

# 浮力效应对射流扩散火焰转捩 特性影响的实验研究<sup>\*</sup>

李 丹 王双峰

1(中国科学院力学研究所 中国科学院微重力重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学工程科学学院 北京 100049)

**摘 要** 对不同空气伴流速度下丙烷层流射流火焰向湍流火焰的转换过程进行实验观测, 分析伴流对火焰转换行为及稳定性的影响. 相对于静止环境中的射流火焰, 较大速度的伴流可以减小浮力效应对射流扩散火焰转换过程的影响, 使火焰发生转换的临界 Reynolds 数 ( $Re_{cr}$ ) 增大, 即火焰推迟转捩. 但当伴流速度较小时,  $Re_{cr}$  保持不变, 转换过程中的射流火焰发生周期性振荡, 振荡幅度随着伴流速度的增大而减小, 继续增大伴流速度, 火焰振荡的周期性最终消失, 转而呈现随机性. 实验还发现, 喷嘴直径较大的扩散火焰的  $Re_{cr}$  更大. 考虑到火焰对燃料射流局部流动状态的影响, 对此现象进行了解释.

**关键词** 扩散火焰, 湍流转捩, 火焰稳定性, 同轴伴流, 浮力效应

**中图分类号** V 524, TK 16

## Experimental Study of Buoyancy Effect on Transitional Jet Diffusion Flames

LI Dan WANG Shuangfeng

1(Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** The transition to turbulence of coflow propane-fueled jet diffusion flames was investigated experimentally with varying air coflow velocities, and the buoyancy-suppressing effect of coflow was analyzed to reveal the buoyancy effect on the transition and stability of diffusion flames. Compared to jet flames in quiescent air, a coflow with relatively high velocity can suppress the influence of buoyancy on transitional flames, and make the critical nozzle Reynolds number of transition to turbulent flame increasing, *i.e.*, the transition process is delayed by coflow. When the coflow velocity is small, however, the critical Reynolds number stays almost the same. In the transitional regime, diffusion flames are characterized by periodic oscillation, and the oscillation amplitude decreases with

\* 中国科学院国家空间科学中心空间科学任务概念课题资助 (XDA15007602)

2017-08-22 收到原稿, 2018-01-11 收到修定稿

E-mail: sfwang@imech.ac.cn

increasing coflow velocity. As coflow velocity increases further, the periodicity of flame oscillation disappears eventually, and presents a randomness. Additionally, the experiments show that a larger jet nozzle results in a greater critical Reynolds number of flame transition. Such an observation is explained in terms of the local fuel jet properties taking into account of the influence of diffusion flame.

**Key words** Diffusion flame, Transition to turbulence, Flame stability, Coflow, Buoyancy effect

## 0 引言

与层流和湍流扩散火焰相比,对扩散火焰从层流向湍流状态转换过程的研究工作还很有限,且研究对象局限于静止环境中的射流火焰。Hottle 等<sup>[1]</sup>和 Wohl 等<sup>[2]</sup>最早对圆形喷口射流火焰的转换行为进行了实验观测。当射流速度较小时扩散火焰处于浮力主控的层流阶段,火焰高度随射流速度的增加而线性增大;继续增大射流速度,火焰高度增加的速率逐渐减小,达到最大值后随着射流速度增大而减小,此时火焰顶端附近出现褶皱和涡旋结构并向上游扩展,这一阶段被称为层流火焰向湍流火焰过渡的转换区;射流速度进一步增加,火焰内的湍流强度增大,形成较为典型的湍流火焰,平均火焰高度基本保持不变。Takeno 等<sup>[3]</sup>通过实验发现两种不同的火焰转换机制,一是燃料射流与火焰面之间相互作用产生的湍流引起火焰转换,二是射流与环境空气之间的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性促使层流射流演变为湍流,同时湍流射流与火焰面的相互作用引起火焰面上出现湍流涡结构。Takahashi 等<sup>[4]</sup>通过实验分析了燃料黏度对扩散火焰转换的影响,Coats 等<sup>[5]</sup>通过实验提出了射流扩散火焰中湍流的三种主要来源,即低频(10~20 Hz)的流体力学不稳定性(引起火焰闪烁现象)、燃料射流的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性以及射流燃烧器内部的流动转换。Hegde 等<sup>[6]</sup>利用落塔设施对微重力条件下丙烷射流火焰的转换过程进行研究,以分析浮力的影响。与常重力下的现象不同,微重力转换火焰中的大尺度结构出现在火焰根部,向下游运动,说明火焰转换主要由射流转换引起。另外,微重力下湍流扩散火焰高度随 Reynolds 数( $Re$ )的增加而增大,直到火焰吹熄火焰高度仍没有达到常值,且火焰高度大约是常重力火焰的两倍。

扩散火焰转换过程十分复杂,目前对其控制机理的认识还不充分,还需要对多种因素的影响进行深入

研究。在实际应用中,扩散火焰需要的空气通常与燃料同流,同轴伴流射流火焰也是实验室研究的基本对象之一。伴流的存在影响到燃料射流和火焰边缘的稳定性,改变了燃料与空气之间的混合特性,从而使火焰行为与静止空气中的射流火焰有显著差别,但已有的研究主要集中于层流和湍流火焰。

本文对同轴伴流影响下层流扩散火焰向湍流火焰转变的过程进行实验研究,考察的实验参数包括空气伴流速度、射流出口  $Re$  和喷嘴直径。通过观测转换火焰的动态特性以及转换临界 Reynolds 数( $Re_{cr}$ )随伴流速度的变化,揭示同轴伴流射流火焰的转换特性,并分析伴流的影响机制。

## 1 实验方法

实验系统主要由同轴伴流射流燃烧器、气体(燃料和空气)供应装置和摄像机组成。图 1 所示为燃烧器结构,不锈钢管制成的两种燃料喷嘴可更换,内径分别为 1.0 mm 和 1.3 mm,长径比为 120,可确保喷嘴出口处的流动充分发展。伴流空气在燃料喷嘴的同心外环内流动,伴流空气管内径为 47 mm,在出口上游设置整流段(填充钢丝球、玻璃珠和蜂窝器等),以获得均匀的空气流动。

实验用气体燃料为纯度 99.9% 的丙烷,伴流空气由压缩空气供应。根据燃料射流出口  $Re$  数、伴流空气速度等实验参数的要求,利用气体质量流量控制器分别对两种气体的流量进行设定和控制。

实验中使用彩色数码摄像机(Point Grey Research, GS3-U3-41C6C-C)对火焰形态和动态变化进行记录,根据不同的火焰动态特性记录速率设为 30~150 frame·s<sup>-1</sup>。

实验步骤如下:设定燃料和伴流空气的流量,向燃烧器供气;流动稳定后,利用电火花点火器点燃燃料射流,在喷嘴出口形成稳定的附着扩散火焰;利用

摄像机记录火焰图像, 记录时间为 10s. 实验中, 燃料射流出口  $Re$  ( $Re = Ud/\nu$ ,  $U$  为射流出口平均速度,  $d$  为喷嘴内径,  $\nu$  为燃料气体的运动黏度) 范围为 1000~3000, 伴流空气速度范围为  $0\sim 0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

附着扩散火焰的高度指喷嘴出口到火焰尖端之间的距离. 当火焰高度随时间动态变化时, 通常用平均火焰高度表征火焰的形态特性, 而确定平均火焰高度常用的方法有两种, 即间歇性函数法和直接观察法, 其得到的实验结果基本一致 [7,8]. 本文通过直接观察法获得平均火焰高度: 根据火焰记录图像, 在足够长的时间段内对火焰瞬时高度进行测量, 然后进行算术平均得到平均火焰高度  $h_f$ .

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 火焰转换过程

图 2 是伴流速度为  $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时  $1.0\text{ mm}$  直径喷嘴射流火焰从层流向湍流状态转换过程中火焰高度随  $Re$  的变化, 图 2 中给出了几个典型阶段的火焰照片. 在层流阶段, 火焰在伴流影响下保持稳定, 这与静止空气中火焰振荡的现象 [5,9,10-16] 不同, 但火焰高度随  $Re$  增加而增大的规律保持不变.  $Re$  增大到约 2000 时, 火焰上端附近首先发生振荡, 表现为大尺度涡结构出现在火焰两侧并沿火焰面移动, 使火焰面

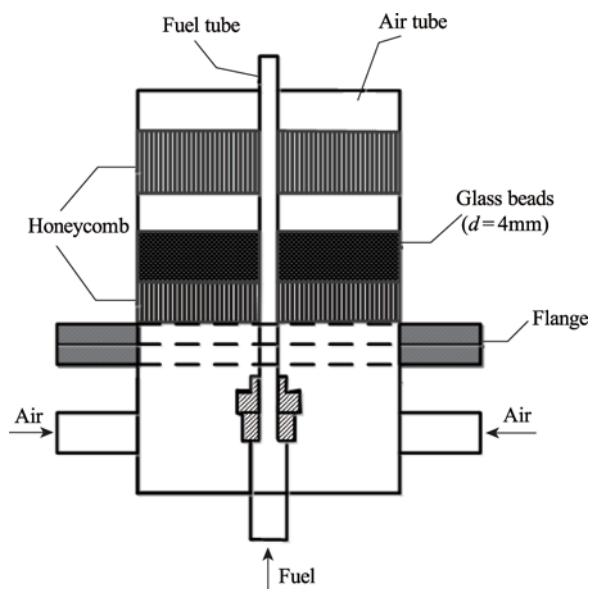


图 1 同轴伴流射流燃烧器结构

Fig.1 Schematic of the coflow burner

皱褶. 随着  $Re$  增大, 火焰面上大尺度结构的影响范围逐渐向上游扩展, 平均火焰高度随  $Re$  的增大而减小, 火焰处于向湍流火焰转换的过程中. 继续增大  $Re$ , 除喷嘴附近区域外, 火焰大部分具有湍流特征, 平均火焰高度基本保持不变.

在本文研究的参数范围内, 同轴伴流射流火焰转换过程具有基本的共同特征, 但较大的伴流速度导致火焰  $Re_{cr}$  发生变化, 不同伴流速度下转换火焰的动态行为也有明显差别.

### 2.2 伴流对火焰转换的影响

图 3 给出了不同伴流速度下两种喷嘴 ( $d = 1.0\text{ mm}$  和  $1.3\text{ mm}$ ) 射流火焰高度随  $Re$  的变化过程. 由图 3 可以看出, 不同伴流速度下, 火焰高度随  $Re$  变化的趋势一致, 当  $Re$  增大到临界值  $Re_{cr}$  时, 层流火焰开始向湍流火焰转换, 火焰高度达到最大值, 之后随着  $Re$  增大而减小. 图 3 中虚线处为  $Re_{cr}$  的位置. 另外, 伴流射流火焰容易发生推举 [17], 本文实验中, 当伴流速度较大时, 火焰在转换阶段即发生推举, 推举后火焰高度突然减小, 从图 3 中可以明显看到这一现象. 从图 3(a) 可以看到,  $d = 1.0\text{ mm}$  且伴流速度  $U_{air} = 0$  时,  $Re_{cr} = 1877 (< 2000)$ ; 当  $U_{air} < 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,  $Re_{cr}$  保持不变; 当  $U_{air} \geq 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 火焰转换推迟发生, 但在  $0.1\sim 0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的伴流速度范围内,  $Re_{cr}$  相同, 约为 2018 ( $> 2000$ ). 图 3(b) 中较大尺寸射流喷嘴的实验结果与此相似, 即  $U_{air} < 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 伴流对  $Re_{cr}$  没有影响, 当  $U_{air}$  增加到  $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  后,  $Re_{cr}$  增大并保持基本相同的取

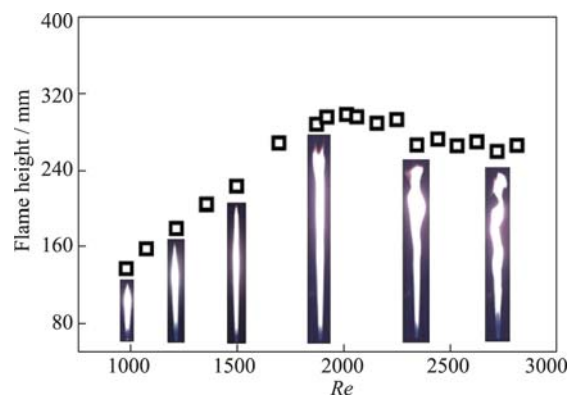


图 2 伴流速度为  $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时火焰高度随  $Re$  的变化 ( $d = 1.0\text{ mm}$ )

Fig.2 Flame height varies with Reynolds number at  $U_{air} = 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $d = 1.0\text{ mm}$ )

值. 已有研究表明, 碳氢燃料射流火焰向湍流状态转换主要是由喷嘴内的流动转换引起的<sup>[3,6,8,11]</sup>, 而浮力诱导产生的火焰面上的大尺度涡旋结构可加速火焰转换, 导致火焰转换提前发生<sup>[6,14]</sup>. 当伴流速度较小时, 浮力对同轴伴流射流火焰的影响依然十分明显, 火焰的  $Re_{cr}$  没有发生变化; 当伴流速度增大后, 浮力效应受到有效抑制, 此时火焰转换由流动转换 (管流  $Re_{cr} \approx 2000^{[3-5]}$ ) 引起, 因此  $Re_{cr}$  增大并且不受伴流速度的影响.

图 4 为两种喷嘴射流火焰  $Re_{cr}$  随伴流速度的变化情况. 如前所述, 喷嘴尺寸不同时, 伴流速度对  $Re_{cr}$  的影响规律类似. 但喷嘴直径对火焰转换的影响也很明显. 伴流速度  $U_{air} < 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 直径为 1.0 mm 喷嘴的  $Re_{cr}$  为 1877, 直径为 1.3 mm 喷嘴的  $Re_{cr}$  为 2383;  $U_{air} \geq 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 两种喷嘴对应的  $Re_{cr}$  分别为 2018 和 2455, 喷嘴尺寸增大使得  $Re_{cr}$  增加.

值得注意的是, 射流 Reynolds 数是基于燃料出口温度和射流速度得到的, 不能直接反映火焰内部的流动状态, 而分析火焰转换临界条件时需要考虑火焰对流动的影响. 射流进入火焰后燃料温度升高, 其动力黏度、密度与温度之间存在如下关系<sup>[18]</sup>:

$$\mu \propto T^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$\rho \propto T^{-1}. \quad (2)$$

因此, 有

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \propto T^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

即随着温度的增加燃料气体运动黏度急剧增大. 对

于特定燃料, 扩散火焰的温度与火焰比表面积  $\gamma$  (表面积与体积之比) 有关  $\gamma$  较大时, 对流和辐射引起的热量损失率更高, 致使火焰温度更低<sup>[8,11]</sup>, 而扩散火焰的比表面积与喷嘴直径  $d$  成反比<sup>[19]</sup>:

$$\gamma \propto d^{-1}. \quad (4)$$

式 (4) 表明, 较小尺寸的喷嘴对应的  $\gamma$  值较大, 因而火焰温度较低. Kang 等<sup>[19]</sup> 对不同直径喷嘴扩散火焰温度的实验测量结果也显示, 喷嘴直径较大时, 一定高度处的中心火焰温度比喷嘴较小时更高.

综上所述可以看出, 大尺寸喷嘴扩散火焰中的射流局部运动黏度  $\nu$  更高, 而黏度的增大可能使火焰中燃料射流重新层流化, 要实现扩散火焰向湍流状态的转换需要增大射流出口  $Re$ .

图 5 是无量纲火焰高度  $h_f/d$  随  $Re$  的变化, 此外还给出了 Hegde 等<sup>[6]</sup> 的实验结果以及层流射流火焰高度的理论解. 该理论公式是 Roper<sup>[7]</sup> 在经典的 Burke 和 Schumann 解的基础上去掉恒定速度场假设得到的, 同时也考虑了伴流的影响. 由图 5 可以看出, 在层流阶段, 本文实验结果与理论公式符合得很好, 除火焰转换点不同外, 实验数据变化趋势与 Hegde 等的结果符合较好. 喷嘴直径不同可能是导致  $Re_{cr}$  不同的原因.

### 2.3 伴流对转换火焰稳定性的影响

浮力诱导火焰面上产生的大尺度涡旋结构是过渡态射流扩散火焰的显著特点. 这些涡旋结构沿着火焰面运动, 使火焰高度和亮度随时间动态变化, 火焰发生振荡或闪烁现象. 对于同轴伴流射流火焰, 伴

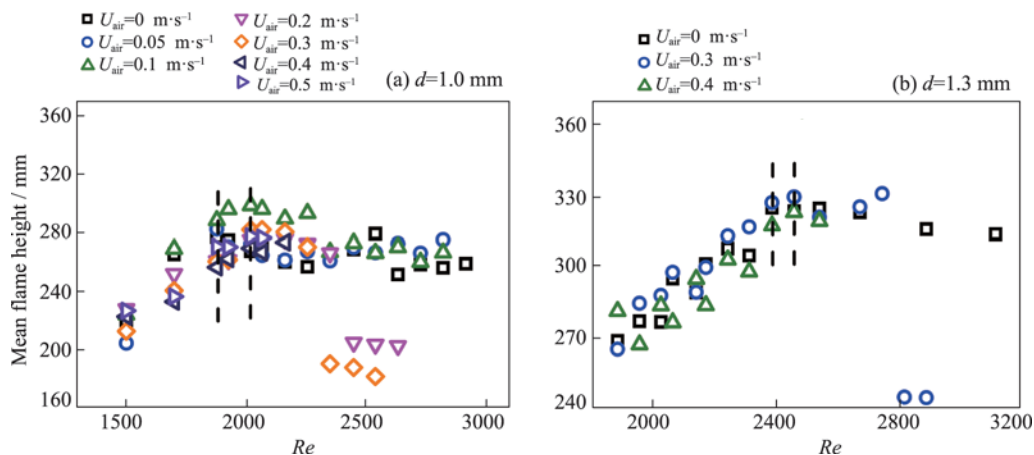


图 3 火焰平均高度随  $Re$  的变化

Fig. 3 Mean flame height varies with Reynolds number

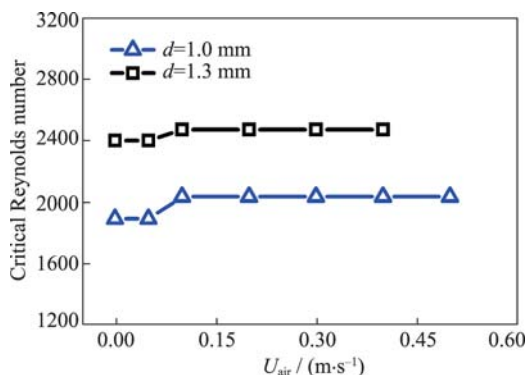
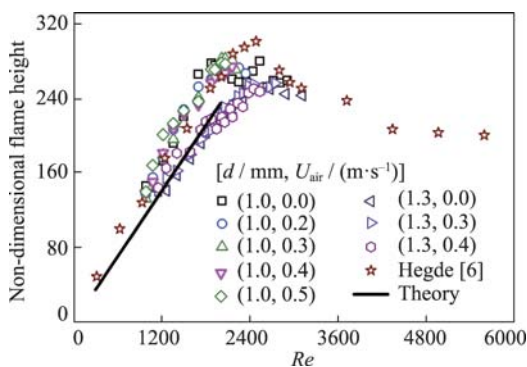
图 4 扩散火焰转换 Reynolds 数  $Re_{cr}$  随伴流速度的变化Fig. 4 Critical Reynolds number of diffusion flames varies with  $U_{air}$ 图 5 无量纲火焰高度随  $Re$  的变化

Fig. 5 Non-dimensional flame height varies with Reynolds number

流速度为  $0 \sim 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 随着伴流速度增大, 火焰振荡幅度逐渐减小, 振荡频率基本不变; 继续增大伴流速度, 火焰振荡的随机性逐渐增强。

图 6 为  $d = 1.0 \text{ mm}$  且  $Re = 2160$  时不同伴流速度下的火焰连续振荡过程, 其中  $r, z$  分别为径向和纵向坐标。由图 6 可以看到, 扩散火焰根部呈蓝色, 而由于碳烟粒子的存在, 火焰其余部分呈亮黄色。在特定伴流速度下, 火焰高度经历持续增加和减小的过程, 火焰振荡和闪烁主要来自于火焰上部, 根部附近始终保持稳定。图 6(a) 为无伴流时火焰的振荡过程, 箭头指示的是火焰面上的大尺度涡旋结构, 随着时间推移, 涡旋结构向上移动并挤压火焰面, 使火焰面发生皱褶, 火焰被拉伸 (高度增加) 并最终在顶端附近断裂, 高度减小。火焰振荡现象是由浮力对流与火焰面之间的剪切层不稳定性引起的 [10,12,16]。  $U_{air} = 0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时 (见图 6 b), 火焰振

荡行为与  $U_{air} = 0$  时的现象基本相同, 随着  $U_{air}$  增大到  $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时 (见图 6 c), 火焰仍发生周期性振荡, 但表现为垂直上下振荡, 该现象与 Fujisawa 等 [17] 在同轴伴流层流扩散火焰中观察到的火焰闪烁行为相似。  $U_{air}$  增大到  $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时 (见图 6 d), 火焰振荡开始出现新的特点, 即周期性减弱, 火焰形态随时间呈现随机变化; 继续增大伴流速度 ( $U_{air} = 0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 见图 6e), 火焰振荡的周期性基本消失。

图 7 给出同样实验条件下火焰高度随时间的变化。可以看出,  $U_{air} \leq 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 火焰高度呈周期性变化, 且变化频率基本相同, 约为  $20 \text{ Hz}$ , 但随着伴流速度增大火焰振荡幅度逐渐减小;  $U_{air} > 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 火焰高度周期性变化规律随伴流速度增加逐渐变弱直至消失。转换过程中火焰同时受到浮力对流和中心射流的影响, 伴流速度较小时, 火焰发生周期性振荡, 这是由于火焰形态主要受到浮力对流的影响; 进一步增大伴流速度后, 空气对流增强, 限制了浮力对流诱导火焰面产生的大尺度涡旋结构的生长 [16], 此时火焰形态受到中心射流的影响较大, 而湍流脉动的不规则性导致火焰振荡的随机性。图 8 为平均火焰高度随伴流速度的变化情况, 由图 8 可以看出, 伴流对转换过程中火焰平均高度的影响很小。

### 3 结论

通过实验对同轴伴流丙烷射流扩散火焰从层流向湍流状态转换过程进行研究, 主要考察伴流速度对扩散火焰转换特性和稳定性的影响。结论如下。

(1) 与静止环境中的射流火焰相比, 较大速度的伴流可以有效减小浮力效应对射流扩散火焰转换过程的影响, 使火焰发生转换的临界 Reynolds 数  $Re_{cr}$  增大, 即火焰推迟转换, 而当伴流速度较小时,  $Re_{cr}$  则不变。

(2) 喷嘴直径较大的扩散火焰  $Re_{cr}$  更大, 这主要是由于此时火焰温度较高, 火焰中的射流运动黏度更大, 导致局部流动重新变为层流, 火焰向湍流状态的转换将在射流出口  $Re$  更大的情况下发生。

(3) 伴流对转换火焰稳定性的影响表现为随着伴流速度的增大, 火焰形态随时间周期性变化的幅度逐渐减小, 在较大的伴流速度下, 火焰形态主要受到中心射流的主导, 火焰振荡的周期性消失, 转而呈现随机性。

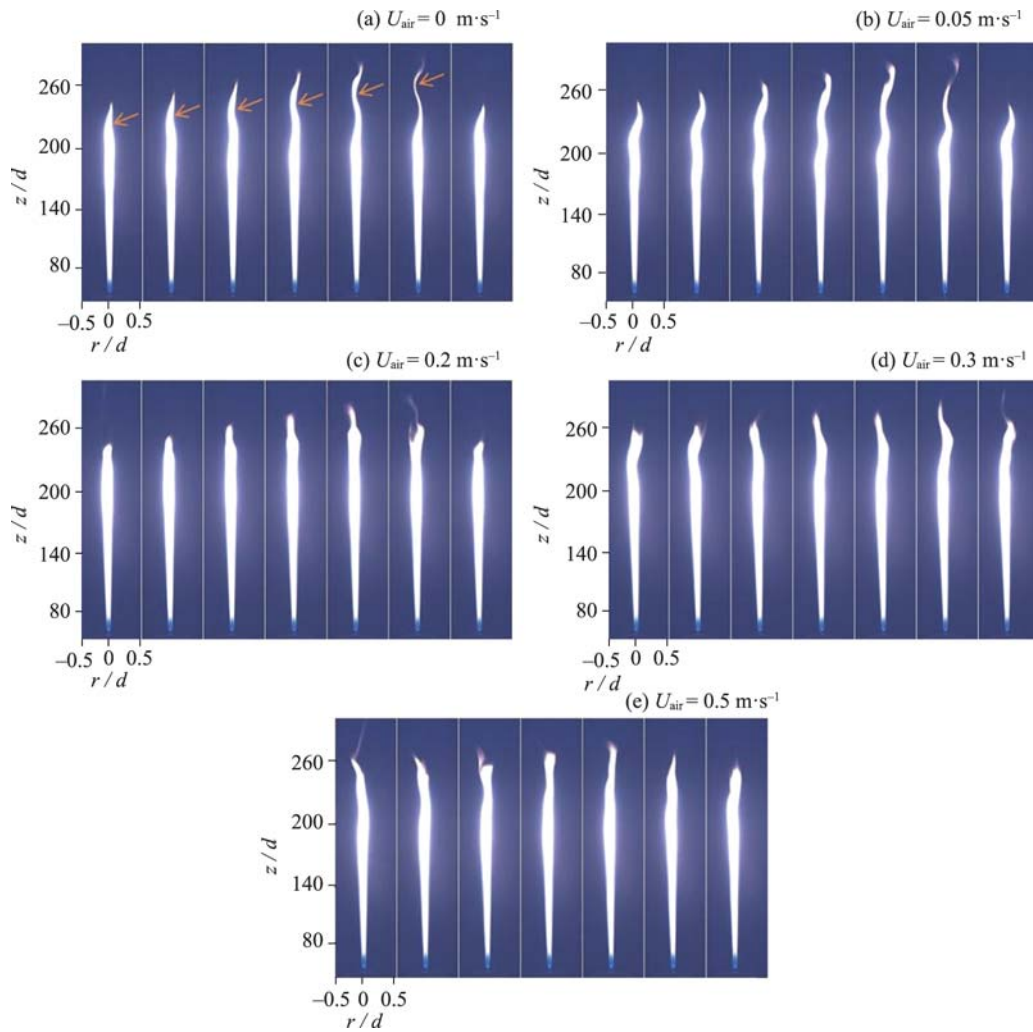


图 6 不同伴流速度下转接火焰的振荡现象 ( $d = 1.0 \text{ mm}$ ,  $Re = 2160$ , 图像时间间隔为  $1/122 \text{ s}$ )  
 Fig. 6 Oscillation phenomenon of transitional flames at various coflow velocities ( $d = 1.0 \text{ mm}$ ,  $Re = 2160$ , time interval is equal to  $1/122 \text{ s}$ )

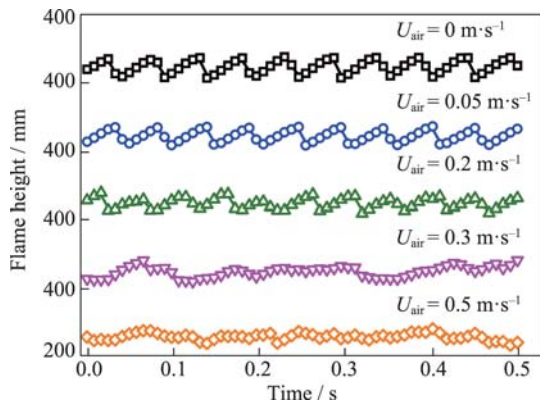


图 7 不同伴流速度下火焰高度随时间的变化  
 ( $d = 1.0 \text{ mm}$ ,  $Re = 2160$ )

Fig. 7 Flame height as a function of time at various coflow velocities ( $d = 1.0 \text{ mm}$ ,  $Re = 2160$ )

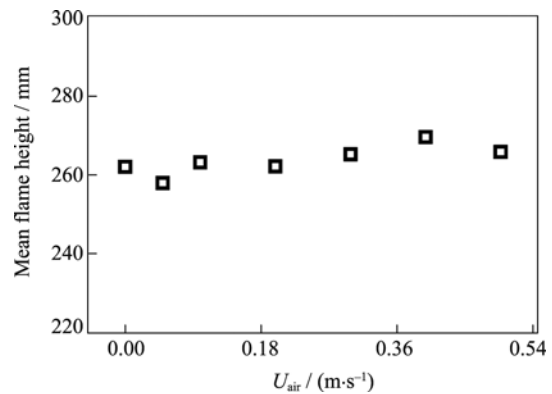


图 8 平均火焰高度随伴流速度的变化  
 ( $d = 1.0 \text{ mm}$ ,  $Re = 2160$ )

Fig. 8 Mean flame height as a function of coflow velocity ( $d = 1.0 \text{ mm}$ ,  $Re = 2160$ )

## 参考文献

- [1] HOTTLE H C, HAWTHORNE W R. Diffusion in laminar flame jets [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 1949, **3**(1): 254-266
- [2] WOHL K, GAZLEY C, KAPP W. Diffusion flames [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 1949, **3**(1): 288-300
- [3] TAKENO T, KOTANI Y. Transition and structure of turbulent jet diffusion flames [C]//Progress in Astronautics and Aeronautics. New York: AIAA, 1978, **58**: 19-35
- [4] TAKAHASHI F M, IKAI S. Transition from laminar to turbulent free jet diffusion flames [J]. *Combust. Flame*, 1982, **48**(82): 85-95
- [5] COATS C M ZHAO H. Transition and stability of turbulent jet diffusion flames [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 1989, **22**(1): 685-692
- [6] HEDGE U N, ZHOU L, BAHADORI M Y. The transition to turbulent of microgravity gas jet diffusion flames [J]. *Combust. Sci. Technol.*, 1994, **102**(1/2/3/4/5/6): 95-113
- [7] ROPER F G. The prediction of laminar jet diffusion flame sizes: Part I theoretical model [J]. *Combust. Flame*, 1977, **29**(3): 219-226
- [8] Heskestad G. Luminous heights of turbulent diffusion flames [J]. *Fire Safety J.*, 1983, **5**(2): 103-108
- [9] KIMURA I. Stability of laminar jet-flames [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 1965, **10**(1): 1295-1300
- [10] ZUKOSKI E E, CETEGEN B M, KUBOTA T. Visible structure of buoyant diffusion flames [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 1985, **20**(1): 361-366
- [11] BAHADORI M Y, STOCKER D P, DAVID F, *et al.* Effects of buoyancy on laminar, transitional, and turbulent gas jet diffusion flames [M]//Modern Developments in Energy, Combustion and Spectroscopy. Cleveland, OH: NASA, 1993: 49-66
- [12] LINGENS A, REEKER M, SCHREIBER M. Instability of buoyant diffusion flames [J]. *Exper. Fluids*, 1996, **20**(4): 241-248
- [13] KONG Wenjun, DU Wenfeng, ZHANG Xiaoqian. Effects of gravity on the dynamic behavior of jet diffusion flames [J]. *J. Eng. Thermophys.*, 2000, **21**(3): 373-377 (孔文俊, 杜文峰, 张孝谦. 重力对扩散射流火焰动态特性的影响 [J]. *工程热物理学报*, 2000, **21**(3): 373-377)
- [14] AGRAWAL A K, ALBERS B W, ALAMMAR K N. Effects of buoyancy on transitional hydrogen gas-jet diffusion flames [J]. *Combust. Sci. Technol.*, 2005, **177**(2): 305-322
- [15] KOLHE P S, AGRAWAL A K. Role of buoyancy on instabilities and structure of transitional gas jet diffusion flames [J]. *Flow Turb. Combust.*, 2007, **79**(4): 343-360
- [16] FUJISAWA N, MATSUMOTO Y, YAMAGATA T. Influence of co-flow on flickering diffusion flame [J]. *Flow Turb. Combust.*, 2016, **97**(3): 931-950
- [17] LEE B, CHUNG S. Stabilization of lifted tribrachial flames in a laminar nonpremixed jet [J]. *Combust. Flame*, 1997, **109**(2): 163-172
- [18] LAW C K. *Combustion Physics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006
- [19] KANG Y H, WANG Q H, LU X F, *et al.* Experimental and theoretical study on the flow, mixing, and combustion characteristics of dimethyl ether, methane, and LPG jet diffusion flames [J]. *Fuel Proc. Technol.*, 2015, **129**: 98-112