层流预混滞止火焰结构及传播速度实验研究

黎 军,田文栋,盛宏至,吴承康

(中国科学院力学研究所能源与环境工程研究室,北京 100080)

摘 要:火焰传播速度反映了火焰和燃料燃烧的基本特性,但火焰传播比较复杂,受流动,传热以及化学反应等众 多因素的影响,在实际的系统中,无法得到理想化的平面燃烧波,而利用平面滞止火焰可外推得到零拉伸率下的火 焰传播速度,即理想层流火焰传播速度。在建立稳定的层流预混滞止火焰的基础上,用激光多普勒仪测定了滞止流 动的速度分布,得到了火焰结构的一些特征,并根据同一空燃比下不同位伸率与当地火焰传播速度的关系,获得了 理想层流火焰的传播速度。

关键词: 燃烧; 层流; 滞止火焰; 拉伸率; 传播速度 中图分类号: 0.643.2
文献标识码: A
文章编号: 1006-8740(2000)03-0210-04

Experimental Study of the Structure of a Premixed Laminar Stagnant Flame and Propagation Speed

L IJun, T IAN W en-dong, SHEN G Hong-zhi, WU Cheng-kang (Institute of M echanics, Chinese A cadem y of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The flame propagation speed is an important feature of the flame and the combustible mixture The phenomenon of flame propagation is a very complicated process The flame speed is influenced by many factors, such as fluid dynamics, heat transfer and chemical reaction dynamics. In fact, it is impossible to set up an ideal plane in a practical system, so it is not easy to determ ine the speed of a laminar premixed flame in an experimental setup. One of the methods to measure the propagation speed is to utilize the stagnant flame An experimental setup of a stagnant flame was used in this paper to measure the minimum speed at the location before the flame sheet by LDA. The flame structure at different stretch rates was discussed and the ideal flame propagation speed was determined by extrapolating the speeds before the flame sheet at different stretch rates to zero stretch rate

Keywords combustion; laminar flow; stagnant flame, stretch rate, flame speed

火焰传播速度反映火焰和燃料燃烧的基本特性, 是火焰研究的重要内容。真正反映燃烧特性的是理想 层流火焰传播速度,理想层流火焰传播速度是指一维, 平面、层流、定常、绝热的预混可燃混合物弱燃烧波的 传播速度。由于一般火焰的传播速度比较复杂,受流 动、传热以及化学反应等众多因素的影响,不能真正反 映燃烧特性,因此在实际的系统中无法得到上述理想 化的平面燃烧波,但通过平面滞止火焰⁽¹⁻³⁾的研究,可 以外推出在零拉伸率下的火焰传播速度,即理想层流 火焰传播速度。为获得理想火焰传播速度,需消除其它 影响因素,滞止火焰是目前最有希望的方法之一,具有 重要研究价值。本文意在探索滞止火焰的实验方法,研 究理想火焰传播速度,积累燃烧过程的基础数据和实 验经验。

图 1 为层流预混平面滞止火焰形成示意图, 渐缩 喷口产生均匀分布的层流预混射流, 该射流在固壁壁

* 收稿日期: 1999-04-12; 修回日期: 1999-07-12。 基金项目: 中国科学院重点课题: "燃烧基础问题研究"基金资助项目。 作者简介: 黎 军(1954-), 男, 博士, 副研究员。 面(滞止平板)的作用下,形成层流滞止流动,并在滞止 平板和喷口间产生一个平面火焰面。y轴与气流轴线 重合,方向与气流方向相反,原点位于平板的滞止点。



滞止流动的拉伸率(flame stretch)a 定义为[1]

 $a = \frac{\mathrm{d}u_{y}}{\mathrm{d}y} \sim \frac{\mu_{0}}{L} \tag{1}$

式中: u,为气流中心线各点的速度; uo为喷口处预混 气体的速度,L为喷口与滞止平板间距离。

改变 u_0 或L 均可改变滞止流动的拉伸率 a, 同时 火焰波前速度(local flam e speed) u_f 也随之改变, 只有 拉伸率 a=0 时的火焰波前速度 u_f 才是理想层流火焰 传播速度 S_{1a}

本文建立了产生层流预混滞止火焰的实验装置, 并对系统的流量测量进行了仔细标定,同时屏蔽周围 环境对火焰区的多种干扰,获得了稳定的层流预混滞 止火焰。通过测量得到了火焰波前速度 uf 与拉伸率的 关系,验证了两者之间的线性关系,外推得到了理想层 流火焰的传播速度,结果与文献[1]的结论相符。

1 试验装置

图 2 为试验系统示意图,主要包括气体的减压和 测量、示踪粒子添加、燃烧装置、滞止平板和激光多普 勒测速系统。

燃烧装置包括混合气喷口、气流均匀室以及氮气 保护层。喷口与气流均匀室的扩张比0 04 1,出口直 径 20 mm,粗糙不洁及较厚金属壁的喷口会造成火焰 形状不规则,严重时导致火焰抖动,难以稳定燃烧,因 此加工的喷口尖锐而且光滑,并使之在试验过程中保 持洁净。喷口上游为气流均匀室,其中布置多层铜网, 使预混气均匀并防止回火。在预混气喷口外侧,增加了 氮气通道,稳定均匀的氮气流可以减少外界气流对层 流火焰的扰动,提高火焰稳定性。由于层流火焰稳定性 较差,很弱的横向气流足以使火焰产生抖动乃至熄灭,



图 2 试验系统示意图

因此将燃烧装置安装在一个相对封闭的挡风罩内。整 个燃烧装置、滞止平板及防风罩安装在三维支架上,便 于测量速度的空间分布。平板与喷口之间的距离可在 10 mm~ 25 mm 范围内调整,空气和甲烷流量可独立 调整,通过改变混气总流量,甲烷和空气比例,平板与 喷口间距离,可获得不同拉伸率,不同燃空比的火焰。

由于层流火焰的厚度在 1 mm 左右, 燃烧主要在 这个区域内完成, 温度和体积变化剧烈, 气流的轻微波 动将直接影响火焰面的空间位置, 使得火焰面附近的 测量难以进行, 因此在燃气和空气管路中增加了阻尼 器件, 克服了气流中的高频波动, 但在气流中仍存在周 期为几m in 的低频波动, 通过试验数据采集时间的合 理安排和对系统的人为调整, 降低低频波动的影响。

试验采用纯度 99 99% 的甲烷为燃料, 与压缩空 气混合进行燃烧, 燃气, 空气和氮气的流量通过浮子流 量计测量; 利用二维激光多普勒测速系统测量流动区 域内的速度分布, 多普勒频移信号采用后向接收; 示踪 粒子采用耐高温的氧化铝粉, 由于火焰面处存在速度 突变, 因此需要跟随性很好的示踪粒子, 经试验选取粒 径 10 µm 左右的粒子, 通过给粉装置送到预混气中。

2 流量测量的误差分析与流量计标定

试验时,选用 2 5 级精度的空气流量计,4 级精度 的甲烷流量计,由于流量计刻度的误差,得到的一系列 同一空燃比的试验结果,其实属于不同的空燃比,因此 拉伸率 *a* 和火焰波前速度 *u_f* 线性度非常低,试验结果 不理想。因此正式试验前首先进行流量计修正。

生产厂家在刻度和标定流量计时,假设了浮子的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

阻力系数关于雷诺数 *R e* 是自模化的^[4], 即在标定和使用时, 浮子的阻力有

$$\frac{\zeta O_0^2}{2E_0} = \frac{\zeta O_1^2}{2E_1} \tag{2}$$

式中: ζ 为阻力系数; Q 为流量; F 为浮子的阻力; 下标 0 为标定时参数, 下标 1 为实际应用时的参数。

在同一刻度下有 $F_{0}=F_{1}$, 在雷诺数自模化的假设下, 阻力系数 ζ与雷诺数无关, 则有

$$\rho_0 Q_0^2 = \rho_1 Q_1^2 \tag{3}$$

因此, 在标定气体和使用气体的密度一致及雷诺 数较大(大于1000)条件下, 可以保证作用时的流量 和标定时一致, 而不必考虑标定工质的成分。本试验的 燃气流量和空气流量很小, 其雷诺数较小, 达不到自模 化, 因此只有标定条件和使用条件相同时才有意义。生 产厂家在标定甲烷流量计时, 是用氢气(或氦气)与氮 气按照甲烷的密度配制的, 它的粘性与甲烷有一定的 差别, 因而在相同流量下, 雷诺数是不同的, 浮子所在 的刻度位置也不相同, 而且厂家只对主刻度进行了标 定, 分刻度通过主刻度的均匀划分得到, 这些均造成甲 烷流量测量精度下降, 达不到标称的 4 级精度。

为提高流量测量的精度,建立了流量标定系统(图 3),将被标定的流量计和已知容积的垂直玻璃管串联, 标定时逐一选择流量计的不同流量 Q_0 ,记录肥皂泡通 过玻璃管两个刻度线之间的时间,可以求得流量计的 实际流量 Q_1 。分别对实验使用的两支空气流量计和两 支甲烷流量计进行了标定:空气流量计精度较高,与标 称精度一致,这是因为流量计出厂时标定所用的是空 气,实际使用时用刻度值加上标定获得的误差修正结 果,精度可以提高 0.5~1.0极。图4是流量较小的一



7

支甲烷流量计的标定结果, 横轴为流量计刻度, 纵轴为 实际流量与刻度流量之比, 可见甲烷流量计的误差相 当大, 在有些刻度处误差可达 100%, 一般也高达 20%, 主刻度处(50, 100, 150)的误差相对较小。实际使 用中用刻度值加上标定获得的误差修正结果, 则甲烷 流量计与空气流量计有相同精度等级。



图 4 甲烷流量计误差

通过对空气和甲烷流量计的标定,提高了刻度线 (包括主刻度线和分刻度线)处的流量测量精度。但由 于雷诺数较小,分刻度线之间的流量并非线性分布,因 此采用差值得到的流量精度较差。

3 试验结果与分析

在相同空燃比下,不同的流量将产生两种火焰形状:稳定的甲烷-空气预混火焰一般为圆形,边缘比较清晰(图 5),火焰面靠近喷口产生图 6 所示的帽型火焰,其顶部仍是局部的平面火焰,增加喷口周围保护氮气的流量,帽型火焰变为一般的平面火焰。



图 5 平面火焰

测量中,对每一几何位置采样 500次,截去信噪比较小的多普勒信号,再进行统计,在该点的相对脉动速度 *u* ¹/*u* 为 1.4%,数据有一定的分散度,主要是由于示踪粒子粒径的分散性,使其跟随性不同,进而使速度分散。



图 6 帽型火焰

图 7 给出了贫燃料时火焰前后的速度分布, 测点 之间的间隔 0.2 mm, y 轴与气流轴线重合, 方向与气 流方向相反,原点位于平板的滞止点。从图可见,火焰 峰面上游的速度是线性分布,其梯度为流动的拉伸率, 火焰峰的速度为最小速度 uf: 火焰峰面上游的速度是 衰减的,这与无燃烧的层流射流从喷口喷出后逐渐衰 减的特性一致;火焰峰面厚度约1~2mm,大部分燃 烧过程在 0 5~ 1 0 mm 内完成, 在这个范围内, 温度 陡升, 气流迅速膨胀, 使气流速度发生突变; 经过火焰 峰面后, 燃烧化学反应继续进行, 气流速度略有上升; 再向下游, 气流速度由上升变为衰减, 燃烧基本完成, 由于固体壁面的存在使高温气体流在轴向滞止,而在 径向发散。图 8 是相应的脉动速度值,在火焰峰面上 游,脉动速度较小,而在火焰峰面下游的脉动速度增 加,火焰峰面后的脉动增长不仅有气流本身的原因,也 存在不同尺寸示踪粒子跟随性不同而导致的测量结果 的分散性,在整个区域内脉动速度不大,特别是在火焰 峰面前,相对脉动速度小于1%,是层流火焰。以上结 果与文献[1,2]中的实验和计算结果基本一致。



图 7 贫燃料时轴向速度的典型分布

改变滞止平板与喷口间距离,或按比例改变空气 和甲烷的流量,可得同一空燃比下不同拉伸率的当地 传播速度 *u_f*。图9给出空燃比1.2时不同拉伸率α的 当地传播速度 *u_f*,对数据线性拟合后外推到拉伸率等 于零处,得理想火焰传播速度 $S_{1}=0$ 352 m/s,线性拟 合的相关系数为 r=0 95,相关系数偏低的原因主要 是试验点较少。给出的理想火焰传播速度与文献中的 试验和计算结果相比,数量级符合但绝对值偏大。



5 结 论

本文建立了层流预混滞止火焰的试验装置,并得 到稳定的层流预混滞止火焰。通过改变滞止平板与喷 口间的距离,或按比例改变空气和甲烷的流量,得到特 定燃空比下理想火焰传播速度。在试验范围内,验证了 层流滞止火焰是获得理想火焰传播速度的重要实验方 法,并指出欲提高实验精度,应配置高精度流量测量仪 表,提高刻度间的流量测量精度;提高试验系统的稳定 性,克服流量的低频波动,保证稳定的气源。

参考文献:

- W u C K, Law C K. Twentith Symposium (International) on Combustion, 1984, 1941.
- [2] Egofopoulos F N, Zhu D L, Law C K. Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, 1990 471.
- [3] Giovangigli V, Smook M D. Combustion Sci and Tech, 1987, 53:23.
- [4] 川田裕郎,小宫勤一,山崎弘郎 流量测量手册[M].北京:中国计 量出版社,1982

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net