

## 正癸烷热空气伴流抬举火焰特性研究

蒋年鹏, 严野, 叶桃红

(中国科学技术大学热科学与能源工程系, 安徽合肥 230027)

**摘要:** 实验研究了不同伴流温度、不同燃料摩尔分数条件下正癸烷热空气伴流抬举火焰的相关抬举特性. 实验结果表明, 在伴流空气温度低于燃料自点火温度时, 正癸烷抬举火焰底部呈现典型的三叉火焰结构. 在引入浮力速度后, 临界抬举速度和燃料当量比条件下的火焰传播速度具有很好的相关性; 将临界抬举速度和临界吹熄速度进行无量纲化后, 二者都和伴流空气温度具有很好的线性相关性. 燃料火焰抬举高度随射流速度增加而增加, 随伴流空气温度增加和燃料摩尔分数增加而减小.

**关键词:** 正癸烷; 抬举火焰; 空气伴流; 抬举速度; 吹熄速度

**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:** 蒋年鹏, 严野, 叶桃红. 正癸烷热空气伴流抬举火焰特性研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(7): 594-599.

JIANG Nianpeng, YAN Ye, YE Taohong. Characteristics of n-decane lifted flame in coflow jets at elevated temperatures[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(7): 594-599.

## Characteristics of n-decane lifted flame in coflow jets at elevated temperatures

JIANG Nianpeng, YAN Ye, YE Taohong

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

**Abstract:** Characteristics of n-decane lifted flame in coflow jets at elevated temperatures and different fuel mole fractions were experimentally studied. The results show that n-decane lifted flame has a tribrachial flame structure in the flame base. After the introduction of the buoyance-induced velocity, the liftoff velocity has a good correlation with the stoichiometric laminar burning velocity. The dimensionless liftoff velocity and blowout velocity are reasonably correlated with coflow air temperature. The liftoff height of the fuel flame increases with the increase in the fuel jet velocity, and decreases with the increase in the mole fraction of the fuel at a certain initial coflow air temperature and in air temperature for a certain mole fraction.

**Key words:** n-decane; lifted flame; coflow jet; liftoff velocity; blowout velocity

收稿日期: 2017-03-21; 修回日期: 2017-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(91441117)资助.

作者简介: 蒋年鹏, 男, 1993年生, 硕士生. 研究方向: 层流燃烧实验研究. E-mail: jnpstar@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 叶桃红, 博士/副教授. E-mail: thye@ustc.edu.cn

## 0 引言

射流扩散火焰广泛存在于实际燃烧系统中,扩散火焰中的抬举、吹熄等驻定及稳定范围的机理性问题,一直是燃烧领域的热门研究对象<sup>[1-3]</sup>.近年来,研究人员开展了很多高温燃烧产物或高温空气作为伴流的中心射流扩散火焰的研究,它们既是常温空气伴流下的射流扩散火焰初始参数及边界条件的拓展,也是实际燃烧系统中发生的 MILD (moderate or intense low oxygen dilution) 燃烧及高温空气燃烧的简化模型.

MILD 燃烧<sup>[4]</sup>是将燃烧后的高温尾气部分回流用来与新鲜反应物预混,通过降低反应区的局部高温降低  $\text{NO}_x$  排放并提高系统热效率.作为对实际发生的 MILD 燃烧的简化,忽略真实燃烧室内存在的复杂回流因素后,很多研究采用燃料中心射流、贫燃预混气的高温燃烧产物作为伴流,如 JHC 燃烧平台<sup>[4]</sup>和 Cabra 燃烧平台<sup>[5]</sup>.

Chung 等<sup>[6-10]</sup>以高温空气作为伴流,开展了气体燃料甲烷、乙烷、丙烷、正丁烷、乙烯的高温伴流射流扩散火焰的实验研究.结果表明,湍流抬举火焰的抬举高度随着射流速度的增大而线性增加,层流抬举火焰的抬举高度随着射流速度的增大而非线性地增加.根据伴流的温度是否超过燃料的自点火温度和中心燃料的稀释度,将抬举火焰分为非自点火抬举火焰、自点火抬举火焰(三叉结构)以及自点火的 MILD 燃烧抬举火焰.在非自点火抬举火焰模式下,层流抬举火焰的存在取决于燃料的  $Sc$ ,只有  $Sc$  大于 1 才可能存在稳定的抬举火焰,而伴流温度高于燃料自点火温度以及 MILD 燃烧模式下,是否发生抬举则不受  $Sc$  的影响.对于层流抬举火焰,当伴流初始温度低于燃料自点火温度时,抬举火焰保持着典型的三叉结构.当伴流初始温度高于自点火温度时,中心射流燃料与高温伴流混合后能够发生自点火,根据中心燃料稀释程度的大小,火焰底部的燃烧特征分别呈现典型的三叉火焰结构和 MILD 燃烧两种模式:前一种模式的火焰抬举高度随着射流速度增大而非线性增加;后一种模式的抬举高度随着射流速度增大而线性增加.除气体燃料外,Choi 等<sup>[11]</sup>还做了液体燃料正庚烷预蒸发高温伴流层流抬举火焰实验,液体燃料正庚烷经过预蒸发后,非自点火抬举火焰表现出和气体燃料相似的特性,而高温伴流的自点火抬举火焰特性和气体燃料有所不

同.Nada 等<sup>[12]</sup>研究了丙烷高温伴流条件下湍流火焰的燃烧特性,实验在低雷诺数区域发生层流向湍流转变,抬举高度随着射流速度增加而减少;完全变成湍流燃烧后,随着射流速度不断增加,火焰抬举高度线性增加.

本文通过高温伴流燃烧装置,分别研究不同伴流温度、射流燃料稀释导致的不同燃料摩尔分数对正癸烷层流火焰抬举特性、临界抬举速度和临界吹熄速度的影响.

## 1 实验装置

实验装置主要由伴流空气辅助系统、燃料预蒸发系统、燃烧器三部分组成,其原理图如图 1 所示.

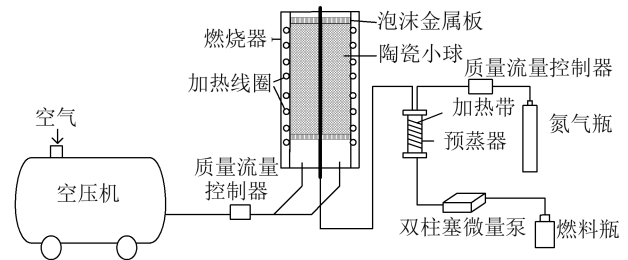


图 1 实验原理图

Fig.1 Schematic of the experimental setup

燃烧器主要由外管、加热套和中心燃料射流圆管三部分组成.外管为耐高温的 304 不锈钢管,高 330mm,出口处内外径分别为 129mm 和 133mm.燃烧器外部为 4.5kW 的加热套,对整个伴流空气加热,伴流温度由温控仪进行控制.射流燃料管道材质为 316 不锈钢钢管,外径 6mm,内径 4mm,长 400mm,燃料射流管高出燃烧器出口 8mm.燃烧器内部填充有泡沫金属和陶瓷小球,可以对伴流空气进行充分整流和保温.预蒸发系统主要由双柱塞微量泵、预蒸发器、温控装置及相应管道构成.双柱塞微量泵量程为 0.01 ~ 10 mL/min,预蒸发器由加热带进行加热,温度由温控仪进行控制,加热功率为 500W.伴流空气由空压机提供.

实验中使用的燃料为正癸烷(99%),由双柱塞微量泵控制流量,将燃料注入预蒸发器中进行气化.稀释的载气为氮气,通过质量流量控制器控制流量,进入预蒸发器后和气化后的燃料混合后进入射流管道.为了充分混合两种气体,并且提高加热效率,预蒸发器内部填满了 6mm 直径的不锈钢钢珠.正癸烷的沸点是 174.1℃,故预蒸发器设定温度为 220℃,采取 20L/min 以下的氮气通过预蒸发器进行加热

测试,预蒸发器出口温度和设定温度温差在  $10^{\circ}\text{C}$  以内,而燃烧实验中采取的氮气流量最大值不超过  $0.4\text{L}/\text{min}$ ,预蒸发器可以满足实验要求.燃料射流出口处速度  $U_0$ .通过燃料的体积流量换算得到.实验中对射流出口温度和伴流温度进行了测量,射流出口温度与伴流温度差值为  $3\sim 10^{\circ}\text{C}$ ,二者相差较小,本文处理实验数据时假定射流温度等于伴流空气温度.

实验中使用 Canon EOS 500D 相机拍照记录火焰抬举高度数据,以燃烧炉外径  $D=156.52\text{mm}$  作为标准,通过抬举高度像素值和燃烧炉外径像素值比值确定  $H_L$ .对每个工况下的抬举火焰进行多次拍照(15次以上),取高度平均值作为实验结果.高温伴流空气温度为  $600\text{K}$  时,径向温度分布较为均匀,在距离射流管道  $1/2D$  处温差在  $10^{\circ}\text{C}$  以内, $2/3D$  处温差在  $15^{\circ}\text{C}$  以内,可以认为高温伴流空气温度分布均匀,射流火焰抬举的实验中采取距离射流管道  $1/3D$  处作为测温点.

## 2 实验结果和分析

本实验研究高温伴流空气条件下气相正癸烷射流火焰抬举及吹熄特性.实验中,通过调节燃料稀释后的摩尔分数  $X_{F,0}$  ( $0.04\sim 0.1$ ),射流速度  $U_0$  和伴流温度  $T_0$  ( $480\sim 600\text{K}$ ),研究不同条件对射流火焰抬举高度的影响.本文所有工况中高温伴流空气速度一直保持  $0.5\text{m}/\text{s}$  不变,本实验所有工况雷诺数均处于  $0\sim 400$  范围内,为层流状态.

图 2 是温度  $T_0$  为  $510\text{K}$  和  $600\text{K}$ 、燃料摩尔分数  $X_{F,0}$  为  $0.06$  和  $0.04$  条件下获得的射流火焰图片.伴流空气温度  $T_0=510\text{K}$ ,燃料射流速度  $U_0$  较小时,即  $U_0<0.46\text{m}/\text{s}$  时,火焰附着于中心射流管出口处,此时为附着火焰,且随着燃料射流速度的增大,火焰逐渐变长.当燃料射流速度达到临界抬举速度( $0.46\text{m}/\text{s}$ )时,如图 2(a)所示,火焰发生抬举,从附着火焰转变为抬举火焰,在火焰底部,可以观察到很明显的三叉火焰结构<sup>[13]</sup>:贫燃预混火焰分支、富燃预混火焰分支和扩散火焰分支相交于三叉点上.随着燃料射流速度增加,火焰抬举高度变大,如图 2(b)所示,射流速度为  $0.66\text{m}/\text{s}$  时,火焰抬举高度比图 2(a)高.当燃料射流速度进一步增加,达到临界吹熄速度  $0.79\text{m}/\text{s}$  时,火焰会被吹熄.

### 2.1 临界抬举速度和临界吹熄速度

实验测量了不同温度、不同燃料摩尔分数  $X_{F,0}$

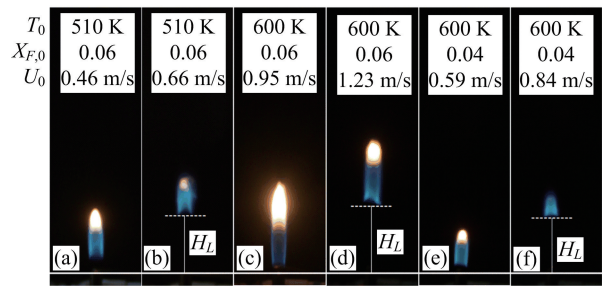
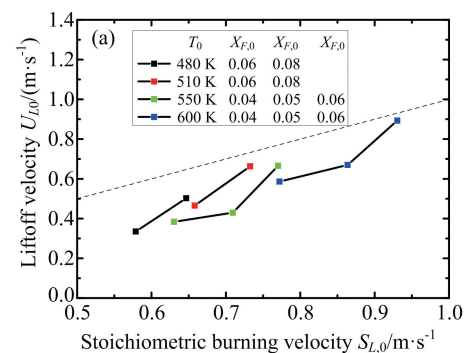


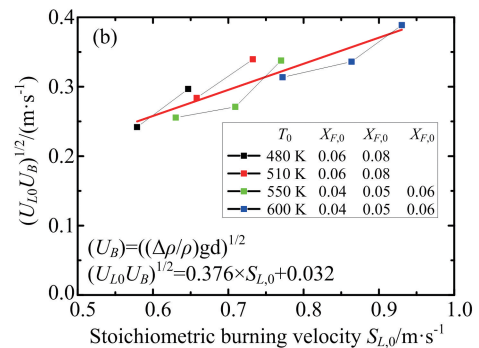
图 2 不同条件下正癸烷抬举火焰

Fig.2 Lifted flame of n-decane under different conditions

条件下正癸烷火焰发生初始抬举时的燃料射流速度,此速度即为临界射流抬举速度  $U_{L,0}$ .本文选择 Li 等<sup>[14]</sup>发展而来的正癸烷机理,机理温度适用范围为  $298\sim 1000\text{K}$ ,采用 CHEMKIN-PRO 计算对应温度、燃料摩尔分数条件下层流火焰当量比传播速度  $S_{L,0}$ .图 3 为临界射流抬举速度与正癸烷当量比火焰传播速度关系图.从图 3(a)中可以看出燃料摩尔分数不变时,随着伴流温度的增加, $U_{L,0}$  也在逐渐变大;温度相同时,随着燃料摩尔分数的增加, $U_{L,0}$  也逐渐变大.并且实验研究的所有条件下,均有  $U_{L,0}<S_{L,0}$ .当燃料的射流速度小于火焰传播速度时,火焰应当处于附着状态.实验中火焰可以发生抬举,是受



(a) 临界抬举速度



(b) 引入浮力速度后抬举速度

图 3 不同条件下临界抬举速度和当量火焰传播速度关系

Fig.3 Lift-off velocities in terms of stoichiometric burning velocity under different conditions

到浮力效应的影响,在喷嘴附近存在卷吸,使得气体流速大于火焰传播速度. Bédard<sup>[15]</sup> 提出的浮力效应速度  $U_B = \sqrt{(\Delta\rho/\rho_u)gd}$ , 将浮力效应速度引入  $U_{L,0}$  和  $S_{L,0}$  的关系中. 其中,  $\Delta\rho$  为射流燃料气体的密度和燃料燃烧后气体的密度差,  $\rho_u$  为射流燃料气体的密度,  $g$  为重力加速度,  $d$  为燃料射流管道内径.

如图 3(b) 所示, 将浮力速度引入临界抬举速度得到  $(U_{L,0}U_B)^{1/2}$ <sup>[16]</sup>, 拟合数据得到:  $(U_{L,0}U_B)^{1/2} = 0.376 \times S_{L,0} + 0.032$ , 拟合结果与实验结果符合得较好. 并且伴流温度越高时, 误差越小, 这可能是温度较低时, 燃料临界抬举速度较小, 实验误差较大导致的.

图 4 为临界抬举速度和伴流温度关系图, 将临界抬举速度除以燃料的摩尔分数进行尺度化, 实验发现  $U_{L,0}/X_{F,0}$  与伴流温度具有很好的线性相关性:  $U_{L,0}/X_{F,0} = 0.0654T_0 - 25.43$ . 其中 550K 时数据与拟合结果误差较大, 其他温度时, 实验结果和拟合结果都符合得较好.

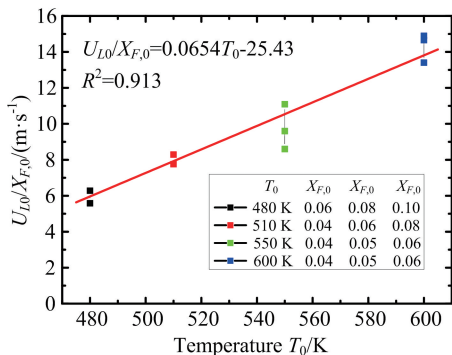


图 4 不同条件下临界抬举速度和伴流温度关系  
Fig.4 Lift-off velocities in terms of coflow jets temperature under different conditions

图 5 为不同伴流温度和燃料摩尔分数条件下癸烷射流火焰的临界吹熄速度与当量火焰传播速度的关系. 燃料摩尔分数相同时, 临界吹熄速度随着伴流温度的增加而增加; 伴流温度不变时, 临界吹熄速度随着摩尔分数的增加而增加. 正癸烷实验的变量为伴流温度和燃料摩尔分数, 当伴流温度不变时, 燃料的临界吹熄速度只受到燃料摩尔分数的影响. 如图 6 所示, 将临界吹熄速度除以燃料的摩尔分数进行尺度化, 实验发现  $U_{B,0}/X_{F,0}$  与伴流温度具有很好的线性相关性:  $U_{B,0}/X_{F,0} = 0.104T_0 - 39.94$ .

2.2 燃料射流速度和抬举高度关系

图 7 为  $T_0 = 550K, X_{F,0} = 0.06$  条件下火焰抬举高度与射流速度关系图. 如图所示, 当燃料射流速度

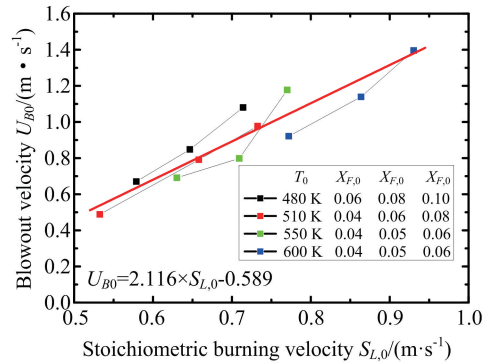


图 5 不同条件下临界吹熄速度和当量火焰传播速度关系  
Fig.5 Blowout velocities in terms of stoichiometric burning velocity under different conditions

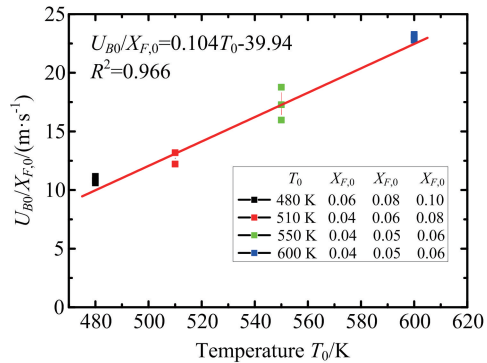


图 6 不同条件下临界吹熄速度和伴流温度关系  
Fig.6 Blowout velocities in terms of coflow jets temperature under different conditions

度较低时, 火焰处于附着状态. 当燃料射流速度达到 0.67m/s 时, 火焰由附着状态转变为稳定的抬举状态. 之后随着射流速度的增大, 火焰抬举高度变大. 当射流速度达到 1.13m/s 时, 火焰会被吹熄. 与湍流抬举火焰不同, 正癸烷层流火焰抬举高度和射流速度非线性相关.

无伴流的自由射流实验中, 抬举火焰的稳定机制被认为基于三叉火焰结构<sup>[17-18]</sup>, 贫燃预混火焰分支、富燃预混火焰分支和扩散火焰分支相交于三叉点上. Choi 等<sup>[11]</sup> 认为, 抬举火焰稳定于化学当量线上, 三叉火焰传播速度与当地轴向速度平衡的点上, 并且对于纯燃料有  $H_L \propto U_0^n$ . 从图 3 可以看出,  $T_0 = 550K, X_{F,0} = 0.06$  条件下  $n = 4.636$ , 且实验结果和拟合曲线符合得很好.

实验研究了  $T_0$  在 480~600K 以及不同燃料摩尔分数条件下火焰抬举高度和射流速度的关系. 图 8 为实验测得的不同温度、燃料摩尔分数条件下正癸烷高温伴流抬举火焰抬举高度与射流速度关系图. 图中火焰抬举高度和燃料射流速度的关系  $H_L \propto U_0^n$

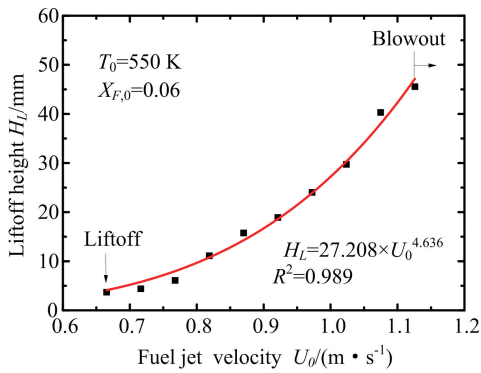


图 7  $T_0=550\text{K}, X_{F,0}=0.06$  时

正癸烷火焰抬举高度与射流速度关系图

Fig.7 Lift-off heights of n-decane flames with fuel jet velocity at  $T_0 = 600\text{K}$  and  $X_{F,0} = 0.06$

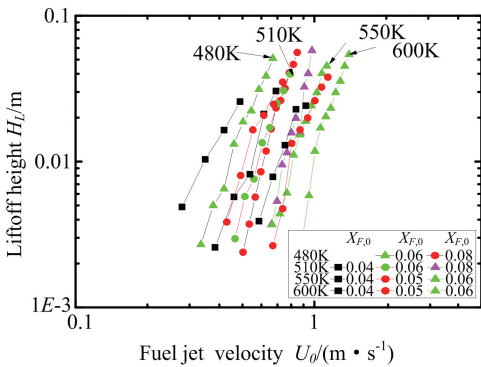


图 8 不同条件下正癸烷火焰抬举高度与射流速度关系图

Fig.8 Lift-off heights of n-decane flames with fuel jet velocity under different conditions

指数  $n$  受到燃料摩尔分数和伴流空气温度的影响。表 1 为抬举高度和燃料射流速度关系指数表,从表 1 中可以看出实验研究范围内  $n$  处于 2.8~5.3 之间,并且指数  $n$  随着伴流温度的增加、燃料摩尔分数的增大而增大。从图中可以看出,燃料抬举高度和射流速度双对数坐标图表现出很好的线性关系,其中,当射流速度  $U_0$  较小时,线性关系遭到破坏;曲线的斜率取决于伴流空气温度和燃料的摩尔分数。

由图 8 可以看出,燃料摩尔分数和射流速度相同时,伴流温度越高,火焰抬举高度越小。伴流温度和射流速度相同时,燃料摩尔分数越大,火焰抬举高度越小。Choi 等<sup>[11]</sup>认为这是由于三叉火焰传播速度和当地流速平衡的结果。三叉火焰传播速度和火焰当量比层流燃烧速度  $S_{L,0}$  有关<sup>[13]</sup>。同样采用 Li 等<sup>[14]</sup>发展而来的正癸烷机理计算  $S_{L,0}$ 。计算结果发现,正癸烷的当量比层流燃烧速度在燃料摩尔分数相同时随着温度的增加而增加,在伴流温度不变时随着燃料摩尔分数增加而增加,验证了图 5(a)的实

验结果。

表 1 抬举高度和燃料射流速度关系指数表

Tab.1 Relationship index between lift-off heights and fuel jet velocities

| 温度<br>摩尔分数 | 480K | 510K | 550K | 600K |
|------------|------|------|------|------|
| 0.04       | —    | 2.85 | 3.22 | 3.61 |
| 0.05       | —    | —    | 3.25 | 3.63 |
| 0.06       | 3.83 | 4.38 | 4.64 | 4.84 |
| 0.08       | 5.04 | 5.3  | —    | —    |

### 3 结论

本文研究了不同伴流空气温度、射流燃料摩尔分数条件下,正癸烷高温伴流抬举火焰的临界抬举、吹熄以及抬举火焰高度随射流速度的变化关系。实验结果表明,对于燃料临界抬举速度和临界吹熄速度,相同伴流温度条件下,均随着燃料摩尔分数的增加而增加;燃料摩尔分数不变时,随着伴流温度的增加,二者逐渐变大。在引入浮力速度后,临界抬举速度和燃料当量比火焰传播速度具有较好的相关性;将临界抬举速度和临界吹熄速度进行无量纲化后,二者都和伴流空气温度具有很好的线性相关性。

不同条件下抬举火焰表现出相似的抬举特性,随着燃料射流速度逐渐增加,火焰均会经历附着火焰—抬举火焰—火焰吹熄的过程,在抬举火焰底部可以观察到明显的三叉火焰结构。相同工况下,正癸烷火焰抬举高度随射流速度增加非线性增加;燃料摩尔分数和射流速度不变时,温度越高,正癸烷火焰抬举高度越小;伴流空气温度和射流速度不变时,燃料摩尔分数越大,正癸烷火焰抬举高度越小。

### 参考文献 (References)

[1] PITTS W M. Assessment of theories for the behavior and blowout of lifted turbulent jet diffusion flames[J]. Symposium (International) on Combustion, 1989, 22 (1): 809-816.

[2] 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.

[3] LAWN C J. Lifted flames on fuel jets in co-flowing air [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(1): 1-30.

[4] MEDWELL P R. Laser diagnostics in MILD combustion [D]. Adelaide: University of Adelaide, 2007.

- [ 5 ] CABRA R, MYHRVOLD T, CHEN J Y, et al. Simultaneous laser Raman-Rayleigh-LIF measurements and numerical modeling results of a lifted turbulent H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> jet flame in a vitiated coflow[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29(2): 1881-1888.
- [ 6 ] KIM K N, WON S H, CHUNG S H. Characteristics of turbulent lifted flames in coflow jets with initial temperature variation [ J ]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 1591-1598.
- [ 7 ] CHOI B C, KIM K N, CHUNG S H. Autoignited laminar lifted flames of propane in coflow jets with tribrachial edge and mild combustion[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(2): 396-404.
- [ 8 ] CHOI B C, CHUNG S H. Autoignited laminar lifted flames of methane, ethylene, ethane, and n-butane jets in coflow air with elevated temperature[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(12): 2348-2356.
- [ 9 ] CHOI B C, CHUNG S H. An experimental study on turbulent lifted flames of methane in coflow jets at elevated temperatures[J]. Fuel, 2013, 103: 956-962.
- [10] CHOI B C, CHUNG S H. Autoignited laminar lifted flames of methane/hydrogen mixtures in heated coflow air [J]. Combustion and Flame, 2012, 159 ( 4 ): 1481-1488.
- [11] CHOI S K, CHUNG S H. Autoignited and non-autoignited lifted flames of pre-vaporized n-heptane in coflow jets at elevated temperatures[J]. Combustion and Flame, 2013, 160(9): 1717-1724.
- [12] NADA Y, MATSUMOTO K, NODA S. Liftoff heights of turbulent non-premixed flames in co-flows diluted by CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(11): 2890-2903.
- [13] CHUNG S H. Stabilization, propagation and instability of tribrachial triple flames [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 877-892.
- [14] ZENG M, YUAN W, WANG Y, et al. Experimental and kinetic modeling study of pyrolysis and oxidation of n-decane[J]. Combustion and Flame, 2014, 161(7): 1701-1715.
- [15] BÉDAT B, CHENG R K. Effects of buoyancy on premixed flame stabilization [J]. Combustion and Flame, 1996, 107(1/2): 13-26.
- [16] KIM K N, WON S H, CHUNG S H. Characteristics of laminar lifted flames in coflow jets with initial temperature variation [ J ]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(1): 947-954.
- [17] CHUNG S H, LEE B J. On the characteristics of laminar lifted flames in a nonpremixed jet [J]. Combustion and Flame, 1991, 86(1/2): 62-72.
- [18] 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.

(上接第 549 页)

- [28] 李世强,杨乐民,周岩,等. 高能球磨法制备石英纳米粉的可行性探讨[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2005, 21 (3): 42-45.
- LI S Q, YANG L M, ZHOU YAN, et al. Discussion on feasibility of the preparation of nano-scale quartz powder by high energy ball milling[J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2005, 21 (3): 42-45.
- [29] PISHTSHEV A, KARAZHANOV S Z, KLOPOV M. Excitons in Mg(OH)<sub>2</sub>, and Ca(OH)<sub>2</sub>, from ab initio calculations[J]. Solid State Communications, 2014, 193: 11-15.
- [30] CHEN H, XU C, LIU Y, et al. Formation of flower-like magnesium hydroxide microstructure via a solvothermal process[J]. Electronic Materials Letters, 2012, 8(5): 529-533.