

## 氢/空气预混平面火焰 CARS 温度测量\*

杨仕润 赵建荣 俞刚 韩百

(中国科学院力学研究所高温气体动力学开放实验室, 北京, 100080)

**摘要:** 介绍了一套用于燃烧研究中对温度和成分浓度测量进行校准的氢/空气预混平面火焰燃烧系统。采用氮 CARS 技术对氢/空气预混平面火焰温度进行了系统的测量, 包括不同当量比条件下的温度分布, 温度的纵向和横向空间分布。结果表明, 氮 CARS 测温与氢/空气预混平面火焰的理论计算温度之间的误差为 3.4%, 而在燃烧炉表面上方 1mm 以上的空间属于火焰的温度均匀区, 温度的不均匀性约为 1.8%。

**关键词:** CARS 预混平面火焰 温度测量

## CARS temperature measurement of H<sub>2</sub>/air premixed flat flame

Yang Shirun, Zhao Jianrong, Yu Gong, Han Bai

(Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

**Abstract:** A H<sub>2</sub>/air premixed flat flame burner as calibration source for CARS temperature and species concentration measurements was established. Temperatures for various stoichiometries along longitude and transverse have been systematically measured by N<sub>2</sub> CARS. The results indicate that difference between measurement temperature and the corresponding theoretical value is about 3.4 percent. Whereas temperature is nearly invariant beyond 1 mm above the burner surface, the associated error is around 1.8 percent.

**Key words:** CARS premixed flat flame temperature measurement

## 引 言

预混平面火焰是一种稳定的且具有一维特征的标准火焰。平面火焰燃烧炉因为具有火焰温度和燃烧成分浓度的时间和空间均匀性, 使其常被用作燃烧研究中温度和成分浓度测量技术的校准源<sup>[1~3]</sup>, 而且, 对于氢和空气预混燃烧, 可以采用较宽范围的混合当量比变化, 从而获得较宽范围的温度和燃烧成分浓度的变化。

\* 国家自然科学基金资助。

- 14 Ruhl E, Heinzel C, Jochims H W. Chem Phys Lett, 1993; 211: 403  
15 Yongpeng Z, Qi W, Shaohong G *et al.* SPIE, 1998; 3549: 221  
16 Cachoncinlle C, Pouvesle J M, Durand G *et al.* J Chem Phys, 1992; 96(8): 6093  
17 Cachoncinlle C, Pouvesle J M, Durand G *et al.* J Chem Phys, 1992; 96(8): 6085  
18 Boichenko A M, Derzhiev V I, Zhilkov A G *et al.* Soviet J Q E, 1991; 21(12): 1305

作者简介: 王 琪, 男, 1942 年 3 月出生。教授, 博导。主要从事 VUV 及 X 光激光方面的研究工作。

为了对 CARS 温度和成分浓度测量技术进行校准, 我们建立了一套  $H_2/air$  预混平面火焰系统和 CARS 测量系统<sup>[4]</sup>, 并采用美国圣地亚国家实验室(Sandia National Laboratories)的 Kee R J 等开发的 PREMIX<sup>[5]</sup>和 EQUIL<sup>[6]</sup>程序对  $H_2/air$  预混平面火焰进行了理论计算, 其中, 前者用于一维模拟计算, 而后者是基于局部热力学平衡假设, 用于计算火焰的绝热燃烧温度, 或在已知当地温度的条件下, 用于计算火焰中各燃烧成分(包括反应物、生成物和中间产物)的浓度。在实验上, 首先对控制氢气流和空气流流量的拉伐尔临界喷管流量计进行了校准, 然后用氮的 Q 支 CARS 光谱测量了火焰的纵向温度分布, 并与理论计算的结果进行了比较。最后, 采用氮 CARS 对燃烧炉火焰温度空间均匀性和火焰温度随当量比的变化进行了测量。

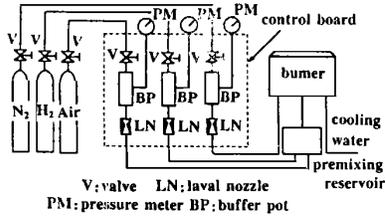


Fig. 1 Experimental setup of  $H_2/air$  the premixed flat flame burner

## 1 实验装置

### 1.1 $H_2/air$ 预混平面火焰燃烧实验气路

$H_2/air$  预混平面火焰燃烧实验的气路安排如图 1 所示。实验用气体氮、空气和氢气分别由高压气瓶提供。高压气瓶出口的气体采用普通的减压器减压, 再通过具有良好的稳定性和调压精度的精密减压阀 (PR2-2A11A3J11-SAN DIMAS, CA USA, 量程 0~

250psi 或 0~ 1.7MPa) 减压进入拉伐尔喷管临界流量计的前室缓冲罐 BP, 前室压力表采用了精度为 0.4、量程 0~ 1.6MPa 的精密压力表。流经拉伐尔喷管的空气和氢气在预混池 (premixing reservoir) 中混合, 然后进入燃烧炉的腔体。

### 1.2 $H_2/air$ 预混平面火焰燃烧炉

$H_2/air$  预混平面火焰燃烧炉的剖面结构如图 2 所示。外径 100mm, 高 50mm 的主体由黄铜制成, 直径 50mm 的多孔板由直径 20 $\mu$ m 的青铜粉末材料烧结而成。氢和空气预混后进入燃烧炉腔体, 腔体中填满直径  $f$ 3mm 的玻璃球以均匀混合气流, 盘绕在多孔板中的内径  $f$ 3mm 的冷却水管用于冷却多孔板以稳定火焰面, 多孔板外圈的同轴氮气流用于保护火焰免受外部环境的气流影响, 稳定火焰。氢气和空气的流量由拉伐尔音速喷管临界流量计控制, 拉伐尔喷管临界流量计经过了严格的实验校准, 以保证燃料当量比的准确。

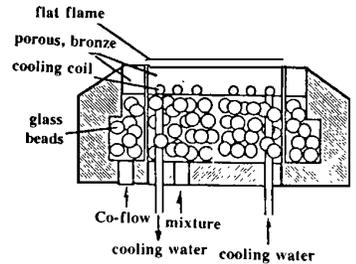


Fig. 2 Sectional view of the flat flame burner

## 2 结果与讨论

### 2.1 $H_2/air$ 平面预混火焰的热力学计算

对  $H_2/air$  预混平面火焰, 我们用 PREMIX 程序计算了当量比  $\Phi=0.5$  和  $\Phi=2.0$  两种情况下, 火焰的温度和主要成分氢、氧和水的摩尔浓度的纵向分布, 并根据所得的温度值和局部热力学平衡假定, 用 EQUIL 程序计算了相应的主要成分氢、氧和水的摩尔浓度。从当量比  $\Phi=0.5$  (图 3) 和  $\Phi=2.0$  (图 4) 两种情况下的计算结果可以看出, 在距燃烧炉表面 1mm 以上的位置, 一维模拟计算和局部热力学平衡计算的结果一致, 并且火焰的温度和主成分的摩尔浓度基本保持不变, 即使在富氢 ( $\Phi=2.0$ ) 的情况下, 两者之间的最大误差也仅有 3%。

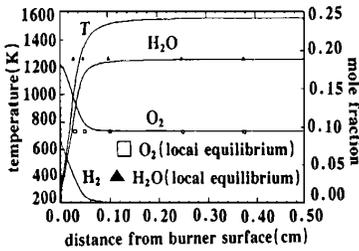


Fig. 3 Comparison of detailed calculation and approximation based on local equilibrium, for a  $H_2/air$  premixed flat flame of equivalence ratio  $\Phi= 0.50$  and mass flux =  $0.033g/cm^2 \cdot s$

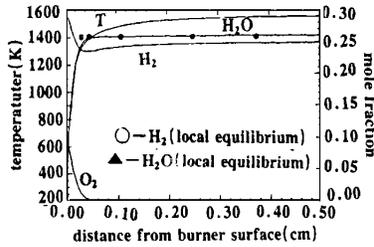


Fig. 4 Comparison of detailed calculation and approximation based on local equilibrium, for a  $H_2/air$  premixed flat flame of equivalence ratio  $\Phi= 2.0$  and mass flux=  $0.060g/cm^2 \cdot s$

### 2.2 氮 CARS 测温校准

为了检验氮的 CARS 光谱测量温度的准确性,我们在  $H_2/air$  预混平面火焰燃烧炉上进行了校准实验,即在燃烧炉表面上方沿中心线流动方向,用氮 CARS 测量了温度的分布,并与  $H_2/air$  预混平面火焰一维模拟理论计算的结果进行了比较。CARS 测量系统与参考文献[7]相同。实验条件为:  $H_2/air$  预混当量比  $\Phi= 1.0$ ,总质量流量=  $0.044(g/cm^2 \cdot s)$ 。结果表明(见图 5),氮 CARS 测量的温度与理论计算的温度一致,两者之间的误差仅为 3.4%,即  $\pm 59K$ 。而在燃烧炉表面上方 1mm 以上的位置所测量的温

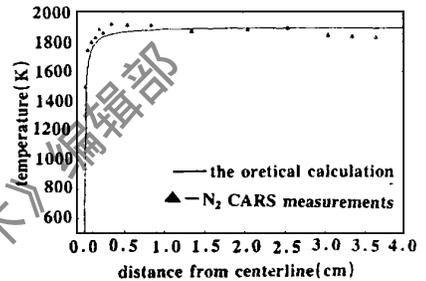


Fig. 5 Comparison of calculated and  $N_2$  CARS temperature measurements, for a  $H_2/air$  premixed flat flame of equivalence ratio  $\Phi= 1.0$  and mass flux=  $0.044g/cm^2 \cdot s$

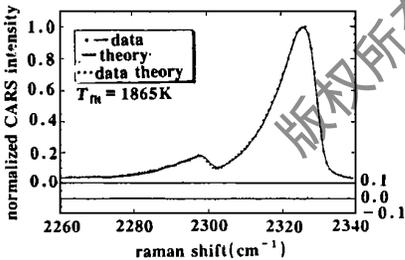


Fig. 6 Comparison of theoretical and experimental  $N_2$  CARS spectra

度的平均值为 1857K,不均匀性为 1.3%,即  $\pm 24K$ 。图 6 为实验测量的氮 Q 支 CARS 光谱及其与理论光谱的拟合结果,拟合温度由理论光谱所确定,拟合误差小于 5%。

### 2.3 H2/air 预混平面火焰温度均匀性校准

$H_2/air$  预混平面火焰理论计算

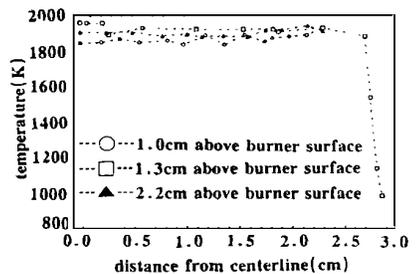


Fig. 7 Temperature profiles measured by  $N_2$  CARS at different height of burner surface, for a  $H_2/air$  premixed flat flame of equivalence ratio  $\Phi= 1.0$  and mass flux=  $0.044g/cm^2 \cdot s$

的结果(图 3~ 图 5)指出,在距燃烧炉表面 1mm 以上的位置,火焰的温度基本保持不变,而且理论计算采用了一维模型,即认为在垂直于流动方向的平面内,温度保持不变。为了检验  $H_2/air$  预混平面火焰温度的这种空间均匀性,我们在  $H_2/air$  预混平面火焰燃烧炉上进行了氮的 CARS 光谱温度测量实验。分别在燃烧炉表面上方 1cm, 1.3cm 和 2.2cm 的位置,沿垂直于流动方向,用氮 CARS 测量了温度的横向分布。测量结果表明(见图 7), $H_2/air$

预混平面火焰温度的空间均匀性很好,在燃烧炉表面上方3个位置测量的横向分布温度一致,平均温度为1893K,温度不均匀性仅为1.8%,即±34K。而燃烧炉表面上方1.3cm处的横向温度分布结果表明,火焰区的均匀区延伸到了约2.7cm的外沿。

#### 2.4 H<sub>2</sub>/air 预混平面火焰温度随当量比的变化

我们采用EQUIL程序对H<sub>2</sub>/air预混平面火焰的绝热温度随当量比的变化进行了理论计算,并用氮的Q支CARS光谱对实际的燃烧温度随当量比的变化进行了测量(图8)。在实验中,对于每一温度剖面的测量,通过同时改变氢和空气的流量来改变当量比,而保持氢和空气的总体积流量不变。氮CARS测量温度与火焰的绝热温度之间的差异表明水冷却的燃烧炉盘有大量的热损失,并且随着氢和空气总流量的增加,在相同的当量比条件下,热损失减小,温度增加。因此,不仅改变当量比可以改变火焰的温度,而且改变氢和空气的总流量也可以改变火焰的温度,从而为温度的校准提供了更宽的温度范围。

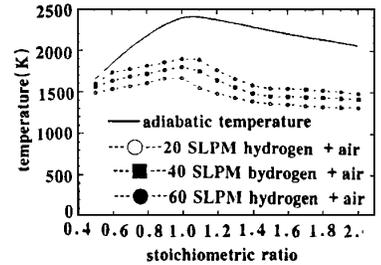


Fig. 8 Temperature profiles as a function of stoichiometric ratio for different flow rates.

### 3 结 论

H<sub>2</sub>/air预混平面火焰燃烧系统以其众多的优点为燃烧研究中各种温度和成分浓度测量技术的实验校准提供了重要的工具:(1)燃烧系统的操作简单、安全,并具有很好的重复性。(2)燃烧火焰具有良好的时间稳定性和较宽的空间均匀性。(3)通过改变氢和空气的混合当量比或总体积流量,可以获得较宽的校准温度和成分浓度的变化范围。

我们的工作得到了课题组钱大兴高级工程师、李英高级技师,以及美国普林斯顿大学机械与航空工程系宋知仁博士的合作和帮助,在此表示谢意。

#### 参 考 文 献

- 1 Antcliff R R, Jr Jarrett O. Rev Scient Instrum, 1987; 58(11): 2075~ 2080
- 2 Prucker S, Meier W, Stricker W. Rev Scient Instrum, 1994; 65(9): 2908~ 2911
- 3 Zhao J R, Yang S R, Li J G *et al.* AIAA paper No. 97-0122, 1997
- 4 Hancock R D, Bertagnolli K E, Lucht R P. Combustion and Flame, 1997; 109: 323~ 331
- 5 Kee R J, Grcar J F, Smooke M D *et al.* A FORTRAN Program for Modeling Steady Laminar One Dimensional Premixed Flames. Sandia Report SAND85-8240, 1985
- 6 Kee R J, Lutz A C, Rupley F M. A FORTRAN Program for Calculating Chemical Equilibrium Using a Modified Solution Procedure of STANJAN, 1992
- 7 赵建荣,李春金,杨仕润. 激光技术, 1997; 21(4): 218~ 222

作者简介: 杨仕润,男,1996年4月出生。博士。主要从事激光诱导光谱研究。

收稿日期: 1999-03-28