本生灯层流预混火焰稳定点与熄火机理

黄 夏 黄 勇 巩 帆

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 采用速度匹配法结合壁面淬熄分析甲烷本生灯层流预混火焰稳定点与熄火机理,得到了贫油与富油状态下火焰稳定点不同的移动规律,定量预测了火焰吹熄特性关系,并通过实验验证. 火焰稳定点在本生灯出口附近的边界层中,该处的火焰传播速度与预混气来流速度相平衡;而在边界层中,以火焰稳定点为起点,存在一个可点火区域. 随着来流预混气流速的增大或者当量比远离恰当比,这一可点火区域逐渐缩小,直至成为一个点,此时即为熄火的临界状态. 通过比较近壁面的当地气流速度与火焰传播速度,并采用非耦合的方法分析壁面淬熄的影响,得到了火焰稳定点的移动规律. 在径向上,火焰稳定点随来流速度增大向射流中心线方向移动;在轴向上,随流速增大,贫油工况下稳定点向下游移动,富油工况时则向上游移动. 根据火焰稳定点移动规律结合可点火区域分析定量预测了吹熄特性,通过了实验验证,证明了火焰的熄火机理.

关 键 词: 本生灯; 层流预混火焰; 速度匹配法; 壁面淬熄; 火焰稳定点; 熄火特性

中图分类号: TK 16

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1325-06

Anchoring point and blow-off mechanism of Bunsen laminar premixed flame

Huang Xia Huang Yong Gong Fan

(School of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A velocity-matching method (VM Method) combined with the wall quenching effect was used to analyze the anchoring point movements and the blow-off characteristics of a methane-air laminar premixed Bunsen flame in lean and rich conditions. A blow-off model was achieved and proved by experiments. The flame was anchored in the shearing layer near the burner exit, where the local velocity was equilibrium with the flame speed; there was also an ignition area in the boundary layer. This ignition area was diminished when the flow velocity increased or the equivalence ratio was away from the stoichiometric ratio. When the ignition area became a point, the blow-off occurred. The anchoring point movements were predicted by comparing the local flow velocity and the flame speed, and considering the wall quenching effect in a decoupled method. With the increasing incoming velocity, in radial direction the anchoring point moves towards the jet center line, and in flow direction it moves downstream in fuel-lean conditions and upstream in fuel-rich conditions, respectively. This movement and the ignition area analysis predict the blow-off characteristics, and are validated by experiments. The result shows a good precision and proves the blow-off mechanism.

Key words: Bunsen burner; laminar premixed flame; velocity-matching method; wall quenching; flame anchoring point; blow-off characteristic

在现代航空发动机燃烧室设计中,火焰的吹熄特性预测是十分重要的一项工作,而熄火特性预测理论源于对火焰的熄火机理研究. 在 20 世纪 50 年代之前,已有对于简单的层流本生型火

收稿日期: 2012-12-18; **网络出版时间**: 2013-07-23 16:54

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130723.1654.005.html

作者简介: 黄 夏(1986-),男,湖北襄阳人,博士生,swd_hx_swd.student@sina.com.

焰[1-3]和湍流本生型火焰[4]熄火特性的实验研究. 以此为基础,文献[5]总结了火焰可能出现的几种情况,如回火、吹熄等. 而文献[6]对此提出了更加详细的熄火机理分析.

文献[6]提出的熄火机理是基于速度的匹配. 流场中气流速度与火焰传播速度相切的地方为火焰稳定点. 随着流速增加,火焰稳定点逐渐被推向下游. 当流速增大到一定程度后,流场中的流速总是超过火焰传播速度,火焰面无法在任何位置存在,火焰即熄灭. 之后文献[7]在上述分析的基础上提出了可点火区域的概念. 在可点火区域的任意位置点火,火焰最后都会驻定在稳定点. 如果这一可点火区域缩小为一个点,表明此时为熄火临界工况,即熄火机理是可点火区域的缩小.

然而,这些研究只是定性地说明了火焰稳定的基本机制,在预测火焰熄火特性方面并没有提供定量的帮助[6-7]. 即使较基础的本生灯火焰熄火特性曲线,目前也只有实验数据及拟合的经验公式,并没有精确的理论分析.

从 Lewis 与 Wohl 等的分析可以看出,火焰稳定存在的前提是存在稳定的火焰根部. 因此火焰根部,或者说火焰稳定点,是熄火机理中的关键. 近年来,有许多研究开始从火焰稳定点入手来分析火焰熄火问题,比如文献[8-9]采用数值模拟的方法研究多孔板火焰的问题,寻找火焰稳定点对熄火机理的影响. 而在文献[10]对旋流火焰临吹熄状态的 PIV 与 PLIF 的拍摄实验中指出,当火焰根部的局部熄火现象发生的概率高到一定程度后,根部先熄灭,然后下游的螺旋形火焰才逐渐熄灭. 这表明研究者已经开始从火焰驻定与熄火的机理来研究火焰的吹熄问题.

根据以上的研究成果,本文采用理论结合实验拟合的方法分析常温常压下的本生灯甲烷预混层流火焰的稳定点位置与来流预混气速度的关系;通过得到的稳定点移动规律,建立火焰的熄火特性预测模型,与实验对比验证以速度匹配为基础的熄火机理. 本文将这种方法称为速度匹配法[11]. 选取本生灯火焰为研究对象是为了排除湍流等因素的影响.

1 速度匹配法分析本生灯火焰稳定点移动规律

根据前人的研究成果可知,本生灯的火焰稳定点存在于射流出口附近的边界层处[6]. 在此处,有当地的火焰传播速度与预混气来流速度相平衡,即

$$S_L(K_Y Y_0) = K_u u_0 \tag{1}$$

其中,S_L 是层流火焰传播速度;Y_0 是预混气中燃料的初始质量分数;u_0 是预混气在本生灯出口处的初始速度. K_u 与 K_Y 分别是无量纲速度和燃料质量浓度,是空间坐标(x,y)的函数,x 代表流向,y 代表径向,原点是本生灯出口处内壁面. K_u 与 K_Y 由圆柱自由射流的理论推导得出,其表达式和推导过程在本文的前期工作[11]中给出.

1.1 气流速度与火焰传播速度

流场中任意一处的预混气来流速度 u 是一个可以由流场直接给出的物理量. 而根据文献[12]的研究,火焰传播速度 S_L 不是直接的物理量,而是由当量比 Φ 决定. 根据式(1)可以得到图 1 所示的来流速度与火焰传播速度的匹配图. 虚线 1 是速度平衡曲线,也即图 2 中的曲线 1,这一曲线是方程(1)的解. 在本研究的前期工作中[11]对曲线 1 的求解给出了具体的分析过程.

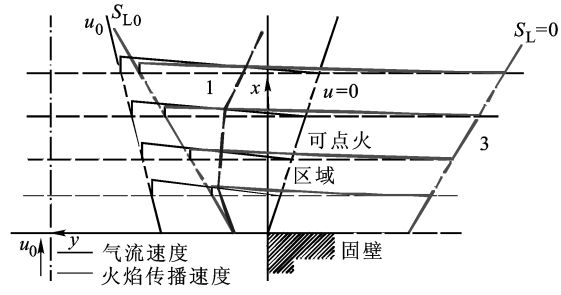


图 1 出口附近两种速度的匹配[11]

1.2 壁面淬熄效应与火焰稳定点

图 1 中的可点火区域应是一个在上下游都封闭的区域. 在流动的上游,即火焰稳定点处,封闭可点火区域的因素是壁面的淬熄效应. 由于壁面的冷却作用,在距离壁面一定范围内是不会有火焰存在的. 对壁面淬熄的分析有两种方式,一种是在火焰传播速度方程组加入向壁面散热的源项,再综合求解,可称为耦合分析方法;另一种则是将壁面淬熄效应从火焰传播速度方程中剥离出来,作为一个独立的变量考虑,可称为非耦合分析方法. 这种非耦合的方法通常采用淬熄距离来体现壁面淬熄的效应. 由于耦合方法分析起来较为复杂,目前广泛采用的壁面淬熄分析方法大多是非耦合的,典型的如文献[13-14]等. 本文也采用非耦合的方式处理壁面淬熄的问题.

本文认为,对于本生灯,其出口附近的壁面淬熄边界如图 2 中的曲线 2. 曲线 2 在 $y>0$ 一侧基本成圆弧状,这是因为壁面在此处出现拐点. 而在 $y<0$ 一侧,虽然曲线 2 大体上可看作沿着壁面,但存在一处凸向壁面的部分,这是由于火焰的存在

会抑制淬熄效应,减小淬熄距离;但这种抑制作用会随着距火焰距离的增大而逐渐减弱,所以淬熄距离也不会无限变小. 这处凸起大体将曲线 2 分成两段. 在壁面靠近射流中心线的一段较弯曲,这一段主要对应贫油工况;而远离射流出口的一段相对较为平滑,主要对应富油工况.

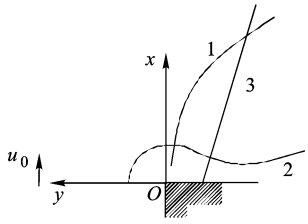


图 2　壁面淬熄边界及可点火区域分析示意图

若固定来流速度,变化当量比,当当量比从贫油向恰当比变化时,火焰温度升高,淬熄效应减弱;而当量比从恰当比向富油变化时,由于富油火焰具有双层结构,外层火焰的存在会向壁面传递更多的热量,使淬熄效应维持在一个较弱的水平.

而若固定当量比,变化来流速度,在贫油工况下,火焰稳定点在曲线 2 的左段移动. 来流速度的提高会加强向壁面的换热,增大耗散,从而增大淬熄距离,使稳定点远离壁面. 而在富油工况下,火焰稳定点在曲线 2 的右段移动,淬熄距离随流速增大逐渐减小,这仍是富油火焰存在双层结构的关系. 来流速度越高,虽然淬熄区域的热耗散会增大,但同时火焰长度变长,火焰面面积增大,向淬熄区域的辐射增多,抑制淬熄效应.

如果提高来流的温度或者压力,由于火焰传播速度整体上会增大,淬熄效应被抑制,曲线 2 整体上会向壁面靠近,但不影响上述的变化规律. 因此本文暂不考虑来流压力与温度的影响,以常温常压下的本生灯火焰为研究对象.

这种壁面淬熄边界分布规律缺乏定量的理论描述,本文以实验数据拟合的方式得到淬熄距离定量的分布规律. 本文在前期工作中认为,淬熄距离应与来流速度有关,因为速度的变化会影响传热[11]. 本文将淬熄距离表示为来流速度的函数:

$$d_q = f(u_0) \tag{2}$$

其中 d_q 是壁面淬熄距离.

图 2 中曲线 1 和 2 的交点即为火焰稳定点,结合方程式(1)、式(2)可以得到火焰稳定点随来流速度、当量比的移动规律. 其中式(2)需要对于淬熄距离进行实验数据的拟合.

1.3　可点火区域的封闭

图 2 中速度平衡曲线 1 与壁面淬熄边界线 2 所组成的区域在下游仍不封闭. 而一个封闭的可点火区域应存在一条边界线,即图 2 中的曲线 3.

对于贫油工况,这一边界线为燃料的贫油可燃极限 Φ_{LLT}. 这一极限是指静止状态下预混气能够燃烧的浓度范围的边界.

而富油时的情况与贫油不同. 富油火焰存在一个以初始当量比反应的内层预混火焰,和一个以化学恰当比反应的外层扩散火焰[15]. 内层的预混火焰向外层提供各种中间产物,外层的扩散火焰则向内层提供热量和 H 原子. 随着富油火焰的当量比或者来流速度的增大,内外层火焰会逐渐靠近并趋于融合,直到火焰熄灭. 可见富油火焰的双层结构对于火焰稳定起到了决定性的作用[15],因此本文假定富油时的封闭曲线 3 为当量比 1.0 的等浓度线.

根据燃烧学的一般理论[16],当量比与燃料的质量分数有如下关系:

$$\Phi = \frac{Y_f}{1 - Y_f} G^0 \tag{3}$$

其中,Y_f 是燃料的质量分数;G^0 是燃烧的理论空气量.

则边界层中任意位置的当量比可表示为

$$\Phi = \frac{K_Y Y_0}{1 - K_Y Y_0} G^0 \tag{4}$$

结合式(3)与式(4),前文中所分析的封闭可点火区域的浓度 Φ_{LT} 等浓度线可表示为

$$\Phi_{LT} = \frac{K_Y \Phi_0 G^0}{\Phi_0 + G^0 - K_Y \Phi_0} \tag{5}$$

当 $\Phi_0 \leqslant 1.0$ 时,$\Phi_{LT} = \Phi_{LLT}$;当 $\Phi_0 > 1.0$ 时,$\Phi_{LT} = 1.0$.

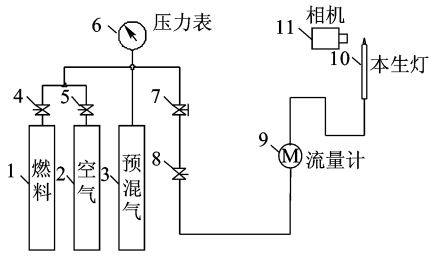
图 2 中的曲线 1,2,3 围成了可点火区域,则联立式(1)、式(2)与式(5),所得方程组的解即为可点火区域在二维上是一个点时的初始来流速度 u_0 与初始当量比 Φ 的关系曲线. 根据以前的工作[11]和上文的分析,求解该方程组,除了需要得到式(2)淬熄距离的拟合公式外,仍需知道预混气的运动粘性系数、燃料在助燃剂中的质量扩散系数、燃料的理论空气量和贫油可燃极限等物性参数.

火焰被吹灭时的临界速度即为吹熄速度. 而根据前文对熄火机理的分析发现,当可点火区域缩小为一个点后,由于该区域在流场中消失,则在流场中的任意一处火焰都不能稳定存在,其物理表现即为被吹灭,说明此时的临界速度为该当量比下的吹熄速度. 这表明,联立求解式(1)、式(2)与式(5)的结果即为吹熄速度与来流初始当量比的关系曲线,也即所谓的熄火特性曲线. 因此,如

果该方程组能够得到较准确的熄火特性预测结果,则说明前文中熄火机理分析的正确性.

2 火焰稳定点及熄火特性实验

本实验的目的,首先是测定火焰稳定点的位置,其次是得到火焰的熄火特性数据,从而验证理论分析的准确性. 本实验系统的示意图如图 3 所示.



1,2,3—气罐;4,5,7,8—阀门;6—压力表;9—流量计;10—本生灯;11—相机.

图 3 本生灯火焰稳定点实验系统示意图

2.1 预混气的制备

本实验采用甲烷作为燃料. 制备预混气的方法是:首先向图 3 的预混气罐 3 中充入表压 P_1 的甲烷,再充入空气并记录下最后的表压 P_2. 则根据气体分压原理,可以得到预混气当量比. 控制甲烷与空气分压的压力表采用量程 1.6 MPa,精度 0.4 级的弹簧管压力计. 根据误差传递原理,当量比的相对误差为±3.2%.

2.2 本生灯出口流速的控制

本实验中灯管出口流速的控制与测量由 LZB-10 玻璃转子流量计完成. 该型流量计量程 1 600 L/h,精度±4%. 则流速相对误差为±4%.

2.3 火焰照片分析

火焰稳定点的空间坐标通过分析火焰根部照片得到. 本实验采用 NIKON COOLPIX P90 相机拍摄火焰根部照片,最大像素为 1 200 万,拍摄照片对应的空间尺度是 48.3 mm×36.2 mm. 导入到 Photoshop 软件中分析色差来得到火焰的轮廓. 分析照片时的误差为±1 像素,对应的尺寸误差为±0.012 1 mm. 在本实验中,火焰稳定点的空间坐标一般在 0.2 ~ 3.0 mm 范围内变化,其相对误差不超过±5%.

2.4 实验工况参数

本实验来流为常温常压,主要的工况参数是来流预混气的当量比和速度. 实验中的当量比 Φ 系列:0.806,0.911,1.015,1.112,1.308,1.616,1.790,2.037,2.214,2.404,2.586. 来流速度 u_0 系列:0.728,1.019,1.310,1.602,1.893,2.184,2.475,2.766,3.058,m/s.

3 实验结果处理及分析

图 4 是不同当量比下火焰稳定点位置的实验数据,每个当量比系列中的火焰稳定点对应的来流速度均为 0.728 ~ 3.058 m/s,箭头表示速度增大的方向. 图 4 的原点即为图 2 中的原点,即本生灯出口内壁面;横坐标为流向距离,实际上为图 2 中的 x 方向;纵坐标为径向距离,实际上为图 2 中的 y 方向. 图 4 以及后文中涉及到稳定点移动规律的图以及涉及到空间坐标的公式都是以图 2 的坐标系统为基础的. 可以看到壁面淬熄的边界正如图 2 的曲线 2 所示分为两段. 在这两段上火焰的稳定点随来流速度的变化关系存在区别. 在径向上,两者都随来流速度的增大而靠近射流的中心线. 而且当量比越接近化学恰当比,火焰稳定点就越靠向射流的中心线. 这是因为当量比越远离恰当比,火焰传播速度越小,速度平衡的位置就越远离射流中心. 在流向上,当 $\Phi \leqslant 1.3$ 时,火焰稳定点随流速增大向下游移动;当 $\Phi > 1.3$ 时,稳定点随流速增大向上游移动. 这是由于一方面,来流速度增大会加大与壁面的换热,从而提高向壁面的热耗散,加强淬熄效应;而另一方面,$\Phi > 1$ 后本生灯火焰会出现双层结构[15],增大从火焰面发出的热量,从而抑制淬熄效应. 这两种因素的相互作用,使得稳定点的变化规律在 $\Phi = 1.3$ 附近出现拐点.

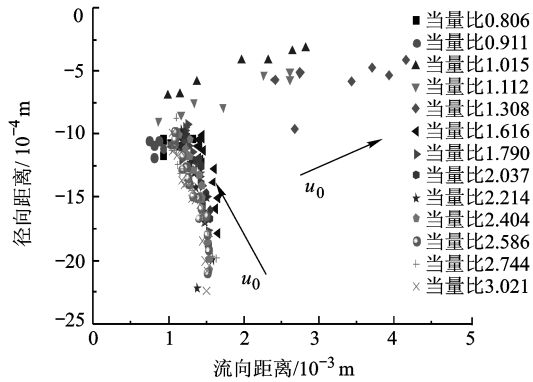


图 4 不同当量比下的火焰稳定点

为了得到淬熄距离随来流速度变化的拟合公式,比较不同流速下火焰稳定点随当量比的变化关系. 图 5 所示,为来流速度 1.019 m/s 下,当量比的变化范围 0.806 ~ 2.586 的稳定点空间位置.

对于贫油工况,稳定点的移动轨迹大体上是一条圆弧,因此对稳定点的坐标取平方平均,得到图 6,进而对得到的直线进行拟合.

对于富油工况,稳定点的移动轨迹大体上是

一条与壁面平行的直线,因此将稳定点的流向坐标与来流速度进行拟合,得到图 7.

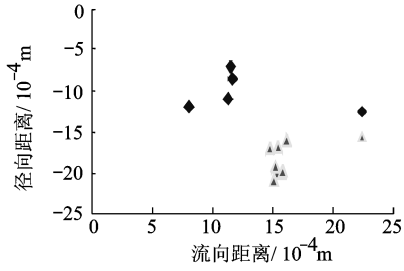


图 5　来流速度 1.02 m/s 下不同当量比火焰稳定点变化

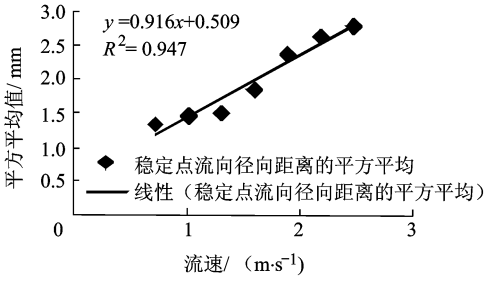


图 6　贫油时壁面淬熄距离与来流速度的关系

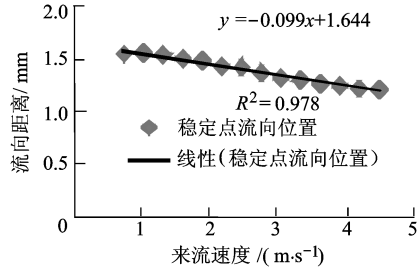


图 7　富油时壁面淬熄距离与来流速度的关系

最终可得到本生灯出口附近壁面淬熄距离的表达式:

$$d_q=\begin{cases}\sqrt{x^2+y^2}=0.000\,916u_0+0.000\,509\\ \qquad \Phi\leqslant 1.3\\ x=-0.000\,099u_0+0.001\,644\\ \qquad \Phi>1.3\end{cases}\tag{6}$$

其单位是 m.

式(6)适用于计算甲烷本生灯火焰出口附近的壁面淬熄距离. 与本文前期工作中提出的壁面淬熄距离方程不同[11],式(6)适用于当量比0.8 ~ 2.6 贫富油的不同工况,而文献[11]中并未考虑富油,只适用于贫油工况.

4　火焰稳定点的预测计算

代入数据求解方程组(1)与(6). 在本课题组的前期研究中将本生灯出口的流动当做层流圆柱自由射流处理,得到的无量纲速度与浓度表达式为[17]

$$K_u=\frac{0.224\,4x+y}{0.322\,7x+0.001\,3}$$

$$K_Y=\frac{Y}{Y_0}=\frac{0.320\,6x+y+0.000\,85}{0.461x+0.001\,9}$$

甲烷层流火焰速度采用文献[17]的经验公式:

$$S_L=S_L(\Phi)=A\Phi^B\exp(-C(\Phi-D)^2)\tag{7}$$

其中的系数见表 1.

表 1　甲烷层流火焰传播速度公式系数[17]

系数	A	B	C	D
数值	0.607 9	−2.554	7.31	1.230

由于存在非线性项,方程组在代入数据后,通过 Wolfram Mathematica 软件数值求解,得到甲烷本生灯层流预混火焰的火焰稳定点移动规律. 图 8 ~ 图 10 是火焰稳定点在不同当量比下的移动规律计算值与实验值的对比,其中 u_0 的变化范围为 0.728 ~ 3.058 m/s,箭头表示速度增大的方向. 结果表明,火焰稳定点的移动规律预测误差在 ±15% 以内,基本上能够预测稳定点的移动规律.

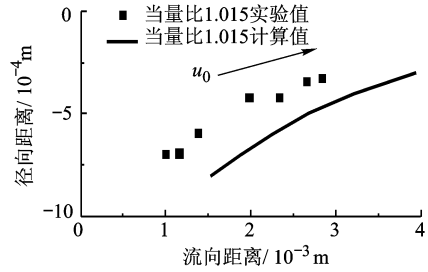


图 8　当量比 1.015 时的火焰稳定点移动规律

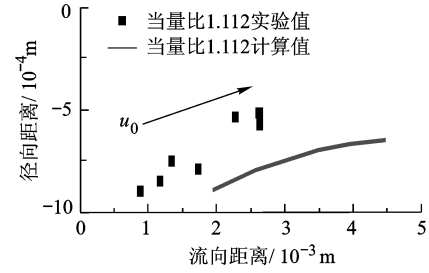


图 9　当量比 1.112 时的火焰稳定点移动规律

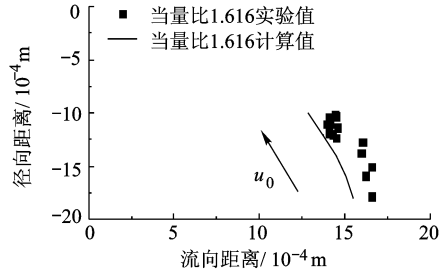


图 10　当量比 1.616 时的火焰稳定点移动规律

5　吹熄速度的预测计算

求解方程组式(1)、式(5)与式(6),可以得到吹熄速度与当量比之间的关系. 方程组也采用

Wolfram Mathematica 软件数值求解. 与实验结果的对比如图 11 所示,其预测误差基本上保持在±15%以内,准确度较好. 由预测结果来看,本文以速度匹配为基础对熄火机理的分析是正确的.

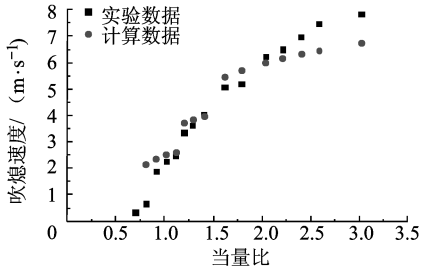


图 11 熄火特性预测结果与实验结果对比

本文以及第 4 节中预测的火焰稳定点存在的误差,可能是由采用非耦合方法处理壁面淬熄造成的. 由于这种方法将壁面淬熄距离与火焰传播速度剥离开来作为一个独立的变量,认为在壁面淬熄边界处,火焰速度突变为 0. 而实际上,壁面淬熄是火焰传播速度变为 0 的物理表现,应存在一个渐变的过程,因此非耦合方法会造成一定误差. 如果在火焰传播速度的公式(9)中将壁面散热源项考虑进去,得到一个准确的解析解,重新代入式(1)中,应可以提高这一预测公式的准确度.

6 结 论

可点火区域的缩小为火焰的熄火机理. 本文比较了本生灯出口附近的边界层中该区域的当地气流速度与火焰传播速度得到速度平衡曲线;又测定了火焰稳定点的实验得到壁面淬熄边界线的拟合表达式. 最终得到了火焰稳定点移动规律与吹熄特性预测的关系式.

分析发现,贫油与富油火焰的稳定点随来流速度的变化关系有区别. 在径向上,两者都随来流速度的增大而靠近射流的中心线. 而在流向上,随流速增大,贫油火焰稳定点移向下游,富油的则移向上游. 而且当量比越接近化学恰当比,火焰稳定点就越靠向射流的中心线;当量比越远离恰当比,火焰稳定点越远离射流中心线.

最后与实验结果的对比,表明火焰稳定点的移动规律预测误差在±25%以内,本生灯的熄火特性预测的误差基本在±15%以内,证明了熄火机理分析的正确性.

参考文献（References）

[1] Lewis B, von Elbe G. Stability and structure of burner flames [J]. Journal of Chemical Physics, 1943, 11(2): 75-97

[2] von Elbe G, Mentser M. Further studies of the structure and stability of burner flames [J]. Journal of Chemical Physics, 1945, 13(2): 89-100

[3] Garside J E, Forsythe J S, Townend D T A. The stability of burner flames [J]. Journal of the Institute of Fuel, 1945, 18: 175-186

[4] Bollinger L M, Williams D T. Experiments on stability of Bunsen-burner flames for turbulent flow [R]. NACA-TN-1234, 1947

[5] Whol K, Kapp N M, Gazley C. The stability of open flames [J]. Symposium on Combustion Flame and Explosion Phenomena, 1949, 3: 3-21

[6] von Elbe G, Lewis B. Theory of ignition, quenching and stabilization of flames of nonturbulent gas mixtures [J]. Symposium on Combustion Flame and Explosion Phenomena, 1949, 3: 68-79

[7] Wohl K. Quenching, flash-Back, blow-off: theory and experiment [J]. Symposium on Combustion Flame and Explosion Phenomena, 1953, 4: 68-89

[8] Altay H M, Kedia K S, Speth R L, et al. Two-dimensional simulations of steady perforated-plate stabilized premixed flames [J]. Combustion Theory and Modeling, 2010, 14(1): 125-154

[9] Kedia K S, Ghoniem A F. Mechanisms of stabilization and blow-off of a premixed flame downstream of a heat-conducting perforated plate [J]. Combustion and Flame, 2010, 159: 1055-1069

[10] Stohr M, Boxx I, Carter C, et al. Dynamics of lean blowout of a swirl-stabilized flame in a gas turbine model combustor [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33: 2953-2960

[11] 黄夏,黄勇,王方,等. 采用速度匹配法研究本生灯火焰的稳定点位置[J]. 燃烧科学与技术,2011,17(1):72-77
Huang Xia, Huang Yong, Wang Fang, et al. Anchoring point of a Bunsen flame by velocity-matching method [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2011, 17(1): 72-77 (in Chinese)

[12] Ju Hyeong Cho, Lieuwen T. Laminar premixed flame response to equivalence ratio oscillations [J]. Combustion and Flame, 2005, 140: 116-129

[13] Andrae J, Bjornbom P. Numerical studies of wall effects with laminar methane flames [J]. Combustion and Flame, 2002, 128: 165-180

[14] Bellenoue M, Kageyama T, Labuda S A, et al. Direct measurement of laminar flame quenching distance in a closed vessel [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003, 27: 323-331

[15] Aggarwal S K. Extinction of laminar partially premixed flames [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35: 528-570

[16] 黄勇,林宇震,樊未军,等. 燃烧与燃烧室[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009:103
Huang Yong, Lin Yuzhen, Fan Weijun, et al. Combustion and combustor[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2009: 103 (in Chinese)

[17] 肖柏荣. 速度匹配法研究火焰稳定机理[D]. 北京:北京航空航天大学能源与动力工程学院,2012
Xiao Bairong. Flame holding mechanism: velocity-matching method[D]. Beijing: School of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012 (in Chinese)

（编 辑:张 嵘）