燃烧科学与技术
Journal of Combustion Science and Technology
2026,32(5):553-561
DOI 10.11715/rskxjs.R202510005

掺氨乙烯同轴扩散火焰碳烟微观特征研究

常坤卓，顾明言，陈　萍，汪　洋，韩焰鹏，邹守军，欧阳子浩
（安徽工业大学能源与环境学院，马鞍山 243000）

摘　要：基于 CoFlame 程序对掺氨乙烯同轴扩散火焰中碳烟颗粒的微观结构特征开展数值模拟研究，系统探讨了掺氨比例对碳烟粒径、数密度、分形维数等参数的影响规律. 结果表明，氨的掺入显著改变了碳烟的形成与演化过程. 随着掺氨比例由 0 增至 5%、30%和 50%，碳烟平均粒径分别下降 65%、73.5%和 75.3%，呈现先快速下降后趋于平缓的趋势. 掺氨显著降低了初级颗粒与团簇的数密度，抑制了颗粒的团聚行为. 进一步分析表明，氨的加入有效抑制了碳烟成核过程，从而减少新生颗粒数量，降低团簇数密度. 此外，掺氨使碳烟的分形直径和体积直径减小，表明其凝并与表面生长过程受到抑制，导致团簇结构更为疏松、紧密度下降.

关键词：NH_3/C_2H_4；碳烟；粒径；颗粒密度
中图分类号：TF055　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-8740(2026)05-0553-09

Soot Morphology in Ammonia/Ethylene Co-flow Diffusion Flames

Chang Kunzhuo，Gu Mingyan，Chen Ping，Wang Yang，Han Yanpeng，Zou Shoujun，Ouyang Zihao
（School of Energy and Environment，Anhui University of Technology，Maanshan 243000，China）

Abstract：This study investigates the microstructural characteristics of soot particles in ammonia-doped ethylene co-flow diffusion flames using the CoFlame code, with a focus on the effects of ammonia blending ratio on parameters such as soot particle size, number density, and fractal dimension. The results indicate that ammonia addition significantly alters the formation and evolution of soot. As the ammonia blending ratio increases from 0% to 5%, 30%, and 50%, the average soot particle size decreases by 65%, 73.5%, and 75.3%, respectively, showing a trend of rapid initial decline followed by gradual stabilization. Ammonia blending markedly reduces the number density of both primary particles and aggregates, suppressing particle agglomeration. Further analysis reveals that ammonia addition effectively inhibits the soot nucleation process, thereby reducing the number of nascent particles and decreasing aggregate number density. In addition, ammonia blending leads to a reduction in both fractal diameter and volume diameter of soot, indicating suppressed coagulation and surface growth processes, which result in more loosely packed, less compact aggregate structures.

Keywords：NH_3/C_2H_4；soot；particle diameter；particle number density

随着全球气候变化问题日益严峻以及能源结构转型的加速推进，氨气(NH_3)作为一种具有零碳属性的燃料[1-2]，在燃烧过程中能够从源头避免碳烟生成[3]，展现出广阔的应用前景[4]. 与常规碳氢燃料相

收稿日期：2025-12-03.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52376088)；安徽省高校协同创新项目(GXXT-2022-025).
作者简介：常坤卓(2001—　　)，女，硕士，1870623930@qq.com.
通信作者：顾明言，女，博士，教授，gumy@ahut.edu.cn.

比，在燃料中掺入氨气可显著改变碳烟的生成行为、演化路径及微观结构特征[5]. 研究表明，氨的引入不仅通过物理稀释作用降低碳烟前驱体浓度[6]，更通过复杂的化学反应动力学机制，有效抑制多环芳烃(PAHs)等关键碳烟前驱体的形成与生长[7]，从而协同控制碳烟排放.

现有研究指出，在掺氨碳氢燃料燃烧体系中，氨的加入会导致 PAHs 浓度下降，并抑制碳烟的成核、凝并、生长与氧化等全过程[8-10]. 随着掺氨比例提高，燃料中碳元素比例降低，氧和氮元素比例相应上升[11]. 实验与模拟结果均表明，氨的掺混可降低 C_2H_2、C_3H_3、C_3H_4 和 C_4H_4 等关键前驱体的摩尔分数[12]，进而减少 A1 ~ A4 芳香环的生成[13]. 同时，NH_3 参与形成的氮-碳氢化合物会干扰 HACA 反应路径[14]，进一步抑制碳烟形成. 尤其在低氧浓度条件下，NH_3 对碳烟的抑制效果更为显著[15]. 此外，NH_3 对 PAHs 和碳烟体积分数的抑制效果随分子尺寸增大而增强[16-17]，呈现 A1＜A2/A3＜A4＜碳烟的递进顺序，且初级颗粒的峰值粒径随掺氨比例增加而减小，并向下游迁移[18]. 化学动力学分析进一步揭示，氨掺混可减少 C_2H_2、丙炔和苯等关键前驱体的生成[19]，同时 Zhou 等采用气相色谱测量也证实 NH_3 对 C_2H_2 与 C_6H_6 具有抑制作用[20]. 此外，温度同样是关键影响因素[21]：在高于 1 273 K 时，NH_3 有效抑制碳烟前驱体生成；而低于该温度时，则可能因 C_2H_4 分解与 C—N 相互作用之间的竞争关系而促进前驱体生成.

在微观结构层面，氨掺混亦对碳烟形貌产生显著影响[22]. 多项实验采用透射电子显微镜、拉曼光谱、热重分析(TGA)等手段采样分析颗粒纳米结构，结果显示掺氨通常导致初级颗粒直径减小[23]、数密度降低，并使团簇结构更为疏松[24]. 具体而言，初级颗粒直径平均下降约 33%，团簇内颗粒数量减少[25]，分形直径显著减小[26]，较多的小颗粒存留，较少大颗粒，凝聚紧密度下降[27]. 纳米尺度表征(如 TEM/HRTEM)进一步显示，掺氨后碳烟微晶长度缩短[28]，微晶曲率与层间距增加[29]，表明其石墨化程度降低、无序性增强[22,30]. 这些微观结构变化共同印证了氨在抑制碳烟生长与凝聚方面的作用机制.

尽管已有研究明确了氨掺混在降低碳烟生成量和改变其微观结构方面的积极效果，掺氨碳氢燃料燃烧过程中碳烟生成的路径复杂，对其微观形貌形成机制及演变规律的认识仍不够系统深入. 为此，本研究拟采用数值模拟方法，重点分析掺氨对碳烟结构演化过程的影响，系统揭示掺氨比例对碳烟团簇结构、初级颗粒粒径及碳层条纹特征的影响规律，以期为深入理解氨在碳烟抑制中的作用提供理论依据.

1　数值方法

1.1　物理模型及网格划分

图 1 为同轴射流扩散火焰及其网格划分方案. 计算域为一个尺寸为 10.06 cm(轴向 z) × 3.31 cm(径向 r)的二维区域. 燃料由内径 6 mm、外径 7 mm 的燃料管喷出，外侧环形区域引入空气形成扩散火焰. 燃料流和空气流的入口均位于 $z = 0$ 处；火焰中

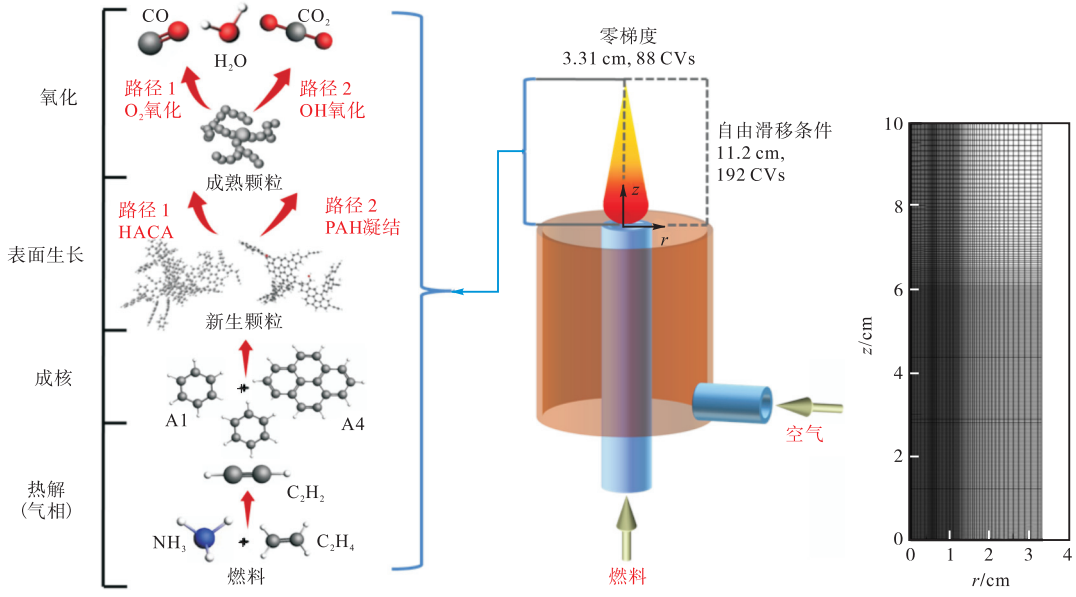


图 1　同轴射流扩散火焰和网格划分

Fig.1　Schematic of the ethylene-ammonia coaxial jet diffusion flame and the corresponding mesh configuration

心线（r = 0）为对称边界条件；径向边界（r = 3.31 cm）采用自由滑移条件；出口边界（z = 10.06 cm）施加零梯度条件以模拟自由排出. 模拟时首先进行了网格无关性检验，由于 Gülder 燃烧器产生的火焰具有高度轴对称性，且考虑到计算资源的消耗，本文仅计算了火焰结构的一半，从而在保证精度的同时有效降低了计算成本.

1.2　气相及碳烟反应机理

本研究采用 CoFlame 程序对层流共轴扩散火焰进行数值模拟，该程序已在多项研究中验证了其在火焰结构和碳烟预测方面的可靠性[31-33]. CoFlame 在二维轴对称圆柱坐标系下，耦合求解质量、动量、能量、气相物质、碳烟聚集体和初级颗粒数密度的传输方程，结合详细气相化学机理、完善的热物性数据库以及断面碳烟模型，可准确描述层流火焰中碳烟的成核、表面生长、聚集、团聚和氧化等过程. 断面碳烟模型将聚集体质量离散为 35 个部分，间距系数设为 2.35，可覆盖火焰中最大粒径的演化范围. 碳烟成核假设为两分子芘（A4）碰撞形成二聚体，后续表面生长遵循 HACA 机制[34]. 氧化过程考虑了 O_2 和 OH 自由基的作用[35]. 气相反应机理采用 Liu 等[18]开发的 NH_3—C_2H_4—PAHs 详细机理，包含 182 个物种和 1 571 个基元反应，基于 Glarborg 等[36]提出的 C0～C2 反应框架扩展而成，覆盖了 C1～C2 烃类的热裂解、NH_3 氧化及其与含氮自由基的耦合反应，并能准确再现 NH_3 掺混条件下 PAHs 浓度随掺氨比变化的下降趋势. 辐射换热采用离散坐标法（DOM）结合统计窄带关联 k-模型（SNBCK）[37].

1.3　模拟条件及工况

本研究模拟的工况如表 1 所示. 为了保证碳流量不变，模拟中保持乙烯流量不变为 150 mL/min，考虑到低掺比和高掺比对乙烯燃烧特性及碳烟生成的影响，模拟中选用了掺氨比例分别为 5%、30% 和 50%，从而揭示不同比例下 NH_3 对成核、团聚及氧化等关键路径的作用规律. 燃料和空气的入口温度均保持 300 K，压力为 1.013×10^5 Pa.

表 1　工况设置

Tab.1　Operating conditions

工况编号	掺氨比例/%	C_2H_4 流量/(mL/min)	NH_3 流量/(mL/min)	空气流量/(L/min)
1	0	150	0	100
2	5	150	7.5	100
3	30	150	45	100
4	50	150	75	100

本研究选取的实验数据是参考文献[14, 38-39]中的数据，主要用于掺氨乙烯燃烧中生成碳烟的特征参数变化规律的比较.

2　结果分析与讨论

2.1　碳烟体积分数与粒径分布

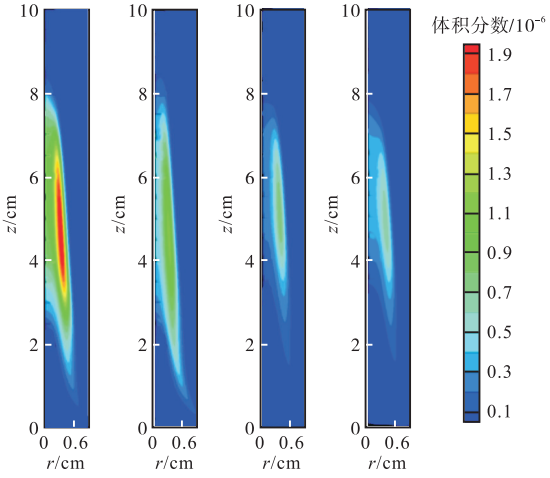
图 2 为不同掺氨比例下火焰中的碳烟体积分数云图. 从图中可以看出，未掺氨时碳烟体积分数最高，峰值可达 2.02×10^{-6}；随着掺氨比增加，碳烟峰值下降明显. 当掺氨 5% 时，碳烟峰值为 1.14×10^{-6}，下降了 43.6%；掺氨 30% 时，碳烟峰值继续下降至 0.78×10^{-6}，比纯乙烯燃料火焰的碳烟峰值下降了 61.4%；掺氨 50% 时，碳烟峰值继续下降到 0.69×10^{-6}，比纯乙烯燃料火焰的碳烟峰值下降了 65.8%. 碳烟峰值降幅明显，同时碳烟的生成区域在轴向范围也逐渐缩小. 这表明掺氨可以有效减少乙烯燃烧过程中产生的碳烟[7]. 图 3 为不同掺氨比下本工作模拟碳烟总量与实验结果[14]的对比. 与参考文献中 Φ 归一化对比，碳烟的总量 Φ 计算公式为

$$F_v = 2\pi \int_0^r f_v r \mathrm{d}r \tag{1}$$

$$\Phi = \int_0^h F_v \mathrm{d}h \tag{2}$$

式中：f_v 为某点的碳烟体积分数；r 为火焰的半径.

从图 2 中可以看出，随着 NH_3 掺混比例从 0 逐步提高至 50%，碳烟总量 Φ 均表现出明显的下降趋势. 少量氨气加入时（5% NH_3），Φ 减少至原来的 1/2；而当掺氨比例达到 50% 时，Φ 降至约原始值的 1/4. 掺氨比例低于 30% 时抑烟效果最为明显；掺氨比例超过 30% 时，Φ 的下降趋缓.



（a）工况 1（b）工况 2（c）工况 3（d）工况 4

图 2　碳烟云图

Fig.2　Soot distribution

图 4 展示了不同掺氨比例条件下同轴扩散火焰的平均粒径空间分布云图，图 5 给出了对应的平均粒

径峰值变化规律. 由图 4 可见，纯 C_2H_4 火焰中碳烟平均粒径分布峰值明显高于掺氨工况，且主要集中在火焰中游区域，峰值达到 133 nm. 随着掺氨比例的增加，平均粒径的分布区间明显收缩，峰值逐渐降低. 当掺氨比例达到 50%时，粒径峰值降至约 32 nm，且分布区域更为均匀和分散. 随着掺氨比例从 0 增加至 5%、30%、50%，平均粒径峰值下降百分比为 65%、73.5%和 75.3%，呈现出先快速下降后缓慢下降的趋势. 这表明掺氨显著抑制了颗粒的生长过程，使得火焰中碳烟颗粒更细小[40]，聚并作用减弱[22,41]. 图 5 对不同掺氨比例下平均粒径峰值进行了定量比较，结果显示平均粒径峰值随掺氨比例单调下降，呈现出明显的抑制趋势.

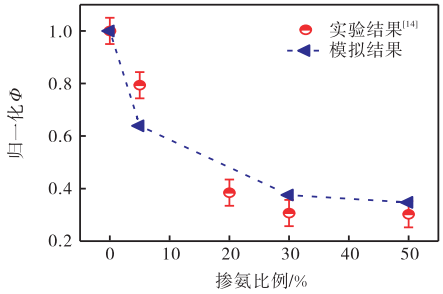
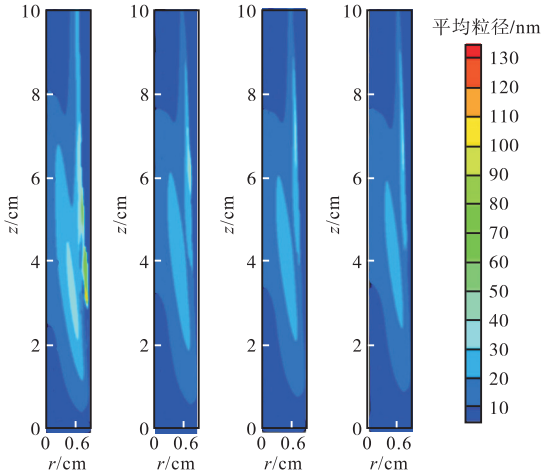


图 3　不同掺氨比例下碳烟总量实验与模拟的归一化对比

Fig.3　Normalized comparison between experimental and simulated total soot for different ammonia blending ratios



（a）工况 1（b）工况 2（c）工况 3（d）工况 4

图 4　同轴扩散火焰的平均粒径云图

Fig.4　Distribution of average particle diameter

图 6 展示了掺氨比例为 30%的工况下，碳烟平均粒径沿火焰中心线高度的实验测量[39]与模拟计算结果对比. 可以看出，二者变化趋势高度一致：粒径均随高度增加先增大后减小，并于 5 ~ 6 cm 处达到 14 ~ 15 nm 的峰值. 模拟值与实验值吻合良好，验证了模型的有效性.

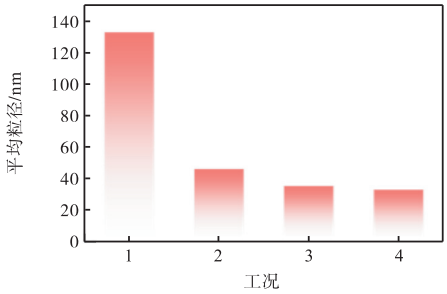


图 5　不同掺氨比例下平均粒径峰值变化

Fig.5　Peak average particle diameter for different ammonia blending ratios

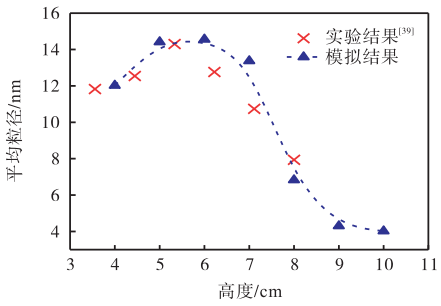
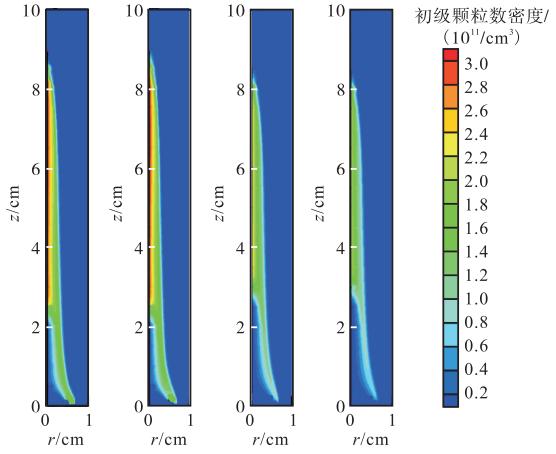


图 6　模拟与实验结果的平均粒径沿高度对比

Fig.6　Comparison of simulated and experimental average particle diameter along the flame height

2.2　碳烟颗粒数密度分布

图 7 展示了不同掺氨工况下碳烟平均初级颗粒数密度的空间分布云图. 从图中可以看出，纯乙烯火焰的初级颗粒数密度在火焰轴心和中上游区域值较高，且分布区域较宽，表明碳烟成核速率较高，颗粒数密度较大. 随着掺氨比例增加，颗粒数密度整体呈



（a）工况 1（b）工况 2（c）工况 3（d）工况 4

图 7　同轴扩散火焰的碳烟平均初级颗粒数密度云图

Fig.7　Distribution of average soot primary particle number density

显著下降趋势[42]，分布区域逐渐收缩，峰值明显减小. 当掺氨比例达到 50%时，数密度分布进一步缩小，仅局限于火焰的局部上游区域，说明掺氨有效抑制了初级颗粒的成核过程.

图 8 进一步给出了不同掺氨比例下，火焰中心线上平均初级颗粒数密度沿火焰高度的变化曲线. 从分布特征来看，初级颗粒数密度沿火焰高度方向呈现先上升、后基本平稳、再逐渐下降的整体趋势. 2～4 cm 处初级颗粒数密度显著上升，此时为碳烟的成核过程[43]，随后颗粒数密度仍维持在较高水平，表明此时颗粒的生成与氧化过程达到动态平衡[44]. 进入火焰上游区域后，氧化反应逐渐占据主导，导致颗粒被持续消耗，数密度随之显著下降.

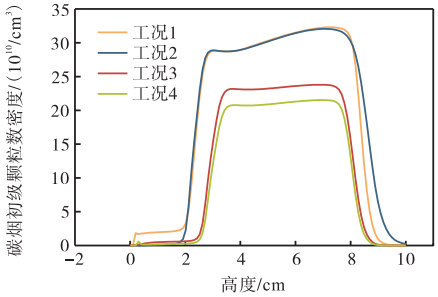


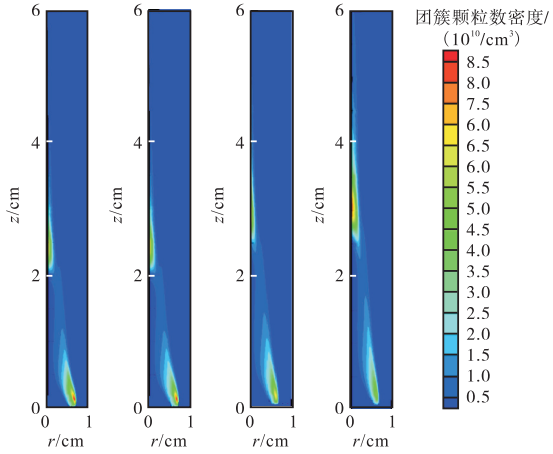
图 8　不同掺氨比例下碳烟平均初级颗粒数密度

Fig.8　Distribution of average soot primary particle number density for different ammonia blending ratios

上述变化规律说明，掺氨所引起的初级颗粒数密度降低，直接导致单位体积内碳烟颗粒数量减少，进而抑制了颗粒间的团聚过程，使得平均粒径峰值下降. 同时，颗粒数密度的减少也直接引起碳烟总体质量分数(F_v)的降低，这与图 2 和图 3 中观测到的碳烟体积分数显著下降趋势相一致.

图 9 展示了不同掺氨比例下同轴扩散火焰中碳烟平均团簇颗粒数密度的二维分布. 纯乙烯火焰中，团簇颗粒数密度主要集中在 0～2 cm 的低高度区域，形成明显的高密度带. 随 NH_3 掺入比例增加，高密度区在径向上逐渐拓宽，但整体数密度显著下降，表明氨的引入抑制了碳烟生成并降低了颗粒浓度. 由于团簇颗粒主要分布于低高度区域，选取 0.2 cm 处沿径向进行分析(图 10)，结果显示随掺氨比例升高，团簇颗粒数密度持续降低，进一步验证了氨气对碳烟成核与团聚过程的抑制作用.

对比图 7 与图 9 碳烟的初级颗粒数密度与团簇颗粒数密度的云图分布可以观察到，两者均在高度 0 cm 处开始出现，表明此高度区间是碳烟成核的主要区域，PAHs 前驱体生成并迅速核化形成初级颗粒，伴随颗粒凝聚生成团聚结构. 随后在 2～4 cm 区间，初级颗粒数密度急剧上升，达到比团聚颗粒数密度高一个数量级以上，说明此时火焰中成核和表面生长过程占主导，快速产生大量初级颗粒，而团聚过程尚处于次要地位. 进入高度 4～8 cm 区域后，初级颗粒数密度维持在平台值，表明新成核过程显著减弱，颗粒数量趋于稳定；与此同时，团聚颗粒数密度逐渐下降，是由于小团簇不断合并形成更大团簇，导致团簇颗粒数量减少但团簇平均尺寸增大. 在 8～10 cm，初级颗粒和团聚颗粒数密度均显著下降，说明此区段高温区内氧化反应逐渐占主导，导致碳烟被消耗.



（a）工况 1（b）工况 2（c）工况 3（d）工况 4

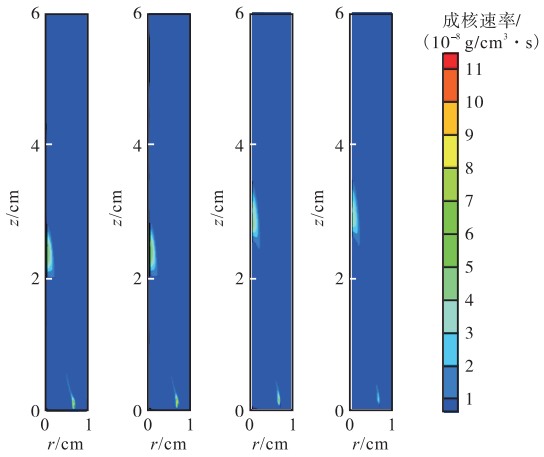
图 9　同轴扩散火焰的碳烟平均团簇颗粒密度的云图

Fig.9　Distribution of the average density of soot aggregates

图 10 与图 11 展示了不同掺氨比例下的成核速率与表面生长速率分布. 可以观察到，成核与表面生长主要集中在 0～4 cm 区域，而碳烟的主要分布区域位于 4～6 cm. 这说明 0～4 cm 区间是碳烟由“成核主导阶段”向“表面生长与团聚主导阶段”过渡的关键区域. 随着掺氨比例增加，成核速率峰值从未掺氨时的 1.14×10^{-7} g/(cm^3·s)依次下降至 9.24×10^{-8} g/(cm^3·s)、6.14×10^{-8} g/(cm^3·s)和 3.18×10^{-8} g/(cm^3·s)，分别为原来的 81.1%、53.9%和 33.4%. 表面生长速率峰值也从 3.18×10^{-4} g/(cm^3·s)下降至 1.50×10^{-4} g/(cm^3·s)、1.11×10^{-4} g/(cm^3·s)与 1.19×10^{-4} g/(cm^3·s)，降幅达到 47.2%、34.9%和 37.4%. 这表明氨的加入显著抑制了成核与后续的表面生长过程. 值得注意的是，成核与表面生长峰值位置随着掺氨比例提高均向更高的空间位置移动. 是因为氨的加入降低了局部 C_2H_2 及芳香前驱体浓度[45]，使成核所需条件只能在更靠上的位置得到满足.

图 9 中的团簇颗粒数密度分布与成核速率云图呈较高一致性，主要集中在 0～4 cm 区域. 掺氨后团

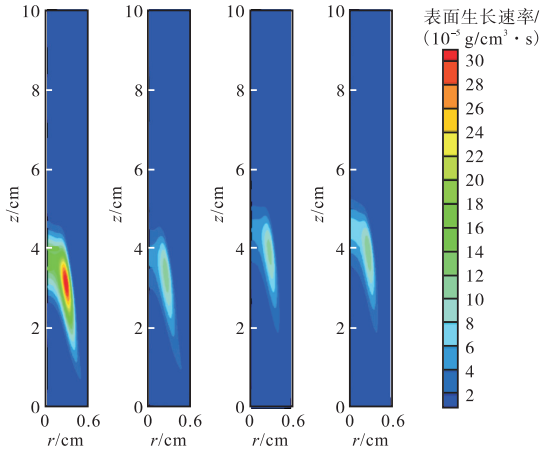
簇数密度峰值明显下降，但峰值位置向上游移动，这与成核与表面生长位置整体上移的趋势完全一致. 因此，图 9 中 2 ~ 4 cm 区域的局部数密度升高并非表明团簇生成增强，而是峰值位置整体上移在局部区段的投影结果，反映出掺氨使碳烟微观结构形成区整体向火焰高处迁移的本质规律.



（a）工况 1（b）工况 2（c）工况 3（d）工况 4

图 10　同轴扩散火焰的成核速率的云图

Fig.10　Distribution of the nucleation rate



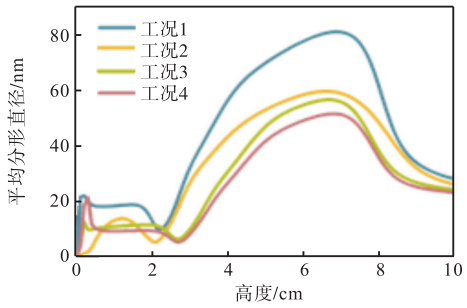
（a）工况 1（b）工况 2（c）工况 3（d）工况 4

图 11　同轴扩散火焰的表面生长速率云图

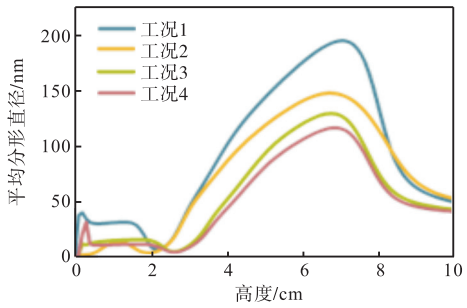
Fig.11　Distribution of HACA surface growth rate

2.3　碳烟体积直径和分形直径

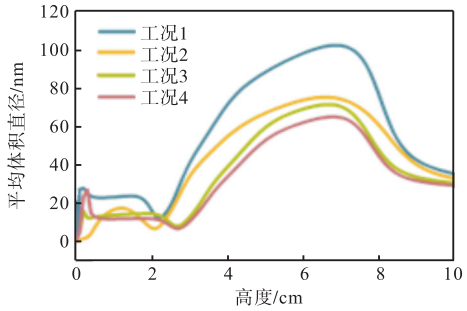
图 12 展示了不同掺氨比例下，沿火焰中心线的平均分形直径与平均体积直径随高度的分布特征. 整体而言，4 个子图（分别对应质量加权和数量加权的平均分形直径与平均体积直径）均呈现相似的高度变化趋势：在近燃烧区（0 ~ 2 cm）出现小幅波动，对应碳烟的成核及初期凝并/表面生长阶段；随后在中上游区域（4 ~ 7 cm）显著上升并达到峰值；至下游区域（7 ~ 10 cm）则逐渐衰减. 随着掺氨比例提高，各曲线的峰值幅度逐渐降低.



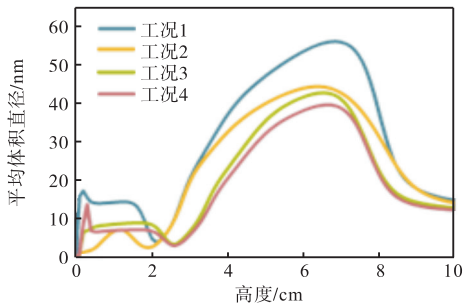
（a）平均分形直径，质量加权



（b）平均分形直径，数量加权



（c）平均体积直径，质量加权



（d）平均体积直径，数量加权

图 12　不同掺氨比例下平均分形直径与平均体积直径

Fig.12　Average fractal diameter and average volume diameter for different ammonia blending ratios

从分形结构演变来看，掺氨使颗粒的平均分形直径整体下降，曲线随掺氨比例增加明显下移，峰值逐渐减小. 在 C_2H_4-50%NH_3 条件下，最大分形直径较纯 C_2H_4 火焰下降近 30%，且峰值位置略向下游移动. 这表明 NH_3 的加入抑制了碳烟团簇的凝并与表面生长过程[9]，导致分形结构趋于松散[24]，团簇复杂度和紧密度均有所降低[27].

在体积尺度方面，掺氨后平均体积直径曲线整

体下移，峰值显著减小，说明颗粒的平均体积随掺氨比例增加而变小，团簇总质量相应减弱. 对比数量加权与质量加权的平均体积直径可见，二者沿火焰高度的变化趋势一致，但数量加权值普遍较低，更反映小尺寸颗粒的主导作用. 说明掺氨后小尺寸颗粒的体积贡献也明显减弱.

图 13 展示了不同掺氨比例下，文献实验中测得的碳烟 sp^2/sp^3 比值[38]与本研究数值模拟所得分形直径（数量加权）在 4 cm 火焰高度处的归一化对比结果. 选取该高度进行分析，是由于碳烟生成主要集中于火焰 4 ~ 6 cm 区域. 实验中，sp^2/sp^3 比值通过 XPS 杂化碳峰面积计算获得，可用于表征碳烟的石墨化程度：比值越高，反映碳原子排列有序性越强，石墨化程度越高. 如图所示，随着掺氨比例增加，sp^2/sp^3 比值逐渐下降，表明 NH_3 的引入抑制了碳烟的石墨化进程，促使碳烟内部结构趋于无序. 这一现象可归因于 NH_3 燃烧释放的活性氮自由基（如 NH、NH_2）与碳氢自由基发生竞争反应，从而阻碍芳香环的生长与结构重组. 结果显示，随着掺氨比例提高，碳烟的分形直径相应减小，表明团簇紧密度下降，结构趋于疏松. 得到与文献一致的结论，掺氨后呈现更为显著的无定形特征[22]，模拟与实验趋势一致，共同说明掺氨降低了碳烟颗粒的致密化与石墨化程度[30,42]. 分形直径的变化与 sp^2/sp^3 比值的演变规律相吻合，表明该参数能够有效反映碳烟团簇结构有序性的变化. 在掺氨条件下，碳烟生成过程中的表面生长以及颗粒间的聚并过程受到抑制，导致颗粒致密化程度下降，最终形成的团簇呈现更低的石墨化程度与更为松散的几何结构.

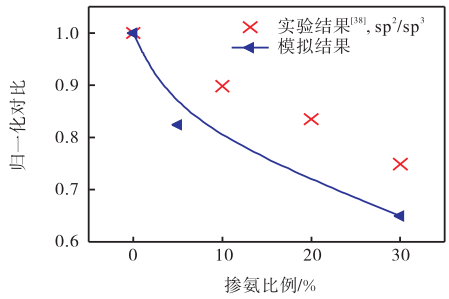


图 13　不同掺氨比例下实验 sp^2/sp^3 与分形直径的归一化对比

Fig.13　Normalized comparison between experimental sp^2/sp^3 and fractal diameters for different ammonia blending ratios

3　结　论

本研究基于 CoFlame 数值模拟，系统探讨了掺氨对乙烯燃烧碳烟微观结构变化的影响规律. 主要结论如下：

（1）掺氨使粒径分布整体在轴向收缩，并显著降低粒径峰值. 掺氨削弱了碳烟的表面生长速率和粒径增长，抑制碳烟生成，平均粒径峰值随掺氨比例增加而持续下降.

（2）团簇高密度区随掺氨比例增加而显著减弱. 与初级颗粒数密度的对比进一步表明，掺氨削弱了碳烟在成核及表面生长主导阶段（2 ~ 4 cm）的颗粒生成，进而减少了后续可供凝并的颗粒数量，最终导致团簇的生成与生长在整个火焰轴线上受到全面抑制. 相比之下，团簇颗粒数密度在高度 3 cm 逐渐减少，是由于小团簇并合为更大团聚体导致数量下降.

（3）碳烟的平均分形直径与平均体积直径均随掺氨比例增加而减小. 这说明 NH_3 的加入削弱了团簇的凝并与表面生长强度，致使分形结构趋于松散，团簇的复杂度和空间紧密度显著降低.

参考文献：

[1] Yun J，Cho J，Kim M，et al. Catalytic NH_3/H_2 co-combustion：A strategy for efficient and clean NH_3 combustion[J]. *Applied Catalysis A：General*，2025，708：120567.

[2] Salmon N，Bañares-Alcántara R. Green ammonia as a spatial energy vector：A review[J]. *Sustainable Energy & Fuels*，2021，5：2814-2839.

[3] Wang Y，Liu Q，Ouyang Z，et al. Characterization and mechanism of soot formation in C_4H_{10} combustion with H_2-NH_3 addition[J]. *Fuel*，2024，371：131992.

[4] Kang L，Pan W，Zhang J，et al. A review on ammonia blends combustion for industrial applications[J]. *Fuel*，2023，332：126150.

[5] Okafor E C，Naito Y，Colson S，et al. Measurement and modelling of the laminar burning velocity of methane-ammonia-air flames at high pressures using a reduced reaction mechanism[J]. *Combustion and Flame*，2019，204：162-175.

[6] Yan Z，Yang Y，Li Q，et al. Study on effects of NH_3 and/or H_2 addition on the characteristics of soot formation and gas emissions in a laminar ethylene diffusion flame[J]. *Fuel Processing Technology*，2023，242：107633.

[7] Li Z，Liu S，Lou C，et al. Soot formation in laminar ammonia-ethylene counterflow diffusion flames：Isolation of chemical，thermal，and dilution effects[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*，2024，94：

444-455.

[8] Yang Y, Zheng S, Xu M, et al. Effect of simultaneous H_2 and NH_3 addition on soot formation in co-flow diffusion CH_4 flame[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, 40(1): 105676.

[9] Qian W, Shi X, Li S. Physical and chemical effects of ammonia on gas emissions and soot formation in laminar coflow ethylene diffusion flames[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(12): 11292-11310.

[10] Yan Z, Zhu T, Xue X, et al. Effects of NH_3 and H_2 addition on morphology, nanostructure and oxidation of soot in n-decane diffusion flames[J]. *Fuel Processing Technology*, 2024, 253: 108003.

[11] Ren F, Li Z, Fan Y, et al. Experimental exploration of the N-containing soot precursors in C_2H_4-NH_3 co-flow diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 2025, 276: 114104.

[12] Shi X, Xu H, Qian W, et al. Effect of hydrogen on soot formation in laminar ammonia-ethylene diffusion flames[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 179: 151657.

[13] Wang Y, Liu K, Luo K, et al. Study on the mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons and soot formation in ethylene/hydrogen/ammonia laminar diffusion flames [J]. *Combustion and Flame*, 2025, 277: 114168.

[14] Li S, Liu Q, Zhang F, et al. Study on soot and NO_x formation characteristics in ammonia/ethylene laminar co-flow diffusion flame[J]. *Molecules*, 2024, 29(17): 4003.

[15] Zhang J, Xu L, Yan F, et al. Effects of ammonia addition on the sooting characteristics of ethylene counterflow diffusion flames with oscillating strain rates[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(24): 19950-19958.

[16] Li Y, Zhang Y, Zhan R, et al. Experimental and kinetic modeling study of ammonia addition on PAH characteristics in premixed n-heptane flames[J]. *Fuel Processing Technology*, 2021, 214: 106682.

[17] Li T, Zhang C, Chu C, et al. H_2/NH_3 addition effects on flame characteristics and soot formation in ethylene inverse diffusion flame[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(13): 9514-9529.

[18] Liu Y, Cheng X, Li Y, et al. Effects of ammonia addition on soot formation in ethylene laminar diffusion flames[J]. *Fuel*, 2021, 292: 120416.

[19] Shu Z, Xu T, Xiao J, et al. Comprehensive kinetic study on ammonia/ethylene counter-flow diffusion flames: influences of diluents[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2024, 11(1): 15.

[20] Zhou M, Yan F, Ma L, et al. Chemical speciation and soot measurements in laminar counterflow diffusion flames of ethylene and ammonia mixtures[J]. *Fuel*, 2022, 308: 122003.

[21] Zhang K, Xu Y, Yu R, et al. Effects of NH_3 addition on soot particles and gaseous precursors formation in C_2H_4 pyrolysis[J]. *Combustion and Flame*, 2025, 279: 114324.

[22] Feng S, Hong R, Qi J, et al. Effect of NH_3 addition on soot morphology and nanostructure evolution in laminar ethylene diffusion flame[J]. *Fuel*, 2023, 350: 128845.

[23] Li Q, Song C, Yan Z, et al. Effects of NH_3/H_2/N_2 addition on soot morphology and nanostructure in laminar co-flow ethylene diffusion flame[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(36): 16321-16334.

[24] Zaher M H, Chu C, Dadsetan M, et al. Experimental and numerical investigation of soot growth and inception in an ammonia-ethylene flame[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(1): 929-937.

[25] Suresh R, Kalvakala K C, Aggarwal S K. A numerical study of NO_x and soot emissions in ethylene-ammonia diffusion flames with oxygen enrichment[J]. *Fuel*, 2024, 362: 130834.

[26] Pedersen K A, Lewandowski M T, Schulze-Netzer C, et al. Ammonia in dual-fueled internal combustion engines: Impact on NO_x, N_2O, and soot formation[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(22): 17585-17604.

[27] Tian L, Lindstedt R P. The impact of ammonia addition on soot formation in ethylene flames[J]. *Combustion and Flame*, 2023, 258: 112724.

[28] Hua Y, Xiang X, Qiu L, et al. Effect of ammonia addition on the morphology and nanostructure evolution of soot particles in ethylene co-flow diffusion flames[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2023, 110: 101356.

[29] Ouyang Z, Zou S, Liu Q, et al. Investigation of soot morphology and nanostructure characteristics in ammonia/ethylene inverse diffusion flames[J]. *Fuel*, 2026, 404: 136239.

[30] Zheng J, Hu L, Chung S H. Effect of ammonia addition on nanostructure of soot in laminar coflow diffusion flames of ethylene diluted with nitrogen[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, 40(1): 105392.

[31] Wang Y, Chung S H. Soot formation in laminar counterflow flames[J]. *Progress in Energy and Combustion Sci-*

ence，2019，74：152-238.

[32] 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)：289-305.

[33] Frenklach M，Wang H. Detailed modeling of soot particle nucleation and growth[J]. S*ymposium*(*International*) *on Combustion*，1991，23(1)：1559-1566.

[34] 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)：122-136.

[35] Xu F，El-Leathy A M，Kim C H，et al. Soot surface oxidation in hydrocarbon/air diffusion flames at atmospheric pressure[J]. *Combustion and Flame*，2003，132(1)：43-57.

[36] Glarborg P，Miller J A，Ruscic B，et al. Modeling nitrogen chemistry in combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*，2018，67：31-68.

[37] Liu F，Guo H，Smallwood G J. Effects of radiation model on the modeling of a laminar coflow methane/air diffusion flame[J]. *Combustion and Flame*，2004，138(1)：136-154.

[38] Zhang F，Li S，Liu Q，et al. Effect of ammonia on the soot surface characteristics in ammonia/ethylene co-flow diffusion flames[J]. *Fuel*，2023，341：127633.

[39] 张 丰. 掺氨乙烯扩散火焰碳烟生成特性研究[D]. 马鞍山：安徽工业大学，2023.
Zhang Feng. Study on Soot Formation Characteristics of Ammonia/Ethylene Diffusion Flame[D]. Maanshan：Anhui University of Technology，2023(in Chinese).

[40] 余荣浩，徐义书，成晓北，等. 氨对苯同轴扩散火焰中碳烟生成特性的影响[J]. 燃烧科学与技术，2025，31(3)：311-321.
Yu Ronghao，Xu Yishu，Cheng Xiaobei，et al. Effect of ammonia addition on the characteristics of soot formation in benzene co-flow diffusion flames[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*，2025，31(3)：311-321(in Chinese).

[41] Ren F，Cheng X，Gao Z，et al. Effects of NH_3 addition on polycyclic aromatic hydrocarbon and soot formation in C_2H_4 co-flow diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*，2022，241：111958.

[42] 余荣浩，徐义书，张 凯，等. 氨/甲苯层流扩散火焰中碳烟形态及纳观结构演变的实验研究[J]. 燃烧科学与技术，2025，31(2)：221-233.
Yu Ronghao，Xu Yishu，Zhangkai，et al. Soot morphology and nanostructure evolution in ammonia/toluene laminar diffusion flames[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*，2025，31(2)：221-233(in Chinese).

[43] 邱 亮，李中秋，刘 洋，等. 添加 CO_2/H_2O 对正丁醇火焰中碳烟反应的影响[J]. 内燃机学报，2018，36(5)：447-454.
Qiu Liang，Li Zhongqiu，Liu Yang，et al. Effects of CO_2/H_2O addition on soot reactions in n-butanol flames[J]. *Transactions of CSICE*，2018，36(5)：447-454(in Chinese).

[44] 闫治宇，史聪灵，熊新怡，等. 氢气/氮气添加对乙烯扩散火焰碳烟生成影响的模拟研究[J]. 西安交通大学学报，2025，59(10)：137-147.
Yan Zhiyu，Shi Congling，Xiong Xinyi，et al. Simulation study on the effect of hydrogen/nitrogen addition on soot formation in ethylene diffusiin flames[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*，2025，59(10)：137-147(in Chinese).

[45] 廉钰坤，王春波，洪迪昆. 掺氨对乙烯氧化过程中多环芳烃生成影响的分子动力学模拟[J]. 中国电机工程学报，2025，45(2)：461-468.
Lian Yukun，Wang Chunbo，Hong Dikun. Molecular dynamics simulation of the effect of ammonia on the generation of AH during ethvlene oxidation[J]. *Proceedings of the CSEE*，2025，45(2)：461-468(in Chinese).