等^[11]和Zhao等^[12]分别模拟和实验研究了掺杂He和 H_2 对层流 C_2H_4 火焰中碳烟生成的影响,均发现 H_2 比He抑制碳烟生成的作用更强;卢坤等^[13]数值模拟研究了掺杂 H_2 对 C_2H_4 /空气扩散火焰中碳烟生成的影响,发现掺杂 H_2 降低了碳烟前驱物的浓度,抑制了碳烟成核、表面增长和凝结等过程;Wang等^[14-15]通过数值模拟和消光法实验研究 O_2/CO_2 气氛下,掺杂 H_2 对层流 C_2H_4 扩散火焰碳烟生成的影响,发现 H_2 和 CO_2 抑制碳烟生成的主要途径不同, H_2 主要是通过其化学效应间接抑制碳烟成核和表面生长, CO_2 则是通过降低H自由基浓度和火焰温度,削弱碳烟的表面生长过程。 CO 是碳烟生成的中间产物之一^[6-7,14-15],在碳烟生成过程中起重要作用。Du等^[16]将 CO 掺杂到乙烯层流火焰中,观察到碳烟浓度线性减少;Guo等^[17]在此基础上,进一步通过消光法实验和数值模拟研究掺杂 CO 对乙烯/空气层流火焰中碳烟生成的影响,发现整体碳烟浓度减少,但 CO 的化学作用提升了碳烟表面增长速率,并通过 $\text{CO}+\text{OH} \rightleftharpoons \text{CO}_2+\text{H}$ 反应增加了 H^\bullet 浓度,减少了 OH^\bullet 浓度,促进了碳烟的生成。

合成气是最具有发展潜力的能源之一,主要成分是 H_2 和 CO ,其价格低廉且制取相对容易,可通过地球储量较为丰富的煤产生^[18]。目前, CO 和 H_2 作为燃料添加剂通常是在空气或空气富氧条件下单一使用的,鲜有对 CO_2 富氧条件下向碳氢燃料中掺杂 H_2/CO 的研究。文中通过二维消光法实验和CoFlame程序模拟研究 O_2/CO_2 气氛下,掺杂 H_2/CO 对稳定层流乙烯扩散火焰中碳烟生成的影响,以期了解合成气作为燃料添加剂的性能,为碳烟减排提供参考。

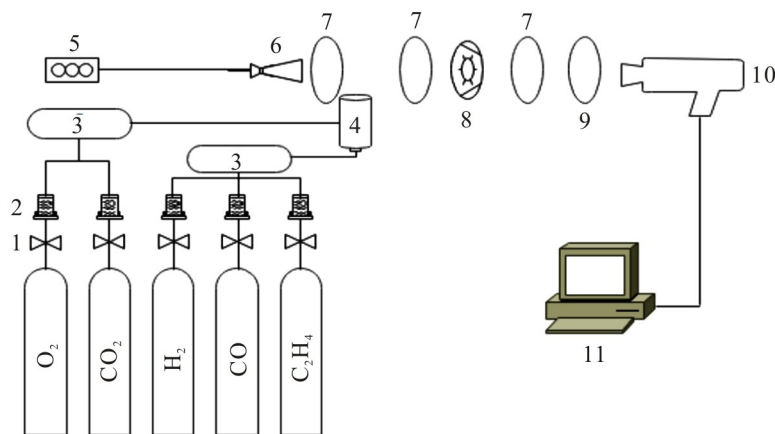
1 实验与模拟

1.1 实验原料

高压气瓶提供的 C_2H_4 , O_2 , H_2 , CO 和 CO_2 。

1.2 实验装置

实验装置主要由火焰燃烧系统和二维消光法测量系统构成,装置示意图如图1。



1.减压阀;2.质量流量计;3.混气罐;4.燃烧器;5.光源调节器;6.光源;7.凸透镜;8.小孔光阑;9.滤波片;10.CCD相机;11.计算机。

图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

燃烧系统由装置1~4和气瓶组成,消光法测量系统由装置5~11组成。装置4为火焰燃烧器,内部结构如图2。中间燃料管内径12 mm,壁厚1 mm;外部氧化剂管内径90 mm,氧化气流从燃料管和氧化剂管之间的环形区域通过;同心环内填充了两块烧结金属泡沫和玻璃珠若干,以保证氧化气流的均匀稳定。

消光法装置参考文献[19]中的测试装置搭建,如图3。其中电荷耦合元件(charge coupled device, CCD)相机为大恒图像生产的MER-125-30UM型号相机,像素个数为1 292×964,帧率30 f/s,设定曝光时间为5 000 μs。为减少碳烟散射引起的光衰减,使用650 nm滤波片。测量碳烟浓度时,通过三点Abel算法^[19-20]获得消光系数,吸收函数 $E(m)$ 取值为0.35,与文献[14]同,该值被证明误差不超过10%,具体可参考文献[20-21]。

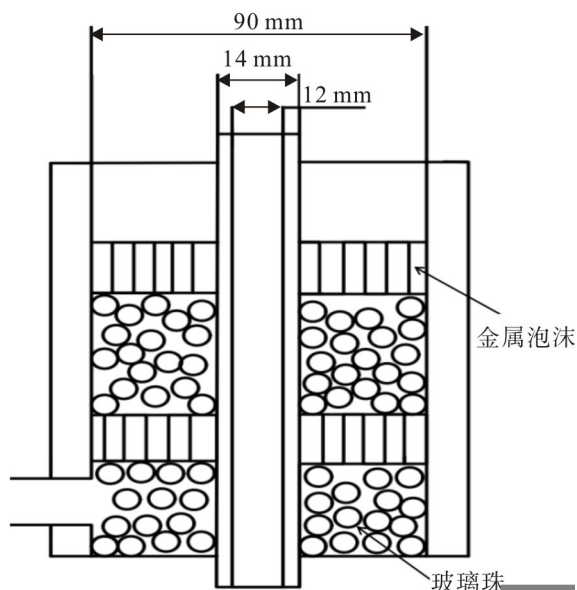


图2 燃烧器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of burner

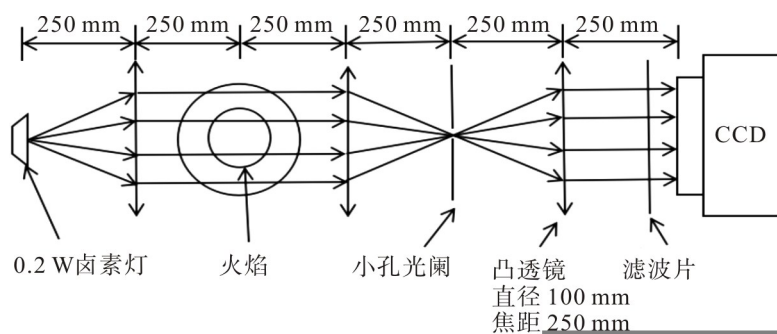


图3 消光法装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of light extinction method

1.3 实验方法

C₂H₄和H₂,CO通过燃料气路的气瓶、减压阀、流量控制器经混气罐混合后进入燃烧器燃料管,O₂和CO₂通过氧化剂气路进入燃烧器氧化剂管。引燃火焰待火焰稳定后,通过消光法测量系统获得火焰数据图像,经分析软件Matlab运算处理获得火焰的碳烟体积分数分布。实验工况见表1,表中 q 为流量。

表1 实验工况

Tab. 1 Experimental conditions

工况	$q(\text{H}_2):q(\text{CO}):q(\text{C}_2\text{H}_4)$	$q(\text{H}_2)/(\text{mL}/\text{min})$	$q(\text{CO})/(\text{mL}/\text{min})$	$q(\text{C}_2\text{H}_4)/(\text{mL}/\text{min})$	$q(\text{O}_2)/(\text{L}/\text{min})$	$q(\text{CO}_2)/(\text{L}/\text{min})$
1	纯乙烯	0	0	270	12.8	30
2	0.1:0.1:1	27	27	270	12.8	30
3	0.1:0.3:1	27	81	270	12.8	30
4	0.2:0.2:1	54	54	270	12.8	30
5	0.3:0.1:1	81	27	270	12.8	30
6	0.3:0.3:1	81	81	270	12.8	30

1.4 数值模型

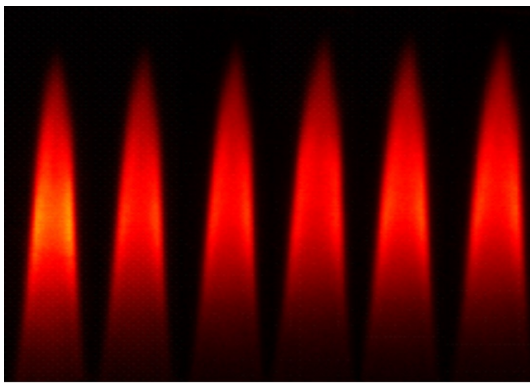
运用CoFlame程序模拟掺杂H₂/CO对乙烯扩散火焰中碳烟生成的影响,并在二维(z 和 r)轴对称圆柱坐标系中求解质量、动量、能量、气体组分质量分数守恒的椭圆控制方程,其中能量方程的辐射换热源项采用离散坐标法耦合到的统计窄带关联 K 模型获得^[21-22]。

气相化学反应模型为ABF(由 Appel J, Bockhorn H, Frenklach M 提出,适用于小分子碳氢化合物的燃烧机理)机理^[23],包括 101 个组分、544 个反应,多环芳香烃生成到芘(A₄, pyrene)。对于碳烟模型,考虑成核、表面生长与氧化等过程,其中碳烟成核是由两个芘碰撞和聚结形成二聚体完成的,表面生长则是基于脱氢加乙炔(hydrogen abstraction acetylene addition, HACA)理论进行的。气溶胶动力学中采用固定分区法追踪碳烟颗粒的团聚、增长及氧化过程,具体可参考文献[8, 14-15]。

2 结果与分析

2.1 火焰高度

图4为掺杂H₂/CO的乙烯火焰高度图像。由图4可知,掺杂H₂/CO的乙烯火焰高度变化微小,与仅添加氢气的效果相近^[14]。图5为掺杂不同比例H₂/CO乙烯火焰高度模拟结果。由图5可知:工况1~6的火焰高度波动较小;工况2~6与工况1相比,最大高度差约0.2 cm,对应浮动幅度约3%。综上,实验和模拟结果均说明掺杂H₂/CO对火焰高度影响较小。



工况1 工况2 工况3 工况4 工况5 工况6

图4 实验火焰图像

Fig. 4 Experimental flame images

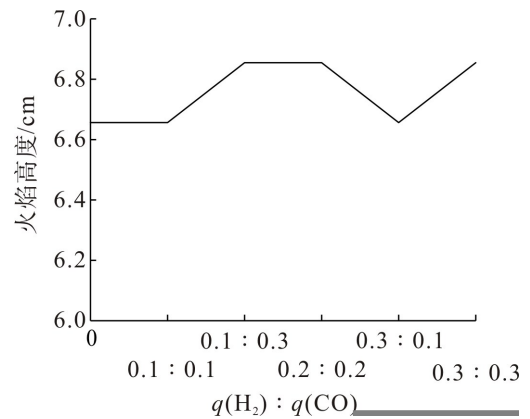


图5 模拟火焰高度

Fig. 5 Simulated flame height

2.2 火焰温度

图6为不同H₂/CO掺杂比下火焰温度分布的模拟结果。由图6可知:掺杂不同比例H₂/CO的各组火焰最高温度均出现在火焰高度约2.5 cm处;相比于工况1,工况2~6的火焰温度分别升高了5.5, 7.2, 10.4, 13.1, 14.9 K,主要是因为H₂/CO参与化学反应,释放热量,但最大升高比仅为0.74%,可忽略不计。温度变化微小,说明掺杂H₂/CO时,温度不是影响碳烟生成的主要因素。

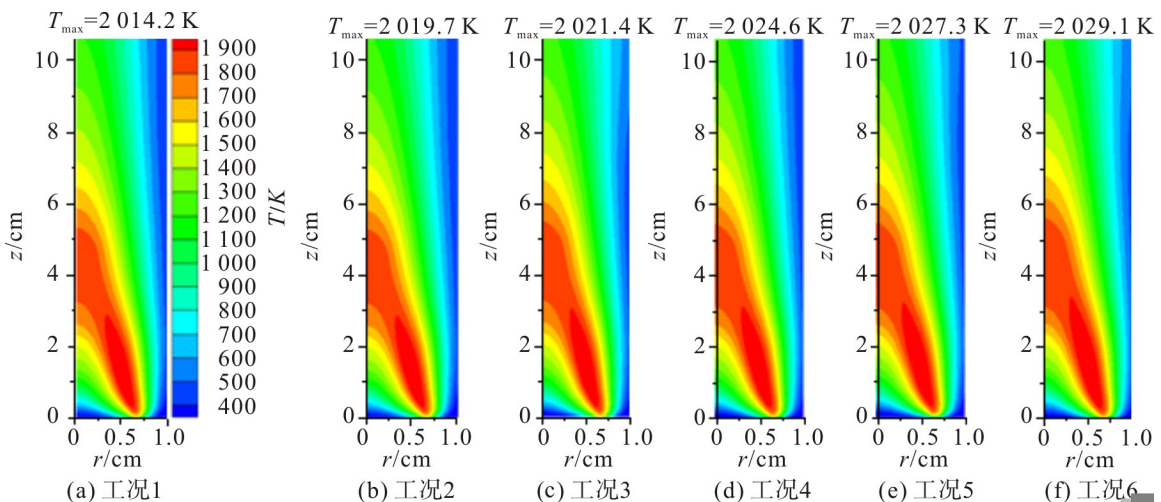


图6 温度场分布

Fig. 6 Distribution of temperature field

2.3 碳烟体积分数

图7,8为不同H₂/CO掺杂比下乙烯火焰的碳烟体积分数(soot volume fraction, SVF)分布。由图7,8可知:模拟结果与实验测量结果较为一致,证明了模拟结果的可靠性;碳烟主要集中在火焰高度为0.8~5.0 cm,中心燃料管半径为0.15~0.45 cm的区域;随着火焰高度上升,SVF先增大后减小,主要是因为反应开始,生成物多为碳烟前驱物和相关基团,碳烟含量几乎为零;随着火焰高度上升,凝聚和表面增长过程继续进行,碳烟生成增多,直至达到峰值;达到峰值后,氧化作用加强,碳烟颗粒迅速被氧化至完全消失。文中所用数值模型在焰翼表现优异,但不能很好地预测火焰中心区域的SVF分布,这与文献[14]一致。

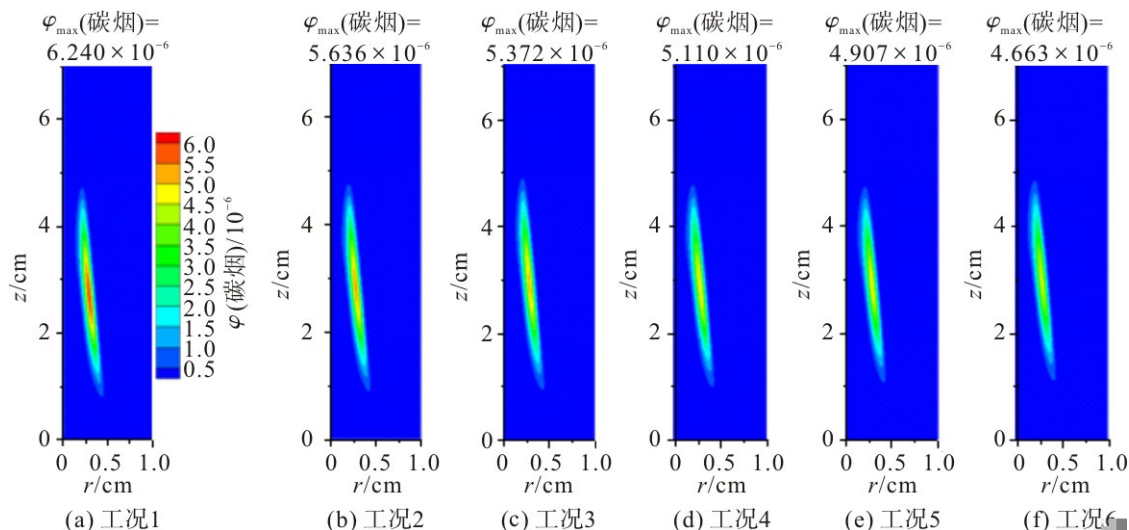


图7 碳烟体积分数分布的模拟结果

Fig. 7 Simulation results of distribution of soot volume fraction

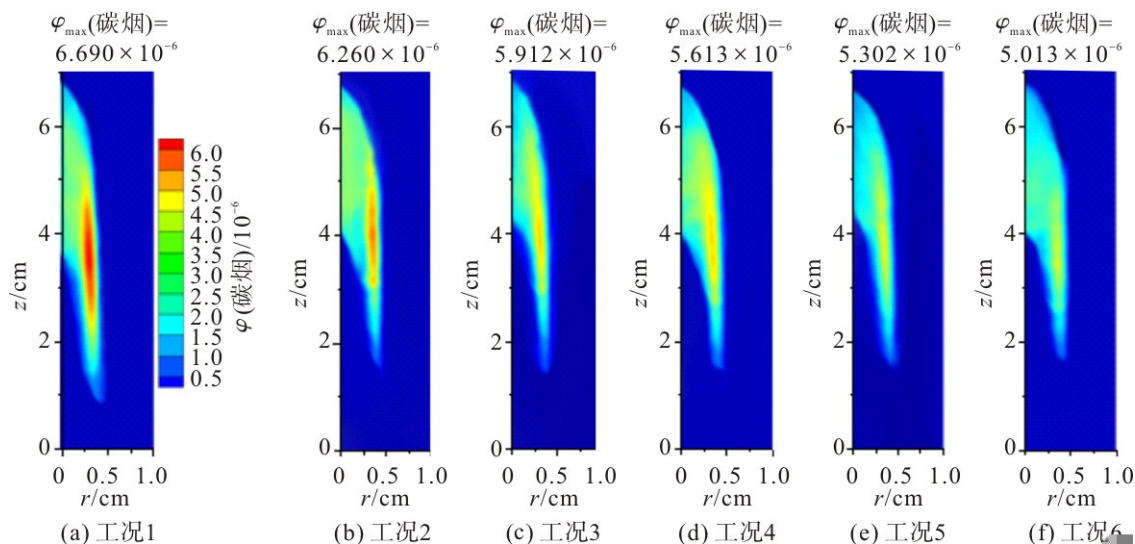


图8 碳烟体积分数分布的实验结果

Fig. 8 Experimental results of distribution of soot volume fraction

以图7为例,与工况1相比,工况2~6最大SVF分别下降了 0.604×10^{-6} , 0.868×10^{-6} , 1.130×10^{-6} , 1.333×10^{-6} 和 1.577×10^{-6} ,对应下降比依次为9.6%, 13.9%, 18.1%, 21.4%, 25.3%。由此可见,H₂/CO作为燃料添加剂能有效抑制碳烟的生成。对比工况2,4,6可发现,H₂,CO流量比相同时,SVF随着H₂/CO掺杂总量增大而降低;对比工况3,4,5可发现,掺杂H₂/CO总流量相同时,H₂比例越大,SVF下降越多。这是因为H₂,CO的热效应和稀释效应及H₂的化学效应抑制碳烟生成,而CO的化学作用则促进了碳烟的生成。

2.4 H与H₂的摩尔分数

H和H₂在碳烟生成初期对多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)的生成有很大影响,H和H₂含量直接影响芘的生成,进而影响碳烟的生成。图9为不同火焰高度处H和H₂摩尔分数径向分布模拟结果。由图9可知:与工况1相比,工况2,3,5中的H摩尔分数变化微小,不足以影响大型PAHs的形成;与工况1相比,工况2,3和5中H₂摩尔分数明显增大,H₂摩尔分数增大能有效抑制A₄(芘)的生成和减缓碳烟的表面增长,进而抑制碳烟的生成。因此,掺杂H₂/CO时H₂摩尔分数增大是抑制碳烟生成的原因。

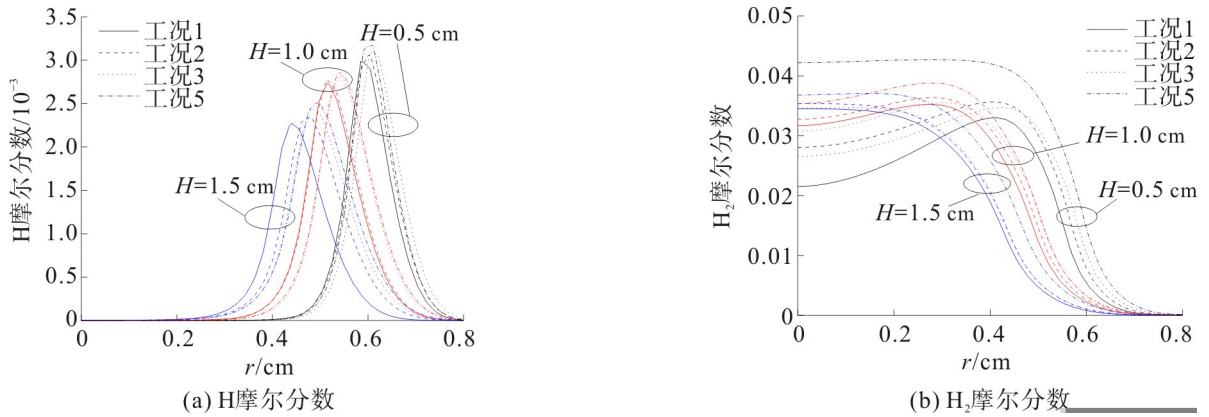


图9 不同火焰高度H和H₂的摩尔分数径向分布

Fig. 9 Radial distribution of mole fraction of H and H₂ at different flame heights

2.5 乙炔与苯的摩尔分数

在火焰较低的位置主要生成碳烟的前驱物,这个阶段多环芳烃的生长受控于第一个苯环的生长速率,从而影响后续的碳烟生成。苯环A₁(C₆H₆)的主要形成路径如下:



由反应(1),(2)可知,C₂H₂是乙烯高温裂解的产物,且为生成A₁的重要中间产物。C₂H₂对多环芳烃的生成和碳烟表面生长有重要影响。图10为不同火焰高度处C₂H₂与A₁摩尔分数径向分布模拟结果。由图10(a)可知:相比于工况1,2,工况3,5在3个高度处的C₂H₂摩尔分数均减小,在径向,C₂H₂摩尔分数达到峰值后逐渐下降;比较工况2,3,5,H₂/CO掺杂总量越大,C₂H₂的摩尔分数越小,总量一定时,C₂H₂摩尔分数相近,这是由于温度变化小,其对乙烯高温裂解产生C₂H₂的影响微弱,此时主要是添加剂的稀释作用产生影响。由图10(b)可知,3个高度处的苯摩尔分数与C₂H₂摩尔分数走势相似,主要是因为C₂H₂通过反应(1)和(2)影响A₁的生成。综上所述,掺杂H₂/CO能有效降低C₂H₂的摩尔分数,进而抑制苯的生成。

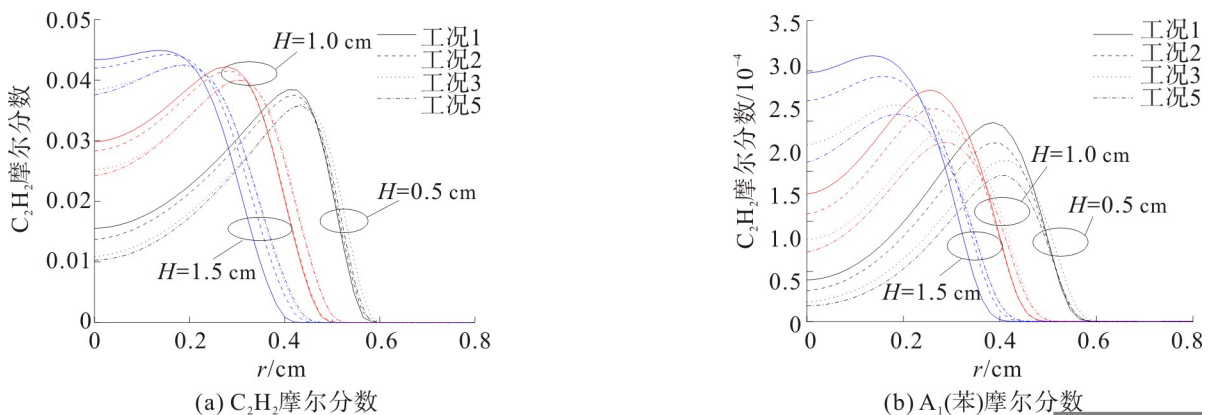


图10 不同火焰高度C₂H₂与A₁的摩尔分数径向分布

Fig. 10 Radial distribution of mole fraction of C₂H₂ and A₁ at different flame heights

2.6 成核速率与芘摩尔分数

成核过程是碳烟生成的重要环节,成核率增大,会使碳烟生成初期有更多的碳烟颗粒参与随后的增长。图11为不同火焰高度处成核速率与A₁(芘)摩尔分数径向分布的模拟结果。由图11可得:成核速率与芘摩尔分数的径向分布规律较一致,主要是因为碳烟成核是通过两个芘分子碰撞形成二聚体来完成的;与工况1相比,工况2,3和5的成核速率和A₁摩尔分数明显下降,说明掺杂H₂/CO能抑制成核速率和A₁生成;A₁摩尔分数随添加剂总量增大而减少,且总量相等时,改变H₂/CO的流量比对其影响微弱,这点与A₁相似。这是由于A₁作为第一个环状组分,通过HACA机理控制更大PAHs的形成,其主要反应如反应(3)~(5)。

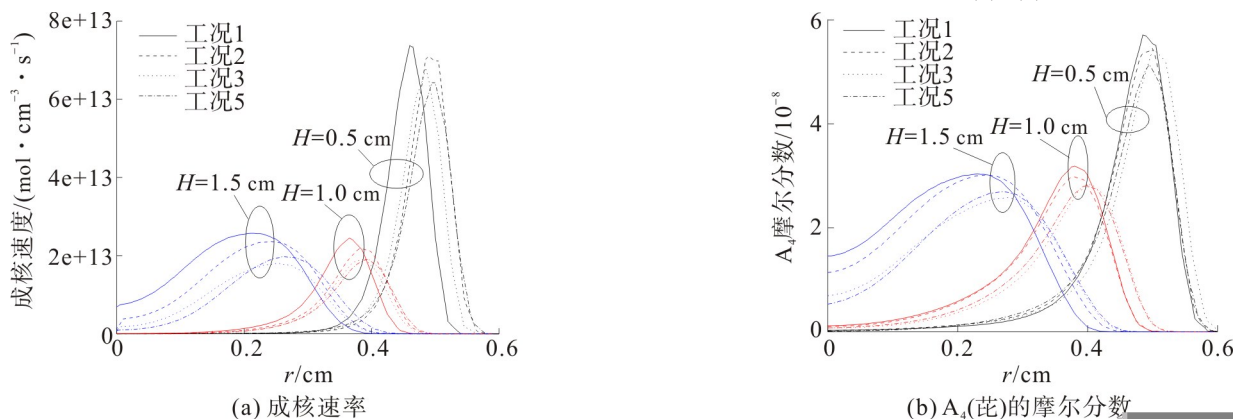
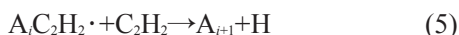


图11 不同火焰高度成核速率与A₁摩尔分数分数的径向分布

Fig. 11 Radial distribution of nucleation rate and A₁ mole fraction at different flame heights



2.7 氧化速率与表面增长速率

碳烟氧化过程与表面增长过程是相互竞争的,当表面增长速率大于氧化速率时,SVF会继续增加,反之降低。图12为不同火焰高度处碳烟氧化速率径向分布的模拟结果,图中负值代表碳烟被氧化。由12可知,相比于工况1,工况2,3和5在3个火焰高度处的氧化速率均减小。氧化速率减小有利于碳烟增长,说明掺杂H₂/CO时,氧化速率变化不是抑制碳烟增长的因素。图13为不同火焰高度处碳烟表面增长速率径向分布的模拟结果。

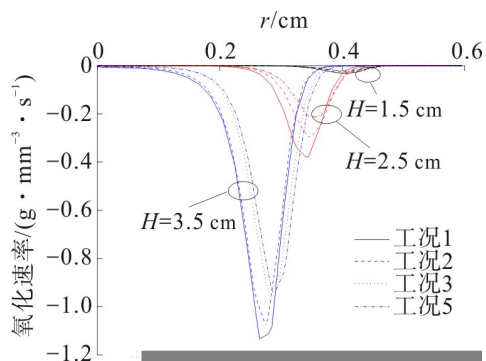
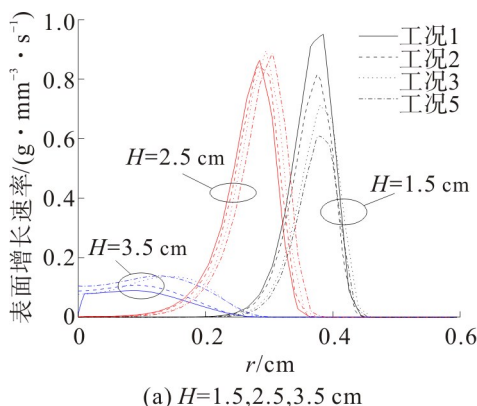
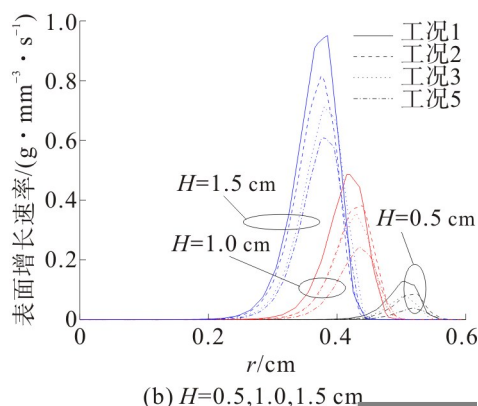


图12 不同火焰高度氧化速率径向分布

Fig. 12 Radial distribution of oxidation rate at different flame heights



(a) H=1.5, 2.5, 3.5 cm



(b) H=0.5, 1.0, 1.5 cm

图13 不同火焰高度的表面增长速率径向分布

Fig. 13 Radial distribution of surface growth rate at different flame heights

由图13可知,在火焰高度为2.5,3.5 cm处,工况2,3,5的碳烟表面增长速率无明显差异;相比于工况1,工况2,3和5在火焰高度0.5,1.0,1.5 cm处的碳烟表面增长速率明显降低,且H₂含量越大,碳烟表面增长速率降低越多,说明掺杂H₂/CO对碳烟表面生长的抑制作用主要在火焰高度较低区域。碳烟表面增长遵循的HACA反应机理如下:



由关于碳烟核心C_{soot}的反应(6),(7)可知,HACA表面增长速率受H原子、H₂和C₂H₂的影响。通过图9可知:H摩尔分数变化较小,其不是碳烟表面反应速率降低的原因;掺杂H₂/CO会增大火焰中H₂摩尔分数,通过反应(6)减少活性碳核数量,减缓碳烟表面增长速率。由图10(a)可得,掺杂H₂/CO后,火焰中C₂H₂的摩尔分数降低,进而减少反应(7)过程中C₂H₂在活性碳核上的吸附,最终降低碳烟表面增长速率。综上,掺杂H₂/CO主要是通过影响H₂和C₂H₂的摩尔分数抑制碳烟表面增长过程。

3 结 论

采用ABF机理的数值模拟和二维消光法实验,研究H₂/CO掺杂比对层流C₂H₄(O₂/CO₂)扩散火焰中碳烟生成的影响,获得火焰高度、温度、碳烟及重要组分含量等参数分布,并对碳烟的成核、氧化、表面增长演化过程进行分析,得到以下主要结论:

1) 掺杂H₂/CO对乙烯火焰高度、火焰温度无明显影响,对火焰中的碳烟生成有明显的抑制作用,H₂/CO的添加量增大,碳烟生成受到的抑制作用增强;在H₂与CO流量比为0.3:0.3时,SVF最大降低25.3%;H₂与CO掺杂总量相等时,H₂含量越大,抑制作用越强,这是由于H₂化学效应抑制碳烟生成,而CO的化学效应促进碳烟生成。

2) 掺杂H₂/CO时,增加H₂含量、降低C₂H₂含量可抑制苯环的生成,阻碍PAHs的增长,致使主要成核物质芘的摩尔分数降低。

3) 掺杂H₂/CO主要是通过抑制成核速率、较低火焰位置处碳烟表面增长来抑制碳烟生成,H⁺含量、温度和碳烟氧化速率不是抑制碳烟生成的主要因素。

参考文献:

- [1] 顾浩. 掺混甲烷对预混合乙烯火焰中碳烟生成特性的影响[D]. 上海:上海交通大学,2018:1-2.
- [2] 鄂勇,宋国利,张颖,等. 碳黑大气颗粒物的环境效应[J]. 地球与环境,2006,34(1):61-64.
- [3] YU D, CHEN M Q. Oxygen enriched co-combustion of biomass and bituminous coal[J]. Energy Sources, Part A:Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2016, 38(7):994-1001.
- [4] 张霞,童莉葛,王立,等. 富氧燃烧技术的应用现状分析[J]. 冶金能源,2007,26(6):41-44,60.
- [5] 吴黎明,潘卫国,郭瑞堂,等. 富氧燃烧技术的研究进展与分析[J]. 锅炉技术,2011,42(1):36-38,68.
- [6] LIU F S, GUO H S, SMALLWOOD G J, et al. The chemical effects of carbon dioxide as an additive in an ethylene diffusion flame: implications for soot and NO_x formation[J]. Combustion and Flame, 2001, 125(1/2):778-787.
- [7] GUO H S, SMALLWOOD G J. A numerical study on the influence of CO₂ addition on soot formation in an ethylene/air diffusion flame[J]. Combustion Science and Technology, 2008, 180(10/11):1695-1708.
- [8] WANG Y, LIU X F, GAO Y P, et al. Numerical simulations on effects of oxygen concentration on the structure and soot formation in a two-dimensional axisymmetric laminar C₂H₄/(O₂-CO₂) diffusion flame[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 137(2):689-702.
- [9] ZHANG Y D, LIU F S, LOU C. Experimental and numerical investigations of soot formation in laminar coflow ethylene flames burning in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres at different O₂ mole fractions[J]. Energy & Fuels, 2018, 32(5):6252-6263.
- [10] GÜLDER Ö L, SNELLING D R, SAWCHUK R A. Influence of hydrogen addition to fuel on temperature field and soot formation in diffusion flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1996, 26(2):2351-2358.

- [9] TOBIESEN F A, SVENDSEN H F, MEJDELL T. Modeling of blast furnace CO₂ capture using amine absorbents[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(23):7811–7819.
- [10] CHOWDHURY F A, GOTO K, YAMADA H, et al. Results of RITE's advanced liquid absorbents develop for low temperature CO₂ capture[J]. *Energy Procedia*, 2017, 114:1716–1720.
- [11] HAN K, AHN C K, LEE M S. Performance of an ammonia-based CO₂ capture pilot facility in iron and steel industry[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 27:239–246.
- [12] 毛艳丽, 曲余玲, 李博, 等. 钢厂烟气CO₂捕捉技术的开发及其应用前景分析[J]. *钢铁*, 2016, 51(8):6–10.
- [13] GOTO K, OKABABE H, CHOWDHURY F A, et al. Development of novel absorbents for CO₂ capture from blast furnace gas [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(5):1214–1219.
- [14] 高红霞, 刘森, 徐彬, 等. N,N-二乙醇胺(DEEA)溶液 CO₂吸收解吸性能的实验研究[J]. *化工学报*, 2015, 66(9):3739–3745.
- [15] DUGAS R. Pilot plant study of carbon dioxide capture by aqueous monoethanolamine[D]. Austin, Texas, The United States of America: University of Texas at Austin, 2006:96–100.

责任编辑:何莉

(上接第168页)

- [11] GUO H S, LIU F S, SMALLWOOD G J, et al. Numerical study on the influence of hydrogen addition on soot formation in a laminar ethylene-air diffusion flame[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 145(1/2):324–338.
- [12] ZHAO H, STONE R, WILLIAMS B. Investigation of the soot formation in ethylene laminar diffusion flames when diluted with helium or supplemented by hydrogen[J]. *Energy & Fuels*, 2014, 28(3):2144–2151.
- [13] 卢坤, 顾明言, 朱本成, 等. 掺氢对乙烯/空气扩散火焰碳烟生成影响的数值研究[J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(3):236–243,264.
- [14] WANG Y, GU M Y, GAO Y P, et al. An experimental and numerical study of soot formation of laminar coflow H₂/C₂H₄ diffusion flames in O₂-CO₂ atmosphere[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 221:50–63.
- [15] WANG Y, LIU X F, GU M Y, et al. Numerical simulation of the effects of hydrogen addition to fuel on the structure and soot formation of a laminar axisymmetric coflow C₂H₄/(O₂-CO₂) diffusion flame[J]. *Combustion Science and Technology*, 2019, 191(10):1743–1768.
- [16] DU D X, AXELBAUM R L, LAW C K. Soot formation in strained diffusion flames with gaseous additives[J]. *Combustion and Flame*, 1995, 102(1/2):11–20.
- [17] GUO H S, LIU F S, SMALLWOOD G J, et al. A numerical study of the influence of transport properties of inert diluents on soot formation in a coflow laminar ethylene/air diffusion flame[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2):2359–2365.
- [18] 袁也, 席剑飞, 顾中铸, 等. H₂/CO合成气层流扩散燃烧产物NO_x生成机理的数值分析[J]. *热能动力工程*, 2017, 32(12):102–105,142.
- [19] 何旭, 戴钰杰, 郑亮, 等. 二维消光法在乙烯火焰碳烟浓度测量中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(26):57–64,147.
- [20] ARANA C P, PONTONI M, SEN S, et al. Field measurements of soot volume fractions in laminar partially premixed coflow ethylene/air flames[J]. *Combustion and Flame*, 2004, 138(4):362–372.
- [21] THOMSON K A, JOHNSON M R, SNELLING D R, et al. Diffuse-light two-dimensional line-of-sight attenuation for soot concentration measurements[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(5):694–703.
- [22] LIU F S, SMALLWOOD G J, GÜLDER Ö L. Application of the statistical narrow-band correlated-k method to low-resolution spectral intensity and radiative heat transfer calculations:effects of the quadrature scheme[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(17):3119–3135.
- [23] APPEL J, BOCKHORN H, FRENKLACH M. Kinetic modeling of soot formation with detailed chemistry and physics: laminar premixed flames of C₂ hydrocarbons[J]. *Combustion and Flame*, 2000, 121(1/2):122–136.

责任编辑:闫芳芳