

稀释对射流扩散火焰抬举及吹熄特性影响的实验研究

严野, 蒋年鹏, 张海涛

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要: 以低热值气体燃料的燃烧利用为背景, 以 N_2 或 CO_2 稀释的甲烷或丙烷及内径 2mm 或 3mm 的喷管作为多重变量, 实验研究了射流扩散火焰的抬举速度及吹熄速度随燃料稀释比的变化规律. 结果发现, 随着稀释比的增大, 火焰抬举速度近似呈线性缓慢减小, 吹熄速度近似呈指数快速衰减. 分析表明, 这主要归因于稀释导致了当量混合层流火焰速度、初始燃料质量分数及燃烧放热的减小, 并对低热值气体燃料的燃烧器设计提出了建议. 此外, 大于临界稀释比时, 附着火焰随射流速度的增大不能转变为稳定的抬举火焰而会发生直接吹熄, 依据甲烷和丙烷临界稀释比对应的射流雷诺数推测出二者的临界稀释比可能受不同机理的控制.

关键词: 低热值气体燃料; 射流扩散火焰; 稀释; 抬举; 吹熄

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.03.009

引用格式: 严野, 蒋年鹏, 张海涛. 稀释对射流扩散火焰抬举及吹熄特性影响的实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(3): 246-252.

YAN Ye, JIANG Nianpeng, ZHANG Haitao. Experimental investigation on the effect of dilution on the liftoff and blowout characteristics of jet diffusion flame[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(3): 246-252.

Experimental investigation on the effect of dilution on the liftoff and blowout characteristics of jet diffusion flame

YAN Ye, JIANG Nianpeng, ZHANG Haitao

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: On the background of combustion utilization of low calorific value gas fuel, methane or propane diluted by N_2 or CO_2 and nozzles of 2mm or 3mm inner diameter are set as multiple experimental variables. The liftoff and blowout velocities of jet diffusion flame varying with the diluent concentration were experimentally investigated. With the increase of the diluent concentration, the liftoff velocities slowly decline almost linearly, while the blowout velocities quickly decrease nearly exponentially. The analysis shows that the tendencies may be attributed to the decreases in the stoichiometric laminar burning velocity, the original fuel mass fraction and heat release. Suggestions on the design of burner utilizing low calorific value gas fuel are proposed. In addition, exceeding the critical diluent concentration, the attached flame is directly quenched instead of being a stable lifted flame with the increase of the jet velocity. According to the Reynolds numbers of methane and propane at each critical diluent concentration, it can be inferred that the two critical diluent concentrations of methane and propane are controlled by different

收稿日期: 2017-03-20; 修回日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(51176178)资助.

作者简介: 严野(通讯作者), 男, 1989年生, 博士生. 研究方向: 湍流燃烧的实验研究. E-mail: yanye@mail.ustc.edu.cn

mechanisms.

Key words: low calorific value gas fuel; jet diffusion flame; dilution; liftoff; blowout

0 引言

在锅炉炉膛、燃气轮机燃烧室及火炬系统等实际燃烧设备中,出于安全性和操作便利性的考虑,射流扩散火焰是最常用的燃烧组织方式.在燃烧的基础研究领域,射流扩散火焰也一直是研究热点^[1-2].随着燃料射流速度的增大,射流扩散火焰通常会依次呈现附着火焰状态、发生火焰抬举、稳定的抬举火焰(lifted flame)状态及发生火焰吹熄等典型状态.某些情况下,附着火焰随着射流速度的增大不能转变为稳定的抬举火焰,而发生直接吹熄^[3-5].目前对层流抬举火焰的驻定机理主要解释为存在三叉火焰结构^[3, 6],对湍流抬举火焰的驻定机理主要有预混火焰传播模型、层流扩散火焰面熄火模型及大尺度涡模型^[1-2]三种解释.

Kalghatgi^[7]实验得到了甲烷、丙烷、丁烷、乙烯、乙炔、氢气及用 CO_2 或空气稀释的甲烷和丙烷在多个直径喷管上自由射流扩散火焰的吹熄速度,并依据预混火焰传播模型的驻定机理,得出一个适用于一定雷诺数范围内的统一无量纲公式,用以描述纯燃料或稀释燃料的自由射流火焰吹熄速度与初始参数的关系. Broadwell等^[8]利用Kalghatgi的实验数据,依据大尺度涡模型的驻定机理,推导出了一个可用于预测纯燃料及稀释燃料火焰吹熄速度的无量纲公式. Chao等^[9]在5mm内径喷管上实验得到了用 He 、 Ar 、 N_2 、 CO_2 稀释的甲烷和丙烷自由射流扩散火焰吹熄速度随稀释比的变化,实验数据与Kalghatgi的公式计算值吻合较好,并指出Broadwell的公式只适用于吹熄时射流雷诺数大于30000的情况,同时对稀释比较大时的Broadwell的公式进行了雷诺数修正. Gollahalli等^[10]在5.53、8.74和12.36mm内径的射流喷管上研究了无空气伴流时 N_2 或 CO_2 稀释的丙烷的火焰抬举速度和再附着速度随稀释比的变化,结果发现:稀释比增大,火焰抬举速度减小;喷嘴直径增大,火焰抬举速度和再附着速度都减小^[10]. Wilson等^[11]实验研究了存在空气伴流时 N_2 稀释的甲烷和乙烯射流扩散火焰的抬举速度、再附着速度随稀释比的变化,并分析了放热对于火焰驻定的影响.

生物沼气、垃圾填埋气、石油伴生气及煤层气

(瓦斯)等低热值气体燃料,主要含可燃成分甲烷、丙烷及不可燃成分 N_2 、 CO_2 、空气等.低热值气体燃料因可燃成分少,存在点火不易、火焰稳定性差、易吹熄、火焰温度低等问题.不同燃烧设备中的火焰有的以附着火焰状态运行,有的以抬举火焰状态运行,燃烧设备燃用低热值气体时,为满足热功率,往往需要增大燃料流速或燃烧器喷管口径,这两者对附着火焰及抬举火焰存在范围的影响是不同的,同时也对火焰驻定提出了新的要求.研究不同燃料、不同稀释气及不同射流管径时的射流扩散火焰的抬举速度和吹熄速度随燃料稀释比的变化关系,对实际燃烧器尤其是低热值气体燃料燃烧器的设计具有很大的指导意义,然而这方面的实验研究还不充分.考虑到实际常见低热值气体燃料的主要组分,本文采用甲烷和丙烷作为燃料, N_2 和 CO_2 分别作为稀释气,且分别采用内径2mm和3mm的射流喷管,研究射流扩散火焰的抬举速度及吹熄速度随稀释比的变化规律,并对此做出理论分析.

1 实验设置

实验系统布置见图1.采用内径2mm(壁厚2mm)和内径3mm(壁厚1.5mm)的不锈钢圆管分别作为射流喷管,两根喷管外径均为6mm,长度均为400mm.燃料甲烷、丙烷和稀释气 N_2 、 CO_2 分别源于各自的气罐,纯度均为约99.9%.燃料和稀释气在较长的流动管道内充分混合后通入垂直向上的射流圆管,在圆管出口处附近采用点火枪点火.一次实验中只采用一种燃料和一种稀释气,流量分别通过各自管路中的质量流量控制器(MFC)调节控制并有配套的流量显示器,燃料和稀释气的MFC的最大量程分别为150SLM和50SLM,最小分度值均为

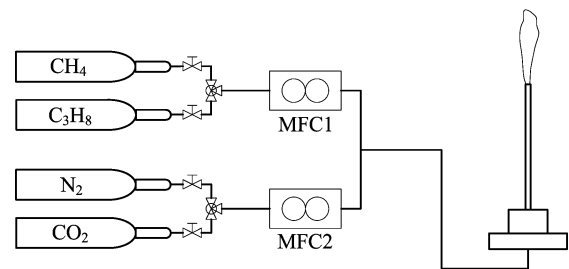


图 1 实验系统布置示意图

Fig.1 Schematic of the experimental setup

0.1SLM.实际操作中通过三通接头及阀门开闭可以方便地实现燃料和稀释气的切换,通过不锈钢卡套接头可以方便地实现两种尺寸射流圆管的更换及其与底座的连接.

通过点火枪点火后,固定燃料的流量,使得火焰附着在喷管口,然后逐渐缓慢地增大稀释气的流量,使得火焰发生抬举或吹熄,记下此时的稀释气流量,为减小随机误差,重复 4 次并取稀释气流量的平均值,即可得到稀释燃料火焰的抬举速度或吹熄速度与当时的稀释比.而后再数次改变初始的燃料流量,重复上述步骤,即可得到火焰发生抬举和吹熄时的射流速度随着一系列稀释比的变化.固定燃料流量而逐步调节稀释气流量的实验方法让实际操作变得方便.

2 结果与分析

2.1 纯燃料的火焰抬举、再附着及吹熄速度

为便于与稀释的燃料的实验进行对比,首先开展了纯燃料的射流扩散火焰实验.图 2 展示了 2 mm 和 3 mm 内径的喷管上纯甲烷和纯丙烷射流扩散火焰的抬举速度、再附着速度及吹熄速度.可以看出,管径相同时,与甲烷火焰相比,丙烷火焰的抬举速度和再附着速度更小而吹熄速度更大,即丙烷的附着火焰、再附着火焰存在范围更小而抬举火焰存在范围更广.对于同一种燃料,随着管径的增大,火焰的抬举速度和再附着速度略有减小,吹熄速度显著增大,即大直径喷管的附着火焰和再附着火焰存在范围更小而抬举火焰存在范围更大.当射流管径变至 1.5 倍时(即 2 mm 增大到 3 mm),甲烷和丙烷火焰抬举速度分别变至 0.753 倍和 0.787 倍,火焰再附着速度分别变至 0.893 倍和 0.953 倍,火焰吹熄速度分别变至 1.34 倍和 1.35 倍.

图 2 得到的变化规律和实际燃烧器的设计是一致的.灶具的燃烧器喷嘴由许多小孔或细缝组成,这是因为在灶具燃烧器上期望得到附着火焰;而锅炉炉膛及燃烧室的燃烧器喷嘴一般由口径较大的喷管构成,这是因为在这些燃烧器上普遍期望得到抬举火焰.液化石油气(首要成分是丙烷)灶具燃烧器喷嘴的孔或细缝的内径尺寸略小于天然气(首要成分是甲烷)灶具燃烧器的,这即是通过减小液化石油气灶具燃烧器喷嘴的孔或缝的内径尺寸以得到更大存在范围的附着火焰.

以下对大直径喷管上或丙烷具有更大的火焰吹熄速度做出定性解释.依据湍流抬举火焰的预混火

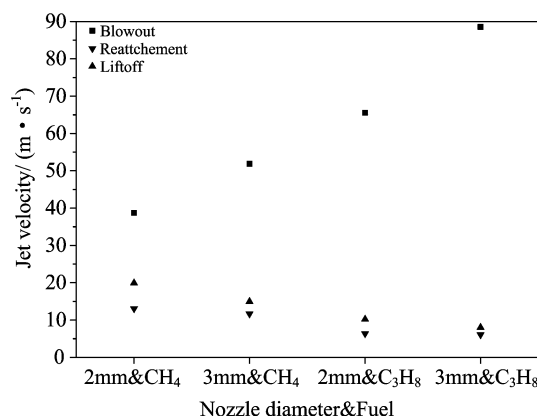


图 2 甲烷和丙烷的火焰抬举、再附着及吹熄速度
Fig.2 Flame liftoff, reattachment and blowout velocities of CH₄ and C₃H₈

焰传播驻定机理,即火焰底部位置处射流燃料已与空气充分预混,抬举火焰的驻定是因火焰底部的湍流预混火焰传播速度与当地的流场速度相平衡,火焰吹熄是因为火焰底部的湍流预混火焰传播速度无法抵御过大的当地流场速度^[12].而 Kalghatgi 推导出湍流预混火焰传播速度与管流的积分长度尺度的射流雷诺数及当量混合层流火焰速度 S_L 呈正相关^[13],而在管流中积分长度尺度往往与管内径一致^[14],则对于同一种燃料,在大直径喷管上具有更大的射流雷诺数及湍流预混火焰传播速度,因而需要更大的射流速度才能发生火焰吹熄.本实验条件下(101.325kPa, 15°C),甲烷的当量混合层流火焰速度(0.372 m/s)与丙烷的(0.382 m/s)相差不大,而丙烷的运动粘度(4.1477×10^{-6} m²/s)显著小于甲烷的(15.976×10^{-6} m²/s),则当燃料射流速度相同时,在同一喷管上丙烷的射流雷诺数更大,故丙烷的湍流火焰传播速度更大^[13],所以丙烷火焰的吹熄速度更大.

2.2 稀释对火焰抬举速度和吹熄速度的影响

图 3 展示了用 N₂ 或 CO₂ 稀释的甲烷或丙烷在 2 mm 或 3 mm 管径喷管上的火焰抬举速度随着稀释比的变化,图 4 展示了相同实验工况时火焰吹熄速度的情况.此稀释比定义为燃料和稀释气充分混合后稀释气体积流量与混合气体积流量之比.可以看出,在所有工况中,火焰的抬举速度和吹熄速度均随着稀释比的增大而减小.从减小的绝对值或相对值来看,抬举速度缓慢减小而吹熄速度呈凹曲线形式快速减小.

对于含稀释气的燃料即所谓低热值气体,随着稀释气含量的增大,可燃成分降低,其吹熄速度显著减小,如图 4 所示,且由于热值的降低,造成最大热

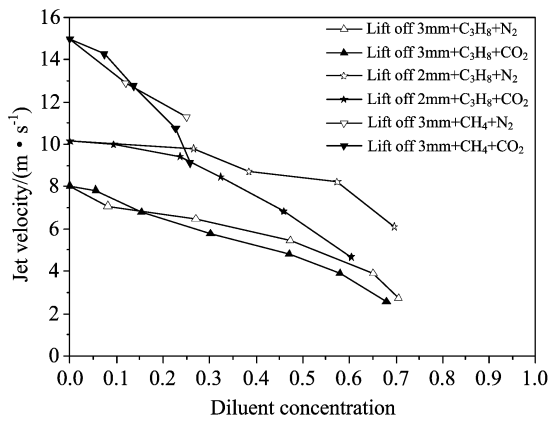


图 3 火焰抬举速度随稀释比的变化
Fig.3 Flame liftoff velocities varying with the diluent concentration

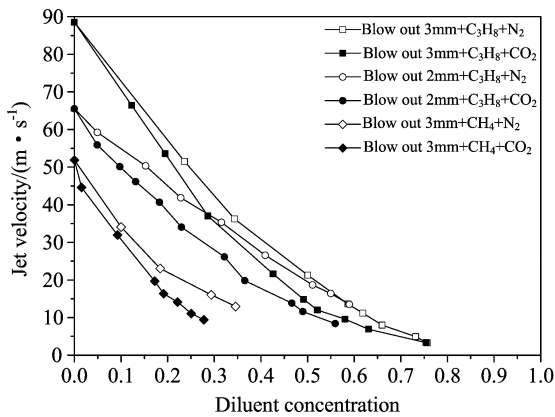


图 4 火焰吹熄速度随稀释比的变化
Fig.4 Flame blowout velocities varying with the diluent concentration

功率的大幅降低,则将低热值气体直接用于纯燃料的燃烧器会难以满足设备热功率的要求.如图 3 所示,随着稀释气含量的增大,燃料的抬举速度即附着火焰的存在上限并不明显减小,因而低热值气体可以用于期望获得附着火焰的燃烧器中,而热值降低造成的热功率的减小可以通过增多燃烧器喷嘴的数量来弥补.

从相同的管径和燃料的实验数据对比可以看出, N_2 和 CO_2 稀释对火焰吹熄速度影响有显著差别. CO_2 稀释燃料的火焰吹熄速度明显小于 N_2 稀释燃料的,这与 Chao 等^[9]在 5mm 内径射流圆管上得到的实验数据结果一致. N_2 和 CO_2 稀释对火焰抬举速度影响的差别不大,但随着稀释比的增大,此差别略微增大,且 CO_2 稀释燃料的火焰抬举速度稍小于 N_2 稀释燃料的.

从相同的燃料和稀释气的实验数据对比可以看出,对于含稀释气的燃料,增大喷管口径会导致火焰

吹熄速度的增大及抬举速度的减小,与纯燃料火焰的情况类似.随着稀释比的增大,喷管口径大小对火焰吹熄速度的影响程度减弱,而对火焰抬举速度的影响程度并未明显变化.这表明,稀释比越大,通过增大喷管口径以获取更大的抬举火焰吹熄速度的效果越不明显.对于应用在期望获得附着火焰燃烧器的低热值气体燃料,可考虑通过适当减小燃烧器出口处的缝和孔的尺寸而扩大附着火焰的存在范围.

从相同的管径和稀释气的实验数据对比可看出,同一稀释比时,丙烷的火焰吹熄速度显著大于甲烷的,丙烷的火焰抬举速度略小于甲烷的,与纯燃料火焰的结论一致.这表明,含丙烷成分多的低热值气体燃料适用于期望获得抬举火焰的燃烧器,含甲烷成分多的低热值气体燃料适用于期望获得附着火焰的燃烧器.

下面从稀释对燃料的当量混合层流火焰速度、射流浓度场及燃烧放热等三方面的影响,分析稀释导致燃料射流火焰抬举速度及吹熄速度减小的主要因素.

2.2.1 稀释对当量混合层流火焰速度的影响

将纯气体燃料预先用 N_2 或 CO_2 稀释后,其当量混合层流火焰速度 S_L 减小,而 S_L 的大小表征此燃料的燃烧活性,与射流抬举火焰的驻定相关.图 5 给出了通过 CHEMKIN-PRO Release 软件计算出的实验所处 101.325kPa 和 15°C 条件下甲烷和丙烷的 S_L 随 N_2 或 CO_2 稀释比的变化. CHEMKIN 系列是由美国 Sandia 国家实验室开发的大型气相化学反应动力学软件包^[15].从图 5 看出,纯甲烷的 S_L 稍小于纯丙烷的 S_L ,随着稀释比的增大,两种燃料的 S_L 均减小,且甲烷的 S_L 减小得更快.对于同一种燃料, CO_2 稀释燃料的 S_L 小于 N_2 稀释燃料的 S_L ,且

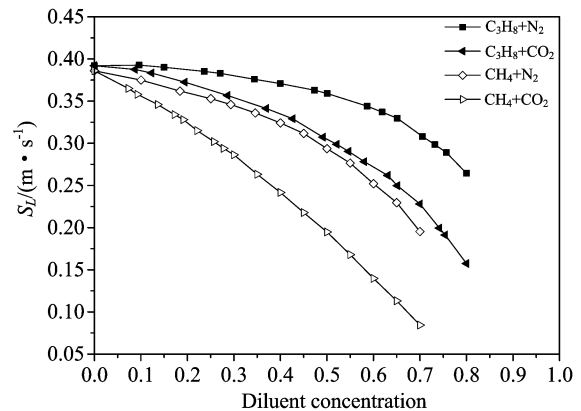


图 5 CH_4 和 C_3H_8 的当量混合层流火焰速度随稀释比的变化
Fig.5 The stoichiometric laminar burning velocity of CH_4 or C_3H_8 varying with the diluent concentration

CO₂ 稀释燃料的 S_L 减小得更快。

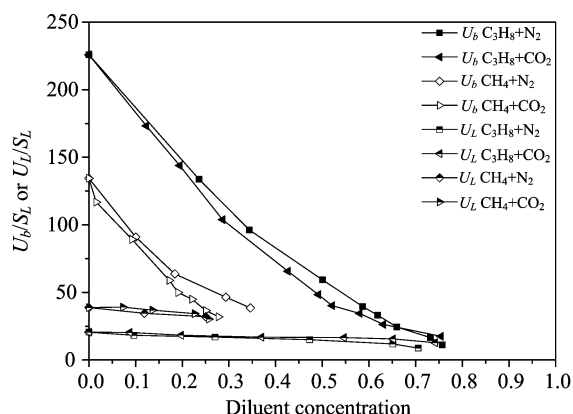


图 6 火焰吹熄速度及抬举速度与当地层流火焰速度之比随稀释比的变化

Fig.6 The ratios of liftoff or blowout velocity to the stoichiometric laminar burning velocity varying with the diluent concentration

图 6 给出了在 3mm 管径的喷管上,随着 N₂ 或 CO₂ 稀释比的变化,甲烷和丙烷的火焰吹熄速度 U_b 及火焰抬举速度 U_L 各自与当地层流火焰速度 S_L 之比(即 U_b/S_L 与 U_L/S_L)的变化趋势,可以看出在这几种工况中,随着稀释比的增大, U_b/S_L 之值大幅度减小,而 U_L/S_L 之值略有减小,结合图 3~图 6 可以看出,随着稀释比的增大,尽管燃料的火焰吹熄速度、抬举速度及当地 S_L 都减小,但吹熄速度的减小程度远大于当地 S_L 的减小程度,抬举速度的减小程度也大于当地 S_L 的减小程度.这表明,除了 S_L 减小这一因素以外,还有其他因素导致了火焰的吹熄速度和抬举速度随稀释比的增大而减小。

2.2.2 稀释对射流浓度场的影响

依据湍流抬举火焰的预混火焰传播模型驻定机理,抬举火焰的驻定点位于流场的当量混合线即燃料 Y_{Fst} 等浓度线上,且驻定点的湍流火焰传播速度等于当地流场速度^[12].图 7 给出了甲烷和丙烷在喷管出口处的初始燃料质量分数 Y_{F0} 及当量混合时燃料质量分数 Y_{Fst} 随 N₂ 或 CO₂ 稀释比的变化.可以看出,随着稀释比的增大, Y_{F0} 大幅减小而 Y_{Fst} 基本保持不变.射流而出的燃料需要卷吸环境空气并混合才能在流场中形成 Y_{Fst} 等浓度线,射流速度不变的情况下,随着稀释比的增大即初始燃料浓度 Y_{F0} 的减小,流场的 Y_{Fst} 等浓度线会靠近喷管口即流场的高速区,则火焰更容易吹熄,即吹熄速度会减小.同理,稀释比相同时,CO₂ 稀释燃料的 Y_{F0} 小于 N₂ 稀释燃料的 Y_{F0} ,则相同射流速度时,CO₂ 稀释燃料的 Y_{Fst} 等浓度线更加靠近喷管口即流场的高速区,则 CO₂ 稀释燃料的吹熄速度小于 N₂ 稀释燃料的。

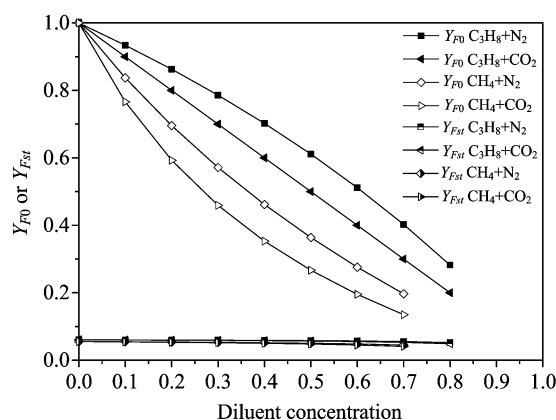


图 7 初始燃料质量分数及当量混合时燃料质量分数随稀释比的变化

Fig.7 The original or stoichiometric fuel mass fraction varying with the diluent concentration

2.2.3 稀释对燃烧放热的影响

由于稀释气体的存在,可燃成分减少,热值降低,单位体积反应物的燃烧放热量减小,且燃烧释放热被稀释气吸收,造成了燃烧火焰的温度随着稀释比的增大而降低.图 8 给出了通过 CHEMKIN 软件计算出的甲烷和丙烷的绝热火焰温度 T_{ad} 随 N₂ 和 CO₂ 的稀释比的变化,此处用绝热火焰温度来表征放热.可以看出,随着稀释比的增大,绝热火焰温度降低得越快,CO₂ 稀释燃料的绝热火焰温度小于 N₂ 稀释燃料的,且二者的差距随稀释比的增大而扩大.高温下 CO₂ 定压摩尔热容约是 N₂ 的 1.5~1.6 倍^[16],且 CO₂ 热辐射特性强于 N₂,这些是造成 CO₂ 稀释燃料比 N₂ 稀释燃料具有更低绝热火焰温度的主要原因。

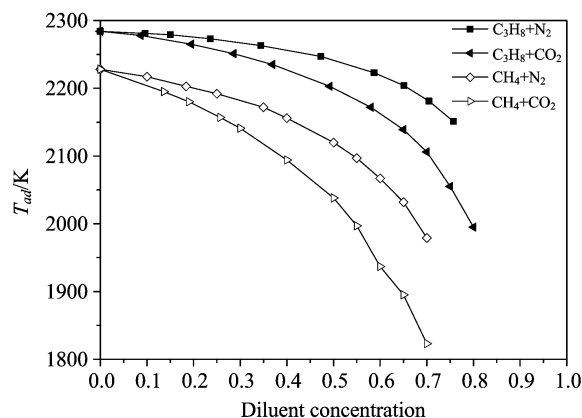


图 8 甲烷和丙烷的绝热火焰温度随稀释比的变化

Fig.8 The adiabatic flame temperature of CH₄ or C₃H₈ varying with the diluent concentration

在层流射流抬举火焰中,火焰反应区的放热会使得三叉火焰前沿附近的来流反应物的流线发生偏

转,造成三叉火焰传播速度的增大^[17].在湍流射流抬举火焰中,放热依然会增大驻定火焰的传播速度^[18].当存在稀释气体后,放热减弱,驻定火焰的传播速度减小,导致了吹熄速度的减小.而由于 CO₂ 稀释燃料的放热弱于 N₂ 稀释的,故 CO₂ 稀释燃料的吹熄速度和抬举速度更小.

2.3 稀释对抬举火焰存在范围的影响及临界稀释比

图 9 给出了几种工况下,火焰抬举速度和吹熄速度之间的速度范围,即抬举火焰存在的射流速度范围,随稀释比的变化.图 10 给出了相应的抬举火焰存在的射流雷诺数范围随稀释比的变化.可以看出抬举火焰的存在范围随着稀释比的增大而收窄.此外,存在着一个临界稀释比,小于此值时,附着火焰能够通过增大射流速度而转变为稳定的抬举火焰;大于此值时,附着火焰仍然存在,但随着燃料射流速度的增大其无法转变为稳定的抬举火焰,而发生直接吹熄;稀释比继续增大,附着火焰存在范围继续收窄,即发生直接吹熄的速度逐渐减小;当接近此燃料的贫燃极限时,连附着火焰也无法存在.

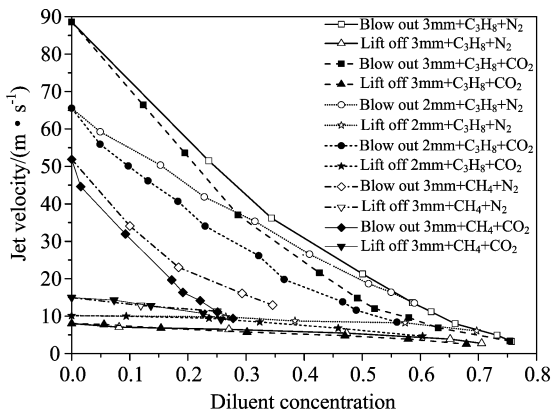


图 9 抬举火焰存在的速度范围随稀释比的变化
Fig.9 The range of velocity of lifted flame varying with the diluent concentration

将图 10 中火焰抬举时和火焰吹熄时射流雷诺数的实验数据点分别作线性拟合线和指数拟合线,两个拟合线的交点即为临界稀释比.表 1 给出了各实验工况下的临界稀释比及对应的射流雷诺数.当然,由于接近临界稀释比时的火焰脉动、不稳定性加剧而火焰刚性减弱,且由于实验操作时流量计最小分度值的限制,临界稀释比的具体数值难以精确测得,表 1 给出的临界稀释比数值也只是根据实验数据点拟合线的预测值,并不代表其精确值.从图 9、图 10 看出,燃料和稀释气的种类及管径大小都对临界稀释比有影响.具体的,丙烷的临界稀释比大于甲烷

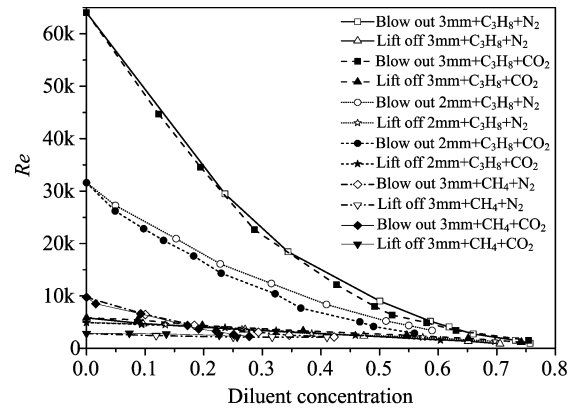


图 10 抬举火焰存在的雷诺数范围随稀释比的变化
Fig.10 The range of Reynolds number of lifted flame varying with the diluent concentration

的, N₂ 稀释燃料的临界稀释比大于 CO₂ 稀释燃料的,管径越大临界稀释比越大.这些规律从表 1 给出的各工况临界稀释比数值也能得到直接反映.

表 1 临界稀释比及对应的射流雷诺数 Re

Tab.1 The critical diluent concentration and the corresponding Reynolds number

实验工况	临界稀释比	雷诺数 Re
3 mm + C ₃ H ₈ + N ₂	0.753	572
3 mm + C ₃ H ₈ + CO ₂	0.683	1 586
2 mm + C ₃ H ₈ + N ₂	0.672	1 495
2 mm + C ₃ H ₈ + CO ₂	0.604	1 687
3 mm + CH ₄ + N ₂	0.457	1 931
3 mm + CH ₄ + CO ₂	0.272	2 313

从表 1 可以看出,甲烷的临界稀释比基本发生在 Re 数为 2000 附近,这可能与火焰处于层流状态有关,而丙烷的临界稀释比均发生于 Re 数显著小于 2000 时.已有文献明确阐述了纯甲烷或稀释的甲烷的射流扩散火焰处于层流状态时不存在稳定抬举火焰的状态^[6],而纯丙烷或稀释的丙烷的射流扩散火焰无论处于层流还是湍流状态均存在稳定抬举火焰的状态^[19],本实验的结果也与此相符.可以推测,甲烷的临界稀释比主要是因为其附着火焰与喷管口发生分离时的火焰处于层流状态,丙烷的临界稀释比主要是因为其附着火焰与喷管口发生分离时的射流速度已经能够将抬举火焰吹熄,即甲烷和丙烷的临界稀释比是受不同机理控制的.

3 结论

本文以低热值气体燃料的燃烧利用为背景,在管径为 2mm 或 3mm 的射流扩散火焰实验台上研

究了用 N_2 或 CO_2 稀释的甲烷、丙烷射流扩散火焰的抬举速度及吹熄速度随稀释比的变化. 在各实验工况中, 随着稀释比的增大, 火焰的抬举速度近似呈线性缓慢减小而吹熄速度近似呈指数型快速减小. 具体地说: ①在相同的燃料及稀释气的情况下, 增大射流管径会引起火焰吹熄速度的增大及抬举速度的减小, 随着稀释比的增大, 管径的改变对吹熄速度的影响程度减弱, 对抬举速度的影响程度无显著变化. 这表明将低热值气体燃料应用于期望获得附着火焰的燃烧器时, 可考虑通过适当减小燃烧器出口处的缝和孔的尺寸而扩大附着火焰的存在范围, 通过增多燃烧器喷嘴的数量来弥补热功率. ②在相同的管径及稀释气的情况下, 稀释丙烷火焰的吹熄速度大于稀释甲烷的, 稀释丙烷的抬举速度小于稀释甲烷的, 即稀释丙烷的抬举火焰存在范围更大. 这表明, 含丙烷多的低热值气体燃料适用于期望获得抬举火焰的燃烧器, 含甲烷多的低热值气体燃料适用于期望获得附着火焰的燃烧器. ③在相同的燃料及管径的情况下, CO_2 稀释燃料的火焰吹熄速度小于 N_2 稀释燃料的, 而 CO_2 稀释燃料的火焰抬举速度略小于 N_2 稀释燃料的.

通过数据或理论分析表明, 稀释对当量混合层流火焰速度、燃料射流浓度场及燃烧放热等三方面的影响是造成火焰抬举速度及吹熄速度随稀释比增大而减小的主要因素.

此外, 对于稀释燃料的射流扩散火焰, 当超过临界稀释比时, 附着火焰随着射流速度的增大无法转变为稳定的抬举火焰而会发生直接吹熄. 甲烷的临界稀释比基本发生在 Re 数为 2000 附近, 而丙烷的临界稀释比均发生于 Re 数显著小于 2000 时, 这表明甲烷和丙烷的临界稀释比可能受到了不同机理的影响.

参考文献(References)

- [1] LYONS K M. Toward an understanding of the stabilization mechanisms of lifted turbulent jet flames; Experiments[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007,33(2):211-231.
- [2] LAWN C J. Lifted flames on fuel jets in co-flowing air [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009,35(1):1-30.
- [3] LEE B J, CHUNG S H. Stabilization of lifted tribrachial flames in a laminar nonpremixed jet [J]. Combustion and Flame, 1997,109(1/2):163-172.
- [4] XUE Y, JU Y. Studies on the liftoff properties of dimethyl ether jet diffusion flames [J]. Combustion Science and Technology, 2006,178(12):2219-2247.
- [5] LEUNG T, WIERZBA I. The effect of co-flow stream velocity on turbulent non-premixed jet flame stability [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009,32(2):1671-1678.
- [6] CHUNG S H. Stabilization, propagation and instability of tribrachial triple flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007,31(1):877-892.
- [7] KALGHATGI G T. Blow-out stability of gaseous jet diffusion flames. Part I; In still air [J]. Combustion Science and Technology, 1981, 26(5/6):233-239.
- [8] BROADWELL J E, DAHM W J, MUNGAL M G. Blowout of turbulent diffusion flames [J]. Symposium (International) on Combustion, 1985, 20(1):303-310.
- [9] CHAO Y, WU C, LEE K, et al. Effects of dilution on blowout limits of turbulent jet flames [J]. Combustion Science and Technology, 2004,176(10):1735-1753.
- [10] GOLLAHALLI S R, SAVAŞ Ö, HUANG R F, et al. Structure of attached and lifted gas jet flames in hysteresis region [J]. Symposium (International) on Combustion, 1988,21(1): 1463-1471.
- [11] WILSON D A, LYONS K M. Effects of dilution and co-flow on the stability of lifted non-premixed biogas-like flames [J]. Fuel, 2008,87(3):405-413.
- [12] VANQUICKENBORNE L, VAN TIGGELEN A. The stabilization mechanism of lifted diffusion flames [J]. Combustion and Flame, 1966,10(1):59-69.
- [13] GAUTAM T K. Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air [J]. Combustion Science and Technology, 1984,41(1/2): 17-29.
- [14] POINSOT T, VEYNANTE D. Theoretical and Numerical Combustion [M]. RT Edwards Incorporated, 2005.
- [15] KEE R J, RUPLEY F M, MILLER J A, et al. CHEMKIN Release 4.1 [M]. San Diego, CA: Reaction Design, 2006.
- [16] 曾丹苓, 敖越, 朱克雄. 工程热力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [17] RUETSCH G R, VERVISCH L, LIÑÁN A. Effects of heat release on triple flames [J]. Physics of Fluids, 1995,7(6):1447.
- [18] UPATNIEKS A, DRISCOLL J F, RASMUSSEN C C, et al. Liftoff of turbulent jet flames; Assessment of edge flame and other concepts using cinema-PIV [J]. Combustion and Flame, 2004,138(3):259-272.
- [19] LEE B J, KIM J S, CHUNG S H. Effect of dilution on the liftoff of non-premixed jet flames [J]. Symposium (International) on Combustion, 1994, 25(1): 1175-1181.