

CO₂物理作用对甲烷扩散火焰燃烧特性影响

陈颖¹, 吕良海¹, 白永强¹, 姚伟¹, 王景甫²

¹北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所, 北京

²北京工业大学机械与能源工程学院, 北京

收稿日期: 2025年5月10日; 录用日期: 2025年6月2日; 发布日期: 2025年6月11日

摘要

本文以天然气的烟气再循环技术为研究背景, 主要研究CO₂气体的加入对CH₄/空气同轴射流层流扩散燃烧火焰影响。采用数值模拟方法, 对CO₂气体的物理特性对火焰温度, CH₄反应速率峰值和火焰尺寸的影响分别进行分析, 为深入研究CH₄火焰燃烧特性提供基础模拟理论的分析依据。研究结果显示, 当空气中的部分N₂被CO₂代替后, 火焰的燃烧温度会随着当量比的增加而降低, 随着CO₂体积分数的增加而降低, 并且无论是在贫燃料燃烧还是在富燃料燃烧, 这种变化趋势保持一致。而CO₂的加入因其自身的高比重使得CO₂进入燃烧室后具有较大的分子动量, 更有利于燃料与氧化剂混合发生反应, 因此使得CH₄/空气反应速率的峰值升高, 但并没有提高CH₄的燃烧效率。火焰尺寸不因CO₂的加入而发生变化, 但随着当量比的增加而减小。

关键词

烟气再循环, 天然气, CO₂物理特性, 火焰基础特性

The Influence of CO₂ Physical Effects on the Combustion Characteristics of Methane Diffusion Flames

Ying Chen¹, Lianghai Lyu¹, Yongqiang Bai¹, Wei Yao¹, Jingfu Wang²

¹Institute of Urban Safety and Environmental Science, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing

²Faculty of Energy and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

Received: May 10th, 2025; accepted: Jun. 2nd, 2025; published: Jun. 11th, 2025

Abstract

This study investigates the influence of CO₂ addition on CH₄/air coaxial jet laminar diffusion flames

文章引用: 陈颖, 吕良海, 白永强, 姚伟, 王景甫. CO₂ 物理作用对甲烷扩散火焰燃烧特性影响[J]. 可持续能源, 2025, 15(3): 43-52. DOI: 10.12677/se.2025.153006

within the context of flue gas recirculation (FGR) technology for natural gas combustion. Numerical simulations were conducted to analyze the effects of CO₂ physical properties on flame temperature, peak CH₄ reaction rate, and flame dimensions, providing foundational theoretical insights for further research on CH₄ flame combustion characteristics. Results indicate that substituting N₂ in air with CO₂ leads to a reduction in flame temperature, which decreases with both increasing equivalence ratio and CO₂ volume fraction. This trend remains consistent under both fuel-lean and fuel-rich combustion conditions. The introduction of CO₂ enhances the peak CH₄ reaction rate due to its higher molecular momentum, which promotes fuel-oxidizer mixing. However, no significant improvement in CH₄ combustion efficiency is observed. Flame dimensions remain unaffected by CO₂ addition but decrease with increasing equivalence ratio.

Keywords

Flue Gas Recirculation, Natural Gas, CO₂ Physical Effects, Flame Combustion Characteristics

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国的工业生产中,为了清洁地利用天然气,我国使用多种天然气的低 NO_x 排放技术。目前,我国的天然气低 NO_x 排放技术研究主要分为三种:① 对天然气和空气的预处理;② 空气和天然气的优化配置及新型燃烧器的设计;③ 烟气的后处理。

对天然气的预处理主要是在天然气中加入一些具有氧化或者还原物质,来抑制燃烧过程中生成的 NO_x。而对空气的预处理方法主要分为三种。其一为降低助燃空气的预热温度,从而可以降低火焰的绝热燃烧温度(即火焰温度峰值),减少热力型 NO_x 的生成量。其二为采用空气分离技术,助燃气体为从空气中分离出来的纯氧,没有 N₂ 参与反应,进而减少了快速型 NO_x 的生成量。其三为采用上个世纪 80 年代末日本提出来的高温空气燃烧技术(HTAC),它利用高效蓄热体,最大限度地回收高温烟气中的热量,把燃烧所需的空气预热到 1000℃ 以上,甚至达到 1400℃,使之进入燃烧室与燃料掺混后形成高温燃烧[1][2]。同时,通过燃烧过程的有效组织,降低了燃烧区的氧气浓度,从而使该技术具有节约燃料、低 NO_x 排放、热利用率高和减小设备尺寸等优点。

空气和天然气的优化配置及新型燃烧器的设计方法较多。对于空气和天然气的优化配置,可以采用新型的燃烧技术,目前应用主要有低过量空气燃烧、烟气再循环燃烧[3]、浓淡燃烧[4]、空气分级燃烧[5]、燃料分级燃烧[6]、多孔介质燃烧[7]等。根据低 NO_x 排放原理和不同的负荷需要,设计出了各种各样的低 NO_x 燃烧器,如浓淡型低 NO_x 燃烧器、两级燃烧式低 NO_x 燃烧器、燃气自身循环式低 NO_x 燃烧器、脉冲式低 NO_x 燃烧器和多孔介质低 NO_x 燃烧器等。此外,也可以把多种低 NO_x 燃烧排放原理综合利用,研制出超低 NO_x 燃烧器。目前,由于研究水平和技术支持方面的匮乏,我国和国际方面还存在一定的差距。

对烟气的净化处理可以根据反应介质状态的不同分为干法和湿法两类。干法包括:选择性催化还原(SCR),选择性非催化还原(SNCR)、非选择性催化还原(NSCR)、分子筛、活性炭吸附法、等离子体等;湿法包括酸碱溶液吸附法、氧化吸附法以及吸附还原法等。此外还有一些新型的烟气净化技术,如电子束照射法、脉冲电晕等离子体法和光催化分解法等,这些技术只是刚刚起步,距离成熟应用还需要一定的时间。

在上述提到的所有天然气低 NO_x 燃烧技术中,烟气再循环燃烧方式应用广泛,它的优点不仅仅在于

能够降低 NO_x 污染物的排放, 还能够提高燃烧效率, 高效回收燃烧产物 CO_2 , 具有明显的节能效果。结合烟气再循环燃烧方式的多种优点, 广泛应用于工业燃烧器、锅炉、燃气轮机、内燃机和斯特林发动机等领域。它的应用范围之广, 使得烟气再循环燃烧方式的研究尤其重要。本文以烟气再循环燃烧技术为研究背景, 对天然气的扩散火焰特性进行数值模拟分析。为天然气的低氮燃烧技术提供一些基本数值模拟数据根据。

CH_4 为天然气的主要成分, 且杂质很少, 因此在大部分学者的研究中直接用纯 CH_4 代替天然气。空气的主要成分为 O_2 和 N_2 , 在本研究中认为空气只由这两种成分组成。烟气中的主要成分为 CO_2 , 烟气再次回到燃烧室参加反应时, 天然气的燃烧气氛就由原来的空气气氛, 变为空气加 CO_2 气氛。当火焰的燃烧气氛发生变化时, 其火焰的基础特性也会发生变化。为了更加清楚地知道在烟气再循环燃烧方式下天然气的燃烧特性, 就必须解明空气加 CO_2 气氛与空气气氛对火焰燃烧特性产生的不同影响。因此, 开展 CH_4 在 $\text{O}_2/\text{N}_2/\text{CO}_2$ 气氛下燃烧的火焰特性基础研究具有重要的现实意义, 可为改善能源结构、天然气的低氮燃烧、烟气再循环燃烧技术的发展提供一些基础的理论依据。

2. 数值模型建立

2.1. 同轴射流扩散火焰喷嘴设计尺寸

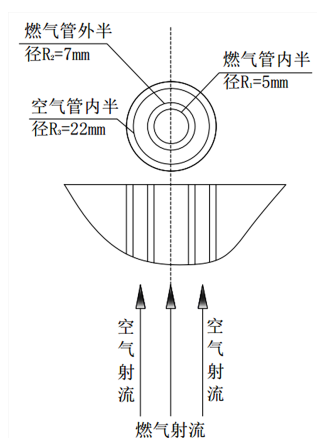


Figure 1. Structure and size of the nozzle

图 1. 喷管结构尺寸图

本文的数值模拟对象为同轴射流扩散火焰, 模拟所用喷管结构尺寸图如图 1 所示。内管为燃气管, 主要通燃料 CH_4 , 半径为 5 mm, 壁厚 2 mm; 外管为助燃剂管, 主要通空气, 半径为 22 mm, 壁厚 2 mm。燃气进口截面面积:

$$S_1 = \pi R_1^2 = 78.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (1)$$

空气进口截面面积:

$$S_2 = \pi (R_2^2 - R_1^2) = 1365.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (2)$$

2.2. 同轴射流扩散火焰燃烧室的设计尺寸

本文模拟的是在确定尺寸的燃烧室内同轴射流层流扩散火焰的燃烧特性, 燃气和助燃剂从喷管喷出后进入到燃烧室内进行扩散燃烧。燃烧室的尺寸大小即为 FLUENT 的计算范围。本文的燃烧室为长 1.5 m, 直径 0.3 米的圆筒, 中间中空, 燃烧产物出口与大气相通。具体尺寸如图 2 所示。

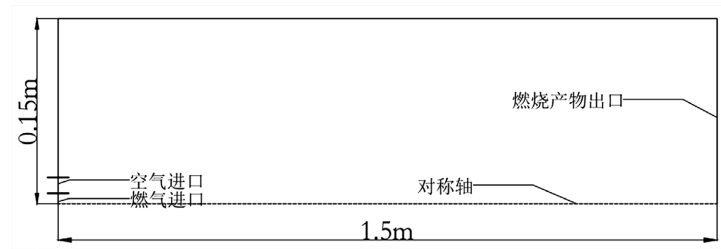


Figure 2. Size of the combustor
图 2. 燃烧室空间尺寸

2.3. 同轴射流扩散火焰数值计算空间网格划分

对于本文中的燃烧室模型，空气入口及燃气入口是比较重要的部位，所以左侧网格应分布较密，此外，在对称轴部位靠近燃气入口的流动较为强烈，故网格应较为稠密。在图 3 的计算空间中，燃气进口边界节点间距为 1 mm；空气进口边界间距为 1.5 mm；壁厚为均匀网格，节点间距 1 mm；右侧压力出口为均匀网格，边界节点间距为 1 mm；左侧壁面为非均匀网格，节点间距为 3 mm，ratio = 1.05，沿 Y 轴方向网格间距逐渐增大；上壁面及 X 轴为非均匀网格，节点间距为 5 mm，ratio = 1.02，沿 X 轴方向网格间距逐渐增大。划分面网格时：Element 项选择 Quad，Type 项选择 Pave，即非结构化网格。

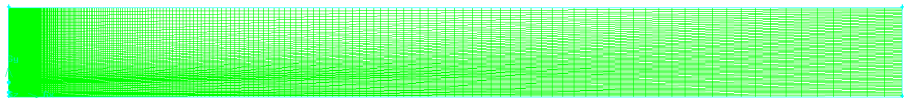


Figure 3. The grid of the iteration space
图 3. 计算空间网格划分

2.4. 网格无关性验证

本文对模拟网格进行无关性验证，对燃烧室模型的网格划分情况分为五种，网格数量分别为：7600，9100，18,300，36,600，45,700。以燃烧室出口的温度为监测值，模拟情况如图 4 所示。将每一次的计算结果与前一次计算结果比较发现，当网格数目超过 18,300 后，计算结果相差不大，基本控制在 0.4%左右，故综合考虑网格的经济性和合理性，本文模型的网格采用第三种网格数目的划分方法。

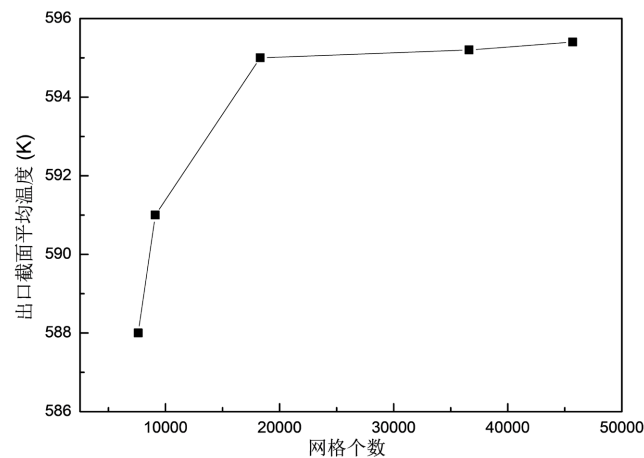


Figure 4. Grid independence verification
图 4. 网格无关性验证

3. 结果和讨论

3.1. CO₂添加对火焰温度的影响

3.1.1. 化学当量比对火焰温度的影响

图 5 显示了在相同的 CO₂ 体积分数, 不同的当量比下, CH₄ 绝热火焰温度的变化情况。由图 5(a)和图 5(b)可以看出, 无论是在贫燃料燃烧还是在富燃料燃烧中, 在相同的 CO₂ 浓度下, 火焰的绝热火焰温度均随当量比的增大而逐渐地降低, 降低趋势基本一致。其原因在于在本文的模型中, 燃料进口喷嘴尺寸半径固定, 且为保证燃料量一致, 故当量比直接反应氧化剂的进口速度, 由图 5 可以看出, 由贫燃料燃烧逐渐过渡到富燃料燃烧, 当量比的逐渐增大, 其空气速度是逐渐降低的。在贫燃料燃烧中, 氧化剂过剩, 即 CH₄ 可以得到充分燃烧; 而在富燃料燃烧中, 燃料过剩, 氧化剂不足, 结果导致燃料不能够完全燃烧。在本文的模拟过程中, 为了保证可比性, 进入燃烧室的燃料的质量流量均保持恒定。所以, 在随着当量比的增大, 由贫燃过渡到富燃燃烧过程, 等量燃料 CH₄ 由充分燃烧过渡到不完全燃烧, 其释放的热量定会有所减少, 故火焰的绝热火焰温度随着当量比的增加会逐渐地降低。

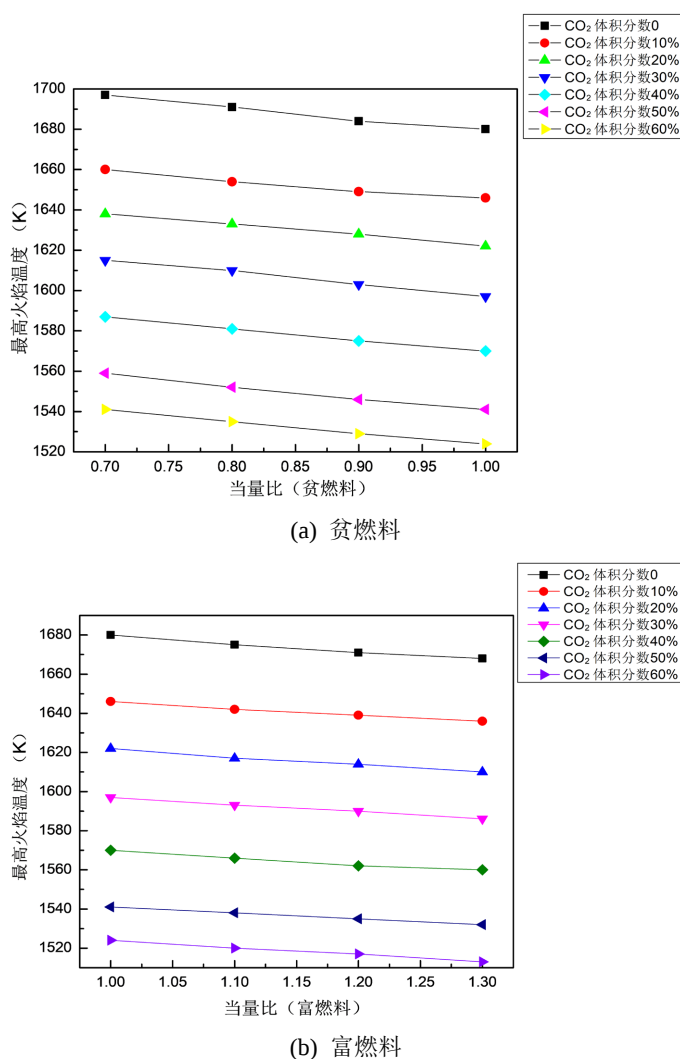


Figure 5. Variation of peak flame temperature with equivalence ratio
图 5. 最高火焰温度随当量比的变化曲线

3.1.2. CO₂ 体积分数对火焰温度的影响

图 6 所示为在不同当量比下, 绝热火焰温度随 CO₂ 体积分数的变化情况。从图中可以看出, 无论是在贫燃料燃烧还是在富燃料燃烧过程中, 随着 CO₂ 体积分数的增加, CH₄ 的绝热火焰温度逐渐降低, 且降低趋势相同, 基本呈线性趋势降低。造成这种下降趋势的原因与 CO₂ 的物理特性有很大关系。在本文中 CO₂ 的体积分数即为它代替的 N₂ 部分, N₂ 的摩尔比热容为 6.96 KJ/(mol·K), CO₂ 的摩尔比热容为 8.87 KJ/(mol·K)。比热容越大意味着同样体积分数的 N₂ 和 CO₂ 相比, CO₂ 本身吸收的热量更多, 故造成了绝热火焰温度较纯 N₂ 气氛的逐渐降低。并且, 随着 CO₂ 体积分数的增加, CO₂ 的这种吸热效应更加的明显, 温度下降趋势更加的明显。在图 6(a)和图 6(b)中, 均有当量比为 1 时绝热火焰温度随 CO₂ 体积分数的变化, 故比较当量比为 1 时, CO₂ 的体积分数为 0%和 10%两种工况。第一种工况空气气体成分体积比为 O₂:N₂:CO₂ = 21:79:0, 第二种工况空气气体成分体积比为 O₂:N₂:CO₂ = 21:69:10, 两种工况的根本区别在于 10%的 N₂ 和 10%的 CO₂ 产生的影响。由于 CO₂ 的比热容大于 N₂, 故 10% CO₂ 吸收的热量, 必然大于 10% N₂ 吸收的热量, 火焰燃烧温度必然会下降, 这与赵然[8]的研究结果一致。根据模拟结果显示每增加 10% CO₂, 绝热火焰温度约下降 20~30 K。此外, CO₂ 气体较 N₂ 气体的低扩散性也是火焰温度下降的原因。CO₂ 在氧气中的扩散率为 0.139 cm²/s, N₂ 在氧气中的扩散率为 0.185 cm²/s, 两种工况中 10% CO₂ 与 10% N₂ 相比, CO₂ 的低扩散率使得火焰传播变得困难, 火焰反应速率降低, 则火焰温度必然下降。

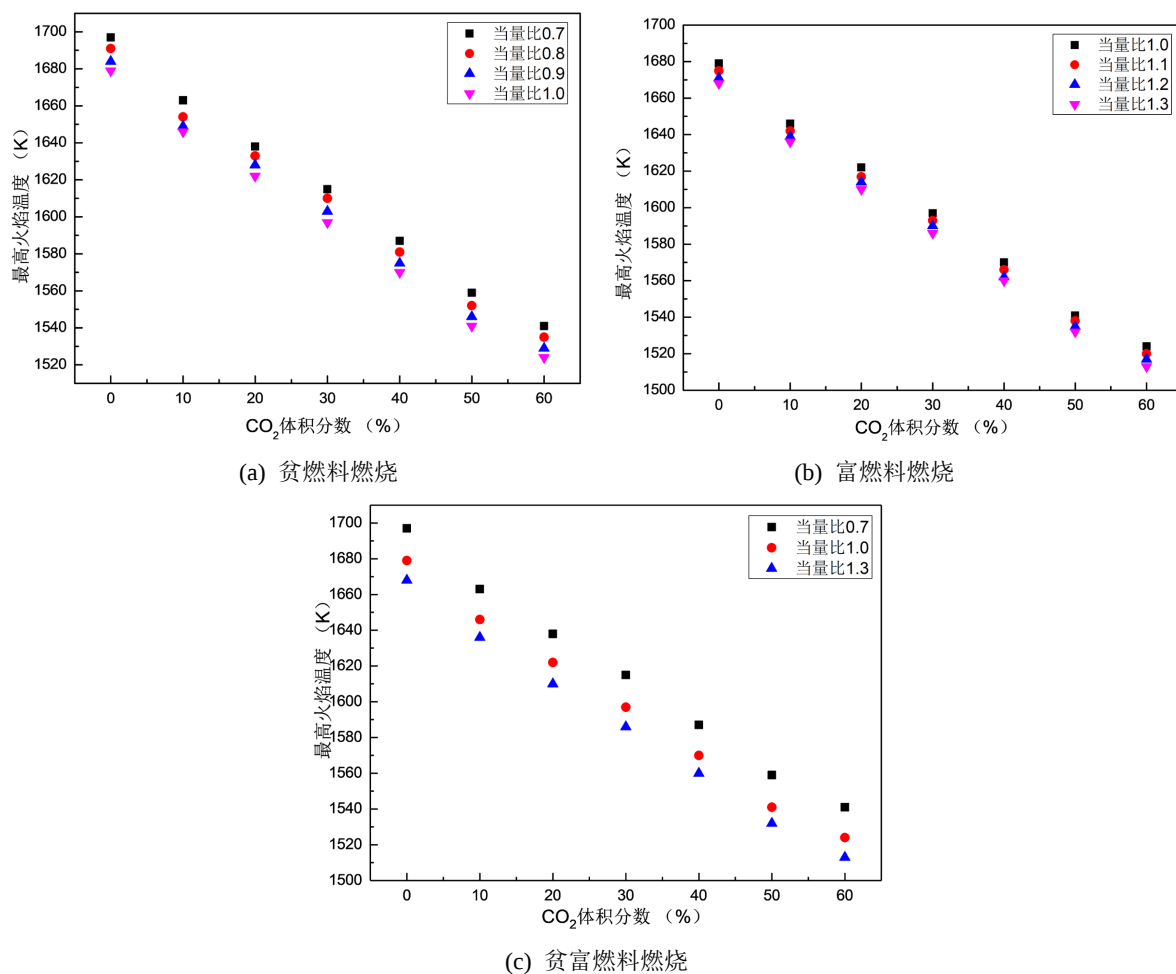


Figure 6. variation of peak flame temperature with CO₂ volume fraction

图 6. 最高火焰温度随 CO₂ 体积分数的变化曲线

图 6(c)显示的是绝热火焰温度在当量比为 0.7、1.0、1.3 下, 随 CO_2 浓度的变化情况, 此图是把贫燃料燃烧、化学恰当反应、富燃料燃烧反映在一张图中, 更加直观地看出绝热火焰温度在不同的燃烧情况下随 CO_2 体积分数的变化情况。从图中, 可以看出在相同的 CO_2 体积分数下, 在贫燃料燃烧中当量比的变化对绝热火焰温度的影响较富燃料燃烧更加的明显。图 6(c)中显示相同的 CO_2 体积分数, 在贫燃料燃烧中, 当量比由 0.7 增加到 1.0, 绝热火焰温度降低约为 17 K 左右; 在富燃料燃烧中, 当量比由 1.0 增加到 1.3, 绝热火焰温度降低约为 10 K 左右。

3.2. CO_2 添加对 CH_4 反应速率峰值的影响

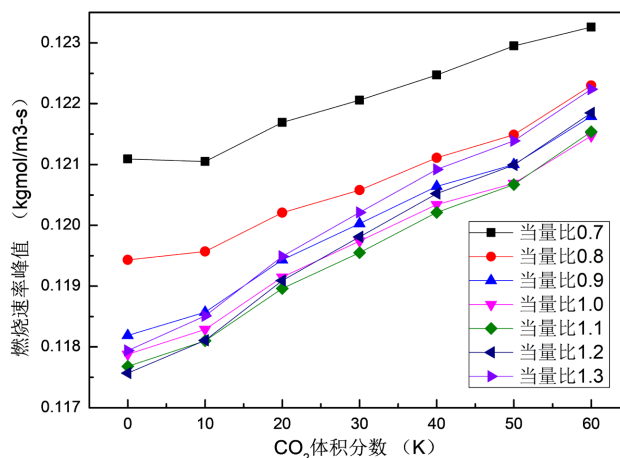


Figure 7. The effect of CO_2 on the peak combustion rate of CH_4
图 7. CO_2 对 CH_4 燃烧速率峰值的影响

在燃烧过程中, 在不考虑燃料与氧化剂的混合过程和燃烧过程之间重叠作用的情况下, 整个反应所需要的时间 τ 应该等于燃料混合时间 τ_{mix} 和化学反应时间 τ_{che} 之和, 即 $\tau = \tau_{\text{mix}} + \tau_{\text{che}}$ 。如果 $\tau_{\text{mix}} \ll \tau_{\text{che}}$, 则有 $\tau \approx \tau_{\text{che}}$, 称之为动力燃烧。此时燃烧过程主要受化学动力学因素影响, 预混燃烧属于动力燃烧工况。如果 $\tau_{\text{mix}} \gg \tau_{\text{che}}$, 则有 $\tau \approx \tau_{\text{mix}}$, 称之为扩散燃烧, 此时燃烧过程主要被扩散因素控制, 可燃物的化学性质对燃烧速率的影响较小, 而流体的动力学因素则强烈地影响着燃烧速率。

本文的研究对象为层流扩散火焰, 即燃烧速率主要受扩散过程的影响。由图 7 显示在 0.7~1.3 的当量比下, 随着 CO_2 体积分数的增加, 燃烧速率在逐渐的增加。其主要原因是 CO_2 代替 N_2 后, 由于 CO_2 较 N_2 具有较高的比重, 当 CO_2 分子以一定的速度进入燃烧室和空气扩散混合时, CO_2 分子有较大的分子动量, 更有利于燃料和氧化剂的混合, 故反应速率略有增加, 但是增加的速率数量级在 10^{-3} , 还是比较小的。值得一提的是, 虽然 CO_2 的加入对燃料的化学反应速率略微提高, 但是并没有提高燃料的燃烧效率, 原因在于 CO_2 具有较大的热容, 当 CO_2 代替部分 N_2 后, 导致火焰放出的热量被 CO_2 更多的吸收, 反而减小了火焰的放热量, 进而降低了火焰的燃烧效率[9]。

3.3. CO_2 添加对火焰尺寸的影响

3.3.1. CO_2 体积分数对火焰尺寸的影响

火焰尺寸的大小直接关系到火焰结构、污染物生成。此外, 在燃气轮机燃烧室中, 火焰尺寸还影响着火焰燃烧的稳定性 and 燃烧室尺寸的大小。因此研究 CO_2 代替部分 N_2 后, 扩散火焰的结构及尺寸变化不但可以从火焰结构中分析火焰稳定性、污染物生成, 还对燃气轮机燃烧室设计改造有重要的指导意义。在数值计算中, 火焰长度的表示方法多种, 文献[10]中用火焰温度分布云图来表征火焰长度; 文献[11]中

用火焰燃烧反应速率来表征温度分布云图。在本文中，用温度分布云图来表征火焰外形的尺寸。

从图 8 中可以看出，在当量比为 1.0 时，用 CO_2 替代空气中原有的部分 N_2 ，结果为降低了火焰的绝热温度。但是，云图的分布并未发生变化。也就是说， CO_2 的添加并未影响到火焰的结构变化。根据相似理论或对扩散方程进行简化处理，可以导出气体燃料与空气等速同向流动层流扩散火焰的火焰长度 L 表达式[12]：

$$L = \frac{V}{2\pi D} \quad (3)$$

式中 V 为燃料流和空气的流量， D 为扩散系数。对于气体燃料和空气等速同向流的火焰，当燃料和空气的流量一定时，其火焰长度与喷嘴直径及喷射压力均无关。同样地，当气体燃料和空气助燃剂的速度不相同时，定性上也可以这样做相似分析。在本文中，由于固定的燃烧室尺寸及喷嘴尺寸，保持恒定的当量比，即不改变燃料和空气的进口速度(总的流量未变)；给定燃料 CH_4 ，其在 O_2 中的扩散系数不变。用 CO_2 代替部分的 N_2 后，并未改变总流量和燃料的扩散系数，故火焰的尺寸也不会变化。所以，在图 8 的三幅图中，随着 CO_2 体积分数的增加，火焰尺寸并未发生变化。

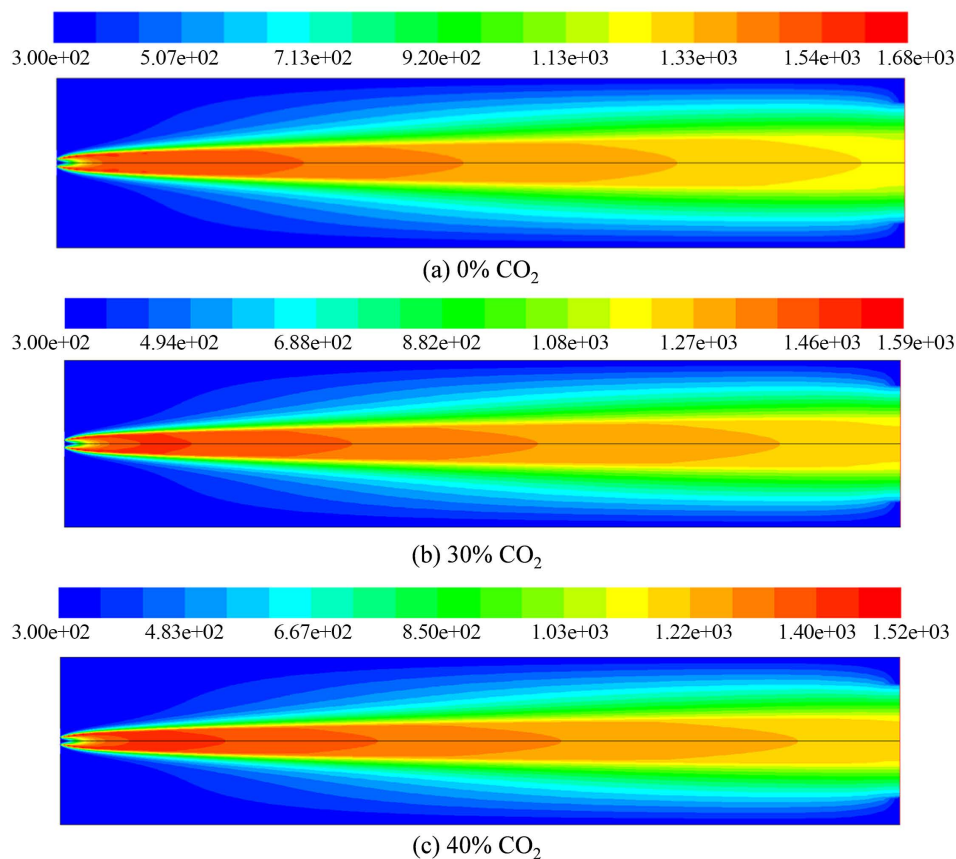


Figure 8. The volume fraction of CO_2 effect on the flame structure ($\Phi = 1.0$)

图 8. CO_2 体积分数对火焰结构的影响(当量比为 1)

3.3.2. 当量比对火焰尺寸的影响

图 9 显示的是在不同的当量比下，火焰尺寸的变化。从图中可以看出，随着当量比的增加，由贫燃燃烧状态过渡到富燃燃烧状态下，火焰靠近喷嘴处逐渐变粗，即火焰燃烧区域变大。由于燃烧室尺寸的

限制, 温度云图并未把整个火焰显示完全, 但是根据燃烧室出口处的火焰情况推测可得, 随着当量比的增加火焰长度逐渐变短。因为在上一节已经分析过 CO_2 体积分数的增加并未对火焰尺寸产生影响, 所以, 此处显示的是在当量比为 0.7, 1.0, 1.3, 空气成分为 $\text{O}_2:\text{N}_2 = 21:79$ (即并未加入 CO_2) 时的火焰尺寸。在本文的燃烧室模型中, 燃烧室尺寸及燃料喷嘴、空气喷嘴尺寸均为确定值, 故进口的速度可以直接反应流量大小。此外为了排除燃料量变化对分析对象产生影响, 本文保证燃料(CH_4)进口速度保持恒定。如果改变当量比, 即改变空气进口速度。当量比的增加实质上是空气进口速度减小的过程。由前面一节的分析可知, 火焰长度与空气和燃料进口的总流量成正比, 空气进口速度减小将导致总的进口流量减少, 故火焰长度会有所减小。空气以一定的速度进入到燃烧室内, 会将燃料流往轴向方向带, 当空气进口速度降低时, 这种作用会略微减轻, 即 CH_4 往燃烧室的径向方向的扩散会略微增加, 故火焰底部会略微变粗。

Hawthor 和他的合作者[13]根据直观的实验研究建立了层流扩散火焰长度与喷嘴直径和气体流动速度之间的一个简单关系, CH_4 /空气层流扩散火焰的长度与喷嘴出口横截面积以及通过这个横截面积时的气流速度成正比。张鹏[14]在此研究基础上加入了稀释气体稀释的影响, 得出结论: 稀释条件下的, CH_4 /空气同轴射流层流扩散火焰长度与通过喷嘴出口横截面积时的气流速度成正比, 与稀释量成反比。在张鹏的研究中, 稀释气体为 N_2 和 CO_2 , 并直接加入到燃料中。当加入稀释气体后, 稀释量的增加造成燃料浓度的降低, 引起了火焰长度的减小。而在本文中, CO_2 气体加入到空气中, 并且 CO_2 的加入并未引起燃料和氧化剂的流量变化, 所以火焰尺寸没有变化并不会和张鹏[14]的研究结果相违背。

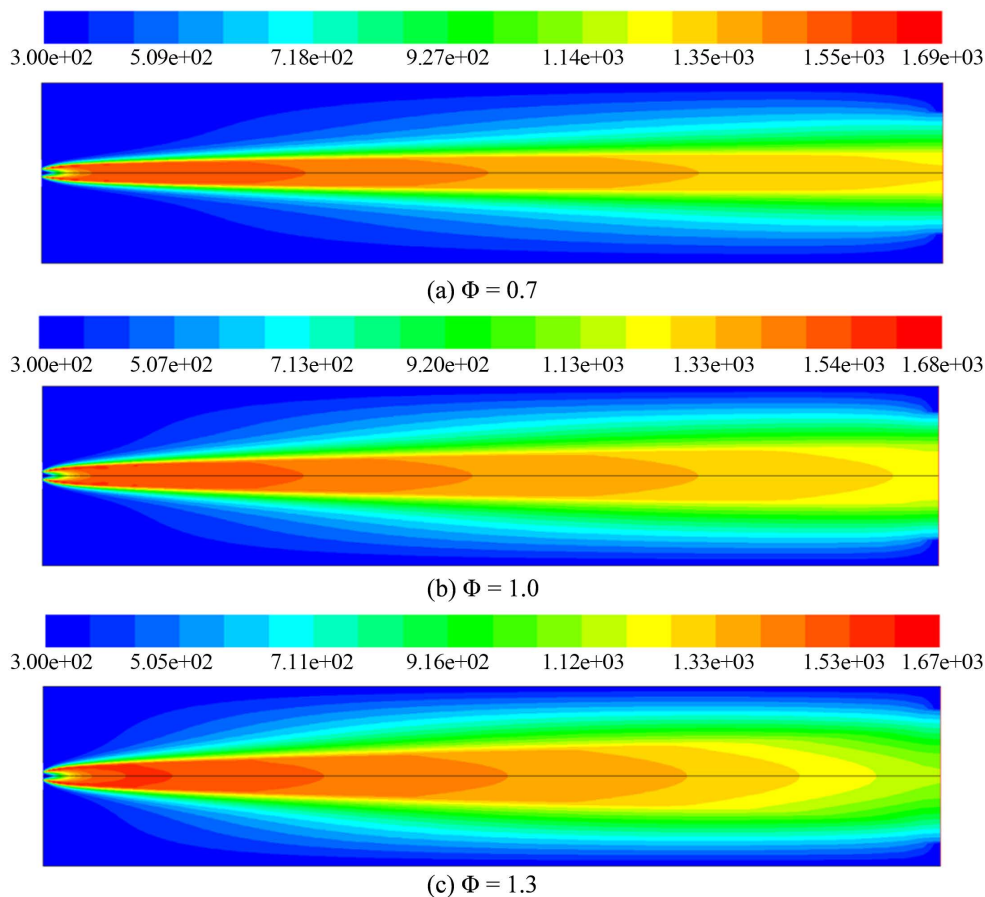


Figure 9. The equivalence ratio effect on the flame structure

图 9. 当量比的变化对火焰结构的影响

5. 结论

本文主要利用 FLUENT 软件计算模拟了 CH_4 /空气在不同的当量比下, 用 CO_2 代替部分空气中的 N_2 , CO_2 体积分数由 0% 增加到 60% 时火焰的燃烧特性, 并得出了以下结论:

1) 当空气中的部分 N_2 被 CO_2 代替后, 火焰的燃烧温度会随着当量比的增加而降低, 随着 CO_2 体积分数的增加而降低, 并且无论是在贫燃料燃烧还是在富燃料燃烧, 这种变化趋势保持一致。造成这种现象的主要原因是 CO_2 明显的阻燃效果。 CO_2 较 N_2 对燃烧的阻碍作用强烈可以用 CO_2 的热效应和 CH_4 反应机理来解释。

2) CO_2 的加入使得 CH_4 /空气反应速率的峰值升高。其主要原因是 CO_2 的高比重使得 CO_2 进入燃烧室后其较大的分子动量更加有利于燃料与氧化剂的混合进行反应。但, 并没有提高 CH_4 的燃烧效率。

3) CO_2 的加入并不会影响火焰结构, 因为 CO_2 的加入在相同的当量比下并没有改变能够影响火焰结构的因素。但火焰结构会随当量比的增加而减小, 其原因在于当量比的增加意味着空气进口速度变慢, 而空气进口速度的缓慢将导致总的进口流量减少, 故火焰长度会有所减小。

基金项目

本文由北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所“科技启萌计划”项目资助。

参考文献

- [1] 刘敏飞, 朱彤, 张鹤声. 高温空气燃烧技术的特点及其应用前景[J]. 能源研究与信息, 2001, 17(1): 27-35.
- [2] 吴道洪. 大力推广高效节能、低污染燃烧器[J]. 能源研究与应用, 2000(2): 36-37.
- [3] Wolsky, A.M. (1986) A New Method of CO_2 Recovery. 79th Annual Meeting of the Air Pollution Control Association, Minneapolis, 22-27 June 1986, 1-3.
- [4] 刘丽珍. 浓淡燃烧低 NO_x 燃烧器研制的探讨[J]. 煤气与热力, 2000, 20(5): 349-351+359.
- [5] 周跃花. 燃烧时 NO_x 的转化与控制[J]. 西安联合大学学报, 2000, 3(4): 70-74.
- [6] 毕玉森. 低氮氧化物燃烧技术的发展状况[J]. 热力发电, 2000, 29(2): 2-9.
- [7] Brenner, G., Pickenäcker, K., Pickenäcker, O., Trimis, D., Wawrzinek, K. and Weber, T. (2000) Numerical and Experimental Investigation of Matrix-Stabilized Methane/Air Combustion in Porous Inert Media. *Combustion and Flame*, **123**, 201-213. [https://doi.org/10.1016/s0010-2180\(00\)00163-2](https://doi.org/10.1016/s0010-2180(00)00163-2)
- [8] 赵然. 高浓度 CO_2 气氛下 NO 释放及火焰特性的动力学研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [9] 张双. 氢气和稀释气体对甲烷/空气预混层流火焰燃烧特性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [10] 徐琼辉, 詹杰民. 预混燃烧中火焰长度的变化规律研究[J]. 中山大学学报, 2008, 47(5): 37-43.
- [11] 徐琼辉, 詹杰民. 非预混燃烧中喷嘴结构布局影响火焰长度的变化[J]. 热能动力工程, 2009, 24(2): 216-227.
- [12] 徐旭常, 周力行. 燃烧技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 52.
- [13] Barllts, H. (1998) Simulation of Pollutant Formation in a Gas Turbine Combustor Using Unsteady Flamelets. *Symposium (International) on Combustion*, **63**, 269-281.
- [14] 张鹏. 稀释气体对甲烷/空气火焰燃烧特性影响的研究与分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2016.